



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Ottimizzazione della strumentazione di monitoraggio neutronico del nocciolo di un reattore LFR

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Corso di Dottorato “Energia e Ambiente”

Luigi Lepore

matricola 1348105

Relatore

Romolo Remetti

A/A 2015-2016

Abstract

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo lo studio di scelta ed ottimizzazione della strumentazione neutronica per il monitoraggio di flussi neutronici da reattori veloci, con particolare attenzione verso i *Lead Fast Reactor*, in ambienti ostili per la tecnologia, in cui i fattori limitanti per i rivelatori risultano essere l'alta temperatura (mediamente $400 \div 500^\circ\text{C}$) ed un alto rateo di dose gamma.

Partendo dalla strumentazione neutronica commercialmente disponibile, si sono proposti miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l'efficacia e l'adeguatezza del sistema di strumentazione, monitoraggio e controllo di reattore. Un tale lavoro deve necessariamente affiancare la fase di progetto del reattore stesso cosicché la strumentazione prevista possa essere efficacemente integrata con le soluzioni progettuali concernenti il disegno neutronico e termoidraulico.

L'identificazione di modelli innovativi per la strumentazione neutronica specializzata per reattori LFR, piuttosto recenti se confrontati con i fratelli maggiori *Sodium Fast Reactor*, richiede che sia ben identificato il tipo di ambiente in cui le sonde andranno ad operare. Non essendo presente, al momento, una sufficiente quantità di dati sperimentali in grado di fornire indicazioni precise riguardo il campo di radiazione o la strumentazione da impiegare in tali reattori, l'approccio più efficace e conveniente -almeno in fase preliminare- per colmare tali lacune è la simulazione mediante codici di calcolo. Focalizzandosi questo lavoro sull'aspetto del monitoraggio neutronico, saranno assunte le condizioni chimiche e termo-idrauliche dell'ambiente reattore, mentre saranno estensivamente studiati gli aspetti nucleari mediante il codice Monte Carlo di trasporto di radiazione *MCNPX ver.2.7.0*.

Come reattore di riferimento è stato scelto il prototipo LFR dimostrativo nel panorama europeo, ALFRED, del quale si è simulato, tramite *MCNPX*, il pressure vessel e tutte le strutture interne a un elevato livello di dettaglio, al fine di ricavare il termine sorgente per la strumentazione, ovvero il flusso neutronico per le posizioni di reattore che possono verosimilmente alloggiare la strumentazione.

Si sono dapprima valutate le prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile, illustrandone criticamente le potenzialità e le problematiche d'impiego al caso in esame. Successivamente, sono stati proposti sviluppi e miglioramenti alle tecnologie in uso, con l'obiettivo di delineare modifiche potenzialmente attuabili al fine di ottimizzare la strumentazione per ambienti tipo LFR, prospettando così la possibilità di sviluppare e costruire rivelatori *ad hoc*, sia per il monitoraggio *in-core* che *out-of-core*, con possibilità di test in impianti sperimentali in grado di fornire spettri neutronici veloci.

Il primo passo dello studio è consistito nell'analisi della strumentazione correntemente utilizzata per SFR, valutandone prestazioni e caratteristiche quando trasposta al reattore LFR ALFRED. Diversi modelli di *camere a fissione* ed *Self-Powered Neutron Detectors*, *SPND*, resistenti ad alte temperature sono stati analizzati dal punto di vista della risposta a diversi flussi neutronici, mostrandone limiti e criticità.

La strumentazione commercialmente disponibile si è dimostrata applicabile, ma non completamente adeguata alle esigenze di monitoraggio del reattore studiato, evidenziando la necessità di studiare soluzioni progettuali innovative che siano corredate anche da esperienze sperimentali in flussi neutronici veloci. Per quanto concerne l'avviamento del reattore e la fase transitoria di salita in potenza, la strumentazione raccomandata consiste in camere e microcamere a fissione, sufficientemente sensibili per monitorare le decadi di flusso neutronico competenti allo *start-up*

e all'*intermediate range* di reattore. Per quanto riguarda il livello di potenza nominale, gli alti ratei di flusso neutronico competenti al *power range* di ALFRED ($300 MW_{th}$), combinati con le elevate sensibilità delle camere a fissione, non consentono a tale strumentazione di poter operare oltre 6 ÷ 12 mesi; i rivelatori di tipo *prompt*-SPND si dimostrano essere più appropriati in termini di affidabilità e durabilità nel tempo, sebbene vadano verificate le loro prestazioni, vista l'esiguità dei segnali elettrici prodotti, in alcuni casi anche alla potenza nominale del reattore.

Un quadro verosimile della strumentazione applicabile al reattore ALFRED può riassumersi come segue:

start-up: quando il flusso neutronico risulta compreso tra $10^0 \div 10^6 n/(cm^2 s)$ ed il fondo γ di reattore è notevolmente intenso, solo le camere a fissione possono essere efficacemente utilizzate come strumentazione *in-core*, perché particolarmente sensibili al campo neutronico quando esercite in *pulse mode*;

intermediate range: quando il flusso neutronico risulta compreso tra $10^6 \div 10^{12} n/(cm^2 s)$, il fondo γ di reattore assume -generalmente- lo stesso ordine di grandezza del campo neutronico e le camere a fissione possono continuare ad essere efficacemente impiegate, tipicamente in *Mean Square Voltage mode*;

power range: quando il flusso neutronico è compreso tra $10^{12} \div 10^{15} n/(cm^2 s)$, il fondo γ di reattore può essere considerato trascurabile per le camere a fissione, che dovranno essere esercite in *current mode* data l'abbondanza delle interazioni neutroniche all'interno del volume sensibile. Il campo neutronico è qui troppo intenso perché le camere a fissione durino a lungo nel tempo, a causa della loro intrinsecamente alta sensibilità ai neutroni. Strumenti meno sensibili, gli SPND a risposta pronta, possono efficacemente prendere il posto delle camere a fissione come strumentazione *in-core* di monitoraggio e controllo del reattore.

Si è fornita una concettualizzazione delle innovazioni applicabili alla strumentazione in generale, con particolare riguardo ai SPND a risposta pronta (oggi poco sperimentati perché non utili nell'attuale panorama reattoristico che si serve dei loro "fratelli maggiori", i SPND-ritardati), delineando possibilità innovative per la misura di flussi neutronici corrispondenti alla potenza nominale di reattore. L'intrinsecamente bassa sensibilità della strumentazione SPND può difatti consentire una loro installazione fissa negli elementi di combustibile, essendo il loro rateo di *burn-up* sufficientemente basso da farli durare a lungo, anche se irraggiati con fluenze superiori a quelle limite per le camere a fissione di corrente uso.

Nell'ottica di sviluppare quest'ultimo tipo di tecnologia strumentale, si è validata la simulazione Monte Carlo *MCNPX* per strumentazione SPND in monitoraggio di flussi neutronici veloci attraverso prove già svolte nel reattore veloce TAPIRO del Centro Ricerche ENEA Casaccia nell'ambito di progetti di ricerca riguardanti la fusione nucleare, identificando -così- uno strumento di calcolo che consenta di poter ottimizzare e ri-progettare al computer tali rivelatori, migliorandone prestazioni, ottimizzandone caratteristiche e durata nel tempo.

Nuovi materiali sensibili per tale classe di strumenti sono stati analizzati, insieme con lo studio del *burn-up* a seguito d'irraggiamento e la verifica della loro risposta dinamica alle variazioni di flusso neutronico. Si è studiata una concettualizzazione di una sonda innovativa basata su SPND che consenta, oltre che le convenzionali misure di flusso neutronico integrato in energia, anche una valutazione delle caratteristiche spettrali dei neutroni, combinando misure da diversi SPND e risolvendo matematicamente un problema di *unfolding spettrale*.

La disponibilità del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può consentire lo studio sperimentale delle principali caratteristiche di prestazione degli strumenti detti, permettendo di acquisire una preziosa esperienza sul campo. Nel prossimo futuro, un SPND prototipo potrà esser costruito e testato, verificando sperimentalmente l'effettiva possibilità tecnica per tale strumentazione di monitorare flussi neutronici veloci.

Il presente lavoro di tesi è il risultato di una collaborazione triennale con il Centro Ricerche ENEA Casaccia, nei laboratori UT-FISST/MEPING prima e FSN/FISS/CRGR poi, ed è stato inquadrato nei Piani Annuali di Ricerca 2013, 2014 e 2015 dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico-ENEA.

Indice

Abstract	3
1 Introduzione	21
1.1 La questione energetica e il nucleare	22
1.2 I reattori GEN-IV della quarta generazione	27
1.3 La filiera dei reattori refrigerati al piombo	29
1.3.1 Evoluzione storica dei reattori refrigerati al piombo	31
1.3.2 Stato dell'arte della tecnologia LFR	34
1.3.2.1 Caratteristiche neutroniche generali di un progetto LFR	34
1.3.2.2 Aspetti peculiari di un progetto LFR	37
1.3.2.3 Criteri ed obiettivi di sicurezza	38
1.3.3 Problematiche attualmente in ricerca e sviluppo	40
1.4 Strumenti utilizzati nello studio	41
1.4.1 Il codice di trasporto Monte Carlo MCNPX	41
1.4.1.1 Il metodo Monte Carlo	42
1.4.1.2 La specifica delle geometrie e dei materiali	43
1.4.1.3 La specifica di sorgente e la <i>kcode</i>	44
1.4.1.4 L'output di MCNP: la tally	44
1.4.1.5 Migliorare la statistica: tecniche di riduzione della varianza	45
1.4.2 L'infrastruttura CRESCO di ENEA	47
1.5 Organigramma del lavoro svolto	49
2 Il termine sorgente: il reattore LFR dimostrativo ALFRED	53
2.1 ALFRED: Advanced Lead Fast REactor Demonstrator	53
2.1.1 Elementi della progettazione del nocciolo	56
2.1.2 Ciclo termico secondario	57
2.1.3 Il Decay Heat Removal system	58
2.1.4 Strutture meccaniche	60
2.2 Il modello MCNPX del reattore ALFRED	62
2.2.1 Posizioni indagate per l'installazione della strumentazione neutronica	66
2.2.2 Spettri neutronici calcolati nelle posizioni d'interesse	70
2.2.3 Spettri gamma calcolati nelle posizioni d'interesse	77
3 Analisi di sonde neutroniche commerciali per installazioni in ambienti ad alta temperatura	79
3.1 Strumentazione di monitoraggio neutronico adeguata per applicazioni LFR	79
3.1.1 Camere a fissione	81
3.1.2 Self Powered Neutron Detectors	83
3.2 Calcolo delle prestazioni della strumentazione applicabile nelle posizioni d'installazione identificate in ALFRED	85
3.2.1 Applicazione della metodologia di aggiornamento della sensitività neutronica a camere a fissione e SPND: FASE I	87

3.2.2	Selezione delle condizioni operative ottimali per le sonde analizzate: risultati della FASE I	94
3.2.3	Applicazione della metodologia di aggiornamento della sensitività neutronica a camere a fissione e SPND: FASE II	95
3.2.4	Selezione delle condizioni operative ottimali per le sonde analizzate: risultati della FASE II	110
3.2.5	Identificazione dei margini di ottimizzazione per le classi di rivelatori analizzate	111
3.2.5.1	Miglioramenti applicabili alle camere a fissione	111
3.2.5.2	Miglioramenti applicabili ai SPND	113
4	Studio di Self Powered Neutron Detectors a risposta pronta per installazioni in-core in reattori ad alta temperatura	117
4.1	Validazione del codice MCNPX ai fini della modellazione delle risposte da rivelatore SPND	118
4.1.1	Modello del rivelatore SPND Thermocoax standard	118
4.1.1.1	Simulazione del SPND Thermocoax Co-type irraggiato con neutroni termici	118
4.1.1.2	Simulazione del SPND Thermocoax Pt-type irraggiato con neutroni termici	122
4.1.1.3	Simulazione del SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni termici	122
4.2	MCNPX e l'esperienza d'irraggiamento di rivelatori SPND nel reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia	125
4.2.1	Il reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia	125
4.2.2	Concettualizzazione di test sperimentali nel reattore TAPIRO	126
4.2.3	Ricostruzione in MCNPX dell'esperienza d'irraggiamento di rivelatori SPND Thermocoax standard nel canale tangenziale del reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia	128
4.3	Studio delle risposte di rivelatori SPND-pronti, commercialmente disponibili, attraverso il codice MCNPX, in TAPIRO	132
4.3.1	Irraggiamenti effettuabili in TAPIRO	132
4.3.2	Studio di burn-up	136
4.3.2.1	Test su SPND al ^{59}Co	136
4.3.2.2	Test su SPND al ^{195}Pt	138
4.3.3	Studio della sensitività e della risposta dinamica	139
4.3.3.1	Test su SPND al ^{59}Co	140
4.3.3.2	Test su SPND al ^{195}Pt	143
4.4	Studio delle risposte di rivelatori SPND-pronti, alimentati con materiali innovativi, attraverso il codice MCNPX	145
4.4.1	Studio di burn-up	145
4.4.1.1	Test su SPND al ^{180}Hf	146
4.4.1.2	Test su SPND al ^{63}Cu	148
4.4.1.3	Test su SPND al ^{115}In	150
4.4.1.4	Test su SPND al ^{209}Bi	152
4.4.1.5	Test su SPND al ^{160}Gd	154
4.4.2	Studio della sensitività e della risposta dinamica	154
5	Proposta di sviluppo di una sonda basata su SPND-pronti per misure di magnitudo e spettro energetico di flussi neutronici veloci	157
5.1	Studio delle caratteristiche spettrali dei materiali sensibili per SPND-pronti identificati in questo studio	157
5.2	Idea concettuale di una sonda spettrometrica basata su SPND, mediante tecniche di <i>unfolding</i>	159

5.2.1	Basi teoriche della tecnica di unfolding dello spettro neutronico a partire da misure con SPND	160
5.2.2	Concettualizzazione della sonda	161
5.3	Applicazione della sonda proposta ai flussi neutronici e gamma nelle posizioni d'installazione identificate in ALFRED	165
6	Conclusioni	173
	Appendici	177
A	Input MCNPX del reattore ALFRED	179
B	Specifiche tecniche della strumentazione neutronica, attualmente disponibile, analizzata nello studio	243
C	Pubblicazioni basate sul lavoro svolto	255
C.1	<i>Fast neutron-flux monitoring instrumentation for Lead Fast Reactors: a preliminary study on fission chamber performances</i>	257
C.2	<i>Evaluation of the current fast neutron flux monitoring instrumentation applied to LFR demonstrator ALFRED: capabilities and limitations</i>	269
C.3	<i>On capabilities and limitations of current fast neutron-flux monitoring instrumentation for the demo LFR ALFRED</i>	281
	Bibliografia	293
	Ringraziamenti Istituzionali	295
	Ringraziamenti Personali	297
	Ringraziamenti Familiari	300

Elenco delle figure

1.1	Maggiori rotte commerciali dell'energia nel 2014: i flussi sono contabilizzati in milioni di tonnellate di petrolio equivalente. Dati dal <i>BP Statistical Review 2015</i> [1].	22
1.2	Consumo di energia primaria nel mondo, fino al 2014. I valori sono espressi in milioni di tonnellate di petrolio equivalente. Dati dal <i>BP Statistical Review 2015</i> [1].	23
1.3	Consumo di energia elettrica in Italia al 2014 ($\sim 311 TWh$), ripartito per fonte. Dati prelevati dal bilancio nazionale TERNA 2014 [2].	24
1.4	Variazione della pericolosità temporale dei rifiuti radioattivi a lunga vita nei casi di: non riprocessamento (smaltimento del combustibile tal quale), riprocessamento (stoccaggio dei flask vetrificati con attinidi minori e prodotti di fissione), trasmutazione del combustibile irraggiato (stoccaggio finale dei soli prodotti di fissione) [3].	26
1.5	Reattore RM-1: spaccato del reattore e vista in pianta nel nocciolo, con specifica delle posizioni degli elementi di controllo normale e di emergenza.	32
1.6	Reattore RM-1: spaccato delle barre di controllo normale e di emergenza, con riferimento alle sezioni specificate in Figura 1.5.	33
1.7	Evoluzione storica degli acciai ferritici/martensitici in uso nell'industria di potenza.	34
1.8	Sezioni d'urto di scattering elastico (destra) e cattura radiativa (sinistra) per gli isotopi naturali del piombo (ENDF/B-VII).	35
1.9	Schematizzazione dei flussi di massa per il combustibile di un reattore LFR adiabatico.	37
1.10	Schema della struttura di un file di input MCNP.	41
1.11	Rappresentazione schematica di una possibile storia di un neutrone incidente su un materiale fissionabile.	42
1.12	Distribuzione del sistema CRESCO sul territorio nazionale.	48
1.13	Struttura a blocchi ed interconnessioni del sistema CRESCO.	48
1.14	Organigramma del lavoro svolto.	50
2.1	Sezione verticale del reattore LFR Dimostrativo ALFRED: (01) elementi di combustibile; (02) inner vessel; (03) griglia di sostegno del nocciolo; (04) griglia superiore; (05) reactor vessel; (06) coperchio del reattore; (07) generatori di vapore; (08) sostegno meccanico del vessel; (09) pompe primarie; (10) piastra di copertura degli elementi di combustibile.	55
2.2	Struttura di un elemento di combustibile del reattore ALFRED.	57
2.3	Struttura di una barretta di combustibile del reattore ALFRED.	57
2.4	A sinistra: schema concettuale di uno dei generatori di vapore di ALFRED. Al centro e a destra: dettagli costruttivi di un tubo a baionetta.	59
2.5	Schema di concetto del sistema passivo di rimozione del calore di decadimento. <i>L'isolation condenser</i> è posto più in alto del generatore di vapore nella realtà impiantistica per garantire il trasferimento di calore per circolazione naturale.	59

2.6	I componenti strutturali fondamentali di ALFRED: tanca reattore (alto, a sinistra); coperchio reattore (alto, a destra); <i>Inner Vessel</i> (basso, a sinistra); blocco generatore di vapore-pompa primaria (basso, a destra).	61
2.7	Posizione delle Control Rods in configurazione critica nel modello del reattore ALFRED utilizzato in simulazione.	63
2.8	Sezione verticale del reattore LFR Dimostrativo ALFRED. Per esigenze di visualizzazione, i generatori di vapore non sono riportati.	64
2.9	ALFRED: sezione verticale degli elementi del reattore. A partire da sinistra, il combustibile, il riflettore, la barra di controllo, la barra di sicurezza. In basso a destra la mappa degli elementi nella vista in pianta del nocciolo.	65
2.10	Posizioni di reattore in cui si è calcolato lo spettro ed il flusso neutronico per mezzo di MCNPX. L'elemento #1 corrisponde al centro del reattore.	66
2.11	Spaccato del reattore Super-Phénix 2. In evidenza i canali per l'introduzione della strumentazione <i>in-core</i>	67
2.12	Configurazione sperimentale della traversa radiale di misura del reattore SPX2: in rosso i diversi canali di introduzione delle sonde.	67
2.13	Nuovo posizionamento, rispetto al precedente (cfr. Figura 2.10), delle tally spettrometriche nel nocciolo del reattore ALFRED.	69
2.14	Profili di flusso neutronico nelle traverse analizzate, in corrispondenza della potenza nominale di $300 MW_{th}$	71
2.15	Spettri neutronici nelle posizioni N1, N2, N3, N4 della traversa radiale sul piano dei <i>noses</i>	74
2.16	Spettri neutronici nelle posizioni C1, C2, C3, C4 della traversa assiale in corrispondenza dell'elemento di combustibile centrale.	75
2.17	Spettri neutronici nelle posizioni R1, R2, R3, R4 della traversa assiale in corrispondenza dell'elemento riflettore affacciato al nocciolo.	76
3.1	Spettro termico di <i>Maxwell-Boltzmann</i> , utilizzato per la stima del fattore di correzione nella equazione 3.4.	87
3.2	Sensibilità, in <i>current mode</i> , corrette per le camere a fissione e i SPND riportati in Tabella 3.1 e Tabella 3.3, nelle posizioni " <i>core-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.4-3.5. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.	89
3.3	Sensibilità, in <i>current mode</i> , corrette per le camere a fissione e i SPND riportati in Tabella 3.1 e Tabella 3.3, nelle posizioni " <i>nose-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.4-3.5.	89
3.4	Risposta, in <i>current mode</i> della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> nelle posizioni " <i>core-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.	90
3.5	Risposta, in <i>current mode</i> della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> nelle posizioni " <i>nose-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.	90
3.6	Tempo di durata della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> nelle posizioni " <i>core-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.7. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.	91

3.7	Tempo di durata della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> nelle posizioni " <i>nose-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.7. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.	91
3.8	Risposta, in <i>current mode</i> della SPND <i>KWD 5503-Co-210</i> nelle posizioni " <i>core-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.	92
3.9	Risposta, in <i>current mode</i> della SPND <i>KWD 5503-Co-210</i> nelle posizioni " <i>nose-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.	92
3.10	Burn-up del SPND <i>KWD 5503-Co-210</i> nelle posizioni " <i>core-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.8. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.	93
3.11	Burn-up del SPND <i>KWD 5503-Co-210</i> nelle posizioni " <i>nose-plane</i> " di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.8. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.	93
3.12	Sensitività della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> in <i>pulse mode</i> nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.	96
3.13	Sensitività della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> in <i>MSV mode</i> nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.	97
3.14	Sensitività della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> in <i>current mode</i> nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.	98
3.15	Sensitività del SPND <i>Thermocoax Co-type</i> in <i>current mode</i> nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.	99
3.16	Sensitività del SPND <i>Thermocoax Pt-type</i> in <i>current mode</i> nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.	100
3.17	Risposta, in <i>current mode</i> della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo le equazioni 3.5-3.6.	103
3.18	Tempo di durata della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo l'equazione 3.7.	104
3.19	Risposta, in <i>current mode</i> del SPND <i>Thermocoax Co-type</i> nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo le equazioni 3.5-3.6.	106
3.20	Risposta, in <i>current mode</i> del SPND <i>Thermocoax Pt-type</i> nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo le equazioni 3.5-3.6.	107
3.21	Burn-up del SPND <i>Thermocoax Co-type</i> nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo l'equazione 3.8.	108
3.22	Burn-up del SPND <i>Thermocoax Pt-type</i> nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo l'equazione 3.8.	109
3.23	Alimentazione di una camera a fissione attraverso un cavo coassiale ad elettrodo interno cavo. Il canale interno all'anodo consente di estrarre il gas dalla camera per effettuarne una purificazione, riducendo il suo contenuto in prodotti di fissione. Inoltre, esso potrebbe essere utilizzato per modificare la pressione di esercizio del gas di riempimento, ottimizzandola opportunamente a seconda della modalità di funzionamento.	113

3.24	Cavo coassiale per radiofrequenze ad elettrodo centrale cavo, commercialmente disponibile.	113
3.25	Struttura della sonda <i>in-core</i> proposta, costituita da 8 SPND <i>ARi-Co-type</i> disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante misura assoluta per attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in [mm].	114
3.26	Struttura della sonda <i>out-of-core</i> proposta, costituita da 5 SPND <i>KWD 5503-Co-210</i> disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante misure assolute per attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in [mm].	115
3.27	Possibili configurazioni innovative per SPND: in rosso sono riportati gli elementi sensibili, in blu l'isolante elettrico e in grigio i materiali strutturali; al centro il canale per la misura di attivazione. Tutte le dimensioni sono in [mm].	116
4.1	Disegno concettuale e sezione del rivelatore SPND <i>Thermocoax standard</i> , come fornito dalla casa costruttrice. Dimensioni in [mm].	119
4.2	Sezioni, specifiche del modello e vista 3D del SPND <i>Thermocoax standard</i> ricostruito in MCNPX.	120
4.3	Il reattore TAPIRO di ENEA Casaccia.	126
4.4	A sinistra: vista in pianta del reattore TAPIRO in corrispondenza del piano mediano di nocciolo. A destra: sezione verticale del reattore sull'asse della canale radiale 1/colonna termica.	127
4.5	Caratteristiche del flusso neutronico di TAPIRO nelle diverse posizioni sperimentali.	129
4.6	Vista in pianta del piano mediano del reattore TAPIRO. In evidenza i canali più promettenti per le campagne sperimentali potenzialmente attuabili.	130
4.7	Geometria del canale tangenziale utilizzato per testare i SPND <i>Thermocoax</i> in TAPIRO.	131
4.8	Spettro del flusso neutronico nella posizione sperimentale del canale tangenziale di TAPIRO, misurato per attivazione neutronica e deconvoluzione mediante tecniche di <i>unfolding</i>	131
4.9	Risultati sperimentali d'irraggiamento del SPND <i>Thermocoax Rh-type</i> in TAPIRO.	131
4.10	Screenshot dal modello MCNPX del reattore TAPIRO. A sinistra, la visualizzazione integrale del reattore, in spaccato longitudinale e 3D. A destra, vista in pianta e 3D del nocciolo, con il canale diametrale passante e la sonda in prova (stiletto azzurro).	134
4.11	Spettro neutronico in corrispondenza del canale diametrale del reattore TAPIRO.	135
4.12	Spettro fotonico in corrispondenza del canale diametrale del reattore TAPIRO.	135
4.13	Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND alimentato con ^{59}Co . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione dell'isotopo originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile.	137
4.14	Risposta dinamica del SPND <i>Thermocoax Co-type</i> all'interno del canale diametrale di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda "vergine", ovvero attività iniziale di ^{60}Co nulla.	141
4.15	Risposta dinamica del SPND <i>Thermocoax Co-type</i> all'interno del canale diametrale di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda già irraggiata, con attività iniziale di ^{60}Co pari a $10 MBq$ (attività che si raggiungerebbe dopo cinque mesi di irraggiamento continuo a piena potenza in TAPIRO).	142
4.16	Risposta dinamica del SPND <i>Thermocoax Pt-type</i> alimentato con ^{190}Pt (platino in composizione isotopica naturale) all'interno del canale diametrale di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda "vergine".	144

4.17	Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{209}Bi . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile. Inoltre, l'unico isotopo maggiormente significativo è il ^{181}Ta , che risulta stabile.	147
4.18	Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{63}Cu . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è il ^{64}Ni , che risulta stabile.	149
4.19	Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{115}In . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è lo ^{116}Sn , diretto prodotto di attivazione del ^{115}In , che risulta stabile.	151
4.20	Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{209}Bi . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è lo ^{206}Pb , principale prodotto della catena di decadimento del ^{210}Bi prodotto per attivazione del ^{209}Bi , che risulta stabile.	153
4.21	Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{209}Bi . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è il ^{159}Tb , derivante dal principale prodotto di attivazione ^{159}Gd	155
5.1	Sensibilità spettrali delle sonde SPND secondo il modello geometrico esplicitato nel paragrafo 4.1.1, alimentate con i diversi materiali sensibili analizzati nel corso di questo studio.	159
5.2	Struttura della sonda spettrometrica, montante 7 SPND aventi materiali sensibili diversi, disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante misura assoluta per attivazione neutronica di opportuno materiale. Come geometria di riferimento si è assunta la struttura standard degli SPND <i>Thermocoax</i> esplicitata nel paragrafo 4.1.1. Tutte le dimensioni sono in $[mm]$	163
5.3	Risultati dell'algoritmo di <i>unfolding</i> realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.1, nelle condizioni specificate nel paragrafo 4.3.1. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di <i>unfolding</i> di spettro realizzato in MatLab.	164
5.4	Risultati dell'algoritmo di <i>unfolding</i> realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.2 concernenti la posizione d'installazione C2 (Figura 2.13) del reattore ALFRED. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di <i>unfolding</i> di spettro realizzato in MatLab.	167

- 5.5 Risultati dell'algoritmo di *unfolding* realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.3 concernenti la posizione d'installazione R1 (Figura 2.13) del reattore ALFRED. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di *unfolding* di spettro realizzato in MatLab. 169
- 5.6 Risultati dell'algoritmo di *unfolding* realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.4 concernenti la posizione d'installazione N4 (Figura 2.13) del reattore ALFRED. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di *unfolding* di spettro realizzato in MatLab. 171

Elenco delle tabelle

1.1	Aspetti positivi e negativi degli <i>Heavy Liquid Metal Coolants</i> nei confronti del sodio refrigerante [6].	30
1.2	Principali caratteristiche fisiche di sodio e metalli liquidi pesanti (@ 480°C, ove non diversamente specificato), utilizzati come refrigeranti per reattori veloci.	31
1.3	Proprietà fisiche del carburo di boro [12], assorbitore neutronico di riferimento per reattori veloci.	36
1.4	Descrizione delle tally più comunemente utilizzate in MCNPX ver.2.7.0. Il <i><particle designator></i> è la lettera con cui MCNP identifica la particella seguita nella tally; <i>nps</i> è il numero totale di storie lanciate nel calcolo, secondo cui il risultato della tally è normalizzato.	46
2.1	Dati tecnici generali del reattore LFR Dimostrativo ALFRED.	54
2.2	Coefficienti utilizzati per il calcolo del fattore di normalizzazione delle tally calcolate dalla simulazione del reattore ALFRED.	63
2.3	Elenco e posizionamento delle tally spettrometriche descritte in Figura 2.13.	70
2.4	Risultati del calcolo degli spettri neutronici del reattore ALFRED nelle posizioni d'interesse (Figura 2.13). I valori assoluti del flusso neutronico sono riferiti alla potenza nominale di reattore.	70
2.5	Raggruppamento energetico utilizzato per la determinazione dello spettro neutronico nelle posizioni d'interesse.	72
2.6	Caratteristiche del campo gamma calcolato nelle posizioni d'interesse (Figura 2.13).	77
3.1	Caratteristiche di riferimento delle camere a fissione commercialmente disponibili applicabili al reattore ALFRED.	81
3.2	Limiti di rivelazione in MSV e <i>current mode</i> per le camere a fissione in Tabella 3.1.	83
3.3	Caratteristiche di riferimento dei SPND commercialmente disponibili applicabili al reattore ALFRED.	83
3.4	Emissioni principali e tempi di risposta dei più comuni materiali sensibili utilizzati per SPND.	85
3.5	Valori delle sezioni d'urto microscopiche di fissione per la camera fissione, e cattura radiativa per i SPND, in corrispondenza dello spettro energetico di neutroni termici, Figura 3.1.	87
3.6	Caratteristiche di riferimento dei SPND <i>Thermocoax</i> disponibili commercialmente ed applicabili al reattore ALFRED.	95
3.7	Sensibilità γ della camera a fissione <i>Photonis CFUE32</i> , nelle condizioni in cui il flusso gamma risulta essere un disturbo significativo.	102
3.8	Sensibilità γ delle sonde SPND studiate, nelle condizioni in cui il flusso gamma risulta essere un disturbo significativo.	103
3.9	Resistività elettrica del sesquiossido di alluminio e del diamante al variare della temperatura, nel campo termico d'interesse del reattore ALFRED.	111

4.1	Risultati della simulazione MCNPX del SPND <i>Thermocoax Co-type</i> , irradiato con neutroni termici.	121
4.2	Risultati della simulazione MCNPX del SPND <i>Thermocoax standard</i> con elettrodo emettitore in <i>Inconel 600</i> , irradiato con neutroni termici.	121
4.3	Risultati della simulazione MCNPX del SPND <i>Thermocoax Pt-type</i> , irradiato con neutroni termici.	122
4.4	Risultati della simulazione MCNPX del SPND <i>Thermocoax Rh-type</i> , irradiato con neutroni termici.	124
4.5	Principali caratteristiche tecniche e sperimentali del reattore TAPIRO.	127
4.6	Risultati della simulazione MCNPX del SPND <i>Thermocoax Rh-type</i> , irradiato nel canale tangenziale del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia.	132
4.7	Raggruppamento energetico utilizzato per la determinazione dello spettro fotografico nelle posizioni d'interesse.	133
4.8	Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax Co-type</i>	137
4.9	Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND <i>Thermocoax Co-type</i>	137
4.10	Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax Pt-type</i> , simulato in MCNPX con ^{190}Pt , ovvero platino in composizione isotopica naturale.	138
4.11	Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND <i>Thermocoax Pt-type</i> , simulato in MCNPX con ^{190}Pt , ovvero platino in composizione isotopica naturale.	138
4.12	Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> , alimentato con ^{180}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale. È preso a riferimento, in questo caso, l'isotopo maggiormente occorrente, il ^{180}Hf	147
4.13	Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{180}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale.	147
4.14	Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> , alimentato con ^{63}Cu	149
4.15	Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{63}Cu	149
4.16	Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> , alimentato con ^{115}In	151
4.17	Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{115}In	151
4.18	Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> , alimentato con ^{209}Bi	153
4.19	Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{209}Bi	153
4.20	Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND <i>Thermocoax standard</i> , alimentato con ^{150}Gd	155
4.21	Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND <i>Thermocoax standard</i> alimentato con ^{150}Gd	155
5.1	Corrente rivelata $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ (risposta ai soli neutroni) per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce di TAPIRO, nelle condizioni specificate nel paragrafo 4.3.1	162
5.2	Correnti rivelate $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce in posizione C2 (Figura 2.13) del reattore ALFRED, in condizioni di potenza nominale.	166
5.3	Correnti rivelate $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce in posizione R1 (Figura 2.13) del reattore ALFRED, in condizioni di potenza nominale.	168

5.4 Correnti rivelate $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce in posizione N4 (Figura 2.13) del reattore ALFRED, in condizioni di potenza nominale. 170

Capitolo 1

Introduzione

ENERGIA:

dal greco $\epsilon\nu\epsilon\rho\gamma\epsilon\iota\alpha$, composto di
 $\epsilon\nu$ intensivo ed $\epsilon\rho\gamma\omicron\nu$ opera, azione.

Testualmente: "*che ha l'azione dentro*".

L'energia, oggi, è tutto.

E non è un luogo comune. È la realtà del mondo che viviamo ogni giorno che, pervasa di energia, ci ha resi così tecnologicamente schiavi del suo enorme potenziale. Chi non ha sperimentato l'impotenza al vedere il proprio telefono cellulare spegnersi; chi non si è trovato improvvisamente al buio di sera, con la lavatrice a pieno carico, una torta in forno o la TV accesa sul proprio canale preferito. Quando l'*azione* manca, ed in particolare quella sua forma specifica che siamo abituati a chiamare *kWh* dalle bollette dell'elettricità, il nostro piccolo mondo si ferma. Ma dietro la vita di ciascuno di noi c'è un mondo infinitamente più grande che alimenta la miriade dei nostri piccoli microcosmi.

L'energia, ed in particolare l'energia elettrica, costituisce la base di crescita e sviluppo sostanziale di una società. Siamo abituati a disporne come, quando e quanto ce ne pare, ma la risorsa non è senza limiti. Gli aspetti tecnologici della sua produzione, trasmissione, distribuzione e, talvolta, approvvigionamento dovrebbero essere al centro dell'interesse comune, sia a livello politico che nel domestico. Ed anche l'informazione dovrebbe essere maggiormente chiara su tutti gli aspetti peculiari della questione, al fine di rendere il cittadino edotto e consapevole delle proprie scelte, nel suo piccolo quotidiano e nelle scelte strategiche dell'intero Paese. La chiave per la sopravvivenza energetica, e quindi lo sviluppo di una nazione è la *diversificazione delle fonti*: quando non si hanno delle risorse certe sul territorio, è opportuno avere un ampio ventaglio di "*fornitori*", cosicché, se uno venga a mancare, gli altri possano sopperire -senza troppo sforzo- a quella mancanza, riequilibrando la relazione tra domanda ed offerta. In concomitanza, una gestione oculata ed un migliore controllo dei consumi, consentirebbero di risparmiare -ove possibile e a costi ragionevoli- ed evitare gli sprechi, riducendo il fabbisogno energetico nel complesso.

L'energia elettrica non è un bene accumulabile. L'intero sistema elettrico è assimilabile al sistema circolatorio del corpo umano: le parti vitali e le periferie sono alimentate e sopravvivono solo perché c'è un cuore pulsante a battere. Nel momento in cui esso si ferma, l'intera macchina va in crisi. Allo stesso modo funziona anche il complesso sistema elettrico di una nazione: una variegata rete di "*cuori*" sparsi qui e là (le centrali di produzione), un sistema di arterie e vene (il sistema elettrico nazionale), una rete di organi e cellule utilizzatori (utenze domestiche, industriali, terziario, ecc.). In ogni momento deve realizzarsi un equilibrio perfetto tra la domanda e l'offerta d'energia, perché il sistema non collassi. E su questa peculiarità il problema tecnologico assume dimensioni che anche un cittadino modello "*super-informato*" stenterebbe a comprendere. Per questo, di seguito si cercherà di dare una spiegazione esaustiva e comprensibile, che sia alla portata di tutti.

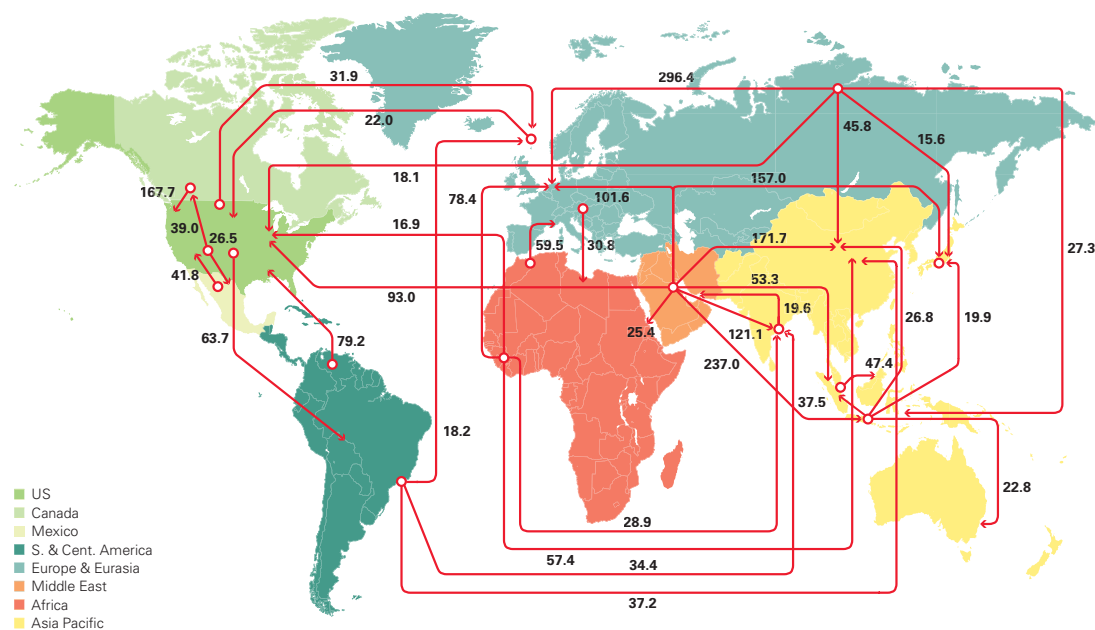


Figura 1.1: Maggiori rotte commerciali dell'energia nel 2014: i flussi sono contabilizzati in milioni di tonnellate di petrolio equivalente. Dati dal *BP Statistical Review 2015* [1].

1.1 La questione energetica e il nucleare

Lo sviluppo e l'evoluzione tecnologica verificatisi a partire dalla prima rivoluzione industriale hanno fortemente condizionato e cambiato gli stili di vita sino ad arrivare ai giorni nostri, ove l'individuo medio è sostanzialmente un "energivoro" nel soddisfare le sue esigenze. I consumi energetici della società in cui viviamo sono stati in costante crescita nell'ultimo secolo, con un impennata repentina a valle della scoperta e l'impiego dell'elettricità e dei combustibili derivati da petrolio, che hanno consentito la realizzazione di macchine e tecnologie cui non sapremmo rinunciare, anche se volessimo. Considerando che né è pensabile tornare ad una vita da cavernicoli, né il pianeta può sostenere il ritmo di crescita dei consumi, occorre trovare un giusto mezzo: quindi andare avanti con il progresso, ma in maniera misurata, risparmiando -ove possibile e senza eccessivo sacrificio- in termini di materie prime ed energia fornite dalla terra. L'energia -e da qui in avanti con questa dizione si farà riferimento a quella elettrica ove non diversamente specificato- è un mondo affascinante e delicato perché un sistema elettrico è come una bilancia a due bracci, che deve essere sempre tenuta in equilibrio: questo perché l'energia elettrica non è un bene stoccabile (come può esserlo un combustibile), ma va continuamente prodotta e -contestualmente- consegnata al destinatario, compensando anche le perdite lungo tutto il tragitto. È chiaro che, man mano che crescono i numeri in gioco, questa necessità comincia a diventare problematica, anche perché il carico (ad esempio l'intera richiesta elettrica italiana in questo istante) è una variabile aleatoria: si fanno delle stime e delle previsioni in relazione al passato, ma quello che nella realtà poi si realizza è il cosiddetto "*inseguimento del carico*", utilizzando strategicamente una combinazione di fonti che riescano a chiudere il bilancio consumo-produzione al *kWh*, istante per istante. È evidente che il buon funzionamento di un sistema elettrico dipende, oltre che dall'infrastruttura di trasmissione/distribuzione delle energia, anche dal mix tecnologico-produttivo che si sceglie di adottare: e qui si potrebbe scopercchiare un vaso di Pandora, addentrandosi nel complesso mondo delle strategie mondiali di approvvigionamento energetico dei combustibili fossili (Figura 1.1), oggi ancora le stragrandi fonti su cui è basato il fabbisogno energetico mondiale (Figura 1.2).

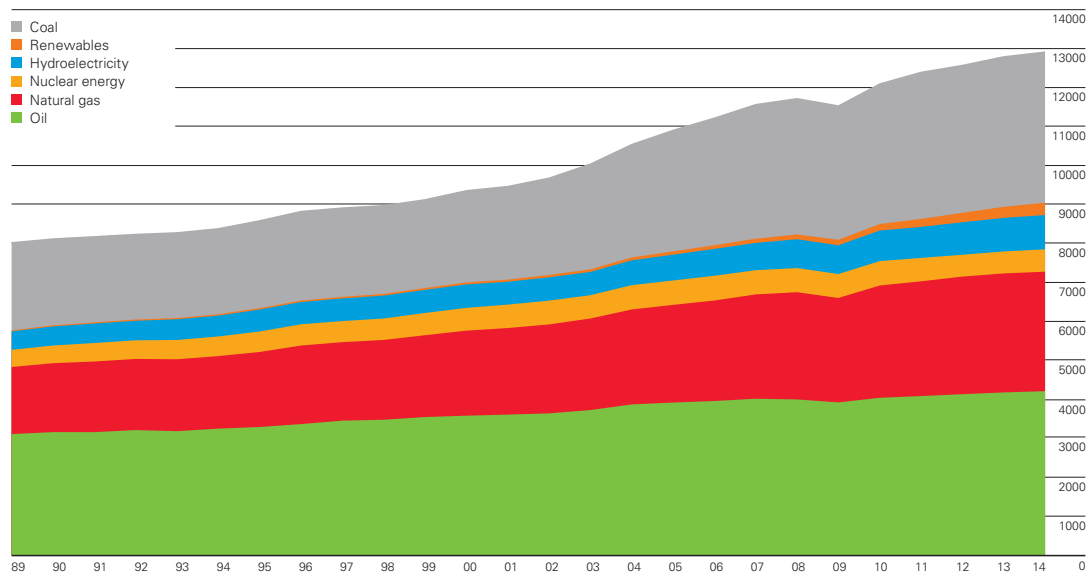


Figura 1.2: Consumo di energia primaria nel mondo, fino al 2014. I valori sono espressi in milioni di tonnellate di petrolio equivalente. Dati dal *BP Statistical Review 2015* [1].

Si restringa ora il campo al "Caso Italia". Da Figura 1.3, nel 2014 il 53% del fabbisogno energetico nazionale è stato soddisfatto da termoelettrico tradizionale (carbone, metano, olio combustibile, RSU), il 19% dall'idroelettrico, il 14% da fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico e geotermoelettrico) e il restante 14% da importazioni. Risulta facile comprendere cosa accadrebbe se, a causa degli eventi moderni, non venissimo più riforniti di combustibile: crisi energetica e black-out. Pochi numeri per dire che la soluzione più intelligente è quella di diversificare la produzione elettrica, cosicché se un settore crolla, gli altri possano supplirvi senza eccessivi sconvolgimenti. Allora perché non produrre più da altre fonti e meno dal termoelettrico tradizionale? Perché ci sono altri parametri in gioco, come, ad esempio:

- la sicurezza della fornitura del kWh al momento della richiesta da parte del sistema elettrico,
- il costo di produzione dell'energia,
- la potenzialità della fonte, la taglia dell'impianto, l'occupazione spaziale, la densità di potenza.

Le fonti non sono intercambiabili tra loro, perché le differenze tecnologiche e le peculiarità specifiche si riflettono nell'impiego che viene fatto di ciascuna di esse. Ad esempio:

- i grandi impianti termoelettrici e le centrali nucleari sono utilizzati per sopperire al *carico di base*, ovvero quella quota parte della richiesta elettrica istantanea ragionevolmente certa, secondo il Gestore del Sistema Elettrico. La motivazione tecnologica risiede nelle lunghe fasi di avviamento, arrivo a piena potenza e spegnimento per tali impianti (tempi nell'ordine delle settimane), il che comporta che essi vengano utilizzati con continuità, assicurando -dunque- la copertura del carico di base;
- gli impianti idroelettrici e le stazioni turbogas sono impiegate per l'inseguimento del carico: essendo la richiesta elettrica istantanea aleatoria, in base alle previsioni su medesimi periodi degli anni precedenti si prevedono accensione e spegnimento programmati -o programmabili sul momento- per tali impianti i cui transitori sono minimi e la produzione elettrica pronta "a comando". Ne segue che tali impianti non sono utilizzati con continuità perché il loro scopo strategico è quello di rispondere alla chiamata, se necessario;

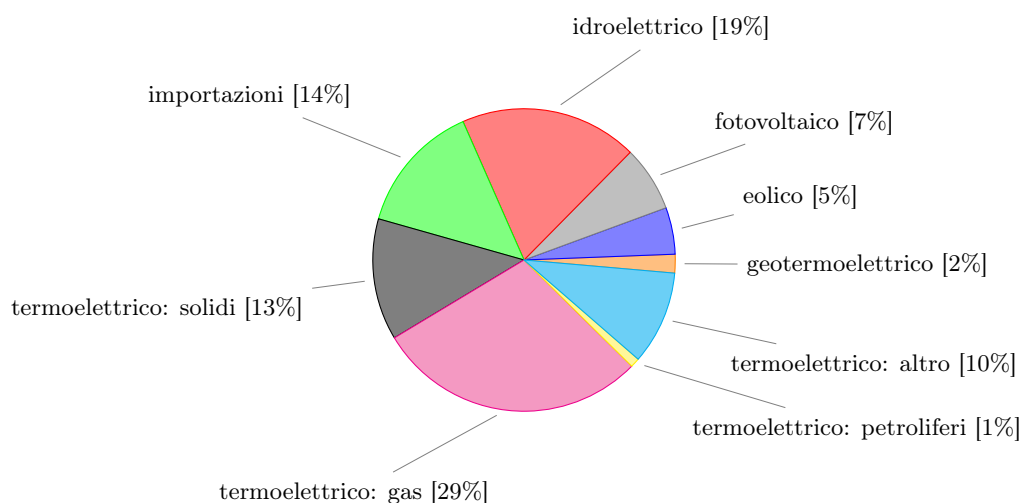


Figura 1.3: Consumo di energia elettrica in Italia al 2014 ($\sim 311 TWh$), ripartito per fonte. Dati prelevati dal bilancio nazionale TERNA 2014 [2].

- le fonti rinnovabili, ed in particolare solare ed eolico, si definiscono *non programmabili* essendo, sia la quantità d'energia prodotta, sia l'istante di produzione, del tutto aleatori poiché governati da fenomeni atmosferici. Le fonti rinnovabili introducono, dunque, aleatorietà anche sulla produzione, complicando non di poco la gestione del sistema elettrico, che in Italia è nato su un progetto di produzione concentrata di energia in pochi, grandi impianti. Da qualche tempo, invece, la diffusione di piccoli impianti sul territorio, anche non necessariamente rinnovabili, ha distribuito la produzione, rendendo la rete elettrica sofferente, perchè non adeguata a questo *layout* di produzione -piuttosto recente- "*a macchia di leopardo*";
- avere una forte produzione da fonte rinnovabile non dispensa dall'avere impianti tradizionali di equivalente producibilità, certa e durevole nel tempo: chiaramente, l'aleatorietà caratteristica delle fonti rinnovabili deve essere compensata dalla presenza di una produzione sicura ed equipollente, nei giorni in cui -banalmente- non c'è sole e non c'è vento.

Gestire una rete elettrica che assicuri a ciascun cittadino, in ogni momento, il supporto vitale per ogni sua attività, è compito tutt'altro che semplice, e nonostante le molteplici precauzioni che si prendono, la "macchina" del sistema elettrico può rapidamente andare fuori controllo, se vengono a mancare le condizioni sostanziali per il suo sostentamento. Chi non ricorda il lungo black-out nel settembre 2003, dove la perdita di una parte della produzione (d'importazione per essere precisi) per apertura di una linea con la Svizzera, causò il progressivo sovraccarico ed apertura delle altre linee d'importazione, lasciando un "buco" nella produzione che rapidamente comportò la caduta di tensione e frequenza della rete, fino al distacco, per protezione, di tutti (o quasi tutti) gli altri nodi di produzione?

In sintesi, quindi, un vasto e proporzionato assortimento energetico e tecnologico per la produzione elettrica di una nazione è la scelta vincente. L'Italia, da questo punto di vista è molto progredita nell'approvvigionamento da idroelettrico, solare ed eolico, ma da quanto detto in precedenza, si evince un collo di bottiglia riguardo la produzione di base, oggi sorretta solo dalle fonti fossili importate, via mare e via terra. L'Italia non dispone di un'alternativa per il carico di base, perchè nel 1987 si affidò agli italiani -ignari della ricadute strategiche della loro scelta- il diritto di voto riguardo la presenza della produzione elettronucleare nel paese. Proprio allora, quando l'Italia del nucleare era una potenza mondiale, in grado di competere con le altre grandi nazioni. Ma il sogno s'infranse, forse per paura, forse per convenienza di qualcuno.

La situazione odierna, comunque, parla chiaro: l'Italia è un paese non energeticamente autosufficiente: non che lo sarebbe se ci fosse il nucleare, visto che non c'è sul territorio nazio-

nale una riserva di uranio sufficiente a mandare avanti una nazione. La differenza tra averlo o non averlo, tuttavia, sussiste. Si ipotizzi che per un improvviso sconvolgimento politico, sia sospesa la fornitura di carbone alla centrale termoelettrica di Torrevaldaliga Nord (Civitavecchia): l'impianto potrebbe funzionare ininterrottamente per 1 o 2 mesi al massimo, dopo di che esaurirebbe il combustibile; si ipotizzi che il medesimo sconvolgimento politico colpisca anche un'attigua centrale nucleare *virtuale*: essa potrebbe continuare a funzionare per una decade, e forse oltre, in relazione al quantitativo di combustibile fresco immagazzinato in situ. Questa differenza sostanziale, fisicamente ha origine in quello che potremmo definire il "*potere calorifico*" di carbone e uranio¹: rispettivamente, $\sim 7\text{ kWh/kg}$ e $\sim 840\,000\text{ kWh/kg}$. La fonte nucleare potrebbe, quindi, assicurare una lunga indipendenza energetica, nonché ottimi margini di riassetamento nel caso di sconvolgimenti politici mondiali.

La maggiore "colpa" che viene attribuita al nucleare dall'opinione pubblica è la sua pericolosità: le radiazioni fanno paura e sono tacciate di essere la causa dei mali del XX secolo. È scientificamente dimostrato che le radiazioni nucleari possano indurre fenomeni di cancerogenesi alle basse dosi o addirittura reazioni tissutali estese nel caso di alte esposizioni, ma si tratta per lo più di situazioni incidentali o malagestione di materiali nucleari. Il nucleare è un'industria, come quella chimica, metalmeccanica, farmaceutica, ecc. e come tale, porta con sé rischi e benefici: nel caso del nucleare, tuttavia, i rischi sono molto ben contabilizzati, essendo in vigore leggi nazionali e trans-nazionali che regolano il nucleare in genere in tutto il mondo. In Italia -sebbene non sia presente la produzione elettronucleare- il D. Lgs. 230/95 e ss.mm.ii. è il testo di riferimento per i rischi da esposizione dei lavoratori alle radiazioni nucleari, largamente utilizzate in campo medico, industriale, ricerca, ecc. Una trattazione così specifica ed approfondita del problema affonda le radici in un lontano passato, quando nel 1928 veniva fondata l'*International Commission on Radiological Protection* (ICRP), il cui scopo principale sarebbe stato, nel tempo, il fornire indicazioni agli addetti ai lavori su come realizzare operativamente la radioprotezione nella conduzione di attività concernenti l'impiego di radiazioni nucleari, per sé e per il pubblico. Una tale attenzione per il lavoratore e la popolazione non esiste in altri settori merceologici, concernenti l'esposizione a rischi chimici (es. industria chimica, meccanica, farmaceutica), chimico-fisici con le polveri sottili (es. industria metalmeccanica), elettromagnetismo (ovunque siamo, siamo immersi in reti di campi elettromagnetici).

Il nucleare, quindi, non è "brutto e cattivo"; va trattato col rispetto e con l'attenzione che gli sono dovuti, e considerato come una risorsa per il progresso e la crescita della nazione, sotto diversi punti di vista. Per quanto riguarda la produzione elettrica, il rischio connesso con l'utilizzazione industriale della fissione a catena diventa accettabile solo se si adottano tutti quegli accorgimenti atti a ridurre la probabilità del verificarsi dell'evento incidentale, così da mantenere il rischio al di sotto di un certo valore, generalmente definito con una curva di accettabilità. Siccome il danno connesso con le installazioni nucleari è quanto mai elevato, anche in termini economici, le moderne centrali richiedono, ad esempio, relativamente all'evento "*fusione del nocciolo*" che sia rispettato il vincolo di probabilità tale per cui si abbia $P_{\text{fusione del nocciolo}} \leq 10^{-6}$ eventi/reattore/anno, così da rimanere nella regione di accettabilità del rischio. Il ridurre la probabilità del verificarsi di eventi indesiderati è dunque obiettivo di sicurezza, e viene raggiunto mediante una minuziosa cura di tutte le fasi di vita del progetto, dall'idea iniziale, alla sua traduzione su carta, alla sua realizzazione operativa.

La sicurezza nucleare, comunque, non si esaurisce nella buona progettazione, realizzazione, esercizio, manutenzione degli impianti. Difatti, quand'anche ci si adoperi per condurre ogni fase di vita d'impianto a regola d'arte, esiste una ulteriore problematica annotabile al settore, che è quella delle scorie a lunga vita: dopo 60 di impiego della fissione termica nei reattori ad acqua e tutti i progetti militari per la produzione di plutonio per ordigni, il mondo ha già accumulato quantitativi consistenti di prodotti di fissione e transuranici a lunga vita media che -nelle ipotesi iniziali del ciclo del combustibile nucleare- dovevano essere stoccati in depositi geologici per tempi dell'ordine dei $10^6 \div 10^7$ anni per tornare a livelli di radioattività compatibili

¹È impropria la dizione di "*potere calorifico*" per l'uranio. Si parla, più correttamente, di *burn up*, il *bruciamiento allo scarico* che equivale alla quantità di energia prodotta dall'unità di massa del combustibile, dimensionalmente omogeneo, quindi al potere calorifico dei combustibili fossili. Il valore di burn-up riportato nel testo è riferito alle tipiche prestazioni di un reattore ad acqua leggera di tipo PWR, *Pressurized Water Reactor*.

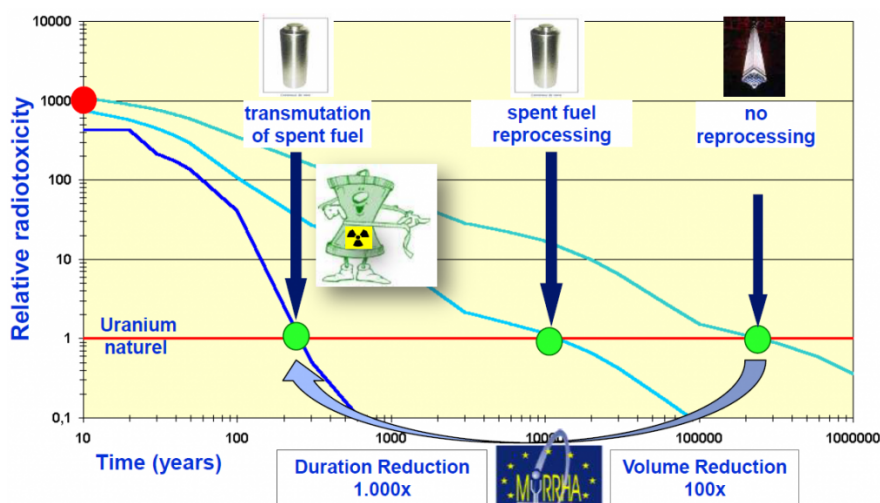


Figura 1.4: Variazione della pericolosità temporale dei rifiuti radioattivi a lunga vita nei casi di: non riprocessamento (smaltimento del combustibile tal quale), riprocessamento (stoccaggio dei flask vetrificati con attinidi minori e prodotti di fissione), trasmutazione del combustibile irraggiato (stoccaggio finale dei soli prodotti di fissione) [3].

con il fondo ambientale. È chiaro che questo tipo di soluzione appare assai preoccupante perché richiede il mantenimento in sicurezza dei manufatti radioattivi di generazione in generazione, evitando che di essi si perda memoria, sebbene l'intenzione nella realizzazione dei depositi geologici sia il realizzarli "a perdita di memoria", ipotesi tutt'altro che rassicurante.

Di qui sono partite le sperimentazioni per ridurre la pericolosità del tempo delle scorie a lunga vita: il primo step significativo fu l'ideazione del processo di ritrattamento, con il recupero dei fissili e fissionabili utili e riciclabili, abbinato alla vetrificazione dei prodotti di fissione e degli attinidi minori non utili nei cosiddetti "flask", la cui pericolosità nel tempo si riduce a circa 10^5 anni. Ancora troppo.

Da qualche decennio a questa parte, e particolarmente nei tempi recenti, si è proposta una soluzione significativa al problema delle scorie, con la creazione di un sistema ADS, *Accelerator Driven System*, un nocciolo sottocritico fatto di scorie a lunga vita e prodotti di fissione alimentato neutronicamente dalle reazioni di spallazione prodotte dai protoni accelerati che impattano su atomi pesanti del piombo-bismuto refrigerante del sistema. Tale sistema è in grado di fissionare gli attinidi minori e trasmutarli in prodotti di fissione i cui isotopi sono temporalmente meno pericolosi, andando -quindi- a contenere il periodo di stoccaggio in sicurezza di quanto rimane (solo i prodotti di fissione) in tempi dell'ordine di qualche centinaia di anni [3].

La capacità di questo tipo di sistema di ridurre la pericolosità delle scorie a lunga vita si è tradotta in un sforzo comune per la realizzazione di una soluzione reattoristica di simile concezione, che direttamente si occupi delle proprie scorie, realizzando un ciclo adiabatico. Un siffatto sistema è la combinazione di un reattore per la produzione elettrica con la "capacità disinquinante" di un sistema ADS: questo è il motivo principale per cui oggi si sperimenta uno sforzo mondiale congiunto per la realizzazione di un reattore al piombo prototipo che abbia le dette caratteristiche. Siccome si ravvisa l'effettiva fattibilità di tale soluzione, è possibile che i LFR, *Lead Fast Reactor*, risultino la soluzione nucleare del futuro, visto che consentono un ciclo nucleare sostenibile, molto più della precedente categoria LWR abbinata ai sistemi burner-ADS (Figura 1.4).

I principali problemi al momento da affrontare risiedono nella compatibilità dei materiali con il refrigerante-piombo e nella realizzazione di un sistema industriale completamente diverso in termini di strutture e componenti rispetto alle soluzioni precedenti perché, al di là delle caratteristiche termiche/chimiche/nucleari del piombo, questo refrigerante è molto più pesante dei refrigeranti tradizionali (acqua per i reattori termici; sodio per i reattori veloci): si deve abbandonare l'idea delle barre di controllo che penetrano passivamente il nocciolo per gravità;

si deve contrastare la spinta di galleggiamento della struttura e del combustibile nel piombo; si deve contenere la dimensione complessiva del sistema per motivi di resistenza strutturale e sicurezza sismica. Si necessitano, insomma, soluzioni alternative rispetto a quelle consolidate che, prima di poter essere messe in opera in un reattore prototipo in scala 1:1, vanno provate attraverso molteplici esperienze, così da realizzare una soluzione reattoristica sicura ed affidabile. In questo senso, la ricerca si spinge in tutti i settori che interessano la progettazione del nocciolo e del sistema primario, affrontando la neutronica, la termoidraulica, la chimica del refrigerante, la progettazione strutturale di internals e combustibile, la strumentazione di misura, ecc.

Nell'ottica di compiere delle scelte di sostenibilità per il futuro del nucleare, a livello mondiale si sta compiendo uno sforzo congiunto, per indirizzare la ricerca e lo sviluppo in una direzione comune ed utile per tutto il genere umano: è lo sforzo di approdare ai reattori della IV generazione, che saranno descritti nel prossimo paragrafo.

1.2 I reattori GEN-IV della quarta generazione

Generation IV è la quarta generazione di reattori nucleari, essendo la prima costituita quasi tutta da prototipi (anni cinquanta e primi sessanta), la seconda da reattori per produzione commerciale di energia (anni settanta e ottanta, essenzialmente della tipologia ad acqua leggera bollente e pressurizzata, ad acqua pesante e del tipo gas-grafite), la terza da reattori ad acqua leggera avanzati (anni novanta ed inizio del 21° secolo). Accanto a quest'ultima categoria sia attestano anche i reattori di terza generazione avanzata, III⁺, che rappresentano la transizione verso la IV generazione.

La flotta della quarta generazione si pone come obiettivi:

- competitività economica del *kWh* prodotto;
- elevati standard di sicurezza, in special modo di carattere intrinseco o passivo;
- possibilità di abbinamento ad altre filiere produttive (calore di processo, produzione di H₂, ecc.);
- produzione di minime quantità di rifiuti radioattivi;
- possibilità di sfruttamento energetico delle notevoli risorse di ²³⁸U fertile, presenti nei depositi geologici come scarto della filiera dei LWR (*Light Water Reactors*);
- possibilità di riduzione della pericolosità radiologica e nel tempo dei rifiuti radioattivi a lunga vita prodotti dalle filiere reattoristiche di produzione di potenza;
- maggiore protezione contro rischi di proliferazione nucleare ed attentati.

Al fine di perseguire questi obiettivi, per iniziativa dello statunitense *Department Of Energy* (DOE), si è costituito nel 2001 un comitato internazionale che ha preso il nome di *Generation IV international Forum* (GIF), per lo sviluppo di sistemi nucleari di produzione di energia che possano essere progettati, sperimentati e realizzati a livello di prototipo entro il 2030, allorché molti reattori, tuttora in produzione, saranno alla fine delle loro licenze operative. Ad oggi, il GIF raggruppa 14 Paesi [4].

I 100 esperti raggruppati dal GIF, esaminando circa un centinaio di concetti di reattori e sistemi nucleari futuribili, hanno selezionato 6 sistemi che rispondono ai requisiti descritti in precedenza:

- ***Sodium-cooled Fast Reactor system, SFR***: il reattore veloce al sodio rappresenta la categoria maggiormente investigata e realizzata impiantisticamente al mondo. Il successo delle sue realizzazioni, tuttavia, ancora non lo rende pronto alla scala commerciale di produzione di potenza, viste alcune difficoltà intrinseche del sodio refrigerante. In particolare, il problema principale è di natura chimica, poiché il sodio è un metallo alcalino e

si ossida in violente reazioni esotermiche: ne segue che il contatto con aria ed acqua è da prevenirsi con ogni tecnologia disponibile, sebbene sia comunque verosimile che -con tutte le contromisure adottate- tale fenomeno accada, visto l'ossigeno atmosferico e l'acqua presente nel ciclo secondario di produzione di potenza. A tal proposito, i sistemi SFR sono necessariamente dotati di un *Intermediate Heat Exchanger* (IHX) anch'esso al sodio, cosicché il sodio primario del reattore scambia calore col sodio secondario non radioattivo, ed il sodio secondario scambia, poi, calore in cascata con l'acqua del ciclo termico di potenza. La pericolosità intrinseca del sodio fuso e la complicazione impiantistica per le motivazioni dette, spingono, oggigiorno, a ricercare soluzioni alternative ai SFR, sebbene tali reattori funzionino egregiamente.

- ***Lead-cooled Fast Reactor system, LFR***: si tratta di reattori raffreddati a piombo o piombo-bismuto fusi. Il principale vantaggio rispetto al sodio fuso risiede nella sicurezza intrinseca offerta dalla chimica del refrigerante, che non reagisce violentemente con aria ed acqua come il sodio. Questa caratteristica ha riflessioni impiantistiche di semplicità, visto che non occorre un complesso sistema di isolamento del primario del reattore dal ciclo termico secondario o dall'ambiente esterno. Di per sé, il piombo porta delle controindicazioni in merito alle sue pesantezza e corrosività chimica e chimico-fisica. Solo lo studio di rivestimenti protettivi ottimizzati ha reso verosimile, ad oggi, la realizzazione di tali sistemi in scala commerciale. Inoltre, il piombo-refrigerante è impiegabile anche per la realizzazione di sistemi ADS (*Accelerator-Driven Systems*), in cui un acceleratore di protoni inietta un fascio di particelle all'interno del piombo liquido della tanca reattore: le seguenti reazioni di spallazione producono un flusso neutronico notevole, che abbinato ad un insieme moltiplicante sottocritico alimentato da attinidi minori ed isotopi fissili "problematici" di uranio e plutonio, costituisce una possibilità significativa di fissionare -e quindi eliminare- le scorie radioattive a più lunga vita del ciclo del combustibile nucleare.
- ***Gas-cooled Fast Reactor system, GFR***: si tratta di un reattore veloce raffreddato ad elio, adatto ad una conveniente gestione degli attinidi prodotti unitamente alla surgenerazione di fissile per conversione fissile-fertile. Le alte temperature e l'elio consentirebbero ottime condizioni per attivare cicli termodinamici secondari ad elevata efficienza, ed anche produrre H₂. Le controindicazioni principali riguardano i materiali e le alte temperature in gioco, nonché l'incidente LOCA (*Loss Of Coolant Accident*), poiché l'immediata depressurizzazione del contenimento primario risulterebbe nell'impossibilità di continuare a raffreddare il nocciolo, visto che non potrebbe utilizzarsi l'opzione di *allagamento* come previsto per i LWR.
- ***Molten Salt Reactor system, MSR***: un reattore epitermico a sali fusi impiega combustibile disciolto in fluoruri, in un ciclo chiuso del combustibile che comporta un efficiente sfruttamento del plutonio e degli attinidi minori. Il combustibile è costituito da una miscela liquida di sodio, zirconio e fluoruri di uranio che viene continuamente ricircolato e trattato al fine di controllarne precisamente la chimica e la composizione. Al reattore è dunque asservito un impianto chimico di ritrattamento vero e proprio, che risulta essere il punto debole di tutto il sistema, data la forte corrosione dei materiali strutturali ad opera del fluido combustibile.
- ***SuperCritical Water-cooled Reactor system, SCWR***: si tratta di un reattore termico, ad acqua leggera portata ad una pressione ed una temperatura notevolmente superiori a quelle corrispondenti al punto termodinamico critico. Il vantaggio di tale sistema è la produzione di calore ad alta temperatura, che innalzerebbe in maniera significativa il rendimento complessivo d'impianto, conservando la comprovata esperienza della categoria reattoristica dei LWR. Le principali problematiche sono connesse all'alta temperatura che i materiali devono sopportare insieme alle transizioni termodinamiche del ciclo, in condizioni normali ed incidentali.
- ***Very High Temperature Reactor system, VHTR***: è un reattore termico del tipo gas-grafite, ove le alte temperature (1000°C) raggiunte sono in grado di indurre termolisi

dell'acqua e produzione diretta di H_2 . La fisica del reattore sarebbe ben conosciuta, e le potenzialità energetiche pressoché illimitate, potendo produrre idrogeno combustibile in maniera pulita e sostenibile, e non dagli idrocarburi, come si fa oggi. La principale problematica risiede nelle alte temperature che i materiali devono essere in grado di sopportare, con continuità ed in sicurezza.

Come risulta evidente dall'elenco precedente, tre delle sei categorie proposte risultano essere reattori con spettro neutronico veloce. La motivazione che spinge ad accelerare verso la realizzazione e la diffusione su scala industriale di tali impianti risiede in una scelta di sostenibilità del ciclo industriale dell'uranio. Ad oggi, degli oltre 400 reattori nucleari di potenza operanti in tutto il mondo, la quasi totalità è costituita da reattori ad acqua leggera, ove il cui ciclo del combustibile è sostanzialmente aperto: anche se in alcuni casi il combustibile viene riprocessato e parte di esso riutilizzato, gli attuali reattori non consentono un gran "riuso" energetico del combustibile già irraggiato per la produzione di nuovi elementi combustibili². Il ciclo aperto sembra avere, almeno a breve termine, la disponibilità di depositi geologici come fattore limitante. In questa ottica la sostenibilità sarebbe garantita solo dall'adozione dello spettro neutronico veloce combinata con il ritrattamento ripetuto degli elementi di combustibile irraggiato (e non una sola volta come può farsi, al meglio delle possibilità, per i LWR) [5].

La categoria dei reattori veloci consta di SFR, LFR e GFR, ovvero soluzioni adottanti sodio, soluzioni adottanti piombo e soluzioni adottanti gas come refrigeranti; altre soluzioni, come i sali fusi sono state poco indagate e ancor meno sperimentate. Siccome i reattori veloci refrigerati a gas sono di più recente progettazione, in buona sostanza, si può ridurre la categoria dei FR (Fast Reactor), implementati o in procinto di realizzazione, a progetti refrigerati a sodio o piombo/piombo-bismuto: un confronto preliminare in termini di proprietà fisiche, parametri di esercizio e caratteristiche tra questi due tipologie di refrigeranti può trovarsi in Tabella 1.2. Al fine di introdurre il lettore prima agli aspetti quantitativi, risulta conveniente effettuare un confronto più qualitativo riguardo vantaggi e svantaggi della categoria LFR rispetto alla concorrente più diretta, quella degli SFR (Tabella 1.1.).

1.3 La filiera dei reattori refrigerati al piombo

A livello internazionale, i reattori al piombo sono identificati con l'acronimo LFR (*Lead-cooled Fast Reactor*) usato per riferirsi ai reattori veloci che usano HLMC (*Heavy Liquid Metal Coolant*), un metallo liquido pesante come refrigerante. Le due alternative sono:

- **piombo puro;**
- **eutettico piombo-bismuto** o **LBE** (Lead-Bismuth Eutectic, 45% wt. Pb, 55% wt. Bi).

Evidentemente, considerando che la temperatura media di reattore può attestarsi intorno a 450°C, entrambe i refrigeranti presentano un elevato margine rispetto al punto di ebollizione (cfr. Tabella 1.2), mentre la differenza nella temperatura di fusione è sostanziale. Poiché occorre tenere sempre ogni parte d'impianto al di sopra del punto di fusione al fine di mantenere liquido il refrigerante, è più problematico utilizzare il piombo puro perché è maggiormente verosimile che si creino dei *cold-spot* dove il fluido possa solidificare, ostruendo le sezioni di passaggio. Dal punto di vista fluidodinamico, quindi, è preferibile ricorrere all'eutettico piombo-bismuto. Questa caratteristica termodinamica è risultata essere la motivazione principale dello sviluppo dei programmi di ricerca russi sugli LFR verso sperimentazioni con la miscela LBE piuttosto

²Dal punto di vista tecnico, il fattore limitante il riprocessamento del combustibile in termine di suo riuso e produzione di nuovi elementi combustibili risiede nello "sporramento" della miscela combustibile in isotopi pari di uranio e plutonio, nonché attinidi minori, le cui caratteristiche perturbano la neutronica del sistema moltiplicante, rendendo il reattore ad acqua più instabile nel mantenimento della reazione a catena, non essendo esso stato progettato per un riciclo spinto del combustibile.

	Aspetti positivi dei HLMC (Pb-LBE vs. Na)	Aspetti negativi dei HLMC (Pb-LBE vs. Na)
Compatibilità chimica	<ul style="list-style-type: none"> nessun pericolo di incendio o esplosione del refrigerante per contatto con aria/acqua; semplificazione impiantistica dovuta alla non necessità del circuito intermedio (IHX): contatto diretto tra piombo e refrigerante secondario. 	<ul style="list-style-type: none"> necessità del controllo real-time del tenore di O₂ per limitare gli effetti corrosivi del piombo, mantenendo il più possibile inalterati i rivestimenti protettivi degli acciai ed evitare la precipitazione degli ossidi; necessità di prevedere un sistema di rimozione dei prodotti di corrosione; effetto di reattività positiva nel passaggio in sospensione e/o soluzione dei prodotti di corrosione; contenimento della velocità del refrigerante a 2 m/s, per limitare la corrosione.
Proprietà termiche	<ul style="list-style-type: none"> alte temperature (elevata efficienza termica) senza necessità di avere elevate pressurizzazioni; riduzione della probabilità di surriscaldamento delle guaine dovuto all'ebollizione non verosimile del piombo; impossibilità che si verifichino colpi d'ariete e shock dovuti ad improvvise transizioni di fase del refrigerante; il congelamento del refrigerante in caso d'incidente sigilla le vie di fuga dei materiali radioattivi verso l'esterno. l'elevata capacità termica limita dinamiche temporali e shock dovuti ai transitori, previsti o imprevisti. 	<ul style="list-style-type: none"> inserimento di reattività positiva nel nocciolo in caso di dissoluzione dei materiali strutturali dovuta a surriscaldamento del refrigerante; rischio di bloccaggio del refrigerante per cold-spot nel nocciolo e nelle tubazioni, a causa dell'elevata temperatura di fusione; necessità di circuiti di riscaldamento dell'impianto del reattore in fase di riempimento del primario. ridotti calore specifico e conducibilità termica rispetto al sodio.
Elevata densità	<ul style="list-style-type: none"> ridotto rischio di re-criticità dopo la fusione del nocciolo a causa della densità del refrigerante comparabile con quella del combustibile; ridotto trascinamento del gas nel refrigerante. 	<ul style="list-style-type: none"> necessità di impiantare pompe potenti ed affidabili; forti pesi dovuti al refrigerante, facilmente incompatibili con i requisiti sismici; necessità di realizzare la tanca reattore, gli <i>internals</i> e le strutture in modo tale da sostenere adeguatamente i pesi in gioco; possibile traslazione verso l'alto degli elementi di combustibile, più leggeri del refrigerante.
Parametri nucleari	<ul style="list-style-type: none"> scarse sezioni d'urto di scattering inelastico e di cattura neutronica, favorevoli al <i>breeding</i> e agli effetti di vuoto; maggiore sezione d'urto di scattering elastico, favorevole per i parametri di albedo del riflettore; matrice stabile per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi. 	<ul style="list-style-type: none"> radioattività significativa del refrigerante dovuta alla formazione di polonio; difficoltà nella gestione della ricarica del reattore; il refrigerante costituisce un rifiuto radioattivo a lunga vita, il che limita le possibilità di riuso dello stesso.

Tabella 1.1: Aspetti positivi e negativi degli *Heavy Liquid Metal Coolants* nei confronti del sodio refrigerante [6].

	Na	Pb	LBE (45% wt. Pb, 55% wt. Bi)
punto di fusione (STP) [$^{\circ}C$]	97,7	327,45	124,5
punto di ebollizione (STP) [$^{\circ}C$]	883	1743	1670
ρ , densità [g/cm^3]	0,85	10,47	10,10
c_p , calore specifico [$kJ/(kgK)$]	1,3	0,15	0,15
ρc_p [$J/(m^3K)$]	$1,1 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$
k , conducibilità termica [$W/(mK)$]	70	16	13
massima velocità di deflusso [m/s]	10	2,5	2,5

Tabella 1.2: Principali caratteristiche fisiche di sodio e metalli liquidi pesanti (@ 480°C, ove non diversamente specificato), utilizzati come refrigeranti per reattori veloci.

che piombo puro, come si vedrà di seguito. Contrariamente ai reattori veloci al sodio, nei quali occorre impedire fortemente il contatto refrigerante-acqua/aria per le violente reazioni esotermiche che si verificherebbero, i LFR non presentano grosse problematiche di incompatibilità tra il refrigerante ed acqua/aria e quindi non necessitano di soluzioni impiantistiche complesse come un *Intermediate Heat eXchanger* (IHX) o generatori di vapore con tubi a doppia parete: ciò si riflette in una maggiore semplicità d'impianto, minori costi e una maggiore sicurezza. Altra peculiarità dei refrigeranti al piombo è la loro scarsa sezione d'urto d'assorbimento dei neutroni, che consente di incrementare la frazione volumetrica del refrigerante (aumentando il passo del reticolo delle barrette): l'aumento della sezione di passaggio è un beneficio termoidraulico rilevante, perché riduce significativamente la velocità del fluido e le cadute di pressione dovute all'attrito, il che aumenta le possibilità di esercire il reattore attraverso la circolazione naturale. Inoltre, gli HLMCs hanno ottime caratteristiche di immobilizzazione dei prodotti di fissione, sebbene abbiano lo svantaggio di essere "pesanti" e quindi avere un comportamento dinamico alle sollecitazioni sismiche che limita di molto le dimensioni di reattore ammissibili ai fini del rispetto dei requisiti di sicurezza in materia antisismica. In ogni caso, questo problema riguarda per lo più reattori di taglia commerciale, e non reattori di tipo modulare cui la concezione di LFR ben si associa.

Il concetto di reattore modulare è un approccio moderno alla realizzazione di un impianto nucleare: si accantona il normale layout d'impianto con una o poche unità di grande potenza, per approdare ad una soluzione che prevede molte unità di piccola taglia, più facilmente esercibili e maggiormente sicure in termini di *CCFs* (*Common Cause Failures*), beneficiando anche delle economie di scala. Inoltre, una soluzione *small modular* è un progetto di dimensioni contenute che può trovare applicazioni anche in piccole realtà territoriali, in paesi in via di sviluppo o, addirittura, per realizzazioni mobili [7].

1.3.1 Evoluzione storica dei reattori refrigerati al piombo

L'idea di realizzare un reattore veloce refrigerato a piombo fuso (o leghe di piombo) nacque inizialmente negli Stati Uniti intorno al 1950, ma rapidamente venne abbandonata a causa delle difficoltà nella gestione di tale refrigerante, dovute alla sua natura corrosiva. Nel medesimo periodo, anche l'Unione Sovietica cominciò a confrontarsi con il progetto di un reattore di questa tipologia, realizzando, tra il 1950 e il 1980, numerose *facilities* sperimentali cui seguirono realizzazioni di reattori-prototipo per la propulsione di sottomarini e navi militari; l'esperienza acquisita fu utilizzata, poi, anche per l'industria di potenza per la produzione di energia elettrica.

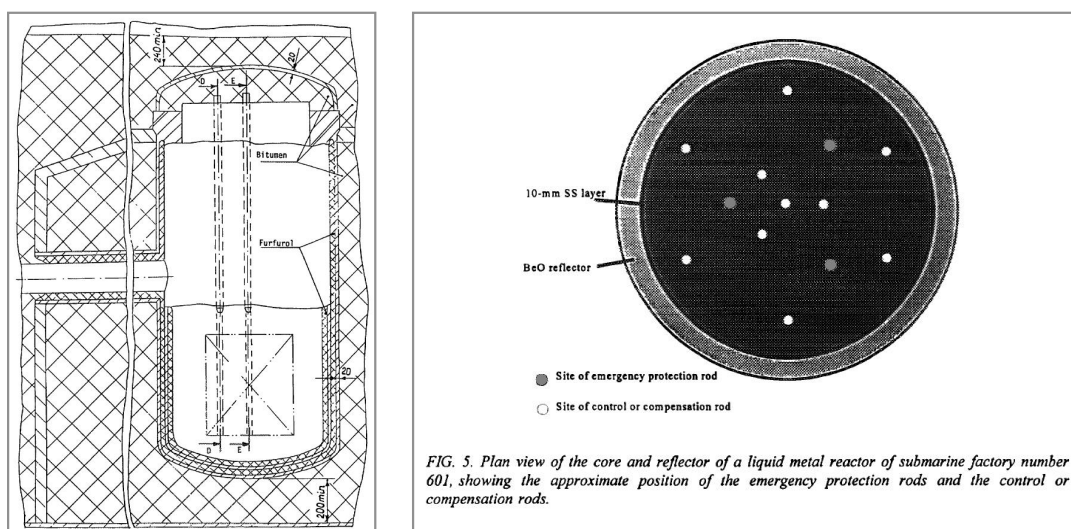


Figura 1.5: Reattore RM-1: spaccato del reattore e vista in pianta nel nocciolo, con specifica delle posizioni degli elementi di controllo normale e di emergenza.

Il primo reattore-test al piombo che raggiunse la criticità (1959) fu il 27/VT (70 MW_{th}), un impianto prototipo realizzato all'*Institute of Physics and Power Engineering* (IPPE) in Obninsk. Esso utilizzava eutettico Pb-Bi come refrigerante, una lega U-Be come combustibile e B₄C come materiale di controllo. Questo reattore operò fino al 1976, caricando solamente due noccioli completi: il nocciolo di primo avviamento funzionò per circa 2000 ore a piena potenza, dal 1959 al 1961; nel 1966 venne caricato il secondo nocciolo che operò fino a fine vita del reattore, per un totale di circa 3000 ore a piena potenza (pressoché il 50% della sua potenziale durata).

Il 27/VT costituì la base di partenza per lo sviluppo dei *Project 645* e *Project 705/705K* che diedero vita ai primi sommergibili nucleari *November* e *Alfa* secondo la classificazione Nato. Complessivamente, 7 sommergibili nucleari del tipo *Project 705/705K* vennero costruiti, seguendo il precedente *Project 645*.

Ulteriore sviluppo del *Project 705* fu il reattore prototipo di potenza KM-1 che fu messo in esercizio nel 1978 all'*A. P. Aleksandrov Scientific Technical Research Institute* (NITI) a Sornov Bor. Esso operò fino al 1986, con uno sfruttamento complessivo del nocciolo del 105% della sua vita utile e un totale di 780.000 MWh di energia termica prodotti.

L'esperienza acquisita con il reattore-esperimento 27/VT consentì, quindi, la realizzazione del primo sottomarino nucleare LFR della storia, il K-27 (*Project 645*, criticità 1962), che montava due reattori gemelli RM-1/2 da 73 MW_{th} ciascuno, refrigerati a LBE pressurizzato a 20 kg/cm². Il nocciolo del reattore (Figura 1.5), con 780 cm di diametro e 800 cm d'altezza, conteneva 90 kg di uranio arricchito al 90% in ²³⁵U e constava di circa 3000 barrette; il combustibile era una lega intermetallica uranio-berillio dispersa in una matrice ceramica di BeO. Il controllo del reattore era effettuato attraverso barre caricate ad esaboruro di europio (EuB₆), comandate da un sistema pressurizzato a gas. La scelta di un materiale contenente europio risultò comportare un elevato contenuto di attività nelle barre di controllo a fine vita, a causa dell'attivazione neutronica. Come mostrato da Figura 1.6, sia le barre di controllo normale che di emergenza erano incapsulate in tubi di acciaio penetranti il nocciolo nelle posizioni evidenziate in Figura 1.5.

Lo sviluppo del progetto KM-1 all'*Aleksandrov Scientific Technical Research Institute* consentì alla Marina Russa di continuare la sua impresa nucleare navale, costruendo altri sommergibili equipaggiati con singole unità tipo-KM-1: alcuni di essi rimasero operativi fino al 1996, per poi essere introdotti alle fasi di smantellamento, ancora oggi in corso. A parte le prime sperimentazioni russe, i reattori veloci refrigerati al piombo rimasero per lungo tempo un "progetto nel cassetto" a causa delle problematiche di compatibilità dei materiali strutturali con

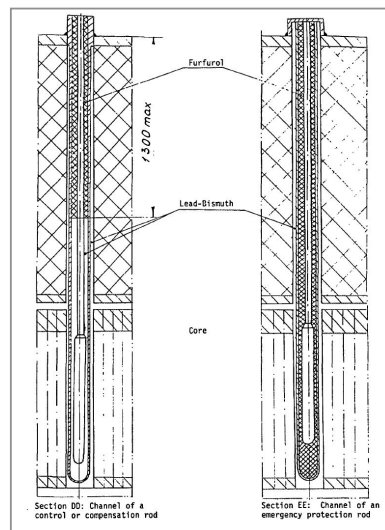


Figura 1.6: Reattore RM-1: spaccato delle barre di controllo normale e di emergenza, con riferimento alle sezioni specificate in Figura 1.5.

questo refrigerante nel medio e lungo termine.

Solo recentemente si è risvegliato l'interesse per questo settore della reattoristica FR perché lo studio e la ricerca sui materiali ha consentito di sviluppare degli acciai speciali e dei rivestimenti protettivi per i normali acciai ferritici in grado di resistere all'azione corrosiva del piombo durante tutto l'arco della plausibile vita di reattore (30-40 anni). I requisiti richiesti ai materiali impiegati nei LFR risultano:

1. adeguate proprietà meccaniche (resistenza, duttilità, durezza) in tutto il range di temperature, stress e dose da radiazioni possibili;
2. adeguata stabilità dimensionale (ridotti *creep* e *swelling*) in tutto il range di temperature, stress e dose da radiazioni possibili;
3. adeguato comportamento a corrosione e infragilimento causati dal refrigerante in tutto il range di temperature, stress e dose da radiazioni possibili.

Nel corso degli anni, a partire dal 1960, un'intensa attività di ricerca e sviluppo ha consentito di migliorare progressivamente le caratteristiche degli acciai in uso nell'industria di potenza, come mostrato in Figura 1.7. Ancora molto resta da fare, ad esempio relativamente agli acciai per i reattori a gas ad alta temperatura (che richiedono materiali resistenti a temperature dell'ordine dei 1000°C), ma l'attuale quadro rende verosimile -rispetto al passato- l'idea di realizzare un impianto LFR di potenza operabile per i tempi normalmente richiesti da questo settore industriale. Per questo -ed anche perché i LFR si inquadrano bene negli obiettivi del GIF- si è avuta recentemente una forte propensione allo sviluppo e alla realizzazione di reattori veloci al Pb/LBE.

In merito ai combustibili, molta è l'esperienza acquisita con combustibili metallici U-Pu-Zr ed ossidi (U, Pu), ma i primi non sono sufficientemente compatibili con il piombo mentre i secondi si ritengono non adatti a sopportare, a lungo termine, le condizioni termofisiche tipiche di un LFR; i combustibili in forma di nitrati misti (U, Pu) si ritiene che possano essere un'ottima soluzione in merito a compatibilità e stabilità, ma è ancora insufficiente l'esperienza d'irraggiamento finora acquisita.

A parte la Russia (che si trova in leggero vantaggio a causa dell'esperienza acquisita nel passato in campo militare/civile con i FR al piombo), allo stato attuale, comunque, si è ancora ben lungi dalla realizzazione su scala industriale di un LFR di potenza: ulteriori studi e prove sperimentali sulla tecnologia del refrigerante, sui materiali, sui componenti, sugli ausiliari di

Generation	Years	Steel modification	10 ⁵ h rupture strength (MPa)	Steels	Maximum use temperature (°C)
0	1940–60		40	T22, T9	520–538
1	1960–70	Addition of Mo, Nb, and V to simple Cr-Mo steels	60	EM12, HCM9M, HT9, HT91	565
2	1970–85	Optimization of C, Nb, and V	100	HCM12, T91, HCM2S	593
3	1985–95	Partial substitution of W for Mo and addition of Cu	140	NF616, E911, HCM12A	620
4	Future	Increase W and add Co	180	NF12, SAVE12	650

Figura 1.7: Evoluzione storica degli acciai ferritici/martensitici in uso nell'industria di potenza.

reattore sono richiesti al fine di acquisire l'esperienza necessaria e un know-how tale da poter realizzare i primi dimostrativi sia in scala ridotta che commerciale [8] [9] [10] [11].

1.3.2 Stato dell'arte della tecnologia LFR

Le attuali concezioni e i progetti in corso di realizzazione nell'ambito del settore dei reattori al piombo beneficiano sia dell'esperienza acquisita da molteplici nazioni con i SFRs (Sodium Fast Reactor) sia delle sperimentazioni LBE russe in reattori navali e prototipi terrestri. L'obiettivo condiviso, in linea con il Generation IV International Forum, è quello di realizzare un reattore surgeneratore, che sia anche bruciatore delle scorie a lunga vita, così da realizzare un ciclo chiuso del combustibile nucleare e, virtualmente, avere una disponibilità energetica "illimitata" vista la naturale abbondanza di ²³⁸U e ²³²Th, i fertili di base per attivare i cicli *breeders*.

Ad oggi, comunque, nessun reattore dimostrativo a metallo liquido pesante è stato ancora realizzato, ma molteplici sono gli sforzi internazionali per raggiungere i predetti obiettivi: di seguito si descriveranno prima le caratteristiche di base di un progetto LFR.

1.3.2.1 Caratteristiche neutroniche generali di un progetto LFR

Avendo il piombo e il suo eutettico Pb-Bi elevati numeri di massa, il processo di rallentamento neutronico in tali materiali è fortemente depresso, per cui l'adozione di HLMCs comporta il mantenimento di uno spettro energetico dei neutroni più "duro" rispetto alla categoria dominante dei SFRs. Tipicamente, l'energia media dello spettro è nell'ordine delle centinaia di keV, in relazione anche al tipo di combustibile utilizzato (ossidi, nitrati, metalli). Il libero cammino medio è nell'ordine di qualche cm. Le dette caratteristiche spettrali sono legate, ovviamente, alle proprietà moderanti del piombo. Ricordando che il *decremento logaritmico medio per collisione* legato al rallentamento neutronico è quantificabile come segue, con A numero di massa del moderatore:

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{(A-1)}{(A+1)} \quad (1.1)$$

Per il piombo si ha $\xi = 0,00963$. Ipotizzando un rallentamento da energia 2 MeV a 400 keV , il numero di collisioni necessarie in piombo ai fini del rallentamento sarebbero $N = \ln(2 \cdot 10^3/400)/\xi \cong 167$. Considerando che i moderatori si valutano anche in base alle loro sezione d'urto di scattering Σ_s e assorbimento Σ_a , è chiaro che il moderatore ideale è bene che abbia una buona tendenza a dar luogo a collisioni e contemporaneamente una bassissima tendenza a causare assorbimento.

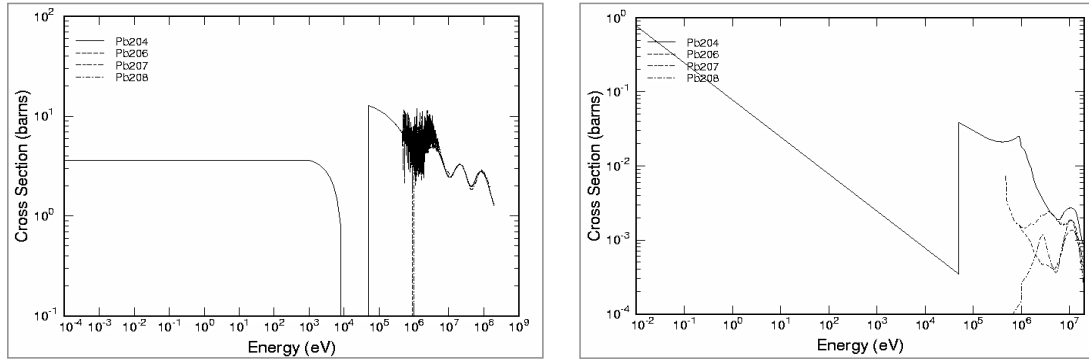


Figura 1.8: Sezioni d'urto di scattering elastico (destra) e cattura radiativa (sinistra) per gli isotopi naturali del piombo (ENDF/B-VII).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{alto } \xi \\ \text{alto } \xi \Sigma_s \\ \text{alto } \xi \Sigma_s / \Sigma_a \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Le altre due grandezze qualificanti il moderatore, riportate sopra, sono rispettivamente la *potenza di rallentamento* e il *rapporto di moderazione*: alti valori delle grandezze presentate qualificano un materiale come buon moderatore. Il piombo non è un buon materiale moderante -com'è giusto che sia- perché presenta scarsi valori dei gruppi precedentemente presentati: pertanto nei LFR ci si aspetta uno spettro neutronico complessivamente "duro" cioè con neutroni poco rallentati rispetto alla loro energia iniziale.

Come è ben visibile in Figura 1.8, le sezioni d'urto elastiche degli isotopi del piombo presenti in composizione isotopica naturale sono pressoché identiche nel range di energie di interesse. Ciò non può dirsi per le sezioni d'urto di cattura radiativa: va comunque evidenziato che il maggiore assorbitore, il ^{204}Pb ha una abbondanza isotopica pari a 1,4%, dunque il suo effetto negativo sull'economia neutronica è limitato, così come quello degli altri isotopi. Ne segue che, complessivamente, il piombo presenta un rateo di cattura neutronica sufficientemente contenuto.

In merito al comportamento neutronico del combustibile, la concezione europea degli LFR prevede l'uso di ossidi misti di U, Pu e MA (Minor Actinides); le soluzioni americane tendono a preferire combustibili in forma di nitrati. Al di là della matrice scelta, è importante valutare attentamente la composizione di fissili e fissionabili che si introducono nelle barrette combustibili poiché l'impatto sulla frazione di neutroni ritardati è significativa. Com'è noto, il controllo della criticità si effettua tramite i neutroni ritardati che "rallentano" le dinamiche evolutive delle escursioni di potenza del reattore e più è elevata la frazione dei neutroni ritardati, β_{eff} , più il sistema risulta sicuro, controllabile e lontano dalla pronto-criticità. Rispetto ai più che provati LWR (in cui $\beta_{eff} \sim 650 pcm$), i reattori veloci presentano minori frazioni di ritardati, dovuti all'indurimento dello spettro e all'utilizzazione di Pu come fissile: a titolo di esempio, il reattore ELSY, a progetto, presenta un $\beta_{eff} \sim 370 \div 420 pcm$ che si riduce a $\beta_{eff} \sim 325 pcm$ nel momento in cui si aggiungono alla miscela combustibile anche gli attinidi minori. È evidente che il margine dalla pronto-criticità in questi sistemi è praticamente dimezzato rispetto a quello dei comprovati LWR, il che rende più verosimile tale incidente: si richiede che i sistemi di rilevamento del campo neutronico siano rapidi ed efficienti e le contromisure agiscano prontamente nell'interrompere la divergenza della reazione a catena. In questa luce, la scelta del materiale assorbitore per il controllo del reattore è cruciale. Avendosi uno spettro neutronico veloce, i maggiori candidati sono:

- **carburo di boro**: è quello più largamente usato nei reattori veloci. Al di là della larga disponibilità del boro e della sua facilità di fabbricazione, scegliere un sistema di controllo basato su B_4C risulta economico e di alte prestazioni visto che la cattura neutronica del ^{10}B è significativa anche alle alte energie tipiche di uno spettro veloce. Visto che

Proprietà fisiche del B ₄ C	
densità [g/cm^3]	2,52
punto di fusione [$^{\circ}C$]	2445
durezza Knopp 100g [GPa]	29 – 35,8
durezza Vickers [GPa]	31
resistenza alla flessione [MPa]	450
resistenza alla compressione [MPa]	> 2800
modulo di Young [GPa]	420
calore specifico a 20 $^{\circ}C$ [$kJ/(kg K)$]	1
conducibilità termica a 20 $^{\circ}C$ [$W/(m K)$]	40
coefficiente di espansione termica [$10^{-6}/^{\circ}C$]	4,5
resistenza elettrica specifica a 20 $^{\circ}C$ [Ω/cm]	1
velocità del suono [m/s]	10920

Tabella 1.3: Proprietà fisiche del carburo di boro [12], assorbitore neutronico di riferimento per reattori veloci.

il ^{10}B è presente al 19,9% nella composizione isotopica naturale del B e che solo esso ha caratteristiche neutroniche interessanti ai fini del controllo, il boro è arricchito in ^{10}B fino al 90%. Si noti che le reazioni di cattura del boro producono He, pertanto le barre di controllo devono prevedere un plenum di raccolta dell'elio o un sistema di venting che prelevi in continuo o discontinuo il gas internamente formatosi. Il carburo di boro è l'assorbitore neutronico di riferimento per i reattori veloci: si ritiene, pertanto necessario approfondire anche le sue caratteristiche fisiche e chimico-fisiche. Esso risulta una combinazione unica di diverse proprietà (cfr. Tabella 1.3) che lo rendono una valida scelta in diversi settori ingegneristici: come refrattario, visto l'alto punto di fusione e la stabilità termica; come abrasivo o per rivestimenti, vista l'estrema durezza; nella balistica, vista la leggerezza abbinata alla durezza; come materiale di controllo nei reattori nucleari, data l'elevata sezione d'urto di cattura per i neutroni. In sintesi, si tratta di un materiale molto duro (secondo solo al diamante e al nitrato di boro), leggero, a bassa densità, resistente ad alta temperatura ad aggressioni chimiche [12].

- **eutettico In-Cd:** costituito da 75% *wt.* in indio e 25% *wt.* in cadmio, esso non costituisce un'alternativa egualmente valida al carburo di boro dal punto di vista neutronico, poiché le sezioni d'urto di cattura veloce non sono altrettanto significative: a parità di dimensioni, le simulazioni effettuate per il reattore ELSY mostrano prestazioni inferiori del 14% per una barra In-Cd rispetto al riferimento del B₄C. Nella progettazione di grandi noccioli, la frazione volumetrica che richiederebbe tale assorbitore sarebbe significativamente maggiore rispetto al carburo di boro e, pertanto, tale materiale risulta non applicabile se non su reattori di piccole dimensioni. Un vantaggio di questa lega è il seguente: avendosi tipicamente il refrigerante a $\sim 400 \div 500^{\circ}C$ ed essendo il punto di fusione della stessa $\sim 122,5^{\circ}C$, tale eutettico sarebbe normalmente liquido ed eventuali distorsioni delle camicie d'acciaio delle barre di controllo non comporterebbero la perdita dell'effetto desiderato e pertanto l'operabilità sarebbe conservata anche in caso di incidente severo che comporti questo danneggiamento.

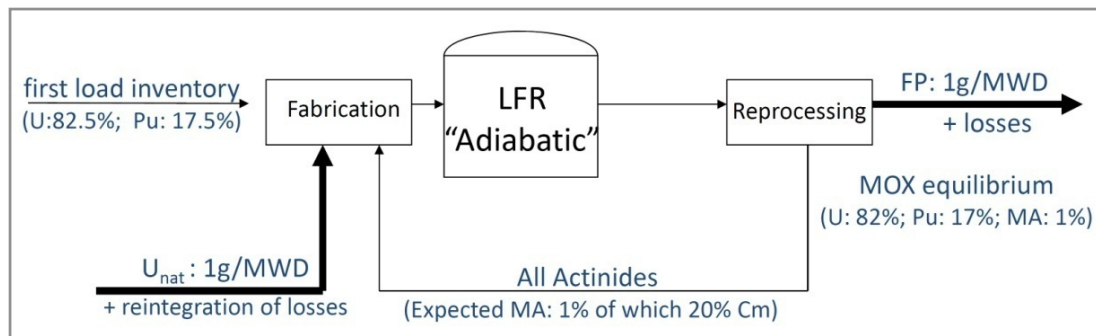


Figura 1.9: Schematizzazione dei flussi di massa per il combustibile di un reattore LFR adiabatico.

- **europio**: in forma di sesquiossido, Eu_2O_3 , l'eurobio presenta delle sezioni d'urto di cattura radiativa significative per lo spettro neutronico veloce di un LFR. Rispetto al carburo di boro, le reazioni dell'eurobio non creano gas come sottoprodotto, pertanto non è necessario prevedere venting o gas plenum. Inoltre, la cattura radiativa sull'eurobio produce isotopi assorbitori altrettanto efficaci e, quindi, la perdita di antireattività di una barra di controllo caricata ad ossido di eurobio è meno significativa rispetto al B_4C . Il problema fondamentale connesso con l'eurobio è legato all'enorme attività che si produrrebbe nelle barre di controllo che, essendo esposte continuamente al flusso neutronico, diventerebbero fortemente radioattive, complicando la loro gestione al termine della vita utile.

1.3.2.2 Aspetti peculiari di un progetto LFR

Accanto alle peculiarità del piombo in termini di comportamento neutronico del reattore, altri aspetti tecnici vanno tenuti in considerazione nel disegno/concezione di un nocciolo LFR. È chiaro che si presenteranno di seguito quelli che interessano ai fini del presente lavoro.

Determinante nel disegno dell'impianto è la tipologia di reattore dentro il quale il nocciolo andrà ad installarsi. Le possibilità risultano:

- **reattore critico**: il nocciolo è caricato con un surplus di reattività che viene depressa e bilanciata attraverso le barre di controllo al fine di mantenere il sistema critico alla potenza desiderata;
- **reattore sotto-critico**: il nocciolo non può costituire un insieme critico. Il mantenimento della reazione di fissione è assicurato dal bombardamento neutronico continuo associato alle reazioni di spallazione prodotte dai protoni provenienti da una macchina acceleratrice su nuclei pesanti (come quelli del refrigerante stesso);
- **reattore adiabatico**: con questa dizione ci si riferisce ad un reattore critico capace di operare mantenendo pressoché inalterato il suo inventario isotopico, con riferimento ai transuranici di interesse e ai MA. In questo modo gli scambi e le interazioni "con l'ambiente esterno" sono ridotte al minimo, dovendo provvedere solo a fornire in input uranio naturale/depleto e ad eliminare periodicamente i prodotti di fissione (Figura 1.9). Si realizza così un ciclo chiuso del combustibile *on-site*, promettente obiettivo promosso dal GIF.

Il ricorso al piombo come refrigerante comporta modificazioni nelle dimensioni tipiche di un nocciolo veloce anche in relazione alle sue proprietà fisiche e termo-fisiche (cfr. Tabella 1.2). Una prima sostanziale differenza tra gli HLMC e il sodio refrigerante risiede nel calore specifico, che risulta circa un decimo di quello del sodio: ciò impone larghi canali per il refrigerante, con

un aumento considerevole della sua frazione volumetrica nel nocciolo e la conseguente riduzione nella densità di potenza. Questa esigenza, assieme al rischio sismico (che impone di contenere il peso del reattore), costringe a realizzare forzatamente noccioli di piccole dimensioni e, quindi, di piccola potenza rispetto alle taglie convenzionalmente in uso. Nella realizzazione di un sistema critico, aumentare la frazione volumetrica del refrigerante nel nocciolo equivale ad aumentare la reattività nella cella: ne risulta che mediamente la reattività inserita in una "cella elementare" di reattore al piombo è più elevata di quella che si troverebbe in una analoga di reattore veloce al sodio. Tale peggioramento nell'economia neutronica è comunque compensato dalla minore cattura neutronica del piombo rispetto a quella del sodio: in ogni caso, il maggiore contenuto di reattività per cella può condurre più facilmente alla criticità locale in fenomeni di *shrinking* (compattazione) radiale del nocciolo. Altro vincolo fondamentale risiede nel mantenere la temperatura del refrigerante sufficientemente al di sopra del suo punto di fusione al fine di evitare ostruzioni delle sezioni di passaggio e incidenti di tipo LOFA (Loss Of Flow Accident) parziale. D'altro canto, non si può portare la temperatura del refrigerante oltre i $500^{\circ}C$ perché sarebbero eccessivamente promossi fenomeni di corrosione degli acciai non rivestiti. Orientativamente, possono considerarsi del tutto generali temperature di ingresso/uscita pari a $400 \div 500^{\circ}C$. Per quanto concerne la pressione di esercizio, non è richiesta pressurizzazione a fini termo-idraulici, pertanto si arriva al massimo a qualche decina di bar con un cuscinio di gas inerte, per evitare il contatto con l'aria esterna e controllare meglio la chimica del refrigerante. Per contenere l'infragilimento strutturale da erosione, inoltre, il flusso del refrigerante va tenuto al di sotto dei 2 m/s nei canali di nocciolo, mentre a livello neutronico occorre mantenere l'irraggiamento delle guaine del combustibile al di sotto di fluenze dell'ordine di $4 \cdot 10^{23}\text{ n/cm}^2$ per energie $E > 0,1\text{ MeV}$ [10].

1.3.2.3 Criteri ed obiettivi di sicurezza

Com'è noto, il sistema di protezione di un reattore, nei confronti dei danni che può produrre un suo malfunzionamento, consta di tre principali categorie d'azione -tipiche del concetto di *Difera in Profondità*- al fine di scongiurare l'evoluzione degli eventi che conduce all'incidente rilevante [5]:

- (i) **MISURE PREVENTIVE**: sono organizzate per prevenire ogni evento che possa portare ad incidenti. Alcune di queste sono:
- caratteristiche di sicurezza intrinseca incluse nel progetto, per stabilizzare o limitare la potenza del reattore;
 - componenti e strutture realizzati con materiali di caratteristiche ben note e comprovate dalla pratica;
 - margini di sicurezza inclusi a progetto di sistemi e componenti;
 - sistemi strutture e componenti verificati e ispezionati (controllo qualità) durante la costruzione, nonché convenientemente mantenuti in esercizio dell'impianto;
 - strumentazione atta a garantire agli operatori l'esatta condizione d'impianto, nonché possibilità di controllarlo;
 - approfondita ed accurata valutazione di sicurezza, volta ad individuare eventuali pecche e mancanze nell'hardware o nella gestione;
 - continuo dialogo con istituzioni come la *World Atomic Nuclear Operator* (WANO), che raccolgono dati derivanti da deficienze e rotture riscontrate durante costruzione ed esercizio d'impianto, cosicché gli errori non vengano ripetuti. Particolare dignità assumono i "*quasi incidenti*", che risultano una sorgente primaria d'informazioni riguardo la sicurezza nucleare;
 - profondo e continuo addestramento degli operatori;
 - adozione di metodologie di qualità a tutti i livelli.

(ii) **MISURE PROTETTIVE**: si tratta di quelle misure atte a fermare o fronteggiare gli incidenti. Nonostante la cura presa nel primo livello, possono verificarsi imprevisti per i quali si richiedono azioni che interrompano la sequenza incidentale, riducendo al massimo il possibile danno. Alcune misure protettive sono:

- sistema di SCRAM³ del reattore per arrestare in sicurezza la reazione a catena. Generalmente ogni progetto di reattore è dotato di due sistemi indipendenti, ridondanti e basati su principi fisici diversi, cosicché al fallimento di uno, l'altro possa sopperire alla funzione di sicurezza;
- circuiti di blocco, inseriti per fermare le conseguenze di errori da parte dell'operatore;
- avviamento delle funzioni vitali di sicurezza completamente automatico, per ridurre le possibilità di errore umano;
- continuo monitoraggio dei livelli di radiazione, per evitare dosi eccessive al personale e scarichi in ambiente oltre i livelli consentiti.

(iii) **MISURE MITIGATIVE**: necessarie a mitigare le conseguenze del fallimento delle azioni preventive e protettive. Si tratta di:

- sistemi di raffreddamento e prevenzione della fusione del nocciolo;
- sistemi di alimentazione elettrica (ed azioni in genere) ausiliari e ridondanti, per assicurare l'intervento delle azioni protettive e mitigative;
- sistema di contenimento dell'edificio reattore, studiato per inglobare la radioattività ed evitare la sua dispersione a valle della rottura del circuito primario;
- pianificazione delle salvaguardie esterne (piani d'emergenza), al fine di proteggere operatori e popolazione.

A questa concezione generale, considerando la limitata esperienza operativa di cui soffrono i LFR in confronto ai SFR, si aggiungo alcuni aspetti specifici [13] che riguardano:

- una progettazione più robusta per sistemi, strutture e componenti atta a limitare la probabilità di sviluppo negativo della catena incidentale, unita ad una maggiore capacità di tollerare le condizioni di stress dovute alle sequenze incidentali. Qui può annoverarsi la tendenza della progettazione *pool* contro quella *loop*, la prima che concepisce una più grande tanca reattore con tutti i componenti immersi in piombo, l'altra un sistema a circuito, a minore contenuto di refrigerante, più compatto e facilmente ispezionabile, ma soggetto con maggiore probabilità alla possibilità d'incidente LOCA, per rottura di una tubazione primaria;
- progettazione intesa all'ispezione continua, al mantenimento di elevati standard di qualità, nonché alla possibilità di semplice, rapida ed efficace sostituzione di parti usurate;
- dinamiche d'intervento più lente riguardo alla refrigerazione d'emergenza del nocciolo, che può contare sulla circolazione naturale innescata dalle caratteristiche termoidrauliche del piombo;
- progettazione semplificata, evitando complessi sistemi impiantistici, specialmente di natura attiva;
- particolare attenzione al comportamento sismico delle strutture, e considerazione delle possibilità di fallimento multiplo di sistemi, strutture e componenti nel disegno d'impianto.

³*Safety Control Rod Axe-Man*, SCRAM, è l'acronimo che identificava il primo sistema di SCRAM della storia, nella *Chicago Pile* di Fermi. Qui, l'assorbitore neutronico era mantenuto estratto da una corda che, all'occorrenza, era pronta ad essere recisa da un operatore munito di ascia.

1.3.3 Problematiche attualmente in ricerca e sviluppo

Come evidenziato in precedenza, la categoria dei reattori LFR non può contare su una vasta esperienza operativa che garantisca una maturità scientifica comparabile a quella dei progetti di reattori veloci al sodio. Esperienze operative, test, prove in scala ridotta su sistemi, materiali, ed infine anche sull'intero reattore, si richiedono per acquisire dati e *know-how* necessari ad un adeguato perseguimento di un progetto stabile, sicuro e duraturo. Di seguito saranno evidenziati gli aspetti ritenuti più critici [13] [14], relativamente al progetto di un reattore veloce al piombo:

- esperienza operativa limitata ad 80 anni-reattore (reattori militari di classe Alfa/Lira ed altri prototipi sovietici terrestri, refrigerati a LBE), con dati e feedback operativi di non libero accesso;
- esplosioni di vapore per vaporizzazione istantanea a seguito di contatto tra acqua del circuito secondario con il piombo refrigerante del circuito primario, con conseguente pressurizzazione del primario stesso e dispersione d'acqua all'interno della tanca reattore per trascinarsi in piombo: problematica di inserzione di reattività;
- possibilità di avere coefficiente di reattività da vuoto del piombo positivo in alcune regioni del nocciolo;
- possibilità del verificarsi di modificazioni geometriche al nocciolo (*core compaction*) con seguente inserzione di reattività positiva;
- aggressione chimica da parte del piombo ai metalli strutturali ed ossidazione degli stessi; conseguenti dispersioni di particelle all'interno del refrigerante primario;
- forte corrosione per sfregamento da piombo o da prodotti di corrosione sospesi in soluzione nel refrigerante, con possibilità di bloccaggio dei canali per ostruzione, a lungo termine;
- complessiva aggressione, da parte del piombo, al sistema di contenimento primario del combustibile (guaine delle barrette) ed analisi delle performance dei rivestimenti protettivi;
- controllo della chimica del piombo in termini di purificazione del refrigerante, ed in particolare del tenore di O₂;
- controllo del tenore di ²¹⁰Po, nel caso di utilizzo di LBE;
- diffusione e capacità di ritenzione dell'inventario isotopico in caso di frattura delle guaine e rilascio di radioattività dal combustibile al refrigerante;
- forti pesi connessi al piombo stesso ed alle strutture che devono sostenerlo: pericolo di rotture in caso di sollecitazioni sismiche particolarmente violente;
- l'impostazione *pool-type* del progetto più condurre, per le dimensioni della tanca reattore e la complessità dei suoi internals, a *flow patterns* inattesi per il refrigerante, con conseguenti interazioni e sollecitazioni impreviste;
- problematiche di *freezing* e bloccaggio di canali di deflusso del refrigerante, specie nella forma di piombo puro, avendo esso un elevato punto di fusione;
- il piombo è otticamente un refrigerante opaco, il che complica le operazioni di ispezione e manutenzione che devono essere condotte, visivamente, alla ceca.

Per avere un'idea più definita degli sforzi di ricerca e sviluppo attualmente in atto, è possibile riferirsi alla pubblicazione [14].

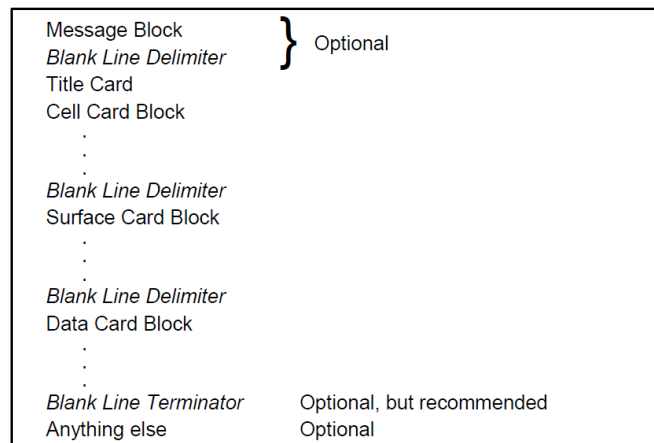


Figura 1.10: Schema della struttura di un file di input MCNP.

1.4 Strumenti utilizzati nello studio

Sebbene gli aspetti di strumentazione e controllo non rientrino esplicitamente tra gli sforzi primari di ricerca e sviluppo identificati dal GIF per la categoria LFR (paragrafo 1.3.3), il presente lavoro intende focalizzarsi proprio sulla strumentazione di monitoraggio e controllo del reattore, mostrando come i rivelatori attualmente disponibili in commercio possono risultare inadeguati alla sorveglianza del flusso neutronico in particolari condizioni. Lo studio ha richiesto un notevole sforzo di simulazione al computer, condotto attraverso il codice Monte Carlo per il trasporto di radiazione *MCNPX ver.2.7.0* [15], utilizzato in tutte le fasi del lavoro svolto.

1.4.1 Il codice di trasporto Monte Carlo MCNPX

MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended) è un codice di trasporto di radiazione realizzato per tracciare le possibili storie di diversi tipi di particelle in ampi range di energia [15] [16] [17]. Si tratta dell'ultima generazione nella serie di codici di trasporto Monte Carlo iniziata presso il *Los Alamos National Laboratory* (LANL, New Mexico, USA) circa sessanta anni fa. Originariamente, esso nasceva per i calcoli di criticità degli ambienti reattore; con il tempo si è arricchito di altre potenzialità, consentendo la generazione ed il trasporto di gamma, particelle cariche leggere e pesanti, nonché particelle subatomiche nelle versioni più recenti. Infatti, oltre alle particelle studiate originariamente dal codice (neutroni, anti-neutroni, fotoni, elettroni e positroni) è oggi possibile studiare il trasporto di moltissime altre particelle appartenenti alle famiglie di leptoni, barioni, mesoni, ioni leggeri e pesanti. Per quanto riguarda il trasporto di particelle neutre, MCNP può essere impiegato in uno dei tre modi seguenti: MODE N, solo trasporto neutronico; MODE P, solo trasporto fotonico; MODE N, P, trasporto "combinato" neutroni/fotoni, necessario quando i fotoni sono prodotti da interazioni neutroniche. Nell'ultima versione, il range di energia per i neutroni si estende da $10^{-11} \div 20 \text{ MeV}$, per i fotoni da $10^{-6} \div 100 \text{ GeV}$, per gli elettroni da $10^{-6} \div 1 \text{ GeV}$ [18].

L'utente crea un file di input che viene successivamente letto dal codice e che ha una struttura a tre macroblocchi, come riportato in Figura 1.10. Nel primo blocco, *cell cards*, si costruisce la geometria del problema, si associano i materiali ad i vari spazi e si specifica quali particelle s'intende trasportare in ciascuno spazio; nel secondo blocco, *surface cards*, si definiscono le superfici geometriche utilizzate nel primo blocco per la descrizione delle celle; nel terzo blocco si specificano le *data cards*, ovvero la composizione dei materiali, la geometria e le caratteristiche della sorgente, le *tallies* del problema, ovvero le richieste di output del calcolo che l'utente fa al codice.

1. Diffusione del neutrone con produzione di un fotone
2. Fissione con produzione di due neutroni e di un fotone
3. Cattura neutronica
4. Fuga del neutrone
5. Diffusione del fotone
6. Fuga del fotone
7. Cattura del fotone

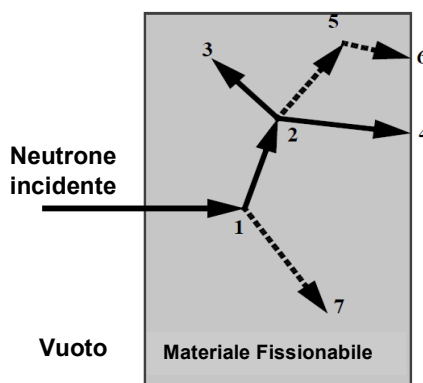


Figura 1.11: Rappresentazione schematica di una possibile storia di un neutrone incidente su un materiale fissionabile.

1.4.1.1 Il metodo Monte Carlo

Il metodo Monte Carlo può essere usato per simulare un processo statistico (come l'interazione di particelle nucleari con la materia) ed è particolarmente utile per problemi complessi di non agevole soluzione deterministica. I singoli eventi probabilistici che comprendono un processo sono simulati sequenzialmente, e le distribuzioni di probabilità che governano questi eventi sono campionate statisticamente per descrivere il fenomeno totale. La simulazione è effettuata tramite un calcolatore digitale poiché il numero di prove, le *storie*, necessario per descrivere adeguatamente il fenomeno dal punto di vista statistico è normalmente molto grande. La tecnica Monte Carlo viene applicata con successo nel campo del trasporto di particelle. Essa consiste nel seguire ciascuna particella proveniente dalla sorgente attraverso tutta la sua vita, dalla sua nascita alla sua "morte" causata da eventi quali assorbimento, fuga, ecc. In Figura 1.11 si riporta, a titolo di esempio, una possibile storia di un neutrone che entra in una cella di materiale fissionabile.

Le distribuzioni di probabilità sono casualmente campionate, utilizzando i dati di trasporto disponibili, per determinare gli eventi che guideranno ciascuna fase della vita della particella stessa. La Figura 1.11 rappresenta la storia di un neutrone incidente su una lastra di materiale che può subire fissione. Una generazione di numeri random compresi tra 0 e 1 consente di determinare la tipologia degli eventi e dove essi hanno luogo, tenendo conto di tutte le proprietà fisiche e delle probabilità che governano i processi e i materiali interessati. Nell'esempio in Figura 1.11, una collisione di un neutrone incidente avviene all'evento (1). Il neutrone è diffuso nella direzione mostrata, che è selezionata casualmente da una distribuzione fisica di scattering; in tale evento è prodotto anche un fotone, il quale viene temporaneamente immagazzinato per una analisi successiva. All'evento (2) avviene una fissione a cui corrisponde la morte del neutrone incidente e la nascita di due neutroni e un fotone. Un neutrone ed il fotone vengono immagazzinati per una successiva analisi. Il primo neutrone di fissione è catturato all'evento (3); il neutrone immagazzinato viene ora recuperato e fugge dalla lastra all'evento (4). Il fotone prodotto dalla fissione viene ora recuperato e subisce una collisione all'evento (5), fuggendo in corrispondenza dell'evento (6). Il fotone generato all'evento (1) viene recuperato e subisce una cattura in corrispondenza dell'evento (7). Generalmente, MCNP recupera le particelle accumulate in modo tale che l'ultima particella immagazzinata sia la prima ad essere ripresa. La storia del neutrone è ora completa, ed il codice è pronto per analizzare il fato del neutrone successivo, la cui storia risulterà certamente diversa.

Un analogo procedimento di campionamento statistico è posto in atto per tutte le fasi della storia della particella, per stimare i punti di sua interazione all'interno del mezzo, per scegliere con quale isotopo di esso avverrà l'interazione ed, inoltre, che tipologia di reazione avrà luogo.

Le distribuzioni neutroniche e fotoniche, ed il comportamento complessivo delle particelle, saranno conosciuti tanto meglio quante più storie verranno seguite ed esaminate. I valori

richiesti dall'utente al codice, le *tallies*, ovvero flussi di particelle, spettri, ratei di reazione, ecc., vengono fornite nel file di output da MCNP insieme a stime della precisione statistica (incertezza) dei risultati.

1.4.1.2 La specifica delle geometrie e dei materiali

L'unità fondamentale della descrizione geometrica nel codice MCNPX è la *cella*: un'arbitraria configurazione tridimensionale di materiali definiti dall'utente viene generalmente suddivisa in celle geometriche limitate da superfici, in un sistema di coordinate cartesiane. Le celle sono definite tramite l'intersezione, l'unione e il complemento di regioni limitate da superfici.

MCNPX usa 26 tipi diversi di superfici definite da equazioni di primo, secondo e quarto grado; tali superfici sono separate in sette classi: quattro piani, cinque sfere, sei cilindri, sei coni di uno o due falde, quadratiche il cui asse è parallelo ad un asse coordinato, quadratiche con asse non parallelo ad un asse coordinato, e un toro ellittico con un asse parallelo ad un asse coordinato. Tutte le superfici sono definite specificando i coefficienti appropriati dell'equazione o, in alcuni casi, fornendo punti noti sulla superficie stessa. MCNPX offre inoltre la possibilità di utilizzare i *macrobodies*, forme 3D di base come sfere, cubi, parallelepipedi, cilindri, ecc., che possono essere combinati utilizzando gli operatori booleani. Ogni superficie, numerata e definita tramite una specifica *surface card*, divide lo spazio in due regioni: una con senso positivo rispetto alla superficie stessa e una con senso negativo. La geometria di ogni cella è descritta nella cell card da una lista di operatori e numeri che identificano le superfici preceduti da un segno "+" (che può essere omissivo) o un segno "-", a seconda di quale delle due porzioni in cui la superficie divide lo spazio si vuole utilizzare per definire la cella. L'operatore intersezione in MCNPX è implicito, è semplicemente lo spazio vuoto lasciato tra i due numeri che definiscono le due superfici che si vogliono intersecare; l'operatore unione è invece rappresentato dal simbolo ":". L'operatore complemento si indica con "#" seguito dal numero della cella che si vuole escludere dalla cella che si sta definendo. Una volta identificato il volume "da riempire", il codice vi colloca all'interno un certo materiale specificato dall'utente, con una densità che viene definita cella per cella. Utilizzando le specifiche delle celle, MCNP segue le particelle attraverso la geometria. Il codice riconosce tutte le superfici limitanti una cella, calcola l'intersezione di una traiettoria di un percorso con ciascuna superficie limitante e trova la distanza percorsa. Se la distanza alla prossima collisione è più grande di tale minima distanza, la particella lascia la cella corrente; MCNP trova la cella corretta in cui la particella entrerà controllando il senso del punto di intersezione per ciascuna superficie elencata per la cella. Il processo si ripete finché la particella da seguire non viene assorbita causando una reazione o fugge dal sistema attraverso una *kill surface* oltre la quale MCNP smette di seguire le particelle, poiché -magari- si è entrati in una regione dello spazio di non interesse in merito al trasporto di radiazione.

Per quanto concerne i materiali e le librerie di dati nucleari, MCNP è dotato di librerie entro cui sono contenuti tutti i dati necessari per simulare il trasporto di particelle neutroniche, fotoniche o elettroniche attraverso qualsiasi materiale. Esistono cinque classi fondamentali di librerie di dati disponibili nel codice MCNPX:

1. librerie di dati relativi a reazioni di interazioni neutroniche caratterizzate da uno spettro di energia continuo;
2. librerie di dati relativi a reazioni di interazioni neutroniche caratterizzate da uno spettro di energia discreto;
3. librerie di dati relativi a reazioni di interazioni fotoniche;
4. librerie di dati relativi a reazioni di interazioni neutroni - fotoni (MODE N P, quando fotoni sono prodotti da interazioni neutroniche);
5. librerie di dati relativi a reazioni di interazioni di elettroni.

Nei problemi con neutroni, una libreria di dati relativa a reazioni di interazioni neutroniche è richiesta per ciascun isotopo di ciascun elemento presente nel problema simulato. Per alcuni

elementi esiste una libreria che identifica direttamente la composizione isotopica naturale. I dati contenuti in tali librerie comprendono sezioni d'urto, informazioni sulle distribuzioni angolari di neutroni diffusi, Q -valore di ciascuna reazione, informazioni per isotopi fissionabili (numero medio di neutroni per fissione), ecc., il tutto anche a diverse temperature per alcuni isotopi. Un gruppo di dati nucleari viene, generalmente, valutato analizzando le sezioni d'urto misurate sperimentalmente e combinando i risultati ottenuti con i valori generati da calcoli basati su modelli nucleari nel tentativo di estrarre le più accurate informazioni di sezioni d'urto. Le sorgenti principali di dati relativi a reazioni di interazioni neutroniche e utilizzate nel codice MCNP sono la *ENDF/B, Evaluated Nuclear Data File*, la *ENDL, Evaluated Nuclear Data Library* e la *AWRE, Atomic Weapons Research Establishment*.

Nei problemi con fotoni, la selezione delle librerie è più semplice, e non risulta necessario fare una specifica isotopo per isotopo.

Le librerie per effettuare la simulazione di interesse sono specificate, nell'input, nella *Mn: Material Card*, ove si riporta la definizione dei materiali utilizzati nel problema. Tale definizione viene esplicitata nella forma: *ZZZAAA.nnX*, dove *ZZZ* è il numero atomico, *AAA* è la massa atomica, *nn* è il numero identificativo della libreria e *X* è la classe dei dati (*C* per neutroni caratterizzati da spettro di energia continua, *D* per neutroni caratterizzati da spettro di energia discreto, *P* per fotoni, ed *E* per elettroni).

1.4.1.3 La specifica di sorgente e la *kcode*

Originariamente MCNP disponeva di quattro tipi standard di geometrie di sorgente: puntiforme, superficie sferica, distribuzione uniforme in una cella di volume e piana. La sorgente puntiforme e quella di volume a distribuzione uniforme isotrope, la sorgente a superficie sferica con distribuzione cosinusoidale, la sorgente piana monodirezionale. Nelle versioni più recenti, ed in particolare nella *2.7.0*, le sorgenti possono essere specificate in forma e direzione di emissione le più svariate. Sono disponibili, inoltre, varie distribuzioni standard di energia e tempo i cui coefficienti possono essere specificati. Queste includono funzioni analitiche per gli spettri di energia di fissione e fusione come ad esempio gli spettri di Watt, di Maxwell o di Gauss o la distribuzione di Gauss per il tempo. Distribuzioni di probabilità indipendenti possono essere specificate direttamente dall'utente, per variabili di sorgente quali: energia, tempo, posizione e direzione, e per altri parametri come le celle o le superfici da cui partono le particelle. Una subroutine SOURCE (da scrivere nel sorgente d'installazione e compilare con il codice sulla macchina ove s'intende operare) è inclusa in MCNP: essa permette all'utente di creare una sorgente a proprio piacimento, qualora non si riesca con le specifiche standard.

Per quanto concerne il calcolo di criticità di un insieme contenente fissile, esso è realizzato attraverso la *kcode*: si tratta dello scopo primario per cui nasce MCNP. Le altre caratteristiche descritte prima sono venute a seguire.

Il codice MCNPX permette di calcolare gli autovalori k_{eff} della equazione del trasporto neutronico e le vite medie di rimozione sia per sistemi sottocritici sia per quelli sopracritici, e gli associati errori relativi. Il calcolo di k_{eff} viene eseguito stimando il numero medio di neutroni di fissione prodotti in una generazione per neutrone di fissione iniziale. Una generazione è la vita di un neutrone dalla nascita, nell'evento di fissione, fino alla morte per fuga, cattura o altri simili fenomeni. Poiché neutroni di fissione vengono "uccisi" in ciascuna generazione per fornire la sorgente per la generazione successiva, una singola storia può essere continuata e seguita di generazione in generazione.

1.4.1.4 L'output di MCNP: la tally

Le "*tally cards*" vengono impiegate per specificare quale tipo di informazione l'utente vuole ottenere dai calcoli Monte Carlo. Sei tipi di tally per neutroni, sei per fotoni e cinque per elettroni sono disponibili in MCNP come card standard; tutti tali tipi di tally sono normalizzati per particella sorgente, ovvero il risultato è diviso per il numero di particelle, *nps*, lanciate nel calcolo. In Tabella 1.4 sono riportati i vari tipi di tally e la corrispondente descrizione.

Le tally fondamentali possono essere modificate, utilizzando opportuni parametri, per ottenere grandezze diverse da quelle precedentemente citate. È possibile ottenere anche tally segmentate in una cella o su una superficie impiegando superfici addizionali che non fanno parte della geometria del problema, attraverso la tecnica delle *mesh tally*. È possibile anche effettuare somme di tally su celle e superfici, combinando tally elementari.

Nel caso in cui la tally desiderata non sia disponibile come una tally standard MCNP, l'utente può definire la propria richiesta mediante una subroutine TALLYX che fornisca le grandezze desiderate. Anch'essa va scritta nel sorgente d'installazione e compilata insieme a codice.

Ciascuna tally è stimata secondo l'impostazione data dall'equazione 1.3.

$$\bar{x} = \sum_i \frac{x_i}{n} \quad (1.3)$$

dove x_i è il risultato della i -sima storia della tally, mentre n è il numero totale di storie. L'errore relativo stimato (RE) di \bar{x} è dato dall'equazione 1.4

$$RE = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_i x_i^2}{(\sum_i x_i)^2} - \frac{1}{n}} \quad (1.4)$$

dove x_i e x_i^2 vengono calcolati alla fine di ciascuna storia per tener conto del fatto che i vari contributi ad una tally dalla stessa storia sono correlati. L'errore relativo è stampato di default da MCNP per ciascuna tally. L'esperienza ha mostrato che vengono generati intervalli di confidenza attendibili per la tally quando l'errore relativo RE associato alla stessa è minore di 0,10. Poiché RE^2 è proporzionale a $1/n$, e il tempo T utilizzato dal computer per risolvere il problema è proporzionale ad n , una *Figura di Merito*, FOM , per una tally è definita mediante l'equazione 1.5.

$$FOM = \frac{1}{RE^2 T} \quad (1.5)$$

Attraverso la FOM è possibile comprendere l'efficienza della tally. Infatti, tally più efficienti saranno caratterizzate da una FOM più grande. Tale parametro è, dunque, utile per confrontare il comportamento statistico del problema e della tally quando vengono utilizzate diverse tecniche di riduzione della varianza (descritte nel paragrafo 1.4.1.5). La FOM dovrebbe essere approssimativamente una costante per ciascuna tally in un problema e costituisce anche un buon indicatore di attendibilità del risultato di tally desiderato. Inoltre, la FOM può essere impiegata per stimare la quantità di tempo di calcolo T richiesto per raggiungere un valore desiderato per l'errore relativo RE .

1.4.1.5 Migliorare la statistica: tecniche di riduzione della varianza

Uno dei principali problemi nell'uso di una tecnica Monte Carlo per modellare un problema statistico è la disponibilità di potenza di calcolo e tempo macchina. Non è inverosimile che, per ottenere risultati con buona precisione nei problemi più complessi siano necessari tempi di calcolo nell'ordine di $100'000 \div 300'000 h \cdot core$, con tempi di diverse settimane, in relazione alla potenza di calcolo disponibile.

Una grande quantità di "tempo macchina" può essere sprecata per seguire eventi non importanti o statisticamente non significativi per raggiungere il risultato desiderato. È importante, dunque, concentrare, in qualche modo, l'attenzione sugli aspetti importanti di un dato problema, senza sprecare tempo sugli eventi non significativi. Le *tecniche di riduzione della varianza*

Tally	Descrizione	Unità
F1: <particle designator>	corrente integrata su una superficie	[<i>particles/nps</i>]
F2: <particle designator>	flusso medio su una superficie	[<i>particles/cm²/nps</i>]
F4: <particle designator>	flusso medio su una cella	[<i>particles/cm²/nps</i>]
F5: <particle designator>	flusso in un punto o in "ring detector"	[<i>particles/cm²/nps</i>]
F6: <particle designator>	energia media depositata su una cella	[<i>MeV/g/nps</i>]
F7:N	energia media di fissione depositata su una cella	[<i>MeV/g/nps</i>]
F8: <particle designator>	distribuzione energetica degli impulsi creati in un rivelatore da una radiazione per deposizione in un cella specifica	[<i>pulses/nps</i>]
*F8: <particle designator>	deposizione integrale di energia in un cella specifica	[<i>MeV/nps</i>]
+F8: <particle designator>	deposizione integrale di carica in un cella specifica	[<i>charge/nps</i>]

Tabella 1.4: Descrizione delle tally più comunemente utilizzate in MCNPX ver.2.7.0. Il <particle designator> è la lettera con cui MCNP identifica la particella seguita nella tally; *nps* è il numero totale di storie lanciate nel calcolo, secondo cui il risultato della tally è normalizzato.

hanno questo obiettivo: riducono, appunto, la varianza (il quadrato della deviazione standard) mantenendo invariato il tempo di calcolo T necessario per risolvere un determinato problema. Il codice MCNP è ricco in tecniche di riduzione della varianza. Tali strumenti di calcolo rendono possibile all'utente il migliorare il campionamento degli eventi statistici nelle regioni di interesse e, al tempo stesso, ridurre gli sforzi realizzati per seguire eventi non importanti in regioni di non interesse.

Alla base dei metodi di riduzione della varianza c'è il concetto di peso della particella. Per simulare il trasporto di un grande numero di particelle fisiche non è necessario seguirle tutte; piuttosto, è necessario seguire il campione più statisticamente significativo di storie all'interno di un problema. A ciascuna storia è assegnato un peso che rappresenta il numero di particelle fisiche considerate. In un determinato momento del cammino ("random walk") della particella, essa sarà divisa ("split") in N tracce purché il peso corrispondente sia diviso per N . Alternativamente, essa può essere uccisa con probabilità $1/N$ ("Russian Roulette") purché il peso delle particelle che sopravvivono sia moltiplicato per N .

Tutte le tecniche di riduzione della varianza operano inserendo un grande numero di particelle di basso peso in regioni di interesse e un piccolo numero di particelle di alto peso in regioni non importanti dello spazio. I principali metodi di riduzione della varianza disponibili in MCNP vengono di seguito descritti.

- **Geometric splitting e roulette russa:** la geometria è divisa in un certo numero di regioni geometriche, o celle, a ciascuna delle quali è assegnata, dall'utente del codice, una importanza di cella. Nel metodo *geometric splitting*, le particelle che entrano in una cella di più alta importanza vengono divise in più tracce aventi minor peso, mentre particelle che attraversano una regione di più bassa importanza subiscono la *roulette russa*, ossia parte di esse vengono eliminate, ma quelle che sopravvivono sono caratterizzate da un peso più alto.
- **Weight cutoff:** un peso minimo viene specificato in ogni regione geometrica al di sotto del quale le particelle subiscono la *roulette russa*. Tale tecnica evita la perdita di tempo nel seguire particelle di basso peso e, dunque, non significative.
- **Implicit capture e analog capture:** quando una particella collide con un nucleo, c'è una probabilità che essa venga catturata dal nucleo. Nella modalità *analog capture* la

particella viene uccisa con quella probabilità. Nella modalità *implicit capture* la particella non viene mai eliminata per cattura: il suo peso, invece, è ridotto dalla probabilità di cattura a ciascuna collisione.

- **Exponential transform:** per trasportare particelle attraverso lunghe distanze, la distanza fra le collisioni nella direzione preferenziale è artificialmente aumentata mentre il peso viene corrispondentemente artificialmente diminuito. Poiché ciò conduce spesso a grandi fluttuazioni di peso, è preferibile utilizzare tale tecnica insieme ad un altro metodo di riduzione della varianza, il *weight window*, il quale agisce nel senso di tenere i pesi delle particelle in una determinata finestra di energia o posizione geometrica.

Esistono molti altri metodi di riduzione della varianza, oltre a quelli esposti, tutti egualmente validi. Il loro corretto uso può aumentare l'efficienza del calcolo e decrescere il tempo macchina, ma necessitano di essere usate in maniera cauta e con senso critico, poiché se da un lato possono aumentare la precisione del calcolo, può anche capitare che ne riducano l'accuratezza, se sono mal utilizzate. Possono rappresentare, tuttavia, un ottimo espediente per la risoluzione di difficili problemi con il metodo Monte Carlo, quando la potenza o il tempo di calcolo risultano limitati.

1.4.2 L'infrastruttura CRESCO di ENEA

Le risorse di calcolo ed il relativo supporto tecnico in questo lavoro sono stati forniti dall'infrastruttura HPC CRESCO/ENEAGRID ed il suo staff [19]. CRESCO (*Computational RESearch center for COmplex system*) è stato fondato da ENEA insieme al Ministero dell'Università e della Ricerca, nell'ambito di progetti di ricerca sia di carattere nazionale che europeo (http://www.cresco.enea.it/english_for_information).

Il laboratorio HPC di ENEA fa parte del Dipartimento delle Tecnologie Energetiche e della divisione ICT e le risorse di calcolo sono dedicate all'Agenzia e le sue attività progettuali. Le risorse economiche di sviluppo provengono da Progetti PON ed Europei.

Le risorse di calcolo offerte all'utenza sono attualmente i sistemi Linux x86_64 (i cluster CRESCO ~ 9000 *cores*) e sistemi speciali dedicati (es. *GPU/PHI*). Le risorse sono distribuite su 6 Centri di Ricerca ENEA, tra cui Portici è il sito principale.

Al 2015, il sistema constava di:

CRESCO2: 84 nodi, 672 *cores* Intel Nehalem, Westmere 16 GB RAM;

CRESCO3: 84 nodi, 2016 *cores* AMD Interlagos, 64 GB RAM;

CRESCO4: 304 nodi, 4864 *cores* Intel SandyBridge, 64 GB RAM.

Oggi aggiunge anche la sezione speciale CRESCO5 con 640 *cores* Haswell, 5 nodi a grande memoria (768 GB RAM), 4 nodi con coprocessori Intel PHI e Nvidia K40, Storage DDN SFA7700 e TapeLibrary estesa a ~ 2 PB [20].

Il sistema *CRESCO HPC* è costituito da alcune migliaia di core di calcolo, divisi in quattro grandi sezioni. Una sezione è dedicata alle applicazioni che richiedono grande quantità di memoria, una sezione dedicata alle applicazioni altamente scalabili e una terza sezione sperimentale dedicata alle applicazioni computazionali. Le principali aree operative su cui opera il sistema rientrano in:

- fluidodinamica della combustione;
- chimica computazionale;
- simulazioni climatiche;
- analisi della diffusione degli inquinanti nell'atmosfera;
- tecnologie nucleari;

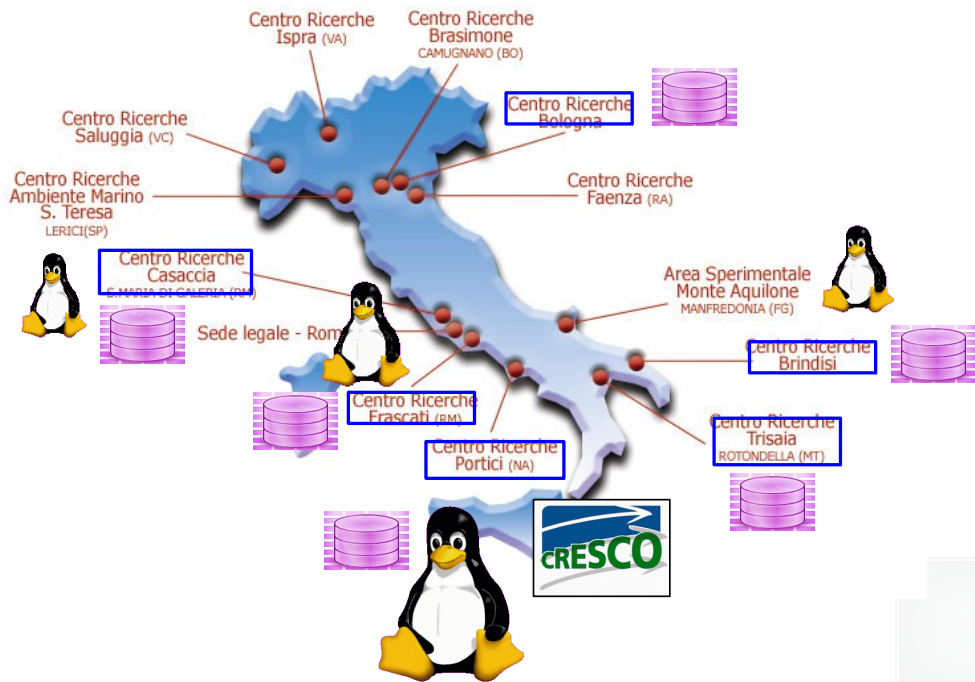


Figura 1.12: Distribuzione del sistema CRESCO sul territorio nazionale.

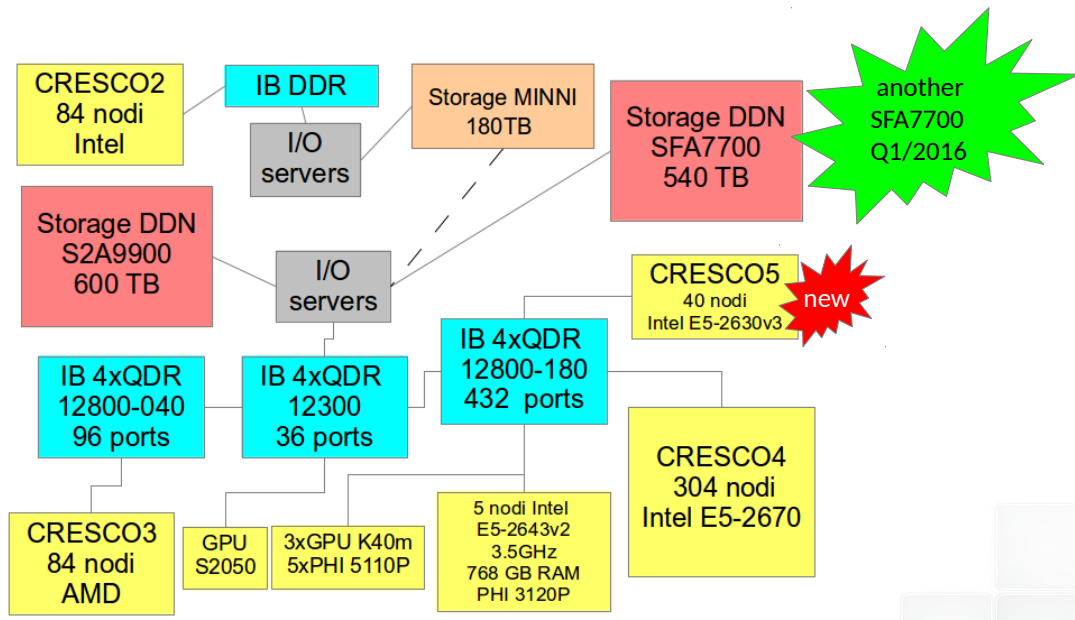


Figura 1.13: Struttura a blocchi ed interconnessioni del sistema CRESCO.

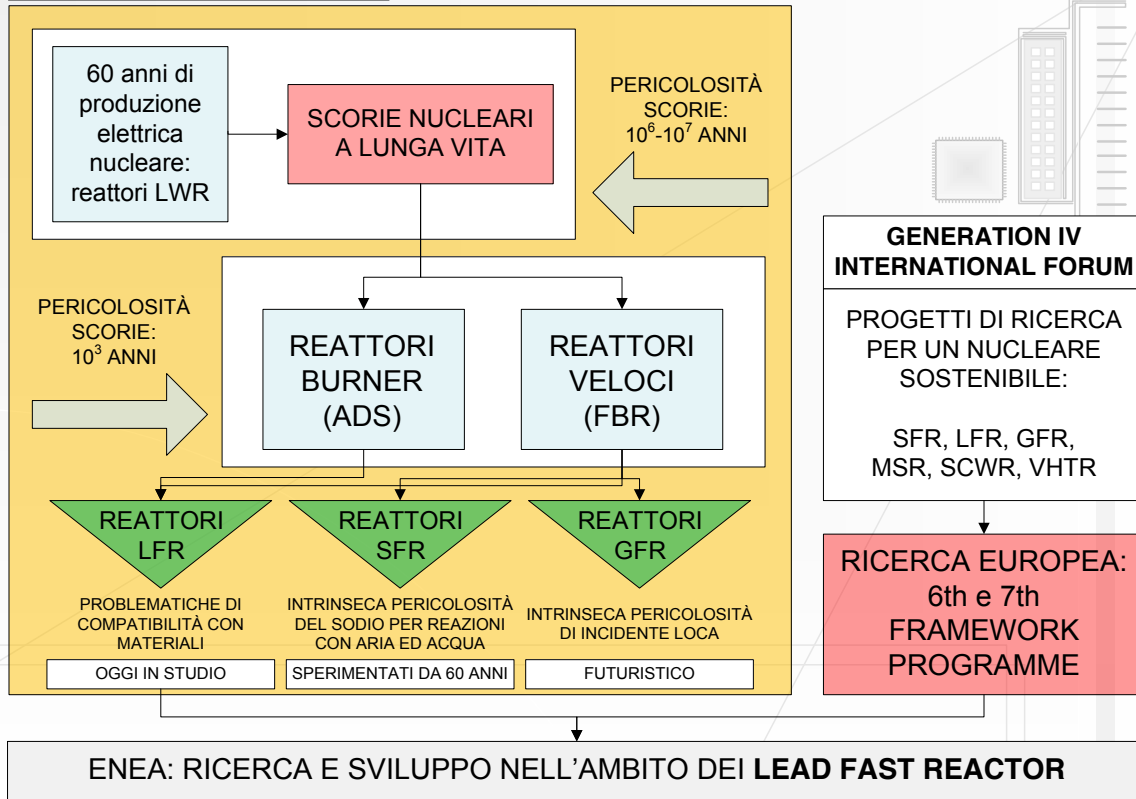
- fluidodinamica per l'aerospazio;
- fisica della fusione nucleare;
- bioinformatica;
- sistemi complessi.

Il sistema CRESCO HPC è integrato in ENEA-GRID, un'infrastruttura che è stata sviluppata per fornire un ambiente unificato per tutte le principali risorse ENEA HPC. Per accedere a ENEA-GRID è necessario essere autorizzati e possedere credenziali di accesso.

1.5 Organigramma del lavoro svolto

Di seguito si presenta il contesto dell'attività in cui si è inserito questo dottorato, mostrando attraverso uno schema di flusso la sequenza dei passi logici seguiti e le interconnessioni tra le diverse parti del lavoro condotto.

CONTESTO DELL'ATTIVITÀ



IL MIO STUDIO DI DOTTORATO

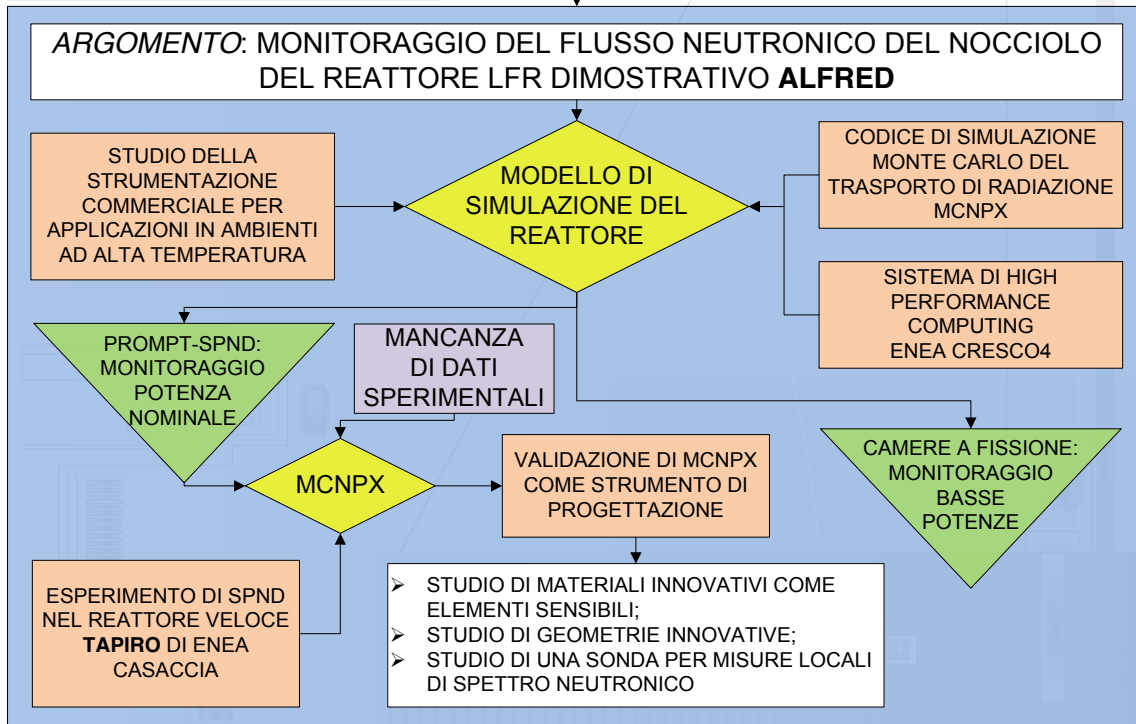


Figura 1.14: Organigramma del lavoro svolto.

Capitolo 2

Il termine sorgente: il reattore LFR dimostrativo ALFRED

ALFRED nasce come prototipo in scala ridotta di ELFR (*European Lead Fast Reactor*), il dimostrativo LFR di taglia industriale in studio nel panorama europeo. Si tratta di un reattore da $300 MW_{th}$ e $125 MW_{el}$, dal progetto compatto, con il primario obiettivo di contenere i costi e dimostrare la fattibilità della tecnologia. Per ridurre il rischio d'investimento, si è protesi verso un disegno semplice, con componenti facilmente rimovibili per sostituzione e manutenzione, operante alle temperature più basse possibili consentite dal piombo refrigerante.

I notevoli costi d'investimento in un impianto nucleare richiedono che siano ridotti al minimo le incertezze ed i ritardi di realizzazione, perché l'investimento diventi produttivo nei tempi previsti, ripagandosi e facendo guadagnare, dopo un certo tempo di recupero, gli investitori. Come dimostrativo di potenza ridotta, ALFRED ha anche questo ruolo strategico, oltre alla responsabilità di dimostrare la fattibilità effettiva e l'affidabilità della tecnologia LFR.

Per perseguire gli obiettivi detti, ALFRED è concepito sì come un reattore dimostrativo, ma di taglia ragguardevole, il più vicino possibile all'obiettivo di lungo termine, il reattore ELFR, adottando soluzioni tecniche già note e provate, e quindi meno rischiose.

2.1 ALFRED: Advanced Lead Fast REactor Demonstrator

Di seguito si riporta una descrizione delle caratteristiche generali del progetto del reattore [21]. Tali dati sono stati di enorme ausilio alla modellazione MCNPX presentata nel prossimo paragrafo.

Il sistema si configura di tipologia *pool-type*: il refrigerante primario del reattore, così come tutti i componenti che lo elaborano (canali, pompe e scambiatori di calore), sono contenuti nel *reactor vessel*. Il piombo "freddo" entra nell'*inner vessel* dal basso, risale riscaldandosi lungo le barrette di combustibile e si raccoglie nel plenum caldo, immediatamente sopra il nocciolo. Qui, 8 canali di aspirazione ai corpi pompa immettono il refrigerante caldo nella parte alta dei generatori di vapore. Il piombo scende verso il basso trasferendo calore ai tubi a baionetta (al cui interno scorre acqua) e va raffreddandosi, fino a raccogliersi nel plenum inferiore del reattore (che comunica con l'ingresso dell'*inner vessel*), ove il circolo ricomincia. Tabella 2.1 riporta alcuni dati generali dell'impianto. Figura 2.1 mostra uno spaccato che identifica i principali componenti e la loro disposizione all'interno del reactor vessel: in particolare, le frecce identificano il percorso del refrigerante.

Potenza termica [MW_{th}]	300
Potenza elettrica [MW_{el}]	~ 125
Massimo <i>burn-up</i> previsto [$MWd/kg_{heavy\ metal}$]	100
Refrigerante primario	piombo puro
Volume stimato del refrigerante primario [m^3]	~ 416
Tipologia di concezione del primario	pool type
Circuito primario: condizioni normali condizioni d'emergenza	circolazione forzata circolazione naturale
Reactor vessel	Austenitic SS altezza: 10.725 m diametro interno: 8 m
Safety vessel	ingloba il reactor vessel
Inner vessel	altezza: 9.7 m diametro interno: 3,3 m
Temperatura ingresso nocciolo [$^{\circ}C$]	400
Temperatura uscita nocciolo [$^{\circ}C$]	480
Temperatura normale di esercizio delle guaine del combustibile [$^{\circ}C$]	550
Numero degli elementi di combustibile	171, esagonali e inscatolati, 57 nocciolo interno, 114 nocciolo esterno; passo: 13,86 mm
Combustibile, MOX (PuO_2+UO_2)	pellet forate internamente, diametro interno 2 mm, diametro esterno 9 mm; altezza attiva 60 cm
Barrette di combustibile	127 per elemento; guaina: diametro interno 9,3 mm, diametro esterno 10,5 mm
Macchina di refuelling	non prevista internamente al vessel
Generatori di vapore	8 fasci di 542 tubi a baionetta, ciascuno con corpo pompa integrato. Per singolo generatore: $\dot{m}_{Pb} = 3247,5\ kg/s$; $\dot{m}_{acqua} = 24,1\ kg/s$
Ciclo termico secondario	vapore surriscaldato, 180 bar
Efficienza del ciclo termico [%]	$\sim 44,7$
Temperatura acqua-vapore (in-out) [$^{\circ}C$]	335-450
Pressione acqua-vapore (in-out) [bar]	188-182
<i>Decay Heat Removal system</i>	2 sistemi separati e ridondanti al 100%, equipaggiati ciascuno con 4 <i>Isolation Condenser</i> collegati direttamente ai generatori di vapore

Tabella 2.1: Dati tecnici generali del reattore LFR Dimostrativo ALFRED.

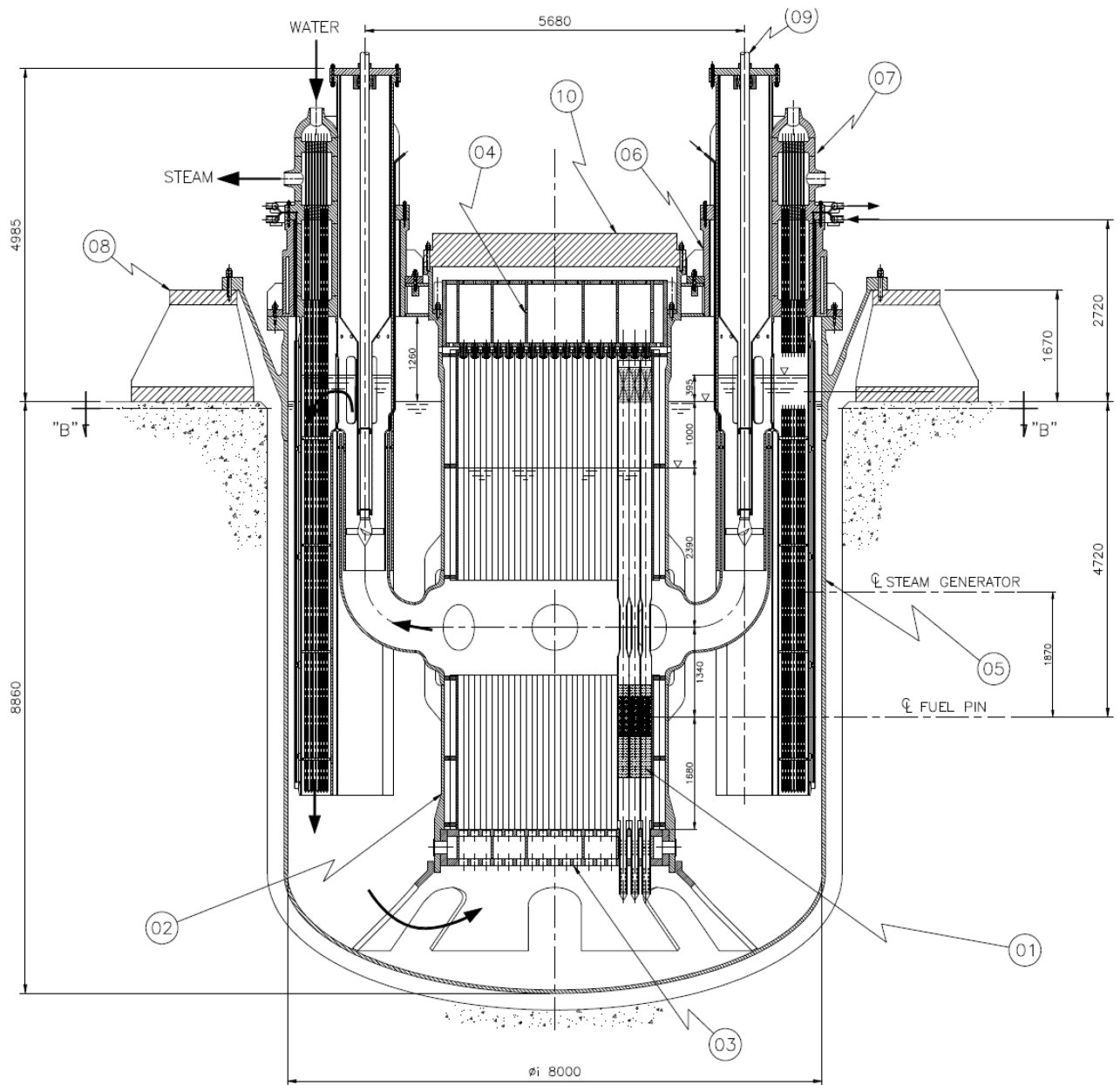


Figura 2.1: Sezione verticale del reattore LFR Dimostrativo ALFRED: (01) elementi di combustibile; (02) inner vessel; (03) griglia di sostegno del nocciolo; (04) griglia superiore; (05) reactor vessel; (06) coperchio del reattore; (07) generatori di vapore; (08) sostegno meccanico del vessel; (09) pompe primarie; (10) piastra di copertura degli elementi di combustibile.

2.1.1 Elementi della progettazione del nocciolo

Il principio che ha guidato la progettazione del nocciolo del reattore si è identificato in soluzioni tecniche che promuovessero la circolazione naturale, con l'obiettivo di massimizzare il "*grace period*" in caso di incidente LOFA (*Loss Of Flow Accident*), allontanando il pericolo di criticità ed inserzione di reattività positiva per effetto di vuoto del refrigerante. Il compromesso raggiunto risulta, geometricamente, in un'altezza attiva di 60 cm con un diametro attivo di ~ 210 cm, rifornito di combustibile MOX (*Mixed OXides*, ossidi misti di U e Pu) con frazione $(Pu)/(Pu+U) < 30\%$.

Nella progettazione, i seguenti requisiti sono stati rispettati:

- le temperature di ingresso e uscita del refrigerante al nocciolo risultano rispettivamente 400 °C e 480 °C: tali valori sono stati scelti per contenere l'infragilimento delle guaine e delle strutture bagnate dal piombo caldo, ed inoltre contenere anche la corrosione chimica e fisica. Il collettore freddo presenta comunque un sufficiente margine dal pericolo di congelamento e bloccaggio del refrigerante;
- la velocità del refrigerante primario è fissata a 2 m/s. Tale accorgimento è necessario a prevenire fenomeni di erosione. All'ingresso dell'impeller della pompa primaria, la velocità risulta 10 m/s.

Lo schema di caricamento del nocciolo (Figura 2.9) consta di 171 elementi di combustibile suddivisi in due regioni a diverso arricchimento in fissile, 12 barre di regolazione (B_4C come assorbitore neutronico), 4 barre di spegnimento d'emergenza (B_4C come assorbitore neutronico) ed una cintura di 108 elementi riflettori (contenenti $ZrO_2-Y_2O_3$).

Gli *assembly* di ALFRED sono costituiti dalle seguenti sezioni (Figura 2.2):

- lo *spike*, ovvero il perno che si innesta nella griglia di base che sostiene il nocciolo: le perforazioni sulla sua superficie consentono l'ingresso del piombo dal *cold plenum* alla parte inferiore dall'elemento;
- la *scatola inferiore*, vuota per la prima porzione e riempita poi dei fasci di barrette di combustibile e dei fasci delle barrette di materiale riflettore;
- il *funnel*, in corrispondenza della fuoriuscita del piombo caldo degli elementi di combustibile. Esso è sostanzialmente una strizione, con un "naso" deflettore che aiuta il direzionamento del flusso del piombo refrigerante. Nella parte superiore esso recupera le dimensioni della base e si innesta nella scatola superiore;
- la *scatola superiore*, elemento strutturale sopra l'*hot plenum*, che ospita semplicemente il pelo libero di piombo interno all'*inner vessel*;
- il *ballast*, ovvero la zavorra in tungsteno che mantenere in posizione gli elementi durante la fase di ricarica, quando il coperchio dell'*inner vessel* è rimosso;
- la *molla di carico*, che tiene in corretta posizione l'elemento di combustibile e riflettore durante l'esercizio del reattore, quando è necessario controbilanciare anche la spinta idrodinamica del refrigerante che sale dal basso verso l'alto, consentendo comunque l'espansione termica assiale.

Ogni elemento di combustibile è costituito da 127 barrette fissate alla scatola dell'elemento di combustibile mediante una griglia. Uno schema della barretta è fornito in Figura 2.3. Il *gas plenum* -destinato ad ospitare i prodotti di fissione gassosi che si formano durante il "consumo" dell'elemento di combustibile- è posto in basso, più vicino cioè al *cold plenum*. L'altezza attiva è formata da una colonna di 60 pellet, in cima alle quali è posto un elemento elastico. Le pellet del combustibile sono forate al centro: questo espediente serve a contenere la temperatura massima possibile ed inoltre ridurre l'ampiezza delle escursioni termiche durante i transitori di potenza, anche quelli non previsti o accidentali. Il numero e la tipologia delle griglie distanziatrici e di

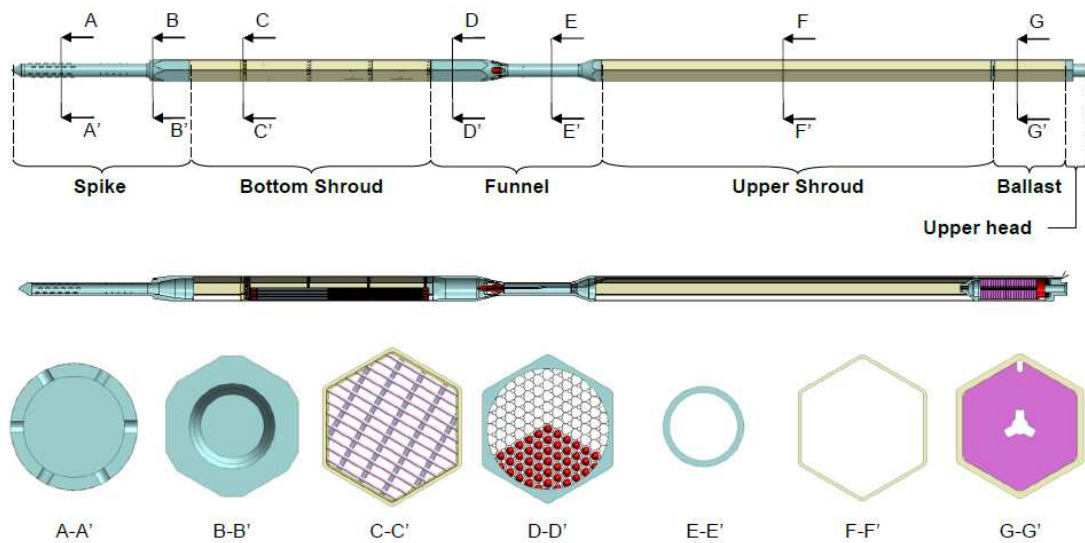


Figura 2.2: Struttura di un elemento di combustibile del reattore ALFRED.

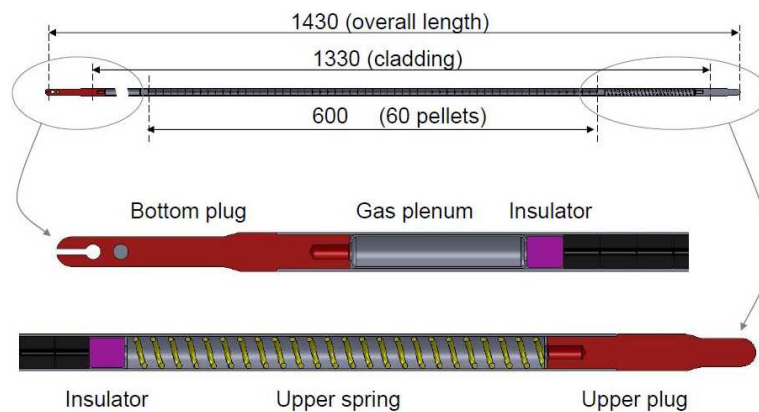


Figura 2.3: Struttura di una barretta di combustibile del reattore ALFRED.

sostegno dei fasci di barrette sono ottimizzate per tenere conto delle perdite di carico e delle vibrazioni.

In merito ai sistemi di controllo della criticità, il reattore può contare su un *sistema di controllo normale* costituito da 12 barre di controllo. Esse si inseriscono dal basso verso l'alto per spinta di galleggiamento: il sistema elettromagnetico attivo che regola l'altezza delle barre di controllo di normale esercizio, le tiene dunque ancorate nella parte bassa del reattore, immediatamente sotto il nocciolo. In caso di emergenza, il sistema viene disenergizzato e le barre penetrano naturalmente nel nocciolo; quando le pompe sono in funzione, la penetrazione è favorita anche dalla spinta idrodinamica del refrigerante. Per quanto riguarda il *sistema di controllo d'emergenza*, 4 barre di sicurezza sono poste immediatamente al di sopra dell'altezza attiva, in posizione centrale: in caso di necessità, tali barre di controllo sono pneumaticamente spinte all'interno dello nocciolo (in caso di perdita d'alimentazione elettrica, un contrappeso meccanico funge da mezzo di inserzione).

2.1.2 Ciclo termico secondario

Il circuito primario di raffreddamento del reattore è costituito dai generatori di vapore, che attivano il ciclo termico secondario, e dai blocchi pompa che si innestano direttamente su

ciascuno degli scambiatori. Il monoblocco generatore di vapore-pompa è progettato per essere il più compatto possibile, al fine di ridurre il diametro della tanca reattore. Sia lo scambiatore che la pompa sono facilmente rimovibili per ispezione e/o riparazione.

A ciascun generatore di vapore compete una potenza di scambio termico di $37,5 MW$. Gli 8 generatori di vapore sono collocati sul coperchio anulare di reattore e distanziati angolarmente di 45° . La pompa primaria è installata lato caldo ed è di tipo assiale, con la sua aspirazione che pesca direttamente dall'*hot plenum*, mediante uno dei bracci dell'*inner vessel*: la girante è immersa nel piombo caldo mentre il motore è installato sul coperchio del reattore, il tutto meccanicamente collegato da un opportuno rotore.

Il piombo elaborato dalla pompa è sospinto verso la cima del generatore di vapore: qui, entra nello scambiatore e scende verso il basso, lambendo i tubi a baionetta, dentro cui scorre acqua. Ogni generatore di vapore consiste in 542 tubi a baionetta, lunghi $6 m$ ciascuno, completamente immersi in piombo. Un singolo tubo è costituito da 4 tubi concentrici:

- **slave tube**: al suo interno scorre l'acqua sotto-raffreddata, che scende verso la parte bassa dello scambiatore;
- **inner tube**: esso definisce un'intercapedine con lo *slave tube*. Questa intercapedine è riempita con un isolatore termico che impedisce all'acqua sotto-raffreddata di iniziare a bollire nel tubo di discesa;
- **outer tube**: nell'intercapedine definita tra l'interno di questo tubo e l'*inner tube* scorre l'acqua in salita, che va via via trasformandosi in vapore;
- **outermost tube**: definisce con l'*outer tube* un'intercapedine riempita di particelle solide ed elio gassoso in pressione, che ha il compito di favorire lo scambio termico fra il piombo che lambisce esternamente l'*outermost tube* e l'acqua in ebollizione.

Secondo lo schema precedentemente mostrato, la rottura del tubo più esterno (in contatto con il piombo) non causerebbe contatto con l'acqua secondaria, per via della presenza dell'*helium gap*. Inoltre, il monitoraggio della pressione del cuscinetto di elio gassoso darebbe un'indicazione tempestiva circa la rottura o la fessurazione dell'*outer* o dell'*outermost tube*, visto che l'acqua primaria si trova a $180 bar$ mentre il primario del reattore è a non più di qualche *bar*. Specifiche tecniche più dettagliate possono trovarsi in Figura 2.4.

Per quanto concerne il ciclo termico di potenza, si tratta di un impianto convenzionale costituito da due turbine -una di alta e una di bassa pressione- entrambe con tre spillamenti che alimentano il tronco di preriscaldamento ed il degasatore. Il condensatore, una pompa per l'estrazione del condensato ed una pompa di alimento (entrambe ridondate) completano il ciclo.

2.1.3 Il Decay Heat Removal system

Il sistema di rimozione del calore di decadimento (*Decay Heat Removal, DHR*) consiste in due sistemi passivi, ridondanti e indipendenti:

- il primo DHR è costituito da quattro *Isolation Condenser, IC*, connessi (uno per scambiatore) direttamente con 4 dei generatori di vapore, lato secondario. Il sistema è dimensionato per resistere al criterio del *single failure*, quindi tre scambiatori sono comunque sufficienti a rimuovere il calore di decadimento;
- il secondo DHR è costituito da quattro IC connessi (uno per scambiatore) con gli altri 4 generatori di vapore, lato secondario. Anche in questo caso il criterio del *single failure* implica che tre scambiatori siano sufficienti a rimuovere il calore di decadimento.

I sistemi di rimozione del calore di decadimento sono considerati sistemi di sicurezza, per cui non sono utilizzati durante il normale esercizio del reattore. La separazione fisica dei due sistemi è raggiunta mediante la disposizione degli stessi in due località fisiche diverse. Inoltre ciascun IC è protetto da quello adiacente mediante delle barriere che non consentono la propagazione

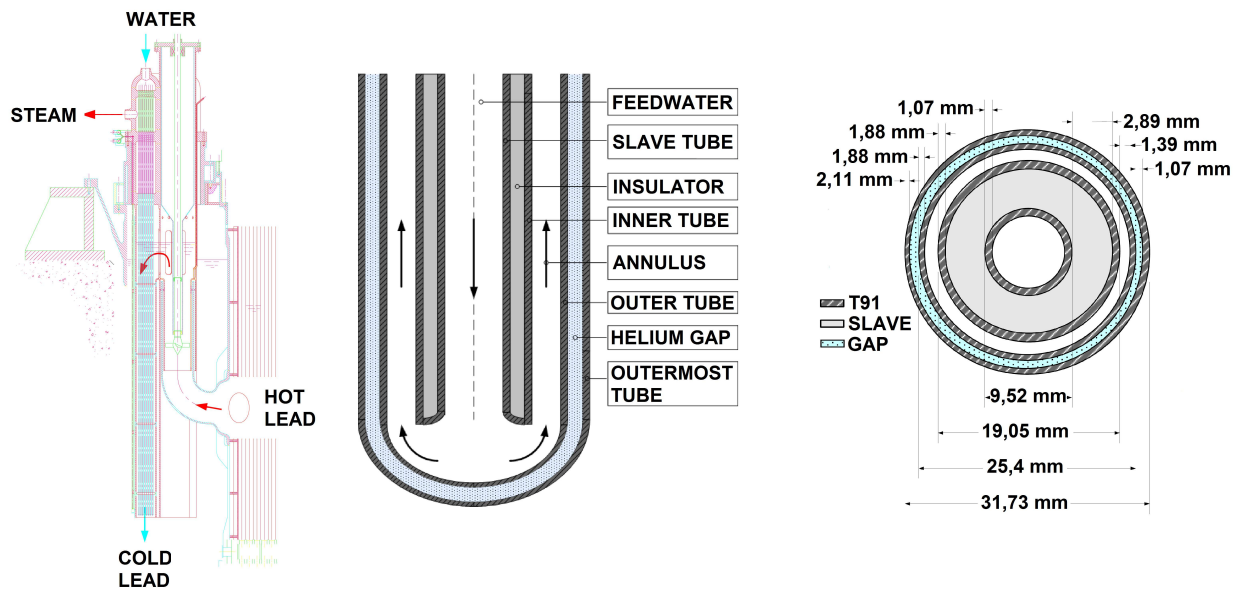


Figura 2.4: A sinistra: schema concettuale di uno dei generatori di vapore di ALFRED. Al centro e a destra: dettagli costruttivi di un tubo a baionetta.

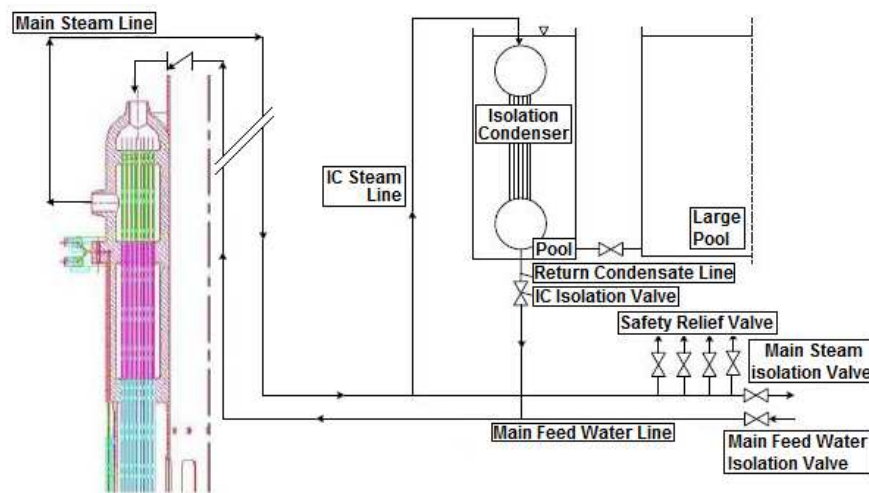


Figura 2.5: Schema di concetto del sistema passivo di rimozione del calore di decadimento. L'*isolation condenser* è posto più in alto del generatore di vapore nella realtà impiantistica per garantire il trasferimento di calore per circolazione naturale.

di *common cause failures*. Entrambi i sistemi sono completamente passivi; è attiva solo la loro entrata in servizio mediante l'attuazione di una valvola d'isolamento che è alimentata diverse fonti di energia, tra loro ridondanti. La logica di attuazione dei sistemi di rimozione del calore di decadimento prevede che entri in funzione il primo, e solo nel caso del fallimento del primo, entri in funzione il secondo. In ogni caso non più di quattro IC alla volta sono utilizzati, poiché l'eccessivo raffreddamento del piombo primario del reattore ne causerebbe la solidificazione.

Ogni *Isolation Condenser* è indipendente. Esso consiste in:

1. uno scambiatore di calore, costituito da un fascio verticale di tubi connessi ad un collettore superiore ed uno inferiore;
2. una piscina d'acqua dove l'*Isolation Condenser* è immerso; il quantitativo d'acqua contenuto nella piscina è sufficiente a garantire la rimozione del calore di decadimento per tre giorni consecutivi;
3. una valvola d'isolamento del sistema.

Ogni IC è connesso direttamente ad uno dei generatori di vapore: il collettore superiore dello scambiatore è connesso direttamente alla linea di vapore ad alta pressione fuoriuscente dal reattore mentre il collettore inferiore è connesso alla *main feed water* dello stesso generatore. In normale esercizio la valvola d'intercettazione al di sotto del condensatore, quindi tra il collettore inferiore dell'IC e la linea *main feed water* è chiusa, il condensatore è pieno d'acqua e non avviene scambio termico. Nel momento in cui il sistema è chiamato a funzionare, le linee acqua-vapore del generatore di vapore vengono intercettate. La valvola d'intercettazione del condensatore viene aperta e l'acqua sottoraffreddata contenuta nell'IC per spinta idrostatica è drenata verso il generatore di vapore; qui s'innescia la produzione di vapore per raffreddamento del piombo primario e s'innesta un fenomeno di circolazione naturale.

2.1.4 Strutture meccaniche

L'*Inner Vessel* è la prima struttura affacciata al nocciolo. Esso ha due funzioni principali: i) fare da sostegno agli elementi di combustibile; ii) separare fisicamente l'*hot plenum* dal *cold plenum*. È sostanzialmente composto da un corpo cilindrico, una piastra di base e un coperchio superiore. La piastra inferiore presenta una struttura forata nella quale si innestano i piedi degli elementi di combustibile e della cintura degli elementi riflettori. La piastra superiore, invece, monta gli elementi elastici che mantengono gli *assembly* leggermente schiacciati sulla griglia di base, per contrastare la spinta idrodinamica del refrigerante che sale dal basso verso l'alto. Alla periferia, l'*Inner Vessel* è composto da una doppia parete, quella esterna di sostegno, quella interna come profilo per mantenere in posizione gli *assembly*. Esso poggia sul corpo conico alla base della tanca reattore. In corrispondenza della mezza altezza assiale, l'*Inner Vessel* presenta un plenum di forma toroidale dal quale si diramano gli otto bracci d'aspirazione diretti alle pompe primarie.

La tanca reattore assume forma cilindrica, con il fondo di superficie toro-sferica; una gonna conica, posta nella parte superiore, costituisce l'accoppiamento meccanico con le strutture di sostegno civili. Le dimensioni della tanca sono tali da ospitare adeguatamente, e con possibilità di facile smontaggio, tutti i componenti del circuito primario. Essa presenta uno spessore uniforme di 50 mm con una maggiorazione localizzata in corrispondenza dell'attacco della gonna. Il recipiente reattore non ha perforazioni: tutti gli ingressi e le uscite per i fluidi di scambio, i sistemi ausiliari e di sicurezza sono posti nella parte superiore, ovvero nel coperchio del vessel.

Nella parte inferiore della tanca si appoggia un corpo conico che costituisce il sostegno per l'*Inner Vessel*: tale corpo è perforato per consentire l'ingresso del piombo freddo alla griglia inferiore di sostegno del nocciolo, attraverso cui il refrigerante penetra negli elementi di combustibile e raggiunge la parte attiva dove si scalda.

Un guscio d'acciaio che riveste il "pozzo" reattore costituisce il *Safety Vessel*. Esso è raffreddato dallo stesso sistema di raffreddamento della struttura in calcestruzzo che circonda reattore. Il gap presente fra la tanca reattore ed il *Safety Vessel* risulta sufficiente per la penetrazione

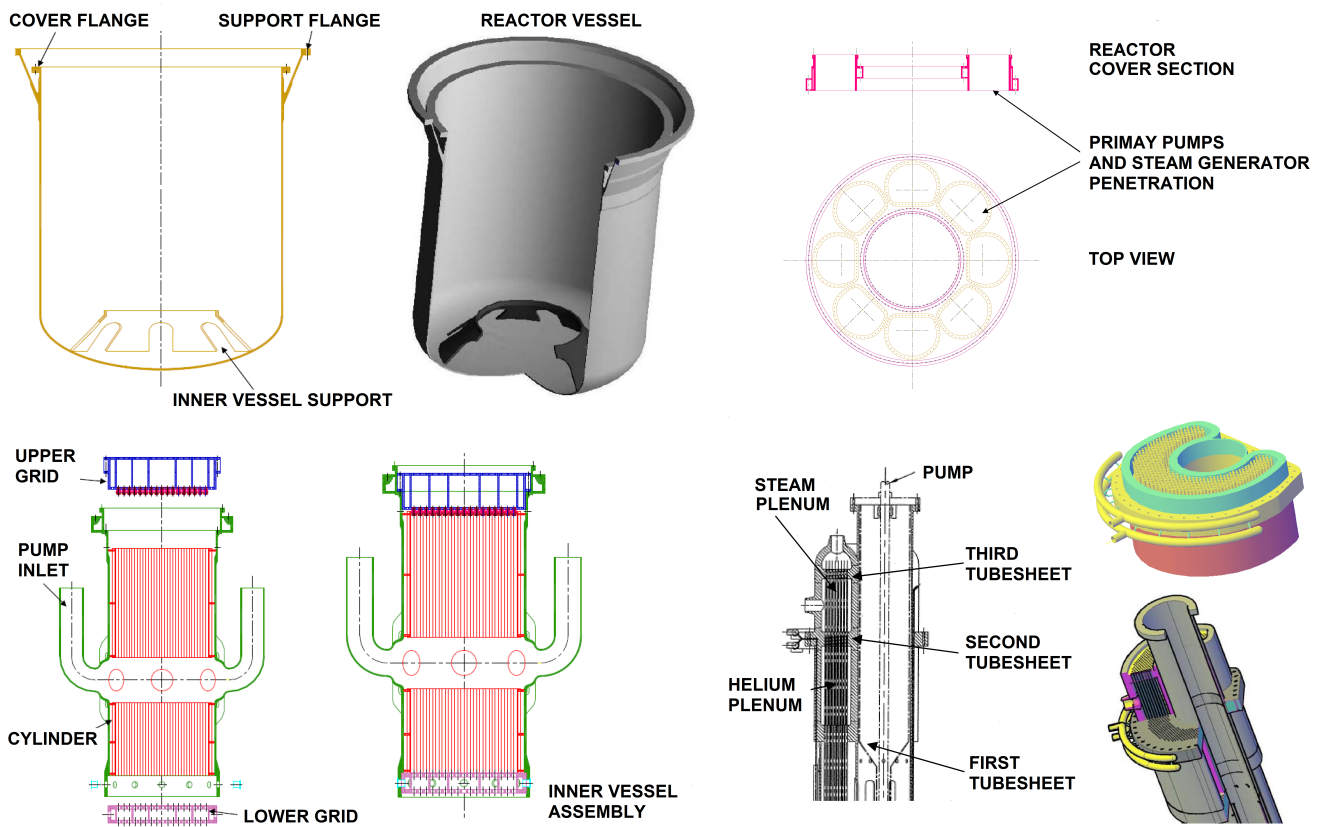


Figura 2.6: I componenti strutturali fondamentali di ALFRED: tanca reattore (alto, a sinistra); coperchio reattore (alto, a destra); *Inner Vessel* (basso, a sinistra); blocco generatore di vapore-pompa primaria (basso, a destra).

di tutti i sistemi di monitoraggio dell'ispezione delle strutture (*In Service Inspection*, ISI), il cui scopo è quello di mantenere elevati standard di sicurezza durante tutte le fasi di esercizio dell'impianto. L'adozione di questo doppio contenimento mitiga le conseguenze di un eventuale perdita di piombo dal contenimento primario: una fuoriuscita di piombo sarebbe raccolta nel *Safety Vessel* proteggendo quindi il calcestruzzo e consentendo alle macchine ISI di rilevarne la presenza in tempi ragionevoli. Inoltre, il *Safety Vessel* sarebbe in grado di sostenere anche le perdite più significative dal primario del reattore, senza che il livello del piombo all'interno della tanca primaria cali in maniera significativa, scoprendo porzioni essenziali di nocciolo e scambiatori di calore, proteggendo dal pericolo di blocco dello scambio termico e della circolazione del refrigerante.

Al fine di ridurre gli effetti delle componenti orizzontali dei terremoti, il *Reactor Vessel* appoggia su isolatori sismici della tipologia 2D.

Il coperchio anulare del reattore supporta tutte le componenti di scambio termico del circuito primario. In particolare, ad esso sono ancorati i generatori di vapore e le pompe primarie. Il grande foro centrale si accoppia all'*Inner Vessel*. Proprio su quest'ultimo si accoppia un coperchio secondario che è l'unico ad essere rimosso nella fase di ricarica nel combustibile.

2.2 Il modello MCNPX del reattore ALFRED

Il reattore ALFRED è stato modellato all'interno di MCNPX ad un livello di dettaglio molto spinto, simulandone tutte le componenti del nocciolo e gli internals, con esclusione dei corpi pompa e del coperchio di reattore. Tale livello di dettaglio si ritiene funzionale all'approfondito studio che si vuole condurre, visto che la popolazione neutronica e lo spettro energetico del flusso neutronico sono influenzati sia dal nocciolo del reattore che dalle strutture intorno ad esso.

I dati necessari alla modellazione si basano su un modello analogo a quello sviluppato all'interno del Progetto LEADER [22] [23].

La Figura 2.8 riporta lo spaccato del reattore all'interno di MCNPX, mentre la Figura 2.9 mostra un dettaglio della sezione verticale degli elementi costituenti il nocciolo ed una mappa dello stesso.

L'accesso alle risorse di calcolo dei cluster *ENEA-CRESCO4* è stato di fondamentale importanza per le simulazioni riguardanti la geometria del reattore. Estrarre dalla simulazione degli spettri neutronici con sufficiente significatività statistica ha richiesto tempi di calcolo molto elevati, nell'ordine di $300\,000 h \cdot core$, senza applicare tecniche di riduzione della varianza. L'estensione e la complessità dell'input (attualmente lungo circa 50'000 righe) non consente la visualizzazione completa del reattore in Figura 2.8 all'interno del *Visual Editor* di MCNP.

La simulazione della reazione di fissione a catena attraverso la routine *kcode* del codice richiede che il reattore sia critico per poter essere confidenti circa i risultati che possono essere estratti attraverso le tally. La necessità di ottenere $k_{eff} = 1$ ha comportato, nella simulazione, la ricerca della configurazione critica attraverso la movimentazione delle barre di controllo. Essendo le *Safety Rods* a progetto sempre estratte in funzionamento normale del reattore, il controllo fine della criticità è affidato al sistema delle *Control Rods*; la quota nominale individuata per l'interfaccia $B_4C/(ZrO_2-Y_2O_3)$ delle *CRs* è 18,75 cm al di sotto della quota superiore dell'altezza attiva del nocciolo, come mostrato in Figura 2.7. Al fine di ottenere dei risultati reali in termini di flussi neutronici, ratei di reazione, ecc., si è inoltre proceduto a normalizzare il modello alla potenza nominale del reattore, $300 MW_{th}$. Il fattore di normalizzazione calcolato è stato ottenuto attraverso una simulazione da cui sono stati estratti i valori di ν e k_{eff} riportati in Tabella 2.2; con la composizione del combustibile e i valori medi dei *Q-valori* di reazione, si hanno tutti i dati per calcolare il fattore di normalizzazione attraverso l'equazione 2.1.

$$C = \frac{P \cdot \bar{\nu}}{k_{eff} \cdot \bar{E}_{fiss}} = 2,99545 \cdot 10^{19} s^{-1} \quad (2.1)$$

Q-valore di reazione di fissione mediato [MeV]	Potenza del reattore [MW]	resa media neutroni di fissione, [n/fissione]	fattore di moltiplicazione [-]
$\bar{E}_{fiss} = 183,078$	$P = 300$	$\bar{\nu} = 2.92418$	$k_{eff} = 0.99843$

Tabella 2.2: Coefficienti utilizzati per il calcolo del fattore di normalizzazione delle tally calcolate dalla simulazione del reattore ALFRED.

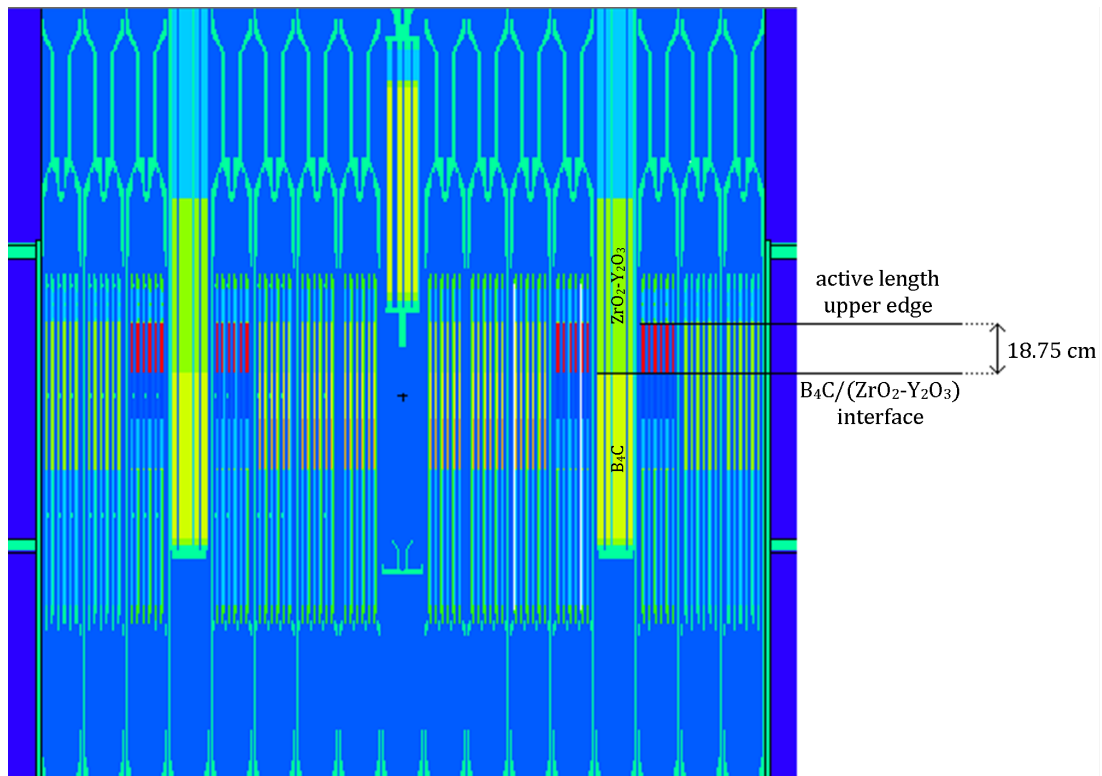


Figura 2.7: Posizione delle Control Rods in configurazione critica nel modello del reattore ALFRED utilizzato in simulazione.

Tale fattore è stato inserito come moltiplicativo per le tally di MCNPX al fine di ottenere un valore di flusso neutronico *assoluto* nel senso che sia un valore compatibile con gli ordini di grandezza che si verificherebbero nella realtà. Il flusso neutronico è stato qui valutato, sia in termini spettrali che integrato in energia, solo nelle posizioni d'interesse per l'installazione della strumentazione in-core. È teoricamente possibile lo studio di qualsiasi altra posizione, anche nelle strutture *ex-core*, ma in questa sede si è preferito concentrarsi sulla strumentazione in prossimità del nocciolo, essendo questo tipo d'installazione la più critica. Di seguito si descrivono dapprima i punti in cui si è valutato il flusso neutronico e, successivamente, si riportano gli spettri calcolati.

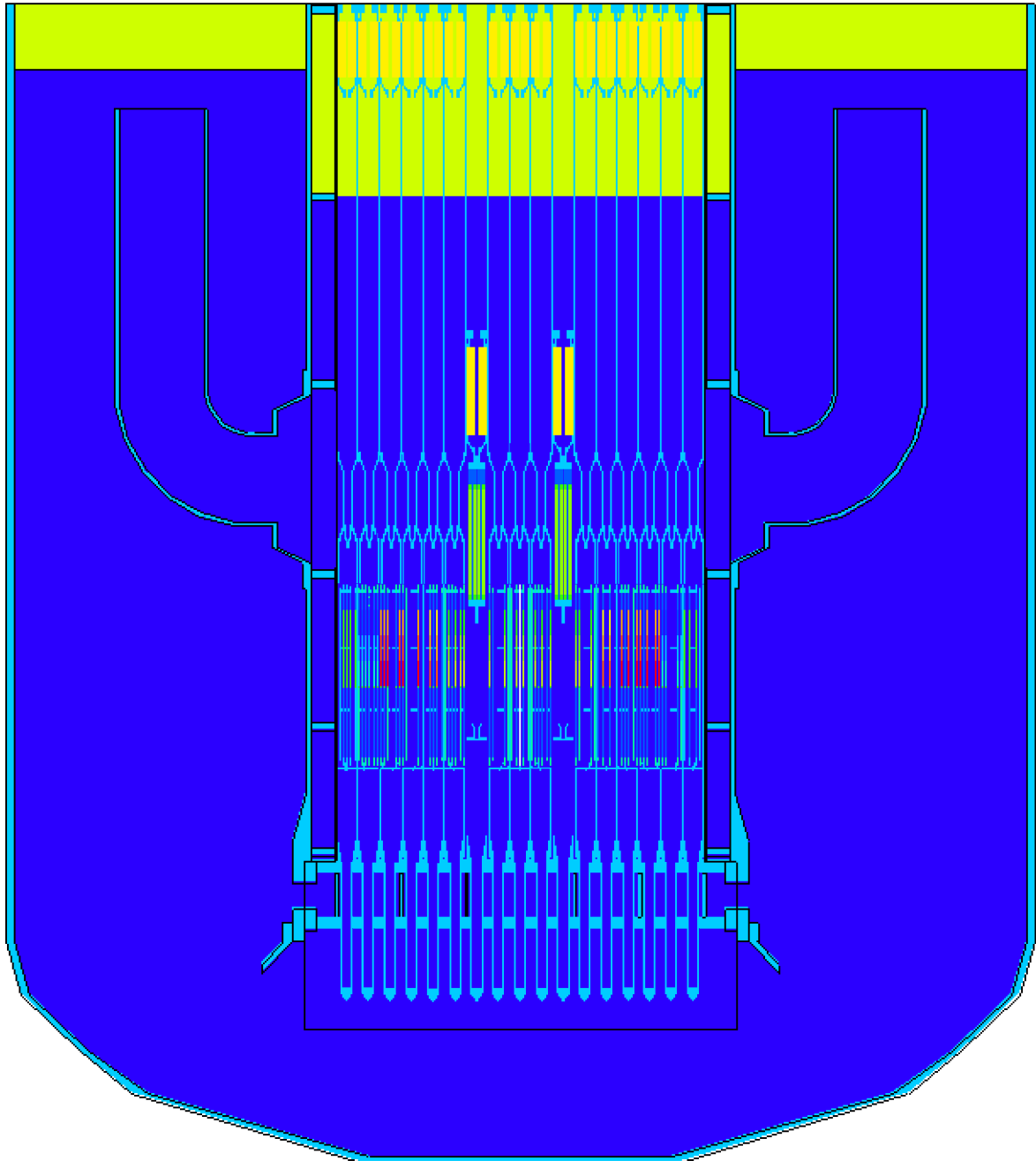


Figura 2.8: Sezione verticale del reattore LFR Dimostrativo ALFRED. Per esigenze di visualizzazione, i generatori di vapore non sono riportati.

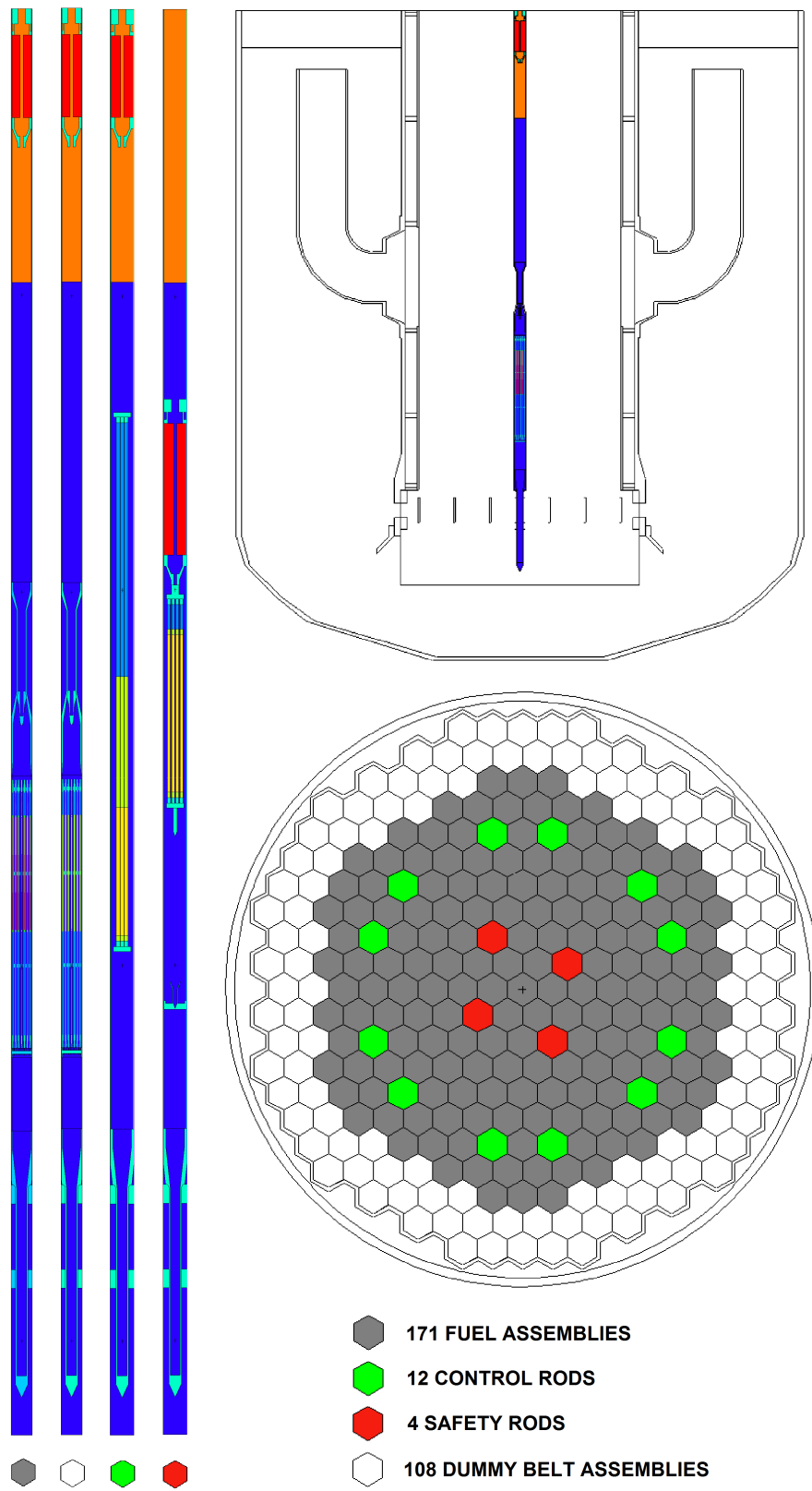


Figura 2.9: ALFRED: sezione verticale degli elementi del reattore. A partire da sinistra, il combustibile, il riflettore, la barra di controllo, la barra di sicurezza. In basso a destra la mappa degli elementi nella vista in pianta del nocciolo.

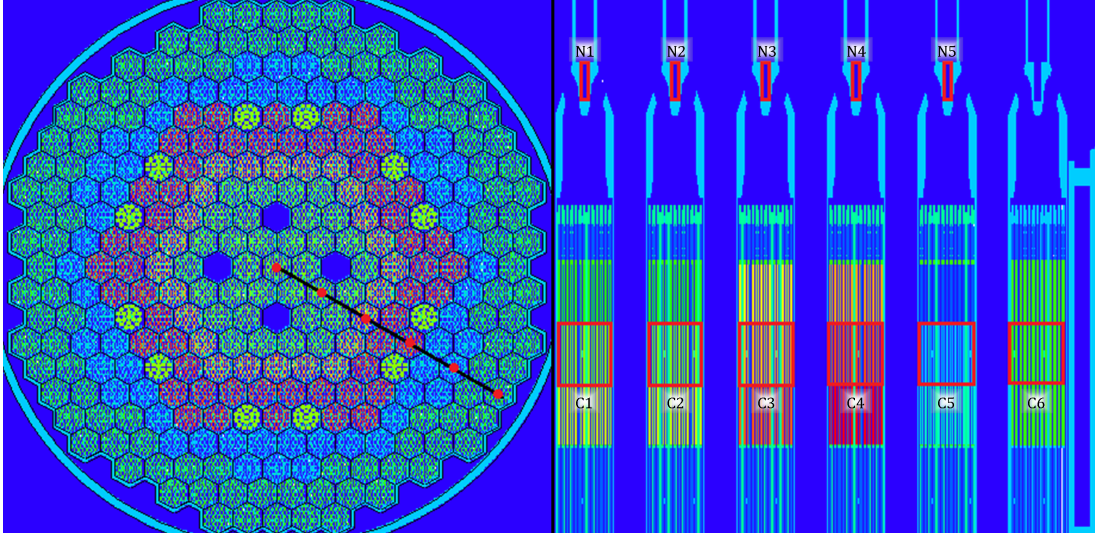


Figura 2.10: Posizioni di reattore in cui si è calcolato lo spettro ed il flusso neutronico per mezzo di MCNPX. L'elemento #1 corrisponde al centro del reattore.

2.2.1 Posizioni indagate per l'installazione della strumentazione neutronica

Nella prima versione del modello MCNPX del reattore ALFRED sono state indagate 11 posizioni per l'installazione della strumentazione neutronica, come riportato in Figura 2.10, opportunamente disposte in due traverse radiali, in corrispondenza del piano mediano di nocciolo e del piano medio dei *noses* degli elementi di combustibile. Al fine di ottenere un risultato statisticamente significativo si è impostata la *tally f4* sul combustibile nella forma di *repeated structure*, e quindi si è calcolato un flusso mediato su tutto su tutto l'elemento analizzato, come riportato anche graficamente in Figura 2.10. Per quanto concerne i *noses* si è impostata una *tally f4* a riempire tutto il volume disponibile nel cavo. Le posizioni investigate sono state numerate in progressione dall'interno verso l'esterno, con prefisso 'C' per il piano mediano di nocciolo e con il prefisso 'N' per il piano corrispondente ai *noses*. Avendo fissato come obiettivo del calcolo un flusso neutronico molto discretizzato sulla base delle energie (binning per le tally di $1 \div 10 \text{ eV}$), al fine di vedere molto bene gli effetti locali delle sezioni d'urto dei materiali sul suo andamento energetico, dopo vari tentativi, non si è riusciti nell'impresa a causa della potenza limitata delle risorse di calcolo disponibili, che avrebbero imposto dei run sperimentali lunghi qualche mese ciascuno. Questo limite è stato, in un primo momento, superato sfruttando la capacità di MCNPX di moltiplicare, internamente al codice, una *tally f4* per una sezione d'urto, fornendo in output direttamente la media della sezione d'urto microscopica della reazione (usata dal rivelatore per contare i neutroni) pesata sullo spettro, nella posizione indagata.

$$\int_E \varphi(\vec{r}, E) \cdot \sigma_i(E) dE = \int_E p(\vec{r}) \psi(E) \cdot \sigma_i(E) dE = \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \int_E p(\vec{r}) \psi(E) dE \quad (2.2)$$

Con riferimento all'equazione 2.2, si sono calcolati i valori locali mediati sull'energia della sezione d'urto, $\bar{\sigma}_i(\vec{r})$, uno per ciascuna posizione d'interesse (\vec{r}), mediando nella variabile energia E la sezione d'urto sul fattore di forma, $\psi(E)$, del flusso neutronico locale, $\varphi(\vec{r}, E)$. MCNPX consente agevolmente di ottenere (anche con limitate risorse di calcolo) i valori $\bar{\sigma}_i(\vec{r})$, in luogo dello spettro vero e proprio, poiché l'informazione sulla distribuzione energetica della popolazione neutronica è condensata in un unico valore di sezione d'urto, statisticamente più significativo.

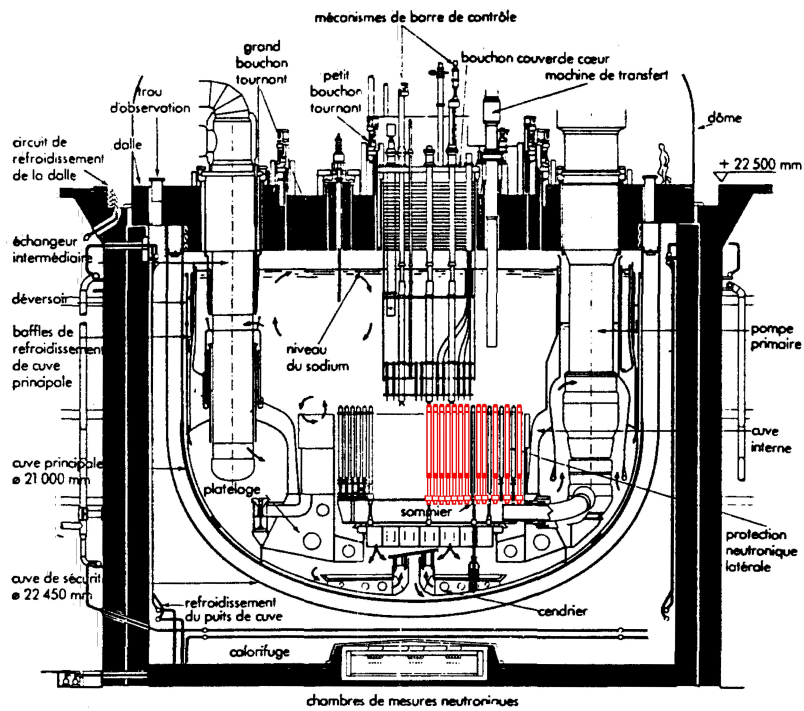


Figura 2.11: Spaccato del reattore Super-Phénix 2. In evidenza i canali per l'introduzione della strumentazione *in-core*.

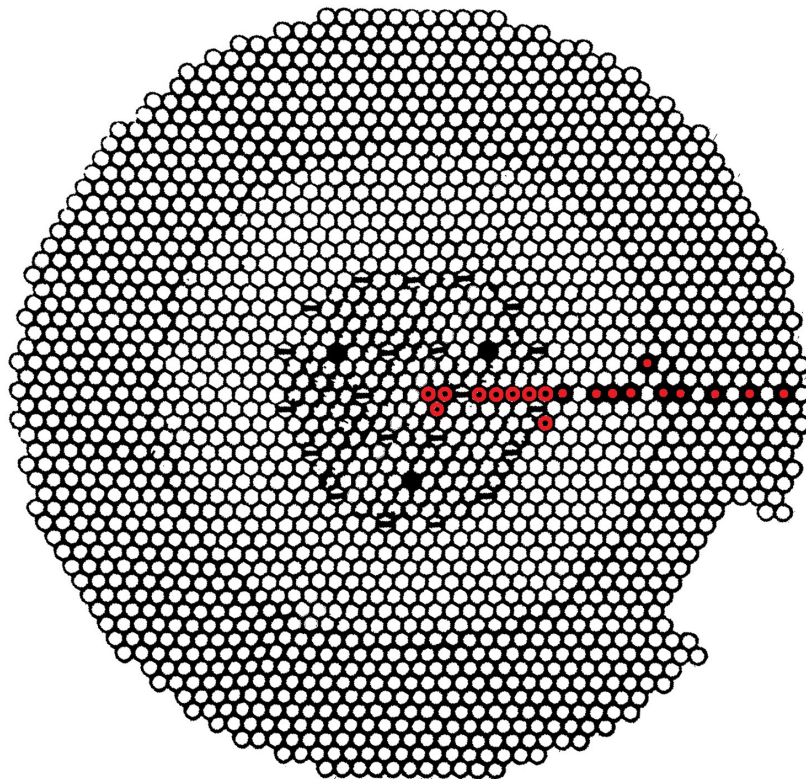


Figura 2.12: Configurazione sperimentale della traversa radiale di misura del reattore SPX2: in rosso i diversi canali di introduzione delle sonde.

L'avvento della disponibilità delle ampie risorse di calcolo fornite dal *Progetto ENEA CRESCO* ha consentito di poter superare i limiti di calcolo esposti in precedenza, approdando ad un calcolo più raffinato, da cui sono stati ricavati direttamente gli spettri neutronici corrispondenti alle posizioni d'interesse per l'installazione della strumentazione di monitoraggio.

In merito al posizionamento dei monitori neutronici, nuovi studi hanno mostrato la necessità di strumentare diversamente il nocciolo di ALFRED, visto che le dinamiche neutroniche dei reattori LFR non beneficiano di una larga esperienza sperimentale come per i SFR: approfondimenti sulla cinetica neutronica, compensati con la pratica sperimentale, sono auspicabili. A tal proposito, è opportuno provvedere a disporre la strumentazione dentro e fuori il nocciolo in posizioni *strategiche*.

Nell'esperienza sperimentale dei reattori *SuperPhénix* (SPX), diverse "guide di neutroni" erano previste per la mappatura del nocciolo, sia come strumentazione di misura vera e propria che canali sperimentali in-core per l'introduzione di sonde di attivazione per misure assolute di flusso [24]. Il reattore SPX1 era inizialmente provvisto di sola strumentazione *ex-core*, composta da rivelatori ad ^3He e camere a fissione disposte al di fuori del vessel, sotto la tanca reattore e sui lati. Dalle prime prove di avviamento del reattore apparve evidente la difficoltà nel monitoraggio del reattore allo shutdown, poiché il sistema non riusciva a "contare" quanto previsto a progetto. Per superare il problema, un secondo sistema di monitoraggio neutronico fu introdotto all'interno del vessel al fine di:

1. monitorare il caricamento del combustibile (alla prima carica) dai primi 7 elementi in poi;
2. monitorare il movimento delle barre di controllo allo *shutdown*;
3. monitorare la reattività durante i test di start-up a potenza "0" e calcolare il "peso" delle barre di controllo;
4. fornire il reattore di un ulteriore sistema di strumentazione per il monitoraggio della potenza nominale.

Tale sistema si componeva essenzialmente di camere a fissione, essendo queste l'unica strumentazione utilizzabile nel campo termico del sodio refrigerante. Esso consentì anche la qualificazione della strumentazione *ex-core*, la cui risposta si supposeva essere funzione anche delle temperature del sodio refrigerante interposto tra il nocciolo del reattore e la posizione in cui era piazzata la strumentazione. In SPX2, invece, un'intera traversa radiale di reattore era riservata all'introduzione di dispositivi di misura, come mostrato in Figura 2.11 e Figura 2.12. Ulteriori dettagli circa i dispositivi e le prove realizzate possono trovarsi in [24] [25] [26].

Dalla letteratura, appare evidente la necessità di un monitoraggio del reattore veloce non solo "a distanza", ma anche "più da vicino". Potrebbero identificarsi due categorie di rivelatori:

- **RIVELATORI DI POTENZA:** posizionati al di fuori del vessel, al di sotto e a lato della tanca reattore, per il monitoraggio del reattore alla potenza nominale. Può trattarsi di rivelatori a gas di qualsiasi tipo, al ^{10}B , ^3He o camere a fissione, non essendoci vincoli sulla temperatura dell'ambiente di installazione: eventualmente tali rivelatori potrebbero anche esser raffreddati se i canali di posizionamento dovessero risultare troppo caldi;
- **RIVELATORI DI FISICA:** installati all'interno del vessel, alcuni *in-core* ed altri *out-of-core*, a seconda delle peculiari necessità e della conformazione del reattore. Trattandosi di ambienti ad alta temperatura è necessario utilizzare camere a fissione o SPND capaci di resistere ai $400 \div 500^\circ\text{C}$ tipici dei reattori veloci.

Entrambe le categorie di rivelatori cooperano al monitoraggio in sicurezza del reattore, compensandosi a vicenda, visto che il primo sistema è più adeguato a condizioni di alto flusso neutronico, mentre il secondo è più adatto al monitoraggio delle condizioni di basso flusso.

Inspirandosi alla configurazione di analisi neutronica del reattore *Super-Phénix 2*, ma essendo ALFRED un dimostrativo a potenza ridotta rispetto alle taglie commerciali dei reattori SPX, un'intera traversa di misura (cfr. Figura 2.12) potrebbe risultare "eccessiva" ed, inoltre, perturbare in maniera non accettabile l'economia neutronica del reattore. Per tale motivo, ma

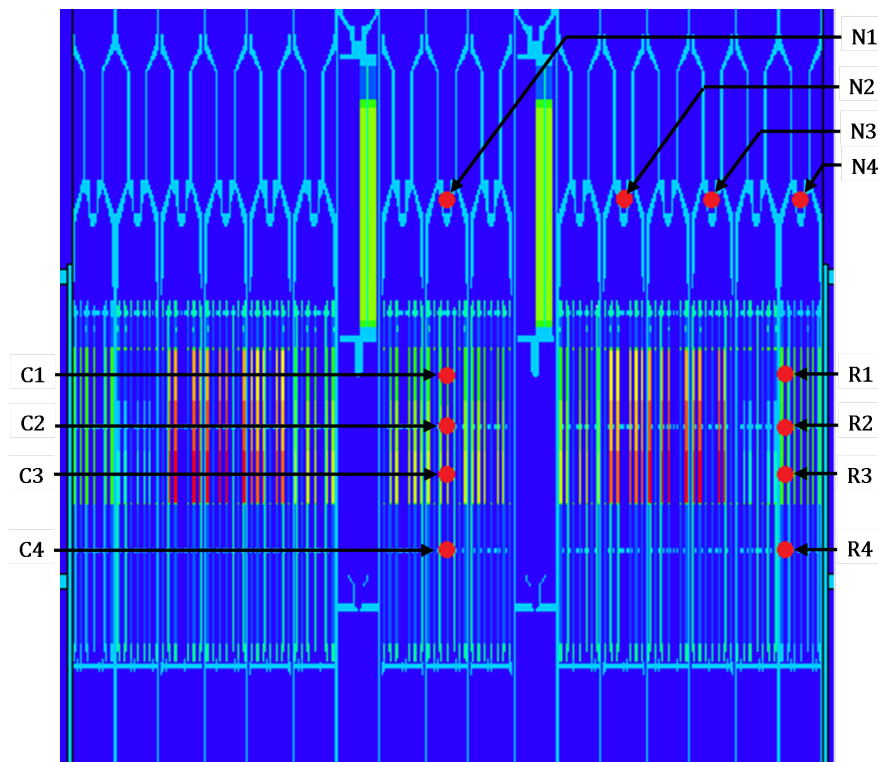


Figura 2.13: Nuovo posizionamento, rispetto al precedente (cfr. Figura 2.10), delle tally spettrometriche nel nocciolo del reattore ALFRED.

senza presumere di poter esaurire qui la scelta ottimale del posizionamento della strumentazione di analisi neutronica del reattore, si è pensato di lasciare l'elemento centrale di reattore come *guida neutronica* per l'introduzione di strumentazione, aggiungendovi -sulla medesima traversa radiale- un'ulteriore *guida neutronica* nel riflettore, immediatamente fuori la parte attiva del nocciolo. Misure intermedie possono essere effettuate attraverso il posizionamento della strumentazione nei *noses* degli elementi attivi, quindi al di fuori del nocciolo stesso. La schematizzazione descritta è riportata graficamente in Figura 2.13 e meglio specificata in Tabella 2.3.

Nelle dette posizioni è stato analizzato il flusso neutronico locale in termini di valore numerico della popolazione ivi presente e distribuzione spettrale. Inoltre, nelle stesse posizioni sono state calcolate le sezioni d'urto aggiornate dei materiali sensibili delle sonde di misura utilizzabili ed è stato valutato il fondo gamma di reattore, al fine di determinare quanto sia elevata questa componente di disturbo alla strumentazione di monitoraggio neutronico. Di seguito saranno presentati i detti risultati.

	Codifica	Posizione rispetto al centro di nocciolo, dimensioni in [cm]	Note
Traversa radiale sul piano dei noses	N1	(x, y, z)=(0; 0; 86)	<i>out-of-core</i>
	N2	(x, y, z)=(71,1; 0; 86)	<i>out-of-core</i>
	N3	(x, y, z)=(119,7; 0; 86)	<i>out-of-core</i>
	N4	(x, y, z)=(168,3; 0; 86)	<i>out-of-core</i>
Traversa assiale elemento di combustibile centrale	C1	(x, y, z)=(0; 0; 18)	<i>in-core</i>
	C2	(x, y, z)=(0; 0; 0)	<i>in-core</i>
	C3	(x, y, z)=(0; 0; -18)	<i>in-core</i>
	C4	(x, y, z)=(0; 0; -50)	<i>out-of-core</i>
Traversa assiale riflettore radiale affacciato al nocciolo	R1	(x, y, z)=(127; 0; 18)	<i>out-of-core</i>
	R2	(x, y, z)=(127; 0; 0)	<i>out-of-core</i>
	R3	(x, y, z)=(127; 0; -18)	<i>out-of-core</i>
	R4	(x, y, z)=(127; 0; -50)	<i>out-of-core</i>

Tabella 2.3: Elenco e posizionamento delle tally spettrometriche descritte in Figura 2.13.

Tempo di calcolo [$h \cdot core$]		300'000	Energia media [keV]	Percentuale epitermica (< 0,1 keV)	Percentuale veloce (> 0,1 keV)
nps	storie	200'000'000			
k_{eff}		0,99843 ± 0,00004			
Flusso neutronico in N1	$n/(cm^2s)$	2,47E + 14(±1%)	~ 26	9,1%	90,7%
Flusso neutronico in N2	$n/(cm^2s)$	1,47E + 15(±1%)	~ 50	5,6%	94,6%
Flusso neutronico in N3	$n/(cm^2s)$	2,88E + 14(±1%)	~ 16	15,7%	84,3%
Flusso neutronico in N4	$n/(cm^2s)$	1,33E + 14(±2%)	~ 13	18,9%	81,1%
Flusso neutronico in C1	$n/(cm^2s)$	3,10E + 15(±0,3%)	~ 150	0,01%	99,99%
Flusso neutronico in C2	$n/(cm^2s)$	3,71E + 15(±0,3%)	~ 150	0,004%	99,996%
Flusso neutronico in C3	$n/(cm^2s)$	3,21E + 15(±0,3%)	~ 150	0,03%	99,97%
Flusso neutronico in C4	$n/(cm^2s)$	2,88E + 14(±1%)	~ 16	15,7%	84,3%
Flusso neutronico in R1	$n/(cm^2s)$	7,00E + 14(±0,8%)	~ 70	1,6%	98,4%
Flusso neutronico in R2	$n/(cm^2s)$	7,55E + 14(±1%)	~ 120	1,5%	98,5%
Flusso neutronico in R3	$n/(cm^2s)$	6,15E + 14(±1%)	~ 120	1,6%	98,4%
Flusso neutronico in R4	$n/(cm^2s)$	2,73E + 14(±0,8%)	~ 33	8,7%	91,3%

Tabella 2.4: Risultati del calcolo degli spettri neutronici del reattore ALFRED nelle posizioni d'interesse (Figura 2.13). I valori assoluti del flusso neutronico sono riferiti alla potenza nominale di reattore.

2.2.2 Spettri neutronici calcolati nelle posizioni d'interesse

La disponibilità dei cluster *CRESCO4* di ENEA ha consentito l'elaborazione degli spettri neutronici nelle posizioni dichiarate in Figura 2.13, altrimenti incalcolabili data l'enorme complessità del modello MCNPX del reattore. La scelta della discretizzazione energetica dello spettro neutronico è stata di fondamentale importanza al fine dell'ottenimento di risultati significativi in tempi ragionevoli. La struttura energetica per la formazione dello spettro utilizza 49 gruppi, come specificato in Tabella 2.5. Con tale struttura e le 12 tally spettrometriche nelle posizioni dichiarate in Figura 2.13, il tempo necessario a ricavare degli spettri con errori sufficientemente bassi è stato nell'ordine di 300000 $h \cdot core$, equivalenti a circa un mese di calcolo ininterrotto su 496 processori in parallelo. Avendo a disposizione un limitato tempo macchina sul sistema *CRESCO4*, tale risultato è stato raggiunto in circa 2,5 mesi di tempo reale, considerando le attese in coda ed alcuni fermi macchina. Una sintesi complessiva del calcolo effettuato è illustrato in Tabella 2.4.

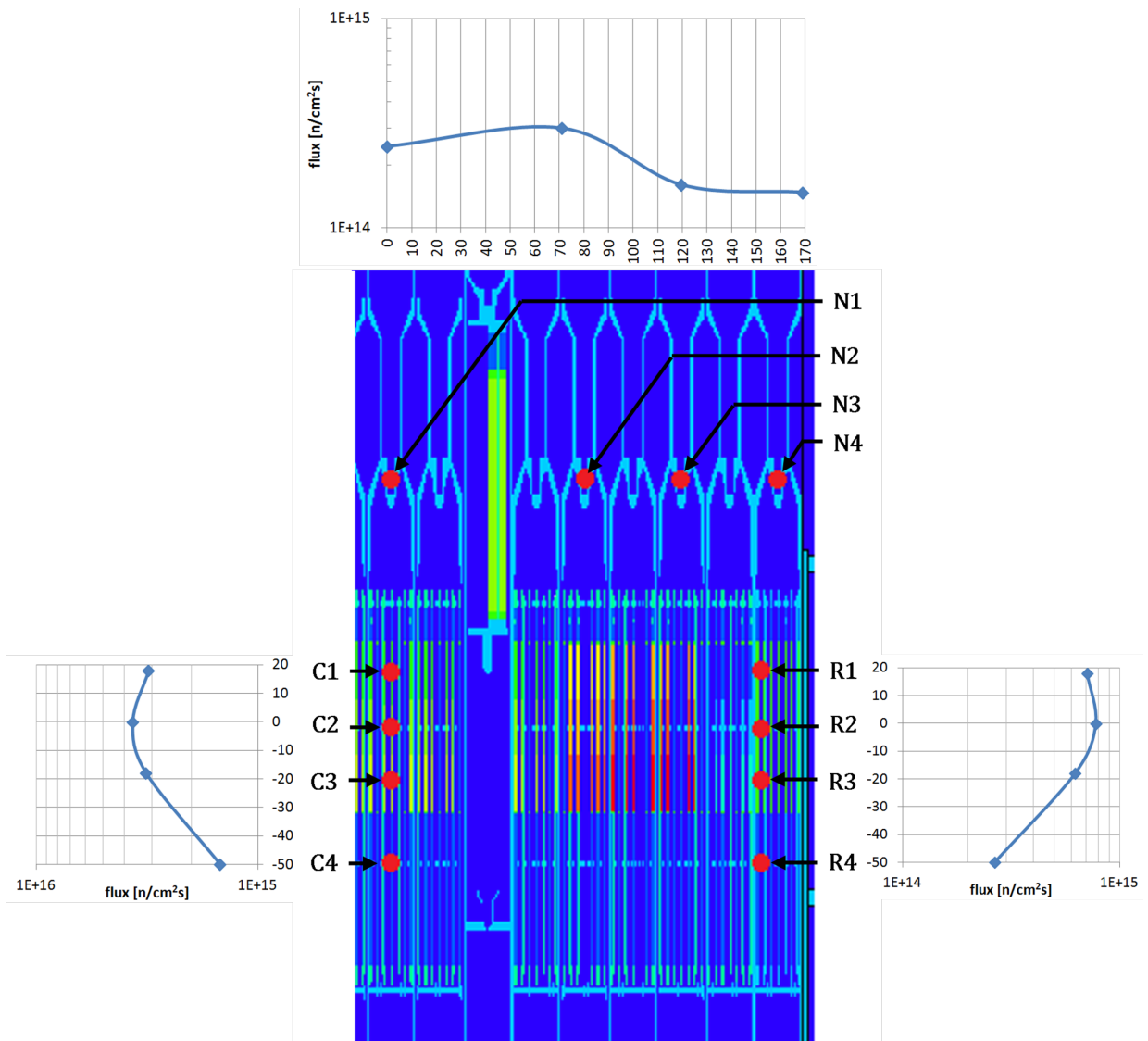


Figura 2.14: Profili di flusso neutronico nelle traverse analizzate, in corrispondenza della potenza nominale di 300 MW_{th} .

<i>group</i>	<i>Lower Energy [MeV]</i>	<i>Upper Energy [MeV]</i>
1	1,7333E+01	1,9640E+01
2	1,4918E+01	1,7333E+01
3	1,3840E+01	1,4918E+01
4	1,1618E+01	1,3840E+01
5	1,0000E+01	1,1618E+01
6	8,1873E+00	1,0000E+01
7	6,7032E+00	8,1873E+00
8	6,0653E+00	6,7032E+00
9	5,4881E+00	6,0653E+00
10	4,4933E+00	5,4881E+00
11	3,6788E+00	4,4933E+00
12	3,0371E+00	3,6788E+00
13	2,4660E+00	3,0371E+00
14	2,2313E+00	2,4660E+00
15	2,0190E+00	2,2313E+00
16	1,6530E+00	2,0190E+00
17	1,3534E+00	1,6530E+00
18	1,2246E+00	1,3534E+00
19	1,1080E+00	1,2246E+00
20	1,0026E+00	1,1080E+00
21	9,0718E-01	1,0026E+00
22	8,2085E-01	9,0718E-01
23	4,9787E-01	8,2085E-01
24	3,0197E-01	4,9787E-01
25	1,8316E-01	3,0197E-01
26	1,1109E-01	1,8316E-01
27	6,7379E-02	1,1109E-01
28	4,0868E-02	6,7379E-02
29	2,4788E-02	4,0868E-02
30	1,5034E-02	2,4788E-02
31	9,1188E-03	1,5034E-02
32	5,5308E-03	9,1188E-03
33	3,3546E-03	5,5308E-03
34	2,0347E-03	3,3546E-03
35	1,2341E-03	2,0347E-03
36	7,4852E-04	1,2341E-03
37	4,5400E-04	7,4852E-04
38	3,0432E-04	4,5400E-04
39	1,4863E-04	3,0432E-04
40	9,1661E-05	1,4863E-04
41	6,7904E-05	9,1661E-05
42	4,0169E-05	6,7904E-05
43	2,2603E-05	4,0169E-05
44	1,3710E-05	2,2603E-05
45	8,3153E-06	1,3710E-05
46	4,0000E-06	8,3153E-06
47	5,4000E-07	4,0000E-06
48	1,0000E-07	5,4000E-07
49	0,0000E+00	1,0000E-07

Tabella 2.5: Raggruppamento energetico utilizzato per la determinazione dello spettro neutronico nelle posizioni d'interesse.

La Figura 2.14 mostra gli andamenti dei profili di flusso neutronico sulle traverse assiali (C, centro nocciolo; R, elemento riflettore) e la traversa radiale (N, piano dei noses) analizzate. In merito alle traverse assiali, gli andamenti dei profili di flusso sono quelli attesi, con i massimi in corrispondenza del piano mediano di nocciolo. Per quanto riguarda la traversa radiale sul piano dei noses, accanto alla naturale discesa del flusso neutronico allontanandosi dal centro nocciolo e andando verso la periferia, si nota un minimo al centro nocciolo dovuto alla presenza delle *SAFETY RODS* che creano una depressione nel flusso neutronico al centro del piano, come già riscontrato nel rapporto [27]. Seguono nelle Figure 2.15, 2.16 e 2.17 gli spettri neutronici nelle posizioni analizzate.

Gli spettri neutronici calcolati nella traversa radiale (N1, N2, N3, N4) e ad ingresso nocciolo (C4, R4) hanno una *coda epitermica* ($< 0.1 \text{ keV}$) non trascurabile. Le posizioni *in-core*, (C1, C2, C3) e nel riflettore ma affacciate alla parte attiva (R1, R2, R3) presentano una popolazione neutronica quasi integralmente veloce (cfr. Tabella 2.4). In merito agli spettri calcolati nelle diverse posizioni delle traverse analizzate (Figure 2.15, 2.16 e 2.17) possono farsi i seguenti commenti:

- traversa radiale sul piano dei *noses*, **N**: l'energia media dello spettro non varia significativamente. Si apprezza un massimo relativo in N2 dovuto alla vicinanza delle *CONTROL RODS* e *SAFETY RODS* che riducono la componente a più bassa energia, aumentando -quindi- l'energia media dello spettro;
- traversa assiale nell'elemento di combustibile centrale, **C**: l'energia media dello spettro risulta pressoché costante nella parte attiva del nocciolo e si attesta ai valori massimi;
- traversa assiale nell'elemento riflettore affacciato al nocciolo, **R**: l'energia media dello spettro varia significativamente a causa della vicinanza delle *CONTROL RODS*. Le energie medie più elevate si riscontrano in R2 ed R3, i punti affacciati al materiale assorbitore delle barre di controllo, mentre R1 e R4, essendo più lontani, risentono meno del taglio della componente a bassa energia dovuto a tali materiali.

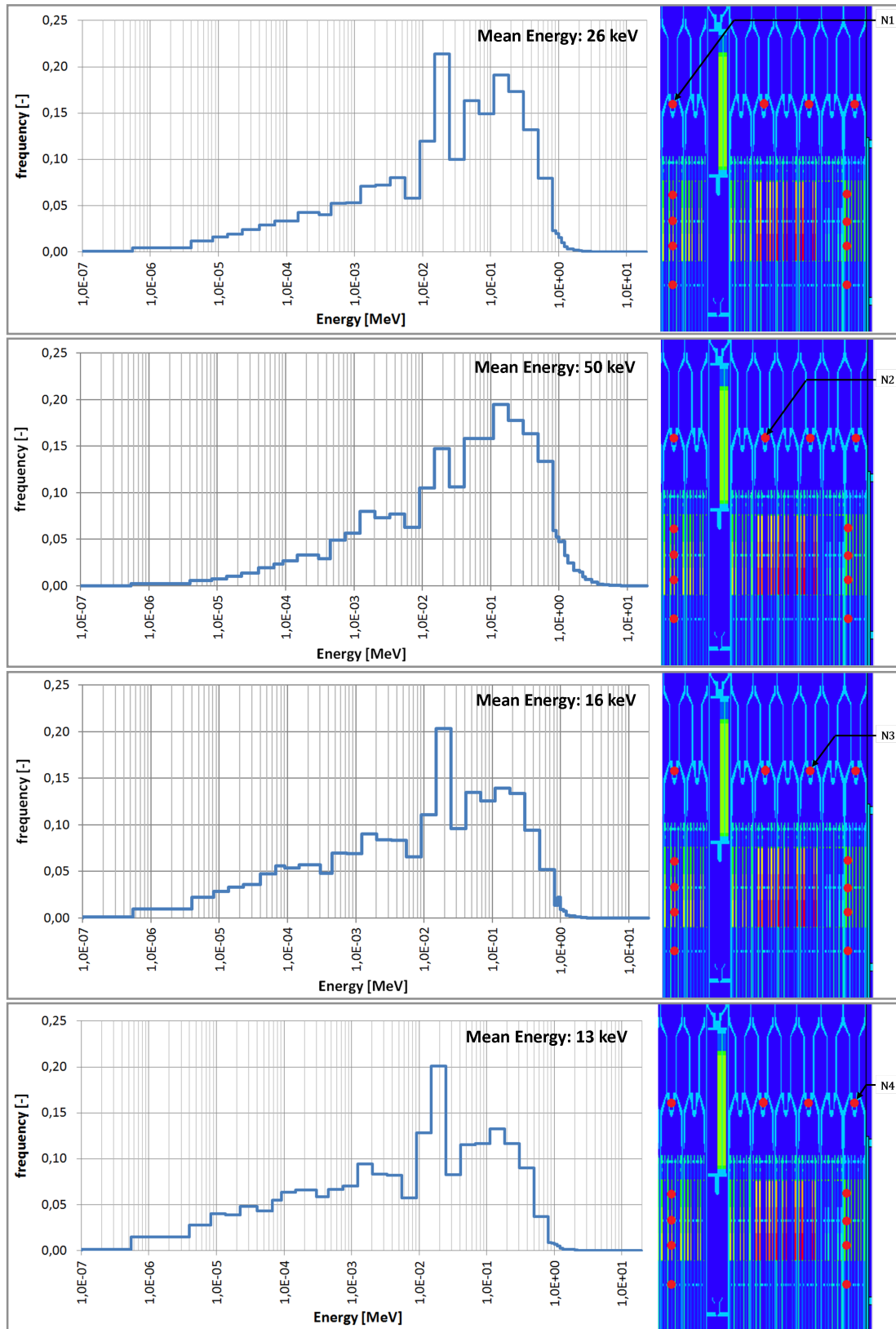


Figura 2.15: Spettri neutronici nelle posizioni N1, N2, N3, N4 della traversa radiale sul piano dei *noses*.

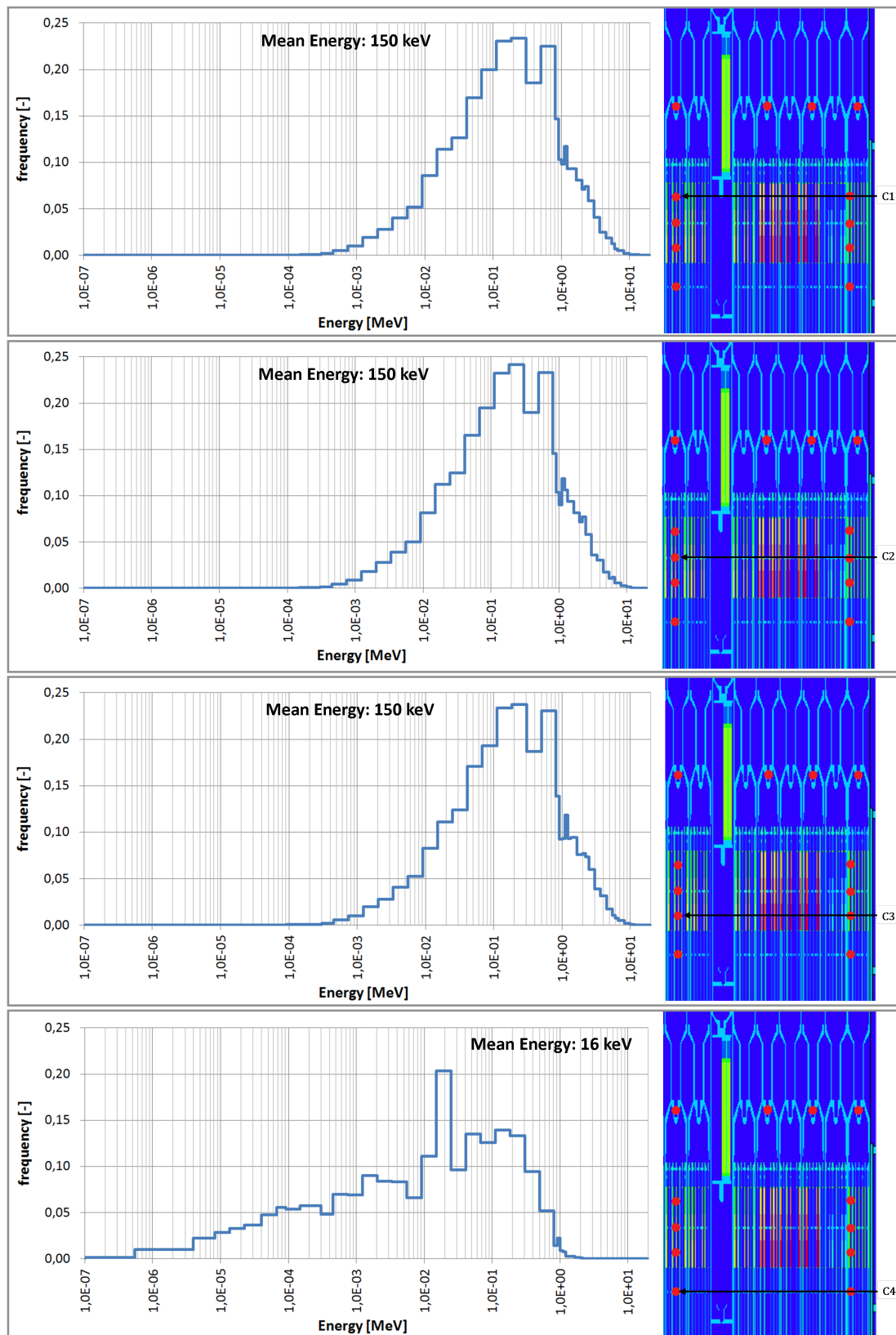


Figura 2.16: Spettri neutronici nelle posizioni C1, C2, C3, C4 della traversa assiale in corrispondenza dell'elemento di combustibile centrale.

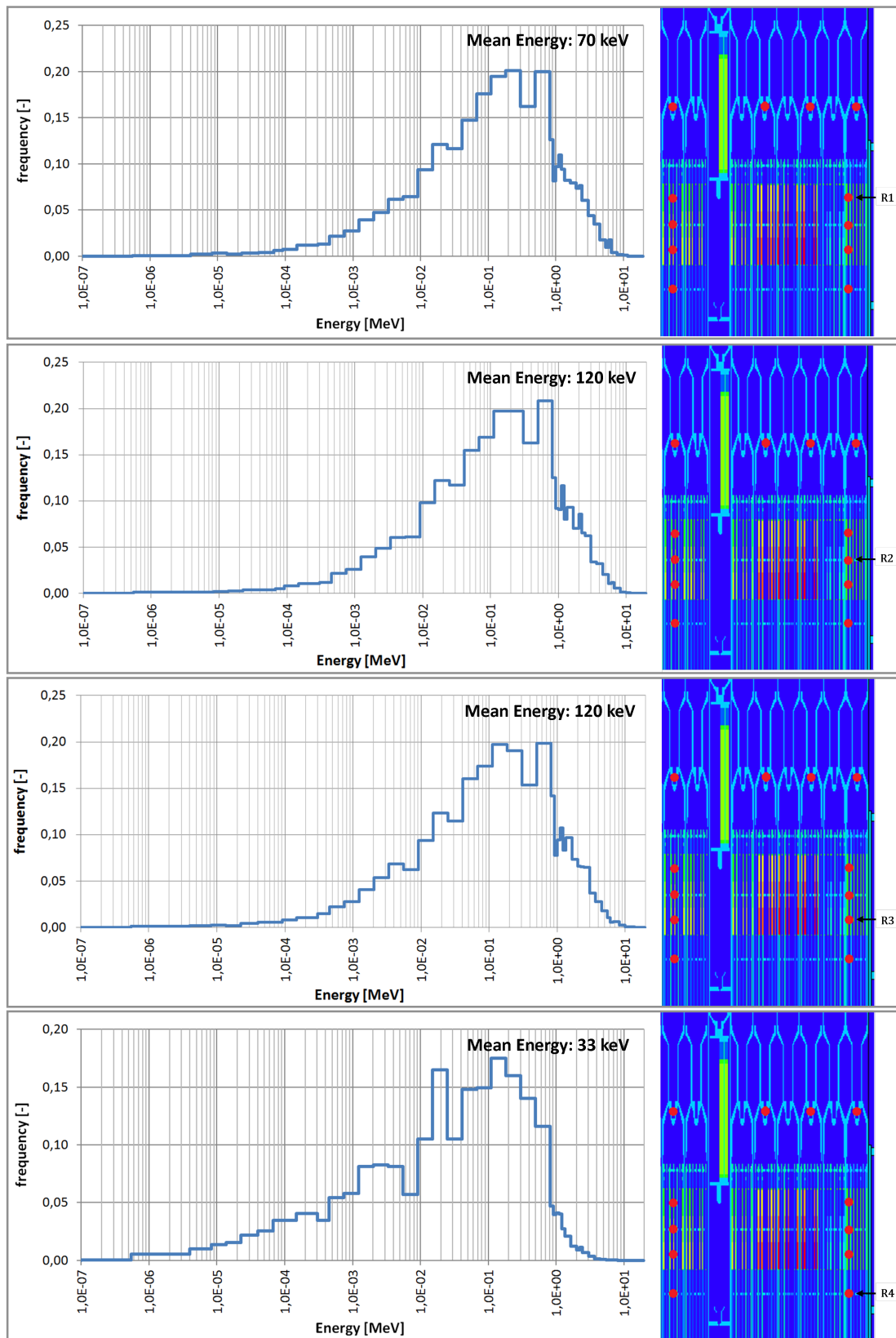


Figura 2.17: Spettri neutronici nelle posizioni R1, R2, R3, R4 della traversa assiale in corrispondenza dell'elemento riflettore affacciato al nocciolo.

	Flusso neutronico [$n/(cm^2s)$] @ 300 MW_{th}	Flusso γ [$\gamma/(cm^2s)$] @ 300 MW_{th}	Energia media γ [keV]	Air kerma free-in-air rate [Gy/s] @ 300 MW_{th}	Rapporto γ/n
N1	$2,47E + 14(\pm 1\%)$	$1,65E + 12(\pm 18\%)$	950	$5,5(\pm 13\%)$	0,0067
N2	$1,47E + 15(\pm 1\%)$	$1,38E + 12(\pm 9\%)$	1450	$14(\pm 18\%)$	0,0009
N3	$2,88E + 14(\pm 1\%)$	$1,29E + 12(\pm 15\%)$	1250	$8,3(\pm 14\%)$	0,0039
N4	$1,33E + 14(\pm 2\%)$	$3,62E + 12(\pm 12\%)$	900	$26,4(\pm 22\%)$	0,0272
C1	$3,10E + 15(\pm 0,3\%)$	$4,23E + 14(\pm 2\%)$	500	$1457(\pm 6\%)$	0,1365
C2	$3,71E + 15(\pm 0,3\%)$	$5,40E + 14(\pm 2\%)$	450	$1767(\pm 6\%)$	0,1456
C3	$3,21E + 15(\pm 0,3\%)$	$4,70E + 14(\pm 4\%)$	500	$1536(\pm 7\%)$	0,1464
C4	$2,88E + 14(\pm 1\%)$	$1,64E + 13(\pm 4\%)$	900	$93(\pm 6\%)$	0,0569
R1	$7,00E + 14(\pm 0,8\%)$	$1,39E + 14(\pm 8\%)$	500	$438(\pm 12\%)$	0,1986
R2	$7,55E + 14(\pm 1\%)$	$1,42E + 14(\pm 5\%)$	600	$566(\pm 16\%)$	0,1881
R3	$6,15E + 14(\pm 1\%)$	$1,59E + 14(\pm 18\%)$	450	$472(\pm 13\%)$	0,2585
R4	$2,73E + 14(\pm 0,8\%)$	$4,21E + 12(\pm 8\%)$	900	$22,2(\pm 12\%)$	0,0154

Tabella 2.6: Caratteristiche del campo gamma calcolato nelle posizioni d'interesse (Figura 2.13).

2.2.3 Spettri gamma calcolati nelle posizioni d'interesse

Per esigenze di brevità, il campo gamma calcolato nelle posizioni in Figura 2.13, non viene riportato punto per punto come per il campo neutronico. Se ne riassumono le principali caratteristiche in Tabella 2.6.

Capitolo 3

Analisi di sonde neutroniche commerciali per installazioni in ambienti ad alta temperatura

La gran parte della strumentazione prodotta a livello mondiale per misure di flusso neutronico è orientata alla misura di neutroni termici: la quasi totalità dei reattori di potenza è difatti costituita da reattori *Light Water Reactor*, ove la qualità energetica dei neutroni monitorati tende ad essere pressoché la medesima, indipendentemente dalla posizione d'installazione all'interno del reattore. Essendo questo il comune riferimento, le industrie produttrici di monitori neutronici generalmente riportano le prestazioni degli strumenti, nelle specifiche tecniche dei dispositivi, riferite ad una ipotesi di monitoraggio di flusso di particelle a spettro termico.

Se sorge la necessità di monitorare flussi neutronici di spettro energetico differente, l'utilizzatore deve provvedere a valutare quali saranno le prestazioni dell'oggetto che intende utilizzare all'interno del proprio setup sperimentale, mediante la misura diretta oppure attraverso calcoli correttivi o codici di simulazione.

Il presente capitolo analizza lo stato dell'arte della strumentazione neutronica utilizzabile per la misura di flussi neutronici veloci in ambienti ad alta temperatura, proponendo un modello correttivo per una valutazione più veritiera delle prestazioni dei dispositivi individuati, avendo a disposizione i soli dati forniti dalle case costruttrici nella misura di spettri termici.

3.1 Strumentazione di monitoraggio neutronico adeguata per applicazioni LFR

A parte l'aggressività chimica dell'ambiente *piombo*, il principale parametro a sfavore per quanto concerne la strumentazione neutronica è la temperatura ($\sim 500^\circ\text{C}$ in condizioni operative nominali), che limita la selezione a ben poche possibilità tecnologiche (come tecniche di rivelazione) e commerciali (come prodotti disponibili). Se poi si pensa che la strumentazione deve essere in grado di seguire -in qualche modo- anche le eventuali condizioni incidentali, il problema diventa ben più sentito visto che le temperature in condizioni avverse possono superare quelle massime previste per le sonde (attualmente, le camere a fissione ad alta temperatura arrivano al massimo a 600°C).

Rispetto ai reattori termici, inoltre, i reattori veloci sono caratterizzati da flussi neutronici a piena potenza superiori di due ordini di grandezza ($10^{16}n/(cm^2s)$ contro $10^{14}n/(cm^2s)$), il che significa che la strumentazione deve seguire un range di flusso neutronico ancora più ampio, dalla potenza '0' alla potenza nominale.

Le problematiche maggiori si ravvisano agli estremi della finestra: inizialmente la popolazione neutronica potrebbe risultare troppo scarsa ad ottenere segnali elettrici significativi ed

affidabili per seguire la salita in potenza (presenza di una *blind window*); in prossimità della potenza nominale, l'abbondante popolazione neutronica potrebbe procurare segnali elettrici molto significativi, ma lo strumento potrebbe risultare troppo fortemente sollecitato in termini di bombardamento neutronico, e consumare il materiale sensibile troppo in fretta. In questi casi, può essere necessaria una schermatura o un riposizionamento in una collocazione più protetta.

Ciò che appare chiaro è che un singolo strumento difficilmente può essere sufficiente, sebbene i range di applicazione possano essere largamente ampi: ad esempio, alcune camere a fissione riescono a coprire una decina di decenni di escursione del flusso neutronico, combinando i funzionamenti in *pulse-mode*, *Campbelling-mode* e *current-mode*.

In *pulse mode*, lo strumento lavora per impulso singolo, ovvero il rivelatore è in grado di rivelare ogni singola interazione di neutrone con il volume sensibile. Non vi è proporzionalità con l'energia del neutrone incidente, bensì con il *Q-valore* della reazione innescata dal neutrone: più esso è alto, più facile sarà la rivelazione di ogni singola reazione all'interno del volume sensibile. La misura in *pulse mode* è un rateo di conteggio. Questa modalità è applicabile solo nel caso in cui l'interferenza gamma risulti trascurabile, oppure si utilizzi un meccanismo di compensazione mediante un doppio strumento, uno sensibile a gamma e neutroni, l'altro sensibile ai soli gamma; per differenza, si ottiene il segnale che compete ai soli neutroni (meccanismo della *camera compensata*).

In *Campbelling mode* o *Mean Square Voltage*, vengono sfruttati la differente deposizione di carica e la differente tempistica di deposizione dell'energia della radiazione all'interno del volume sensibile, ad opera di neutroni e gamma. Tipicamente, la carica prodotta dal neutrone è più grande e viene raccolta in tempi brevi rispetto alla carica prodotta da un raggio γ , che è quantitativamente inferiore.

Nel *current mode*, il rivelatore è utilizzato come una camera in ionizzazione, ed un segnale di corrente è misurato. Generalmente l'interferenza gamma risulta trascurabile e non si richiede l'intervento di un meccanismo di compensazione.

Si ricordi che, dal punto di vista del *range* di potenza del reattore, la strumentazione neutronica può essere suddivisa in 3 categorie:

- **Start-up range:** $10^0 \div 10^6 n/(cm^2s)$; il fondo gamma è predominante; rivelatori neutronici in *pulse mode*;
- **Intermediate range:** $10^6 \div 10^{12} n/(cm^2s)$; fondo gamma e neutronico confrontabili; rivelatori in *pulse mode* a camera compensata o in *Campbelling mode*;
- **Power range:** $10^{12} \div 10^{16} n/(cm^2s)$; fondo gamma trascurabile rispetto al campo neutronico; rivelatori in *current mode*, senza necessità di discriminazione γ .

La strumentazione di monitoraggio neutronico può essere, generalmente, in-core o out-of-core, e protendere per l'una o l'altra soluzione dipende dal tipo di reattore e dalla grandezza del nocciolo. Per un comune reattore PWR, il controllo si realizza mediante strumentazione out-of-core posta al di fuori del pressure vessel, con l'ausilio di sistemi di monitoraggio interno spot (tipo SPND o camere a fissione) per la taratura della strumentazione esterna; già per un EPR (o un BWR, *Boiling Water Reactor*) la strumentazione esterna non è più sufficiente perché le dimensioni di nocciolo sono troppo estese per poterlo monitorare con sonde esterne.

Un reattore veloce, ed in particolare uno al piombo, necessita obbligatoriamente di una strumentazione di monitoraggio continuo *in-core*, per le dimensioni e gli arricchimenti in gioco (nell'ordine di qualche decina %): non sono inverosimili fenomeni di criticità locale in caso di shrinking radiale del nocciolo o potenziali novità che un reattore al piombo potrebbe presentare in termini di comportamento neutronico. Appare chiaro che una mappatura interna e variamente fitta radialmente e assialmente *in-core* risulta strumento di studio e caratteristica di sicurezza imprescindibile.

Considerando tutti questi aspetti, e valutando i prodotti disponibili nel mercato, si trovano adattabili alle predette condizioni operative, alcuni modelli di camere a fissione [28] e Self Powered Neutron Detector, SPND, le cui specifiche sono riportate in Appendice B. Le loro capacità e prestazioni nell'ambiente reattore di interesse saranno discusse nei paragrafi successivi.

Costruttore	Modello	Sensitività				Dimensioni [mm]		
		pulse	cps/nv	MSV	$A^2 Hz^{-1}/nv$		current	A/nv
Photonis	CFUC06		1		$4 \cdot 10^{-26}$		$2 \cdot 10^{-13}$	D=48, H=412
Photonis	CFUC07		1		$4 \cdot 10^{-26}$		$2 \cdot 10^{-13}$	D=48, H=412
Photonis	CFUE32		0,001		$4 \cdot 10^{-29}$		$1 \cdot 10^{-16}$	D=7, H=150
Photonis	CFUE43		–		$3 \cdot 10^{-31}$		$7 \cdot 10^{-17}$	D=7, H=85,5

Tabella 3.1: Caratteristiche di riferimento delle camere a fissione commercialmente disponibili applicabili al reattore ALFRED.

3.1.1 Camere a fissione

Le camere a fissione sono sostanzialmente dei condensatori come strutture elettriche, dove fra gli elettrodi si interpone un gas (argon-azoto) in cui si viene a produrre la carica che, raccolta all'anodo, dà origine al segnale elettrico in uscita dallo strumento. Il materiale sensibile ai neutroni è generalmente un fissile (o anche un fertile, sebbene sia rara questa applicazione) e le particelle che causano la ionizzazione del gas sono i frammenti di fissione. A causa della cinetica della fissione nel layer di materiale sensibile (generalmente si riveste il catodo con uno strato molto sottile di un materiale contenente fissile), per singolo evento di fissione, solo uno dei due frammenti riesce a causare creazione di coppie ioniche nel gas visto che i due frammenti sono emessi praticamente nella stessa direzione, ma in verso opposto, quindi uno 'muore' nel layer e l'altro ne fuoriesce (sempre che il layer non sia troppo spesso e la fissione non sia avvenuta troppo in profondità). Appare immediatamente chiaro che la configurazione e le caratteristiche del layer sensibile sono parametri chiave nelle prestazioni/sensibilità della camera a fissione.

La peculiarità delle camere a fissione risiede nell'enorme quantitativo di coppie ioniche che vengono a prodursi per singolo evento di fissione visto che i frammenti emergenti posseggono una energia cinetica di circa 70 e 100 MeV, rispettivamente per quello leggero e quello pesante. L'abbondanza delle coppie create per singolo evento fa sì che il segnale elettrico potenzialmente collezionabile sia molto forte e ben distinguibile dal fondo, specie in *pulse mode*.

Le camere a fissione commercialmente disponibili sfruttano generalmente ^{235}U che si dimostra sensibile ai neutroni fin dalle energie termiche; difficilmente si usano fertili perché, sebbene la reazione di fissione non risulti una reazione a soglia, la fissione di un fertile richiede che il neutrone proiettile abbia una certa energia cinetica iniziale per poter indurre il nucleo bersaglio a fissionarsi. Nel caso del ^{238}U , ad esempio, la camera a fissione sarebbe significativamente sensibile a neutroni con energie superiori o uguali a $\sim 600 \text{ keV}$.

Diversi sono i produttori di camere a fissione sul mercato: *LND Inc.*, *Mirion Technologies - IST*, *General Electric*, *Thermoscientific*, *Centronic*, *Photonis*, ecc. e tra questi sono stati selezionati solo i modelli che potrebbero essere applicati alle misure neutroniche del reattore ALFRED. La Tabella 3.1 riporta le caratteristiche prelevate da specifica tecnica (Appendice B), riferite alla misura di uno spettro termico. Le potenzialità di misura qui descritte saranno aggiornate secondo gli spettri neutronici specifici delle potenziali installazioni in ALFRED, con la procedura che verrà spiegata nel paragrafo 3.2.

Le camere a fissione possono operare in tutte le tre modalità funzionali descritte in precedenza, a seconda del termine sorgente. Il *pulse mode*, è generalmente utilizzato per popolazioni neutroniche di scarsa entità, poiché l'intervallo di rivelazione, in termini di impulsi in uscita, risulta andare da 10 cps, conteggi per secondo, fino ad un massimo di 10^6 cps , presupponendo uno *shaping time* dell'impulso di tensione di $1 \mu\text{s}$. Con una sensibilità ipotetica di 1 cps/nv , tale limite equivarrebbe ad un massimo flusso neutronico misurabile di $10^6 \text{ n}/(\text{cm}^2\text{s})$; oltre non si riuscirebbe ad ottenere perché lo strumento perderebbe la proporzionalità diretta con il flusso neutronico che si intende monitorare. In questa modalità di funzionamento, si ha una intrinseca discriminazione del fondo gamma (dai prodotti di fissione accumulatisi internamente e dal campo gamma di reattore) e del fondo α derivante dal layer di fissile, visto l'elevato *Q-valore* della

reazione di fissione, che rende l'impulso elettrico connesso all'interazione del singolo neutrone estremamente facile da discriminare. Elevati flussi gamma possono comunque essere di disturbo per l'elettronica di preamplificazione/amplificazione e conteggio visto che complicano notevolmente il treno d'impulsi da analizzare: ne segue che più è elevato il fondo gamma, più si riduce il rateo di conteggio massimo misurabile dalla camera senza che essa perda la proporzionalità col flusso neutronico. Le camere a fissione della Photonis, citate in Tabella 3.1, ad esempio, supportano un rateo di dose gamma massimo di 10^4 Gy/h.

Il *Campbelling mode* (o MSV, *Mean Square Voltage*) e il *current mode* sono utilizzati tipicamente nei reattori, dove il flusso neutronico elevato impedisce la gran parte del tempo di operare lo strumento in *pulse mode*. A seconda della tipologia di reattore e della taglia, infatti, il *pulse mode* potrebbe essere in grado di monitorare al massimo la *potenza "0"* e le prime decadi di evoluzione del flusso neutronico; successivamente occorre passare al MSV per le decadi centrali e al *current mode* in prossimità dei livelli di potenza nominale. I principali problemi che si ritrovano nei funzionamenti in MSV e *current mode* riguardano la significatività del segnale di corrente che si deriva dallo strumento, vista la presenza di alcuni effetti di disturbo come:

- **alpha current:** è la porzione del segnale in corrente che viene provocata dalla ionizzazione del gas indotta dalle particelle α emergenti dal layer fissile, per naturale decadimento degli isotopi contenuti;
- **gamma current:** è la porzione del segnale in corrente che viene provocata dalla ionizzazione indiretta del gas da parte dei fotoni che interagiscono con la camera, sia che essi provengano dall'ambiente reattore, sia che siano originati dal decadimento dei prodotti di fissione incapsulati nel layer fissile, la cui percentuale va incrementandosi via via che cresce l'utilizzazione e, quindi, il burn-up della camera;
- **leakage current:** è la porzione del segnale in corrente dovuta alle perdite ohmiche dell'isolante che separa gli elettrodi dello strumento. Le qualità isolanti dell'allumina (Al_2O_3), generalmente utilizzata, peggiorano rapidamente con l'aumentare della temperatura: a 600 °C la *leakage current* può essere 10^4 volte superiore del corrispondente valore a 20 °C.

Per gli effetti appena discussi, esiste un limite inferiore al segnale di corrente portante informazione sul flusso neutronico ricavabile dallo strumento. Al di sopra di questo limite, la corrente ricavata dallo strumento è proporzionale al rateo di fissione nel layer sensibile e, quindi al flusso neutronico. Per effetti di crescita della densità di carica nel gas man mano che aumenta il rateo degli eventi di ionizzazione, si ha anche un limite superiore al segnale di corrente ricavabile: difatti, superato un certo valore di interazioni nella camera, si hanno effetti secondari (schermatura dell'anodo ad opera delle particelle raccolte e conseguente variazione del campo elettrico della camera) che ostacolano la corretta raccolta degli elettroni all'anodo e questo implica una perdita di proporzionalità del segnale elettrico con il flusso neutronico. Questi limiti sono propri di ogni strumento e dipendono dalla geometria, dalla tensione esterna applicata e dalla sensibilità della camera, nonché dalle capacità dell'elettronica. La Tabella 3.2 riporta i limiti di utilizzo in MSV e *current mode* per le camere a fissione evidenziate precedentemente.

La camera a fissione ideale dovrebbe essere in grado di coprire tutte le decadi del flusso neutronico, dalla *potenza "0"* fino alla potenza nominale, attraverso le diverse modalità di esercizio. Tuttavia, far funzionare lo strumento in tutte le modalità richiede che si scenda a compromessi perché ciascun modo richiederebbe una ottimizzazione di per sé. Uno dei problemi più significativi risiede nella pressione di esercizio del gas nella camera: il *pulse mode* e il MSV *mode* richiederebbero una elevata pressione per raggiungere le migliori prestazioni; il *current mode* richiede una pressione inferiore, per evitare un eccessivo addensamento di carica che influisce sul limite superiore di rivelazione. Una possibilità di miglioramento può essere costituita da una camera "a doppia pressione", con due sezioni separate, a pressioni diverse.

	MSV mode				current mode			
	limite inferiore	A^2/Hz	limite superiore	A^2/Hz	limite inferiore	A	limite superiore	A
CFUC06	N.D.		N.D.		$7 \cdot 10^{-5}$		N.D.	
CFUC07	N.D.		N.D.		$7 \cdot 10^{-5}$		N.D.	
CFUE32	$4 \cdot 10^{-22}$		$1,2 \cdot 10^{-16}$		$1 \cdot 10^{-7}$		$1 \cdot 10^{-3}$	
CFUE43	$6 \cdot 10^{-22}$		$4,5 \cdot 10^{-18}$		$1,4 \cdot 10^{-7}$		$1,05 \cdot 10^{-3}$	

Tabella 3.2: Limiti di rivelazione in MSV e *current mode* per le camere a fissione in Tabella 3.1.

Costruttore	Modello	Sensitività $[A/nv]$	Dimensioni dell'emettitore $[mm]$	Dimensioni complessive $[mm]$	Burn-up $[\%/mese/nv]$
KWD Instruments	5503-V-100	$5,1 \cdot 10^{-21}$	D=2, H=100	D=3,5	$1,2 \cdot 10^{-15}$
KWD Instruments	5503-Rh-50	$8,7 \cdot 10^{-21}$	D=0,7, H=50	D=2,5	$3,9 \cdot 10^{-14}$
KWD Instruments	5503-Co-210	$5,4 \cdot 10^{-21}$	D=2, H=210	D=3,7	$1,0 \cdot 10^{-14}$
ARi Industries	V-type	$1,54 \cdot 10^{-21}$	D=0,5, H=200	D=1,5	$1,3 \cdot 10^{-15}$
ARi Industries	Rh-type	$2,4 \cdot 10^{-20}$	D=0,5, H=200	D=1,5	$2,3 \cdot 10^{-14}$
ARi Industries	Co-type	$3,2 \cdot 10^{-22}$	D=0,5, H=200	D=1,5	$1,0 \cdot 10^{-14}$

Tabella 3.3: Caratteristiche di riferimento dei SPND commercialmente disponibili applicabili al reattore ALFRED.

3.1.2 Self Powered Neutron Detectors

I *Self Powered Neutron Detectors*, SPND, assumono una struttura elettrica simile ad un condensatore, dove l'elettrodo interno è costituito da un opportuno materiale sensibile ai neutroni; tra l'elettrodo esterno e il materiale sensibile ai neutroni è interposto un isolante elettrico.

Si basano sul principio dell'attivazione neutronica di opportuni materiali, la cui interazione coi neutroni produce, ad esempio, radionuclidi β -emettitori; le cariche prodotte dal decadimento β (proporzionali al rateo di interazione dei neutroni, in certe condizioni) costituiscono il segnale elettrico ricavabile dallo strumento.

Uno dei grandi vantaggi di questa categoria è la non necessità dell'alimentazione esterna per la creazione di un campo elettrico che metta in moto le cariche; il movimento è assicurato dal *Q-valore* delle reazioni di decadimento. Hanno tuttavia problemi concernenti le dimensioni, poiché per collezionare un segnale sufficientemente forte è necessario esporre al flusso neutronico quantità di materiale sensibile non indifferenti e ciò comporta un ingombro intrinseco dello strumento.

Una variante dei SPND classici è costituita dalla classe che sfrutta le reazioni (n, γ) , ove i fotoni prodotti per attivazione del materiale sensibile sono sfruttati per produrre carica elettrica a valle delle interazioni fotoelettriche, Compton e creazione di coppie con i materiali della sonda. In questo caso sono generalmente utilizzati platino, afnio e cobalto.

Dal punto di vista del controllo di reattore, i SPND hanno un problema fondamentale: il tempo di risposta. Le versioni basate sul decadimento β , presentano un ritardo intrinseco dovuto al tempo di dimezzamento del nuclide prodottosi per attivazione del materiale sensibile.

Quelli basati sulle emissioni gamma dei radionuclidi prodottisi per attivazione sono, invece, pronti (tempo di risposta $< 0,5 ms$), poiché nella cattura radiativa l'emissione dei gamma è sufficientemente immediata; essendo però questi ultimi basati sull'interazione dei fotoni, sono più suscettibili d'influenza dal fondo gamma del reattore ed avranno un valor minimo del segnale di corrente statisticamente rappresentativo del flusso neutronico più elevato di quelli basati sul decadimento β^- .

Diversi sono i produttori di SPND sul mercato: *KWD Nuclear Instrument*, *ARi Industries*, *Thermocoax*, ecc., e tra questi sono stati selezionati alcuni modelli che potrebbero essere applicati alle misure neutroniche del reattore ALFRED, in Tabella 3.3. Essa riporta le caratteristiche prelevate da specifica tecnica (Appendice B), riferite alla misura di uno spettro termico. Le

potenzialità di misura qui descritte saranno aggiornate secondo gli spettri neutronici specifici delle potenziali installazioni in ALFRED, con la procedura che verrà spiegata nel paragrafo 3.2.

I SPND funzionano in *current mode*. Essendo strumenti a stato solido sono molto resistenti e adatti a funzionare in ambienti ostili, sottoposti ad un forte campo di radiazione ed una elevata temperatura.

Il problema principale è la significatività del segnale ottenuto perché le sonde sono sensibili anche alla radiazione gamma e pertanto il contributo al segnale di corrente dovuto all'irraggiamento gamma proveniente dall'esterno deve essere reso trascurabile (o debitamente contabilizzato) per poter utilizzare correttamente la sonda. Esiste, quindi, un limite inferiore al segnale elettrico in corrente considerabile come accettabile.

Inoltre, a seconda della tipologia utilizzata, i SPND possono essere *pronti* o *ritardati* i primi possono essere applicati al controllo di reattore e alla mappatura del flusso neutronico; i secondi sono utilizzabili solo per monitorare l'andamento spaziale del flusso neutronico. Nei ritardati, a causa dei tempi caratteristici dei decadimenti nucleari, per un flusso neutronico costante, si ottiene un segnale di corrente costante, ma solo dopo aver atteso un certo tempo pari a 4-5 vite medie del nuclide che dà luogo al segnale: tale corrente prende il nome di corrente di saturazione. Evidentemente, poiché è necessario attendere affinché il segnale prelevato dal SPND β -ritardati porti informazione circa il flusso neutronico (previa taratura dello strumento), ne segue che questi ultimi sono utili solo al monitoraggio locale del flusso neutronico a fini di studio del *burn-up* del combustibile ed ottimizzazione del ciclo di ricarica del nocciolo; solo i SPND γ -pronti possono essere usati come input al sistema di controllo, visto che il segnale di corrente prodotto è contestuale alla cattura neutronica, data la diseccitazione gamma praticamente immediata (Tabella 3.4).

Non si hanno limiti di rivelazione per i SPND studiati; si ravvisa un problema di monitoraggio delle basse potenze, a causa dei segnali statisticamente poco significativi, mentre non si prevedono limiti superiori per le correnti misurate, a causa dell'intrinsecamente scarsa sensibilità ($A/(n/(cm^2 s))$) di tali strumenti. Dal punto di vista dell'interferenza gamma, le note proprietà di interazione dei fotoni con il piombo fanno attendere che esso si comporti da ottimo schermo, andando a ridurre in maniera significativa il contributo gamma spurio alla sonda da parte dell'interferenza γ dell'ambiente reattore, specie se si considerano posizioni 'lontane' e più schermate dal piombo refrigerante. Un'installazione più "in lontananza" consentirebbe di abbassare i limiti inferiori di rivelazione per i SPND (sempre tenendo presente che i materiali della sonda si attivano e pertanto essa stessa diventa una sorgente gamma), rendendo possibile, in via teorica, il loro utilizzo anche a potenze ridotte, laddove i segnali di corrente riportanti informazioni di flusso neutronico sarebbero più contenuti.

Va, inoltre, sottolineato che i SPND β -ritardati sono meno affetti dall'interferenza gamma rispetto ai SPND γ -pronti e tale interferenza è tanto più ridotta quanto più la sonda è affusolata e l'emettitore di piccolo diametro. Ne segue che è statisticamente più significativo il valore di corrente ricavato da un SPND β -ritardato rispetto ad un SPND γ -pronto.

Qualora i valori di corrente misurati risultino troppo scarsi per l'elettronica di acquisizione e analisi, è possibile anche effettuare degli accorpamenti di più SPND insieme, creando degli assembly elettricamente connessi tra loro, il cui output elettrico è maggiormente significativo. Questa necessità impiantistica può condurre, però, lontano dalle esigenze di monitoraggio locale, visto che per incrementare il segnale occorre aumentare in numero di SPND in loco o aumentarne le dimensioni, il che significa non riuscire più ad avere un monitoraggio locale, ma una informazione più estesa e di carattere globale, oltre che un maggiore disturbo al processo. Ne segue che l'applicabilità della tecnologia dipende anche da cosa si desidera realizzare con essa.

	Tipo di risposta	Tempi di risposta		
		0 – 64%	0 – 86%	0 – 95%
β SPND ^{52}V	ritardato: 99% ; pronto: 1%	5,4 min	10,8 min	16,3 min
β SPND ^{104}Rh	ritardato: 92% ; pronto: 8%	1,08 min	2,14 min	3,18 min
γ SPND ^{59}Co	pronto: 100%	$1 \cdot 10^{-14} \text{s}$		

Tabella 3.4: Emissioni principali e tempi di risposta dei più comuni materiali sensibili utilizzati per SPND.

3.2 Calcolo delle prestazioni della strumentazione applicabile nelle posizioni d'installazione identificate in ALFRED

Le caratteristiche neutroniche delle camere a fissione e dei SPND riportati precedentemente in Tabella 3.1 e Tabella 3.3 sono riferite alla misura di uno spettro di neutroni termici. Ciò è dovuto al fatto che nei *Light Water Reactors*, i reattori di potenza più diffusi al mondo, i rivelatori monitorano per lo più neutroni termici, indipendentemente dalla posizione in cui sono installati; ne segue che lo spostamento di un rivelatore all'interno di una configurazione LWR influenza, in prima analisi, la sola magnitudo nella risposta misurata (perché varia intensità del flusso neutronico) e non le caratteristiche di efficienza e sensitività dello strumento (perché non vi sono variazioni sostanziali della distribuzione energetica dei neutroni).

Nei reattori veloci la situazione è completamente diversa: non desiderando che avvenga il rallentamento neutronico, ma considerando che comunque i neutroni interagiscono con i materiali e -prima o poi- rallentano, l'energia media dello spettro neutronico può variare significativamente da una posizione all'altra muovendosi dal centro verso la periferia del reattore. Questo significa che la sensitività dello strumento non è più costante (come accade per i LWR) perché varia la media della sezione d'urto della reazione che esso usa per contare i neutroni: se varia lo spettro neutronico, varia anche tale parametro nucleare, e dunque la sensitività ed infine la risposta del rivelatore, entrambe intrinsecamente legate alla posizione d'installazione.

Al fine di correggere i valori di sensitività neutronica ed aggiornarli a dei numeri più verosimili per le condizioni d'installazione all'interno del reattore ALFRED, si è proceduto a calcolare un fattore di correzione come di seguito spiegato.

A partire dall'equazione 2.2, il problema può essere formalizzato come segue: detta R la generica risposta del rivelatore, essa risulterà proporzionale alle caratteristiche di magnitudo, $p(\vec{r})$, e di spettro, $\psi(E)$ ¹, del flusso neutronico locale, $\varphi(\vec{r}, E) = p(\vec{r})\psi(E)$:

$$R \propto \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \int_E p(\vec{r})\psi(E) dE \quad (3.1)$$

È ragionevole supporre, quindi, che se due posizioni diverse monitorassero la stessa magnitudo di flusso neutronico, $p(\vec{r}) = \text{cost}$, ma un diverso spettro energetico (ad esempio una volta *termico* ed una volta *veloce*), potrà aversi

$$\begin{aligned} R|_{\text{thermal}} &\propto \bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{\text{thermal}} \int_E p(\vec{r})\psi(E)|_{\text{thermal}} dE \\ R|_{\text{fast}} &\propto \bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{\text{fast}} \int_E p(\vec{r})\psi(E)|_{\text{fast}} dE \end{aligned} \quad (3.2)$$

da cui, facendo il rapporto, si ottiene l'*Energy Spectrum Correction Factor*, ESCF:

¹ $\psi(E)$ definisce il fattore di forma dello spettro neutronico, ovvero il suo integrale in energia $\int_E \psi(E) = 1$ per definizione.

$$\begin{aligned}
ESCF(\vec{r}) &= \frac{R|_{fast}}{R|_{thermal}} = \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{fast} \int_E p(\vec{r}) \psi(E)|_{fast} dE}{\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{thermal} \int_E p(\vec{r}) \psi(E)|_{thermal} dE} = \\
&= \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{fast} \cdot \cancel{p(\vec{r})} \int_E \psi(E)|_{fast} dE}{\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{thermal} \cdot \cancel{p(\vec{r})} \int_E \psi(E)|_{thermal} dE} \stackrel{=1}{=} \\
&= \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{fast}}{\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{thermal}} \stackrel{=1}{=}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Se si considera che con $\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{thermal}$ ci si può riferire alle condizioni di test in fabbrica con neutroni a spettro termico, quindi $\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{thermal} = \bar{\sigma}_i|_{thermal}$, ne segue che l'equazione 3.3 diventa

$$ESCF(\vec{r}) = \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{fast}}{\bar{\sigma}_i|_{thermal}} \tag{3.4}$$

Attraverso l'equazione 3.4 è possibile, dunque, modificare la sensitività della sonda in analisi dalle caratteristiche di monitoraggio di un flusso termico, $S|_{thermal}$ dato dalla casa costruttrice, alle condizioni del proprio esperimento $S(\vec{r})|_{fast}$, mediante la seguente relazione

$$S(\vec{r})|_{fast} = S|_{thermal} \cdot ESCF(\vec{r}) \tag{3.5}$$

Il valore della correzione in equazione 3.4 è calcolabile mediante il codice MCNPX, il numeratore mediante l'*input deck* realizzato del reattore, ipotizzando una certa posizione \vec{r} d'installazione, il denominatore mediante un apposito calcolo a parte che tenga in considerazione uno spettro neutronico termico dato da una distribuzione Maxwell-Boltzmann con $T = 293 K$.

Il metodo proposto restituisce, quindi, una prima stima delle sensitività degli strumenti analizzati senza introdurli direttamente nel codice MCNPX e preoccuparsi così di tutte le questioni inerenti la fisica alla base dei dispositivi: MCNP, difatti, è perfettamente in grado di riprodurre in simulazione il comportamento fisico di un rivelatore, purché esso sia riprodotto ad un livello di dettaglio molto spinto nel codice. Considerando che raramente si hanno a disposizione i dettagli costruttivi alla perfezione, tale operazione è generalmente condotta mediante un oneroso processo di *tuning sperimentale*, mediante una serie prove che consentano di "aggiustare il tiro" e ricostruire i dettagli tecnologici non noti per ipotesi successive.

È evidente che tale processo, con tutte le complicazioni del caso, è attuabile solo avendo a disposizione uno strumento reale ed un banco di prova per condurre tali test di tuning; una prima fase di valutazione, che consenta uno *screening* preliminare delle sonde, non potrebbe adottare approccio migliore di quello riassunto nell'equazione 3.5.

Ottenere un valore plausibile di sensitività il primo passo del processo di selezione dello strumento di monitoraggio più adeguato alla particolare condizione identificata. La sensitività aggiornata, insieme con la magnitudo del flusso neutronico locale, consente di valutare le condizioni di sollecitazione ed invecchiamento del dispositivo e del suo volume sensibile (*burn-up*), dando una stima della sua durata. Altri fattori, comunque, vanno tenuti in considerazione: ad esempio, vincoli di dose gamma possono accorciare la vita utile del dispositivo, o rendere poco statisticamente significativa la sua risposta.

La simulazione consente di effettuare valutazioni preliminari, ma è opportuno che il processo di selezione del migliore strumento di misura sia confortato passo passo da misure sperimentali che confermino le scelte intraprese; non è infrequente che nuovi aspetti non considerati ed inattesi si manifestino causando necessarie correzioni di tiro.

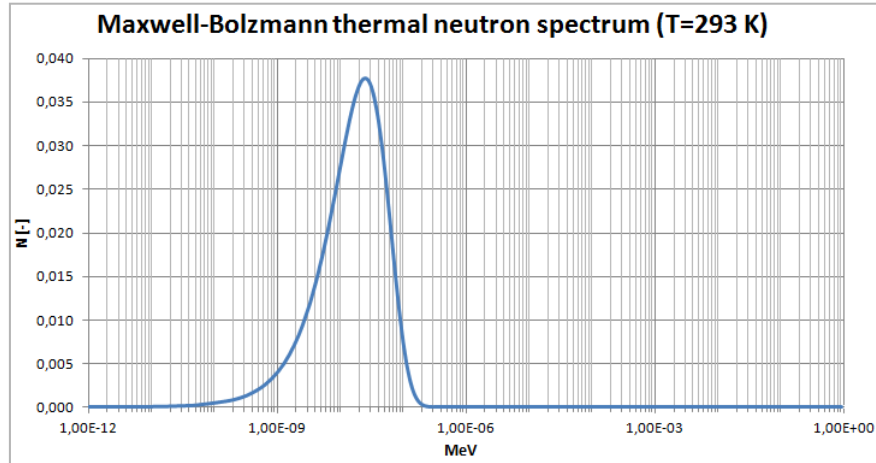


Figura 3.1: Spettro termico di *Maxwell-Boltzmann*, utilizzato per la stima del fattore di correzione nella equazione 3.4.

	CF: U _{Photonis}	SPND: ⁵¹ V,	SPND: ¹⁰³ Rh	SPND: ⁵⁹ Co
$\bar{\sigma}_i _{thermal}$ [barn]	625 ± 0,125	5,75 ± 0,001	166,4 ± 0,037	42,4 ± 0,01

Tabella 3.5: Valori delle sezioni d'urto microscopiche di fissione per la camera fissione, e cattura radiativa per i SPND, in corrispondenza dello spettro energetico di neutroni termici, Figura 3.1.

Nei prossimi paragrafi si riportano i risultati di applicazione della metodologia mostrata alla strumentazione in Tabella 3.1 e Tabella 3.3.

3.2.1 Applicazione della metodologia di aggiornamento della sensitività neutronica a camere a fissione e SPND: FASE I

La procedura matematica di aggiornamento delle prestazioni, descritta attraverso le equazioni 3.1-3.5, presuppone un calcolo "esterno" alla simulazione del reattore ALFRED per la valutazione dei valori $\bar{\sigma}_i|_{thermal}$ in equazione 3.4. Il riferimento di spettro energetico è la distribuzione Maxwell-Boltzmann con $T = 293 K$, presentata in Figura 3.1.

Ciascun materiale sensibile, uranio (in composizione isotopica ²³⁵U:93,0%, ²³⁸U:5,94%, ²³⁴U:0,99%, ²³⁶U:0,08%) per le camere a fissione Photonis, ⁵¹V, ¹⁰³Rh e ⁵⁹Co per i SPND, è stato dunque sottoposto al tale spettro per il calcolo dei valori $\bar{\sigma}_i|_{thermal}$, che sono riportati in Tabella 3.5.

Il calcolo degli *Energy Spectrum Correction Factor* prosegue con il calcolo dei numeratori dell'equazione 3.4, che necessitano primariamente di stabilire i punti in cui sarà installata la strumentazione, ove è appunto interessante conoscere le prestazioni dei dispositivi. La prima fase di valutazione ha utilizzato i punti di misura mostrati in Figura 2.10. Celle opportune di materiali sensibili dei rivelatori sotto indagine sono state inserite nel modello MCNPX del reattore ALFRED e sottoposti ad irraggiamento (run da $60 \cdot 10^6 nps$ con $k = 1,00024 \pm 0,00007$ per l'uranio; run da $100 \cdot 10^6 nps$ con $k = 1,00028 \pm 0,00005$ per ⁵¹V, ¹⁰³Rh e ⁵⁹Co), calcolando attraverso le *tally f4* i gruppi $\bar{\sigma}_i(\vec{r})|_{fast}$. In questo caso, si ha un valore di *Energy Spectrum Correction Factor* per ogni posizione indagata, ed una rappresentazione tabulare non sarebbe eloquente come i grafici di seguito riportati in Figura 3.2 e Figura 3.3.

Com'è evidente, esiste una variazione della sensitività delle sonde spostandosi da una posizione all'altra: in particolare, quella più significativa si riscontra in corrispondenza della transizione tra la parte attiva del nocciolo e il riflettore, sulla traversa radiale giacente sul piano mediano di

nocciolo, Figura 3.2. Il materiale sensibile che mostra la variazione più significativa (oscillazioni di due ordini di grandezza) è il ^{59}Co . Tale andamento ha come giustificazione la sostanziale differenza dell'energia media dello spettro *in-core*, posizioni C1,... C5, rispetto alla posizione C6, che risulta *out-of-core*.

Sul *nose plane*, Figura 3.3, non si apprezzano variazioni sostanziali passando da una posizione all'altra; è bene notare, comunque, che, a parità di rivelatore, i valori di sensitività si modificano fino a due ordini di grandezza, muovendosi dal *core plane* al *nose plane*, sempre per l'effetto di riduzione dell'energia media dello spettro neutronico, che innalza i valori delle sezioni d'urto d'assorbimento, che generalmente aumentano al diminuire dell'energia dei neutroni.

Attraverso i valori aggiornati delle sensitività degli strumenti (equazione 3.5), è possibile valutare anche la risposta -e quindi il segnale elettrico atteso che si misurerebbe in output nelle condizioni di esperimento reale-, mediante la seguente relazione, ove si richiama $p(\vec{r})$, la magnitudo dello spettro neutronico misurato nella posizione indagata.

$$R(\vec{r})|_{fast} = p(\vec{r}) \cdot S(\vec{r})|_{fast} \quad (3.6)$$

Di seguito, per brevità, si riportano solo le risposte elettriche della *Photonis CFUE32*, Figure 3.4-3.5, e del *KWD 5503-Co-210*, Figure 3.8-3.9, secondo l'equazione 3.6 e per diversi livelli di potenza del reattore ALFRED, nei punti d'installazione individuati in Figura 2.10.

Per la camera a fissione *Photonis CFUE32*, il costruttore identifica una soglia di fluensa, E_{th} sulla base dell'esposizione ad un flusso neutronico a spettro termico. Con l'ausilio dei $ESCF(\vec{r})$ determinati, può correggersi anche tale soglia ed aggiornarla ai flussi neutronici veloci di ALFRED secondo la relazione $E_{th}/ESCF(\vec{r})$. Dividendo, quindi, la soglia in fluensa aggiornata alla specifica posizione \vec{r} , per il corrispondente flusso neutronico $p(\vec{r})$, si ha una stima di durata della sonda nell'ipotesi di irraggiamento continuo e costante nella posizione indagata, Figure 3.6-3.7.

$$t(\vec{r}) = \frac{E_{th}/ESCF(\vec{r})}{p(\vec{r})} \quad (3.7)$$

Per quanto concerne i Self Powered Neutron Detectors, non esistono dei limiti d'irraggiamento predeterminati e disponibili a catalogo: contrariamente alle camere a fissione, i SPND non soffrono dello sporcamiento del volume sensibile ad opera dei prodotti di fissione, ed in più sono completamente a stato solido, quindi più tecnologicamente resistenti. Per questo, nel caso del SPND *KWD 5503-Co-210* si è proceduto semplicemente a calcolare i valori di burn-up corrispondenti alle posizioni \vec{r} indagate. Il costruttore identifica un valore di *burn-up* termico, $B.U._{th}$ corrispondente ad un certo flusso neutronico termico p_{th} . Con l'ausilio dei $ESCF(\vec{r})$ determinati, ed i valori $p(\vec{r})$ corrispondenti, può aggiornarsi il valore del di *burn-up* ai flussi neutronici veloci di ALFRED, Figure 3.10-3.11.

$$B.U.(\vec{r}) = \frac{B.U._{th}}{p_{th}} \cdot ESCF(\vec{r}) \cdot p(\vec{r}) \quad (3.8)$$

Nel paragrafo successivo saranno analizzate sia le risposte che gli effetti del prolungato irraggiamento delle sonde analizzate, ricavando le opportune conclusioni circa l'effettiva applicabilità, almeno in prima ipotesi, dei detti strumenti alle esigenze di monitoraggio di ALFRED.

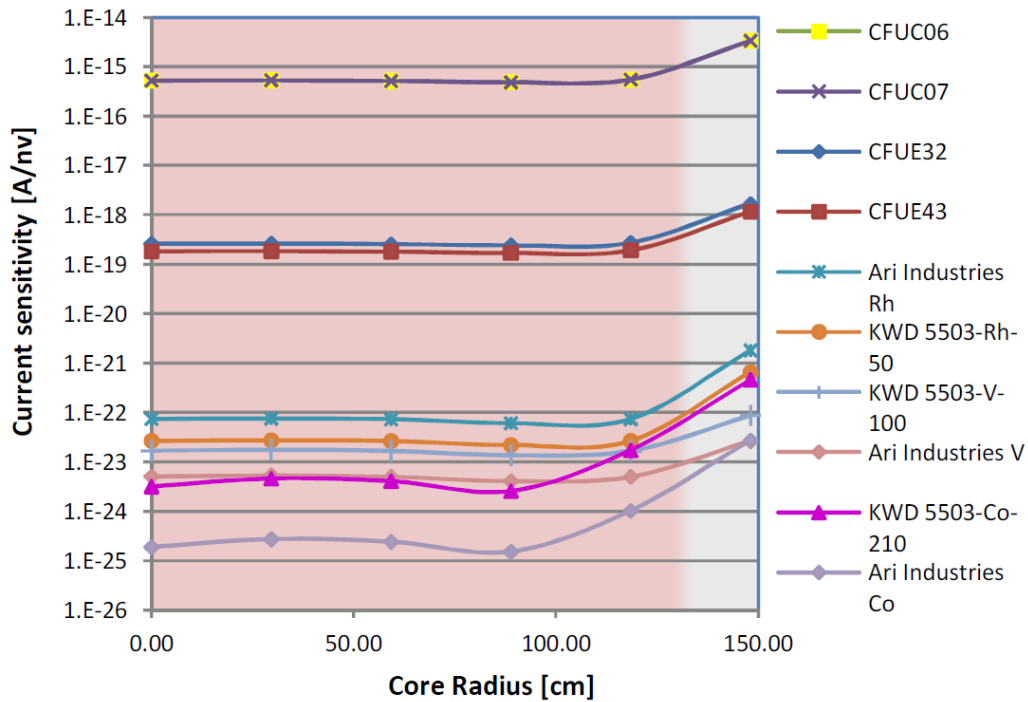


Figura 3.2: Sensività, in *current mode*, corrette per le camere a fissione e i SPND riportati in Tabella 3.1 e Tabella 3.3, nelle posizioni "core-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.4-3.5. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.

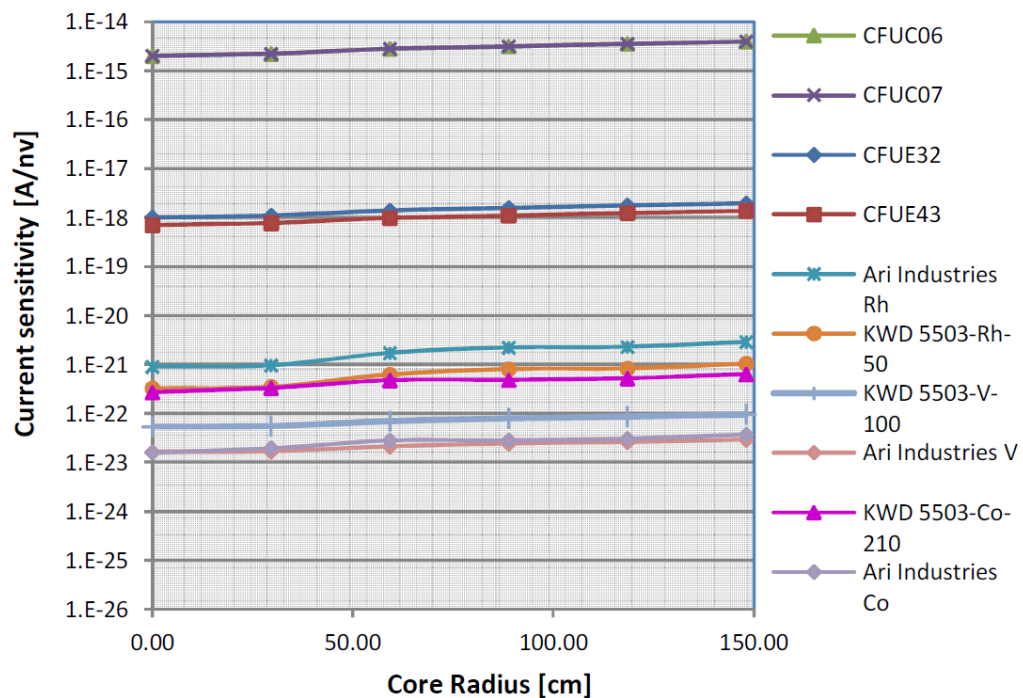


Figura 3.3: Sensività, in *current mode*, corrette per le camere a fissione e i SPND riportati in Tabella 3.1 e Tabella 3.3, nelle posizioni "nose-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.4-3.5.

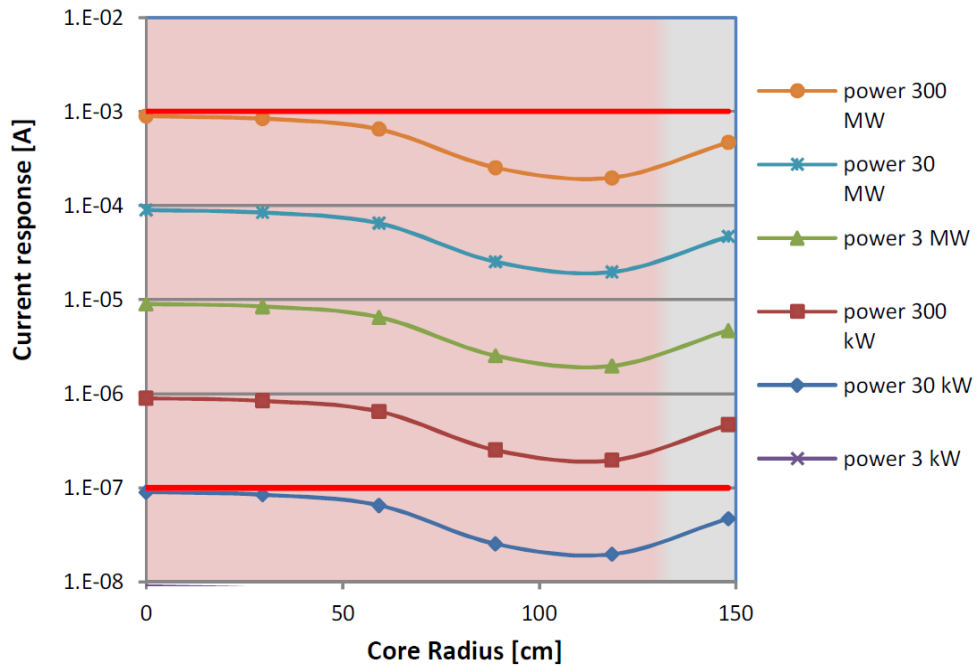


Figura 3.4: Risposta, in *current mode* della camera a fissione *Photonis CFUE32* nelle posizioni "core-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.

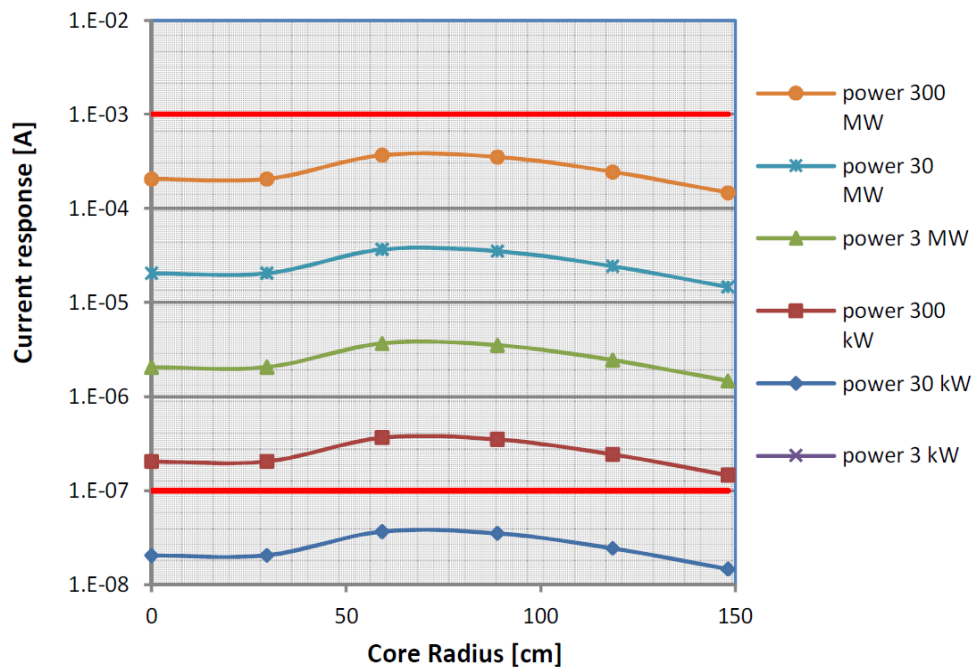


Figura 3.5: Risposta, in *current mode* della camera a fissione *Photonis CFUE32* nelle posizioni "nose-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.

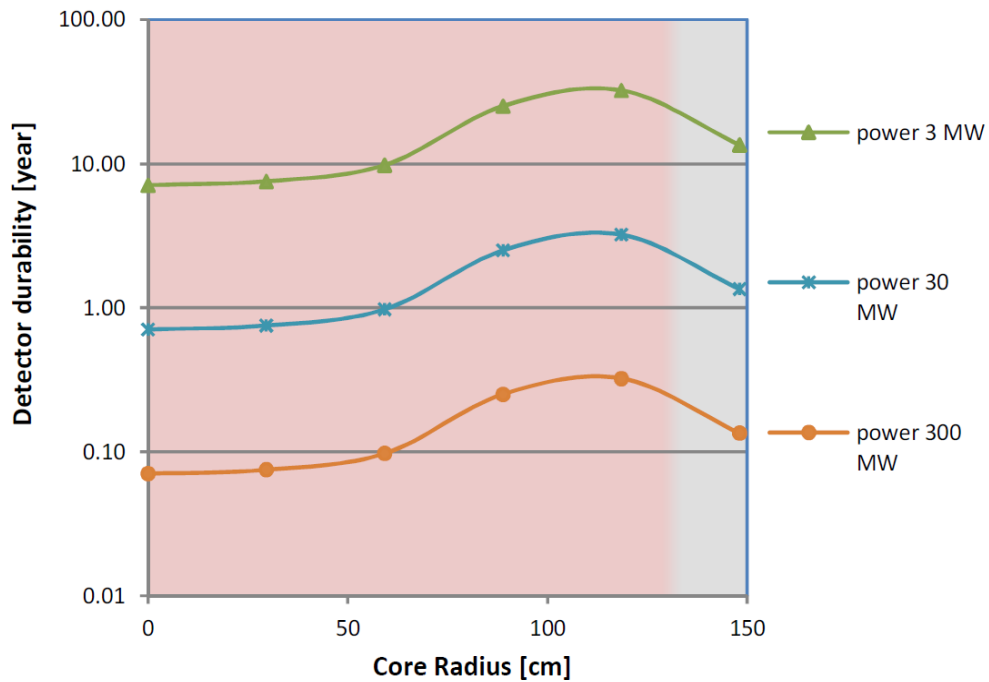


Figura 3.6: Tempo di durata della camera a fissione *Photonis CFUE32* nelle posizioni "core-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.7. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.

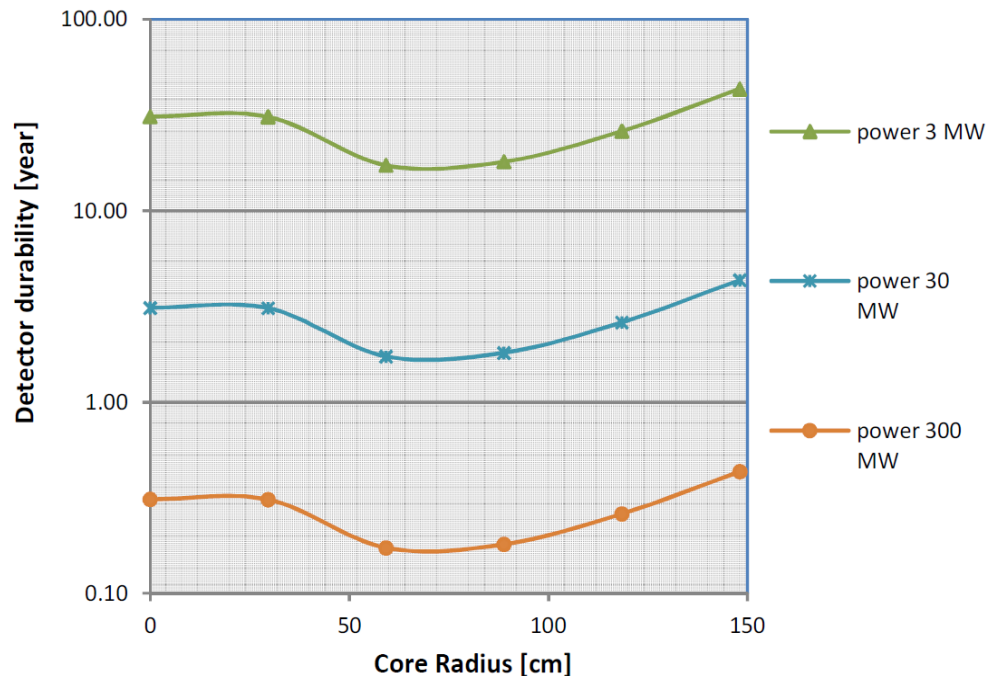


Figura 3.7: Tempo di durata della camera a fissione *Photonis CFUE32* nelle posizioni "nose-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.7. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.

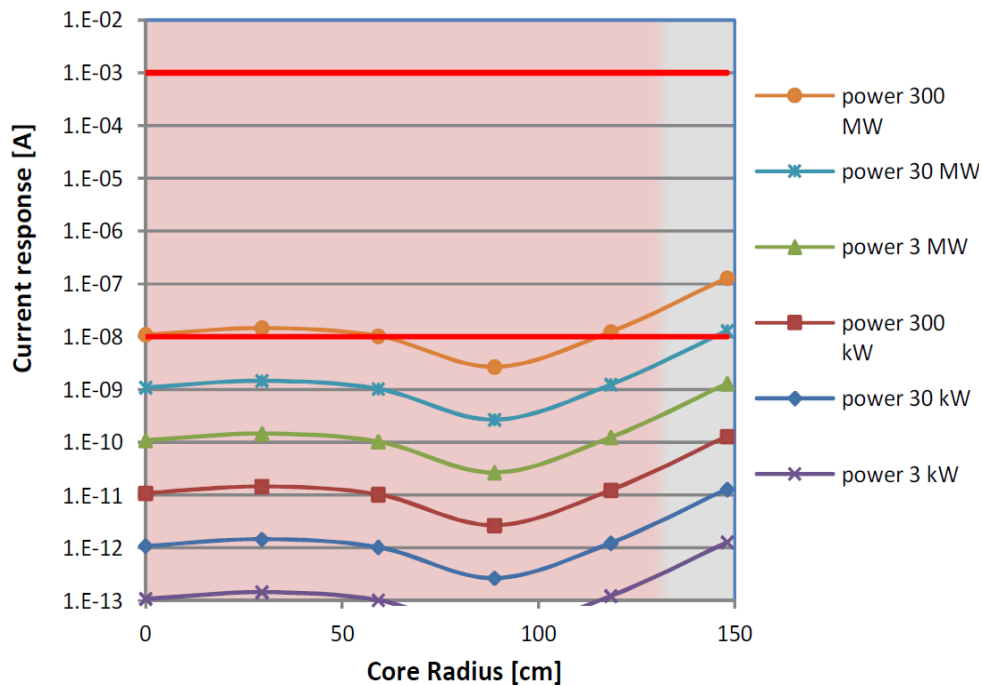


Figura 3.8: Risposta, in *current mode* della SPND *KWD 5503-Co-210* nelle posizioni "*core-plane*" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.

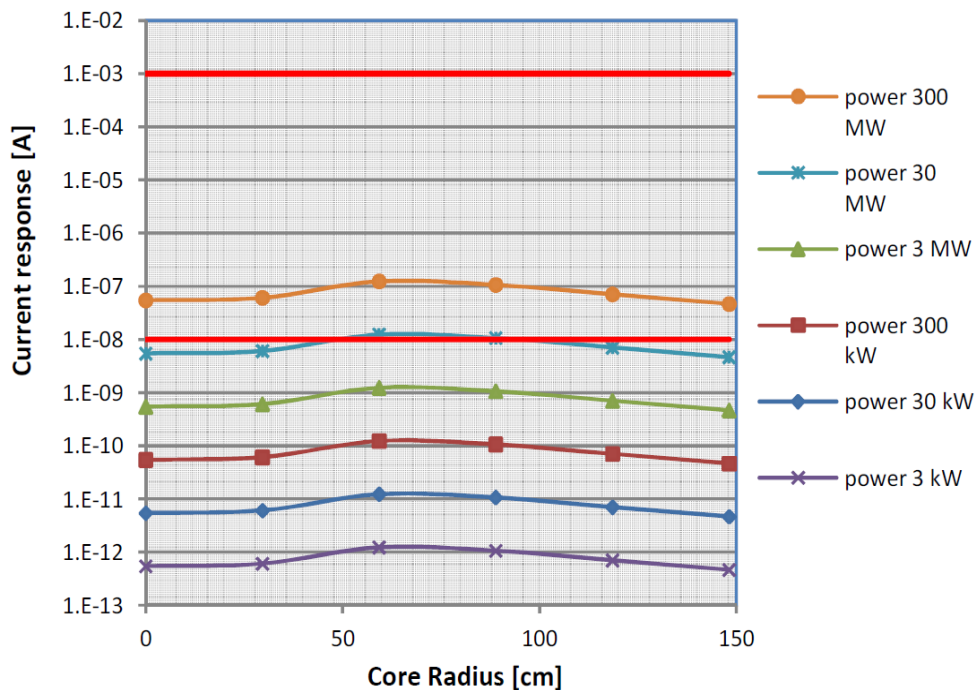


Figura 3.9: Risposta, in *current mode* della SPND *KWD 5503-Co-210* nelle posizioni "*nose-plane*" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo le equazioni 3.5-3.6. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.

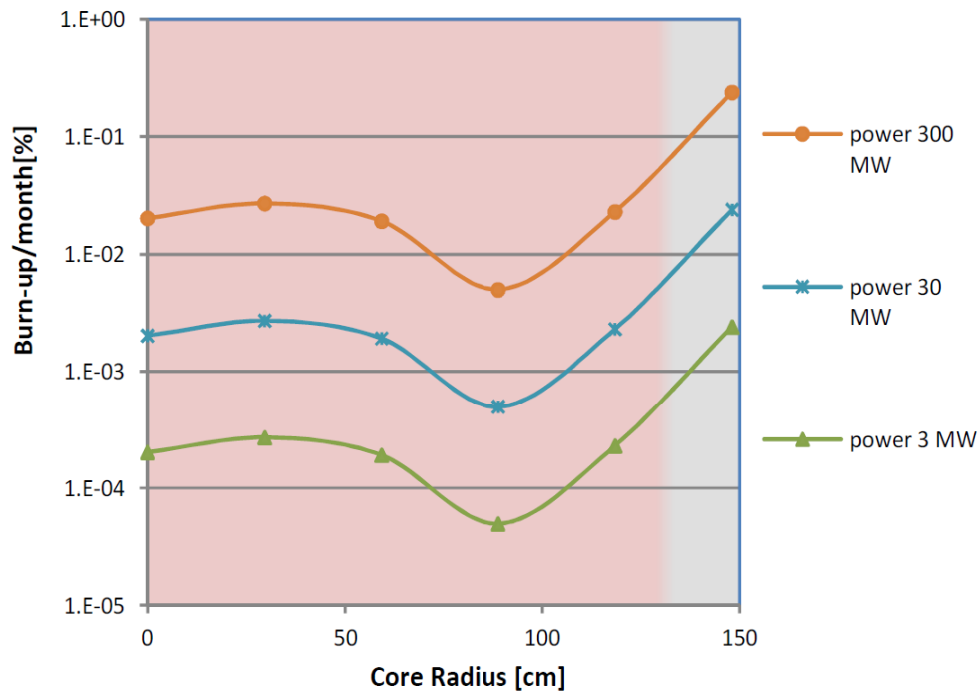


Figura 3.10: Burn-up del SPND *KWD 5503-Co-210* nelle posizioni "core-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.8. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore. La transizione dalla sfumatura rossa al grigio indica il confine tra la parte attiva del nocciolo e l'inizio degli elementi riflettori.

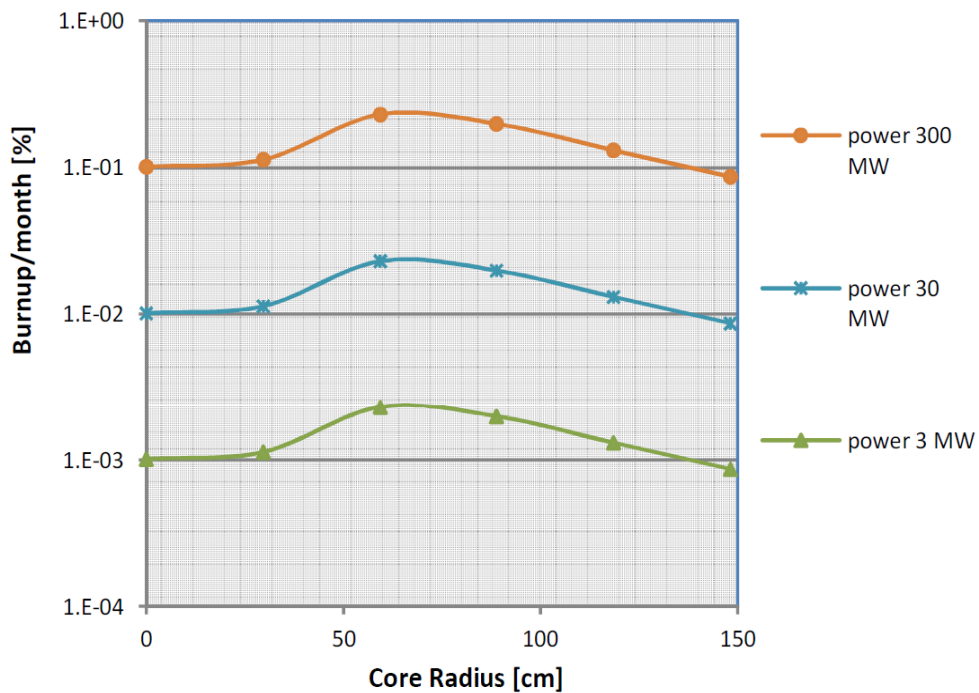


Figura 3.11: Burn-up del SPND *KWD 5503-Co-210* nelle posizioni "nose-plane" di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.10), secondo l'equazione 3.8. La regione individuata tra i segmenti rossi orizzontali identifica la finestra di possibile utilizzo del rivelatore.

3.2.2 Selezione delle condizioni operative ottimali per le sonde analizzate: risultati della FASE I

A questo punto, possono trarsi delle conclusioni circa l'applicabilità delle camere a fissione e degli SPND precedentemente citati al reattore ALFRED. Per quanto concerne le **camere a fissione**:

- le *Photonis CFUC06* e *CFUC07* sono utilizzabili fino ad una massima potenza di 10 MW, per lo più in MSV e *current mode*, dopo di che si troverebbero ad operare fuori dai range consentiti. Ciò significherebbe che, se utilizzate nell'avviamento di reattore, esse devano poi essere rimosse al limite dei 10 MW prima di poter continuare la salita a potenza, pena la loro andata fuori servizio. Se la rimozione può essere facilmente pensata negli elementi riflettori, che possono assumere un layout tale da consentire l'estrazione e la variazione di quota dello strumento, effettuare la medesima operazione negli elementi di combustibile può risultare notevolmente più complesso: ne segue che le posizioni N1, N2, N3, N4 e N5 non sono attuabili con semplicità. Ne segue che queste sonde possono essere utilizzate solo negli elementi riflettori o anche radialmente "più lontano", nel barrel o al di fuori di esso;
- la *Photonis CFUE32* sembrerebbe essere lo strumento più adatto allo scopo di monitoraggio del flusso neutronico visto che riuscirebbe, con le tre modalità di funzionamento, a seguire tutta l'evoluzione del reattore, dalla potenza "0" alla potenza nominale, in posizioni *in-core* e *out-of-core*. Il problema fondamentale dell'uso *in-core* è nella durabilità alla potenza nominale: da Figura 3.6 si evince che sul piano mediano di nocciolo e all'interno dei fasci di barrette combustibili, lo strumento non durerebbe più di 3 mesi, accettando una perdita in sensitività di 1%. Le installazioni *out-of-core* nei *noses* degli elementi combustibili o negli elementi riflettori garantirebbero durate più elevate, fino ad un massimo di 6-9 mesi, sempre accettando una perdita in sensitività di 1%. Per allungare questi tempi, occorre ridurre l'esposizione al flusso della camera (installazione "più lontano") o accettare una maggiore degradazione della sua sensitività. Accettando una riduzione della sensitività nell'ordine del 10%, lo strumento durerebbe al massimo 2 anni nell'installazione *in-core* e 4-6 anni in posizioni *out-of-core*. Qualora non si possa accettare una variazione della sensitività così ampia, non resta che, in caso di un uso *in-core* dello strumento, di estrarlo durante la salita in potenza;
- la *Photonis CFUE43* risulta utilizzabile a partire da circa 100 kW e, dunque, non è in grado di seguire inizialmente la salita in potenza. Questo strumento soffre le stesse problematiche di installazione e durata della *Photonis CFUE32*.

Sintetizzando, quindi, le *Photonis CFUE32* e *CFUE43* sembrerebbero essere gli strumenti più adeguati al monitoraggio del reattore ALFRED, almeno per installazioni *out-of-core*. Rimane da determinare, tuttavia, quale sia la massima fluenza ammissibile per lo strumento, prima che esso non sia più in grado di seguire linearmente l'andamento del flusso neutronico: come detto in precedenza, la durate stimate sono da considerarsi dei limiti superiori, poiché potrebbero verificarsi danneggiamenti da flusso neutronico veloce che possono pregiudicare il buon funzionamento della camera a fissione già prima che essa perda sensitività a causa del bruciamento del fissile.

Per quanto concerne i **SPND**, invece, è evidente che essi necessitano di flussi neutronici consistenti per poter funzionare, dati gli scarsi valori assunti dalle sensitività, se confrontate con le precedenti camere a fissione:

- i regimi di bassa potenza non sono facilmente monitorabili, sebbene sia possibile creare anche un *assembly* di SPND connettendo in parallelo più sonde al fine di aumentare la significatività statistica del segnale elettrico. Va detto però che aumentare il numero delle sonde o realizzarne di più grandi conduce verso la perdita dell'*informazione locale*, approdando ad una informazione "più globale";

- se l'interesse è il controllo di reattore, avendo un nocciolo fortemente accoppiato, il reattore ALFRED risulterebbe ben controllabile dall'esterno: si può pensare, allora, di disporre una corona di SPND attorno al nocciolo, creando dei fasci di strumenti negli elementi riflettori, laddove c'è spazio a sufficienza e il flusso neutronico è ancora sufficientemente forte ad ottenere dei segnali significativi. Va verificata la capacità di un eventuale *assembly* nel seguire i regimi di potenza "0";
- in linea teorica, sarebbe possibile installare dei SPND più grossi o fasci di strumenti anche al di sopra dei *noses* degli elementi combustibili, visto lo spazio disponibile: i risultati nelle tabelle precedenti mostrano, tuttavia, una scarsa significatività dei segnali per tali posizionamenti e ciò è dovuto al flusso neutronico intrinsecamente più basso per le posizioni in questione.

3.2.3 Applicazione della metodologia di aggiornamento della sensibilità neutronica a camere a fissione e SPND: FASE II

Il calcolo presentato nei paragrafi 3.2.1 e 3.2.2, è stato ripetuto a valle dei risultati di simulazione più accurati presentati nei paragrafi 2.2.2 e 2.2.3 riguardo i campi neutronico e gamma nelle posizioni in Figura 2.13.

In questa fase, beneficiando dei risultati della precedente, si è scelto di concentrare l'attenzione solamente su tre sonde, la *Photonis CFUE32* (cfr. Tabella 3.1) ed i SPND *Thermocoax Co-type* e *Thermocoax Pt-type*, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3.6. La scelta di orientamento verso il brand *Thermocoax* deriva dalla disponibilità di dettagliati disegni costruttivi, che hanno consentito, come si vedrà di seguito, una modellazione molto accurata di tali dispositivi, utile non tanto in questa fase, quanto per quello che si mostrerà nei capitoli successivi.

Sia la *Photonis CFUE32* che i SPND *Thermocoax* citati, risultano strumentazione pronta, con tempo di risposta $< 50\text{ ms}$, adatta al comando e controllo del reattore, oltre che per eventuali studi di *burn-up* del combustibile.

Fermo restando i valori $\bar{\sigma}_i|_{thermal}$ riportati in Tabella 3.5, il calcolo degli *Energy Spectrum Correction Factor* è stato eseguito nelle posizioni in Figura 2.13. Di seguito sono presentate le sensibilità aggiornate per gli strumenti analizzati, in particolare:

- Figura 3.12: sensibilità della camera a fissione *Photonis CFUE32* in *pulse mode*;
- Figura 3.13: sensibilità della camera a fissione *Photonis CFUE32* in *MSV mode*;
- Figura 3.14: sensibilità della camera a fissione *Photonis CFUE32* in *current mode*;
- Figura 3.15: sensibilità del SPND *Thermocoax Co-type* in *current mode*;
- Figura 3.16: sensibilità del SPND *Thermocoax Pt-type* in *current mode*.

Costruttore	Modello	Sensibilità [A/nv]	Dimensioni dell'emettitore [mm]	Dimensioni complessive [mm]
Thermocoax	Co-type	$1,42 \cdot 10^{-21}$	D=1, H=200	D=2,5, H=250
Thermocoax	Pt-type	$1,8 \cdot 10^{-21}$	D=1, H=200	D=2,5, H=250

Tabella 3.6: Caratteristiche di riferimento dei SPND *Thermocoax* disponibili commercialmente ed applicabili al reattore ALFRED.

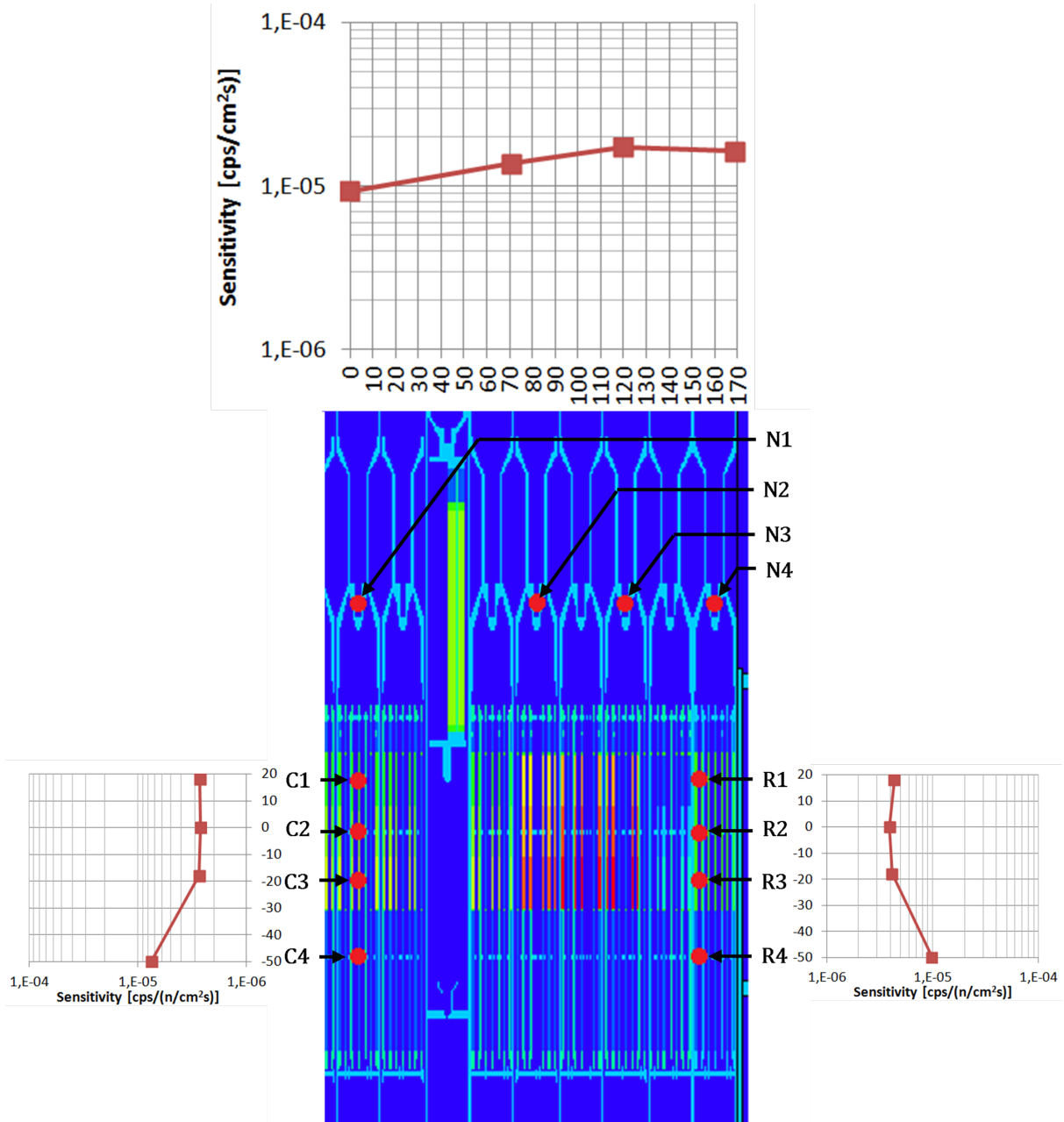


Figura 3.12: Sensività della camera a fissione *Photonis CFUE32* in *pulse mode* nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.

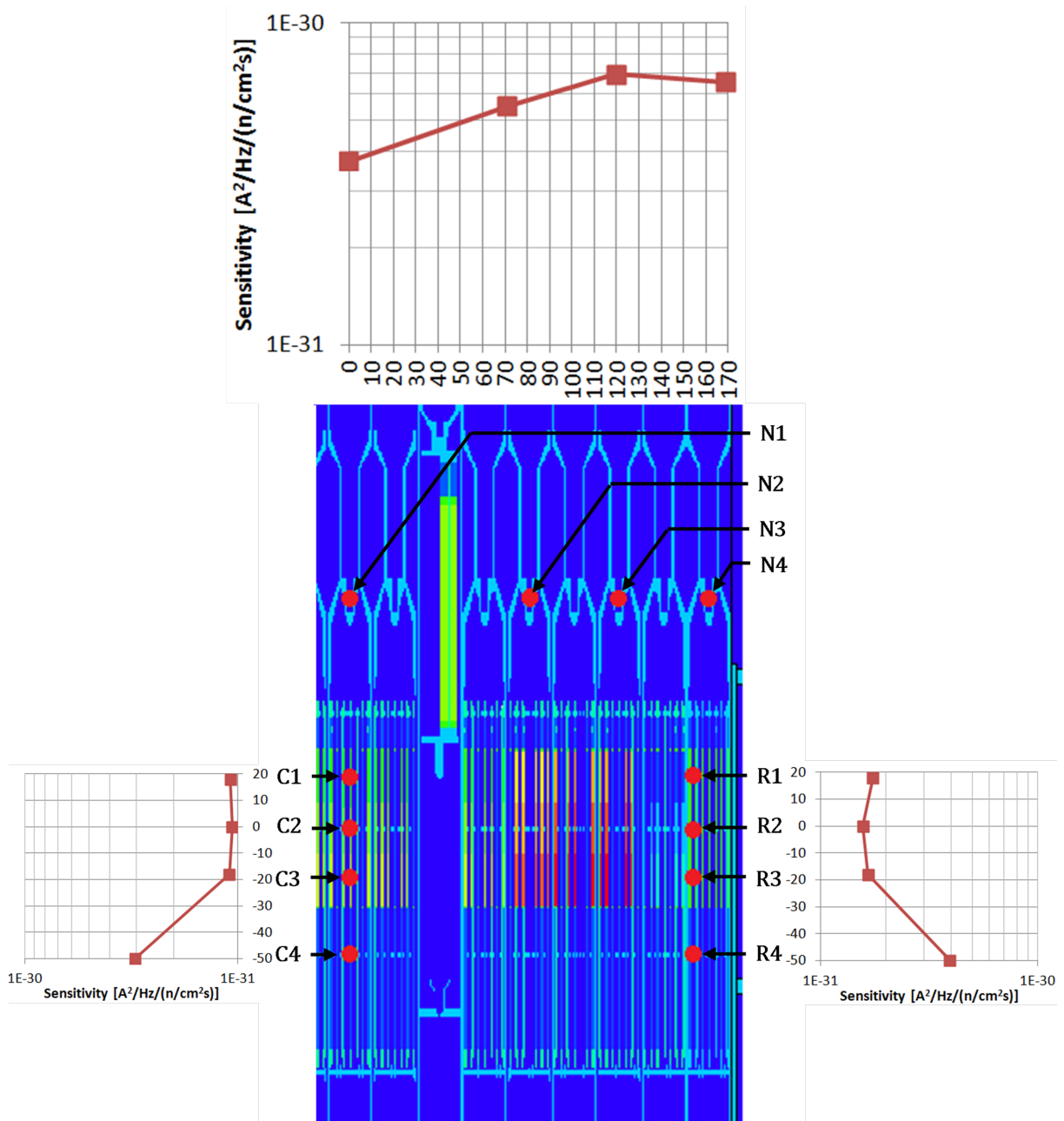


Figura 3.13: Sensività della camera a fissione *Photonis CFUE32* in *MSV mode* nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.

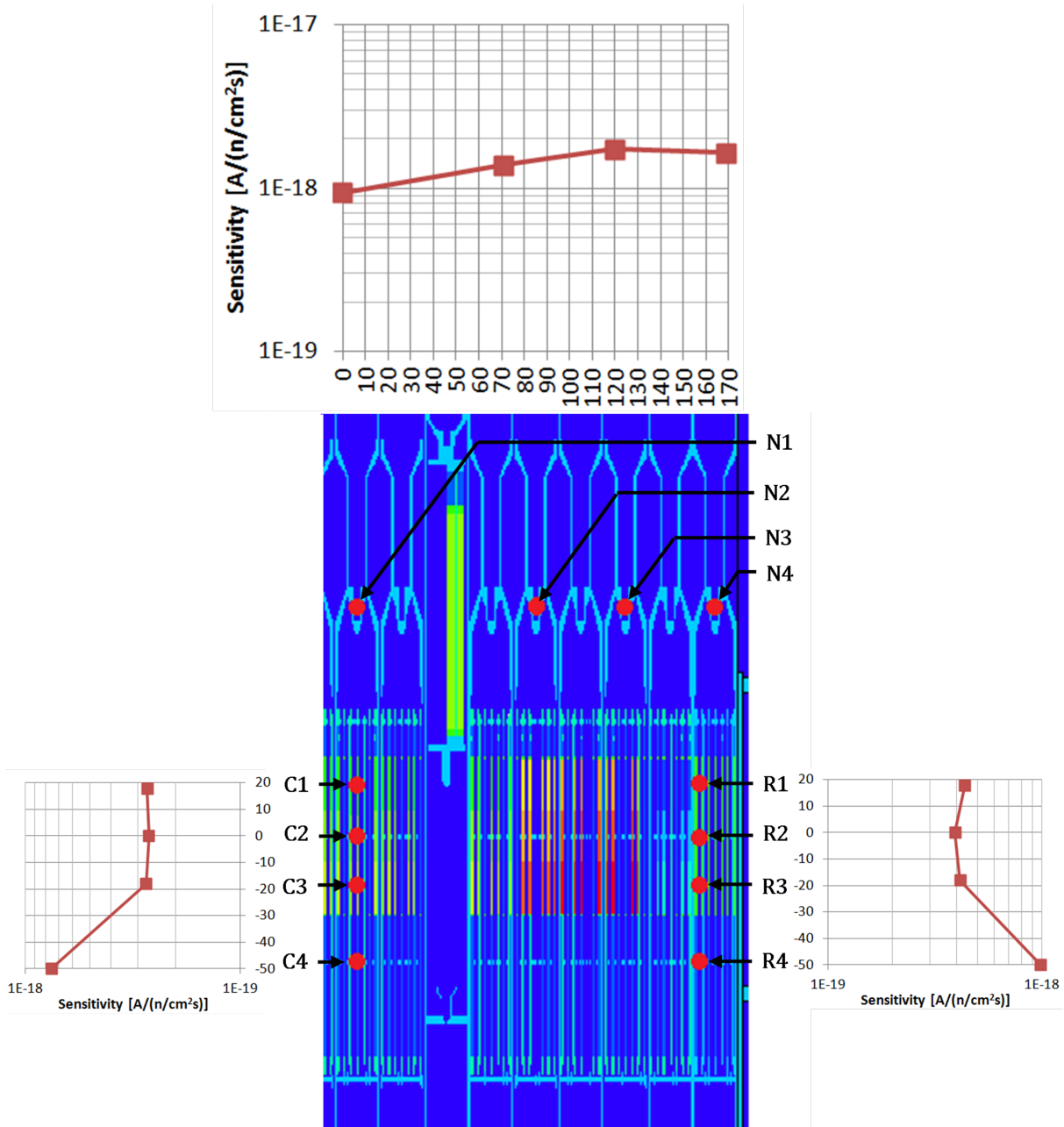


Figura 3.14: Sensività della camera a fissione *Photonis CFUE32* in *current mode* nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.

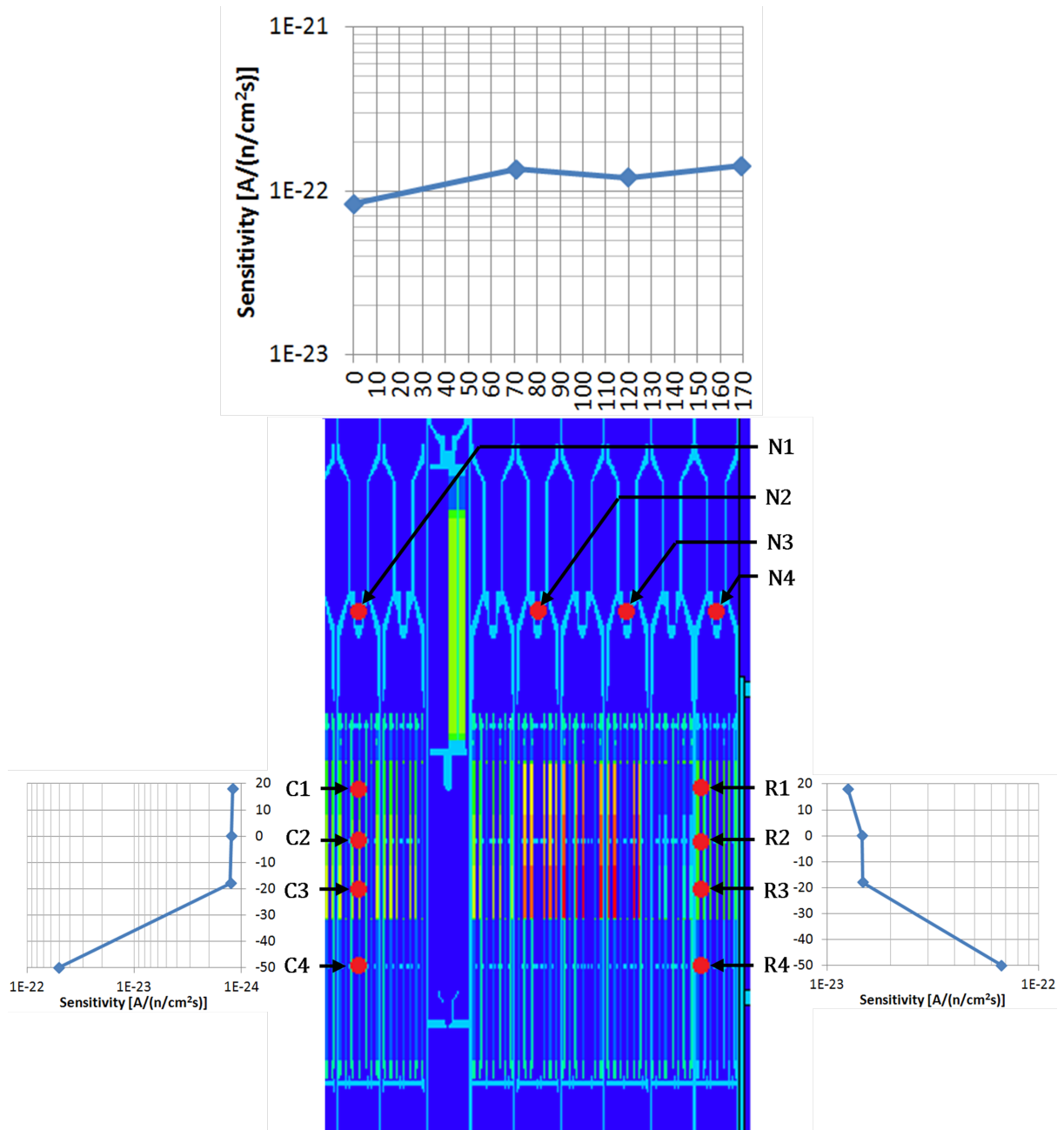


Figura 3.15: Sensività del SPND *Thermocoax Co-type* in *current mode* nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.

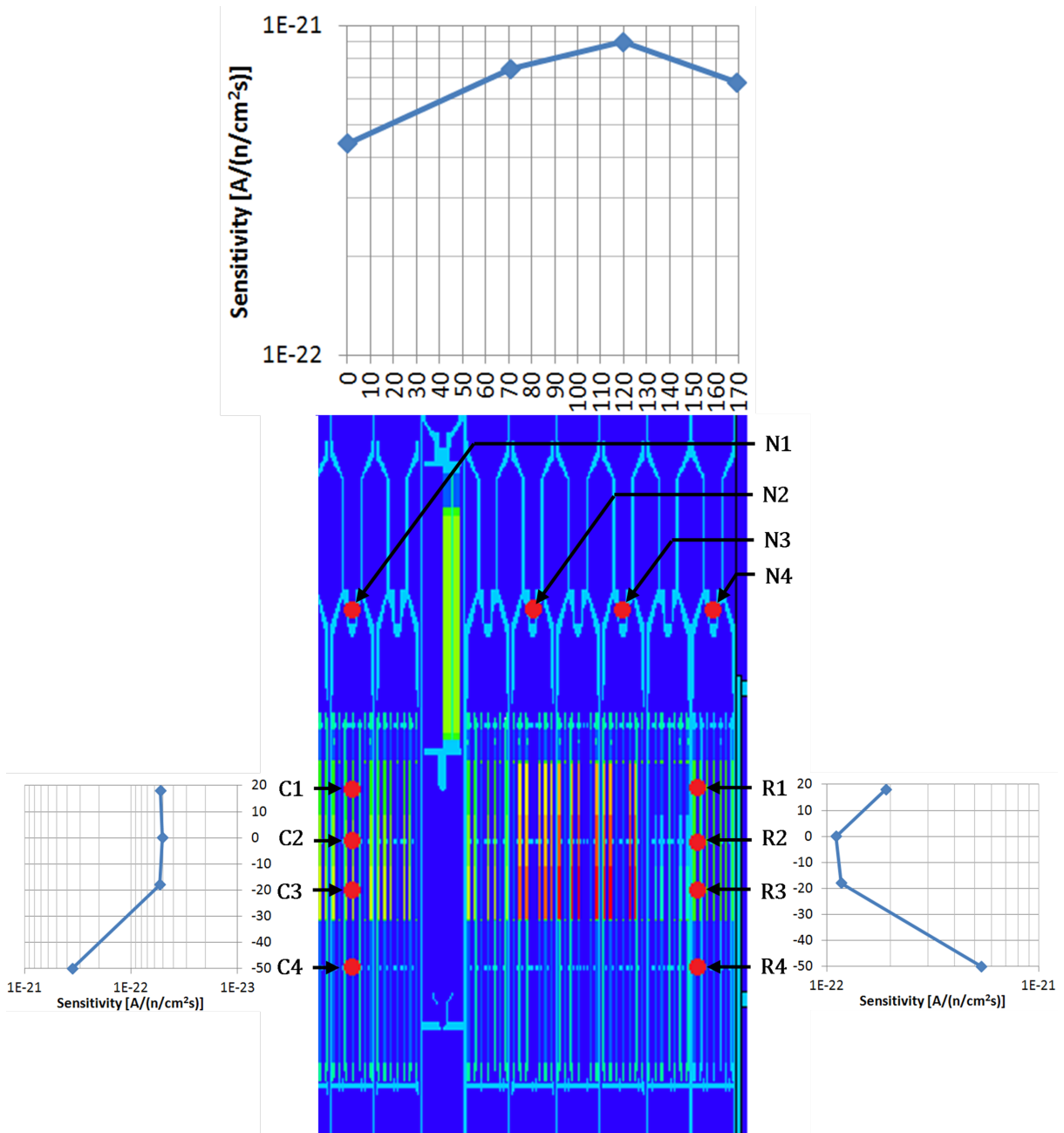


Figura 3.16: Sensività del SPND *Thermocoax Pt-type* in *current mode* nelle posizioni d'installazione in ALFRED in Figura 2.13.

Come in precedenza, le variazioni più significative nelle sensitività delle sonde si riscontrano in corrispondenza della transizione tra la parte attiva del nocciolo e le altre zone.

In tutti i trend analizzati, Figure 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16, si evince un aumento della sensitività di tutte le sonde in quelle posizioni che presentano le energie medie di spettro neutronico più basse. Le sensitività individuate variano -lungo una traversa, tra valori minimo e massimo- da valori di qualche per cento fino ad un fattore circa 50 nel caso del ^{59}Co , anche in relazione alla specifica forma assunta dalla sezione d'urto della reazione nucleare su cui si basa il segnale prodotto dal sensore. In alcuni casi, pertanto, può considerarsi un unico valor medio per la sensitività; in altri, le variazioni risultano così elevate da non potersi considerare trascurabili.

La disponibilità di dati circa il campo gamma di reattore, consente anche di valutare gli effetti d'interferenza ad esso dovuti, essendo gli strumenti analizzati sensibili non solo ai neutroni, ma anche al fondo gamma di reattore.

La sensitività gamma della camera a fissione *Photonis CFUE32* è data essere da specifiche tecniche $3,6 \cdot 10^{-7} A/(Gy/s)$ per funzionamento in *current mode*, con una massimo *rateo di kerma* tollerabile di $\sim 3 Gy/s$. A causa di tale vincolo, appare immediatamente chiaro che non è possibile utilizzare questo strumento per potenze di reattore superiori a $300 kW_{th}$ (cfr. Tabella 2.6). Le posizioni più critiche per l'interferenza gamma risultano essere quelle prossime al combustibile, dove si registrano i più alti ratei di kerma.

La camera a fissione studiata, nelle installazioni in prossimità del combustibile e nel funzionamento in *current mode* è notevolmente disturbata dal campo gamma di reattore (Tabella 3.7), che produce un contributo alla risposta della sonda più che significativo, con valori comparabili con la sola risposta neutronica. È pertanto sconsigliabile utilizzare lo strumento in *current mode*, a meno che non si utilizzi una tecnica di sottrazione del contributo del fondo gamma.

La sensitività gamma degli strumenti, ed in particolare per i SPND, è funzione dell'energia della radiazione stessa, e dei materiali costituenti la sonda, in relazione all'andamento del coefficienti d'attenuazione lineare e alla natura degli eventi indotti dai gamma interagenti con lo strumento. È immediatamente possibile notare che la traversa radiale dei *noses* e i punti C4 e R4, essendo significativamente lontani dal nocciolo (il che interpone tra esso e i punti di misura un consistente strato di piombo schermante), sono interessati da un flusso gamma di almeno due ordini di grandezza inferiore al flusso neutronico, il che rende il contributo degli *elettroni di risposta "mossi"* dai fotoni del nocciolo intrinsecamente trascurabile, a causa della scarsa popolazione fotonica. L'effetto di attenuazione del piombo si riscontra anche nell'energia media degli spettri gamma nelle dette posizioni, visto che si registrano delle energie medie alte, tra i $900 \div 1500 keV$. I punti interni al nocciolo, o immediatamente affacciati ad esso, sono invece interessati da un flusso gamma paragonabile al flusso neutronico; ciò si riscontra anche dalle energie medie degli spettri, qui più basse (intorno ai $500 keV$) poiché non c'è sufficiente piombo ad attenuare i fotoni di bassa energia. In questa condizione, può essere significativo andare a studiare la sensitività gamma dei SPND, visto che il campo gamma non è trascurabile.

Come risulta evidente da Tabella 3.8, le sonde SPND-pronte studiate, essendo basate -come tecnica di rivelazione- sulla radiazione gamma pronta emessa a valle della diseccitazione gamma seguente la cattura neutronica, sono sensibili anche alla radiazione fotonica proveniente dall'esterno della sonda. Ne segue che oltre alla corrente misurabile dovuta all'interazione dei neutroni con la sonda stessa, vi sarà un contributo ulteriore derivante dal fondo gamma del reattore. Tali contributi sono da tenere in considerazione perché in alcuni casi non trascurabili. Dai calcoli effettuati, si evince che per la sonda SPND al cobalto, in caso di installazione nell'elemento di combustibile centrale, lo strumento risulta più sensibile al campo gamma che ai neutroni: questo effetto è dovuto alla forma della sezione d'urto di cattura del ^{59}Co , che assume valori esigui alle alte energie dello spettro neutronico nelle dette posizioni, facendo sì che la sensitività neutronica nelle stesse sia bassa. Nell'installazione nell'elemento riflettore, invece, la minore energia media dello spettro neutronico assicura una sensitività neutronica della sonda più alta, sicché essa risulta più sensibile ai neutroni che al campo gamma di reattore. Per quanto concerne la sonda SPND al platino, sia nell'installazione nell'elemento di combustibile centrale che nell'installazione nell'elemento riflettore, la sensitività neutronica risulta essere

	Energia media γ [keV]	Rapporto γ/n	Sensitività γ <i>Photonis</i> <i>CFUE32</i> [A/nv]	Sensitività γ / Sensitività n [-]
C1	500	0,1365	1,69E-19	0,62
C2	450	0,1456	1,73E-19	0,65
C3	500	0,1464	1,69E-19	0,63
R1	500	0,1986	2,23E-19	0,51
R2	600	0,1881	2,63E-19	0,67
R3	450	0,2585	2,72E-19	0,66

Tabella 3.7: Sensitività γ della camera a fissione *Photonis CFUE32*, nelle condizioni in cui il flusso gamma risulta essere un disturbo significativo.

sempre maggiore della sensitività al campo gamma di reattore. È pensabile, comunque, un'installazione anche di SPND sensibili ai solo gamma e di materiali simili a cobalto e platino degli emettitori utilizzati negli SPND precedenti, così da ottenere una risposta gamma *sottraibile* alle risposte "lorde" degli strumenti precedenti, ed ottenere così risposte "nette", dovute ai soli neutroni.

Attraverso i valori aggiornati delle sensitività degli strumenti (equazione 3.5) ed i valori di flusso neutronico in Figura 2.14, è possibile valutare anche la risposta -e quindi il segnale elettrico atteso che si misurerebbe in output nelle condizioni di esperimento reale-, mediante la relazione 3.6.

Per la camera a fissione *Photonis CFUE32*, si presenta solo il funzionamento in *current mode*, visto che interessa la verifica della possibilità d'impiego della strumentazione ai livelli di potenza $10 \div 100\%$ della potenza nominale, ove l'abbondanza della popolazione neutronica obbliga ad operare lo strumento in proprio in questa modalità. La potenza "0" del reattore può essere misurata agevolmente attraverso il *pulse mode*, mentre tutti i valori intermedi (dal MW_{th} in su) possono sfruttare il *MSV mode* (*Campbell mode*) fino a circa il 10% della potenza nominale, ove può effettuarsi il passaggio al *current mode*. In termini di risposta, tale camera a fissione si presenta come lo strumento ideale per il monitoraggio dalla potenza "0" a qualche centinaio di kW_{th} , data l'elevata sensitività; oltre i 300 kW_{th} le installazioni in prossimità del combustibile non possono essere realizzate per non eccedere nell'esposizione gamma della sonda. Un'ulteriore controindicazione riguarda la durata dello strumento che -data l'elevata sensitività- tende ad esaurirsi troppo in fretta nei regimi di potenza che vanno dal $10 \div 100\%$ della potenza nominale.

Figura 3.17 riporta i risultati di calcolo per la camera a fissione *Photonis CFUE32*. Per quanto concerne la sua durabilità, analogamente a quanto fatto in precedenza, con l'ausilio dei $ESCF(\vec{r})$ calcolati, può determinarsi una stima di durata della sonda nell'ipotesi di irraggiamento continuo e costante nella posizione indagata, secondo l'equazione 3.7. Figura 3.18 riporta i risultati di tale calcolo.

Come risulta evidente da Figura 3.18, la camera a fissione *Photonis CFUE32*:

- a potenza nominale (300 MW_{th}): massima durata 1-2 mesi;
- al 10% della potenza nominale (30 MW_{th}): massima durata 10-20 mesi;

Dispositivi di movimentazione e riposizionamento delle camere a fissione dovrebbero essere previsti dato l'eccessivo bruciamento in tempi troppo brevi, incompatibili con le durate tipiche delle campagne d'irraggiamento del combustibile ($12 \div 24$ mesi). Se si pensa, inoltre, che ALFRED risulta essere un reattore dimostrativo a potenza ridotta, si comprende quanto il problema dell'esposizione gamma e della durata delle camere a fissione possa divenire più significativo per un reattore di taglia industriale (3000 MW_{th}).

	Energia media γ [keV]	Rapporto γ/n	Sensitività γ <i>Thermocoax Co-type</i> [A/nv]	Sensitività γ /Sensitività n [-]	Sensitività γ <i>Thermocoax Pt-type</i> [A/nv]	Sensitività γ /Sensitività n [-]
C1	500	0,1365	2,23E-24	1,84	1,53E-23	0,29
C2	450	0,1456	2,38E-24	1,92	1,63E-23	0,32
C3	500	0,1464	2,39E-24	1,90	1,64E-23	0,31
R1	500	0,1986	3,24E-24	0,26	2,22E-23	0,12
R2	600	0,1881	3,07E-24	0,21	2,10E-23	0,19
R3	450	0,2585	4,22E-24	0,29	2,89E-23	0,25

Tabella 3.8: Sensitività γ delle sonde SPND studiate, nelle condizioni in cui il flusso gamma risulta essere un disturbo significativo.

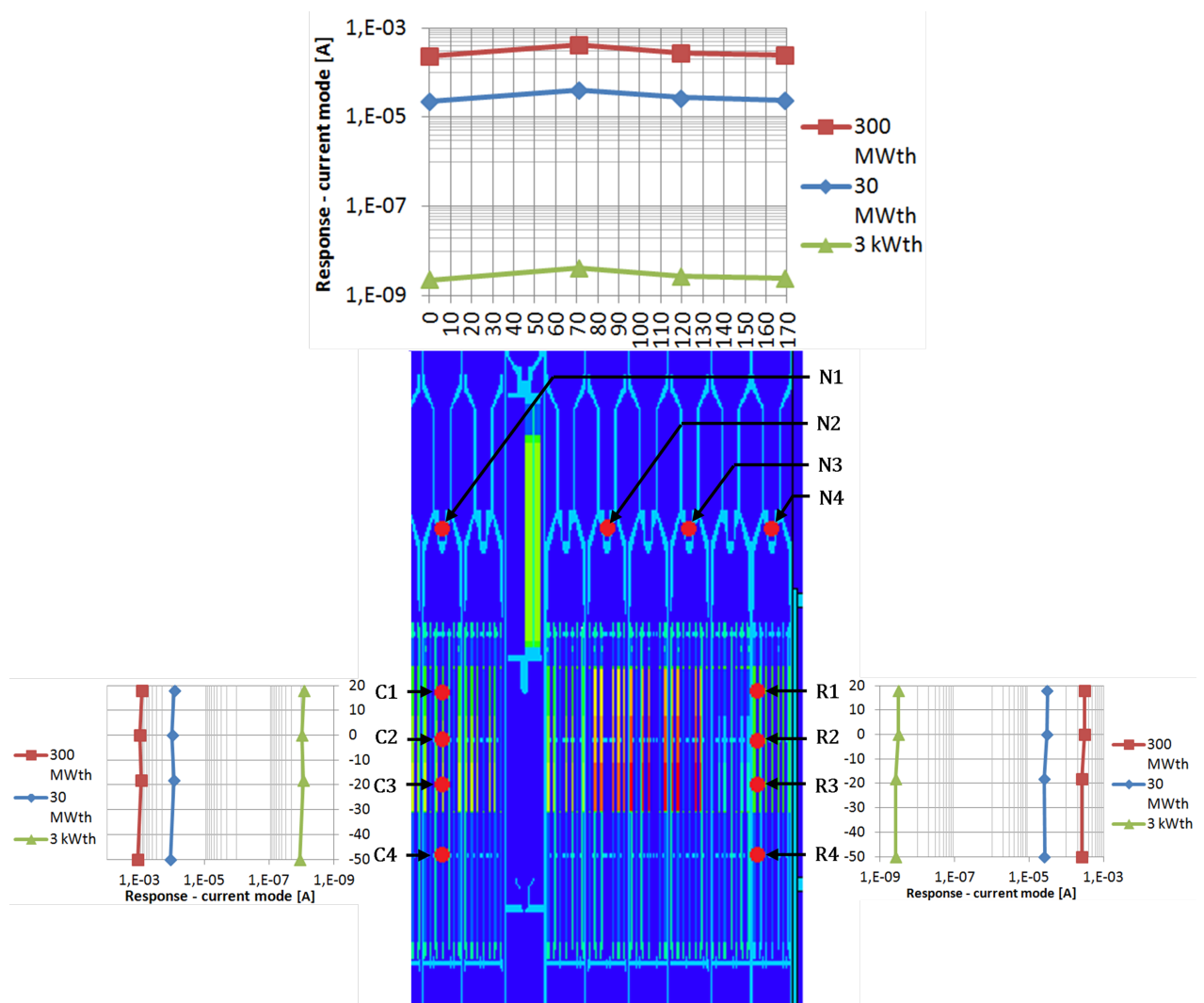


Figura 3.17: Risposta, in *current mode* della camera a fissione *Photonis CFUE32* nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo le equazioni 3.5-3.6.

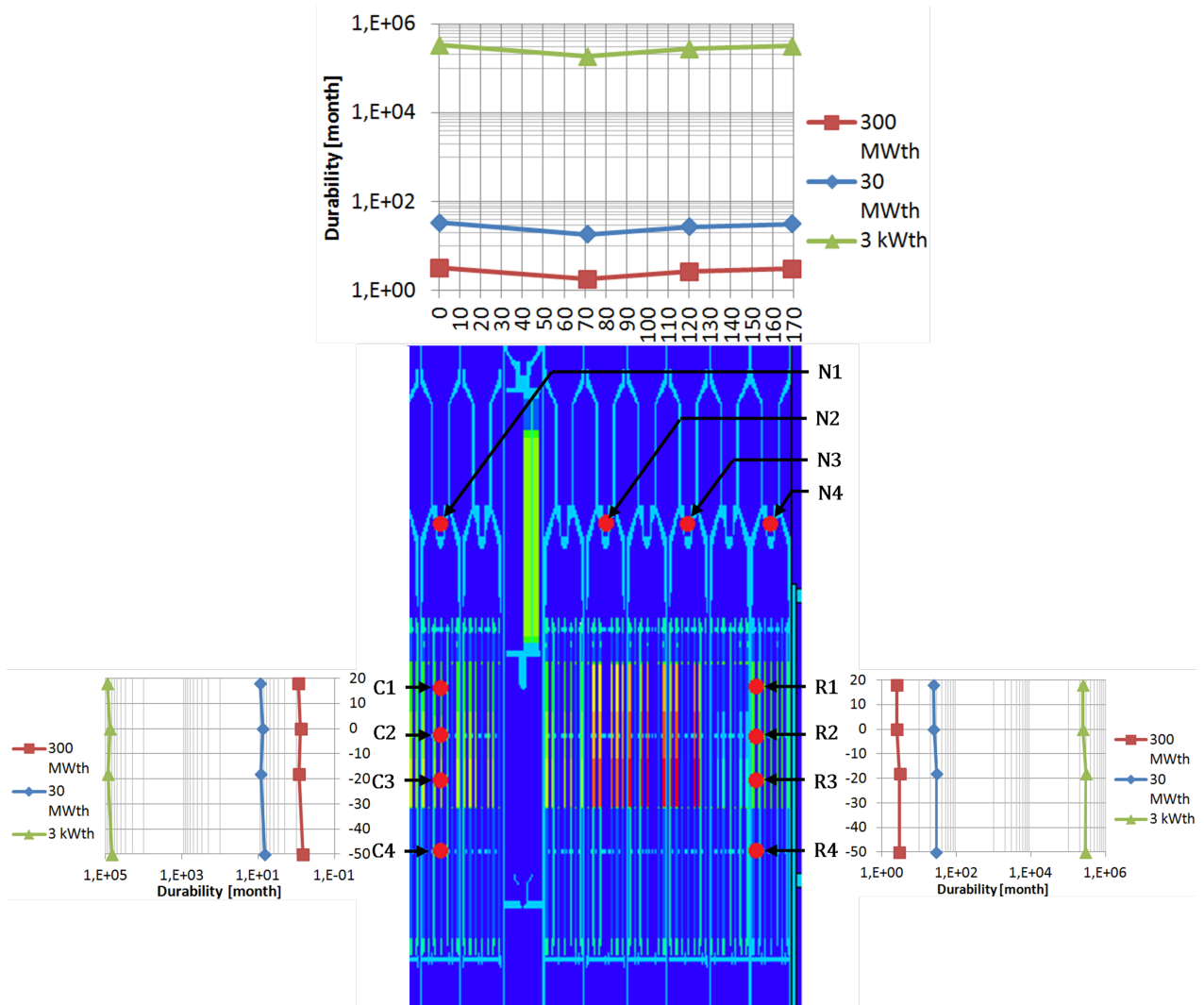


Figura 3.18: Tempo di durata della camera a fissione *Photonis CFUE32* nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo l'equazione 3.7.

Per quanto concerne i SPND, in Figura 3.19 e 3.20 sono presentate le risposte (*current mode*) nelle posizioni d'interesse (Figura 2.13), in tre livelli di potenza.

Elettroniche di misura nucleare possono discriminare correnti nell'ordine dei μA . Considerando -conservativamente- un limite inferiore di $1 \div 10 nA$, è evidente che:

- il SPND *Thermocoax Co-type* può misurare agevolmente potenze superiori al 50% della potenza nominale;
- il SPND *Thermocoax Pt-type* può misurare agevolmente potenze superiori al 10% della potenza nominale.

I SPND individuati sono, quindi, utilizzabili solo con una popolazione neutronica molto elevata, data la scarsa sensibilità, se comparati con le camere a fissione. I valori delle correnti misurate, comunque rientrano in una finestra accettabile. Se si pensa, poi, all'utilizzazione di tali strumenti in un futuro reattore da $3000 MW_{th}$ ², si intuisce come gli SPND possano diventare gli strumenti principi del monitoraggio di un reattore al piombo, considerando una elevata durabilità nel tempo dovuta ad una scarsa sensibilità.

Anche per i SPND *Thermocoax* non esistono dei limiti d'irraggiamento predeterminati e disponibili a catalogo. Come in precedenza, si è proceduto semplicemente a calcolare i valori di burn-up corrispondenti alle posizioni \vec{r} indagate, aggiornando il valore di *burn-up* termico fornito dal costruttore, ad un valore compatibile con i flussi neutronici veloci, mediante l'equazione 3.8. I risultati di *burn-up* sono riportati nelle Figure 3.21-3.22.

Valori limite di *burn-up* tollerabili da tali strumenti si suppongono essere nell'ordine delle decine percentuali che, con i tassi di burn-up calcolati in precedenza, si traducono in una considerevole durabilità degli SPND rispetto alle camere a fissione sfruttanti ^{235}U , vista la minore sensibilità ai neutroni dovuta alla forma della sezione d'urto di reazione.

²Si consideri che incrementare di un fattore 10 la potenza di reattore non equivale ad incrementare di un fattore 10 il flusso neutronico. È comunque plausibile che la densità di potenza di un reattore da $3000 MW_{th}$ sia superiore alla corrispondente grandezza in un reattore da $300 MW_{th}$, e tale proporzionalità si rifletterebbe sul flusso neutronico.

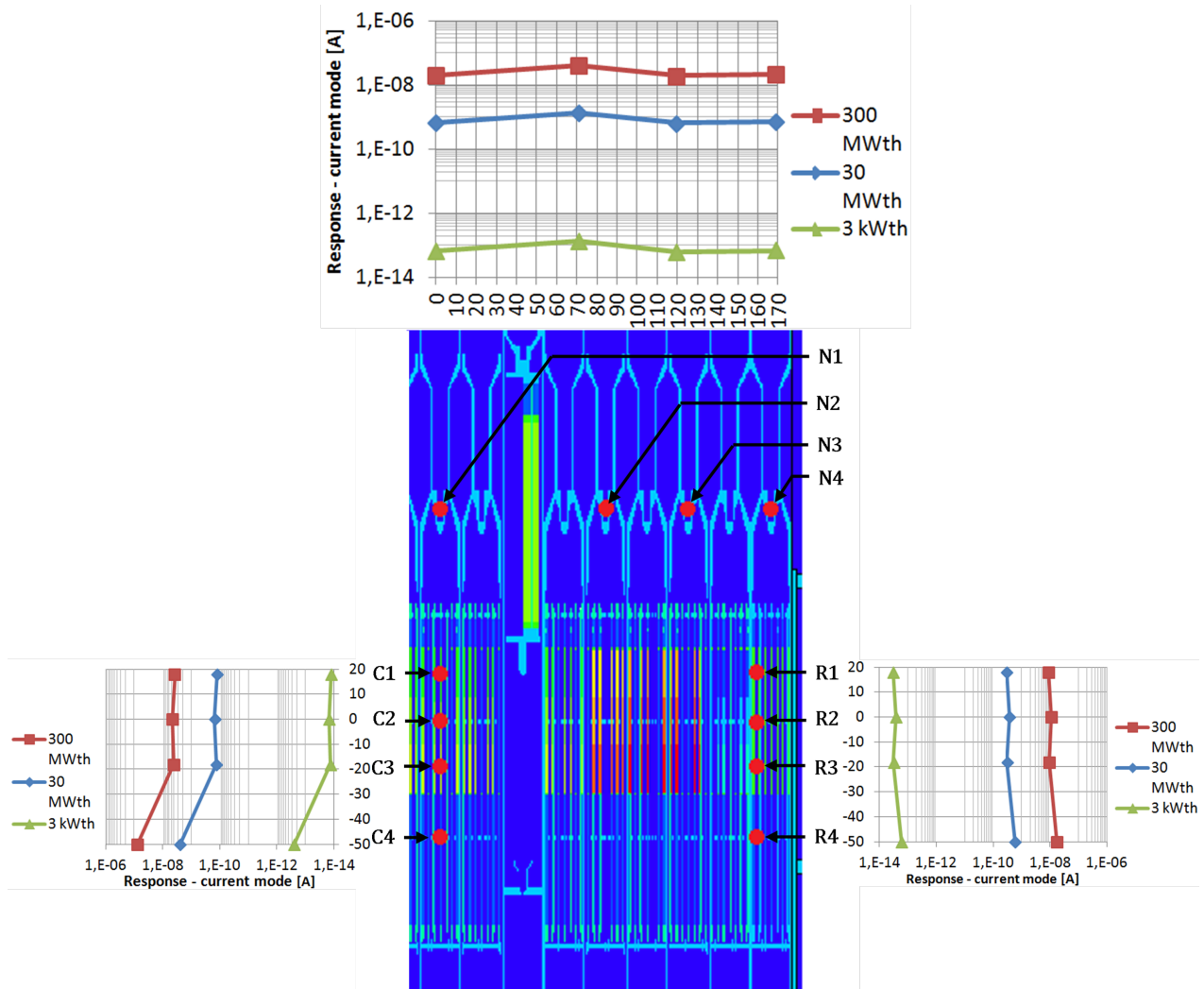


Figura 3.19: Risposta, in *current mode* del SPND *Thermocoax Co-type* nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo le equazioni 3.5-3.6.

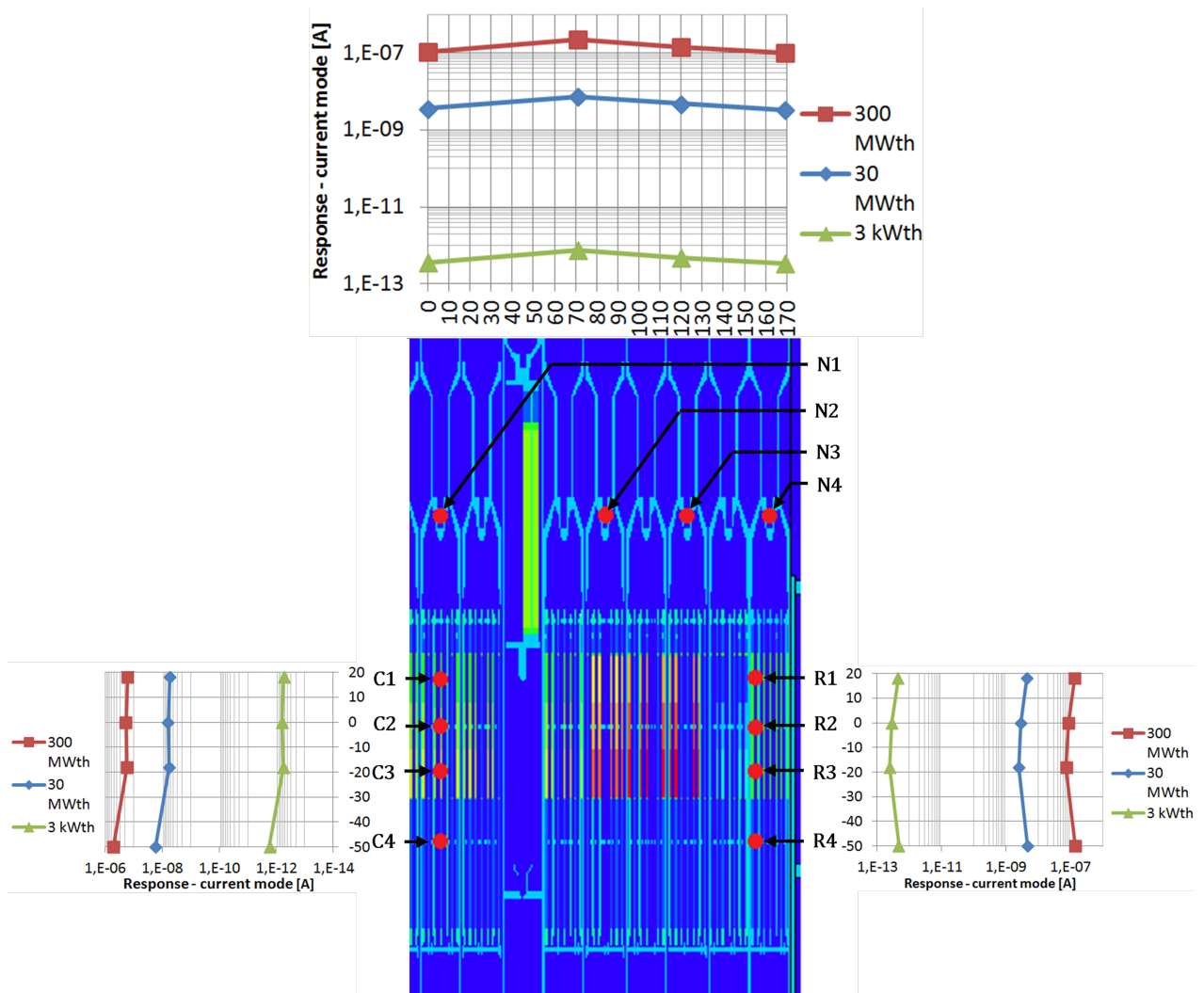


Figura 3.20: Risposta, in *current mode* del SPND *Thermocoax Pt-type* nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo le equazioni 3.5-3.6.

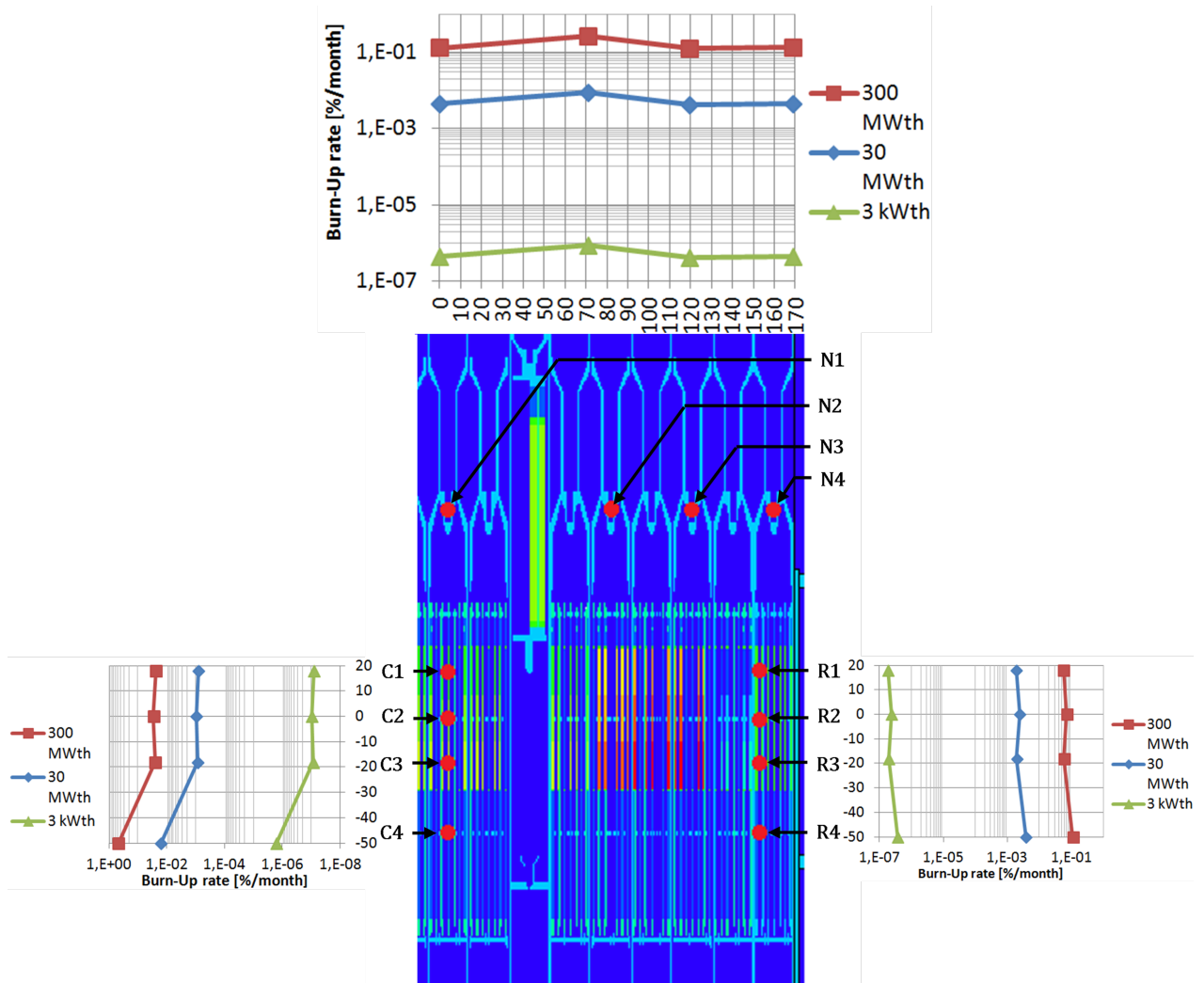


Figura 3.21: Burn-up del SPND *Thermocoax Co-type* nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo l'equazione 3.8.

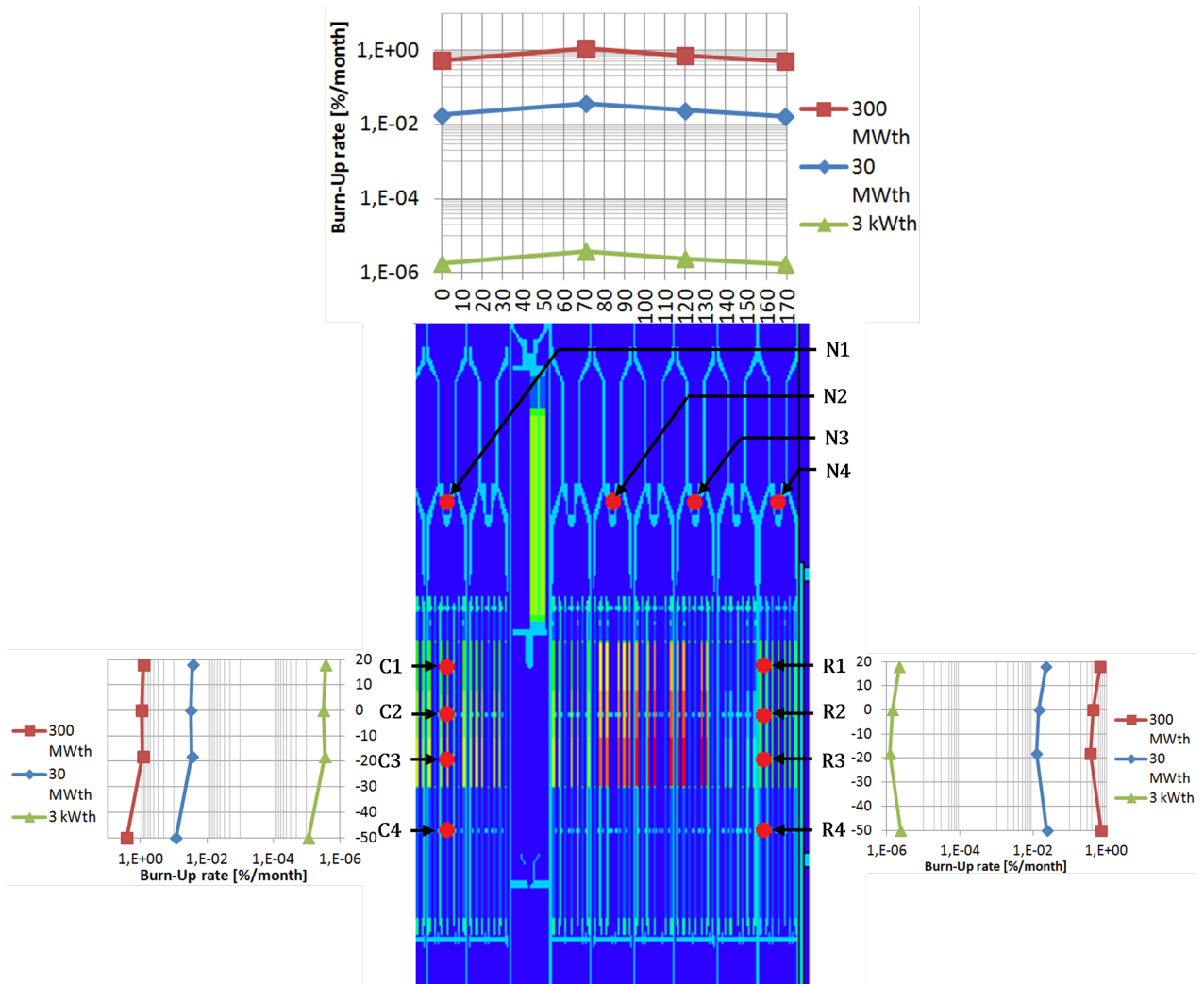


Figura 3.22: Burn-up del SPND *Thermocoax Pt-type* nelle posizioni di reattore investigate nel reattore ALFRED (Figura 2.13), secondo l'equazione 3.8.

3.2.4 Selezione delle condizioni operative ottimali per le sonde analizzate: risultati della FASE II

A questo punto, possono trarsi ulteriori conclusioni circa l'applicabilità delle camere a fissione e degli SPND precedentemente studiati al reattore ALFRED. Ciò che si è delineato in questa seconda fase può riassumersi nelle seguenti considerazioni.

- La camera a fissione *Photonis CFUE32* è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento fino a circa 0,1% della potenza nominale, ed esiste un problema di durabilità per potenze > 10% della potenza nominale, perché l'elevata sensibilità "brucia" la camera troppo in fretta.

Il massimo rateo di esposizione gamma obbliga lo strumento a dover essere allontanato dalla parte attiva del combustibile quando per potenze > 0.1% della potenza nominale.

Sistemi di movimentazione durante il funzionamento del reattore si rendono necessari, così da seguire efficacemente e "da vicino" l'avviamento di reattore, per poter poi rimuovere la sonda quando i limiti di flusso neutronico e gamma lo impongano.

Una possibilità di ridurre la sensibilità delle camere a fissione e renderle più durevoli nel tempo sta nella variazione del materiale sensibile, la cui scelta potrebbe ricadere su un isotopo fissile avente una sezione d'urto di fissione (pesata sullo spettro neutronico) di valore inferiore rispetto al ^{235}U .

- I Self Powered Neutron Detector *Thermocoax* presentano incapacità nel monitoraggio delle basse potenze, visto che la loro usabilità richiede potenze almeno valori nell'ordine dei MW. Sono, tuttavia, strumenti molto robusti, completamente a stato solido, e non richiedono una alimentazione elettrica per poter operare.

Con qualche accorgimento, quindi, si può pensare di utilizzare questo strumento in posizioni fisse negli elementi di combustibile e riflettore, per monitorare il reattore agli alti livelli di potenza, vista anche la durabilità nel tempo.

Appare chiaro che i SPND si dimostrano essere una tecnologia molto adatta al controllo del reattore ALFRED nei regimi prossimi alla potenza nominale.

3.2.5 Identificazione dei margini di ottimizzazione per le classi di rivelatori analizzate

Ciò che si è delineato nello studio condotto finora può riassumersi nelle seguenti considerazioni.

- Le **camere a fissione**, come tecnologia di rivelazione, non riescono a coprire, con un singolo strumento le esigenze di monitoraggio di ALFRED. Ad esempio, la sensitività della *Photonis CFUE32* è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento alla potenza nominale, ma esiste un problema di durabilità a tali livelli di potenza, perché l'eccessiva sensitività "brucia" la camera troppo in fretta. Per contro la *Photonis CFUE43* segue bene le potenze più elevate anche in termini temporali, perché la vita dello strumento sarebbe nell'ordine di qualche anno per le installazioni appena fuori dal nocciolo. Ne segue che una camera a fissione ottimizzata per l'applicazione nel reattore ALFRED deve avere una sensitività compresa fra le due precedentemente citate. Inoltre, tale parametro va scelto anche con il compromesso della durabilità richiesta alla sonda. Tali strumenti beneficiano dell'esperienza sperimentale dei *Sodium Fast Reactor*, come riportato in [28].
- I **Self Powered Neutron Detectors** presentano incapacità nel monitoraggio delle basse potenze, visto che la loro usabilità richiede valori di potenza almeno nell'ordine dei *MW*. Sono, tuttavia, strumenti molto robusti, completamente a stato solido, e non richiedono un'alimentazione elettrica per poter operare. Con qualche accorgimento, quindi, si può pensare di utilizzare questo tipo di strumento per monitorare il reattore agli alti livelli di potenza, vista anche la durabilità nel tempo. Ottimizzando questa tecnica di monitoraggio, si pensa di ottenere uno strumento molto adatto al controllo del reattore ALFRED nei regimi prossimi alla potenza nominale.

Di seguito si delineano alcune modifiche che si prevede possano essere effettuate alla strumentazione corrente al fine di raggiungere i detti obiettivi di monitoraggio del reattore. È chiaro che l'ottimizzazione precisa degli strumenti dipenderà anche dalla strategia di monitoraggio e controllo che esigenze neutroniche o obiettivi di sicurezza richiedono: qui tale proposta di modifica s'intende come potenzialità tecnologica.

Inoltre, sebbene questa ottimizzazione risulti specifica per il reattore studiato, è estendibile anche ad altri LFR di pari potenza e simile costruzione; potenze nominali diverse (inferiori o superiori) o concezioni di reattore differenti, conducono a flussi neutronici differenti e, variando il termine sorgente allo strumento, variano i segnali da esso ricavabili, la significatività statistica di essi e la conseguente durabilità nel tempo.

3.2.5.1 Miglioramenti applicabili alle camere a fissione

Come si è dimostrato in precedenza, le camere a fissione commercialmente disponibili sono capaci di monitorare efficacemente il reattore, sebbene occorra ricorrere ad una combinazione di strumenti ed estrarre quelli di monitoraggio della salita in potenza una volta arrivati a potenza nominale di reattore.

	Resistività elettrica $[\Omega \cdot m]$	
	T= 25 °C	T= 500 °C
Al ₂ O ₃ [29]	$2 \cdot 10^{11}$	$6,3 \cdot 10^8$
Diamante [30][31]	$10^{11} \div 10^{18}$	$10^{10} \div 10^{14}$

Tabella 3.9: Resistività elettrica del sesquiossido di alluminio e del diamante al variare della temperatura, nel campo termico d'interesse del reattore ALFRED.

Il problema principale che si ravvisa nelle camere a fissione è il loro *burn-up* troppo rapido in corrispondenza dei flussi neutronici di potenza nominale di reattore, che comporterebbe di dover sostituire frequentemente gli strumenti a causa del loro disservizio. Appare evidente, quindi, che tali sonde si prestano poco a seguire il flusso neutronico a potenza nominale, perché sono più adatte a monitorare bassi flussi neutronici, corrispondenti alla salita in potenza.

Ciò che converrebbe, quindi, è una ottimizzazione delle camere a fissione per le basse potenze, migliorando la sensibilità dello strumento e il rapporto segnale/rumore in un particolare range di flusso neutronico, in modo da assicurare un'ottima capacità di monitoraggio della potenza "0" e della salita in potenza.

Un limite da tenere in considerazione per questo strumento è la scelta dell'isolante elettrico: in genere si usa sesquiossido di alluminio (Al_2O_3) il cui principale problema è il degrado della resistività elettrica con l'aumentare della temperatura, che può condurre ad una corrente di fondo che disturba la misura al punto tale da renderla inefficace: chiaramente la questione è maggiormente sentita nelle condizioni di reattore che comportano una condizione di basso rapporto segnale/rumore, cioè le condizioni di bassa potenza. Inoltre, l'applicazione delle camere a fissione in ambiente LFR è del tutto particolare in termini di prestazioni e durabilità dello strumento.

Oltre alla questione dell'aumento della *leakage-current* causata dalla riduzione della resistività elettrica dell'isolante, c'è da tener conto dell'accumulo dei prodotti di fissione (radioattivi, producono segnali spuri) e -in condizioni normali- anche del fondo gamma di reattore. Nei LFR il fondo gamma risulta maggiormente depresso a causa del refrigerante e pertanto i disturbi allo strumento pervengono maggiormente dai primi due effetti peggiorativi precedentemente detti: ne segue che una camera a fissione per LFR potrebbe tollerare maggiori *burn-up* prima di esser messa fuori servizio, rispetto ad una tradizionale applicazione LWR. È chiaro che, comunque, questo aspetto va approfondito e verificato sperimentalmente.

La necessità di migliorare il rapporto segnale/rumore può condurre ad ipotizzare alcune modifiche ai classici layout utilizzati per le camere a fissione commercialmente disponibili. Primariamente, il problema del deterioramento delle capacità di isolamento elettrico dell' Al_2O_3 può essere superato cambiando materiale, approdando ad uno più resistente come il diamante sintetico visto che la sua resistività elettrica è meno penalizzata dalla temperatura nel campo termico di interesse del reattore ALFRED: la Tabella 3.9 riporta un confronto fra i materiali detti.

Per quanto concerne il *burn-up* delle tradizionali camere a fissione (cioè impieganti solo fissile), occorre tenere in considerazione due fenomeni fondamentali: i) il consumo del fissile nella camera, ii) l'accumulo dei prodotti di fissione.

Entrambe i fenomeni sono proporzionali alla fluenza neutronica e i loro effetti sono peggiorativi, perché va esaurendosi il materiale sensibile disponibile e nello strumento si crea radiazione che disturba la rivelazione del segnale utile. Se, da un lato si può intervenire a contrastare il consumo di fissile realizzando una camera a fissione autofertilizzata (cioè con un materiale fertile incorporato che si trasmuta a causa del bombardamento neutronico producendo fissile), si può intervenire meno sull'accumulo dei prodotti di fissione, poiché gran parte di essi risultano essere solidi e intrappolati nel layer sensibile. È pur vero, però, che per singolo evento di fissione -a strumento ben progettato- un frammento di fissione rimane in seno al layer fissile e l'altro viene emesso nel gas: ne segue che vi sarà un accumulo dei prodotti di fissione anche nell'argon-azoto della camera, da cui poi le specie radioattive potranno anche depositarsi sulle superfici a contatto col gas.

Una possibile mitigazione dello sporco dello strumento da prodotti di fissione è il controllo dell'atmosfera gassosa interna, attraverso ventilazione: con riferimento alla Figura 3.23, si può pensare di realizzare un cavo coassiale con l'elettrodo interno cavo (es. Figura 3.24), così da creare un canale per l'estrazione del gas interno, al fine di purificarlo dai prodotti di fissione contenuti. È pensabile anche effettuare un ciclo di lavaggi della camera, sfruttando giochi di pressione per portare in seno al gas anche le specie radioattive solide depositatesi sulle superfici esposte all'argon-azoto, riducendo la contaminazione.

Un "condotto di ventilazione" per la camera a fissione presenterebbe anche il vantaggio di poter variare la pressione di esercizio durante il passaggio da un modo di funzionamento ad

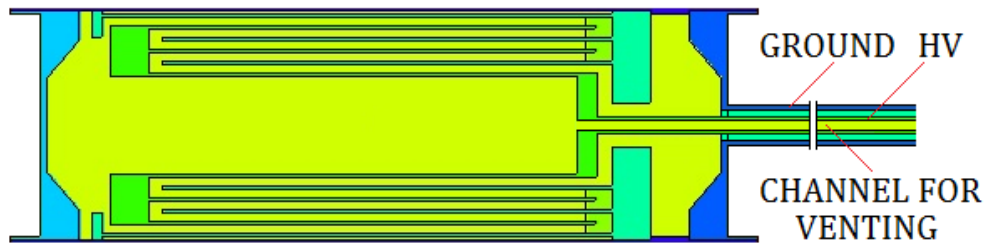


Figura 3.23: Alimentazione di una camera a fissione attraverso un cavo coassiale ad elettrodo interno cavo. Il canale interno all'anodo consente di estrarre il gas dalla camera per effettuare una purificazione, riducendo il suo contenuto in prodotti di fissione. Inoltre, esso potrebbe essere utilizzato per modificare la pressione di esercizio del gas di riempimento, ottimizzandola opportunamente a seconda della modalità di funzionamento.

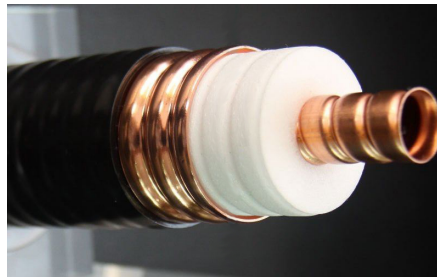


Figura 3.24: Cavo coassiale per radiofrequenze ad elettrodo centrale cavo, commercialmente disponibile.

un altro: è noto che il *pulse* ed il *MSV mode* richiedono elevate pressioni della miscela Ar-N per ottimizzare le prestazioni della tecnica; il *current mode* richiede, invece, pressioni inferiori per ridurre l'addensamento di carica. Ne segue che la disponibilità di un canale di ventilazione allo strumento risulterebbe conveniente anche a variare la pressione di esercizio dello stesso a seconda della modalità di funzionamento, ottimizzandone le prestazioni e la sensibilità.

Da un punto di vista meccanico, realizzare un'alimentazione elettrica attraverso un cavo coassiale cavo richiede che lo stesso sia a prova di perdita, nella connessione con la camera e nel suo sviluppo lineare: una possibilità realizzativa è quella di concepire il cavo di alimentazione *embedded* nello strumento, cioè costruirlo insieme ad esso, come un'unica entità. Il problema della rigidità del coassiale siffatto può essere superato concependo l'elettrodo interno con una struttura ad elica, come i cavi utilizzati per le radiofrequenze, commercialmente disponibili (Figura 3.24). Evidentemente, le possibili soluzioni proposte necessitano di essere a fondo investigate, studiate ad un elevato livello di dettaglio attraverso la simulazione e verificate sperimentalmente in termini di effettiva fattibilità.

3.2.5.2 Miglioramenti applicabili ai SPND

I Self Powered Neutron Detectors a risposta pronta possono rivestire un ruolo chiave nei reattori LFR. Essendo la prontezza della risposta basata sulla diseccitazione gamma dei nuclei attivatisi a valle del bombardamento neutronico, nei tradizionali LWR questi strumenti sono più sensibili dei *SPND-ritardati* all'interferenza gamma di reattore, e ciò aumenta il valor minimo del segnale di corrente statisticamente rappresentativo del flusso neutronico. Nei reattori LFR, il campo di radiazione gamma (che naturalmente si accompagna alla fissione e al decadimento dei prodotti di fissione) è intrinsecamente attenuato dal piombo stesso, pertanto il termine sorgente che interagisce con lo strumento di misura può essere costituito per lo più dal solo flusso neutronico: ciò mette in evidenza che il segnale di corrente che un *SPND-veloce* può produrre in LFR può portare informazione del solo flusso neutronico.

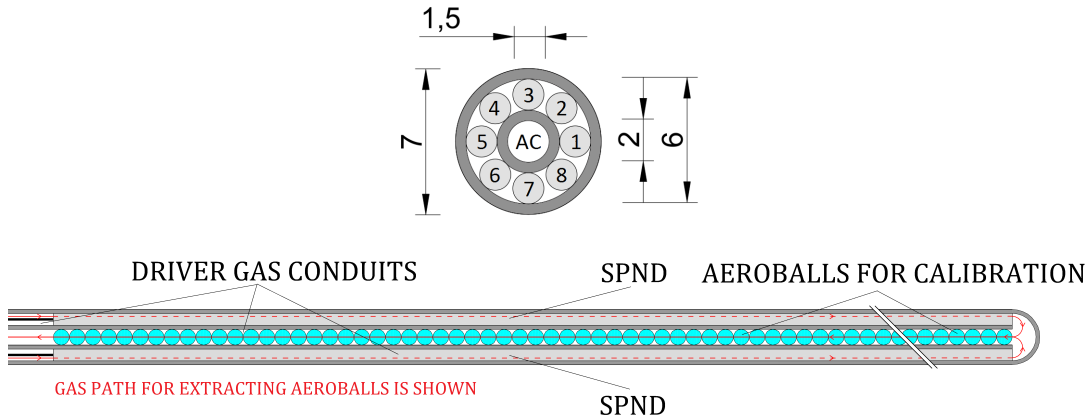


Figura 3.25: Struttura della sonda *in-core* proposta, costituita da 8 SPND *ARi-Co-type* disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante misura assoluta per attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in [mm].

In termini numerici, questa constatazione vuol significare che si riduce il valor minimo del segnale di corrente statisticamente significativo, e ciò va ad ampliare la finestra di applicazione della sonda, che può essere in grado di monitorare anche regimi di potenza inferiori e, più efficacemente, il range di potenza nominale.

Tutte le prestazioni dei SPND (capacità di monitoraggio ed interferenza della radiazione gamma) sono generalmente riferite ad applicazioni di tipo LWR, pertanto non sono disponibili dati sperimentali che mostrino cosa accade alla sensibilità gamma in ambiente LFR, o -più in generale- in un flusso neutronico veloce. In questo senso, è necessario andare a verificare sperimentalmente cosa accadrebbe alla sensibilità gamma delle sonde in ambiente LFR. Una stima numerica deve tener conto del trasporto gamma nei due diversi mezzi che conduce ad uno spettro fotonico attraverso il quale occorre pesare i coefficienti di interazione gamma; inoltre, il piombo favorisce interazioni fotoelettriche (distruttive per i fotoni), fino ad 1 MeV, mentre nell'acqua sono favorite interazioni Compton (non distruttive per i fotoni) visto che le interazioni fotoelettriche sono depresse da ~ 100 keV in avanti.

Come evidenziato in precedenza, l'aumento di sensibilità di un SPND richiede che sia aumentata la massa dell'elemento sensibile, ma questo può contrastare le esigenze di monitoraggio locale o semplicemente i vincoli di spazio disponibile.

La proposta consiste nella realizzazione di un *assembly* di SPND, in una struttura tubolare la cui sezione è specificata in Figura 3.25: con riferimento alla figura, si hanno 8 SPND *ARi-Co-type* disposti radialmente attorno ad un canale centrale appositamente predisposto per la taratura della strumentazione mediante misura assoluta per attivazione neutronica di opportuni materiali.

Sono diversi i vantaggi dello strumento descritto:

- in prima analisi, mettere in parallelo 8 SPND -piuttosto che realizzarne uno solo di equivalente occupazione spaziale- rispetta il principio di sicurezza della ridondanza: è più difficile che falliscano per usura i contatti elettrici di tutti gli strumenti contemporaneamente;
- il *casing* esterno consente la protezione degli strumenti dal piombo, evitando fenomeni di corrosione e deterioramento delle sonde e della cavetteria; l'isolamento consentirebbe anche una sostituzione più semplice delle sonde stesse a fine vita;
- l'*Activation Channel* (AC), inglobato nello strumento stesso consente di effettuare misure assolute di attivazione neutronica per la taratura dell'*assembly* di SPND con sistemi di posta pneumatica, potendo sfruttare l'intercapedine esterna come canale di mandata/prelievo del gas compresso che movimentava i campioni di materiale opportuno. È,

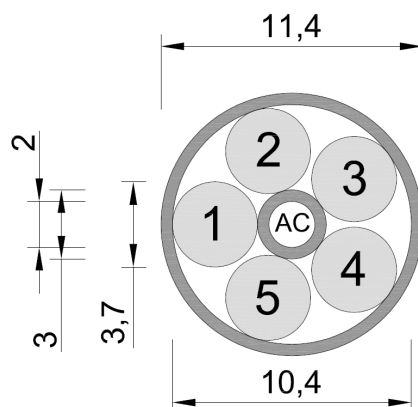


Figura 3.26: Struttura della sonda *out-of-core* proposta, costituita da 5 *SPND KWD 5503-Co-210* disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante misure assolute per attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in $[mm]$.

tuttavia, da dimostrare che il posizionamento centrale del canale (all'interno della corona di rivelatori) non influenzi la misura di attivazione per la taratura dello strumento; qualora ciò avvenga, è possibile ripensare la sonda posizionando il canale AC in periferia;

- collegare in parallelo gli 8 *SPND ARi-Co-type* precedentemente descritti, aumenta la carica complessivamente raccolta: non varia il rapporto segnale/rumore, ma cresce l'entità del segnale misurabile, e quindi la significatività statistica della misura.

Si propone una possibilità di utilizzo anche dei *SPND KWD 5503-Co-210*, Figura 3.26. Quanto presentato di seguito presuppone una applicazione di tipo *out-of-core*, nella cintura di elementi riflettori che circonda il nocciolo. Essendoci maggiori spazi disponibili e minori vincoli, si ha più libertà di manovra. Similmente alla sonda precedente, l'idea è quella di realizzare un parallelo di strumenti, con un canale centrale che alloggi il sistema di posta pneumatica per la taratura della strumentazione mediante attivazione neutronica. Fissando il canale di attivazione (AC) di 3 mm di diametro, si riescono a disporre attorno ad esso 5 SPND del tipo proposto, per un diametro massimo complessivo della sonda di 11,4 mm: chiaramente, tali dimensioni sono estendibili, visto che non occorre sottostare agli stretti vincoli di occupazione spaziale che incorrono nelle installazioni *in-core*, come nel caso precedente. I vantaggi di un tale tipo di installazione sono equivalenti a quelli evidenziati in precedenza.

Essendo i *SPND KWD 5503-Co-210* più grandi dei precedenti *SPND ARi-Co-type* studiati, i segnali di corrente ricavabili sono maggiormente significativi già per singolo strumento, il che conduce ad un comportamento complessivo dell'assembly sicuramente migliore rispetto a quello proposto in precedenza.

Non si pensa inverosimile il poter ottimizzare il disegno dei SPND per massimizzare il contenuto di materiale sensibile a parità di occupazione spaziale. Conservando sempre una conformazione piuttosto allungata, i materiali e gli spessori usualmente utilizzati per l'isolante, si propongono due disegni innovativi per SPND, potenzialmente adottabili sia per strumenti pensati per applicazioni *in-core* che *out-of-core*.

La Figura 3.27 riporta due possibili schematizzazioni per SPND innovativi, ad incrementata sensibilità, per maggiore contenuto di materiale sensibile. Il riferimento è ad una applicazione *in-core*; il concetto è più facilmente estensibile ad applicazioni *out-of-core*. Come anticipato, è possibile prevedere il canale di attivazione anche in periferia, qualora si verifichi che il posizionamento al centro della corona di elementi sensibili condizioni la misura di attivazione necessaria alla taratura.

Per quanto concerne la simulazione al computer, gli SPND sono strumenti semplici da sviluppare perché non sono coinvolti campi elettrici imposti, il che significa che il trasporto

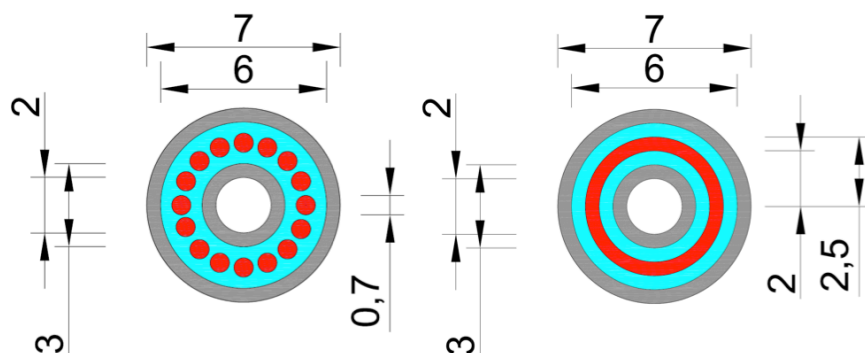


Figura 3.27: Possibili configurazioni innovative per SPND: in rosso sono riportati gli elementi sensibili, in blu l'isolante elettrico e in grigio i materiali strutturali; al centro il canale per la misura di attivazione. Tutte le dimensioni sono in $[mm]$.

di carica avviene esclusivamente a mezzo dell'energia che gli elettroni acquistano per effetto delle interazioni delle radiazioni o per il decadimento beta. In termini costruttivi, un SPND è uno strumento semplice, che non richiede l'adozione di tecniche di lavorazioni o macchinari particolari; a differenza dei layer fissili delle camere a fissione, le materie prime sono tutte di tipo convenzionale (non radioattive) e pertanto non si richiedono manipolazioni controllate. Ne segue che, avendo a disposizione i materiali, costruire un prototipo è relativamente semplice. Si conclude, pertanto, che una sonda di tale tipo può essere progettata, sviluppata e testata in tempi rapidi.

Capitolo 4

Studio di Self Powered Neutron Detectors a risposta pronta per installazioni in-core in reattori ad alta temperatura

Quanto fin qui mostrato mette in evidenza le sostanziali possibilità offerte dalla strumentazione SPND a risposta pronta in termini di monitoraggio, comando e controllo di un ambiente reattore dalle condizioni termiche ostili, nella misura di flussi neutronici veloci di elevata entità.

La scarsità di esperienza sperimentale ed applicazioni pratiche dei SPND-pronti, spinge ad un approfondimento del loro studio, al fine di comprendere meglio le potenzialità della strumentazione corrente e poterne, al contempo, derivare delle concezioni innovative, con nuovi materiali sensibili, nuove geometrie e prestazioni *ad-hoc*.

Attenzione è rivolta agli aspetti di monitoraggio neutronico di reattori veloci, in particolare LFR, il cui riferimento assunto è il reattore dimostrativo ALFRED.

Sulla base dei risultati conseguiti in [27] [32], l'effettiva possibilità di utilizzare i *Self Powered Neutron Detectors* per le misure di flusso neutronico *in-core* nel regime di potenza ($10^{14} \div 10^{15} \text{ n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$) del reattore ALFRED, spinge ad approfondire lo studio:

- dei rivelatori commerciali disponibili, identificando le caratteristiche ed il comportamento in fase di irraggiamento: dinamiche di risposta, *burn-up* del materiale sensibile e modificazione del segnale elettrico del rivelatore a lungo termine;
- di rivelatori innovativi, provvisti di nuovi materiali sensibili, con l'obiettivo di sfruttare le diverse caratteristiche di ciascuno (ovvero le sezioni d'urto di reazione) per implementare tecniche di *unfolding* dello spettro neutronico, così da ottenere non solo un rivelatore che misuri quantitativamente i neutroni in una certa posizione, ma anche la loro qualità energetica.

Lo strumento principe di questo processo di approfondimento ed ottimizzazione è il codice MCNP. La ricostruzione di un'esperienza sperimentale con SPND all'interno della simulazione Monte Carlo ha consentito di validare il codice, elevandolo a strumento di progettazione delle sonde, viste le provate capacità di riproduzione della realtà fisica.

Di seguito si illustrano i passi del processo di validazione del codice ed i risultati dello studio successivamente effettuato con esso. Nel Capitolo 5, il tutto troverà compimento nella proposta concettuale di una sonda, basata su SPND-pronti, che sia in grado di misurare sia la magnitudo che lo spettro energetico del flusso neutronico nelle posizioni d'installazione in ALFRED.

4.1 Validazione del codice MCNPX ai fini della modellazione delle risposte da rivelatore SPND

Il lavoro condotto si propone come obiettivo finale l'ottimizzazione e la progettazione *ex-novo* di strumentazione SPND-pronta dedicata al monitoraggio di flussi neutronici veloci.

Il codice di simulazione MCNPX può essere utilizzato nella modellazione di tale tecnologia. Essendo, infatti, i Self Powered Neutron Detectors completamente privi di alimentazione elettrica, non vi è la necessità di includere nei calcoli l'effetto del campo elettrico che alimenta la maggior parte dei rivelatori, il che consente al codice di trasporto di radiazione proposto di riuscire a simulare -da solo- il comportamento e la risposta di tale strumentazione.

Preliminarmente alla fase di progettazione vera e propria della strumentazione dedicata, si vuole effettuare -quindi- una verifica circa l'effettiva capacità del codice di simulazione e del modello costruito di riprodurre effettivamente i campi di radiazione e le dinamiche di tali rivelatori.

In particolare, verranno riprodotte le condizioni di irraggiamento:

- SPND *Thermocoax Co-type* irraggiato con neutroni termici (condizioni di test in fabbrica);
- SPND *Thermocoax Pt-type* irraggiato con neutroni termici (condizioni di test in fabbrica);
- SPND *Thermocoax Rh-type* irraggiato con neutroni termici (condizioni di test in fabbrica);
- SPND *Thermocoax Rh-type* irraggiato con neutroni veloci (test nel canale tangenziale del reattore veloce TAPIRO).

La riproduzione dei valori assoluti di sensitività e risposta tra quanto dichiarato dalla casa costruttrice o misurato e la simulazione, assegna ad MCNPX la dignità di strumento di progettazione, potendo confidare nelle capacità del codice di restituire valori simulati compatibili con quelli che si avrebbero nelle condizioni di esperimento reale.

Il fine, dunque, è dimostrare che lo strumento di simulazione risulti adatto alla modellazione tecnologica di tale strumentazione.

4.1.1 Modello del rivelatore SPND Thermocoax standard

Di seguito è presentato il modello del rivelatore SPND *Thermocoax standard* sottoposto alle diverse condizioni d'irraggiamento citate. Il rivelatore, come mostrato in Figura 4.1, è stato ricostruito in MCNPX (Figura 4.2), con le specifiche di materiali e dimensioni presentate di seguito.

4.1.1.1 Simulazione del SPND Thermocoax Co-type irraggiato con neutroni termici

Il rivelatore *Thermocoax Co-type* modellato secondo le specifiche in Figura 4.2 è stato irraggiato con neutroni termici secondo la distribuzione Maxwell-Boltzmann a $T = 293\text{ K}$ in Figura 3.1.

La procedura di calcolo utilizzata è descritta di seguito. Per un SPND a risposta pronta, cioè basato sulla diseccitazione gamma a seguito della cattura neutronica, al fine di ottenere la corrente elettronica che transita da emettitore al collettore, è stata impostata una *tally* di flusso $f2$ sulla superficie mediana dell'allumina isolante (cfr. Figura 4.2), effettuando un bilancio sulla popolazione elettronica transitante nei due versi:

$$N_{\text{netto da emettitore a collettore}} = \left[N_{\text{entrante nel collettore}} - N_{\text{uscente dal collettore}} \right] - \left[N_{\text{uscente dall'emettitore}} - N_{\text{entrante nell'emettitore}} \right] \quad (4.1)$$

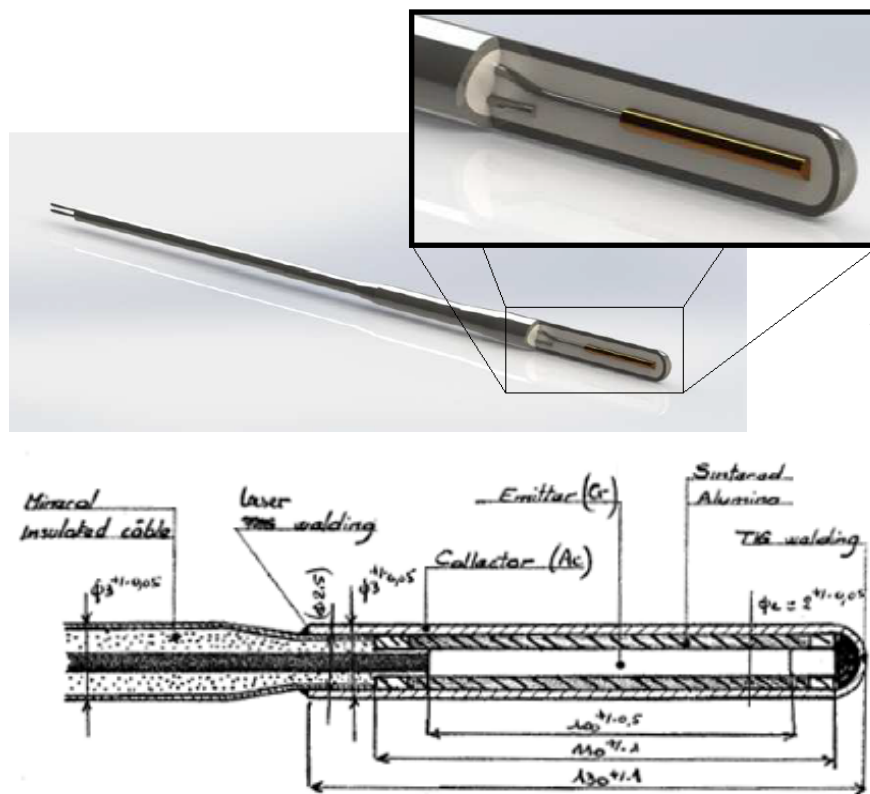


Figura 4.1: Disegno concettuale e sezione del rivelatore SPND *Thermocoax standard*, come fornito dalla casa costruttrice. Dimensioni in [mm].

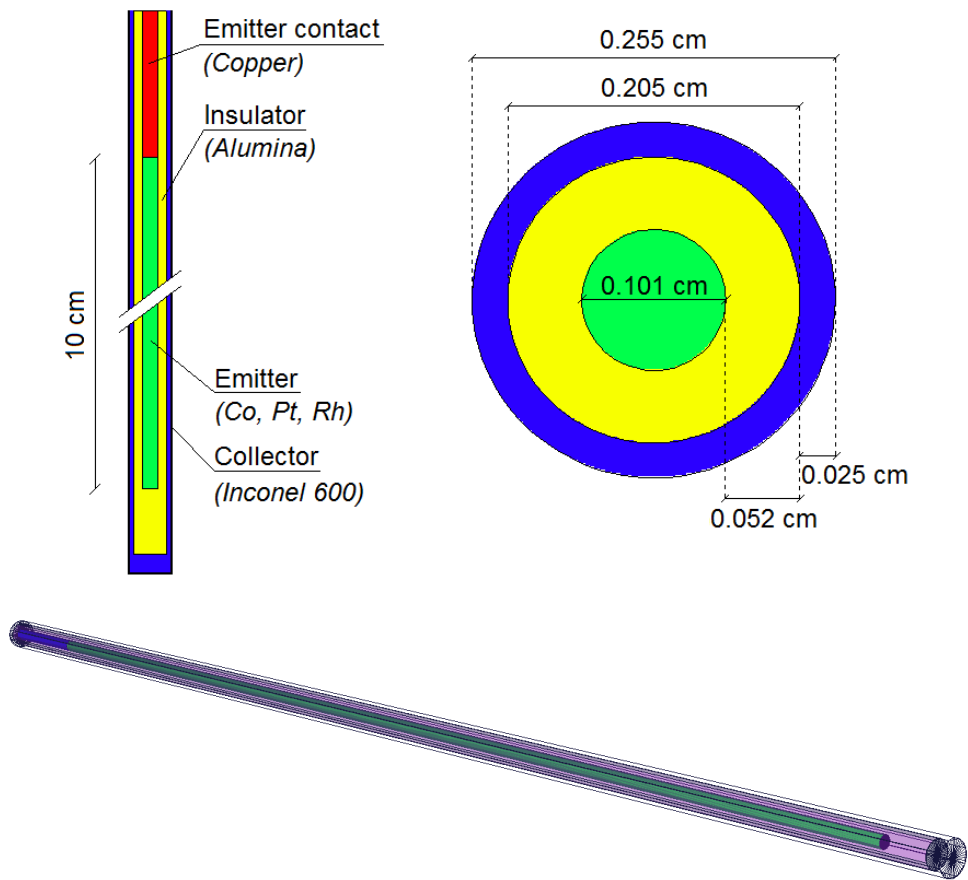


Figura 4.2: Sezioni, specifiche del modello e vista 3D del SPND *Thermocoax standard* ricostruito in MCNPX.

$$C = \frac{N_{\text{netto da emettitore a collettore}} \left[\frac{e/s}{(n/(cm^2 s))} \right] \cdot 1,6E - 19 \left[\frac{C}{e} \right]}{\text{emitter length [cm]}} \left[\frac{A}{cm \cdot (n/(cm^2 s))} \right] \quad (4.2)$$

L'equazione 4.2 fornisce, pertanto, la sensitività dello strumento per unità di lunghezza del materiale sensibile, da confrontare con le specifiche tecniche dichiarate dalla casa costruttrice. I risultati della simulazione sono riportati di seguito.

MCNPX mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0,05%
Rateo di reazioni (n, γ) all'emettitore $[reazioni/s/(n/cm^2 s^{-1})]$	$7,8467E - 2$
$N_{\text{netto da emettitore a collettore}} [e/s/(n/cm^2 s^{-1})]$	$4,24189E - 3$
Corrente elettronica nel collettore (stima MCNPX) $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	$6,787E - 23$
Corrente elettronica nel collettore (casa costruttrice) $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	$7,1E - 23$
Scarto MCNP vs. datasheet	-4,4%

Tabella 4.1: Risultati della simulazione MCNPX del SPND *Thermocoax Co-type*, irradiato con neutroni termici.

Come risulta evidente da Tabella 4.1, la sensitività calcolata da MCNPX è una sottostima rispetto al valore dichiarato dalla casa costruttrice. Questa sottostima era attesa, dato che il codice di simulazione effettua un *energy cutoff* sugli elettroni quando questi, nel loro processo di perdita di energia per interazione con i materiali, scendono al di sotto dell'energia di soglia di $1 keV$. Questo valore rappresenta un limite inferiore per MCNPX, e non risulta modificabile. Il risultato ottenuto è comunque molto significativo. È opportuno qui notare, inoltre, che gli elettroni che concorrono alla creazione della corrente elettronica al collettore non derivano solo dalle reazioni (n, γ) nell'emettitore, ma anche da altri processi d'interazione dei neutroni con i materiali, nonché da tutte le radiazioni secondarie, fotoniche ed elettroniche. Al fine di valutare tale effetto -e comprendere quindi quale sia la risposta netta dovuta all'utilizzo del ^{59}Co come materiale sensibile- si è realizzata una simulazione con un emettitore interno realizzato in *Inconel 600*, lo stesso materiale di cui è fatto il collettore esterno. Utilizzando l'equazione 4.2, i risultati di questa simulazione sono riportati di seguito.

mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0,06%
$N_{\text{netto da emettitore a collettore}} [e/s/(n/cm^2 s^{-1})]$	$9,682E - 4$
Corrente elettronica nel collettore (stima MCNPX) $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	$1,549E - 23$

Tabella 4.2: Risultati della simulazione MCNPX del SPND *Thermocoax standard* con elettrodo emettitore in *Inconel 600*, irradiato con neutroni termici.

La risposta netta ai soli neutroni del SPND *Thermocoax Co-type* è, dunque, statisticamente significativa rispetto al *dummy* contenente l'emettitore in *Inconel 600* visto che risulta essere maggiorata di +338%.

4.1.1.2 Simulazione del SPND Thermocoax Pt-type irraggiato con neutroni termici

Il rivelatore *Thermocoax Pt-type* modellato secondo le specifiche in Figura 4.2 è stato irraggiato con neutroni termici secondo la distribuzione Maxwell-Boltzmann a $T = 293 K$ in Figura 3.1.

La procedura di calcolo utilizzata è quella descritta dalle equazioni 4.1-4.2. L'equazione 4.2 fornisce, pertanto, la sensibilità dello strumento, da confrontare con le specifiche tecniche dichiarate dalla casa costruttrice. I risultati della simulazione sono riportati di seguito.

MCNPX mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally $f2$	0,05%
Rateo di reazioni (n, γ) all'emettitore $[reazioni/s/(n/cm^2 s^{-1})]$	$1,9936E - 2$
$N_{netto da emettitore a collettore} [e/s/(n/cm^2 s^{-1})]$	$2,37938E - 3$
Corrente elettronica nel collettore (stima MCNPX) $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	$3,8E - 23$
Corrente elettronica nel collettore (casa costruttrice) $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	$9,0E - 23$
Scarto MCNP vs. datasheet	-57,7%

Tabella 4.3: Risultati della simulazione MCNPX del SPND *Thermocoax Pt-type*, irraggiato con neutroni termici.

Come risulta evidente, la sensibilità calcolata da MCNPX è una sottostima rispetto al valore dichiarato dalla casa costruttrice, sia per l'*energy cutoff* del codice sugli elettroni, sia perché il materiale sensibile utilizzato dalla casa costruttrice è il ^{195}Pt puro, mentre il materiale introdotto in MCNPX è platino in composizione isotopica naturale, nella quale il ^{195}Pt occorre per 33,8%. Il risultato ottenuto è comunque significativo, perché la procedura descritta riproduce l'ordine di grandezza della sensibilità dichiarata dalla casa costruttrice, con una sottostima nell'ordine del 58%, più che accettabile considerando le limitazioni dette. Nonostante tali limitazioni, anche la risposta netta del SPND *Thermocoax Pt-type* così simulato, risulta statisticamente significativa rispetto al *dummy* contenente l'emettitore in *Inconel 600* visto che risulta essere maggiorata di +145%.

4.1.1.3 Simulazione del SPND Thermocoax Rh-type irraggiato con neutroni termici

Il rivelatore *Thermocoax Rh-type* modellato secondo le specifiche in Figura 4.2 è stato irraggiato con neutroni termici secondo la distribuzione Maxwell-Boltzmann a $T = 293 K$ in Figura 3.1.

A differenza dei precedenti, la riproduzione al calcolatore della sensibilità del SPND contenente ^{103}Rh necessita di tenere conto anche del contributo degli elettroni derivanti dal decadimento beta del ^{104}Rh prodottosi per attivazione neutronica. Accanto, quindi, agli elettroni che transitano da emettitore a collettore per interazioni dei neutroni con i materiali della sonda, occorre introdurre anche la simulazione delle particelle beta (derivanti dal decadimento del ^{104}Rh) che transitano da emettitore a collettore.

La sensibilità dichiarata dalla casa costruttrice è fornita a $t = 68 s$ (67% della risposta a saturazione) dall'inizio dell'irraggiamento, supposto con flusso neutronico costante. Il rateo delle particelle beta, infatti, non è costante con il flusso neutronico sebbene quest'ultimo lo sia, ma è legato al valore istantaneo di attività del nuclide ^{104}Rh (supposta essere nulla al tempo $t = 0$). Dall'istante di inizio dell'irraggiamento occorre attendere $6 \div 7$ vite medie del ^{104}Rh perché la sua attività saturi divenendo pressoché costante.

Appare chiaro che un SPND con emettitore basato su decadimento beta non è in grado di seguire istante per istante l'evoluzione di flusso in un reattore, perché la risposta utilizzabile dello strumento si basa sostanzialmente sull'arrivo a saturazione dell'attività del nuclide decadente

β^- , in una condizione di flusso neutronico costante. Una sonda siffatta può essere utilizzata solo per applicazioni di monitoraggio del ciclo del combustibile e, in nessun caso, per attivare le funzioni di sicurezza del reattore.

La simulazione della risposta di un SPND basato su decadimento beta è stata ricavata per sovrapposizione degli effetti, in due stadi di simulazione:

1. conteggio degli elettroni transitanti dall'emettitore al collettore per effetto dell'irraggiamento neutronico sui materiali della sonda, come da equazione 4.2;
2. conteggio degli elettroni transitanti dall'emettitore al collettore per effetto di decadimento beta del nuclide attivatosi sotto irraggiamento neutronico.

Il secondo contributo richiede che sia valutata l'attività del nuclide ^{104}Rh , calcolabile dall'equazione 4.3.

$$A(t) = N \cdot V \cdot \int_0^\infty \varphi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4.3)$$

dove:

N è la densità atomica del materiale emettitore;

V è il volume del materiale emettitore;

σ_c è la sezione d'urto di cattura del materiale emettitore;

τ è la vita media del ^{104}Rh , prodottosi per cattura.

La casa costruttrice fornisce i valori di risposta a $t = 68\text{ s}$, corrispondente al 67% della risposta satura della sonda, il che trasforma l'equazione 4.3 come segue:

$$A(t = 68\text{ s}) = N \cdot V \cdot \int_0^\infty \varphi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot 0.67 [=] \left[\frac{\text{beta decay}}{s} \right] \quad (4.4)$$

Esplicitando il flusso neutronico come $\varphi(E) = |p| \cdot \psi(E)$, con $\int_0^\infty \psi(E) dE = 1$, si può riscrivere

$$\frac{A(t = 68\text{ s})}{|p|} = N \cdot V \cdot \int_0^\infty \psi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot 0.67 [=] \left[\frac{\text{beta decay}}{s \cdot (n/cm^2 s^{-1})} \right] \quad (4.5)$$

L'equazione 4.5 è rappresentativa del rateo dei decadimenti beta al tempo indicato per unità di flusso neutronico: le particelle beta sono quindi trasportate all'interno del modello della sonda e contate, al fine di determinare quale sia la corrente netta transitante da emettitore a collettore mediante un'equazione simile alla 4.2. Il calcolo del numero degli elettroni transitanti $N_{\text{netto da emettitore a collettore}}$ è qui più complesso perché il trasporto delle particelle β all'interno della sonda ha richiesto una simulazione *ad hoc*, poiché *i*) è stato necessario introdurre manualmente uno spettro degli elettroni beta emessi, visto che MCNPX non tratta i secondari carichi di decadimento beta; *ii*) non tutti gli elettroni beta attraversano l'isolante tra emettitore e collettore; *iii*) gli elettroni beta mettono in moto altri elettroni mentre interagiscono con la materia.

Si è, allora, proceduto a realizzare una simulazione *ad hoc* considerando come input del calcolo una sorgente omogenea di elettroni beta del ^{104}Rh all'interno del volume dell'emettitore, calcolando così il seguente fattore di conversione tra elettroni effettivamente transitanti e particelle beta che vengono a crearsi nell'emettitore:

$$CC = 0,2684 \frac{e_{\text{netto da emettitore a collettore}}}{\text{beta decay}} \quad (4.6)$$

Il numero netto di elettroni transitanti da emettitore a collettore risulta, in questo caso, il prodotto dei valori delle equazioni 4.5 e 4.6:

$$\begin{aligned} N_{\text{netto da emettitore a collettore}} \left[\frac{e/s}{(n/(cm^2 s))} \right] &= \\ = N \cdot V \cdot \int_0^\infty \psi(E) \sigma_c^{Rh-103}(E) dE \cdot 0.67 [=] \left[\frac{\text{beta decay}}{s \cdot (n/cm^2 s^{-1})} \right] \cdot 0,2684 \frac{e_{\text{netto da emettitore a collettore}}}{\text{beta decay}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Utilizzando, poi, un'equazione tipo 4.2, si può calcolare -infine- il contributo al segnale di corrente derivante dal trasporto delle particelle β creati nell'emettitore.

Riassumendo tutti i contributi per il SPND *Thermocoax Rh-type*, si ottengono i risultati in Tabella 4.4.

La sottostima riscontrata nella procedura di simulazione era attesa a causa di come è stata realizzata la riproduzione delle particelle beta derivanti dall'attivazione neutronica del ^{103}Rh (eq. 4.6): non avendo avuto a disposizione lo spettro integrale di tutti i canali di produzione di elettroni da parte del ^{104}Rh , si è utilizzato uno spettro beta semplificato, costituente una porzione delle particelle che effettivamente si producono. Nonostante la limitazione detta, anche la risposta netta del SPND *Thermocoax Rh-type* si trova essere statisticamente significativa rispetto al dummy contenente l'emettitore in *Inconel 600* visto che risulta essere maggiorata di +2943%.

Anche in questo caso l'ordine di grandezza della sensitività dello strumento è riprodotta.

MCNPX mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally f2	0,07%
massima incertezza sulle tally f4	0,02%
<i>Contributo 1: elettroni derivanti da interazione dei neutroni con i materiali della sonda</i>	
$N_{\text{netto da emettitore a collettore}} \left[\frac{e/s}{(n/cm^2 s^{-1})} \right]$	5,4992E - 4
Corrente elettronica nel collettore - contributo 1 $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	8,799E - 24
<i>Contributo 2: elettroni derivanti da decadimento beta (@ t = 68 s)</i>	
Rateo di reazioni (n, γ) all'emettitore $[reazioni/s/(n/cm^2 s^{-1})]$	1,6078E - 1
Elettroni β prodotti (eq. 4.5) $[\beta/s/(n/cm^2 s^{-1})]$	1,0772E-1
Fattore di conversione (eq. 4.6) $[e/\beta]$	0,2684
$N_{\text{netto da emettitore a collettore}} \left[\frac{e/s}{(n/cm^2 s^{-1})} \right]$	2,8912E - 2
Corrente elettronica nel collettore - contributo 2 $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	4,626E - 22
Corrente elettronica totale nel collettore (stima MCNPX) $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	4,714E - 22
Corrente elettronica nel collettore (casa costruttrice) $[A/cm/(n/cm^2 s^{-1})]$	20,5E - 22
Scarto MCNP vs. datasheet	-77%

Tabella 4.4: Risultati della simulazione MCNPX del SPND *Thermocoax Rh-type*, irradiato con neutroni termici.

4.2 MCNPX e l'esperienza d'irraggiamento di rivelatori SPND nel reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia

Alla simulazione della risposta di un SPND *Thermocoax standard* all'interno del flusso neutronico veloce del reattore TAPIRO di Enea Casaccia, si è scelto di dare maggiore rilevanza, nell'ottica del mostrare le potenzialità e le prospettive offerte dall'esercizio di questa macchina.

A tal proposito, prima di addentrarsi nella discussione della simulazione e dei suoi risultati, si riporta una descrizione di massima del reattore.

4.2.1 Il reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia

TAPIRO è la sorgente neutronica veloce di ENEA Casaccia, operante dal 1971, costruito sulla falsariga dell'*Argonne Fast Source Reactor* (Idaho Falls), e di *Harmonie* (Cadarache), ma con aspetti di originalità che lo contraddistinguono dai precedenti, rendendolo -de facto- un unicum.

Le caratteristiche d'impianto, riassunte sinteticamente in Tabella 4.5, sono così sintetizzabili:

- il reattore è progettato per operare ad un livello massimo di potenza di 5 kW . È costituito da un nocciolo cilindrico di uranio metallico fortemente arricchito (93,5% in ^{235}U) legato con circa 1,5% in peso di molibdeno, per un volume di circa $\sim 1,4$ litri. Il nocciolo, organizzato in tre piastre sovrapposte, è incamiciato in tutte le sue parti da un *liner* di acciaio inossidabile dello spessore di $0,5\text{ mm}$;
- il nocciolo è circondato da un riflettore in rame, anch'esso di forma cilindrica, dello spessore di $\sim 30\text{ cm}$;
- all'interno del riflettore è chiuso l'involucro di contenimento del nocciolo;
- l'intero riflettore è poi chiuso in un involucro di acciaio e circondato dallo schermo biologico realizzato in calcestruzzo pesante borato, con densità $3,1\text{ g/cm}^3$.

Lo schermo è attraversato da numerosi canali d'irraggiamento che penetrano nel riflettore, chiusi da opportuni tappi schermanti. Una colonna termica completa le attrezzature sperimentali. Il centro geometrico di nocciolo si trova a $\sim 1\text{ m}$ sulla quota del pavimento del locale reattore.

Sotto il reattore si trova un piccolo locale, inaccessibile durante l'esercizio, dove sono installati i meccanismi degli elementi di controllo. Questo locale è costituito da un contenitore in acciaio a tenuta (denominato *contenitore sottopila*) alloggiato entro l'anello di fondazione del blocco pila e concepito per fungere, in caso d'incidente, da volume di sfianto per il contenitore-fluido refrigerante ed il circuito di refrigerazione primario.

Gli elementi di controllo sono costituiti da parti dello stesso riflettore dotate di movimento verticale di estrazione rapida ed inserzione. Un analogo meccanismo controlla anche il movimento di uno dei 3 dischi costituenti il nocciolo che, a reattore spento, è alloggiata in basso, nella direzione del contenitore sottopila.

Il sistema di controllo del reattore è costituito da due complessi di partenza e due complessi lineari di lettura e sicurezza. Un complesso logartimico consente la registrazione del flusso anche in caso d'incidente con mancato funzionamento degli altri complessi di misura.

Il nocciolo è refrigerato da elio gassoso alla pressione di $6,5 \div 8,5\text{ ata}$ che circola in un'intercapedine di qualche mm esistente tra nocciolo e riflettore. Il circolatore del refrigerante è di tipo rotante su cuscinetti a gas. Il calore asportato è smaltito attraverso uno scambiatore elio-aria verso l'esterno del locale reattore.

Il reattore è ospitato in un edificio a semitenuta dotato di impianto di condizionamento e termoventilazione in ciclo aperto, con filtri assoluti all'espulsione.

In Figura 4.4 sono riportate una vista in pianta ed una in sezione; in Figura 4.5 gli spettri neutronici erogabili dalla macchina nei diversi canali sperimentali.

La principale peculiarità del reattore risiede nel suo spettro neutronico, praticamente da ^{235}U puro, la cui energia media risiede intorno a $\sim 1\text{ MeV}$.



Figura 4.3: Il reattore TAPIRO di ENEA Casaccia.

Il reattore offre una serie di canali per diverse prove, in relazione alla magnitudo e all'energia del flusso neutronico desiderato, nonché allo spazio necessario alla prova. La posizione che consente di ottenere il massimo flusso e la maggiore energia media dello spettro neutronico è il canale diametrale, che risulta passante per il nocciolo, per cui la sonda in prova è posizionabile al centro della massa critica. A seguire, il canale che risulta maggiormente promettente per prove sperimentali è il canale radiale 1 che arriva a ridosso del bordo esterno del nocciolo: sebbene si attenda un minore flusso in magnitudo, con una inferiore energia media dello spettro, questo canale ($\sim 6\text{ cm}$ di diametro occupabile, distante $9,3\text{ cm}$ dall'asse verticale del nocciolo) risulta fondamentale a superare i limiti di quello diametrale, che ha un diametro occupabile di appena $\sim 1\text{ cm}$.

Sebbene le sonde precedentemente discusse siano sperimentabili anche solo nel canale diametrale viste le loro dimensioni, può essere interessante effettuare una prova delle stesse annegate in piombo solido, al fine di verificare l'influenza sulle prestazioni di questo mezzo: difatti, data la sua notevole efficacia nello schermaggio della radiazione gamma, si pensa sia possibile andare a ridurre il valor minimo del segnale di corrente statisticamente rappresentativo del flusso neutronico, visto che l'interferenza del campo di radiazione gamma è intrinsecamente attenuata, in un reattore LFR, dal refrigerante stesso.

4.2.2 Concettualizzazione di test sperimentali nel reattore TAPIRO

Le caratteristiche del reattore veloce TAPIRO si dimostrano adatte ad investigare le problematiche di monitoraggio di flussi neutronici veloci di "bassa intensità" laddove la popolazione neutronica può risultare insufficiente a ricavare segnali elettrici statisticamente significativi cui affidare il monitoraggio e controllo del reattore. È, inoltre, possibile studiare caratteristiche specifiche degli strumenti (cioè per unità di flusso) come le sensibilità neutroniche e gamma.

Essendo il flusso neutronico massimo del reattore TAPIRO nell'ordine di $10^{11} \div 10^{12} \text{ n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$, da Figura 4.5, si evince che si riuscirebbe a riprodurre un flusso neutronico in TAPIRO -come valore assoluto- al massimo di entità tale da simulare il range di potenza di ALFRED che va dalla potenza '0' a qualche centinaio di kW . Chiaramente, più si è in prossimità del centro del nocciolo, più la magnitudo del flusso è significativa, pertanto saranno da preferire prove nel canale diametrale, tangenziale e poi nel più grande canale radiale 1.

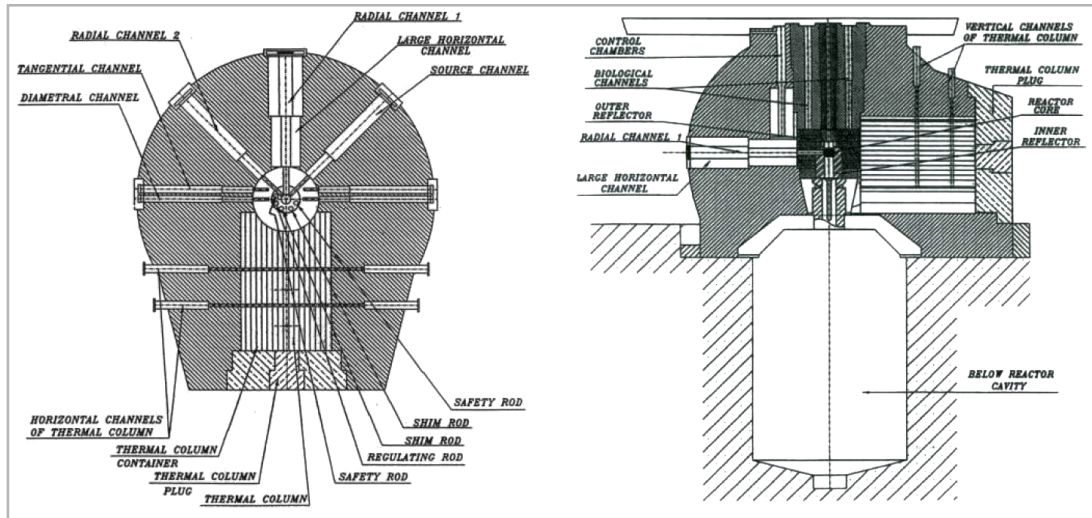


Figura 4.4: A sinistra: vista in pianta del reattore TAPIRO in corrispondenza del piano mediano di nocciolo. A destra: sezione verticale del reattore sull'asse della canale radiale 1/colonna termica.

Reactor Type	Fast Reactor
First criticality	1971
Maximum thermal power [kW]	5
Maximum neutron flux [$n/(cm^2 s)$] @ the core center	$4 \cdot 10^{12}$
Fuel layout	3 cylinders, 2 fixed, 1 moveable
Fuel composition (metal alloy)	98,5% wt. U 93,5% ^{235}U ; 5,6% ^{238}U ; 0,6% ^{234}U ; 0,3% ^{236}U 1,5% wt. Mo
Cooling system	Gas (helium)
Reflector	Copper
Control system	based on leakage - 2 safety rods - 2 shim rods - 1 regulating rod
Test channels	- radial channel 1 (useful I.D. $\sim 6 cm$) - radial channel 2 (useful I.D. $\sim 8 cm$) - tangential channel (useful I.D. $\sim 3 cm$) - diametral channel (useful I.D. $\sim 1 cm$) - 2 vertical channels (useful I.D. $\sim 12 cm$) - thermal column (experimental cavity $\sim 2 m^3$)

Tabella 4.5: Principali caratteristiche tecniche e sperimentali del reattore TAPIRO.

Considerando l'esiguità dei dati sperimentali relativi ad SPND-pronti e tenendo conto dell'esperienza già effettuata in TAPIRO [33] (che verrà in seguito puntualmente discussa), il reattore può risultare adatto a:

- testare SPND commerciali nel canale diametrale del reattore, in condizioni di flusso massimo;
- testare SPND di nuova concezioni (ad aumentata sensibilità) negli altri canali a minore flusso.

Essendo privilegiate le prove nel canale diametrale (cfr. Figura 4.6), per questioni di dimensione occorre orientarsi verso gli strumenti di misura inferiore a $\sim 1\text{ cm}$, applicabili potenzialmente in tutto il reattore ALFRED, perlomeno da un punto di vista di occupazione spaziale. Per contro, il canale radiale 1 (cfr. Figura 4.6) offrirebbe la possibilità di provare strumentazione di più grande dimensione, potenzialmente applicabile negli elementi riflettori radiali di ALFRED, o anche "più lontano". Le caratteristiche che possono studiarsi della strumentazione, commerciale o innovativa, sono:

- misura della sensibilità ai neutroni;
- misura della sensibilità gamma;
- valutazione dei limiti inferiori per i segnali elettrici statisticamente significativi e rappresentativi del flusso neutronico (minimo flusso neutronico rivelabile in maniera affidabile).

4.2.3 Ricostruzione in MCNPX dell'esperienza d'irraggiamento di rivelatori SPND Thermocoax standard nel canale tangenziale del reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia

Il lavoro descritto in [33] rappresenta un primo tentativo di studio di SPND in flussi neutronici veloci, più che altro per il loro impiego nell'ambito della ricerca sulla fusione nucleare. SPND *Thermocoax* di geometria convenzionale, al rodio, vanadio e cobalto, sono stati acquistati per essere testati nei flussi neutronici del *Frascati Neutron Generator*, FNG, e nel canale tangenziale di TAPIRO.

Riguardo l'esperienza in TAPIRO, [33], la geometria d'irraggiamento è riportata in Figura 4.7, ed il SPND è posizionato a $\sim 21\text{ cm}$ dal centro di reattore; in questa posizione il flusso neutronico risulta approssimativamente $4,76 \cdot 10^{10}\text{ n}/(\text{cm}^2\text{ s})$ ($\pm 10\%$), in corrispondenza della potenza 2 kW di reattore.

Lo spettro del flusso neutronico in tale posizione, Figura 4.8, è stato indagato mediante attivazione neutronica e deconvoluzione attraverso tecniche di *unfolding* (codice SAND-II). Esso risulta avere un'energia media di $\sim 100\text{ keV}$.

Preliminarmente alla fase d'irraggiamento vera e propria in TAPIRO, i rivelatori sono stati installati ed il fondo di misura è stato acquisito. Già dalla valutazione del fondo è emerso che il segnale fornito dal *Thermocoax Rh-type* risultava chiaramente superiore alle fluttuazioni degli altri due, rispettivamente al vanadio e cobalto. Questa valutazione ha reso il rivelatore al rodio il principale target del test, i cui risultati sono presentati in Figura 4.9.

Durante la fase d'irraggiamento, sono ben visibili delle oscillazioni della corrente misurata dall'elettrometro *Keithley 6485*, dovute -secondo i tecnici d'impianto- alle interferenze elettromagnetiche del motore del circolatore dell'elio di raffreddamento. Lo spegnimento dello stesso durante il decadimento del flusso neutronico seguente allo shutdown del reattore ha consentito la misura di un andamento di corrente più stabile nel tempo, attraverso cui è stata inferita la corrente di saturazione corrispondente all'irraggiamento a piena potenza del reattore. Tale valore si è attestato mediamente a $\sim 17\text{ pA}$.

Le misure con *Thermocoax V-type* e *Thermocoax Co-type* non hanno fornito risultati utilizzabili, visto che le risposte sono risultate confondersi con i rumori statistici.

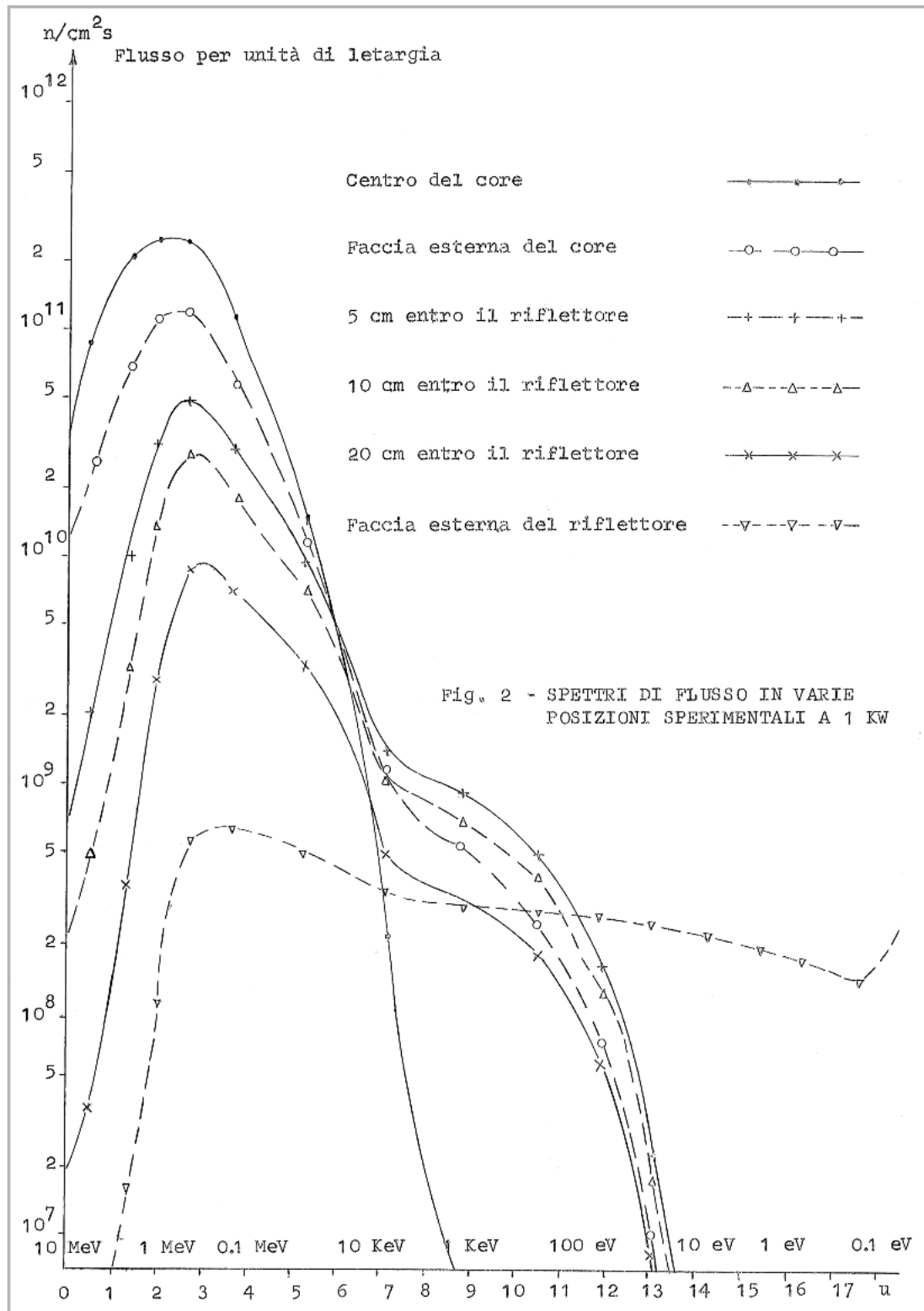


Figura 4.5: Caratteristiche del flusso neutronico di TAPIRO nelle diverse posizioni sperimentali.

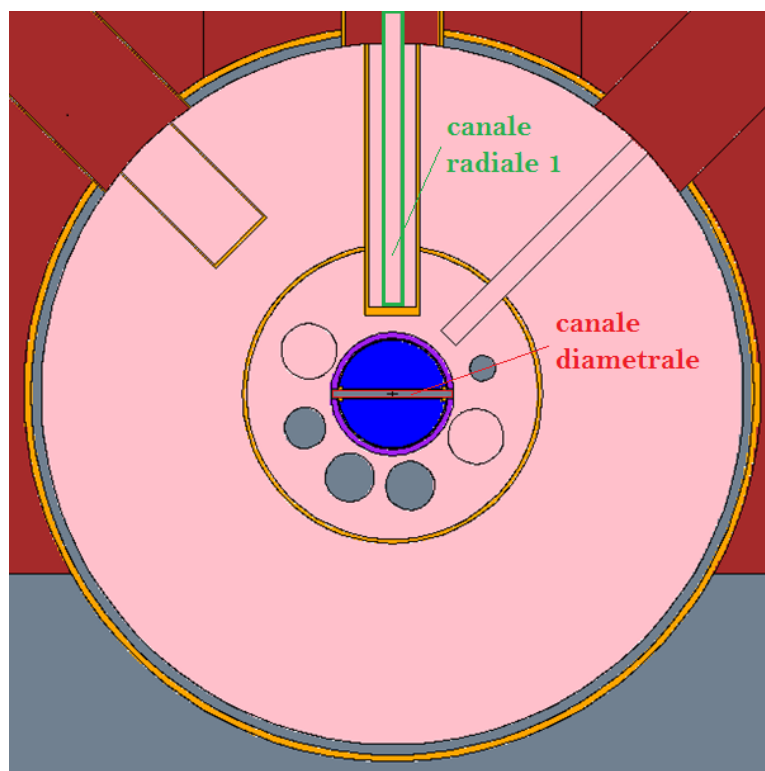


Figura 4.6: Vista in pianta del piano mediano del reattore TAPIRO. In evidenza i canali più promettenti per le campagne sperimentali potenzialmente attuabili.

Al fine di riprodurre l'esperienza d'irraggiamento del SPND *Thermocoax Rh-type* all'interno del canale tangenziale del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia [33] fin qui descritta, la procedura di calcolo di cui al paragrafo 4.1.1.3 è stata ripetuta integralmente in flusso neutronico veloce. Il confronto della simulazione con la realtà sperimentale costituisce un'ulteriore conferma circa la validità dell'approccio utilizzato, rendendo la procedura utilizzabile anche a fini di progettazione di strumentazione innovativa.

I risultati di simulazione sono riportati in Tabella 4.6.

Anche in questo caso, come nel paragrafo 4.1.1.3 si riscontra una sottostima dovuta alla tecnica di simulazione delle emissioni beta del ^{104}Rh . Nonostante questa limitazione, il risultato ottenuto è più che soddisfacente poiché anche la riproduzione dell'ordine di grandezza della risposta dello strumento consente ad MCNPX di divenire uno strumento pratico di simulazione e progettazione più che valido.

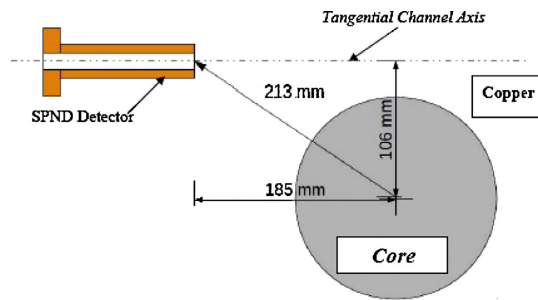


Figura 4.7: Geometria del canale tangenziale utilizzato per testare i SPND *Thermocoax* in TAPIRO.

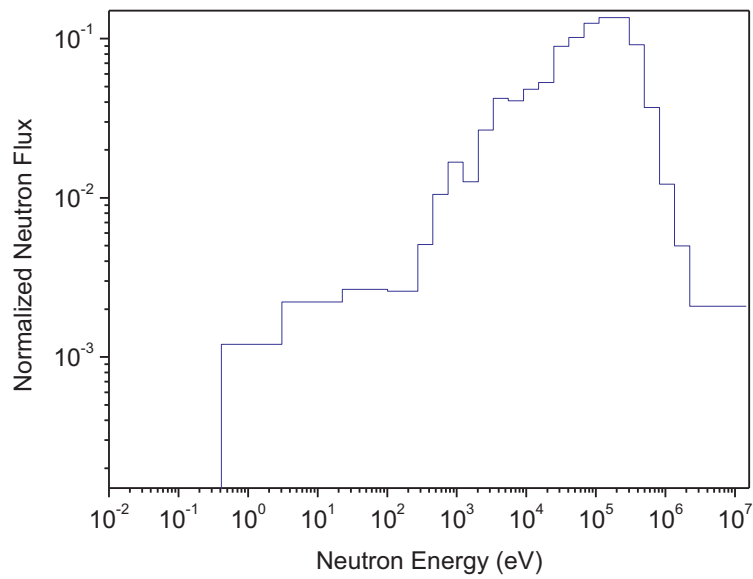


Figura 4.8: Spettro del flusso neutronico nella posizione sperimentale del canale tangenziale di TAPIRO, misurato per attivazione neutronica e deconvoluzione mediante tecniche di *unfolding*.

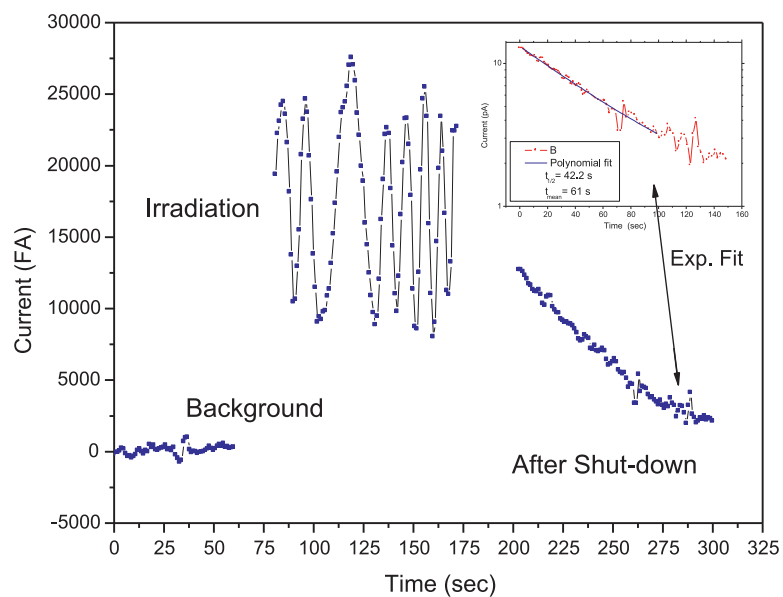


Figura 4.9: Risultati sperimentali d'irraggiamento del SPND *Thermocoax Rh-type* in TAPIRO.

MCNPX mode	n p e
nps (storie elaborate)	5'000'000'000
massima incertezza sulle tally $f2$	0,07%
massima incertezza sulle tally $f4$	0,01%
<i>Contributo 1: elettroni derivanti da interazione dei neutroni con i materiali della sonda</i>	
$N_{netto\ da\ emettitore\ a\ collettore}$ $[e/s/(n/cm^2\ s^{-1})]$	5,3568E - 6
Flusso neutronico $[n/cm^2\ s^{-1}]$	$4,76 \cdot 10^{10}$ ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica nel collettore - contributo 1 $[pA]$	0,041 ($\pm 10\%$)
<i>Contributo 2: elettroni derivanti da decadimento beta (@ $t = \infty$)</i>	
Rateo di reazioni (n, γ) all'emettitore $[reazioni/s/(n/cm^2\ s^{-1})]$	2,1256E - 3
Elettroni β prodotti (eq. 4.5) $[\beta/s/(n/cm^2\ s^{-1})]$, (@ $t = \infty$)	2,1256E - 3
Fattore di conversione (eq. 4.6) $[e/\beta]$	0,2684
$N_{netto\ da\ emettitore\ a\ collettore}$ $[e/s/(n/cm^2\ s^{-1})]$	5,7051E - 4
Flusso neutronico $[n/cm^2\ s^{-1}]$	$4,76 \cdot 10^{10}$ ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica nel collettore - contributo 2 $[pA]$	4,345 ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica totale nel collettore (stima MCNPX) $[pA]$	4,386 ($\pm 10\%$)
Corrente elettronica misurata sperimentalmente (reference [33]) $[pA]$	17
Scarto MCNP vs. sperimentale	-74,2%

Tabella 4.6: Risultati della simulazione MCNPX del SPND *Thermocoax Rh-type*, irradiato nel canale tangenziale del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia.

4.3 Studio delle risposte di rivelatori SPND-pronti, commercialmente disponibili, attraverso il codice MCNPX, in TAPIRO

La validazione di MCNPX, sia attraverso la riproduzione teorica delle prestazioni degli strumenti dichiarate dalla casa costruttrice, che sperimentale, mediante la ricostruzione dell'esperienza d'irraggiamento [33] in TAPIRO, ha consentito l'uso del codice come mezzo di ottimizzazione e progettazione di tali rivelatori.

Essendo disponibile presso il *Centro Ricerche ENEA Casaccia* la sorgente veloce TAPIRO, d'ora in avanti lo studio delle caratteristiche dei SPND *Thermocoax Co-type* e *Pt-type* si concentra sull'esposizione degli stessi alle peculiarità d'irraggiamento del reattore, presagendo che tali studi possano trovare, nel prossimo futuro, anche una corrispondenza sperimentale.

Non si esclude che un SPND prototipo possa esser costruito e testato, verificando l'effettiva possibilità tecnica per tale strumentazione di monitorare flussi neutronici veloci in sicurezza e con continuità.

4.3.1 Irraggiamenti effettuabili in TAPIRO

La disponibilità del reattore veloce TAPIRO presso ENEA Casaccia rende possibile concettualizzare e programmare prove sperimentali per le sonde in flussi neutronici veloci.

Nell'ambito del lavoro condotto, l'interesse è effettuare irraggiamenti alle massime potenzialità della macchina, ricavando i più elevati valori di flusso neutronico, che siano in grado di far registrare dei segnali elettrici quantificabili e statisticamente significativi nell'irraggiamento dei SPND. Nei reattori di potenza o dimostrativi in scala ridotta, infatti, i valori di flusso neutronico risulteranno $100 \div 1000$ volte superiori a quelli sperimentabili in TAPIRO, rendendo le risposte elettriche ancor più significative. In ogni caso, la dimostrazione della possibilità di

<i>group</i>	<i>Lower Energy [MeV]</i>	<i>Upper Energy [MeV]</i>
1	8,00E+00	1,00E+01
2	6,00E+00	8,00E+00
3	5,00E+00	6,00E+00
4	4,00E+00	5,00E+00
5	3,00E+00	4,00E+00
6	2,00E+00	3,00E+00
7	1,50E+00	2,00E+00
8	1,00E+00	1,50E+00
9	8,00E-01	1,00E+00
10	6,00E-01	8,00E-01
11	5,00E-01	6,00E-01
12	4,00E-01	5,00E-01
13	3,00E-01	4,00E-01
14	2,00E-01	3,00E-01
15	1,00E-01	2,00E-01
16	8,00E-02	1,00E-01
17	7,00E-02	8,00E-02
18	6,00E-02	7,00E-02
19	5,00E-02	6,00E-02
20	4,00E-02	5,00E-02
21	3,00E-02	4,00E-02
22	2,00E-02	3,00E-02
23	1,00E-02	2,00E-02
24	1,00E-03	1,00E-02

Tabella 4.7: Raggruppamento energetico utilizzato per la determinazione dello spettro fotonico nelle posizioni d'interesse.

ottenere risposte "leggibili" anche in TAPIRO elegge tale reattore a possibile banco di prova per questa strumentazione.

La disponibilità del modello MCNPX del reattore TAPIRO presso il *Laboratorio FSN-FISS-RNR* di ENEA Casaccia, ha consentito una più fine elaborazione dello studio condotto, rendendo possibile la realizzazione di simulazioni integrali delle sonde inserite all'interno del canale diametrico. In Figura 4.10 sono mostrati alcuni screenshot estratti dal modello.

Il detto canale diametrico presenta un flusso neutronico massimo di $1,3 \cdot 10^{12} n/(cm^2 s)$ quando il reattore è esercito alla potenza di $5 kW$. In corrispondenza di tale flusso neutronico è presente anche un campo fotonico nell'ordine di $5,7 \cdot 10^{11} fotoni/(cm^2 s)$. Gli spettri dei campi neutronico e fotonico precedentemente detti sono stati ricavati dalla simulazione e mostrati nelle figure sottostanti, Figura 4.11 e Figura 4.12, secondo le classificazioni energetiche identificate in Tabella 2.5 e 4.7, rispettivamente per neutroni e fotoni.

L'energia media dello flusso neutronico risulta $\sim 820 keV$. L'energia media dello flusso fotonico risiede in $\sim 1,0 \div 1,5 MeV$.

Tali condizioni di flusso neutronico sono state di seguito utilizzate per lo studio delle caratteristiche dei SPND *Thermocoax Co-type* e *Pt-type*.

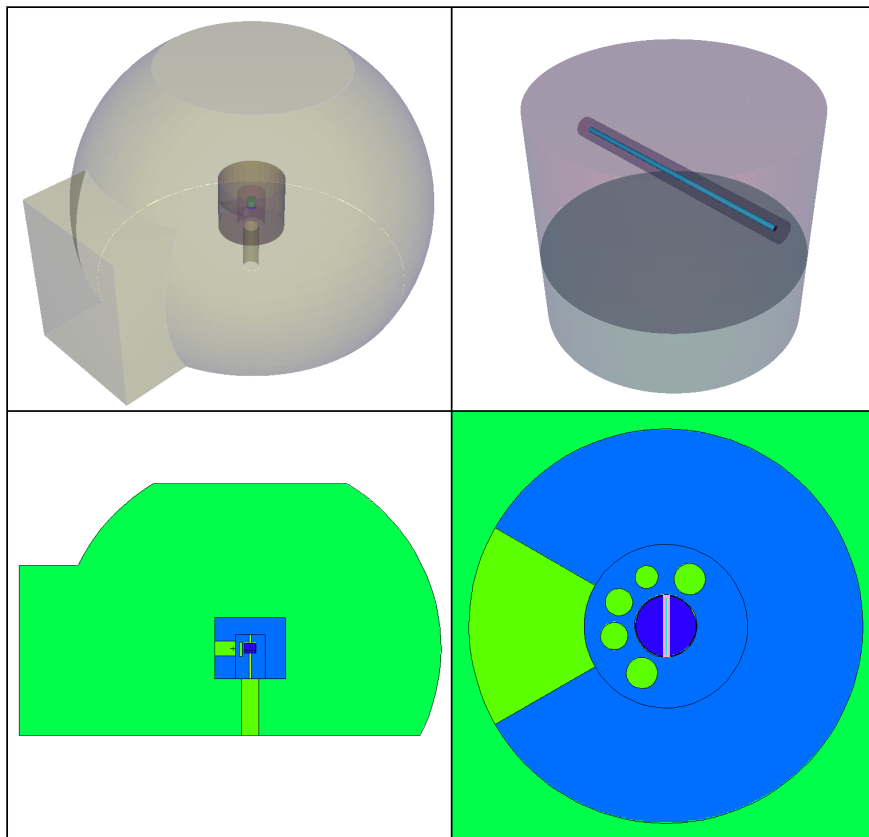


Figura 4.10: Screenshot dal modello MCNPX del reattore TAPIRO. A sinistra, la visualizzazione integrale del reattore, in spaccato longitudinale e 3D. A destra, vista in pianta e 3D del nocciolo, con il canale diametrale passante e la sonda in prova (stiletto azzurro).

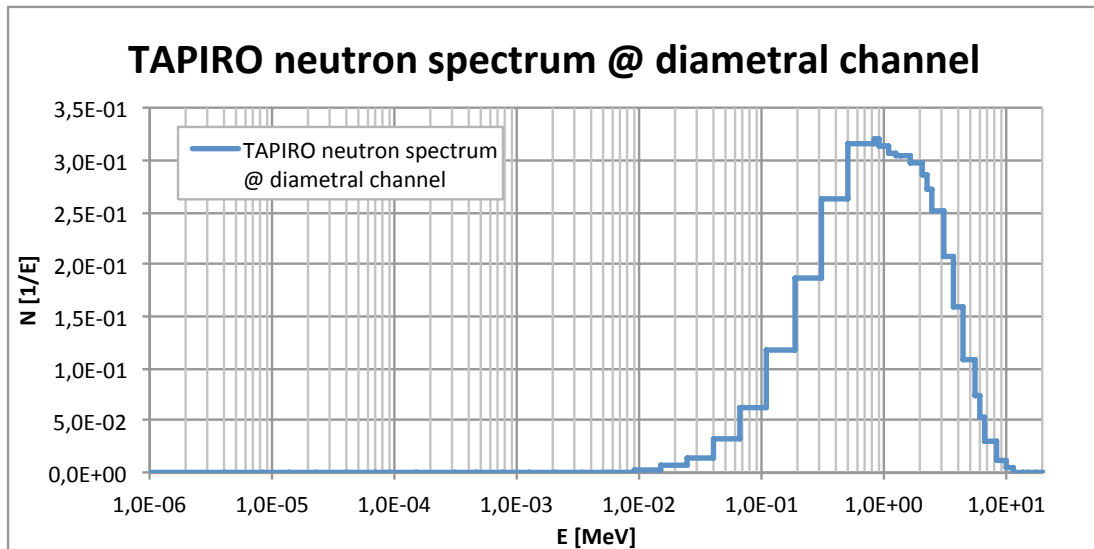


Figura 4.11: Spettro neutronico in corrispondenza del canale diametrale del reattore TAPIRO.

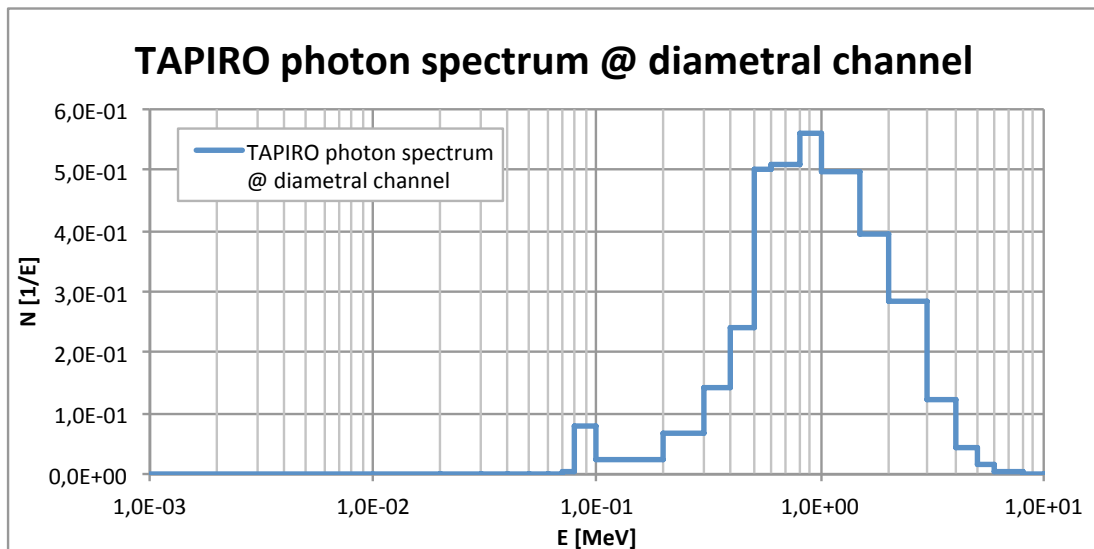


Figura 4.12: Spettro fotonico in corrispondenza del canale diametrale del reattore TAPIRO.

4.3.2 Studio di burn-up

Si riporta di seguito lo studio di *burn-up* dei SPND-pronti, commercialmente disponibili, *Thermocoax Co-type* e *Pt-type*. Le motivazioni principali che spingono allo studio di burn-up del materiale sensibile si riassumono:

- nella valutazione del rateo di consumo e del consumo effettivo del materiale sensibile in determinate condizioni d'irraggiamento, che -a lungo andare- comportano variazioni nella sensibilità dello strumento, fino alla necessità di sua sostituzione;
- nella modificazione attesa nella risposta elettrica dello strumento a causa dei disturbi innescati dalla creazione, all'interno del volume sensibile, di specie radioattive, inizialmente per attivazione neutronica, e poi per decadimento radioattivo delle specie prodotte.

Entrambi gli aspetti possono comportare esigenze di sostituzione dello strumento, nel lungo termine, identificando -quindi- un intervallo di vita utile della sonda. Si precisa che, non avendo a disposizione in MCNPX tutte le librerie delle sezioni d'urto alla temperature $600 \div 900 K$, si è deciso di utilizzare le sezioni d'urto a $T = 293 K$, presenti per tutti i nuclidi, al fine di fornire dei dati e dei risultati omogenei e confrontabili tra loro, senza comunque perdere di significatività. L'intera procedura, con dati di partenza più completi, potrà essere ripetuta anche con librerie più appropriate, appena disponibili. Come si vedrà, le principali reazioni indotte da neutroni sui materiali sensibili sono, nell'ordine d'importanza:

- reazioni (n, γ) ;
- reazioni (n, p) ;
- reazioni (n, α) ;
- reazioni $(n, 2n)$;
- reazioni $(n, 3n)$.

Di esse, le prime tre mettono in moto, indirettamente o direttamente, particelle cariche, potendo contribuire in maniera significativa alla transizione di elettroni dall'emettitore al collettore. Le ultime due categorie di reazione, hanno capacità di produrre segnale solo per conseguente diseccitazione del nucleo, se esso viene lasciato, dal neutrone incidente, in uno stato metastabile a corta vita.

Come si vedrà, comunque, i ratei di reazione più significativi riguardano solo le prime due categorie.

4.3.2.1 Test su SPND al ^{59}Co

Un SPND come definito nel paragrafo 4.1.1, alimentato con un volume sensibile di ^{59}Co è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1, all'interno di TAPIRO. Le condizioni generali della prova sono riportate in Tabella 4.8.

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette, e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, sono riportati in Tabella 4.9.

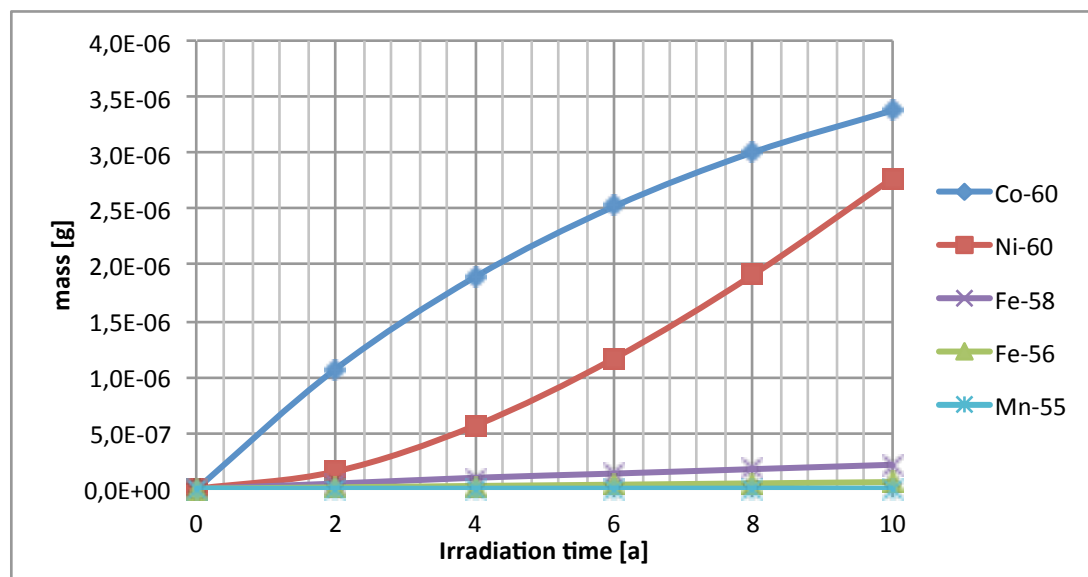
Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ^{59}Co , essendo quantitativamente l'isotopo predominante. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 4.9 sono prodotti di attivazione e successivo decadimento a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi. A titolo di esempio, si riportano le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori in Figura 4.13.

Come risulta evidente da Tabella 4.8, Tabella 4.9 e Figura 4.13, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E+20 n/(cm^2)$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 3,4E - 5\%/anno$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell'esposizione a flussi

Carica iniziale di ^{59}Co [g]	9,958000E-01
Carica finale di ^{59}Co [g]	9,957966E-01
Consumo in ^{59}Co [g]	3,379102E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1,30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4,10E+20
Burn-up medio [%/mese]	2,83E-06

Tabella 4.8: Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND *Thermocoax Co-type*.

	Ratei di reazione [reazioni/s]			
	(n, γ)	($n, 2n$)	(n, α)	(n, p)
^{55}Mn	1,07E-01 ($\pm 1,2\%$)	2,09E-03 ($\pm 19\%$)	1,38E-03 ($\pm 3,7\%$)	6,45E-03 ($\pm 2,0\%$)
^{56}Fe	6,15E+00 ($\pm 1,8\%$)	3,63E-02 ($\pm 28\%$)	3,15E-01 ($\pm 2,9\%$)	7,45E-01 ($\pm 2,7\%$)
^{57}Fe	5,06E-02 ($\pm 3,6\%$)	1,00E-02 ($\pm 8\%$)	6,90E-03 ($\pm 1,3\%$)	4,82E-03 ($\pm 1,9\%$)
^{58}Fe	1,93E+01 ($\pm 1,8\%$)	7,48E-01 ($\pm 17\%$)	1,65E-01 ($\pm 5,2\%$)	2,39E-02 ($\pm 7,8\%$)
^{59}Co	1,88E+08 ($\pm 0,7\%$)	1,95E+06 ($\pm 20\%$)	1,95E+06 ($\pm 3,5\%$)	1,86E+07 ($\pm 1,5\%$)
^{60}Ni	3,91E+02 ($\pm 1,7\%$)	1,10E+00 ($\pm 30\%$)	4,99E+01 ($\pm 2,1\%$)	5,77E+01 ($\pm 2,2\%$)
^{61}Ni	1,47E-03 ($\pm 1,6\%$)	7,37E-05 ($\pm 9\%$)	1,99E-04 ($\pm 1,1\%$)	2,41E-04 ($\pm 1,4\%$)
^{62}Ni	2,59E-09 ($\pm 0,4\%$)	2,02E-11 ($\pm 20\%$)	6,27E-12 ($\pm 4,1\%$)	4,16E-12 ($\pm 6,4\%$)
^{63}Cu	5,66E-17 ($\pm 3,3\%$)	1,10E-19 ($\pm 26\%$)	9,25E-19 ($\pm 2,4\%$)	3,72E-17 ($\pm 0,7\%$)

Tabella 4.9: Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND *Thermocoax Co-type*.Figura 4.13: Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND alimentato con ^{59}Co . Come risulta evidente, anche per valori di fluenza nell'ordine di $4E+20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione dell'isotopo originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile.

Carica iniziale di ^{195}Pt [g]	1,721000E+00
Carica finale di ^{195}Pt [g]	1,720805E+00
Consumo in ^{195}Pt [g]	1,946654E-04
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1,30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4,10E+20
Burn-up medio [%/mese]	9,4E-05

Tabella 4.10: Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND *Thermocoax Pt-type*, simulato in MCNPX con ^{195}Pt , ovvero platino in composizione isotopica naturale.

	Ratei di reazione [reazioni/s]		
	(n, γ)	$(n, 2n)$	$(n, 3n)$
^{195}Pt	1,47E+09 ($\pm 0,4\%$)	1,02E+08 ($\pm 4,0\%$)	4,57E+05 ($\pm 52\%$)

Tabella 4.11: Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND *Thermocoax Pt-type*, simulato in MCNPX con ^{195}Pt , ovvero platino in composizione isotopica naturale.

neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, il SPND al ^{59}Co presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un'installazione fissa dello strumento all'interno della struttura dell'elemento di combustibile di ALFRED.

È da notare, comunque, che tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

4.3.2.2 Test su SPND al ^{195}Pt

Le librerie di sezioni d'urto a disposizione della versione di MCNPX in uso non sono provviste di dati diversificati per gli isotopi del platino, quindi non è stato possibile effettuare uno studio di burn-up dettagliato come per il ^{59}Co . La libreria disponibile considera il solo platino in composizione isotopica naturale, di seguito indicato come ^{195}Pt .

Un SPND come definito nel paragrafo 4.1.1, alimentato con un volume sensibile di ^{195}Pt (che contiene ^{195}Pt nella misura del 33,8%) è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1, all'interno di TAPIRO. Le condizioni generali della prova sono riportate in Tabella 4.10. I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, sono riportati in Tabella 4.11.

Anche in questo caso, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E + 20 n/cm^2$, il consumo del materiale sensibile è esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1,1E - 3\%/anno$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, il SPND al ^{195}Pt presenterebbe una vita utile più corta di quella che corrisponderebbe al ^{59}Co , ma comunque più che longeva, rendendo ipotizzabile anche per esso un'installazione fissa all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

È da notare, comunque, che tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

4.3.3 Studio della sensibilità e della risposta dinamica

L'interesse verso i *Self Powered Neutron Detectors* per ambienti reattoristici nasce dall'idea di utilizzarli come strumentazione di controllo *in-core*, specie in quei reattori in sperimentazione (come i *Lead Fast Reactors*), le cui dinamiche non sono ancora ben conosciute e strumentazione di monitoraggio 'vicina' al processo di fissione si rende, pertanto, necessaria per questioni di studio e di sicurezza nelle operazioni condotte.

In altre parole, la strumentazione di monitoraggio e controllo del reattore deve essere 'pronta', il che tecnicamente si traduce nell'ottenere variazioni delle risposte elettriche riportanti informazioni sul flusso neutronico con ritardi inferiori ai 50 ms , rispetto all'istante di variazione nel flusso neutronico. Tipicamente, nel campo dei reattori veloci sono utilizzate, *in-core*, camere a fissione, ma la loro principale problematica risiede nell' "esaurimento" troppo rapido della sonda all'aumentare del flusso neutronico, sia per consumo del materiale sensibile che per accumulo di prodotti di fissione che costituiscono un disturbo significativo al segnale elettrico.

I SPND-pronti possono superare questo inconveniente, ma le loro caratteristiche dinamiche devono essere necessariamente testate in esperienze che dimostrino l'effettiva monitorabilità del flusso neutronico da parte di queste sonde. In passato, attività di ricerca sono state condotte sulle caratteristiche dinamiche di SPND-ritardati in flussi neutronici termici, epitermici e veloci [33] [34] [35] o SPND-pronti in flussi neutronici termici ed epitermici [36] [37] [38].

Difficilmente sono stati sperimentati, nel passato, SPND-pronti in flussi neutronici veloci, perché l'ottenimento da tali rivelatori di segnali elettrici statisticamente significativi richiede valori di flusso neutronico elevati ($> 10^{12}n/(cm^2 s)$), a causa degli andamenti delle sezioni d'urto di reazione. Considerando una trattazione generale, la corrente misurabile attraverso un rivelatore SPND-pronto può essere scomposta nei seguenti contributi:

- $I_{(n,\gamma)}$, corrente da reazioni (n, γ) ;
- $I_{fondo\ \gamma}$, corrente dal fondo gamma-pronto di reattore;
- I_{decay} , corrente da accumulo di prodotti di attivazione nel volume sensibile del rivelatore;
- I_{noise} , corrente dovuta al cavo o agli effetti ambientale (es. fenomeni di agitazione termica degli, accumulo di prodotti di fissione nel reattore, ecc).

$$I_{TOT} = I_{(n,\gamma)} + I_{fondo\ \gamma} + I_{decay} + I_{noise} \quad (4.8)$$

Di essi, il primo porta effettivamente informazioni circa il flusso neutronico, gli altri costituiscono degli effetti di disturbo, che possono essere caratterizzati preliminarmente così da poter scorporare dalla corrente integrale misurata dal SPND il segnale direttamente collegato alla grandezza finale oggetto della misura, ovvero il flusso neutronico. Esperienze circa la prontezza di risposta alle variazioni del flusso neutronico sono state condotte in precedenza, con risultati più che soddisfacenti [36] [38].

Di seguito è analizzato l'andamento della corrente totale, secondo l'equazione 4.8, per il SPND commerciale *Thermocoax Co-type*, nelle condizioni d'irraggiamento descritte nel paragrafo 4.3.1. Non risulta possibile effettuare sul rivelatore al ^{195}Pt l'analisi che include il contri-

buto alla corrente per decadimento radioattivo, per la mancanza di dati nella libreria dei dati nucleari, come detto in precedenza.

4.3.3.1 Test su SPND al ^{59}Co

Attraverso il modello di simulazione descritto nel paragrafo 4.3.1, è stato possibile effettuare delle prove dinamiche attraverso il codice MCNPX, ipotizzando che il flusso neutronico di TAPIRO, ed il conseguente campo gamma, sia pulsato secondo una certa dinamica. La prova intende verificare se il comportamento della corrente misurata in output al rivelatore segue la forzante neutronica.

Si è ipotizzato un impulso di sorgente della durata di 1 s, un repentino azzeramento, ed una seguente risalita: entrambe i contributi $I_{(n,\gamma)}$ e $I_{fondo\gamma}$ sono proporzionali al flusso neutronico di sorgente, quindi è ragionevole supporre che tali contributi seguiranno il medesimo andamento dei flussi neutronico e gamma. Per quanto concerne, invece, il contributo al segnale di corrente dovuto ai prodotti di reazione creatisi all'interno del volume sensibile, I_{decay} , è chiaro che tale valore dipende dalla storia d'irraggiamento della sonda, visto che l'accumulo di specie radioattive incrementa via via che aumenta la fluenza di esposizione della sonda. In particolare, per un SPND alimentato con ^{59}Co , l'isotopo radioattivo più significativo è il prodotto d'attivazione diretto, ovvero il ^{60}Co , come è evidente dallo studio di burn-up effettuato in precedenza.

Si considerano quindi due casi:

1. Sorgente pulsata e materiale sensibile della sonda "verGINE", ovvero attività di ^{60}Co nulla inizialmente

Come risulta evidente da Figura 4.14, la risposta della sonda segue la dinamica di variazione del flusso neutronico nel tempo, per cui si conferma la prontezza di risposta e di monitoraggio della grandezza d'interesse.

Nel caso particolare del canale diametrale di TAPIRO, la sonda risulta presentare le risposte al campo neutronico, $I_{(n,\gamma)}$, e al campo gamma, $I_{fondo\gamma}$, confrontabili tra loro.

Per quanto concerne la corrente dovuta al decadimento radioattivo del materiale sensibile della sonda, I_{decay} , nel caso della sonda vergine, è chiaro che tale contributo è nullo.

2. Sorgente pulsata e materiale sensibile della sonda già irraggiato, con attività iniziale di ^{60}Co corrispondente a 10 MBq (ovvero a ~ 5 mesi d'irraggiamento continuo in TAPIRO)

Com'è evidente da Figura 4.15, si conferma -come in precedenza- la prontezza di risposta e di monitoraggio della grandezza d'interesse. Anche in questo caso, le risposte al campo neutronico, $I_{(n,\gamma)}$, e al campo gamma $I_{fondo\gamma}$, confrontabili tra loro. Per quanto concerne la corrente dovuta al decadimento radioattivo del materiale sensibile della sonda, I_{decay} , nel caso della sonda contenente un'attività pari 10 MBq, esisterà un contributo di corrente "di fondo" che risulta costante poiché la dinamica di variazione dell'attività è molto più "lenta" della dinamica di variazione del flusso neutronico proposta. In altre parole, nell'arco di 3 secondi, l'attività di ^{60}Co contenuta nella sonda non varia e, quindi, neanche il contributo I_{decay} . È chiaro che all'aumentare della fluenza cui è esposta la sonda, tale contributo crescerà nel tempo, e sarà necessaria una compensazione a lungo termine che tenga conto del *burn-up* della sonda.

Considerando che, in ogni caso risulta necessario tarare periodicamente la strumentazione mediante misure assolute di flusso neutronico (a mezzo di attivazione indotta su campioni opportuni), è possibile, oltre che calcolare matematicamente il *burn-up* ed una seguente previsione, anche effettuare delle misure in vivo per monitorare questi effetti di disturbo a lungo termine.

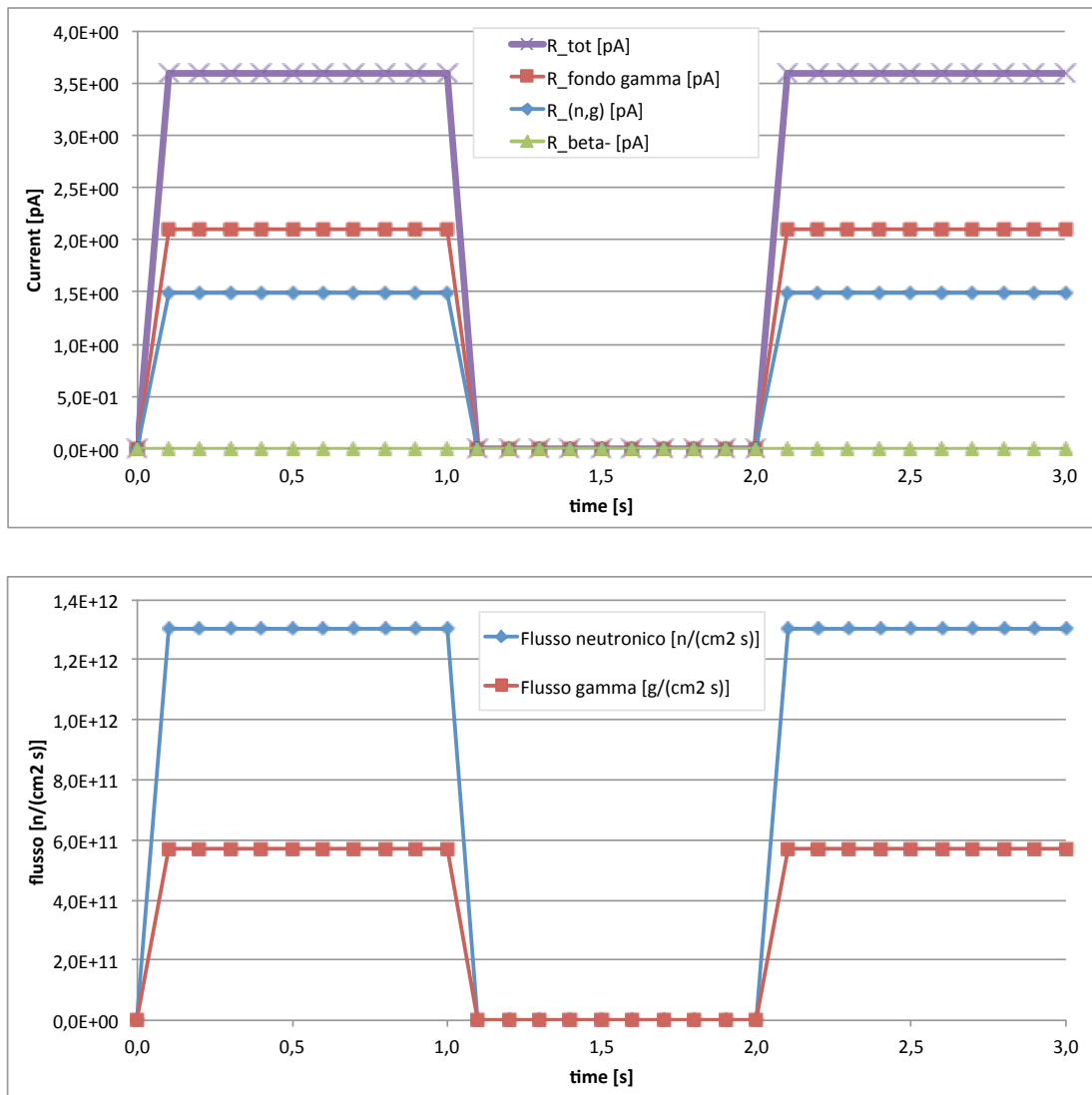


Figura 4.14: Risposta dinamica del SPND *Thermocoax Co-type* all'interno del canale diametrale di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda "vergine", ovvero attività iniziale di ^{60}Co nulla.

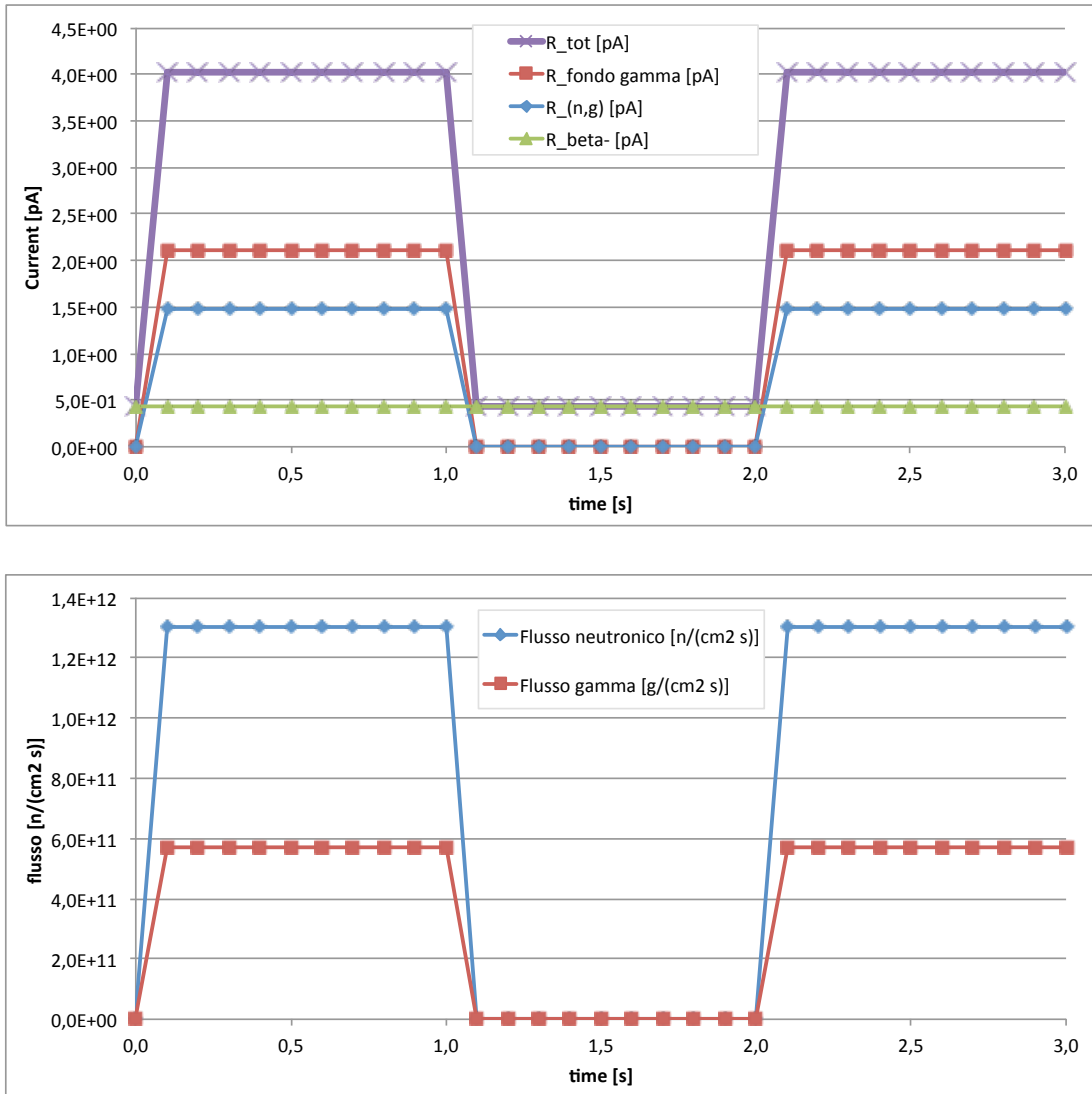


Figura 4.15: Risposta dinamica del SPND *Thermocoax Co-type* all'interno del canale di diametro di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda già irraggiata, con attività iniziale di ^{60}Co pari a 10 MBq (attività che si raggiungerebbe dopo cinque mesi di irraggiamento continuo a piena potenza in TAPIRO).

4.3.3.2 Test su SPND al ^{195}Pt

Attraverso il modello di simulazione descritto nel paragrafo 4.3.1, è stato possibile effettuare delle prove dinamiche attraverso il codice MCNPX, ipotizzando che il flusso neutronico di TAPIRO, ed il conseguente campo gamma, sia pulsato secondo una certa dinamica. La prova intende verificare se il comportamento della corrente misurata in output al rivelatore segue la forzante neutronica.

Si è ipotizzato un impulso di sorgente della durata di 1 s, un repentino azzeramento, ed una seguente risalita: entrambe i contributi $I_{(n,\gamma)}$ e $I_{fondo\gamma}$ sono proporzionali al flusso neutronico di sorgente, quindi è ragionevole supporre che tali contributi seguiranno il medesimo andamento dei flussi neutronico e gamma. Per quanto concerne, invece, il contributo al segnale di corrente dovuto ai prodotti di reazione creatisi all'interno del volume sensibile, I_{decay} , è chiaro che tale valore dipende dalla storia d'irraggiamento della sonda, visto che l'accumulo di specie radioattive incrementa via via che aumenta la fluenza di esposizione della sonda.

Per quanto riguarda il SPND al ^{195}Pt , non è possibile tenere in considerazione tale contributo per la mancanza in libreria di dati circa le sezioni d'urto isotopo per isotopo. Si ricorda, difatti, che i risultati presentati di seguito riguardano un emettitore di ^{190}Pt , ovvero platino in composizione isotopica naturale.

1. Sorgente pulsata e materiale sensibile della sonda "vergine"

Come risulta evidente da Figura 4.16, la risposta della sonda segue la dinamica di variazione del flusso neutronico nel tempo, per cui si conferma la prontezza di risposta e di monitoraggio della grandezza d'interesse.

Nel caso particolare del canale diametrale di TAPIRO, la sonda risulta presentare la risposta al campo gamma $I_{fondo\gamma}$, più significativa della risposta neutronica $I_{(n,\gamma)}$, con un fattore circa 10 tra i due contributi. Tale risultato era atteso, essendo già verificato sperimentalmente in [37] [38].

La maggiore sensibilità di tale sonda al campo gamma di reattore può essere superata mediante compensazione in tempo reale, quindi sottraendo un segnale di corrente prodotto da una sonda con emettitore simile al platino e sensibile al "solo" campo gamma, oppure mediante correzioni matematiche. Come detto, in questo caso non è possibile calcolare il contributo d'attivazione I_{decay} , che va comunque tenuto in considerazione e trattato come proposto precedentemente.

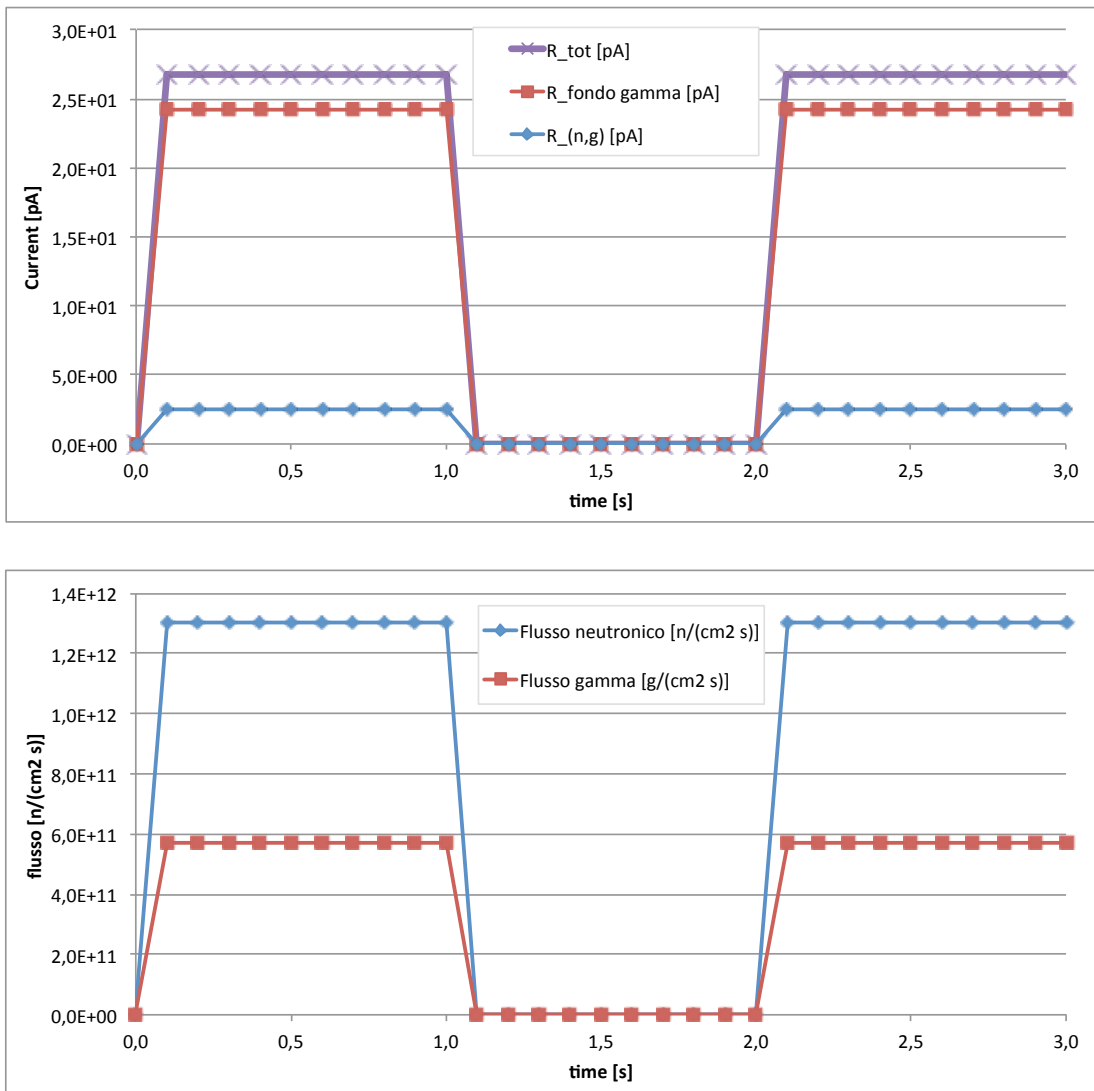


Figura 4.16: Risposta dinamica del SPND *Thermocoax Pt-type* alimentato con ¹⁹⁰Pt (platino in composizione isotopica naturale) all'interno del canale diametrico di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda "vergine".

4.4 Studio delle risposte di rivelatori SPND-pronti, alimentati con materiali innovativi, attraverso il codice MCNPX

Nel presente paragrafo è analizzato il comportamento di alcuni isotopi alternativi come materiali sensibili applicabili alla tecnologia degli SPND-pronti.

4.4.1 Studio di burn-up

Si riporta di seguito lo studio di *burn-up* degli SPND pronti, provvisti di materiali sensibili diversi da quelli che più frequentemente si trovano in uso presso i costruttori di tali strumenti.

La motivazioni principali che spingono allo studio del burn-up del materiale sensibile si riassumono:

- nella valutazione del rateo di consumo e del consumo effettivo del materiale sensibile in determinate condizioni d'irraggiamento, che -a lungo andare- comportano variazioni nella sensibilità dello strumento, fino alla necessità di sua sostituzione;
- nella modificazione attesa nella risposta elettrica dello strumento a causa dei disturbi innescati dalla creazione, all'interno del volume sensibile di specie radioattive, inizialmente per attivazione neutronica, e poi per decadimento radioattivo delle specie prodotte.

Entrambi gli aspetti possono comportare esigenze di sostituzione dello strumento, nel lungo termine, identificando -quindi- un intervallo di vita utile della sonda.

Si precisa che, non avendo a disposizione tutte le librerie delle sezioni d'urto alla temperature $600 \div 900 K$, si è deciso di utilizzare le sezioni d'urto a $T = 293 K$, presenti per tutti i nuclidi, al fine di fornire dei dati e dei risultati omogenei e confrontabili tra loro, senza comunque perdere di significatività. L'intera procedura, con dati di partenza più completi, potrà essere ripetuta anche con librerie più appropriate, appena disponibili.

Come in precedenza, si vedrà che le principali reazioni indotte da neutroni sui materiali sensibili sono, nell'ordine d'importanza:

- reazioni (n, γ) ;
- reazioni (n, p) ;
- reazioni (n, α) ;
- reazioni $(n, 2n)$;
- reazioni $(n, 3n)$.

Di esse, le prime tre mettono in moto, indirettamente o direttamente, particelle cariche, potendo contribuire in maniera significativa alla transizione di elettroni dall'emettitore al collettore. Le ultime due categorie di reazione, hanno capacità di produrre segnale solo per conseguente diseccitazione del nucleo, se esso viene lasciato, dal neutrone incidente, in uno stato metastabile a corta vita.

Dalla simulazione, si evince -generalmente- che i ratei di reazione più significativi riguardano solo le prime due categorie.

4.4.1.1 Test su SPND al ^{177}Hf

Un SPND come definito nel paragrafo 4.1.1, alimentato con un volume sensibile di ^{177}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale, è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1, all'interno di TAPIRO. Le condizioni generali della prova sono riportate in Tabella 4.12.

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, sono riportati in Tabella 4.13.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano gli isotopi maggiormente presenti, ovvero quelli in composizione isotopica naturale dell'afnio, essendo quantitativamente predominanti. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 4.13 sono prodotti di attivazione e successivo decadimento, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi. Inoltre, le reazioni di cattura radiativa sugli isotopi ^{176}Hf , ^{177}Hf , ^{178}Hf e ^{179}Hf , producono isotopi stabili dello stesso materiale sensibile, il che "auto fertilizza" la sonda, allungandone la vita utile. Si riportano, nel grafico in Figura 4.17, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per attivazione neutronica e successivo decadimento.

Come risulta evidente da Tabella 4.12, Tabella 4.13 e Figura 4.17, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E+20 \text{ n}/(\text{cm}^2)$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 3,6E - 4\%/anno$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{177}Hf presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un'installazione fissa dello strumento all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

È da notare, comunque, che tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

Carica iniziale di ^{180}Hf [g]	3,7830000E-01
Carica finale di ^{180}Hf [g]	3,7828625E-01
Carica finale di ^{181}Ta [g]	1,3751224E-05
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1,30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4,10E+20
Burn-up medio [%/mese]	3,03E-05

Tabella 4.12: Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard*, alimentato con ^{180}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale. È preso a riferimento, in questo caso, l'isotopo maggiormente occorrente, il ^{180}Hf .

	Ratei di reazione [reazioni/s]			
	(n, γ)	$(n, 2n)$	(n, α)	(n, p)
^{174}Lu	2,86E+02 ($\pm 0,4\%$)	2,93E+00 ($\pm 6,7\%$)	9,8E-05 ($\pm 45,2\%$)	3,21E-01 ($\pm 0,5\%$)
^{176}Lu	1,02E+00 ($\pm 0,4\%$)	2,61E-02 ($\pm 3,9\%$)	2,5E-07 ($\pm 45,2\%$)	8,24E-04 ($\pm 0,5\%$)
^{176}Hf	6,48E+07 ($\pm 0,4\%$)	1,50E+06 ($\pm 6,8\%$)	-	1,86E+03 ($\pm 15\%$)
^{177}Hf	5,26E+08 ($\pm 1,1\%$)	1,83E+07 ($\pm 4,0\%$)	-	3,72E+03 ($\pm 13\%$)
^{178}Hf	2,33E+08 ($\pm 0,4\%$)	1,19E+07 ($\pm 5,7\%$)	-	1,61E+03 ($\pm 28\%$)
^{179}Hf	2,54E+08 ($\pm 0,4\%$)	1,95E+07 ($\pm 3,2\%$)	-	3,83E+02 ($\pm 24\%$)
^{180}Hf	1,44E+08 ($\pm 0,4\%$)	1,48E+07 ($\pm 6,0\%$)	-	4,26E+02 ($\pm 41\%$)
^{181}Ta	1,77E+04 ($\pm 0,5\%$)	3,38E+02 ($\pm 6,5\%$)	-	4,87E+00 ($\pm 0,6\%$)
^{182}Ta	9,07E-02 ($\pm 0,6\%$)	4,73E-03 ($\pm 3,8\%$)	1,1E-07 ($\pm 35,7\%$)	-
^{182}W	4,36E-01 ($\pm 1,5\%$)	9,21E-03 ($\pm 7,7\%$)	5,2E-07 ($\pm 51,9\%$)	1,24E-06 ($\pm 39\%$)
^{183}W	8,85E-06 ($\pm 0,7\%$)	7,79E-07 ($\pm 3,7\%$)	1,0E-11 ($\pm 51,9\%$)	2,73E-11 ($\pm 33\%$)
^{184}W	4,83E-11 ($\pm 0,7\%$)	3,17E-12 ($\pm 5,9\%$)	5,6E-17 ($\pm 51,9\%$)	1,51E-16 ($\pm 45\%$)

Tabella 4.13: Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{180}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale.

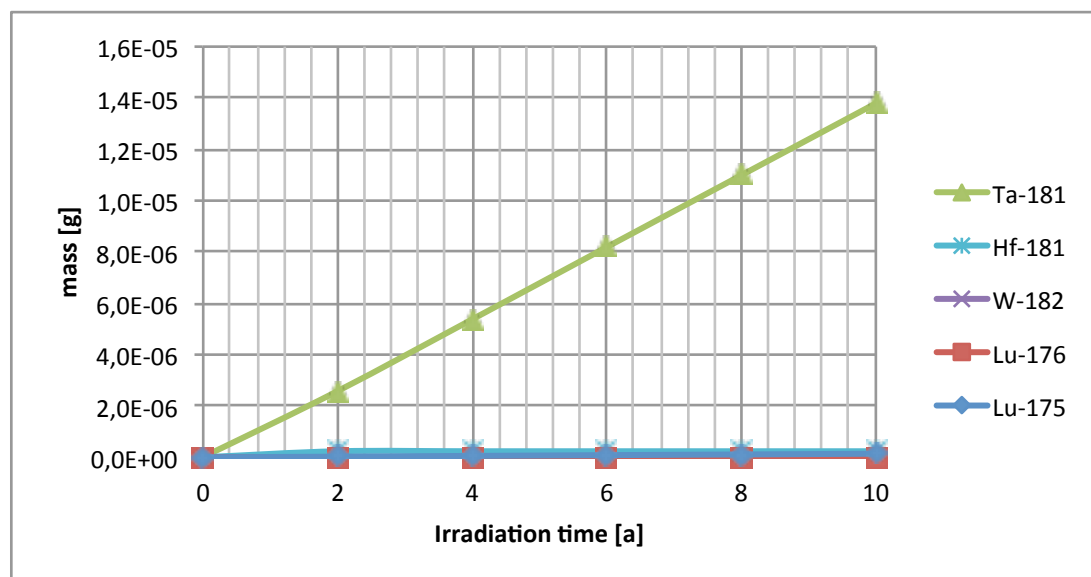


Figura 4.17: Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{180}Hf . Come risulta evidente, anche per valori di fluenza nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile. Inoltre, l'unico isotopo maggiormente significativo è il ^{181}Ta , che risulta stabile.

4.4.1.2 Test su SPND al ^{63}Cu

Un SPND come definito nel paragrafo 4.1.1, alimentato con un volume sensibile di ^{63}Cu è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1, all'interno di TAPIRO. Le condizioni generali della prova sono riportate in Tabella 4.14.

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, sono riportati in Tabella 4.15.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ^{63}Cu , isotopo principale del volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 4.15 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi.

Si riportano, nel grafico in Figura 4.18, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per attivazione neutronica e successivo decadimento.

Come risulta evidente da Tabella 4.14, Tabella 4.15 e Figura 4.18, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E+20\text{ n}/(\text{cm}^2)$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1,3E - 4\%/anno$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{63}Cu presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un'installazione fissa dello strumento all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

Carica iniziale di ^{63}Cu [g]	7,17300000E-01
Carica finale di ^{63}Cu [g]	7,17290911E-01
Carica finale di ^{64}Ni [g]	9,08884771E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1,30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4,10E+20
Burn-up medio [%/mese]	1,06E-05

Tabella 4.14: Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard*, alimentato con ^{63}Cu .

	Ratei di reazione [reazioni/s]			
	(n, γ)	(n, 2n)	(n, α)	(n, p)
^{59}Co	1,38E+00 ($\pm 1,4\%$)	2,48E-02 ($\pm 20\%$)	1,57E-02 ($\pm 3,7\%$)	1,35E-01 ($\pm 1,5\%$)
^{60}Ni	1,61E+01 ($\pm 2,5\%$)	1,09E-01 ($\pm 31\%$)	2,08E+00 ($\pm 2,2\%$)	2,44E+00 ($\pm 2,4\%$)
^{61}Ni	1,12E-02 ($\pm 1,8\%$)	7,11E-04 ($\pm 8,7\%$)	1,48E-03 ($\pm 1,2\%$)	1,81E-03 ($\pm 1,5\%$)
^{62}Ni	4,05E+01 ($\pm 0,4\%$)	5,70E-01 ($\pm 21\%$)	1,14E-01 ($\pm 4,5\%$)	8,44E-02 ($\pm 7,7\%$)
^{64}Ni	7,34E+02 ($\pm 0,5\%$)	4,50E+01 ($\pm 14\%$)	7,95E-01 ($\pm 7,0\%$)	1,03E-01 ($\pm 26\%$)
^{63}Cu	2,64E+08 ($\pm 0,7\%$)	1,23E+06 ($\pm 28\%$)	4,81E+06 ($\pm 2,5\%$)	1,83E+08 ($\pm 0,7\%$)
^{65}Cu	6,75E-03 ($\pm 0,8\%$)	1,67E-04 ($\pm 17\%$)	5,80E-06 ($\pm 6,7\%$)	2,10E-04 ($\pm 1,5\%$)

Tabella 4.15: Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{63}Cu .

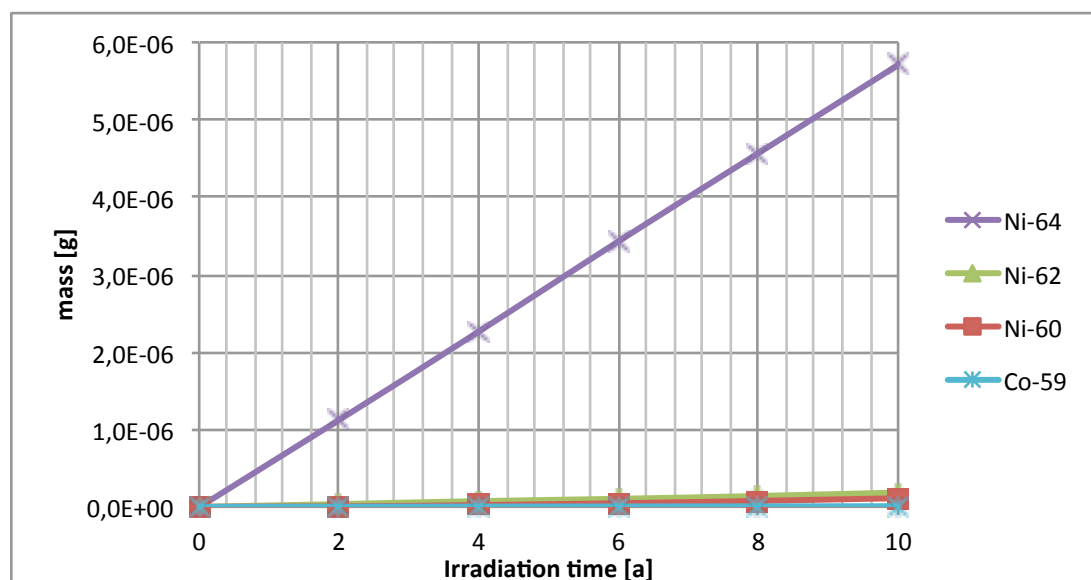


Figura 4.18: Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{63}Cu . Come risulta evidente, anche per valori di fluenza nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è il ^{64}Ni , che risulta stabile.

4.4.1.3 Test su SPND al ^{115}In

Un SPND come definito nel paragrafo 4.1.1, alimentato con un volume sensibile di ^{115}In è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1, all'interno di TAPIRO. Le condizioni generali della prova sono riportate in Tabella 4.16.

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, sono riportati in Tabella 4.17.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ^{115}In , isotopo principale del volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 4.17 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi.

Si riportano, nel grafico in Figura 4.19, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per attivazione neutronica e successivo decadimento.

Come risulta evidente da Tabella 4.16, Tabella 4.17 e Figura 4.19, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E+20\text{ n}/(\text{cm}^2)$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1,8E - 3\%/anno$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{115}In presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un'installazione fissa dello strumento all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

Carica iniziale di ^{115}In [g]	5,857000E-01
Carica finale di ^{115}In [g]	5,855946E-01
Carica finale di ^{116}Sn [g]	1,054452E-04
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1,30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4,10E+20
Burn-up medio [%/mese]	1,50E-04

Tabella 4.16: Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard*, alimentato con ^{115}In .

	Ratei di reazione [reazioni/s]			
	(n, γ)	($n, 2n$)	(n, α)	(n, p)
^{112}Cd	4,35E-01 ($\pm 0,4\%$)	2,04E-03 ($\pm 14\%$)	1,66E-06 ($\pm 13\%$)	1,63E-05 ($\pm 15\%$)
^{113}Cd	9,90E-02 ($\pm 0,4\%$)	2,49E-03 ($\pm 4,9\%$)	1,06E-06 ($\pm 5,7\%$)	2,94E-06 ($\pm 8,2\%$)
^{114}Cd	1,73E+01 ($\pm 1,3\%$)	2,01E-01 ($\pm 13\%$)	2,67E-05 ($\pm 19\%$)	2,03E-04 ($\pm 20\%$)
^{116}Cd	2,15E-06 ($\pm 0,6\%$)	6,55E-08 ($\pm 11\%$)	1,43E-12 ($\pm 30\%$)	1,66E-11 ($\pm 29\%$)
^{115}In	1,69E+09 ($\pm 0,4\%$)	4,23E+06 ($\pm 13\%$)	6,16E+03 ($\pm 9,6\%$)	3,31E+04 ($\pm 7,4\%$)
^{115}Sn	3,82E+03 ($\pm 0,5\%$)	6,12E+01 ($\pm 7,2\%$)	5,20E-01 ($\pm 1,5\%$)	8,85E-01 ($\pm 4,3\%$)
^{116}Sn	9,17E+04 ($\pm 0,5\%$)	7,07E+02 ($\pm 14\%$)	2,46E+00 ($\pm 8,2\%$)	8,39E+00 ($\pm 12\%$)
^{117}Sn	1,98E+00 ($\pm 0,5\%$)	1,03E-01 ($\pm 5,3\%$)	5,09E-05 ($\pm 4,7\%$)	1,34E-04 ($\pm 9,4\%$)
^{118}Sn	9,61E-06 ($\pm 0,8\%$)	1,49E-07 ($\pm 13\%$)	3,68E-11 ($\pm 21\%$)	3,17E-10 ($\pm 19\%$)

Tabella 4.17: Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{115}In .

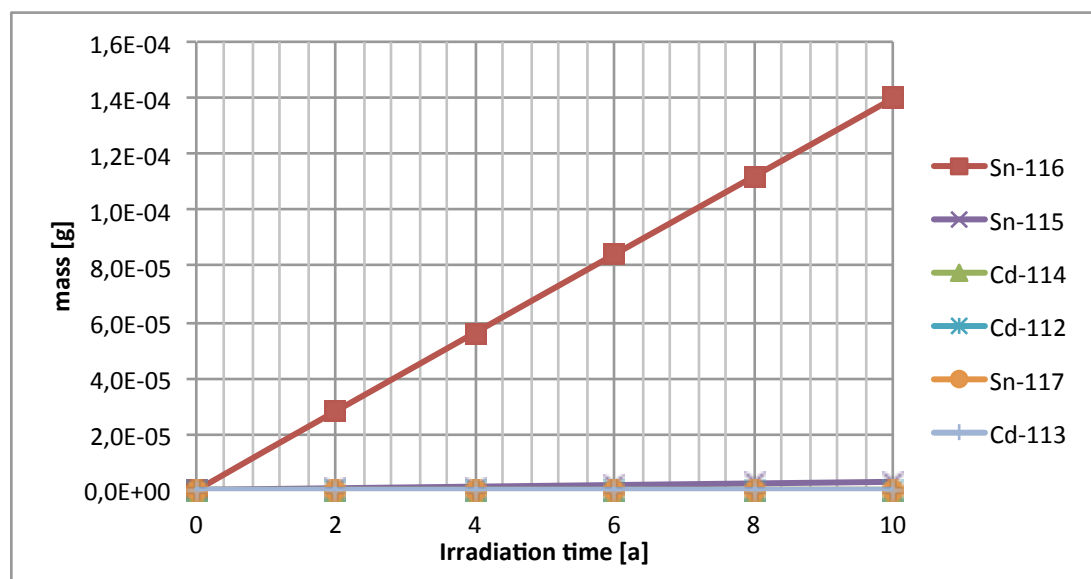


Figura 4.19: Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{115}In . Come risulta evidente, anche per valori di fluenza nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è lo ^{116}Sn , diretto prodotto di attivazione del ^{115}In , che risulta stabile.

4.4.1.4 Test su SPND al ^{209}Bi

Un SPND come definito nel paragrafo 4.1.1, alimentato con un volume sensibile di ^{209}Bi è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1, all'interno di TAPIRO. Le condizioni generali della prova sono riportate in Tabella 4.18.

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, sono riportati in Tabella 4.19.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ^{209}Bi , isotopo principale del volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 4.19 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi.

Si riportano, nel grafico in Figura 4.20, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per attivazione neutronica e successivo decadimento.

Come risulta evidente da Tabella 4.18, Tabella 4.19 e Figura 4.20, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E+20\text{ n}/(\text{cm}^2)$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 4,5E - 5\%/anno$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{209}Bi presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un'installazione fissa dello strumento all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

Carica iniziale di ^{209}Bi [g]	7,847000E-01
Carica finale di ^{209}Bi [g]	7,846965E-01
Carica finale di ^{206}Pb [g]	1,084000E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1,30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4,10E+20
Burn-up medio [%/mese]	3,73E-06

Tabella 4.18: Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard*, alimentato con ^{209}Bi .

	Ratei di reazione [reazioni/s]				
	(n, γ)	$(n, 2n)$	$(n, 3n)$	(n, α)	(n, p)
^{206}Pb	3,64E+01 ($\pm 2,6\%$)	1,32E+01 ($\pm 8,2\%$)	8,86E-03 ($\pm 71\%$)	2,25E-03 ($\pm 7,1\%$)	8,37E-03 ($\pm 20\%$)
^{207}Pb	5,83E-03 ($\pm 1,3\%$)	7,44E-03 ($\pm 5,6\%$)	5,68E-06 ($\pm 70\%$)	8,76E-07 ($\pm 7,3\%$)	1,83E-06 ($\pm 21\%$)
^{208}Pb	2,59E-03 ($\pm 3,9\%$)	6,56E-03 ($\pm 7,0\%$)	8,10E-06 ($\pm 70\%$)	1,21E-06 ($\pm 8,7\%$)	1,61E-07 ($\pm 44\%$)
^{209}Bi	1,61E+07 ($\pm 0,5\%$)	1,60E+07 ($\pm 6,6\%$)	2,30E+04 ($\pm 69\%$)	2,14E+04 ($\pm 1,0\%$)	1,52E+04 ($\pm 2,7\%$)

Tabella 4.19: Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{209}Bi .

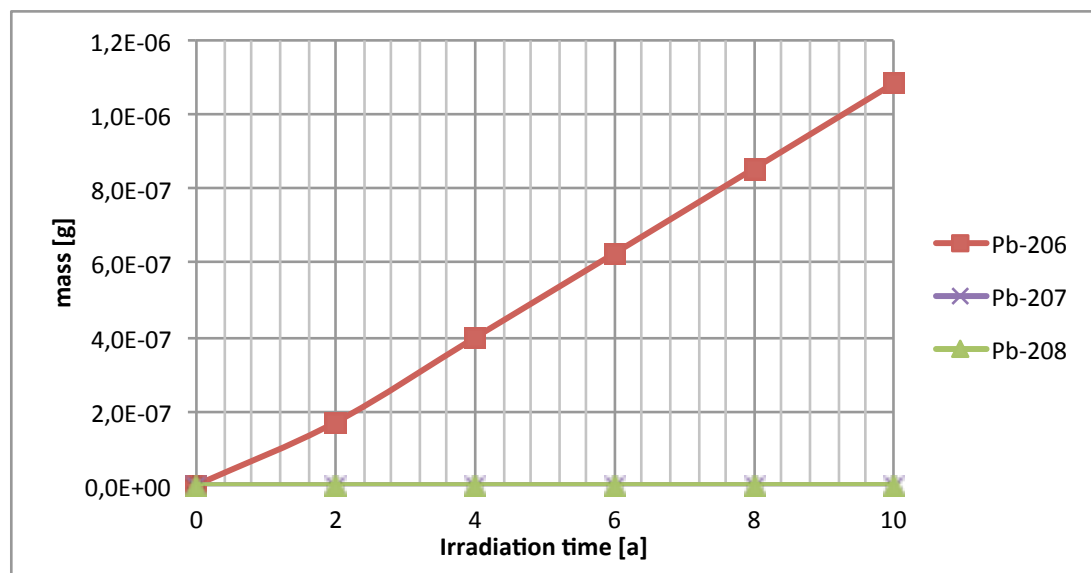


Figura 4.20: Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{209}Bi . Come risulta evidente, anche per valori di fluenza nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è lo ^{206}Pb , principale prodotto della catena di decadimento del ^{210}Bi prodotto per attivazione del ^{209}Bi , che risulta stabile.

4.4.1.5 Test su SPND al ^{150}Gd

Un SPND come definito nel paragrafo 4.1.1, alimentato con un volume sensibile di ^{150}Gd , ovvero gadolinio in composizione isotopica naturale, è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1, all'interno di TAPIRO. Le condizioni generali della prova sono riportate in Tabella 4.20.

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, sono riportati in Tabella 4.21.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano i soli isotopi del gadolinio, presenti dal principio nel volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti e non riportati in Tabella 4.21 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, quindi è ragionevole supporre quantitativi di ordini di grandezza inferiori. Il maggiore accumulo riguarda il ^{159}Tb , come riportato nel grafico in Figura 4.21 con le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per attivazione neutronica e successivo decadimento.

Come risulta evidente da Tabella 4.20, Tabella 4.21 e Figura 4.21, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E + 20 \text{ n}/(\text{cm}^2)$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1,3E - 3\%/anno$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{150}Gd presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un'installazione fissa dello strumento all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

4.4.2 Studio della sensitività e della risposta dinamica

Per motivi di brevità non si riportano dati e grafici relativi alla risposta dinamica di SPND alimentati con ^{63}Cu , ^{150}Hf , ^{115}In , ^{209}Bi e ^{150}Gd essendo i comportamenti confrontabili e sovrapponibili con quanto già riportato per ^{59}Co e ^{190}Pt .

Carica iniziale di ^{150}Gd [g]	5,158867E-01
Carica finale di ^{150}Gd [g]	5,158206E-01
Carica finale di ^{159}Tb [g]	8,647000E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1,30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4,10E+20
Burn-up medio [%/mese]	1,07E-04

Tabella 4.20: Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard*, alimentato con ^{150}Gd .

	Ratei di reazione [reazioni/s]				
	(n, γ)	$(n, 2n)$	$(n, 3n)$	(n, α)	(n, p)
^{152}Gd	3,72E+06 ($\pm 0,3\%$)	9,39E+03 ($\pm 11\%$)	9,95E+00 ($\pm 74\%$)	6,31E+02 ($\pm 0,5\%$)	1,72E+01 ($\pm 10\%$)
^{154}Gd	2,87E+07 ($\pm 0,8\%$)	8,85E+04 ($\pm 12\%$)	2,88E+01 ($\pm 85\%$)	1,50E+02 ($\pm 5,4\%$)	1,01E+02 ($\pm 13\%$)
^{155}Gd	2,99E+08 ($\pm 0,5\%$)	2,76E+06 ($\pm 5,4\%$)	1,27E+03 ($\pm 73\%$)	9,50E+02 ($\pm 4,8\%$)	1,24E+03 ($\pm 8,8\%$)
^{156}Gd	1,67E+08 ($\pm 4,3\%$)	1,11E+06 ($\pm 11\%$)	2,13E+03 ($\pm 73\%$)	5,98E+02 ($\pm 17\%$)	5,56E+02 ($\pm 18\%$)
^{157}Gd	1,63E+08 ($\pm 0,5\%$)	3,77E+06 ($\pm 5,0\%$)	1,27E+03 ($\pm 73\%$)	3,78E+02 ($\pm 10\%$)	5,89E+02 ($\pm 17\%$)
^{158}Gd	9,90E+07 ($\pm 0,9\%$)	2,14E+06 ($\pm 9,0\%$)	1,85E+03 ($\pm 74\%$)	4,17E+02 ($\pm 19\%$)	3,34E+02 ($\pm 27\%$)
^{160}Gd	3,53E+07 ($\pm 0,6\%$)	3,03E+06 ($\pm 7,2\%$)	7,39E+03 ($\pm 69\%$)	2,03E+02 ($\pm 28\%$)	1,32E+02 ($\pm 31\%$)

Tabella 4.21: Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{150}Gd .

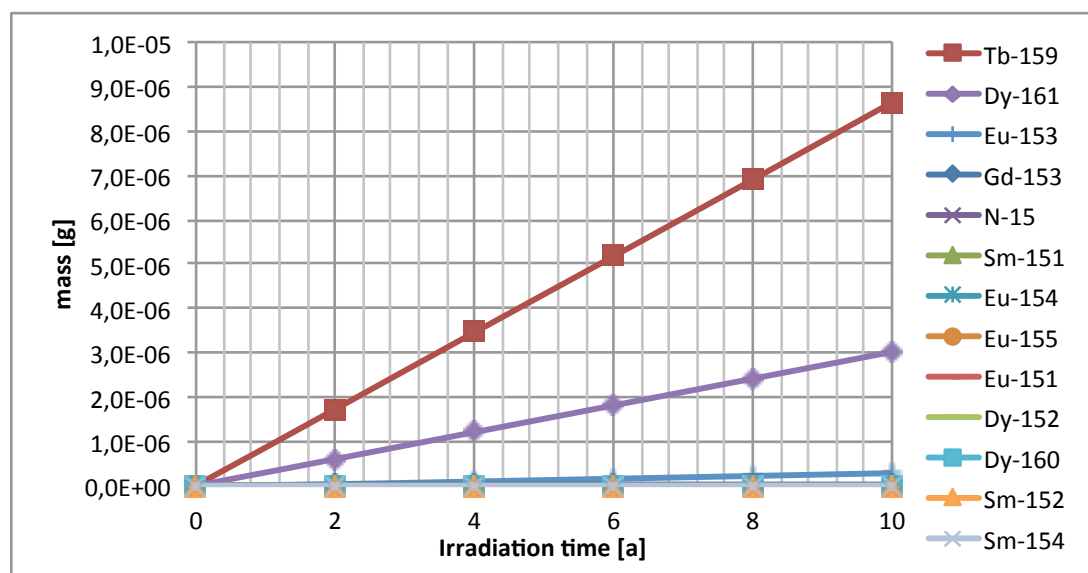


Figura 4.21: Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND *Thermocoax standard* alimentato con ^{150}Gd . Come risulta evidente, anche per valori di fluenza nell'ordine di $4E + 20 n/(cm^2)$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è il ^{159}Tb , derivante dal principale prodotto di attivazione ^{159}Gd .

Capitolo 5

Proposta di sviluppo di una sonda basata su SPND-pronti per misure di magnitudo e spettro energetico di flussi neutronici veloci

Tradizionalmente, i rivelatori per neutroni utilizzati in reattoristica, radiodosimetria e ricerca rientrano nella categoria dei *contatori* di radiazione, ovvero sono in grado di stabilire un flusso o una fluenza di particelle in un dato punto senza, tuttavia, riuscire a discriminare la qualità energetica. Come evidenziato in precedenza, una variazione d'entità del flusso neutronico è derivabile dalla misura in campo della sonda solo nell'ipotesi che non si modifichi lo spettro energetico della radiazione monitorata.

Se, a priori, è ipotizzabile -in una data applicazione- una variabilità dello spettro neutronico in termini energetici, la misura in campo della sonda non è più sufficiente a fornire informazioni attendibili circa il flusso di particelle monitorato.

Per superare tale limitazione, è plausibile che -nel punto d'interesse- si esponano al medesimo flusso diversi materiali sensibili: avendo ciascuno una propria "*curva di risposta*", identificabile con la sensibilità in funzione dell'energia, dalla misura di diverse risposte risulta possibile inferire la qualità energetica dello spettro che le ha generate mediante tecniche di deconvoluzione definite, in questo specifico campo, *tecniche di unfolding*.

Nel presente capitolo si mostrano le caratteristiche spettrali dei materiali sensibili utilizzati in questo studio, proponendo -infine- il layout di una sonda che sia in grado di applicare operativamente una tecnica di deconvoluzione spettrale, fornendo misure locali di flusso neutronico più affidabili rispetto ai tradizionali rivelatori per neutroni.

5.1 Studio delle caratteristiche spettrali dei materiali sensibili per SPND-pronti identificati in questo studio

Notoriamente, i *Self Powered Neutron Detectors* producono in output solo segnali di corrente, rivelando tali sonde solo ratei di reazione e non informazioni energetiche circa le particelle che innescano le reazioni dette.

Come per la maggior parte dei rivelatori per neutroni, quindi, non risulta -a priori- possibile effettuare una discriminazione energetica delle particelle rivelate misurando operativamente uno spettro direttamente con lo strumento. L'utilizzazione di tali rivelatori è possibile previa taratura con misure assolute di flusso neutronico, e nell'ipotesi che -una volta effettuata la taratura- la qualità energetica dello spettro monitorato non cambi.

L'informazione energetica circa i neutroni che innescano le reazioni cui risulta sensibile il rivelatore è racchiusa nelle sezioni d'urto di reazione, che associano a ciascuna energia del neutrone incidente, un valore di probabilità d'innescò di una specifica reazione o di una serie di reazioni. Avendosi, quindi, il rateo di reazione, R ,

$$R = N \cdot V \cdot \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma_c(E) dE [=] \left[\frac{\text{reazioni}}{s} \right] \quad (5.1)$$

dove:

N è la densità atomica del materiale emettitore;

V è il volume del materiale emettitore;

$\varphi(E)$ è il flusso neutronico locale;

$\sigma_c(E)$ è la sezione d'urto di cattura del materiale emettitore;

esplicitando il flusso neutronico come $\varphi(E) = |p| \cdot \psi(E)$, con $\int_0^{\infty} \psi(E) dE = 1$, si può riscrivere

$$R = N \cdot V \cdot |p| \cdot \int_0^{\infty} \psi(E) \sigma_c(E) dE [=] \left[\frac{\text{reazioni}}{s} \right] \quad (5.2)$$

da cui risulta evidente che a parità di entità del flusso neutronico, $|p| = \text{cost}$, una variazione di R è lecita anche per variazioni del solo spettro neutronico $\psi(E)$.

Considerando che i SPND sono operati in *current mode*, la risposta in corrente misurata I_{TOT} risulta

$$I_{TOT} \propto R = N \cdot V \cdot |p| \cdot \int_0^{\infty} \psi(E) \sigma_c(E) dE \quad (5.3)$$

e la "porzione d'interesse" (dall'eq. 4.8) può essere riscritta nella forma più semplice

$$I_{(n,\gamma)} = C \cdot \int_0^{\infty} \varphi(E) S(E) dE \quad (5.4)$$

dove:

$C = I_{(n,\gamma)}/I_{TOT}$ è la frazione della corrente misurata direttamente imputabile al solo flusso neutronico (dall'eq. 4.8);

$\varphi(E) [=] \left[n/(cm^2 s) \right]$ è il flusso neutronico locale;

$S(E) [=] \left[\frac{pA}{n/(cm^2 s)} \right]$ è la sensitività della sonda in funzione dell'energia del neutrone incidente.

La formulazione semplificata 5.4 risulta perfettamente equivalente alla formulazione 5.3, e lascia chiaramente intendere che la misura rivelata dalla sonda SPND è direttamente collegata alla grandezza che s'intende misurare, $\varphi(E)$, a mezzo della sensitività spettrale del materiale sensibile $S(E)$, parametro che può essere caratterizzato a priori, perché caratteristica specifica dello strumento. È evidente, quindi, che il valor misurato di corrente porta informazioni anche dello spettro neutronico che lo ha prodotto.

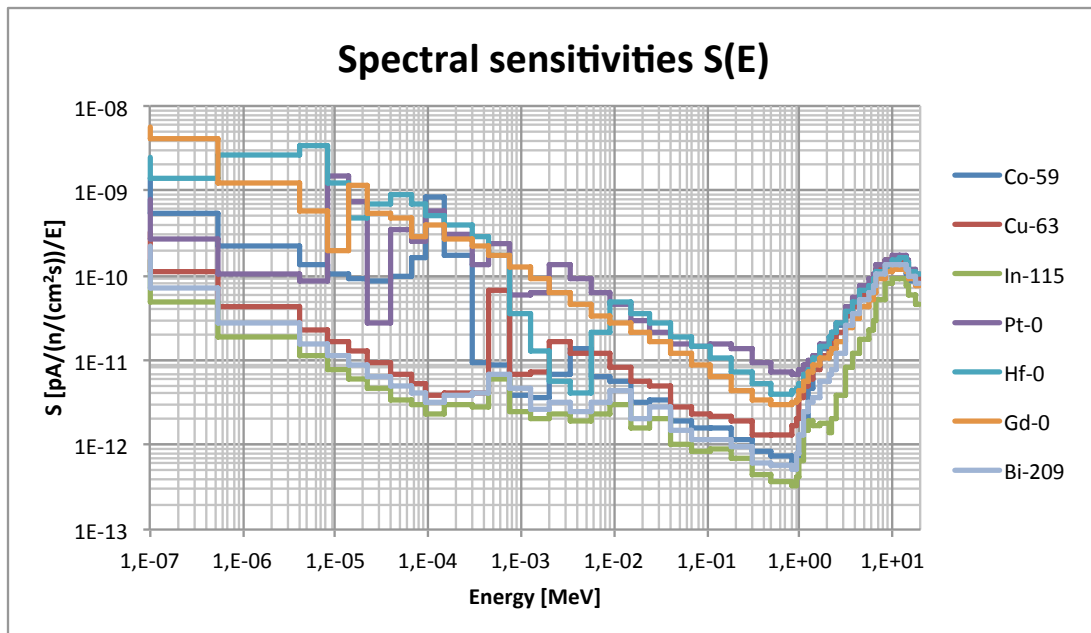


Figura 5.1: Sensività spettrali delle sonde SPND secondo il modello geometrico esplicitato nel paragrafo 4.1.1, alimentate con i diversi materiali sensibili analizzati nel corso di questo studio.

Questa caratteristica, se opportunamente sfruttata, può dar luogo alla possibilità -attraverso le sensibilità spettrali caratteristiche di diversi materiali sensibili esposti al medesimo flusso neutronico- di ricostruire il flusso neutronico da misure combinate con diversi SPND, applicando una *deconvoluzione*. La formulazione teorica sarà spiegata nel paragrafo seguente.

La ricostruzione spettrale appena suggerita necessita che siano caratterizzate preliminarmente le sensibilità spettrali, $S(E)$, che -come detto- sono caratteristiche specifiche degli strumenti. Sfruttando il modello del rivelatore descritto nel paragrafo 4.1.1, e la suddivisione del range energetico suggerita in Tabella 2.5, mediante il codice MCNPX sono state ricavate le caratteristiche dette, che sono riportate graficamente in Figura 5.1.

Ogni materiale ha richiesto 49 simulazioni, una per finestra energetica, con una spesa computazionale per singola simulazione di $\sim 15 \div 20 h \cdot core$, per un totale complessivo di $\sim 6000 h \cdot core$.

Risulta evidente che:

- al fine di poter ottenere dei valori di corrente significativi in output ai SPND, sono necessari flussi neutronici di entità notevoli $> 10^{11} \div 10^{12} n/(cm^2 s)$, a seconda delle fasce energetiche monitorate;
- seguendo gli andamenti delle sensibilità spettrali, ciascun materiale emettitore risulta sensibile in maniera differenziale in alcune finestre energetiche piuttosto che in altre, il che equivarrebbe a dire che potrebbe seguirne un'ottimizzazione delle coppie *finestre energetiche-materiali*, utile a ricostruire lo spettro d'irraggiamento.

5.2 Idea concettuale di una sonda spettrometrica basata su SPND, mediante tecniche di *unfolding*

La deconvoluzione degli spettri neutronici, definita anche come *unfolding spettrale*, nasce in risposta alla necessità di superare -mediante un processo matematico- gli inconvenienti legati alla scarsa risoluzione energetica delle tecnologie in uso per realizzare la spettrometria neutronica.

Le energie dei neutroni sono rilevabili sperimentalmente mediante l'impiego di *Sfere di Bonner, fogli ad attivazione, scintillatori liquidi e solidi, rivelatori al diamante*, che producono spettri d'interpretazione più o meno complessa. Facendo un'analogia con la spettrometria gamma, lo stato dell'arte dei rivelatori fisici per neutroni produce degli spettri simili ad una sorgente gamma multi-picco (es. ^{152}Eu) vista con uno scintillatore inorganico basato su NaI(Tl), ove picchi contigui crescono "sporcandosi" l'uno con l'altro, rendendo la determinazione dell'area netta del picco d'interesse ricavabile solo per procedure di deconvoluzione matematica. Le tecniche di *unfolding spettrale* risolvono la medesima questione nei problemi con neutroni.

L'odierno sforzo di perfezionamento di tali tecniche è dovuto al recente sviluppo di sistemi hardware che siano in grado di collegare l'impulso di tensione rivelato all'energia del neutrone incidente, rendendo quindi disponibile una base spettrale di dati di partenza su cui poter lavorare. Lo stato dell'arte delle tecniche più attuali può trovarsi in [39] [40] [41].

Il problema che ci si pone di affrontare qui, tuttavia differisce dai precedenti approcci che presuppongono comunque che dal rivelatore emerga, attraverso un sistema multicanale -anche se in maniera poco raffinata-, un'informazione più o meno discretizzata in energia.

I SPND, infatti, forniscono in uscita un unico segnale di corrente dovuto al loro utilizzo in *current mode*. Ne deriva immediatamente che l'adozione di un solo rivelatore e di un solo materiale sensibile non conduce ad alcuna determinazione di spettro, poiché esisteranno infiniti spettri neutronici incidenti sul rivelatore cui corrisponderebbe il medesimo segnale di corrente. L'impiego di diversi materiali sensibili, come si vedrà di seguito, può costituire una soluzione a questo problema, perchè consente di incrementare le equazioni componenti il sistema matematico che, quando determinato nelle sue soluzioni, potrà fornire informazioni spettrali sul flusso neutronico che ha investito i diversi rivelatori.

5.2.1 Basi teoriche della tecnica di unfolding dello spettro neutronico a partire da misure con SPND

L'equazione 5.4, presa in considerazione per $i = 1 \dots N$ materiali, risulta avere la struttura di un'equazione di Fredholm del primo tipo:

$$\begin{aligned} I_{(n,\gamma)}(i) &= C(i) \cdot \int_0^\infty S(i, E) \varphi(E) dE \\ \tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) &= \int_0^\infty S(i, E) \varphi(E) dE \end{aligned} \quad (5.5)$$

dove:

(i) è l' i -esimo di N materiali;

$$\tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) = I_{(n,\gamma)}(i) / C(i).$$

La seconda delle equazioni in 5.5 presenta l'insieme della variabile i discreto mentre la variabile E è continua. Si impone, quindi, una discretizzazione della 5.5 secondo gli N materiali, che conduce -necessariamente- anche ad una discretizzazione della variabile E , al fine di ottenere un sistema di equazioni che abbia una soluzione determinata.

Si considerino N sonde SPND, esposte allo stesso flusso neutronico, contenenti N materiali sensibili diversi e si abbiano W finestre energetiche in cui poter scomporre l'integrale in equazione 5.5. Per il generico rivelatore i , potrà scriversi

$$\tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) = \sum_{j=1}^W S_{W_j}(i) \varphi_{W_j} \quad (5.6)$$

dove:

$S_{W_j}(i)$ è la sensitività dell' i - *simo* rivelatore nella finestra energetica W_j ;

φ_{W_j} è il flusso neutronico nella finestra energetica W_j .

Scrivendo un sistema di equazioni in forma matriciale,

$$\begin{bmatrix} \varphi_{W_1} S_{W_1}(1) & \varphi_{W_2} S_{W_2}(1) & \varphi_{W_3} S_{W_3}(1) & \cdots & \varphi_{W_W} S_{W_W}(1) \\ \varphi_{W_1} S_{W_1}(2) & \varphi_{W_2} S_{W_2}(2) & \varphi_{W_3} S_{W_3}(2) & \cdots & \varphi_{W_W} S_{W_W}(2) \\ \varphi_{W_1} S_{W_1}(3) & \varphi_{W_2} S_{W_2}(3) & \varphi_{W_3} S_{W_3}(3) & \cdots & \varphi_{W_W} S_{W_W}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{W_1} S_{W_1}(N) & \varphi_{W_2} S_{W_2}(N) & \varphi_{W_3} S_{W_3}(N) & \cdots & \varphi_{W_W} S_{W_W}(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{(n,\gamma)}(1) \\ \tilde{I}_{(n,\gamma)}(2) \\ \tilde{I}_{(n,\gamma)}(3) \\ \vdots \\ \tilde{I}_{(n,\gamma)}(N) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

ovvero,

$$\begin{bmatrix} S_W \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{(n,\gamma)} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Per $W > N$ il sistema risulta indeterminato, quindi non esiste una soluzione univoca. Se $W \equiv N$, il sistema risulta determinato. La soluzione è -tuttavia- dipendente da come vengono selezionate le larghezze di banda delle W finestre. In ogni caso, la soluzione per $W \equiv N$ risulta

$$\begin{bmatrix} \varphi_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_W \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \tilde{I}_{(n,\gamma)} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

per cui dalla misura simultanea, nella stessa posizione, con N SPND collocati in un unico assembly, è possibile calcolare il flusso neutronico d'interesse spettralmente suddiviso in $W \equiv N$ finestre energetiche. La particolarità della soluzione numerica, dipendente da come vengono selezionate le W finestre, può essere risolta con una scelta opportuna di esse, attraverso algoritmi "intelligenti" che ottimizzino le finestre energetiche caso per caso.

5.2.2 Concettualizzazione della sonda

L'idea concettuale, riguardo uno strumento costituito da un assembly di SPND, proposta in merito a modifiche applicabili ad SPND per adattarli alle specifiche necessità di misura (paragrafo 3.2.5.2), è stata utilizzata rivisitata come segue.

L'obiettivo iniziale di un assembly di rivelatori di medesimo tipo all'interno di un unico strumento di misura era quello di incrementare la statistica del segnale rivelabile (a seconda delle posizioni di installazione), assumendo anche la ridondanza locale come dispositivo di sicurezza.

La proposta corrente conserva le caratteristiche di sicurezza della ridondanza, ma presuppone l'utilizzo di SPND alimentati con materiali diversi, al fine di poter applicare la procedura

	Corrente rivelata nelle condizioni d'irraggiamento specificate nel paragrafo 4.3.1 [pA]
^{59}Co	14,19
^{190}Pt	23,52
^{63}Cu	13,38
^{190}Hf	19,66
^{115}In	3,45
^{209}Bi	13,33
^{190}Gd	9,43

Tabella 5.1: Corrente rivelata $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ (risposta ai soli neutroni) per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce di TAPIRO, nelle condizioni specificate nel paragrafo 4.3.1

matematica delineata nel paragrafo 5.2.1, al fine di ottenere dalla sonda anche informazioni spettrali riguardo il flusso neutronico monitorato.

Con riferimento alla Figura 5.2 si è pensato di costruire l'assembly con 7 SPND del tipo *Thermocox standard*, la cui geometria è esplicitata nel paragrafo 4.1.1), alimentati con i materiali sensibili precedentemente analizzati: ^{59}Co , ^{190}Pt , ^{63}Cu , ^{190}Hf , ^{115}In , ^{209}Bi e ^{190}Gd . Come mostrato in Figura 5.1, ciascuno presenta una propria caratteristica spettrale in merito alla corrente rivelabile: è assumibile, quindi che, per un dato spettro neutronico incidente sulla sonda, ciascuno abbia una risposta particolare che in combinazione con le altre restituisca informazioni sulla distribuzione energetica mediante il processo di deconvoluzione delineato in precedenza.

Come prova preliminare del metodo, si è proceduto ad esporre il siffatto assembly allo spettro d'irraggiamento del reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia, secondo le condizioni specificate nel paragrafo 4.3.1. Ciascun SPND misurerà un segnale di corrente proprio, legato unicamente alla forma che assume la sua curva $S(E)$ in Figura 5.1.

Conoscendo le sensibilità integrali di ciascun SPND, (derivabili sperimentalmente dalla taratura degli strumenti mediante una misura assoluta di flusso, ad esempio mediante attivazione neutronica), dai valori in Tabella 5.1 si ottiene una misura quantitativa del flusso neutronico integrale che ha originato la risposta misurata.

Sempre a partire dalle misure di corrente per singolo SPND (Tabella 5.1) risulta possibile, inoltre, iniziare il procedimento di *unfolding* matematico dello spettro neutronico che ha originato i segnali di corrente, come teorizzato nel paragrafo 5.2.1. Avendo $N = 7$ materiali sensibili diversi, il procedimento di unfolding matematico presenta soluzione determinata se vengono selezionate $W = 7$ finestre energetiche in cui condensare l'insieme continuo della variabile energia, E .

Come detto, tuttavia, la soluzione del sistema lineare proposto è numericamente dipendente da come si scelgono le larghezze delle W finestre energetiche. Con riferimento alla Figura 5.1, le sensibilità spettrali $S(E)$ sono state calcolate, attraverso MCNPX, in 49 gruppi energetici, secondo la classificazione in Tabella 2.5. Selezionare la migliore condensazione possibile da 49 a 7 gruppi energetici al fine di rendere il sistema di equazioni 5.7 compatibile e determinato, richiede un'analisi comparata e contemporanea di tutte le possibili combinazioni $\tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) =$

$\sum_{j=1}^W S_{W_j}(i)\varphi_{W_j}$ che condurrebbero ai segnali di corrente misurati.

Una procedura di selezione ed ottimizzazione delle larghezze delle 7 finestre energetiche è stata implementata in un algoritmo *MatLab*, che opera come segue:

1. calcolo di tutte le possibili combinazioni delle larghezze delle 7 finestre energetiche in cui suddividere lo spettro;
2. condensazione delle sensibilità spettrali (per tutti i materiali) in tutte le combinazioni individuate al punto precedente;
3. risoluzione del sistema lineare in equazione 5.7 per tutte le combinazioni individuate;

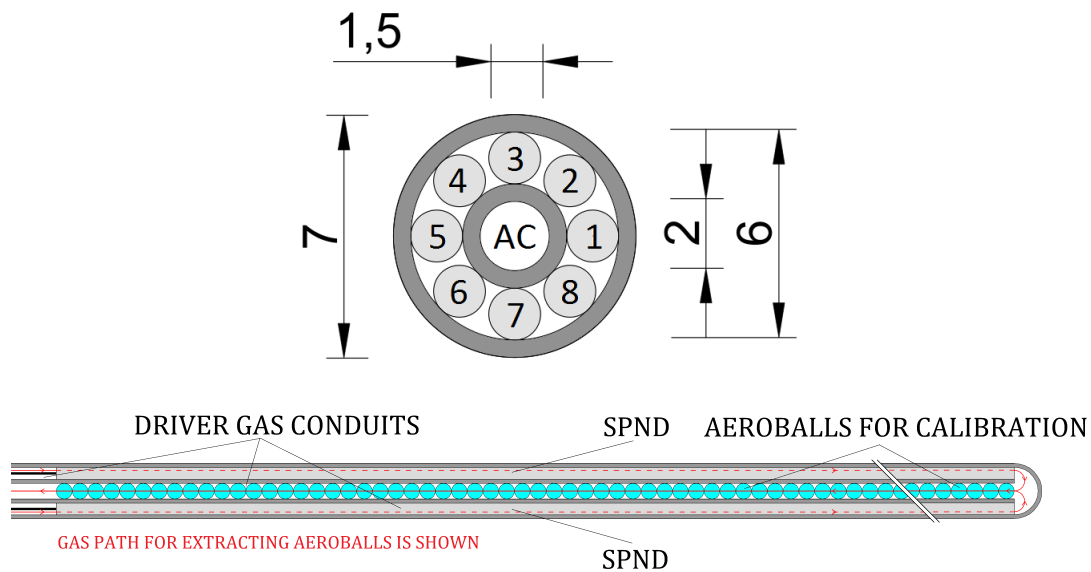


Figura 5.2: Struttura della sonda spettrometrica, montante 7 SPND aventi materiali sensibili diversi, disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante misura assoluta per attivazione neutronica di opportuno materiale. Come geometria di riferimento si è assunta la struttura standard degli SPND *Thermocoax* esplicitata nel paragrafo 4.1.1. Tutte le dimensioni sono in $[mm]$.

4. rigetto delle soluzioni non accettabili (se $\varphi_{W_j} < 0$);
5. analisi in frequenza della matrice dei risultati di flusso neutronico al fine di individuare le distribuzioni spettrali e le suddivisioni del range energetico più verosimili.

Il detto algoritmo è ancora in fase di sviluppo ed ottimizzazione, pertanto non verrà qui riportato. I primi risultati della sua applicazione a partire dai dati disponibili in Tabella 5.1 sono presentati di seguito. Sebbene l'algoritmo detto sia ancora in fase di sviluppo, i risultati preliminari mostrano l'effettiva possibilità di misurare sperimentalmente, con i SPND-pronti, anche la qualità energetica del flusso neutronico nella posizione di installazione.

Figura 5.3 mostra la ricostruzione mediante MatLab e l'algoritmo di *unfolding*, dello spettro neutronico atteso nella posizione monitorata (curva rossa) ed le diverse possibili soluzioni proposte dallo script (curve blu).

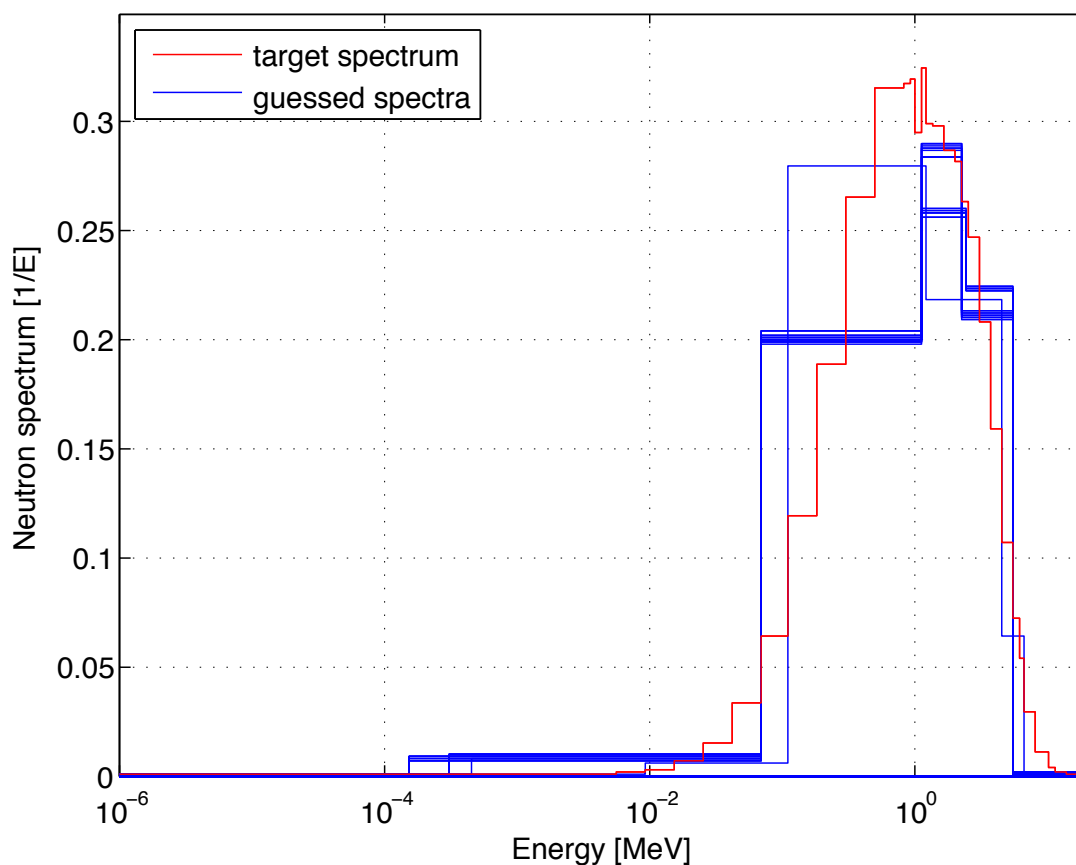


Figura 5.3: Risultati dell'algoritmo di *unfolding* realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.1, nelle condizioni specificate nel paragrafo 4.3.1. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di *unfolding* di spettro realizzato in MatLab.

5.3 Applicazione della sonda proposta ai flussi neutronici e gamma nelle posizioni d'installazione identificate in ALFRED

La procedura esplicita nel paragrafo 5.2.2 è stata applicata anche alle seguenti posizioni d'installazione della strumentazione neutronica ipotizzate per il reattore ALFRED. Con riferimento alla Figura 2.13:

- posizione C2: centro nocciolo, energia media dello spettro 150 keV ;
- posizione R1: estremo superiore dell'elemento riflettore, energia media dello spettro 70 keV ;
- posizione N4: punto estremo della traversa radiale sul piano dei *noses*, energia media dello spettro 13 keV .

Con l'assembly di SPND concettualizzato ed il metodo proposto nel paragrafo 5.2.2, si è proceduto ad esporre il siffatto assembly allo spettro d'irraggiamento del reattore LFR ALFRED nelle posizioni precedentemente dichiarate.

Come in precedenza, ciascun SPND misurerà un segnale di corrente proprio, legato unicamente alla forma che assume la sua curva di sensitività spettrale $S(E)$ in Figura 5.1.

Di seguito sono presentati i risultati per le diverse posizioni analizzate.

Sebbene i risultati si configurino come preliminari e l'algoritmo detto sia ancora in fase di sviluppo, può ritenersi dimostrata l'effettiva possibilità di misurare sperimentalmente, con i SPND-pronti, anche la qualità energetica del flusso neutronico nella posizione di installazione, oltre che la magnitudo di flusso neutronico.

	Correnti rivelate nella posizione C2 nel reattore LFR ALFRED [pA]
⁵⁹ Co	16236,53
^{190m} Pt	82861,50
⁶³ Cu	19374,51
^{190m} Hf	60042,44
¹¹⁵ In	5079,11
²⁰⁹ Bi	9728,58
^{190m} Gd	51659,68

Tabella 5.2: Correnti rivelate $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce in posizione C2 (Figura 2.13) del reattore ALFRED, in condizioni di potenza nominale.

A partire dalle misure di corrente per singolo SPND (Tabella 5.2) risulta possibile iniziare il procedimento di *unfolding* matematico dello spettro neutronico che ha originato i segnali di corrente, come teorizzato nel paragrafo 5.2.1. Avendo $N = 7$ materiali sensibili diversi, il procedimento di unfolding matematico presenta soluzione determinata se vengono selezionate $W = 7$ finestre energetiche in cui condensare l'insieme continuo della variabile energia, E .

Come detto, tuttavia, la soluzione del sistema lineare proposto è numericamente dipendente da come si scelgono le larghezze delle W finestre energetiche. Una procedura di selezione ed ottimizzazione delle larghezze delle 7 finestre energetiche è implementata attraverso l'algoritmo *MatLab* citato precedentemente.

I risultati della sua applicazione a partire dai dati disponibili in Tabella 5.2 sono presentati in Figura 5.4. Sebbene l'algoritmo detto sia ancora in fase di sviluppo, i risultati preliminari mostrano l'effettiva possibilità di misurare sperimentalmente, con i SPND-pronti, anche la qualità energetica del flusso neutronico nella posizione di installazione.

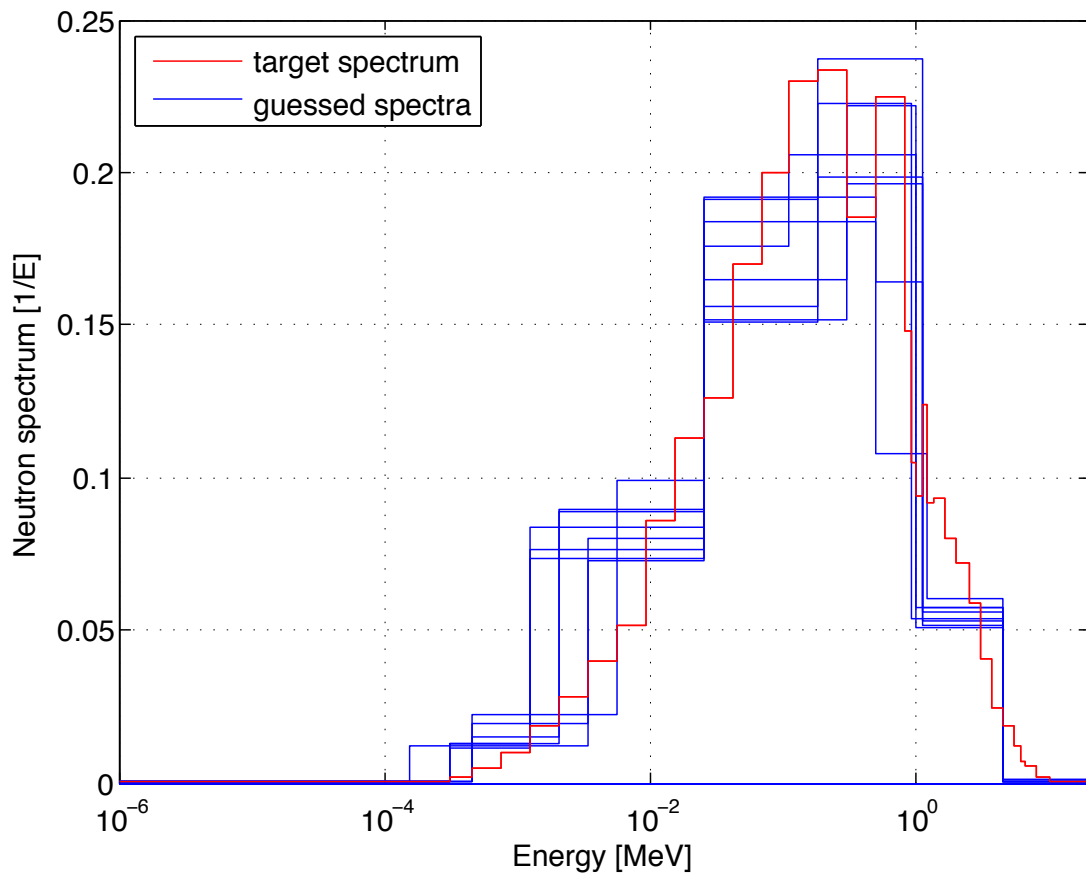


Figura 5.4: Risultati dell'algoritmo di *unfolding* realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.2 concernenti la posizione d'installazione C2 (Figura 2.13) del reattore ALFRED. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di *unfolding* di spettro realizzato in MatLab.

	Correnti rivelate nella posizione R1 nel reattore LFR ALFRED [pA]
⁵⁹ Co	7885,67
^{190m} Pt	17657,76
⁶³ Cu	1311,00
^{190m} Hf	40044,55
¹¹⁵ In	386,27
²⁰⁹ Bi	535,72
^{190m} Gd	22960,71

Tabella 5.3: Correnti rivelate $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce in posizione R1 (Figura 2.13) del reattore ALFRED, in condizioni di potenza nominale.

A partire dalle misure di corrente per singolo SPND (Tabella 5.3) risulta possibile iniziare il procedimento di *unfolding* matematico dello spettro neutronico che ha originato i segnali di corrente, come teorizzato nel paragrafo 5.2.1. Avendo $N = 7$ materiali sensibili diversi, il procedimento di unfolding matematico presenta soluzione determinata se vengono selezionate $W = 7$ finestre energetiche in cui condensare l'insieme continuo della variabile energia, E .

Come detto, tuttavia, la soluzione del sistema lineare proposto è numericamente dipendente da come si scelgono le larghezze delle W finestre energetiche. Una procedura di selezione ed ottimizzazione delle larghezze delle 7 finestre energetiche è implementata attraverso l'algoritmo *MatLab* citato precedentemente.

I risultati della sua applicazione a partire dai dati disponibili in Tabella 5.3 sono presentati in Figura 5.5. Sebbene l'algoritmo detto sia ancora in fase di sviluppo, i risultati preliminari mostrano l'effettiva possibilità di misurare sperimentalmente, con i SPND-pronti, anche la qualità energetica del flusso neutronico nella posizione di installazione.

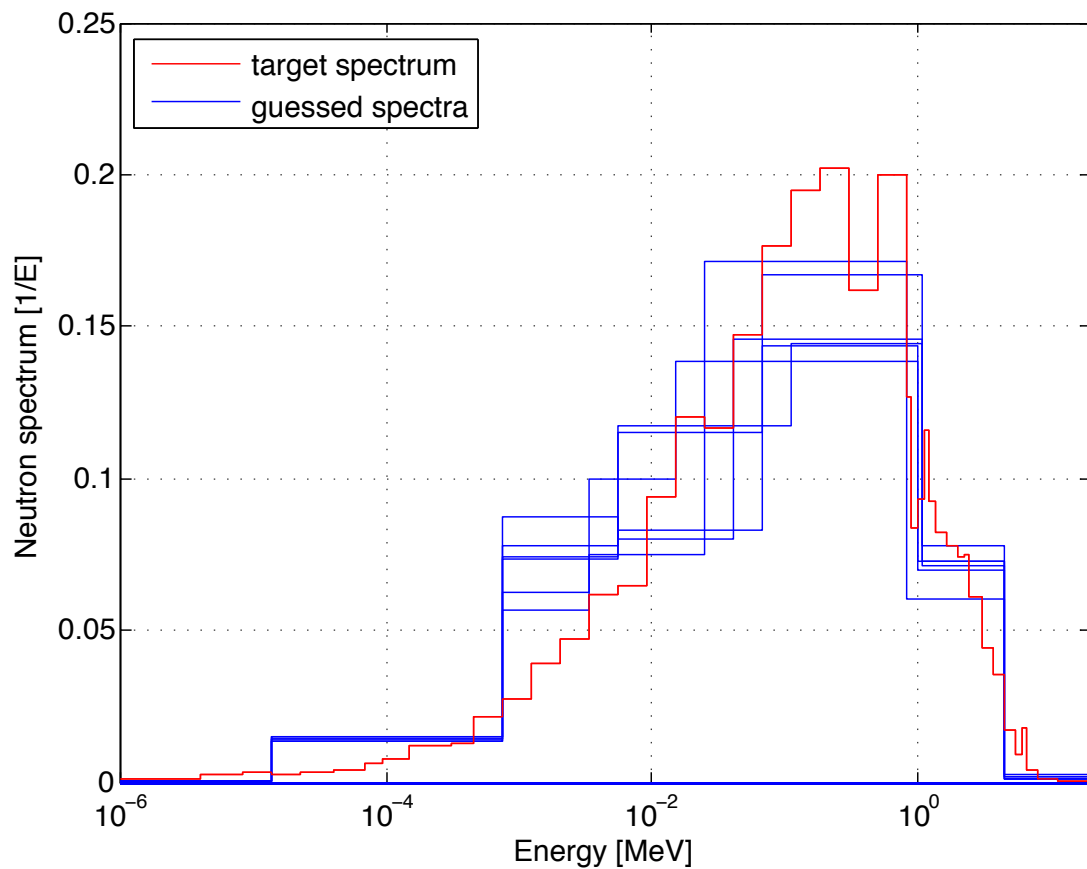


Figura 5.5: Risultati dell'algoritmo di *unfolding* realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.3 concernenti la posizione d'installazione R1 (Figura 2.13) del reattore ALFRED. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di *unfolding* di spettro realizzato in MatLab.

	Correnti rivelate nella posizione N4 nel reattore LFR ALFRED [pA]
^{59}Co	7467,68
^{190}Pt	26146,71
^{63}Cu	4555,70
^{190}Hf	28595,92
^{115}In	1078,82
^{209}Bi	2057,14
^{190}Gd	21078,50

Tabella 5.4: Correnti rivelate $\tilde{I}_{(n,\gamma)}$ per singolo SPND nell'esposizione al flusso neutronico veloce in posizione N4 (Figura 2.13) del reattore ALFRED, in condizioni di potenza nominale.

A partire dalle misure di corrente per singolo SPND (Tabella 5.4) risulta possibile iniziare il procedimento di *unfolding* matematico dello spettro neutronico che ha originato i segnali di corrente, come teorizzato nel paragrafo 5.2.1. Avendo $N = 7$ materiali sensibili diversi, il procedimento di unfolding matematico presenta soluzione determinata se vengono selezionate $W = 7$ finestre energetiche in cui condensare l'insieme continuo della variabile energia, E .

Come detto, tuttavia, la soluzione del sistema lineare proposto è numericamente dipendente da come si scelgono le larghezze delle W finestre energetiche. Una procedura di selezione ed ottimizzazione delle larghezze delle 7 finestre energetiche è implementata attraverso l'algoritmo *MatLab* citato precedentemente.

I risultati della sua applicazione a partire dai dati disponibili in Tabella 5.4 sono presentati in Figura 5.6. Sebbene l'algoritmo detto sia ancora in fase di sviluppo, i risultati preliminari mostrano l'effettiva possibilità di misurare sperimentalmente, con i SPND-pronti, anche la qualità energetica del flusso neutronico nella posizione di installazione.

In questo caso, rispetto ai precedenti, i risultati sembrano più grossolani: è possibile che ciò sia dovuto alla particolare scelta della condensazione a 49 gruppi, probabilmente meno efficiente quando l'energia media dello spettro tende a valori di bassa energia, come per N4 rispetto ai precedenti C2 ed R1.

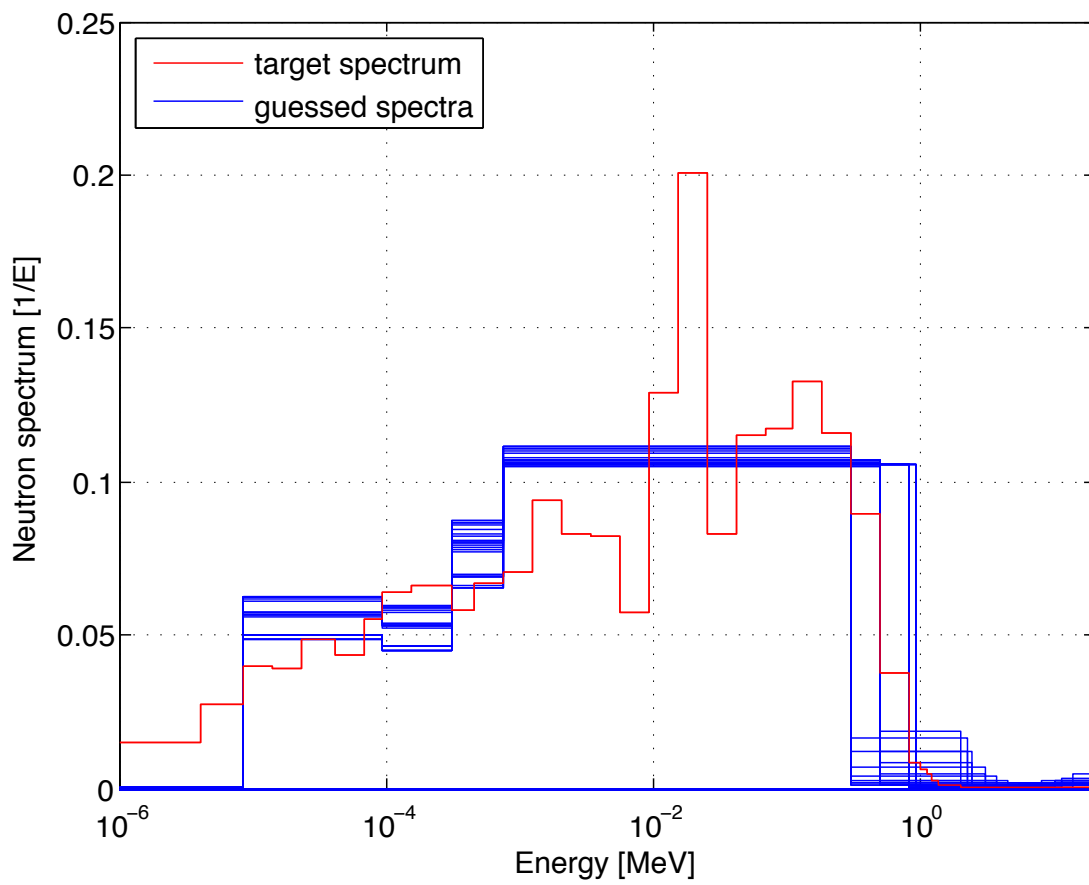


Figura 5.6: Risultati dell'algoritmo di *unfolding* realizzato in MatLab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 5.4 concernenti la posizione d'installazione N4 (Figura 2.13) del reattore ALFRED. La curva rossa rappresenta lo spettro atteso, mentre le curve blu rappresentano i tentativi di calcolo dell'algoritmo di *unfolding* di spettro realizzato in MatLab.

Capitolo 6

Conclusioni

Il presente lavoro di dottorato ha avuto come oggetto lo studio di strumentazione dedicata per la misura di flussi neutronici veloci di elevata entità in ambienti ostili per la tecnologia, con temperature di $400 \div 500^\circ\text{C}$ ed elevati ratei di dose gamma, condizioni tipiche delle applicazioni di monitoraggio *in-core* dei reattori veloci.

Il rinnovato interesse verso questa classe reattoristica nasce dagli obiettivi proposti dal *Generation IV International Forum* riguardo un futuro sostenibile per il nucleare di potenza e la gestione del ciclo dei rifiuti. I reattori veloci ed i sistemi ingegneristici di trasmutazione delle scorie a lunga vita si dimostrano essere, ad oggi, le uniche soluzioni tecnologiche per ridurre la pericolosità nel tempo degli "scarti" del ciclo del combustibile. Pensare di poter tecnologicamente ridurre il tempo di stoccaggio da $10^6 \div 10^7$ anni a circa 10^3 anni, è obiettivo così significativo da giustificare tutti gli investimenti e gli sforzi in merito.

Tra le categorie reattoristiche coinvolte a perseguire tali scopi, i *Lead Fast Reactor*, *LFR*, e gli *Accelerator Driven System*, *ADS*, (sistemi sottocritici basati sulla tecnologia del piombo refrigerante) assumono sicuramente importanza particolare, essendo i sistemi trasmutatori delle scorie. Ad oggi, il principale problema degli ADS risiede nell'acceleratore di protoni che alimenta la macchina stessa: le elevate correnti richieste per ottenere un flusso neutronico di trasmutazione sostenuto rendono l'acceleratore lineare il componente più critico e costoso, cosicché al tempo presente, la realizzazione su scala industriale di sistemi ADS sembra assumere connotazioni futuristiche. Le peculiarità tecnologiche del piombo refrigerante, in termini di trasmutazione dei transuranici, sono attuabili -sebbene in misura minore e con caratteristiche diverse- anche in insiemi critici: i LFR si propongono essere la soluzione nucleare più promettente -a breve termine- riguardo il *ciclo adiabatico* del combustibile nucleare, ove dal trattamento del combustibile d'impianto si eliminano i soli prodotti di fissione (le scorie decadenti nel giro di qualche migliaio di anni), che vengono quantitativamente rimpiazzati con uranio naturale. Ne segue che un reattore LFR adottante un ciclo adiabatico, consuma e smaltisce le scorie a lunga vita che produce (gli attinidi) da sé.

La promessa recondita in queste teorie è un futuro del pianeta più sostenibile.

Nell'ambito degli sforzi compiuti a livello mondiale, anche ENEA, *Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile*, nell'ambito del 6° e 7° Programma Quadro, ha partecipato e partecipa a questioni di ricerca e sviluppo in merito alle tecnologie dei reattori di IV Generazione nel panorama Europeo.

Lo sforzo verso cui si tende è la realizzazione di sistemi dimostrativi industriali, che siano in grado di far acquisire know-how e sviluppare conoscenze e competenze in merito alle problematiche impiantistiche che riguardano i reattori del futuro. Com'è noto, dei reattori veloci esiste una larga esperienza industriale solo per la categoria dei *Sodium Fast Reactor*, *SFR*, mentre altre soluzioni necessitano di essere approfonditamente studiate e sperimentate prima di poterle pensare applicazioni su scala commerciale.

In questo contesto si innesta il progetto e lo studio del reattore *ALFRED*, *Advanced Lead Fast REactor Demonstrator*, reattore dimostrativo del più grande progetto *ELFR*, *European*

Lead Fast Reactor, target di riferimento del panorama europeo, per quanto concerne i reattori al piombo.

Com'è facilmente intuibile, la scarsa esperienza sperimentale dei LFR pone perplessità in merito all'ipotesi di realizzare un reattore di grande scala come ALFRED (300 MW_{th}), senza passare per esperimenti in scala ridotta, al fine di comprendere -primariamente- le questioni legate alla fisica del nocciolo di tali reattori, la tecnologia e le problematiche del refrigerante e dei materiali connesse con l'esercizio "neutronico" di nocciolo.

Le necessità di studio e sicurezza lasciano presagire, dunque, che un Dimostrativo di taglia considerevole come ALFRED assuma anche la connotazione di un reattore di ricerca, con canali di prova e sperimentazione, strumentazione ridondata e diversificata, per seguire tutte le possibili dinamiche neutroniche e termoidrauliche.

Il presente lavoro di dottorato affronta la questione della strumentazione neutronica di monitoraggio e controllo di tale reattore.

La raffinata simulazione al calcolatore di ALFRED, all'interno di un dettagliata ricostruzione del modello nel codice di trasporto Monte Carlo di radiazione *MCNPX ver.2.7.0*, ha consentito di caratterizzare preliminarmente i flussi neutronici e gamma cui sarebbero esposte le sonde nelle posizioni ipotizzabili per l'installazione della strumentazione neutronica.

Identificato, quindi, il termine sorgente, si è proceduto a valutare le prestazioni della strumentazione correntemente disponibile ed utilizzata in analoghi progetti di reattori SFR, focalizzando solo sulla strumentazione pronta (la sola adatta a scopi di comando e controllo) capace di resistere alle alte temperature.

Le categorie di strumenti analizzate risultano *Camere e Microcamere a Fissione ad alta temperatura e Self Powered Neutron Detectors*.

I risultati delle simulazioni sulla strumentazione commerciale possono riassumersi nelle seguenti considerazioni.

- Le **camere a fissione** risultano la strumentazione principe per seguire l'avviamento e le prime decadi di flusso neutronico, data la loro elevata sensibilità di risposta. Esiste una problematica di durata nel tempo e sovraesposizione al flusso gamma di reattore, quando la potenza s'incrementa, il che rende necessario riposizionare la strumentazione durante la salita in potenza, se essa è stata introdotta *in-core*.

In particolare, la camera a fissione *Photonis CFUE32* è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento fino a circa 0,1% della potenza nominale, ed esiste un problema di durabilità per potenze $> 10\%$ della potenza nominale, perché l'elevata sensibilità "brucia" la camera troppo in fretta.

Il massimo rateo di esposizione gamma obbliga lo strumento a dover essere allontanato dalla parte attiva del combustibile quando per potenze $> 0.1\%$ della potenza nominale.

Sistemi di movimentazione durante il funzionamento del reattore si rendono necessari, così da seguire efficacemente e "da vicino" l'avviamento di reattore, per poter poi rimuovere la sonda quando i limiti di flusso neutronico e gamma lo impongano.

Una possibilità di ridurre la sensibilità delle camere a fissione e renderle più durevoli nel tempo sta nella variazione del materiale sensibile, la cui scelta potrebbe ricadere su un isotopo fissile avente una sezione d'urto di fissione (pesata sullo spettro neutronico) di valore inferiore rispetto al ^{235}U .

- I **Self Powered Neutron Detectors** presentano sicuramente incapacità di monitoraggio alle basse potenze, necessitando di elevati flussi neutronici per poter essere operati, data la loro intrinsecamente scarsa sensibilità.

In particolare, l'usabilità di SPND *Thermocoax* in ALFRED richiede valori di potenza almeno nell'ordine dei *MW*. Sono, tuttavia, strumenti molto robusti, completamente a stato solido, e non richiedono una alimentazione elettrica per poter operare.

Con qualche accorgimento, quindi, si può pensare di utilizzare questo strumento in posizioni fisse negli elementi di combustibile e riflettore, per monitorare il reattore agli alti livelli di potenza, vista anche la durabilità nel tempo.

Vi è la necessità di provvedere a condurre ulteriori studi circa la strumentazione da applicare al reattore, perché quella commercialmente disponibile al momento risulta applicabile, ma non completamente adeguata. In particolare, il monitoraggio della potenza nominale in posizioni vicine al nocciolo, *in-core* e *out-of-core* richiede miglioramenti della strumentazione da applicare, di cui la tecnologia unicamente utilizzabile sembra essere quella degli SPND-pronti.

Dalle considerazioni precedenti, appare chiaro che i SPND si dimostrano essere una tecnologia molto adatta al controllo del reattore ALFRED nei regimi prossimi alla potenza nominale, laddove non esiste altra strumentazione da poter operare. Per tale motivo, questo lavoro ha preso -come direzione di studio- l'approfondimento dell'applicazione di SPND-pronti alla misura integrale e spettrale di flussi neutronici veloci, analizzando:

- burn-up ed accumulo di prodotti di reazione a valle di irraggiamento in spettri neutronici veloci;
- risposta dinamica e prontezza di rivelazione delle variazioni di flusso neutronico;
- materiali sensibili diversi da quelli convenzionali;
- il disegno di una sonda costituita di un assembly di SPND che consenta misure integrali e spettrali di flussi neutronici veloci.

I SPND-pronti si dimostrano, tecnologicamente, strumenti semplici, efficaci, resistenti e sicuri per il monitoraggio della potenza nominale; sono da investigare, tuttavia, ottimizzazioni di tali strumenti per le condizioni di reattore LFR, al fine di ottenere migliori prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore nel range delle alte potenze.

In particolare, non esiste una provata esperienza operativa di tale classe di strumenti, il che rende il campo della ricerca e sviluppo fertile in tale direzione. Il reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può risultare una possibilità concreta di test di sonde commercialmente disponibili o prototipi innovativi, al fine di colmare la mancanza di dati sperimentali. Tale studio sarebbe funzionale alla verifica dell'applicabilità della tecnologia detta ai reattori veloci di tipo LFR (o, più in generale, l'intera classe dei reattori veloci), nonché di enorme ausilio allo sviluppo di disegni innovativi ai fini della realizzazione di nuovi prototipi.

Appendici

Appendice A

Input MCNPX del reattore ALFRED

Di seguito è riportato in versione integrale l'input MCNPX del reattore ALFRED utilizzato nei calcoli. Per esigenze di brevità, si è tagliata la specifica di celle e superfici dei generatori di vapore da 2 a 8, lasciando solo l'input di modellazione del generatore #1.

```
c HEX1 outermost tube
1101 4 -7.74 -190 (
  (10017 -10018):(10027 -10028):(10037 -10038):(10047 -10048):(10057 -10058):
  (10067 -10068):(10077 -10078):(10087 -10088):(10097 -10098):(10107 -10108):
  (10117 -10118):(10127 -10128):(10137 -10138):(10147 -10148):(10157 -10158):
  (10167 -10168):(10177 -10178):(10187 -10188):(10197 -10198):(10207 -10208):
  (10217 -10218):(10227 -10228):(10237 -10238):(10247 -10248):(10257 -10258):
  (10267 -10268):(10277 -10278):(10287 -10288):(10297 -10298):(10307 -10308):
  (10317 -10318):(10327 -10328):(10337 -10338):(10347 -10348):(10357 -10358):
  (10367 -10368):(10377 -10378):(10387 -10388):(10397 -10398):(10407 -10408):
  (10417 -10418):(10427 -10428):(10437 -10438):(10447 -10448):(10457 -10458):
  (10467 -10468):(10477 -10478):(10487 -10488):(10497 -10498):(10507 -10508):
  (10517 -10518):(10527 -10528):(10537 -10538):(10547 -10548):(10557 -10558):
  (10567 -10568):(10577 -10578):(10587 -10588):(10597 -10598):(10607 -10608):
  (10617 -10618):(10627 -10628):(10637 -10638):(10647 -10648):(10657 -10658):
  (10667 -10668):(10677 -10678):(10687 -10688):(10697 -10698):(10707 -10708):
  (10717 -10718):(10727 -10728):(10737 -10738):(10747 -10748):(10757 -10758):
  (10767 -10768):(10777 -10778):(10787 -10788):(10797 -10798):(10807 -10808):
  (10817 -10818):(10827 -10828):(10837 -10838):(10847 -10848):(10857 -10858):
  (10867 -10868):(10877 -10878):(10887 -10888):(10897 -10898):(10907 -10908):
  (10917 -10918):(10927 -10928):(10937 -10938):(10947 -10948):(10957 -10958):
  (10967 -10968):(10977 -10978):(10987 -10988):(10997 -10998):(11007 -11008):
  (11017 -11018):(11027 -11028):(11037 -11038):(11047 -11048):(11057 -11058):
  (11067 -11068):(11077 -11078):(11087 -11088):(11097 -11098):(11107 -11108):
  (11117 -11118):(11127 -11128):(11137 -11138):(11147 -11148):(11157 -11158):
  (11167 -11168):(11177 -11178):(11187 -11188):(11197 -11198):(11207 -11208):
  (11217 -11218):(11227 -11228):(11237 -11238):(11247 -11248):(11257 -11258):
  (11267 -11268):(11277 -11278):(11287 -11288):(11297 -11298):(11307 -11308):
  (11317 -11318):(11327 -11328):(11337 -11338):(11347 -11348):(11357 -11358)
  ) imp:n=1
1103 4 -7.74 -190 (
  (12807 -12808):(12817 -12818):(12827 -12828):(12837 -12838):(12847 -12848):
  (12857 -12858):(12867 -12868):(12877 -12878):(12887 -12888):(12897 -12898):
  (12907 -12908):(12917 -12918):(12927 -12928):(12937 -12938):(12947 -12948):
  (12957 -12958):(12967 -12968):(12977 -12978):(12987 -12988):(12997 -12998):
  (13007 -13008):(13017 -13018):(13027 -13028):(13037 -13038):(13047 -13048):
  (13057 -13058):(13067 -13068):(13077 -13078):(13087 -13088):(13097 -13098):
  (13107 -13108):(13117 -13118):(13127 -13128):(13137 -13138):(13147 -13148):
  (13157 -13158):(13167 -13168):(13177 -13178):(13187 -13188):(13197 -13198):
  (13207 -13208):(13217 -13218):(13227 -13228):(13237 -13238):(13247 -13248):
  (13257 -13258):(13267 -13268):(13277 -13278):(13287 -13288):(13297 -13298):
  (13307 -13308):(13317 -13318):(13327 -13328):(13337 -13338):(13347 -13348):
  (13357 -13358):(13367 -13368):(13377 -13378):(13387 -13388):(13397 -13398):
  (13407 -13408):(13417 -13418):(13427 -13428):(13437 -13438):(13447 -13448):
  (13457 -13458):(13467 -13468):(13477 -13478):(13487 -13488):(13497 -13498):
  (13507 -13508):(13517 -13518):(13527 -13528):(13537 -13538):(13547 -13548):
  (13557 -13558):(13567 -13568):(13577 -13578):(13587 -13588):(13597 -13598):
  (13607 -13608):(13617 -13618):(13627 -13628):(13637 -13638):(13647 -13648):
  (13657 -13658):(13667 -13668):(13677 -13678):(13687 -13688):(14087 -14088): \ $ v
  (13697 -13698):(13707 -13708):(13717 -13718):(13727 -13728):(13737 -13738):
  (13747 -13748):(13757 -13758):(13767 -13768):(13777 -13778):(13787 -13788):
  (13797 -13798):(13807 -13808):(13817 -13818):(13827 -13828):(13837 -13838):
  (13847 -13848):(13857 -13858):(13867 -13868):(13877 -13878):(13887 -13888):
  (13897 -13898):(13907 -13908):(13917 -13918):(13927 -13928):(13937 -13938):
  (13947 -13948):(13957 -13958):(13967 -13968):(13977 -13978):(13987 -13988):
  (13997 -13998):(14007 -14008):(14017 -14018):(14027 -14028):(14037 -14038):
  (14047 -14048):(14057 -14058):(14067 -14068):(14077 -14078)
  ) imp:n=1
1104 4 -7.74 -190 (
```

```

(14097 -14098):(14107 -14108):(14117 -14118):(14127 -14128):(14137 -14138):
(14147 -14148):(14157 -14158):(14167 -14168):(14177 -14178):(14187 -14188):
(14197 -14198):(14207 -14208):(14217 -14218):(14227 -14228):(14237 -14238):
(14247 -14248):(14257 -14258):(14267 -14268):(14277 -14278):(14287 -14288):
(14297 -14298):(14307 -14308):(14317 -14318):(14327 -14328):(14337 -14338):
(14347 -14348):(14357 -14358):(14367 -14368):(14377 -14378):(14387 -14388):
(14397 -14398):(14407 -14408):(14417 -14418):(14427 -14428):(14437 -14438):
(14447 -14448):(14457 -14458):(14467 -14468):(14477 -14478):(14487 -14488):
(14497 -14498):(14507 -14508):(14517 -14518):(14527 -14528):(14537 -14538):
(14547 -14548):(14557 -14558):(14567 -14568):(14577 -14578):(14587 -14588):
(14597 -14598):(14607 -14608):(14617 -14618):(14627 -14628):(14637 -14638):
(14647 -14648):(14657 -14658):(14667 -14668):(14677 -14678):(14687 -14688):
(14697 -14698):(14707 -14708):(14717 -14718):(14727 -14728):(14737 -14738):
(14747 -14748):(14757 -14758):(14767 -14768):(14777 -14778):(14787 -14788):
(14797 -14798):(14807 -14808):(14817 -14818):(14827 -14828):(14837 -14838):
(14847 -14848):(14857 -14858):(14867 -14868):(14877 -14878):(14887 -14888):
(14897 -14898):(14907 -14908):(14917 -14918):(14927 -14928):(14937 -14938):
(14947 -14948):(14957 -14958):(14967 -14968):(14977 -14978):(14987 -14988):
(14997 -14998):(15007 -15008):(15017 -15018):(15027 -15028):(15037 -15038):
(15047 -15048):(15057 -15058):(15067 -15068):(15077 -15078):(15087 -15088):
(15097 -15098):(15107 -15108):(15117 -15118):(15127 -15128):(15137 -15138):
(15147 -15148):(15157 -15158):(15167 -15168):(15177 -15178):(15187 -15188):
(15197 -15198):(15207 -15208):(15217 -15218):(15227 -15228):(15237 -15238):
(15247 -15248):(15257 -15258):(15267 -15268):(15277 -15278):(15287 -15288):
(15297 -15298):(15307 -15308):(15317 -15318):(15327 -15328):(15337 -15338):
(15347 -15348):(15357 -15358):(15367 -15368):(15377 -15378):(15387 -15388):
(15397 -15398):(15407 -15408):(15417 -15418):(15427 -15428)
) imp:n=1
c
c HEX1 outer tube
1105 4 -7.74 -190 (
(10015 -10016):(10025 -10026):(10035 -10036):(10045 -10046):(10055 -10056):
(10065 -10066):(10075 -10076):(10085 -10086):(10095 -10096):(10105 -10106):
(10115 -10116):(10125 -10126):(10135 -10136):(10145 -10146):(10155 -10156):
(10165 -10166):(10175 -10176):(10185 -10186):(10195 -10196):(10205 -10206):
(10215 -10216):(10225 -10226):(10235 -10236):(10245 -10246):(10255 -10256):
(10265 -10266):(10275 -10276):(10285 -10286):(10295 -10296):(10305 -10306):
(10315 -10316):(10325 -10326):(10335 -10336):(10345 -10346):(10355 -10356):
(10365 -10366):(10375 -10376):(10385 -10386):(10395 -10396):(10405 -10406):
(10415 -10416):(10425 -10426):(10435 -10436):(10445 -10446):(10455 -10456):
(10465 -10466):(10475 -10476):(10485 -10486):(10495 -10496):(10505 -10506):
(10515 -10516):(10525 -10526):(10535 -10536):(10545 -10546):(10555 -10556):
(10565 -10566):(10575 -10576):(10585 -10586):(10595 -10596):(10605 -10606):
(10615 -10616):(10625 -10626):(10635 -10636):(10645 -10646):(10655 -10656):
(10665 -10666):(10675 -10676):(10685 -10686):(10695 -10696):(10705 -10706):
(10715 -10716):(10725 -10726):(10735 -10736):(10745 -10746):(10755 -10756):
(10765 -10766):(10775 -10776):(10785 -10786):(10795 -10796):(10805 -10806):
(10815 -10816):(10825 -10826):(10835 -10836):(10845 -10846):(10855 -10856):
(10865 -10866):(10875 -10876):(10885 -10886):(10895 -10896):(10905 -10906):
(10915 -10916):(10925 -10926):(10935 -10936):(10945 -10946):(10955 -10956):
(10965 -10966):(10975 -10976):(10985 -10986):(10995 -10996):(11005 -11006):
(11015 -11016):(11025 -11026):(11035 -11036):(11045 -11046):(11055 -11056):
(11065 -11066):(11075 -11076):(11085 -11086):(11095 -11096):(11105 -11106):
(11115 -11116):(11125 -11126):(11135 -11136):(11145 -11146):(11155 -11156):
(11165 -11166):(11175 -11176):(11185 -11186):(11195 -11196):(11205 -11206):
(11215 -11216):(11225 -11226):(11235 -11236):(11245 -11246):(11255 -11256):
(11265 -11266):(11275 -11276):(11285 -11286):(11295 -11296):(11305 -11306):
(11315 -11316):(11325 -11326):(11335 -11336):(11345 -11346):(11355 -11356)
) imp:n=1
1106 4 -7.74 -190 (
(11365 -11366):(11375 -11376):(11385 -11386):(11395 -11396):(11405 -11406):
(11415 -11416):(11425 -11426):(11435 -11436):(11445 -11446):(11455 -11456):
(11465 -11466):(11475 -11476):(11485 -11486):(11495 -11496):(11505 -11506):
(11515 -11516):(11525 -11526):(11535 -11536):(11545 -11546):(11555 -11556):
(11565 -11566):(11575 -11576):(11585 -11586):(11595 -11596):(11605 -11606):
(11615 -11616):(11625 -11626):(11635 -11636):(11645 -11646):(11655 -11656):
(11665 -11666):(11675 -11676):(11685 -11686):(11695 -11696):(11705 -11706):
(11715 -11716):(11725 -11726):(11735 -11736):(11745 -11746):(11755 -11756):
(11765 -11766):(11775 -11776):(11785 -11786):(11795 -11796):(11805 -11806):
(11815 -11816):(11825 -11826):(11835 -11836):(11845 -11846):(11855 -11856):
(11865 -11866):(11875 -11876):(11885 -11886):(11895 -11896):
(11905 -11906):(11915 -11916):(11925 -11926):(11935 -11936):(11945 -11946):
(11955 -11956):(11965 -11966):(11975 -11976):(11985 -11986):(11995 -11996):
(12005 -12006):(12015 -12016):(12025 -12026):(12035 -12036):(12045 -12046):
(12055 -12056):(12065 -12066):(12075 -12076):(12085 -12086):(12095 -12096):
(12105 -12106):(12115 -12116):(12125 -12126):(12135 -12136):(12145 -12146):
(12155 -12156):(12165 -12166):(12175 -12176):(12185 -12186):(12195 -12196):
(12205 -12206):(12215 -12216):(12225 -12226):(12235 -12236):(12245 -12246):
(12255 -12256):(12265 -12266):(12275 -12276):(12285 -12286):(12295 -12296):
(12305 -12306):(12315 -12316):(12325 -12326):(12335 -12336):(12345 -12346):
(12355 -12356):(12365 -12366):(12375 -12376):(12385 -12386):(12395 -12396):
(12405 -12406):(12415 -12416):(12425 -12426):(12435 -12436):(12445 -12446):
(12455 -12456):(12465 -12466):(12475 -12476):(12485 -12486):(12495 -12496):
(12505 -12506):(12515 -12516):(12525 -12526):(12535 -12536):(12545 -12546):
(12555 -12556):(12565 -12566):(12575 -12576):(12585 -12586):(12595 -12596):
(12605 -12606):(12615 -12616):(12625 -12626):(12635 -12636):(12645 -12646):
(12655 -12656):(12665 -12666):(12675 -12676):(12685 -12686):(12695 -12696):
(12705 -12706):(12715 -12716):(12725 -12726):(12735 -12736):(12745 -12746):
(12755 -12756):(12765 -12766):(12775 -12776):(12785 -12786)
) imp:n=1
1107 4 -7.74 -190 (
(12805 -12806):(12815 -12816):(12825 -12826):(12835 -12836):(12845 -12846):
(12855 -12856):(12865 -12866):(12875 -12876):(12885 -12886):(12895 -12896):
(12905 -12906):(12915 -12916):(12925 -12926):(12935 -12936):(12945 -12946):
(12955 -12956):(12965 -12966):(12975 -12976):(12985 -12986):(12995 -12996):
(13005 -13006):(13015 -13016):(13025 -13026):(13035 -13036):(13045 -13046):
(13055 -13056):(13065 -13066):(13075 -13076):(13085 -13086):(13095 -13096):
(13105 -13106):(13115 -13116):(13125 -13126):(13135 -13136):(13145 -13146):
(13155 -13156):(13165 -13166):(13175 -13176):(13185 -13186):(13195 -13196):
(13205 -13206):(13215 -13216):(13225 -13226):(13235 -13236):(13245 -13246):
(13255 -13256):(13265 -13266):(13275 -13276):(13285 -13286):(13295 -13296):
(13305 -13306):(13315 -13316):(13325 -13326):(13335 -13336):(13345 -13346):
(13355 -13356):(13365 -13366):(13375 -13376):(13385 -13386):(13395 -13396):
(13405 -13406):(13415 -13416):(13425 -13426):(13435 -13436):(13445 -13446):
(13455 -13456):(13465 -13466):(13475 -13476):(13485 -13486):(13495 -13496):
(13505 -13506):(13515 -13516):(13525 -13526):(13535 -13536):(13545 -13546):
(13555 -13556):(13565 -13566):(13575 -13576):(13585 -13586):(13595 -13596):
(13605 -13606):(13615 -13616):(13625 -13626):(13635 -13636):(13645 -13646):
(13655 -13656):(13665 -13666):(13675 -13676):(13685 -13686):(13695 -13696):
(13705 -13706):(13715 -13716):(13725 -13726):(13735 -13736):
(13745 -13746):(13755 -13756):(13765 -13766):(13775 -13776):(13785 -13786):
(13795 -13796):(13805 -13806):(13815 -13816):(13825 -13826):(13835 -13836):
(13845 -13846):(13855 -13856):(13865 -13866):(13875 -13876):(13885 -13886):
(13895 -13896):(13905 -13906):(13915 -13916):(13925 -13926):(13935 -13936):
(13945 -13946):(13955 -13956):(13965 -13966):(13975 -13976):(13985 -13986):
(13995 -13996):(14005 -14006):(14015 -14016):(14025 -14026):(14035 -14036):
(14045 -14046):(14055 -14056):(14065 -14066):(14075 -14076)
) imp:n=1
1108 4 -7.74 -190 (
(14095 -14096):(14105 -14106):(14115 -14116):(14125 -14126):(14135 -14136):
(14145 -14146):(14155 -14156):(14165 -14166):(14175 -14176):(14185 -14186):
(14195 -14196):(14205 -14206):(14215 -14216):(14225 -14226):(14235 -14236):
(14245 -14246):(14255 -14256):(14265 -14266):(14275 -14276):(14285 -14286):
(14295 -14296):(14305 -14306):(14315 -14316):(14325 -14326):(14335 -14336):
(14345 -14346):(14355 -14356):(14365 -14366):(14375 -14376):(14385 -14386):
(14395 -14396):(14405 -14406):(14415 -14416):(14425 -14426):(14435 -14436):
(14445 -14446):(14455 -14456):(14465 -14466):(14475 -14476):(14485 -14486):
(14495 -14496):(14505 -14506):(14515 -14516):(14525 -14526):(14535 -14536):
(14545 -14546):(14555 -14556):(14565 -14566):(14575 -14576):(14585 -14586):
(14595 -14596):(14605 -14606):(14615 -14616):(14625 -14626):(14635 -14636):
(14645 -14646):(14655 -14656):(14665 -14666):(14675 -14676):(14685 -14686):
(14695 -14696):(14705 -14706):(14715 -14716):(14725 -14726):(14735 -14736):
(14745 -14746):(14755 -14756):(14765 -14766):(14775 -14776):(14785 -14786):
(14795 -14796):(14805 -14806):(14815 -14816):(14825 -14826):(14835 -14836):
(14845 -14846):(14855 -14856):(14865 -14866):(14875 -14876):(14885 -14886):
(14895 -14896):(14905 -14906):(14915 -14916):(14925 -14926):(14935 -14936):
(14945 -14946):(14955 -14956):(14965 -14966):(14975 -14976):(14985 -14986):
(14995 -14996):(15005 -15006):(15015 -15016):(15025 -15026):(15035 -15036):
(15045 -15046):(15055 -15056):(15065 -15066):(15075 -15076):(15085 -15086):
(15095 -15096):(15105 -15106):(15115 -15116):(15125 -15126):(15135 -15136):
(15145 -15146):(15155 -15156):(15165 -15166):(15175 -15176):(15185 -15186):
(15195 -15196):(15205 -15206):(15215 -15216):(15225 -15226):(15235 -15236):
(15245 -15246):(15255 -15256):(15265 -15266):(15275 -15276):(15285 -15286):
(15295 -15296):(15305 -15306):(15315 -15316):(15325 -15326):(15335 -15336):
(15345 -15346):(15355 -15356):(15365 -15366):(15375 -15376):(15385 -15386):
(15395 -15396):(15405 -15406):(15415 -15416):(15425 -15426)
) imp:n=1
c
c HEX1 inner tube
1109 4 -7.74 -190 (
(10013 -10014):(10023 -10024):(10033 -10034):(10043 -10044):(10053 -10054):
(10063 -10064):(10073 -10074):(10083 -10084):(10093 -10094):(10103 -10104):
(10113 -10114):(10123 -10124):(10133 -10134):(10143 -10144):(10153 -10154):
(10163 -10164):(10173 -10174):(10183 -10184):(10193 -10194):(10203 -10204):
(10213 -10214):(10223 -10224):(10233 -10234):(10243 -10244):(10253 -10254):
(10263 -10264):(10273 -10274):(10283 -10284):(10293 -10294):(10303 -10304):
(10313 -10314):(10323 -10324):(10333 -10334):(10343 -10344):(10353 -10354):
(10363 -10364):(10373 -10374):(10383 -10384):(10393 -10394):(10403 -10404):
(10413 -10414):(10423 -10424):(10433 -10434):(10443 -10444):(10453 -10454):
(10463 -10464):(10473 -10474):(10483 -10484):(10493 -10494):(10503 -10504):
(10513 -10514):(10523 -10524):(10533 -10534):(10543 -10544):(10553 -10554):
(10563 -10564):(10573 -10574):(10583 -10584):(10593 -10594):(10603 -10604):
(10613 -10614):(10623 -10624):(10633 -10634):(10643 -10644):(10653 -10654):
(10663 -10664):(10673 -10674):(10683 -10684):(10693 -10694):(10703 -10704):

```



```

1115 4 -7.74 -190 (
(12801 -12802):(12811 -12812):(12821 -12822):(12831 -12832):(12841 -12842):
(12851 -12852):(12861 -12862):(12871 -12872):(12881 -12882):(12891 -12892):
(12901 -12902):(12911 -12912):(12921 -12922):(12931 -12932):(12941 -12942):
(12951 -12952):(12961 -12962):(12971 -12972):(12981 -12982):(12991 -12992):
(13001 -13002):(13011 -13012):(13021 -13022):(13031 -13032):(13041 -13042):
(13051 -13052):(13061 -13062):(13071 -13072):(13081 -13082):(13091 -13092):
(13101 -13102):(13111 -13112):(13121 -13122):(13131 -13132):(13141 -13142):
(13151 -13152):(13161 -13162):(13171 -13172):(13181 -13182):(13191 -13192):
(13201 -13202):(13211 -13212):(13221 -13222):(13231 -13232):(13241 -13242):
(13251 -13252):(13261 -13262):(13271 -13272):(13281 -13282):(13291 -13292):
(13301 -13302):(13311 -13312):(13321 -13322):(13331 -13332):(13341 -13342):
(13351 -13352):(13361 -13362):(13371 -13372):(13381 -13382):(13391 -13392):
(13401 -13402):(13411 -13412):(13421 -13422):(13431 -13432):(13441 -13442):
(13451 -13452):(13461 -13462):(13471 -13472):(13481 -13482):(13491 -13492):
(13501 -13502):(13511 -13512):(13521 -13522):(13531 -13532):(13541 -13542):
(13551 -13552):(13561 -13562):(13571 -13572):(13581 -13582):(13591 -13592):
(13601 -13602):(13611 -13612):(13621 -13622):(13631 -13632):(13641 -13642):
(13651 -13652):(13661 -13662):(13671 -13672):(13681 -13682):(14081 -14082): \ $ v
(13691 -13692):(13701 -13702):(13711 -13712):(13721 -13722):(13731 -13732):
(13741 -13742):(13751 -13752):(13761 -13762):(13771 -13772):(13781 -13782):
(13791 -13792):(13801 -13802):(13811 -13812):(13821 -13822):(13831 -13832):
(13841 -13842):(13851 -13852):(13861 -13862):(13871 -13872):(13881 -13882):
(13891 -13892):(13901 -13902):(13911 -13912):(13921 -13922):(13931 -13932):
(13941 -13942):(13951 -13952):(13961 -13962):(13971 -13972):(13981 -13982):
(13991 -13992):(14001 -14002):(14011 -14012):(14021 -14022):(14031 -14032):
(14041 -14042):(14051 -14052):(14061 -14062):(14071 -14072)
) imp:n=1
1116 4 -7.74 -190 (
(14091 -14092):(14101 -14102):(14111 -14112):(14121 -14122):(14131 -14132):
(14141 -14142):(14151 -14152):(14161 -14162):(14171 -14172):(14181 -14182):
(14191 -14192):(14201 -14202):(14211 -14212):(14221 -14222):(14231 -14232):
(14241 -14242):(14251 -14252):(14261 -14262):(14271 -14272):(14281 -14282):
(14291 -14292):(14301 -14302):(14311 -14312):(14321 -14322):(14331 -14332):
(14341 -14342):(14351 -14352):(14361 -14362):(14371 -14372):(14381 -14382):
(14391 -14392):(14401 -14402):(14411 -14412):(14421 -14422):(14431 -14432):
(14441 -14442):(14451 -14452):(14461 -14462):(14471 -14472):(14481 -14482):
(14491 -14492):(14501 -14502):(14511 -14512):(14521 -14522):(14531 -14532):
(14541 -14542):(14551 -14552):(14561 -14562):(14571 -14572):(14581 -14582):
(14591 -14592):(14601 -14602):(14611 -14612):(14621 -14622):(14631 -14632):
(14641 -14642):(14651 -14652):(14661 -14662):(14671 -14672):(14681 -14682):
(14691 -14692):(14701 -14702):(14711 -14712):(14721 -14722):(14731 -14732):
(14741 -14742):(14751 -14752):(14761 -14762):(14771 -14772):(14781 -14782):
(14791 -14792):(14801 -14802):(14811 -14812):(14821 -14822):(14831 -14832):
(14841 -14842):(14851 -14852):(14861 -14862):(14871 -14872):(14881 -14882):
(14891 -14892):(14901 -14902):(14911 -14912):(14921 -14922):(14931 -14932):
(14941 -14942):(14951 -14952):(14961 -14962):(14971 -14972):(14981 -14982):
(14991 -14992):(15001 -15002):(15011 -15012):(15021 -15022):(15031 -15032):
(15041 -15042):(15051 -15052):(15061 -15062):(15071 -15072):(15081 -15082):
(15091 -15092):(15101 -15102):(15111 -15112):(15121 -15122):(15131 -15132):
(15141 -15142):(15151 -15152):(15161 -15162):(15171 -15172):(15181 -15182):
(15191 -15192):(15201 -15202):(15211 -15212):(15221 -15222):(15231 -15232):
(15241 -15242):(15251 -15252):(15261 -15262):(15271 -15272):(15281 -15282):
(15291 -15292):(15301 -15302):(15311 -15312):(15321 -15322):(15331 -15332):
(15341 -15342):(15351 -15352):(15361 -15362):(15371 -15372):(15381 -15382):
(15391 -15392):(15401 -15402):(15411 -15412):(15421 -15422)
) imp:n=1
c
c HEX1 WATER DOWNCOMER
1117 9 -0.6286 -190 (
(-10011):(-10021):(-10031):(-10041):(-10051):
(-10061):(-10071):(-10081):(-10091):(-10101):
(-10111):(-10121):(-10131):(-10141):(-10151):
(-10161):(-10171):(-10181):(-10191):(-10201):
(-10211):(-10221):(-10231):(-10241):(-10251):
(-10261):(-10271):(-10281):(-10291):(-10301):
(-10311):(-10321):(-10331):(-10341):(-10351):
(-10361):(-10371):(-10381):(-10391):(-10401):
(-10411):(-10421):(-10431):(-10441):(-10451):
(-10461):(-10471):(-10481):(-10491):(-10501):
(-10511):(-10521):(-10531):(-10541):(-10551):
(-10561):(-10571):(-10581):(-10591):(-10601):
(-10611):(-10621):(-10631):(-10641):(-10651):
(-10661):(-10671):(-10681):(-10691):(-10701):
(-10711):(-10721):(-10731):(-10741):(-10751):
(-10761):(-10771):(-10781):(-10791):(-10801):
(-10811):(-10821):(-10831):(-10841):(-10851):
(-10861):(-10871):(-10881):(-10891):(-10901):
(-10911):(-10921):(-10931):(-10941):(-10951):
(-10961):(-10971):(-10981):(-10991):(-11001):
(-11011):(-11021):(-11031):(-11041):(-11051):
(-11061):(-11071):(-11081):(-11091):(-11101):
(-11111):(-11121):(-11131):(-11141):(-11151):
(-11161):(-11171):(-11181):(-11191):(-11201):
(-11211):(-11221):(-11231):(-11241):(-11251):
(-11261):(-11271):(-11281):(-11291):(-11301):
(-11311):(-11321):(-11331):(-11341):(-11351)
) imp:n=1
1118 9 -0.6286 -190 (
(-11361):(-11371):(-11381):(-11391):(-11401):
(-11411):(-11421):(-11431):(-11441):(-11451):
(-11461):(-11471):(-11481):(-11491):(-11501):
(-11511):(-11521):(-11531):(-11541):(-11551):
(-11561):(-11571):(-11581):(-11591):(-11601):
(-11611):(-11621):(-11631):(-11641):(-11651):
(-11661):(-11671):(-11681):(-11691):(-11701):
(-11711):(-11721):(-11731):(-11741):(-11751):
(-11761):(-11771):(-11781):(-11791):(-11801):
(-11811):(-11821):(-11831):(-11841):(-11851): \ $ void filled by tube 279
(-11861):(-11871):(-11881):(-11891):(-11901):
(-11911):(-11921):(-11931):(-11941):(-11951):
(-11961):(-11971):(-11981):(-11991):(-12001):
(-12011):(-12021):(-12031):(-12041):(-12051):
(-12061):(-12071):(-12081):(-12091):(-12101):
(-12111):(-12121):(-12131):(-12141):(-12151):
(-12161):(-12171):(-12181):(-12191):(-12201):
(-12211):(-12221):(-12231):(-12241):(-12251):
(-12261):(-12271):(-12281):(-12291):(-12301):
(-12311):(-12321):(-12331):(-12341):(-12351):
(-12361):(-12371):(-12381):(-12391):(-12401):
(-12411):(-12421):(-12431):(-12441):(-12451):
(-12461):(-12471):(-12481):(-12491):(-12501):
(-12511):(-12521):(-12531):(-12541):(-12551):
(-12561):(-12571):(-12581):(-12591):(-12601):
(-12611):(-12621):(-12631):(-12641):(-12651):
(-12661):(-12671):(-12681):(-12691):(-12701):
(-12711):(-12721):(-12731):(-12741):(-12751):
(-12761):(-12771):(-12781)
) imp:n=1
1119 9 -0.6286 -190 (
(-12801):(-12811):(-12821):(-12831):(-12841):
(-12851):(-12861):(-12871):(-12881):(-12891):
(-12901):(-12911):(-12921):(-12931):(-12941):
(-12951):(-12961):(-12971):(-12981):(-12991):
(-13001):(-13011):(-13021):(-13031):(-13041):
(-13051):(-13061):(-13071):(-13081):(-13091):
(-13101):(-13111):(-13121):(-13131):(-13141):
(-13151):(-13161):(-13171):(-13181):(-13191):
(-13201):(-13211):(-13221):(-13231):(-13241):
(-13251):(-13261):(-13271):(-13281):(-13291):
(-13301):(-13311):(-13321):(-13331):(-13341):
(-13351):(-13361):(-13371):(-13381):(-13391):
(-13401):(-13411):(-13421):(-13431):(-13441):
(-13451):(-13461):(-13471):(-13481):(-13491):
(-13501):(-13511):(-13521):(-13531):(-13541):
(-13551):(-13561):(-13571):(-13581):(-13591):
(-13601):(-13611):(-13621):(-13631):(-13641):
(-13651):(-13661):(-13671):(-13681):(-14081): \ $ void filled by tube 408
(-13691):(-13701):(-13711):(-13721):(-13731):
(-13741):(-13751):(-13761):(-13771):(-13781):
(-13791):(-13801):(-13811):(-13821):(-13831):
(-13841):(-13851):(-13861):(-13871):(-13881):
(-13891):(-13901):(-13911):(-13921):(-13931):
(-13941):(-13951):(-13961):(-13971):(-13981):
(-13991):(-14001):(-14011):(-14021):(-14031):
(-14041):(-14051):(-14061):(-14071)
) imp:n=1
1120 9 -0.6286 -190 (
(-14091):(-14101):(-14111):(-14121):(-14131):
(-14141):(-14151):(-14161):(-14171):(-14181):
(-14191):(-14201):(-14211):(-14221):(-14231):
(-14241):(-14251):(-14261):(-14271):(-14281):
(-14291):(-14301):(-14311):(-14321):(-14331):
(-14341):(-14351):(-14361):(-14371):(-14381):
(-14391):(-14401):(-14411):(-14421):(-14431):
(-14441):(-14451):(-14461):(-14471):(-14481):
(-14491):(-14501):(-14511):(-14521):(-14531):
(-14541):(-14551):(-14561):(-14571):(-14581):
(-14591):(-14601):(-14611):(-14621):(-14631):
(-14641):(-14651):(-14661):(-14671):(-14681):
(-14691):(-14701):(-14711):(-14721):(-14731):
(-14741):(-14751):(-14761):(-14771):(-14781):
(-14791):(-14801):(-14811):(-14821):(-14831):
(-14841):(-14851):(-14861):(-14871):(-14881):

```



```

(10064 -10065):(10074 -10075):(10084 -10085):(10094 -10095):(10104 -10105):
(10114 -10115):(10124 -10125):(10134 -10135):(10144 -10145):(10154 -10155):
(10164 -10165):(10174 -10175):(10184 -10185):(10194 -10195):(10204 -10205):
(10214 -10215):(10224 -10225):(10234 -10235):(10244 -10245):(10254 -10255):
(10264 -10265):(10274 -10275):(10284 -10285):(10294 -10295):(10304 -10305):
(10314 -10315):(10324 -10325):(10334 -10335):(10344 -10345):(10354 -10355):
(10364 -10365):(10374 -10375):(10384 -10385):(10394 -10395):(10404 -10405):
(10414 -10415):(10424 -10425):(10434 -10435):(10444 -10445):(10454 -10455):
(10464 -10465):(10474 -10475):(10484 -10485):(10494 -10495):(10504 -10505):
(10514 -10515):(10524 -10525):(10534 -10535):(10544 -10545):(10554 -10555):
(10564 -10565):(10574 -10575):(10584 -10585):(10594 -10595):(10604 -10605):
(10614 -10615):(10624 -10625):(10634 -10635):(10644 -10645):(10654 -10655):
(10664 -10665):(10674 -10675):(10684 -10685):(10694 -10695):(10704 -10705):
(10714 -10715):(10724 -10725):(10734 -10735):(10744 -10745):(10754 -10755):
(10764 -10765):(10774 -10775):(10784 -10785):(10794 -10795):(10804 -10805):
(10814 -10815):(10824 -10825):(10834 -10835):(10844 -10845):(10854 -10855):
(10864 -10865):(10874 -10875):(10884 -10885):(10894 -10895):(10904 -10905):
(10914 -10915):(10924 -10925):(10934 -10935):(10944 -10945):(10954 -10955):
(10964 -10965):(10974 -10975):(10984 -10985):(10994 -10995):(11004 -11005):
(11014 -11015):(11024 -11025):(11034 -11035):(11044 -11045):(11054 -11055):
(11064 -11065):(11074 -11075):(11084 -11085):(11094 -11095):(11104 -11105):
(11114 -11115):(11124 -11125):(11134 -11135):(11144 -11145):(11154 -11155):
(11164 -11165):(11174 -11175):(11184 -11185):(11194 -11195):(11204 -11205):
(11214 -11215):(11224 -11225):(11234 -11235):(11244 -11245):(11254 -11255):
(11264 -11265):(11274 -11275):(11284 -11285):(11294 -11295):(11304 -11305):
(11314 -11315):(11324 -11325):(11334 -11335):(11344 -11345):(11354 -11355)
) imp:n=1
1138 9 -0.0727 40000 -190 (
(11364 -11365):(11374 -11375):(11384 -11385):(11394 -11395):(11404 -11405):
(11414 -11415):(11424 -11425):(11434 -11435):(11444 -11445):(11454 -11455):
(11464 -11465):(11474 -11475):(11484 -11485):(11494 -11495):(11504 -11505):
(11514 -11515):(11524 -11525):(11534 -11535):(11544 -11545):(11554 -11555):
(11564 -11565):(11574 -11575):(11584 -11585):(11594 -11595):(11604 -11605):
(11614 -11615):(11624 -11625):(11634 -11635):(11644 -11645):(11654 -11655):
(11664 -11665):(11674 -11675):(11684 -11685):(11694 -11695):(11704 -11705):
(11714 -11715):(11724 -11725):(11734 -11735):(11744 -11745):(11754 -11755):
(11764 -11765):(11774 -11775):(11784 -11785):(11794 -11795):(11804 -11805):
(11814 -11815):(11824 -11825):(11834 -11835):(11844 -11845):(11854 -11855):
(11864 -11865):(11874 -11875):(11884 -11885):(11894 -11895):
(11904 -11905):(11914 -11915):(11924 -11925):(11934 -11935):(11944 -11945):
(11954 -11955):(11964 -11965):(11974 -11975):(11984 -11985):(11994 -11995):
(12004 -12005):(12014 -12015):(12024 -12025):(12034 -12035):(12044 -12045):
(12054 -12055):(12064 -12065):(12074 -12075):(12084 -12085):(12094 -12095):
(12104 -12105):(12114 -12115):(12124 -12125):(12134 -12135):(12144 -12145):
(12154 -12155):(12164 -12165):(12174 -12175):(12184 -12185):(12194 -12195):
(12204 -12205):(12214 -12215):(12224 -12225):(12234 -12235):(12244 -12245):
(12254 -12255):(12264 -12265):(12274 -12275):(12284 -12285):(12294 -12295):
(12304 -12305):(12314 -12315):(12324 -12325):(12334 -12335):(12344 -12345):
(12354 -12355):(12364 -12365):(12374 -12375):(12384 -12385):(12394 -12395):
(12404 -12405):(12414 -12415):(12424 -12425):(12434 -12435):(12444 -12445):
(12454 -12455):(12464 -12465):(12474 -12475):(12484 -12485):(12494 -12495):
(12504 -12505):(12514 -12515):(12524 -12525):(12534 -12535):(12544 -12545):
(12554 -12555):(12564 -12565):(12574 -12575):(12584 -12585):(12594 -12595):
(12604 -12605):(12614 -12615):(12624 -12625):(12634 -12635):(12644 -12645):
(12654 -12655):(12664 -12665):(12674 -12675):(12684 -12685):(12694 -12695):
(12704 -12705):(12714 -12715):(12724 -12725):(12734 -12735):(12744 -12745):
(12754 -12755):(12764 -12765):(12774 -12775):(12784 -12785)
) imp:n=1
1139 9 -0.0727 40000 -190 (
(12804 -12805):(12814 -12815):(12824 -12825):(12834 -12835):(12844 -12845):
(12854 -12855):(12864 -12865):(12874 -12875):(12884 -12885):(12894 -12895):
(12904 -12905):(12914 -12915):(12924 -12925):(12934 -12935):(12944 -12945):
(12954 -12955):(12964 -12965):(12974 -12975):(12984 -12985):(12994 -12995):
(13004 -13005):(13014 -13015):(13024 -13025):(13034 -13035):(13044 -13045):
(13054 -13055):(13064 -13065):(13074 -13075):(13084 -13085):(13094 -13095):
(13104 -13105):(13114 -13115):(13124 -13125):(13134 -13135):(13144 -13145):
(13154 -13155):(13164 -13165):(13174 -13175):(13184 -13185):(13194 -13195):
(13204 -13205):(13214 -13215):(13224 -13225):(13234 -13235):(13244 -13245):
(13254 -13255):(13264 -13265):(13274 -13275):(13284 -13285):(13294 -13295):
(13304 -13305):(13314 -13315):(13324 -13325):(13334 -13335):(13344 -13345):
(13354 -13355):(13364 -13365):(13374 -13375):(13384 -13385):(13394 -13395):
(13404 -13405):(13414 -13415):(13424 -13425):(13434 -13435):(13444 -13445):
(13454 -13455):(13464 -13465):(13474 -13475):(13484 -13485):(13494 -13495):
(13504 -13505):(13514 -13515):(13524 -13525):(13534 -13535):(13544 -13545):
(13554 -13555):(13564 -13565):(13574 -13575):(13584 -13585):(13594 -13595):
(13604 -13605):(13614 -13615):(13624 -13625):(13634 -13635):(13644 -13645):
(13654 -13655):(13664 -13665):(13674 -13675):(13684 -13685):(14084 -14085):
(13694 -13695):(13704 -13705):(13714 -13715):(13724 -13725):(13734 -13735):
(13744 -13745):(13754 -13755):(13764 -13765):(13774 -13775):(13784 -13785):
(13794 -13795):(13804 -13805):(13814 -13815):(13824 -13825):(13834 -13835):
(13844 -13845):(13854 -13855):(13864 -13865):(13874 -13875):(13884 -13885):
(13894 -13895):(13904 -13905):(13914 -13915):(13924 -13925):(13934 -13935):
(13944 -13945):(13954 -13955):(13964 -13965):(13974 -13975):(13984 -13985):
(13994 -13995):(14004 -14005):(14014 -14015):(14024 -14025):(14034 -14035):
(14044 -14045):(14054 -14055):(14064 -14065):(14074 -14075)
) imp:n=1
1140 9 -0.0727 40000 -190 (
(14094 -14095):(14104 -14105):(14114 -14115):(14124 -14125):(14134 -14135):
(14144 -14145):(14154 -14155):(14164 -14165):(14174 -14175):(14184 -14185):
(14194 -14195):(14204 -14205):(14214 -14215):(14224 -14225):(14234 -14235):
(14244 -14245):(14254 -14255):(14264 -14265):(14274 -14275):(14284 -14285):
(14294 -14295):(14304 -14305):(14314 -14315):(14324 -14325):(14334 -14335):
(14344 -14345):(14354 -14355):(14364 -14365):(14374 -14375):(14384 -14385):
(14394 -14395):(14404 -14405):(14414 -14415):(14424 -14425):(14434 -14435):
(14444 -14445):(14454 -14455):(14464 -14465):(14474 -14475):(14484 -14485):
(14494 -14495):(14504 -14505):(14514 -14515):(14524 -14525):(14534 -14535):
(14544 -14545):(14554 -14555):(14564 -14565):(14574 -14575):(14584 -14585):
(14594 -14595):(14604 -14605):(14614 -14615):(14624 -14625):(14634 -14635):
(14644 -14645):(14654 -14655):(14664 -14665):(14674 -14675):(14684 -14685):
(14694 -14695):(14704 -14705):(14714 -14715):(14724 -14725):(14734 -14735):
(14744 -14745):(14754 -14755):(14764 -14765):(14774 -14775):(14784 -14785):
(14794 -14795):(14804 -14805):(14814 -14815):(14824 -14825):(14834 -14835):
(14844 -14845):(14854 -14855):(14864 -14865):(14874 -14875):(14884 -14885):
(14894 -14895):(14904 -14905):(14914 -14915):(14924 -14925):(14934 -14935):
(14944 -14945):(14954 -14955):(14964 -14965):(14974 -14975):(14984 -14985):
(14994 -14995):(15004 -15005):(15014 -15015):(15024 -15025):(15034 -15035):
(15044 -15045):(15054 -15055):(15064 -15065):(15074 -15075):(15084 -15085):
(15094 -15095):(15104 -15105):(15114 -15115):(15124 -15125):(15134 -15135):
(15144 -15145):(15154 -15155):(15164 -15165):(15174 -15175):(15184 -15185):
(15194 -15195):(15204 -15205):(15214 -15215):(15224 -15225):(15234 -15235):
(15244 -15245):(15254 -15255):(15264 -15265):(15274 -15275):(15284 -15285):
(15294 -15295):(15304 -15305):(15314 -15315):(15324 -15325):(15334 -15335):
(15344 -15345):(15354 -15355):(15364 -15365):(15374 -15375):(15384 -15385):
(15394 -15395):(15404 -15405):(15414 -15415):(15424 -15425)
) imp:n=1
C
c HEX1 helium gap
1141 99 -6.25 -190 (
(10016 -10017):(10026 -10027):(10036 -10037):(10046 -10047):(10056 -10057):
(10066 -10067):(10076 -10077):(10086 -10087):(10096 -10097):(10106 -10107):
(10116 -10117):(10126 -10127):(10136 -10137):(10146 -10147):(10156 -10157):
(10166 -10167):(10176 -10177):(10186 -10187):(10196 -10197):(10206 -10207):
(10216 -10217):(10226 -10227):(10236 -10237):(10246 -10247):(10256 -10257):
(10266 -10267):(10276 -10277):(10286 -10287):(10296 -10297):(10306 -10307):
(10316 -10317):(10326 -10327):(10336 -10337):(10346 -10347):(10356 -10357):
(10366 -10367):(10376 -10377):(10386 -10387):(10396 -10397):(10406 -10407):
(10416 -10417):(10426 -10427):(10436 -10437):(10446 -10447):(10456 -10457):
(10466 -10467):(10476 -10477):(10486 -10487):(10496 -10497):(10506 -10507):
(10516 -10517):(10526 -10527):(10536 -10537):(10546 -10547):(10556 -10557):
(10566 -10567):(10576 -10577):(10586 -10587):(10596 -10597):(10606 -10607):
(10616 -10617):(10626 -10627):(10636 -10637):(10646 -10647):(10656 -10657):
(10666 -10667):(10676 -10677):(10686 -10687):(10696 -10697):(10706 -10707):
(10716 -10717):(10726 -10727):(10736 -10737):(10746 -10747):(10756 -10757):
(10766 -10767):(10776 -10777):(10786 -10787):(10796 -10797):(10806 -10807):
(10816 -10817):(10826 -10827):(10836 -10837):(10846 -10847):(10856 -10857):
(10866 -10867):(10876 -10877):(10886 -10887):(10896 -10897):(10906 -10907):
(10916 -10917):(10926 -10927):(10936 -10937):(10946 -10947):(10956 -10957):
(10966 -10967):(10976 -10977):(10986 -10987):(10996 -10997):(11006 -11007):
(11016 -11017):(11026 -11027):(11036 -11037):(11046 -11047):(11056 -11057):
(11066 -11067):(11076 -11077):(11086 -11087):(11096 -11097):(11106 -11107):
(11116 -11117):(11126 -11127):(11136 -11137):(11146 -11147):(11156 -11157):
(11166 -11167):(11176 -11177):(11186 -11187):(11196 -11197):(11206 -11207):
(11216 -11217):(11226 -11227):(11236 -11237):(11246 -11247):(11256 -11257):
(11266 -11267):(11276 -11277):(11286 -11287):(11296 -11297):(11306 -11307):
(11316 -11317):(11326 -11327):(11336 -11337):(11346 -11347):(11356 -11357)
) imp:n=1
1142 99 -6.25 -190 (
(11366 -11367):(11376 -11377):(11386 -11387):(11396 -11397):(11406 -11407):
(11416 -11417):(11426 -11427):(11436 -11437):(11446 -11447):(11456 -11457):
(11466 -11467):(11476 -11477):(11486 -11487):(11496 -11497):(11506 -11507):
(11516 -11517):(11526 -11527):(11536 -11537):(11546 -11547):(11556 -11557):
(11566 -11567):(11576 -11577):(11586 -11587):(11596 -11597):(11606 -11607):
(11616 -11617):(11626 -11627):(11636 -11637):(11646 -11647):(11656 -11657):
(11666 -11667):(11676 -11677):(11686 -11687):(11696 -11697):(11706 -11707):
(11716 -11717):(11726 -11727):(11736 -11737):(11746 -11747):(11756 -11757):
(11766 -11767):(11776 -11777):(11786 -11787):(11796 -11797):(11806 -11807):
(11816 -11817):(11826 -11827):(11836 -11837):(11846 -11847):(11856 -11857):
(11866 -11867):(11876 -11877):(11886 -11887):(11896 -11897):
(11906 -11907):(11916 -11917):(11926 -11927):(11936 -11937):(11946 -11947):
(11956 -11957):(11966 -11967):(11976 -11977):(11986 -11987):(11996 -11997):
(12006 -12007):(12016 -12017):(12026 -12027):(12036 -12037):(12046 -12047):
(12056 -12057):(12066 -12067):(12076 -12077):(12086 -12087):(12096 -12097):
(12106 -12107):(12116 -12117):(12126 -12127):(12136 -12137):(12146 -12147):
(12156 -12157):(12166 -12167):(12176 -12177):(12186 -12187):(12196 -12197):

```



```

(12206 -12207):(12216 -12217):(12226 -12227):(12236 -12237):(12246 -12247):
(12256 -12257):(12266 -12267):(12276 -12277):(12286 -12287):(12296 -12297):
(12306 -12307):(12316 -12317):(12326 -12327):(12336 -12337):(12346 -12347):
(12356 -12357):(12366 -12367):(12376 -12377):(12386 -12387):(12396 -12397):
(12406 -12407):(12416 -12417):(12426 -12427):(12436 -12437):(12446 -12447):
(12456 -12457):(12466 -12467):(12476 -12477):(12486 -12487):(12496 -12497):
(12506 -12507):(12516 -12517):(12526 -12527):(12536 -12537):(12546 -12547):
(12556 -12557):(12566 -12567):(12576 -12577):(12586 -12587):(12596 -12597):
(12606 -12607):(12616 -12617):(12626 -12627):(12636 -12637):(12646 -12647):
(12656 -12657):(12666 -12667):(12676 -12677):(12686 -12687):(12696 -12697):
(12706 -12707):(12716 -12717):(12726 -12727):(12736 -12737):(12746 -12747):
(12756 -12757):(12766 -12767):(12776 -12777):(12786 -12787)
) imp:n=1
1143 99 -6.25 -190 (
(12806 -12807):(12816 -12817):(12826 -12827):(12836 -12837):(12846 -12847):
(12856 -12857):(12866 -12867):(12876 -12877):(12886 -12887):(12896 -12897):
(12906 -12907):(12916 -12917):(12926 -12927):(12936 -12937):(12946 -12947):
(12956 -12957):(12966 -12967):(12976 -12977):(12986 -12987):(12996 -12997):
(13006 -13007):(13016 -13017):(13026 -13027):(13036 -13037):(13046 -13047):
(13056 -13057):(13066 -13067):(13076 -13077):(13086 -13087):(13096 -13097):
(13106 -13107):(13116 -13117):(13126 -13127):(13136 -13137):(13146 -13147):
(13156 -13157):(13166 -13167):(13176 -13177):(13186 -13187):(13196 -13197):
(13206 -13207):(13216 -13217):(13226 -13227):(13236 -13237):(13246 -13247):
(13256 -13257):(13266 -13267):(13276 -13277):(13286 -13287):(13296 -13297):
(13306 -13307):(13316 -13317):(13326 -13327):(13336 -13337):(13346 -13347):
(13356 -13357):(13366 -13367):(13376 -13377):(13386 -13387):(13396 -13397):
(13406 -13407):(13416 -13417):(13426 -13427):(13436 -13437):(13446 -13447):
(13456 -13457):(13466 -13467):(13476 -13477):(13486 -13487):(13496 -13497):
(13506 -13507):(13516 -13517):(13526 -13527):(13536 -13537):(13546 -13547):
(13556 -13557):(13566 -13567):(13576 -13577):(13586 -13587):(13596 -13597):
(13606 -13607):(13616 -13617):(13626 -13627):(13636 -13637):(13646 -13647):
(13656 -13657):(13666 -13667):(13676 -13677):(13686 -13687):(14086 -14087):
(13696 -13697):(13706 -13707):(13716 -13717):(13726 -13727):(13736 -13737):
(13746 -13747):(13756 -13757):(13766 -13767):(13776 -13777):(13786 -13787):
(13796 -13797):(13806 -13807):(13816 -13817):(13826 -13827):(13836 -13837):
(13846 -13847):(13856 -13857):(13866 -13867):(13876 -13877):(13886 -13887):
(13896 -13897):(13906 -13907):(13916 -13917):(13926 -13927):(13936 -13937):
(13946 -13947):(13956 -13957):(13966 -13967):(13976 -13977):(13986 -13987):
(13996 -13997):(14006 -14007):(14016 -14017):(14026 -14027):(14036 -14037):
(14046 -14047):(14056 -14057):(14066 -14067):(14076 -14077)
) imp:n=1
1144 99 -6.25 -190 (
(14096 -14097):(14106 -14107):(14116 -14117):(14126 -14127):(14136 -14137):
(14146 -14147):(14156 -14157):(14166 -14167):(14176 -14177):(14186 -14187):
(14196 -14197):(14206 -14207):(14216 -14217):(14226 -14227):(14236 -14237):
(14246 -14247):(14256 -14257):(14266 -14267):(14276 -14277):(14286 -14287):
(14296 -14297):(14306 -14307):(14316 -14317):(14326 -14327):(14336 -14337):
(14346 -14347):(14356 -14357):(14366 -14367):(14376 -14377):(14386 -14387):
(14396 -14397):(14406 -14407):(14416 -14417):(14426 -14427):(14436 -14437):
(14446 -14447):(14456 -14457):(14466 -14467):(14476 -14477):(14486 -14487):
(14496 -14497):(14506 -14507):(14516 -14517):(14526 -14527):(14536 -14537):
(14546 -14547):(14556 -14557):(14566 -14567):(14576 -14577):(14586 -14587):
(14596 -14597):(14606 -14607):(14616 -14617):(14626 -14627):(14636 -14637):
(14646 -14647):(14656 -14657):(14666 -14667):(14676 -14677):(14686 -14687):
(14696 -14697):(14706 -14707):(14716 -14717):(14726 -14727):(14736 -14737):
(14746 -14747):(14756 -14757):(14766 -14767):(14776 -14777):(14786 -14787):
(14796 -14797):(14806 -14807):(14816 -14817):(14826 -14827):(14836 -14837):
(14846 -14847):(14856 -14857):(14866 -14867):(14876 -14877):(14886 -14887):
(14896 -14897):(14906 -14907):(14916 -14917):(14926 -14927):(14936 -14937):
(14946 -14947):(14956 -14957):(14966 -14967):(14976 -14977):(14986 -14987):
(14996 -14997):(15006 -15007):(15016 -15017):(15026 -15027):(15036 -15037):
(15046 -15047):(15056 -15057):(15066 -15067):(15076 -15077):(15086 -15087):
(15096 -15097):(15106 -15107):(15116 -15117):(15126 -15127):(15136 -15137):
(15146 -15147):(15156 -15157):(15166 -15167):(15176 -15177):(15186 -15187):
(15196 -15197):(15206 -15207):(15216 -15217):(15226 -15227):(15236 -15237):
(15246 -15247):(15256 -15257):(15266 -15267):(15276 -15277):(15286 -15287):
(15296 -15297):(15306 -15307):(15316 -15317):(15326 -15327):(15336 -15337):
(15346 -15347):(15356 -15357):(15366 -15367):(15376 -15377):(15386 -15387):
(15396 -15397):(15406 -15407):(15416 -15417):(15426 -15427)
) imp:n=1
c
c HEX1 insulator into the slave tube (vacuum)
1145 0 -190 (
(10012 -10013):(10022 -10023):(10032 -10033):(10042 -10043):(10052 -10053):
(10062 -10063):(10072 -10073):(10082 -10083):(10092 -10093):(10102 -10103):
(10112 -10113):(10122 -10123):(10132 -10133):(10142 -10143):(10152 -10153):
(10162 -10163):(10172 -10173):(10182 -10183):(10192 -10193):(10202 -10203):
(10212 -10213):(10222 -10223):(10232 -10233):(10242 -10243):(10252 -10253):
(10262 -10263):(10272 -10273):(10282 -10283):(10292 -10293):(10302 -10303):
(10312 -10313):(10322 -10323):(10332 -10333):(10342 -10343):(10352 -10353):
(10362 -10363):(10372 -10373):(10382 -10383):(10392 -10393):(10402 -10403):
(10412 -10413):(10422 -10423):(10432 -10433):(10442 -10443):(10452 -10453):
(10462 -10463):(10472 -10473):(10482 -10483):(10492 -10493):(10502 -10503):
(10512 -10513):(10522 -10523):(10532 -10533):(10542 -10543):(10552 -10553):
(10562 -10563):(10572 -10573):(10582 -10583):(10592 -10593):(10602 -10603):
(10612 -10613):(10622 -10623):(10632 -10633):(10642 -10643):(10652 -10653):
(10662 -10663):(10672 -10673):(10682 -10683):(10692 -10693):(10702 -10703):
(10712 -10713):(10722 -10723):(10732 -10733):(10742 -10743):(10752 -10753):
(10762 -10763):(10772 -10773):(10782 -10783):(10792 -10793):(10802 -10803):
(10812 -10813):(10822 -10823):(10832 -10833):(10842 -10843):(10852 -10853):
(10862 -10863):(10872 -10873):(10882 -10883):(10892 -10893):(10902 -10903):
(10912 -10913):(10922 -10923):(10932 -10933):(10942 -10943):(10952 -10953):
(10962 -10963):(10972 -10973):(10982 -10983):(10992 -10993):(11002 -11003):
(11012 -11013):(11022 -11023):(11032 -11033):(11042 -11043):(11052 -11053):
(11062 -11063):(11072 -11073):(11082 -11083):(11092 -11093):(11102 -11103):
(11112 -11113):(11122 -11123):(11132 -11133):(11142 -11143):(11152 -11153):
(11162 -11163):(11172 -11173):(11182 -11183):(11192 -11193):(11202 -11203):
(11212 -11213):(11222 -11223):(11232 -11233):(11242 -11243):(11252 -11253):
(11262 -11263):(11272 -11273):(11282 -11283):(11292 -11293):(11302 -11303):
(11312 -11313):(11322 -11323):(11332 -11333):(11342 -11343):(11352 -11353)
) imp:n=1
1146 0 -190 (
(11362 -11363):(11372 -11373):(11382 -11383):(11392 -11393):(11402 -11403):
(11412 -11413):(11422 -11423):(11432 -11433):(11442 -11443):(11452 -11453):
(11462 -11463):(11472 -11473):(11482 -11483):(11492 -11493):(11502 -11503):
(11512 -11513):(11522 -11523):(11532 -11533):(11542 -11543):(11552 -11553):
(11562 -11563):(11572 -11573):(11582 -11583):(11592 -11593):(11602 -11603):
(11612 -11613):(11622 -11623):(11632 -11633):(11642 -11643):(11652 -11653):
(11662 -11663):(11672 -11673):(11682 -11683):(11692 -11693):(11702 -11703):
(11712 -11713):(11722 -11723):(11732 -11733):(11742 -11743):(11752 -11753):
(11762 -11763):(11772 -11773):(11782 -11783):(11792 -11793):(11802 -11803):
(11812 -11813):(11822 -11823):(11832 -11833):(11842 -11843):(11852 -11853):
(11862 -11863):(11872 -11873):(11882 -11883):(11892 -11893):
(11902 -11903):(11912 -11913):(11922 -11923):(11932 -11933):(11942 -11943):
(11952 -11953):(11962 -11963):(11972 -11973):(11982 -11983):(11992 -11993):
(12002 -12003):(12012 -12013):(12022 -12023):(12032 -12033):(12042 -12043):
(12052 -12053):(12062 -12063):(12072 -12073):(12082 -12083):(12092 -12093):
(12102 -12103):(12112 -12113):(12122 -12123):(12132 -12133):(12142 -12143):
(12152 -12153):(12162 -12163):(12172 -12173):(12182 -12183):(12192 -12193):
(12202 -12203):(12212 -12213):(12222 -12223):(12232 -12233):(12242 -12243):
(12252 -12253):(12262 -12263):(12272 -12273):(12282 -12283):(12292 -12293):
(12302 -12303):(12312 -12313):(12322 -12323):(12332 -12333):(12342 -12343):
(12352 -12353):(12362 -12363):(12372 -12373):(12382 -12383):(12392 -12393):
(12402 -12403):(12412 -12413):(12422 -12423):(12432 -12433):(12442 -12443):
(12452 -12453):(12462 -12463):(12472 -12473):(12482 -12483):(12492 -12493):
(12502 -12503):(12512 -12513):(12522 -12523):(12532 -12533):(12542 -12543):
(12552 -12553):(12562 -12563):(12572 -12573):(12582 -12583):(12592 -12593):
(12602 -12603):(12612 -12613):(12622 -12623):(12632 -12633):(12642 -12643):
(12652 -12653):(12662 -12663):(12672 -12673):(12682 -12683):(12692 -12693):
(12702 -12703):(12712 -12713):(12722 -12723):(12732 -12733):(12742 -12743):
(12752 -12753):(12762 -12763):(12772 -12773):(12782 -12783)
) imp:n=1
1147 0 -190 (
(12802 -12803):(12812 -12813):(12822 -12823):(12832 -12833):(12842 -12843):
(12852 -12853):(12862 -12863):(12872 -12873):(12882 -12883):(12892 -12893):
(12902 -12903):(12912 -12913):(12922 -12923):(12932 -12933):(12942 -12943):
(12952 -12953):(12962 -12963):(12972 -12973):(12982 -12983):(12992 -12993):
(13002 -13003):(13012 -13013):(13022 -13023):(13032 -13033):(13042 -13043):
(13052 -13053):(13062 -13063):(13072 -13073):(13082 -13083):(13092 -13093):
(13102 -13103):(13112 -13113):(13122 -13123):(13132 -13133):(13142 -13143):
(13152 -13153):(13162 -13163):(13172 -13173):(13182 -13183):(13192 -13193):
(13202 -13203):(13212 -13213):(13222 -13223):(13232 -13233):(13242 -13243):
(13252 -13253):(13262 -13263):(13272 -13273):(13282 -13283):(13292 -13293):
(13302 -13303):(13312 -13313):(13322 -13323):(13332 -13333):(13342 -13343):
(13352 -13353):(13362 -13363):(13372 -13373):(13382 -13383):(13392 -13393):
(13402 -13403):(13412 -13413):(13422 -13423):(13432 -13433):(13442 -13443):
(13452 -13453):(13462 -13463):(13472 -13473):(13482 -13483):(13492 -13493):
(13502 -13503):(13512 -13513):(13522 -13523):(13532 -13533):(13542 -13543):
(13552 -13553):(13562 -13563):(13572 -13573):(13582 -13583):(13592 -13593):
(13602 -13603):(13612 -13613):(13622 -13623):(13632 -13633):(13642 -13643):
(13652 -13653):(13662 -13663):(13672 -13673):(13682 -13683):(14082 -14083):
(13692 -13693):(13702 -13703):(13712 -13713):(13722 -13723):(13732 -13733):
(13742 -13743):(13752 -13753):(13762 -13763):(13772 -13773):(13782 -13783):
(13792 -13793):(13802 -13803):(13812 -13813):(13822 -13823):(13832 -13833):
(13842 -13843):(13852 -13853):(13862 -13863):(13872 -13873):(13882 -13883):
(13892 -13893):(13902 -13903):(13912 -13913):(13922 -13923):(13932 -13933):
(13942 -13943):(13952 -13953):(13962 -13963):(13972 -13973):(13982 -13983):
(13992 -13993):(14002 -14003):(14012 -14013):(14022 -14023):(14032 -14033):
(14042 -14043):(14052 -14053):(14062 -14063):(14072 -14073)
) imp:n=1
1148 0 -190 (
(14092 -14093):(14102 -14103):(14112 -14113):(14122 -14123):(14132 -14133):
(14142 -14143):(14152 -14153):(14162 -14163):(14172 -14173):(14182 -14183):
(14192 -14193):(14202 -14203):(14212 -14213):(14222 -14223):(14232 -14233):
)

```

```

(14242 -14243):(14252 -14253):(14262 -14263):(14272 -14273):(14282 -14283):
(14292 -14293):(14302 -14303):(14312 -14313):(14322 -14323):(14332 -14333):
(14342 -14343):(14352 -14353):(14362 -14363):(14372 -14373):(14382 -14383):
(14392 -14393):(14402 -14403):(14412 -14413):(14422 -14423):(14432 -14433):
(14442 -14443):(14452 -14453):(14462 -14463):(14472 -14473):(14482 -14483):
(14492 -14493):(14502 -14503):(14512 -14513):(14522 -14523):(14532 -14533):
(14542 -14543):(14552 -14553):(14562 -14563):(14572 -14573):(14582 -14583):
(14592 -14593):(14602 -14603):(14612 -14613):(14622 -14623):(14632 -14633):
(14642 -14643):(14652 -14653):(14662 -14663):(14672 -14673):(14682 -14683):
(14692 -14693):(14702 -14703):(14712 -14713):(14722 -14723):(14732 -14733):
(14742 -14743):(14752 -14753):(14762 -14763):(14772 -14773):(14782 -14783):
(14792 -14793):(14802 -14803):(14812 -14813):(14822 -14823):(14832 -14833):
(14842 -14843):(14852 -14853):(14862 -14863):(14872 -14873):(14882 -14883):
(14892 -14893):(14902 -14903):(14912 -14913):(14922 -14923):(14932 -14933):
(14942 -14943):(14952 -14953):(14962 -14963):(14972 -14973):(14982 -14983):
(14992 -14993):(15002 -15003):(15012 -15013):(15022 -15023):(15032 -15033):
(15042 -15043):(15052 -15053):(15062 -15063):(15072 -15073):(15082 -15083):
(15092 -15093):(15102 -15103):(15112 -15113):(15122 -15123):(15132 -15133):
(15142 -15143):(15152 -15153):(15162 -15163):(15172 -15173):(15182 -15183):
(15192 -15193):(15202 -15203):(15212 -15213):(15222 -15223):(15232 -15233):
(15242 -15243):(15252 -15253):(15262 -15263):(15272 -15273):(15282 -15283):
(15292 -15293):(15302 -15303):(15312 -15313):(15322 -15323):(15332 -15333):
(15342 -15343):(15352 -15353):(15362 -15363):(15372 -15373):(15382 -15383):
(15392 -15393):(15402 -15403):(15412 -15413):(15422 -15423)
) imp:n=1
c
... the other 7 steam generators
c
c BEGINNING OF THE REACTOR
c
c kill cell
525 0 190:(1282 2062)
:(-2062 ((2075 -2075.2):(2077 2075.2 -2077.2))
:(2079 2077.2 -2079.2):(2081 2079.2))) imp:n=0
c argon on main vessel Pb
5221 7 -0.0006084 \ $ collettori 8-1
1274 -1281 2188 -190 60000 80000
c HEX 8
80018 80028 80038 80048 80058
80068 80078 80088 80098 80108
80118 80128 80138 80148 80158
80168 80178 80188 80198 80208
80218 80228 80238 80248 80258
80268 80278 80288 80298 80308
80318 80328 80338 80348 80358
80368 80378 80388 80398 80408
80418 80428 80438 80448 80458
80468 80478 80488 80498 80508
80518 80528 80538 80548 80558
80568 80578 80588 80598 80608
80618 80628 80638 80648 80658
80668 80678 80688 80698 80708
80718 80728 80738 80748 80758
80768 80778 80788 80798 80808
80818 80828 80838 80848 80858
80868 80878 80888 80898 80908
80918 80928 80938 80948 80958
80968 80978 80988 80998 81008
81018 81028 81038 81048 81058
81068 81078 81088 81098 81108
81118 81128 81138 81148 81158
81168 81178 81188 81198 81208
81218 81228 81238 81248 81258
81268 81278 81288 81298 81308
81318 81328 81338 81348 81358
81368 81378 81388 81398 81408
81418 81428 81438 81448 81458
81468 81478 81488 81498 81508
81518 81528 81538 81548 81558
81568 81578 81588 81598 81608
81618 81628 81638 81648 81658
81668 81678 81688 81698 81708
81718 81728 81738 81748 81758
81768 81778 81788 81798 81808
81818 81828 81838 81848 82798
81858 81868 81878 81888 81898
81908 81918 81928 81938 81948
81958 81968 81978 81988 81998
82008 82018 82028 82038 82048
82058 82068 82078 82088 82098
82108 82118 82128 82138 82148
82158 82168 82178 82188 82198
82208 82218 82228 82238 82248
82258 82268 82278 82288 82298
82308 82318 82328 82338 82348
82358 82368 82378 82388 82398
82408 82418 82428 82438 82448
82458 82468 82478 82488 82498
82508 82518 82528 82538 82548
82558 82568 82578 82588 82598
82608 82618 82628 82638 82648
82658 82668 82678 82688 82698
82708 82718 82728 82738 82748
82758 82768 82778 82788
82808 82818 82828 82838 82848
82858 82868 82878 82888 82898
82908 82918 82928 82938 82948
82958 82968 82978 82988 82998
83008 83018 83028 83038 83048
83058 83068 83078 83088 83098
83108 83118 83128 83138 83148
83158 83168 83178 83188 83198
83208 83218 83228 83238 83248
83258 83268 83278 83288 83298
83308 83318 83328 83338 83348
83358 83368 83378 83388 83398
83408 83418 83428 83438 83448
83458 83468 83478 83488 83498
83508 83518 83528 83538 83548
83558 83568 83578 83588 83598
83608 83618 83628 83638 83648
83658 83668 83678 83688 84088
83698 83708 83718 83728 83738
83748 83758 83768 83778 83788
83798 83808 83818 83828 83838
83848 83858 83868 83878 83888
83898 83908 83918 83928 83938
83948 83958 83968 83978 83988
83998 84008 84018 84028 84038
84048 84058 84068 84078
84098 84108 84118 84128 84138
84148 84158 84168 84178 84188
84198 84208 84218 84228 84238
84248 84258 84268 84278 84288
84298 84308 84318 84328 84338
84348 84358 84368 84378 84388
84398 84408 84418 84428 84438
84448 84458 84468 84478 84488
84498 84508 84518 84528 84538
84548 84558 84568 84578 84588
84598 84608 84618 84628 84638
84648 84658 84668 84678 84688
84698 84708 84718 84728 84738
84748 84758 84768 84778 84788
84798 84808 84818 84828 84838
84848 84858 84868 84878 84888
84898 84908 84918 84928 84938
84948 84958 84968 84978 84988
84998 85008 85018 85028 85038
85048 85058 85068 85078 85088
85098 85108 85118 85128 85138
85148 85158 85168 85178 85188
85198 85208 85218 85228 85238
85248 85258 85268 85278 85288
85298 85308 85318 85328 85338
85348 85358 85368 85378 85388
85398 85408 85418 85428
c HEX 1
10018 10028 10038 10048 10058
10068 10078 10088 10098 10108
10118 10128 10138 10148 10158
10168 10178 10188 10198 10208
10218 10228 10238 10248 10258
10268 10278 10288 10298 10308
10318 10328 10338 10348 10358
10368 10378 10388 10398 10408
10418 10428 10438 10448 10458
10468 10478 10488 10498 10508
10518 10528 10538 10548 10558
10568 10578 10588 10598 10608
10618 10628 10638 10648 10658
10668 10678 10688 10698 10708
10718 10728 10738 10748 10758
10768 10778 10788 10798 10808

```

```

10818 10828 10838 10848 10858
10868 10878 10888 10898 10908
10918 10928 10938 10948 10958
10968 10978 10988 10998 11008
11018 11028 11038 11048 11058
11068 11078 11088 11098 11108
11118 11128 11138 11148 11158
11168 11178 11188 11198 11208
11218 11228 11238 11248 11258
11268 11278 11288 11298 11308
11318 11328 11338 11348 11358
11368 11378 11388 11398 11408
11418 11428 11438 11448 11458
11468 11478 11488 11498 11508
11518 11528 11538 11548 11558
11568 11578 11588 11598 11608
11618 11628 11638 11648 11658
11668 11678 11688 11698 11708
11718 11728 11738 11748 11758
11768 11778 11788 11798 11808
11818 11828 11838 11848 12798
11858 11868 11878 11888 11898
11908 11918 11928 11938 11948
11958 11968 11978 11988 11998
12008 12018 12028 12038 12048
12058 12068 12078 12088 12098
12108 12118 12128 12138 12148
12158 12168 12178 12188 12198
12208 12218 12228 12238 12248
12258 12268 12278 12288 12298
12308 12318 12328 12338 12348
12358 12368 12378 12388 12398
12408 12418 12428 12438 12448
12458 12468 12478 12488 12498
12508 12518 12528 12538 12548
12558 12568 12578 12588 12598
12608 12618 12628 12638 12648
12658 12668 12678 12688 12698
12708 12718 12728 12738 12748
12758 12768 12778 12788
12808 12818 12828 12838 12848
12858 12868 12878 12888 12898
12908 12918 12928 12938 12948
12958 12968 12978 12988 12998
13008 13018 13028 13038 13048
13058 13068 13078 13088 13098
13108 13118 13128 13138 13148
13158 13168 13178 13188 13198
13208 13218 13228 13238 13248
13258 13268 13278 13288 13298
13308 13318 13328 13338 13348
13358 13368 13378 13388 13398
13408 13418 13428 13438 13448
13458 13468 13478 13488 13498
13508 13518 13528 13538 13548
13558 13568 13578 13588 13598
13608 13618 13628 13638 13648
13658 13668 13678 13688 14088
13698 13708 13718 13728 13738
13748 13758 13768 13778 13788
13798 13808 13818 13828 13838
13848 13858 13868 13878 13888
13898 13908 13918 13928 13938
13948 13958 13968 13978 13988
13998 14008 14018 14028 14038
14048 14058 14068 14078
14098 14108 14118 14128 14138
14148 14158 14168 14178 14188
14198 14208 14218 14228 14238
14248 14258 14268 14278 14288
14298 14308 14318 14328 14338
14348 14358 14368 14378 14388
14398 14408 14418 14428 14438
14448 14458 14468 14478 14488
14498 14508 14518 14528 14538
14548 14558 14568 14578 14588
14598 14608 14618 14628 14638
14648 14658 14668 14678 14688
14698 14708 14718 14728 14738
14748 14758 14768 14778 14788
14798 14808 14818 14828 14838
14848 14858 14868 14878 14888

14898 14908 14918 14928 14938
14948 14958 14968 14978 14988
14998 15008 15018 15028 15038
15048 15058 15068 15078 15088
15098 15108 15118 15128 15138
15148 15158 15168 15178 15188
15198 15208 15218 15228 15238
15248 15258 15268 15278 15288
15298 15308 15318 15328 15338
15348 15358 15368 15378 15388
15398 15408 15418 15428
imp:n=1
c
c argon on main vessel Pb
5222 7 -0.0006084 \ $ collettori 2-3
1274 -1281 2188 -190 -60000 80000
c HEX 2
20018 20028 20038 20048 20058
20068 20078 20088 20098 20108
20118 20128 20138 20148 20158
20168 20178 20188 20198 20208
20218 20228 20238 20248 20258
20268 20278 20288 20298 20308
20318 20328 20338 20348 20358
20368 20378 20388 20398 20408
20418 20428 20438 20448 20458
20468 20478 20488 20498 20508
20518 20528 20538 20548 20558
20568 20578 20588 20598 20608
20618 20628 20638 20648 20658
20668 20678 20688 20698 20708
20718 20728 20738 20748 20758
20768 20778 20788 20798 20808
20818 20828 20838 20848 20858
20868 20878 20888 20898 20908
20918 20928 20938 20948 20958
20968 20978 20988 20998 21008
21018 21028 21038 21048 21058
21068 21078 21088 21098 21108
21118 21128 21138 21148 21158
21168 21178 21188 21198 21208
21218 21228 21238 21248 21258
21268 21278 21288 21298 21308
21318 21328 21338 21348 21358
21368 21378 21388 21398 21408
21418 21428 21438 21448 21458
21468 21478 21488 21498 21508
21518 21528 21538 21548 21558
21568 21578 21588 21598 21608
21618 21628 21638 21648 21658
21668 21678 21688 21698 21708
21718 21728 21738 21748 21758
21768 21778 21788 21798 21808
21818 21828 21838 21848 22798
21858 21868 21878 21888 21898
21908 21918 21928 21938 21948
21958 21968 21978 21988 21998
22008 22018 22028 22038 22048
22058 22068 22078 22088 22098
22108 22118 22128 22138 22148
22158 22168 22178 22188 22198
22208 22218 22228 22238 22248
22258 22268 22278 22288 22298
22308 22318 22328 22338 22348
22358 22368 22378 22388 22398
22408 22418 22428 22438 22448
22458 22468 22478 22488 22498
22508 22518 22528 22538 22548
22558 22568 22578 22588 22598
22608 22618 22628 22638 22648
22658 22668 22678 22688 22698
22708 22718 22728 22738 22748
22758 22768 22778 22788
22808 22818 22828 22838 22848
22858 22868 22878 22888 22898
22908 22918 22928 22938 22948
22958 22968 22978 22988 22998
23008 23018 23028 23038 23048
23058 23068 23078 23088 23098
23108 23118 23128 23138 23148
23158 23168 23178 23188 23198
23208 23218 23228 23238 23248

```

```

23258 23268 23278 23288 23298
23308 23318 23328 23338 23348
23358 23368 23378 23388 23398
23408 23418 23428 23438 23448
23458 23468 23478 23488 23498
23508 23518 23528 23538 23548
23558 23568 23578 23588 23598
23608 23618 23628 23638 23648
23658 23668 23678 23688 24088
23698 23708 23718 23728 23738
23748 23758 23768 23778 23788
23798 23808 23818 23828 23838
23848 23858 23868 23878 23888
23898 23908 23918 23928 23938
23948 23958 23968 23978 23988
23998 24008 24018 24028 24038
24048 24058 24068 24078
24098 24108 24118 24128 24138
24148 24158 24168 24178 24188
24198 24208 24218 24228 24238
24248 24258 24268 24278 24288
24298 24308 24318 24328 24338
24348 24358 24368 24378 24388
24398 24408 24418 24428 24438
24448 24458 24468 24478 24488
24498 24508 24518 24528 24538
24548 24558 24568 24578 24588
24598 24608 24618 24628 24638
24648 24658 24668 24678 24688
24698 24708 24718 24728 24738
24748 24758 24768 24778 24788
24798 24808 24818 24828 24838
24848 24858 24868 24878 24888
24898 24908 24918 24928 24938
24948 24958 24968 24978 24988
24998 25008 25018 25028 25038
25048 25058 25068 25078 25088
25098 25108 25118 25128 25138
25148 25158 25168 25178 25188
25198 25208 25218 25228 25238
25248 25258 25268 25278 25288
25298 25308 25318 25328 25338
25348 25358 25368 25378 25388
25398 25408 25418 25428
c HEX 3
30018 30028 30038 30048 30058
30068 30078 30088 30098 30108
30118 30128 30138 30148 30158
30168 30178 30188 30198 30208
30218 30228 30238 30248 30258
30268 30278 30288 30298 30308
30318 30328 30338 30348 30358
30368 30378 30388 30398 30408
30418 30428 30438 30448 30458
30468 30478 30488 30498 30508
30518 30528 30538 30548 30558
30568 30578 30588 30598 30608
30618 30628 30638 30648 30658
30668 30678 30688 30698 30708
30718 30728 30738 30748 30758
30768 30778 30788 30798 30808
30818 30828 30838 30848 30858
30868 30878 30888 30898 30908
30918 30928 30938 30948 30958
30968 30978 30988 30998 31008
31018 31028 31038 31048 31058
31068 31078 31088 31098 31108
31118 31128 31138 31148 31158
31168 31178 31188 31198 31208
31218 31228 31238 31248 31258
31268 31278 31288 31298 31308
31318 31328 31338 31348 31358
31368 31378 31388 31398 31408
31418 31428 31438 31448 31458
31468 31478 31488 31498 31508
31518 31528 31538 31548 31558
31568 31578 31588 31598 31608
31618 31628 31638 31648 31658
31668 31678 31688 31698 31708
31718 31728 31738 31748 31758
31768 31778 31788 31798 31808
31818 31828 31838 31848 32798
31858 31868 31878 31888 31898
31908 31918 31928 31938 31948
31958 31968 31978 31988 31998
32008 32018 32028 32038 32048
32058 32068 32078 32088 32098
32108 32118 32128 32138 32148
32158 32168 32178 32188 32198
32208 32218 32228 32238 32248
32258 32268 32278 32288 32298
32308 32318 32328 32338 32348
32358 32368 32378 32388 32398
32408 32418 32428 32438 32448
32458 32468 32478 32488 32498
32508 32518 32528 32538 32548
32558 32568 32578 32588 32598
32608 32618 32628 32638 32648
32658 32668 32678 32688 32698
32708 32718 32728 32738 32748
32758 32768 32778 32788
32808 32818 32828 32838 32848
32858 32868 32878 32888 32898
32908 32918 32928 32938 32948
32958 32968 32978 32988 32998
33008 33018 33028 33038 33048
33058 33068 33078 33088 33098
33108 33118 33128 33138 33148
33158 33168 33178 33188 33198
33208 33218 33228 33238 33248
33258 33268 33278 33288 33298
33308 33318 33328 33338 33348
33358 33368 33378 33388 33398
33408 33418 33428 33438 33448
33458 33468 33478 33488 33498
33508 33518 33528 33538 33548
33558 33568 33578 33588 33598
33608 33618 33628 33638 33648
33658 33668 33678 33688 34088
33698 33708 33718 33728 33738
33748 33758 33768 33778 33788
33798 33808 33818 33828 33838
33848 33858 33868 33878 33888
33898 33908 33918 33928 33938
33948 33958 33968 33978 33988
33998 34008 34018 34028 34038
34048 34058 34068 34078
34098 34108 34118 34128 34138
34148 34158 34168 34178 34188
34198 34208 34218 34228 34238
34248 34258 34268 34278 34288
34298 34308 34318 34328 34338
34348 34358 34368 34378 34388
34398 34408 34418 34428 34438
34448 34458 34468 34478 34488
34498 34508 34518 34528 34538
34548 34558 34568 34578 34588
34598 34608 34618 34628 34638
34648 34658 34668 34678 34688
34698 34708 34718 34728 34738
34748 34758 34768 34778 34788
34798 34808 34818 34828 34838
34848 34858 34868 34878 34888
34898 34908 34918 34928 34938
34948 34958 34968 34978 34988
34998 35008 35018 35028 35038
35048 35058 35068 35078 35088
35098 35108 35118 35128 35138
35148 35158 35168 35178 35188
35198 35208 35218 35228 35238
35248 35258 35268 35278 35288
35298 35308 35318 35328 35338
35348 35358 35368 35378 35388
35398 35408 35418 35428
imp:n=1
c
c argon on main vessel Pb
5223 7 -0.0006084 \$/ collettori 4-5
1274 -1281 2188 -190 -60000 -80000
c HEX 4
40018 40028 40038 40048 40058
40068 40078 40088 40098 40108
40118 40128 40138 40148 40158
40168 40178 40188 40198 40208

```



```

52908 52918 52928 52938 52948
52958 52968 52978 52988 52998
53008 53018 53028 53038 53048
53058 53068 53078 53088 53098
53108 53118 53128 53138 53148
53158 53168 53178 53188 53198
53208 53218 53228 53238 53248
53258 53268 53278 53288 53298
53308 53318 53328 53338 53348
53358 53368 53378 53388 53398
53408 53418 53428 53438 53448
53458 53468 53478 53488 53498
53508 53518 53528 53538 53548
53558 53568 53578 53588 53598
53608 53618 53628 53638 53648
53658 53668 53678 53688 54088
53698 53708 53718 53728 53738
53748 53758 53768 53778 53788
53798 53808 53818 53828 53838
53848 53858 53868 53878 53888
53898 53908 53918 53928 53938
53948 53958 53968 53978 53988
53998 54008 54018 54028 54038
54048 54058 54068 54078
54098 54108 54118 54128 54138
54148 54158 54168 54178 54188
54198 54208 54218 54228 54238
54248 54258 54268 54278 54288
54298 54308 54318 54328 54338
54348 54358 54368 54378 54388
54398 54408 54418 54428 54438
54448 54458 54468 54478 54488
54498 54508 54518 54528 54538
54548 54558 54568 54578 54588
54598 54608 54618 54628 54638
54648 54658 54668 54678 54688
54698 54708 54718 54728 54738
54748 54758 54768 54778 54788
54798 54808 54818 54828 54838
54848 54858 54868 54878 54888
54898 54908 54918 54928 54938
54948 54958 54968 54978 54988
54998 55008 55018 55028 55038
55048 55058 55068 55078 55088
55098 55108 55118 55128 55138
55148 55158 55168 55178 55188
55198 55208 55218 55228 55238
55248 55258 55268 55278 55288
55298 55308 55318 55328 55338
55348 55358 55368 55378 55388
55398 55408 55418 55428
imp:n=1
c
c argon on main vessel Pb
5224 7 -0.0006084          \% collettori 6-7
      1274 -1281 2188 -190 60000 -80000
c HEX 6
60018 60028 60038 60048 60058
60068 60078 60088 60098 60108
60118 60128 60138 60148 60158
60168 60178 60188 60198 60208
60218 60228 60238 60248 60258
60268 60278 60288 60298 60308
60318 60328 60338 60348 60358
60368 60378 60388 60398 60408
60418 60428 60438 60448 60458
60468 60478 60488 60498 60508
60518 60528 60538 60548 60558
60568 60578 60588 60598 60608
60618 60628 60638 60648 60658
60668 60678 60688 60698 60708
60718 60728 60738 60748 60758
60768 60778 60788 60798 60808
60818 60828 60838 60848 60858
60868 60878 60888 60898 60908
60918 60928 60938 60948 60958
60968 60978 60988 60998 61008
61018 61028 61038 61048 61058
61068 61078 61088 61098 61108
61118 61128 61138 61148 61158
61168 61178 61188 61198 61208
61218 61228 61238 61248 61258
61268 61278 61288 61298 61308
61318 61328 61338 61348 61358
61368 61378 61388 61398 61408
61418 61428 61438 61448 61458
61468 61478 61488 61498 61508
61518 61528 61538 61548 61558
61568 61578 61588 61598 61608
61618 61628 61638 61648 61658
61668 61678 61688 61698 61708
61718 61728 61738 61748 61758
61768 61778 61788 61798 61808
61818 61828 61838 61848 62798
61858 61868 61878 61888 61898
61908 61918 61928 61938 61948
61958 61968 61978 61988 61998
62008 62018 62028 62038 62048
62058 62068 62078 62088 62098
62108 62118 62128 62138 62148
62158 62168 62178 62188 62198
62208 62218 62228 62238 62248
62258 62268 62278 62288 62298
62308 62318 62328 62338 62348
62358 62368 62378 62388 62398
62408 62418 62428 62438 62448
62458 62468 62478 62488 62498
62508 62518 62528 62538 62548
62558 62568 62578 62588 62598
62608 62618 62628 62638 62648
62658 62668 62678 62688 62698
62708 62718 62728 62738 62748
62758 62768 62778 62788
62808 62818 62828 62838 62848
62858 62868 62878 62888 62898
62908 62918 62928 62938 62948
62958 62968 62978 62988 62998
63008 63018 63028 63038 63048
63058 63068 63078 63088 63098
63108 63118 63128 63138 63148
63158 63168 63178 63188 63198
63208 63218 63228 63238 63248
63258 63268 63278 63288 63298
63308 63318 63328 63338 63348
63358 63368 63378 63388 63398
63408 63418 63428 63438 63448
63458 63468 63478 63488 63498
63508 63518 63528 63538 63548
63558 63568 63578 63588 63598
63608 63618 63628 63638 63648
63658 63668 63678 63688 64088
63698 63708 63718 63728 63738
63748 63758 63768 63778 63788
63798 63808 63818 63828 63838
63848 63858 63868 63878 63888
63898 63908 63918 63928 63938
63948 63958 63968 63978 63988
63998 64008 64018 64028 64038
64048 64058 64068 64078
64098 64108 64118 64128 64138
64148 64158 64168 64178 64188
64198 64208 64218 64228 64238
64248 64258 64268 64278 64288
64298 64308 64318 64328 64338
64348 64358 64368 64378 64388
64398 64408 64418 64428 64438
64448 64458 64468 64478 64488
64498 64508 64518 64528 64538
64548 64558 64568 64578 64588
64598 64608 64618 64628 64638
64648 64658 64668 64678 64688
64698 64708 64718 64728 64738
64748 64758 64768 64778 64788
64798 64808 64818 64828 64838
64848 64858 64868 64878 64888
64898 64908 64918 64928 64938
64948 64958 64968 64978 64988
64998 65008 65018 65028 65038
65048 65058 65068 65078 65088
65098 65108 65118 65128 65138
65148 65158 65168 65178 65188
65198 65208 65218 65228 65238
65248 65258 65268 65278 65288
65298 65308 65318 65328 65338

```

```

65348 65358 65368 65378 65388
65398 65408 65418 65428
c HEX 7
70018 70028 70038 70048 70058
70068 70078 70088 70098 70108
70118 70128 70138 70148 70158
70168 70178 70188 70198 70208
70218 70228 70238 70248 70258
70268 70278 70288 70298 70308
70318 70328 70338 70348 70358
70368 70378 70388 70398 70408
70418 70428 70438 70448 70458
70468 70478 70488 70498 70508
70518 70528 70538 70548 70558
70568 70578 70588 70598 70608
70618 70628 70638 70648 70658
70668 70678 70688 70698 70708
70718 70728 70738 70748 70758
70768 70778 70788 70798 70808
70818 70828 70838 70848 70858
70868 70878 70888 70898 70908
70918 70928 70938 70948 70958
70968 70978 70988 70998 71008
71018 71028 71038 71048 71058
71068 71078 71088 71098 71108
71118 71128 71138 71148 71158
71168 71178 71188 71198 71208
71218 71228 71238 71248 71258
71268 71278 71288 71298 71308
71318 71328 71338 71348 71358
71368 71378 71388 71398 71408
71418 71428 71438 71448 71458
71468 71478 71488 71498 71508
71518 71528 71538 71548 71558
71568 71578 71588 71598 71608
71618 71628 71638 71648 71658
71668 71678 71688 71698 71708
71718 71728 71738 71748 71758
71768 71778 71788 71798 71808
71818 71828 71838 71848 72798
71858 71868 71878 71888 71898
71908 71918 71928 71938 71948
71958 71968 71978 71988 71998
72008 72018 72028 72038 72048
72058 72068 72078 72088 72098
72108 72118 72128 72138 72148
72158 72168 72178 72188 72198
72208 72218 72228 72238 72248
72258 72268 72278 72288 72298
72308 72318 72328 72338 72348
72358 72368 72378 72388 72398
72408 72418 72428 72438 72448
72458 72468 72478 72488 72498
72508 72518 72528 72538 72548
72558 72568 72578 72588 72598
72608 72618 72628 72638 72648
72658 72668 72678 72688 72698
72708 72718 72728 72738 72748
72758 72768 72778 72788
72808 72818 72828 72838 72848
72858 72868 72878 72888 72898
72908 72918 72928 72938 72948
72958 72968 72978 72988 72998
73008 73018 73028 73038 73048
73058 73068 73078 73088 73098
73108 73118 73128 73138 73148
73158 73168 73178 73188 73198
73208 73218 73228 73238 73248
73258 73268 73278 73288 73298
73308 73318 73328 73338 73348
73358 73368 73378 73388 73398
73408 73418 73428 73438 73448
73458 73468 73478 73488 73498
73508 73518 73528 73538 73548
73558 73568 73578 73588 73598
73608 73618 73628 73638 73648
73658 73668 73678 73688 74088
73698 73708 73718 73728 73738
73748 73758 73768 73778 73788
73798 73808 73818 73828 73838
73848 73858 73868 73878 73888
73898 73908 73918 73928 73938
73948 73958 73968 73978 73988
73998 74008 74018 74028 74038
74048 74058 74068 74078
74098 74108 74118 74128 74138
74148 74158 74168 74178 74188
74198 74208 74218 74228 74238
74248 74258 74268 74278 74288
74298 74308 74318 74328 74338
74348 74358 74368 74378 74388
74398 74408 74418 74428 74438
74448 74458 74468 74478 74488
74498 74508 74518 74528 74538
74548 74558 74568 74578 74588
74598 74608 74618 74628 74638
74648 74658 74668 74678 74688
74698 74708 74718 74728 74738
74748 74758 74768 74778 74788
74798 74808 74818 74828 74838
74848 74858 74868 74878 74888
74898 74908 74918 74928 74938
74948 74958 74968 74978 74988
74998 75008 75018 75028 75038
75048 75058 75068 75078 75088
75098 75108 75118 75128 75138
75148 75158 75168 75178 75188
75198 75208 75218 75228 75238
75248 75258 75268 75278 75288
75298 75308 75318 75328 75338
75348 75358 75368 75378 75388
75398 75408 75418 75428
imp:n=1
c main vessel and inner vessel sustaining support
520 4 -7.74 (2062 -2065 1280 -1283)
:(2066 -2067 2068 -2062 2070 2071 2072 2073 606 607 608 609
(-2074:-2076:-2078:-2080))
:(1281 -1282 2062 -190)
:(2074 -2075)
:(2076 -2077)
:(2078 -2079)
:(2080 -2081)
imp:n=1
c Pb in reactor pool
5211 2 -10.52 \ $ settore HEX 8-1
( (-2080:-2078:-2076:-2074) ((-2066.1 (1272 -2062)
:(-257 -1272))
:(-2062 2067.1)
:(2066 -2067 (-2078:-2076:-2074:-2072)
(-2070:-2071:-2072:-2073:-606:-607:-608:-609)))
:(2062 -2065 1283 -1281)
:(2065 -2060 1280 -1281):(1041 -1280 (-1042:-543:-1044:-545)))
:(1274 2060 2061 -1072 -1281)
:(1275 1079 -1281 1072 -1079.3)
:(1277 -1278 1073 1082 1083 548 549 -2188)
:(1278 -1281 1078.3 -2188
c collettore 1 (asse x)
(((1092 -2001 1278)
:(1093 2001 -2002)
:(1094 2002 -2003)
:(1095 2003 -2004)
:(1096 2004 -2005)
:(1097 2005 -2006)
:(1098 2006 -1088)))
c collettore 2 (asse x +45)
((557 -2001 1278)
:(558 2001 -2002)
:(559 2002 -2003)
:(560 2003 -2004)
:(561 2004 -2005)
:(562 2005 -2006)
:(563 2006 -1088)))
c altro
:(1277 -1281 1088 -2188)
:(1077.1 -1077.3 1275 -1277 -1075)
:(1274 -1277 1075 -2188) ) 60000 80000
c HEX 8
80018 80028 80038 80048 80058
80068 80078 80088 80098 80108
80118 80128 80138 80148 80158
80168 80178 80188 80198 80208
80218 80228 80238 80248 80258
80268 80278 80288 80298 80308
80318 80328 80338 80348 80358

```

80368	80378	80388	80398	80408	84448	84458	84468	84478	84488
80418	80428	80438	80448	80458	84498	84508	84518	84528	84538
80468	80478	80488	80498	80508	84548	84558	84568	84578	84588
80518	80528	80538	80548	80558	84598	84608	84618	84628	84638
80568	80578	80588	80598	80608	84648	84658	84668	84678	84688
80618	80628	80638	80648	80658	84698	84708	84718	84728	84738
80668	80678	80688	80698	80708	84748	84758	84768	84778	84788
80718	80728	80738	80748	80758	84798	84808	84818	84828	84838
80768	80778	80788	80798	80808	84848	84858	84868	84878	84888
80818	80828	80838	80848	80858	84898	84908	84918	84928	84938
80868	80878	80888	80898	80908	84948	84958	84968	84978	84988
80918	80928	80938	80948	80958	84998	85008	85018	85028	85038
80968	80978	80988	80998	81008	85048	85058	85068	85078	85088
81018	81028	81038	81048	81058	85098	85108	85118	85128	85138
81068	81078	81088	81098	81108	85148	85158	85168	85178	85188
81118	81128	81138	81148	81158	85198	85208	85218	85228	85238
81168	81178	81188	81198	81208	85248	85258	85268	85278	85288
81218	81228	81238	81248	81258	85298	85308	85318	85328	85338
81268	81278	81288	81298	81308	85348	85358	85368	85378	85388
81318	81328	81338	81348	81358	85398	85408	85418	85428	
81368	81378	81388	81398	81408	c HEX 1				
81418	81428	81438	81448	81458	10018	10028	10038	10048	10058
81468	81478	81488	81498	81508	10068	10078	10088	10098	10108
81518	81528	81538	81548	81558	10118	10128	10138	10148	10158
81568	81578	81588	81598	81608	10168	10178	10188	10198	10208
81618	81628	81638	81648	81658	10218	10228	10238	10248	10258
81668	81678	81688	81698	81708	10268	10278	10288	10298	10308
81718	81728	81738	81748	81758	10318	10328	10338	10348	10358
81768	81778	81788	81798	81808	10368	10378	10388	10398	10408
81818	81828	81838	81848	82798	10418	10428	10438	10448	10458
81858	81868	81878	81888	81898	10468	10478	10488	10498	10508
81908	81918	81928	81938	81948	10518	10528	10538	10548	10558
81958	81968	81978	81988	81998	10568	10578	10588	10598	10608
82008	82018	82028	82038	82048	10618	10628	10638	10648	10658
82058	82068	82078	82088	82098	10668	10678	10688	10698	10708
82108	82118	82128	82138	82148	10718	10728	10738	10748	10758
82158	82168	82178	82188	82198	10768	10778	10788	10798	10808
82208	82218	82228	82238	82248	10818	10828	10838	10848	10858
82258	82268	82278	82288	82298	10868	10878	10888	10898	10908
82308	82318	82328	82338	82348	10918	10928	10938	10948	10958
82358	82368	82378	82388	82398	10968	10978	10988	10998	11008
82408	82418	82428	82438	82448	11018	11028	11038	11048	11058
82458	82468	82478	82488	82498	11068	11078	11088	11098	11108
82508	82518	82528	82538	82548	11118	11128	11138	11148	11158
82558	82568	82578	82588	82598	11168	11178	11188	11198	11208
82608	82618	82628	82638	82648	11218	11228	11238	11248	11258
82658	82668	82678	82688	82698	11268	11278	11288	11298	11308
82708	82718	82728	82738	82748	11318	11328	11338	11348	11358
82758	82768	82778	82788		11368	11378	11388	11398	11408
82808	82818	82828	82838	82848	11418	11428	11438	11448	11458
82858	82868	82878	82888	82898	11468	11478	11488	11498	11508
82908	82918	82928	82938	82948	11518	11528	11538	11548	11558
82958	82968	82978	82988	82998	11568	11578	11588	11598	11608
83008	83018	83028	83038	83048	11618	11628	11638	11648	11658
83058	83068	83078	83088	83098	11668	11678	11688	11698	11708
83108	83118	83128	83138	83148	11718	11728	11738	11748	11758
83158	83168	83178	83188	83198	11768	11778	11788	11798	11808
83208	83218	83228	83238	83248	11818	11828	11838	11848	12798
83258	83268	83278	83288	83298	11858	11868	11878	11888	11898
83308	83318	83328	83338	83348	11908	11918	11928	11938	11948
83358	83368	83378	83388	83398	11958	11968	11978	11988	11998
83408	83418	83428	83438	83448	12008	12018	12028	12038	12048
83458	83468	83478	83488	83498	12058	12068	12078	12088	12098
83508	83518	83528	83538	83548	12108	12118	12128	12138	12148
83558	83568	83578	83588	83598	12158	12168	12178	12188	12198
83608	83618	83628	83638	83648	12208	12218	12228	12238	12248
83658	83668	83678	83688	84088	12258	12268	12278	12288	12298
83698	83708	83718	83728	83738	12308	12318	12328	12338	12348
83748	83758	83768	83778	83788	12358	12368	12378	12388	12398
83798	83808	83818	83828	83838	12408	12418	12428	12438	12448
83848	83858	83868	83878	83888	12458	12468	12478	12488	12498
83898	83908	83918	83928	83938	12508	12518	12528	12538	12548
83948	83958	83968	83978	83988	12558	12568	12578	12588	12598
83998	84008	84018	84028	84038	12608	12618	12628	12638	12648
84048	84058	84068	84078		12658	12668	12678	12688	12698
84098	84108	84118	84128	84138	12708	12718	12728	12738	12748
84148	84158	84168	84178	84188	12758	12768	12778	12788	
84198	84208	84218	84228	84238	12808	12818	12828	12838	12848
84248	84258	84268	84278	84288	12858	12868	12878	12888	12898
84298	84308	84318	84328	84338	12908	12918	12928	12938	12948
84348	84358	84368	84378	84388	12958	12968	12978	12988	12998
84398	84408	84418	84428	84438	13008	13018	13028	13038	13048


```

13058 13068 13078 13088 13098
13108 13118 13128 13138 13148
13158 13168 13178 13188 13198
13208 13218 13228 13238 13248
13258 13268 13278 13288 13298
13308 13318 13328 13338 13348
13358 13368 13378 13388 13398
13408 13418 13428 13438 13448
13458 13468 13478 13488 13498
13508 13518 13528 13538 13548
13558 13568 13578 13588 13598
13608 13618 13628 13638 13648
13658 13668 13678 13688 14088
13698 13708 13718 13728 13738
13748 13758 13768 13778 13788
13798 13808 13818 13828 13838
13848 13858 13868 13878 13888
13898 13908 13918 13928 13938
13948 13958 13968 13978 13988
13998 14008 14018 14028 14038
14048 14058 14068 14078
14098 14108 14118 14128 14138
14148 14158 14168 14178 14188
14198 14208 14218 14228 14238
14248 14258 14268 14278 14288
14298 14308 14318 14328 14338
14348 14358 14368 14378 14388
14398 14408 14418 14428 14438
14448 14458 14468 14478 14488
14498 14508 14518 14528 14538
14548 14558 14568 14578 14588
14598 14608 14618 14628 14638
14648 14658 14668 14678 14688
14698 14708 14718 14728 14738
14748 14758 14768 14778 14788
14798 14808 14818 14828 14838
14848 14858 14868 14878 14888
14898 14908 14918 14928 14938
14948 14958 14968 14978 14988
14998 15008 15018 15028 15038
15048 15058 15068 15078 15088
15098 15108 15118 15128 15138
15148 15158 15168 15178 15188
15198 15208 15218 15228 15238
15248 15258 15268 15278 15288
15298 15308 15318 15328 15338
15348 15358 15368 15378 15388
15398 15408 15418 15428
imp:n=1
c
c Pb in reactor pool
5212 2 -10.52 \$/ settore HEX 2-3
( (-2080:-2078:-2076:-2074) ((-2066.1 (1272 -2062)
:(-257 -1272))
:(-2062 2067.1)
:(2066 -2067 (-2078:-2076:-2074:-2072)
(-2070:-2071:-2072:-2073:-606:-607:-608:-609)))
:(2062 -2065 1283 -1281)
:((2065 -2060 1280 -1281):(1041 -1280 (-1042:-543:-1044:-545)))
:(1274 2060 2061 -1072 -1281)
:(1275 1079 -1281 1072 -1079.3)
:(1277 -1278 1073 1082 1083 548 549 -2188)
:(1278 -1281 1078.3 -2188
23008 23018 23028 23038 23048
23058 23068 23078 23088 23098
23108 23118 23128 23138 23148
23158 23168 23178 23188 23198
23208 23218 23228 23238 23248
23258 23268 23278 23288 23298
23308 23318 23328 23338 23348
23358 23368 23378 23388 23398
23408 23418 23428 23438 23448
23458 23468 23478 23488 23498
23508 23518 23528 23538 23548
23558 23568 23578 23588 23598
23608 23618 23628 23638 23648
23658 23668 23678 23688 24088
23698 23708 23718 23728 23738
23748 23758 23768 23778 23788
23798 23808 23818 23828 23838
23848 23858 23868 23878 23888
23898 23908 23918 23928 23938
23948 23958 23968 23978 23988
c collettore 3 (asse y)
((2017 -2001 1278)
:(2018 2001 -2002)
:(2019 2002 -2003)
:(2020 2003 -2004)
:(2021 2004 -2005)
:(2022 2005 -2006)
:(2023 2006 -1088))
c collettore 8 (asse y +458)
((599 -2001 1278)
:(600 2001 -2002)
:(601 2002 -2003)
:(602 2003 -2004)
:(603 2004 -2005)
:(604 2005 -2006)
:(605 2006 -1088)))
c altro
:(1277 -1281 1088 -2188)
:(1077.1 -1077.3 1275 -1277 -1075)
:(1274 -1277 1075 -2188) ) -60000 80000
c HEX 2
20018 20028 20038 20048 20058
20068 20078 20088 20098 20108
20118 20128 20138 20148 20158
20168 20178 20188 20198 20208
20218 20228 20238 20248 20258
20268 20278 20288 20298 20308
20318 20328 20338 20348 20358
20368 20378 20388 20398 20408
20418 20428 20438 20448 20458
20468 20478 20488 20498 20508
20518 20528 20538 20548 20558
20568 20578 20588 20598 20608
20618 20628 20638 20648 20658
20668 20678 20688 20698 20708
20718 20728 20738 20748 20758
20768 20778 20788 20798 20808
20818 20828 20838 20848 20858
20868 20878 20888 20898 20908
20918 20928 20938 20948 20958
20968 20978 20988 20998 21008
21018 21028 21038 21048 21058
21068 21078 21088 21098 21108
21118 21128 21138 21148 21158
21168 21178 21188 21198 21208
21218 21228 21238 21248 21258
21268 21278 21288 21298 21308
21318 21328 21338 21348 21358
21368 21378 21388 21398 21408
21418 21428 21438 21448 21458
21468 21478 21488 21498 21508
21518 21528 21538 21548 21558
21568 21578 21588 21598 21608
21618 21628 21638 21648 21658
21668 21678 21688 21698 21708
21718 21728 21738 21748 21758
21768 21778 21788 21798 21808
21818 21828 21838 21848 22798
21858 21868 21878 21888 21898
21908 21918 21928 21938 21948
21958 21968 21978 21988 21998
22008 22018 22028 22038 22048
22058 22068 22078 22088 22098
22108 22118 22128 22138 22148
22158 22168 22178 22188 22198
22208 22218 22228 22238 22248
22258 22268 22278 22288 22298
22308 22318 22328 22338 22348
22358 22368 22378 22388 22398
22408 22418 22428 22438 22448
22458 22468 22478 22488 22498
22508 22518 22528 22538 22548
22558 22568 22578 22588 22598
22608 22618 22628 22638 22648
22658 22668 22678 22688 22698
22708 22718 22728 22738 22748
22758 22768 22778 22788
22808 22818 22828 22838 22848
22858 22868 22878 22888 22898
22908 22918 22928 22938 22948
22958 22968 22978 22988 22998
23008 23018 23028 23038 23048
23058 23068 23078 23088 23098
23108 23118 23128 23138 23148
23158 23168 23178 23188 23198
23208 23218 23228 23238 23248
23258 23268 23278 23288 23298
23308 23318 23328 23338 23348
23358 23368 23378 23388 23398
23408 23418 23428 23438 23448
23458 23468 23478 23488 23498
23508 23518 23528 23538 23548
23558 23568 23578 23588 23598
23608 23618 23628 23638 23648
23658 23668 23678 23688 24088
23698 23708 23718 23728 23738
23748 23758 23768 23778 23788
23798 23808 23818 23828 23838
23848 23858 23868 23878 23888
23898 23908 23918 23928 23938
23948 23958 23968 23978 23988

```

```

23998 24008 24018 24028 24038
24048 24058 24068 24078
24098 24108 24118 24128 24138
24148 24158 24168 24178 24188
24198 24208 24218 24228 24238
24248 24258 24268 24278 24288
24298 24308 24318 24328 24338
24348 24358 24368 24378 24388
24398 24408 24418 24428 24438
24448 24458 24468 24478 24488
24498 24508 24518 24528 24538
24548 24558 24568 24578 24588
24598 24608 24618 24628 24638
24648 24658 24668 24678 24688
24698 24708 24718 24728 24738
24748 24758 24768 24778 24788
24798 24808 24818 24828 24838
24848 24858 24868 24878 24888
24898 24908 24918 24928 24938
24948 24958 24968 24978 24988
24998 25008 25018 25028 25038
25048 25058 25068 25078 25088
25098 25108 25118 25128 25138
25148 25158 25168 25178 25188
25198 25208 25218 25228 25238
25248 25258 25268 25278 25288
25298 25308 25318 25328 25338
25348 25358 25368 25378 25388
25398 25408 25418 25428
c HEX 3
30018 30028 30038 30048 30058
30068 30078 30088 30098 30108
30118 30128 30138 30148 30158
30168 30178 30188 30198 30208
30218 30228 30238 30248 30258
30268 30278 30288 30298 30308
30318 30328 30338 30348 30358
30368 30378 30388 30398 30408
30418 30428 30438 30448 30458
30468 30478 30488 30498 30508
30518 30528 30538 30548 30558
30568 30578 30588 30598 30608
30618 30628 30638 30648 30658
30668 30678 30688 30698 30708
30718 30728 30738 30748 30758
30768 30778 30788 30798 30808
30818 30828 30838 30848 30858
30868 30878 30888 30898 30908
30918 30928 30938 30948 30958
30968 30978 30988 30998 31008
31018 31028 31038 31048 31058
31068 31078 31088 31098 31108
31118 31128 31138 31148 31158
31168 31178 31188 31198 31208
31218 31228 31238 31248 31258
31268 31278 31288 31298 31308
31318 31328 31338 31348 31358
31368 31378 31388 31398 31408
31418 31428 31438 31448 31458
31468 31478 31488 31498 31508
31518 31528 31538 31548 31558
31568 31578 31588 31598 31608
31618 31628 31638 31648 31658
31668 31678 31688 31698 31708
31718 31728 31738 31748 31758
31768 31778 31788 31798 31808
31818 31828 31838 31848 31858
31868 31878 31888 31898 31908
31918 31928 31938 31948 31958
31968 31978 31988 31998 32008
32008 32018 32028 32038 32048
32058 32068 32078 32088 32098
32108 32118 32128 32138 32148
32158 32168 32178 32188 32198
32208 32218 32228 32238 32248
32258 32268 32278 32288 32298
32308 32318 32328 32338 32348
32358 32368 32378 32388 32398
32408 32418 32428 32438 32448
32458 32468 32478 32488 32498
32508 32518 32528 32538 32548
32558 32568 32578 32588 32598
32608 32618 32628 32638 32648
32658 32668 32678 32688 32698
32708 32718 32728 32738 32748
32758 32768 32778 32788
32808 32818 32828 32838 32848
32858 32868 32878 32888 32898
32908 32918 32928 32938 32948
32958 32968 32978 32988 32998
33008 33018 33028 33038 33048
33058 33068 33078 33088 33098
33108 33118 33128 33138 33148
33158 33168 33178 33188 33198
33208 33218 33228 33238 33248
33258 33268 33278 33288 33298
33308 33318 33328 33338 33348
33358 33368 33378 33388 33398
33408 33418 33428 33438 33448
33458 33468 33478 33488 33498
33508 33518 33528 33538 33548
33558 33568 33578 33588 33598
33608 33618 33628 33638 33648
33658 33668 33678 33688 34088
33698 33708 33718 33728 33738
33748 33758 33768 33778 33788
33798 33808 33818 33828 33838
33848 33858 33868 33878 33888
33898 33908 33918 33928 33938
33948 33958 33968 33978 33988
33998 34008 34018 34028 34038
34048 34058 34068 34078
34098 34108 34118 34128 34138
34148 34158 34168 34178 34188
34198 34208 34218 34228 34238
34248 34258 34268 34278 34288
34298 34308 34318 34328 34338
34348 34358 34368 34378 34388
34398 34408 34418 34428 34438
34448 34458 34468 34478 34488
34498 34508 34518 34528 34538
34548 34558 34568 34578 34588
34598 34608 34618 34628 34638
34648 34658 34668 34678 34688
34698 34708 34718 34728 34738
34748 34758 34768 34778 34788
34798 34808 34818 34828 34838
34848 34858 34868 34878 34888
34898 34908 34918 34928 34938
34948 34958 34968 34978 34988
34998 35008 35018 35028 35038
35048 35058 35068 35078 35088
35098 35108 35118 35128 35138
35148 35158 35168 35178 35188
35198 35208 35218 35228 35238
35248 35258 35268 35278 35288
35298 35308 35318 35328 35338
35348 35358 35368 35378 35388
35398 35408 35418 35428
imp:n=1
c
c Pb in reactor pool
5213 2 -10.52 \ $ HEX 4-5
( (-2080:-2078:-2076:-2074) ((-2066.1 (1272 -2062)
:(-257 -1272))
:(-2062 2067.1)
:(2066 -2067 (-2078:-2076:-2074:-2072)
(-2070:-2071:-2072:-2073:-606:-607:-608:-609)))
:(2062 -2065 1283 -1281)
:( (2065 -2060 1280 -1281):(1041 -1280 (-1042:-543:-1044:-545)))
:(1274 2060 2061 -1072 -1281)
:(1275 1079 -1281 1072 -1079.3)
:(1277 -1278 1073 1082 1083 548 549 -2188)
:(1278 -1281 1078.3 -2188
c collettore 5 (asse -x)
((2031 -2001 1278)
:(2032 2001 -2002)
:(2033 2002 -2003)
:(2034 2003 -2004)
:(2035 2004 -2005)
:(2036 2005 -2006)
:(2037 2006 -1088))
c collettore 6 (asse -x +458)
((585 -2001 1278)

```

```

:(586 2001 -2002)
:(587 2002 -2003)
:(588 2003 -2004)
:(589 2004 -2005)
:(590 2005 -2006)
:(591 2006 -1088)))
c altro
:(1277 -1281 1088 -2188)
:(1077.1 -1077.3 1275 -1277 -1075)
:(1274 -1277 1075 -2188) ) -80000 -60000
c HEX 4
40018 40028 40038 40048 40058
40068 40078 40088 40098 40108
40118 40128 40138 40148 40158
40168 40178 40188 40198 40208
40218 40228 40238 40248 40258
40268 40278 40288 40298 40308
40318 40328 40338 40348 40358
40368 40378 40388 40398 40408
40418 40428 40438 40448 40458
40468 40478 40488 40498 40508
40518 40528 40538 40548 40558
40568 40578 40588 40598 40608
40618 40628 40638 40648 40658
40668 40678 40688 40698 40708
40718 40728 40738 40748 40758
40768 40778 40788 40798 40808
40818 40828 40838 40848 40858
40868 40878 40888 40898 40908
40918 40928 40938 40948 40958
40968 40978 40988 40998 41008
41018 41028 41038 41048 41058
41068 41078 41088 41098 41108
41118 41128 41138 41148 41158
41168 41178 41188 41198 41208
41218 41228 41238 41248 41258
41268 41278 41288 41298 41308
41318 41328 41338 41348 41358
41368 41378 41388 41398 41408
41418 41428 41438 41448 41458
41468 41478 41488 41498 41508
41518 41528 41538 41548 41558
41568 41578 41588 41598 41608
41618 41628 41638 41648 41658
41668 41678 41688 41698 41708
41718 41728 41738 41748 41758
41768 41778 41788 41798 41808
41818 41828 41838 41848 42798
41858 41868 41878 41888 41898
41908 41918 41928 41938 41948
41958 41968 41978 41988 41998
42008 42018 42028 42038 42048
42058 42068 42078 42088 42098
42108 42118 42128 42138 42148
42158 42168 42178 42188 42198
42208 42218 42228 42238 42248
42258 42268 42278 42288 42298
42308 42318 42328 42338 42348
42358 42368 42378 42388 42398
42408 42418 42428 42438 42448
42458 42468 42478 42488 42498
42508 42518 42528 42538 42548
42558 42568 42578 42588 42598
42608 42618 42628 42638 42648
42658 42668 42678 42688 42698
42708 42718 42728 42738 42748
42758 42768 42778 42788
42808 42818 42828 42838 42848
42858 42868 42878 42888 42898
42908 42918 42928 42938 42948
42958 42968 42978 42988 42998
43008 43018 43028 43038 43048
43058 43068 43078 43088 43098
43108 43118 43128 43138 43148
43158 43168 43178 43188 43198
43208 43218 43228 43238 43248
43258 43268 43278 43288 43298
43308 43318 43328 43338 43348
43358 43368 43378 43388 43398
43408 43418 43428 43438 43448
43458 43468 43478 43488 43498
43508 43518 43528 43538 43548
43558 43568 43578 43588 43598
43608 43618 43628 43638 43648
43658 43668 43678 43688 44088
43698 43708 43718 43728 43738
43748 43758 43768 43778 43788
43798 43808 43818 43828 43838
43848 43858 43868 43878 43888
43898 43908 43918 43928 43938
43948 43958 43968 43978 43988
43998 44008 44018 44028 44038
44048 44058 44068 44078
44098 44108 44118 44128 44138
44148 44158 44168 44178 44188
44198 44208 44218 44228 44238
44248 44258 44268 44278 44288
44298 44308 44318 44328 44338
44348 44358 44368 44378 44388
44398 44408 44418 44428 44438
44448 44458 44468 44478 44488
44498 44508 44518 44528 44538
44548 44558 44568 44578 44588
44598 44608 44618 44628 44638
44648 44658 44668 44678 44688
44698 44708 44718 44728 44738
44748 44758 44768 44778 44788
44798 44808 44818 44828 44838
44848 44858 44868 44878 44888
44898 44908 44918 44928 44938
44948 44958 44968 44978 44988
44998 45008 45018 45028 45038
45048 45058 45068 45078 45088
45098 45108 45118 45128 45138
45148 45158 45168 45178 45188
45198 45208 45218 45228 45238
45248 45258 45268 45278 45288
45298 45308 45318 45328 45338
45348 45358 45368 45378 45388
45398 45408 45418 45428
c HEX 5
50018 50028 50038 50048 50058
50068 50078 50088 50098 50108
50118 50128 50138 50148 50158
50168 50178 50188 50198 50208
50218 50228 50238 50248 50258
50268 50278 50288 50298 50308
50318 50328 50338 50348 50358
50368 50378 50388 50398 50408
50418 50428 50438 50448 50458
50468 50478 50488 50498 50508
50518 50528 50538 50548 50558
50568 50578 50588 50598 50608
50618 50628 50638 50648 50658
50668 50678 50688 50698 50708
50718 50728 50738 50748 50758
50768 50778 50788 50798 50808
50818 50828 50838 50848 50858
50868 50878 50888 50898 50908
50918 50928 50938 50948 50958
50968 50978 50988 50998 51008
51018 51028 51038 51048 51058
51068 51078 51088 51098 51108
51118 51128 51138 51148 51158
51168 51178 51188 51198 51208
51218 51228 51238 51248 51258
51268 51278 51288 51298 51308
51318 51328 51338 51348 51358
51368 51378 51388 51398 51408
51418 51428 51438 51448 51458
51468 51478 51488 51498 51508
51518 51528 51538 51548 51558
51568 51578 51588 51598 51608
51618 51628 51638 51648 51658
51668 51678 51688 51698 51708
51718 51728 51738 51748 51758
51768 51778 51788 51798 51808
51818 51828 51838 51848 52798
51858 51868 51878 51888 51898
51908 51918 51928 51938 51948
51958 51968 51978 51988 51998
52008 52018 52028 52038 52048
52058 52068 52078 52088 52098
52108 52118 52128 52138 52148

```

```

52158 52168 52178 52188 52198          (((571 -2001 1278)
52208 52218 52228 52238 52248          : (572 2001 -2002)
52258 52268 52278 52288 52298          : (573 2002 -2003)
52308 52318 52328 52338 52348          : (574 2003 -2004)
52358 52368 52378 52388 52398          : (575 2004 -2005)
52408 52418 52428 52438 52448          : (576 2005 -2006)
52458 52468 52478 52488 52498          : (577 2006 -1088))
52508 52518 52528 52538 52548          c collettore 7 (asse -y)
52558 52568 52578 52588 52598          ((2045 -2001 1278)
52608 52618 52628 52638 52648          : (2046 2001 -2002)
52658 52668 52678 52688 52698          : (2047 2002 -2003)
52708 52718 52728 52738 52748          : (2048 2003 -2004)
52758 52768 52778 52788          : (2049 2004 -2005)
52808 52818 52828 52838 52848          : (2050 2005 -2006)
52858 52868 52878 52888 52898          : (2051 2006 -1088)))
52908 52918 52928 52938 52948          c altro
52958 52968 52978 52988 52998          : (1277 -1281 1088 -2188)
53008 53018 53028 53038 53048          : (1077.1 -1077.3 1275 -1277 -1075)
53058 53068 53078 53088 53098          : (1274 -1277 1075 -2188) ) -80000 60000
53108 53118 53128 53138 53148          c HEX 6
53158 53168 53178 53188 53198          60018 60028 60038 60048 60058
53208 53218 53228 53238 53248          60068 60078 60088 60098 60108
53258 53268 53278 53288 53298          60118 60128 60138 60148 60158
53308 53318 53328 53338 53348          60168 60178 60188 60198 60208
53358 53368 53378 53388 53398          60218 60228 60238 60248 60258
53408 53418 53428 53438 53448          60268 60278 60288 60298 60308
53458 53468 53478 53488 53498          60318 60328 60338 60348 60358
53508 53518 53528 53538 53548          60368 60378 60388 60398 60408
53558 53568 53578 53588 53598          60418 60428 60438 60448 60458
53608 53618 53628 53638 53648          60468 60478 60488 60498 60508
53658 53668 53678 53688 54088          60518 60528 60538 60548 60558
53698 53708 53718 53728 53738          60568 60578 60588 60598 60608
53748 53758 53768 53778 53788          60618 60628 60638 60648 60658
53798 53808 53818 53828 53838          60668 60678 60688 60698 60708
53848 53858 53868 53878 53888          60718 60728 60738 60748 60758
53898 53908 53918 53928 53938          60768 60778 60788 60798 60808
53948 53958 53968 53978 53988          60818 60828 60838 60848 60858
53998 54008 54018 54028 54038          60868 60878 60888 60898 60908
54048 54058 54068 54078          60918 60928 60938 60948 60958
54098 54108 54118 54128 54138          60968 60978 60988 60998 61008
54148 54158 54168 54178 54188          61018 61028 61038 61048 61058
54198 54208 54218 54228 54238          61068 61078 61088 61098 61108
54248 54258 54268 54278 54288          61118 61128 61138 61148 61158
54298 54308 54318 54328 54338          61168 61178 61188 61198 61208
54348 54358 54368 54378 54388          61218 61228 61238 61248 61258
54398 54408 54418 54428 54438          61268 61278 61288 61298 61308
54448 54458 54468 54478 54488          61318 61328 61338 61348 61358
54498 54508 54518 54528 54538          61368 61378 61388 61398 61408
54548 54558 54568 54578 54588          61418 61428 61438 61448 61458
54598 54608 54618 54628 54638          61468 61478 61488 61498 61508
54648 54658 54668 54678 54688          61518 61528 61538 61548 61558
54698 54708 54718 54728 54738          61568 61578 61588 61598 61608
54748 54758 54768 54778 54788          61618 61628 61638 61648 61658
54798 54808 54818 54828 54838          61668 61678 61688 61698 61708
54848 54858 54868 54878 54888          61718 61728 61738 61748 61758
54898 54908 54918 54928 54938          61768 61778 61788 61798 61808
54948 54958 54968 54978 54988          61818 61828 61838 61848 62798
54998 55008 55018 55028 55038          61858 61868 61878 61888 61898
55048 55058 55068 55078 55088          61908 61918 61928 61938 61948
55098 55108 55118 55128 55138          61958 61968 61978 61988 61998
55148 55158 55168 55178 55188          62008 62018 62028 62038 62048
55198 55208 55218 55228 55238          62058 62068 62078 62088 62098
55248 55258 55268 55278 55288          62108 62118 62128 62138 62148
55298 55308 55318 55328 55338          62158 62168 62178 62188 62198
55348 55358 55368 55378 55388          62208 62218 62228 62238 62248
55398 55408 55418 55428          62258 62268 62278 62288 62298
imp:n=1
c
c Pb in reactor pool
5214 2 -10.52 \ $ HEX 6-7
( (-2080;-2078;-2076;-2074) ((-2066.1 (1272 -2062)
:(-257 -1272))
:(-2062 2067.1)
:(2066 -2067 (-2078;-2076;-2074;-2072)
(-2070;-2071;-2072;-2073;-606;-607;-608;-609)))
:(2062 -2065 1283 -1281)
:(2065 -2060 1280 -1281):(1041 -1280 (-1042;-543;-1044;-545)))
:(1274 2060 2061 -1072 -1281)
:(1275 1079 -1281 1072 -1079.3)
:(1277 -1278 1073 1082 1083 548 549 -2188)
:(1278 -1281 1078.3 -2188)
c collettore 4 (asse -y +458)
63058 63068 63078 63088 63098

```

```

63108 63118 63128 63138 63148
63158 63168 63178 63188 63198
63208 63218 63228 63238 63248
63258 63268 63278 63288 63298
63308 63318 63328 63338 63348
63358 63368 63378 63388 63398
63408 63418 63428 63438 63448
63458 63468 63478 63488 63498
63508 63518 63528 63538 63548
63558 63568 63578 63588 63598
63608 63618 63628 63638 63648
63658 63668 63678 63688 64088
63698 63708 63718 63728 63738
63748 63758 63768 63778 63788
63798 63808 63818 63828 63838
63848 63858 63868 63878 63888
63898 63908 63918 63928 63938
63948 63958 63968 63978 63988
63998 64008 64018 64028 64038
64048 64058 64068 64078
64098 64108 64118 64128 64138
64148 64158 64168 64178 64188
64198 64208 64218 64228 64238
64248 64258 64268 64278 64288
64298 64308 64318 64328 64338
64348 64358 64368 64378 64388
64398 64408 64418 64428 64438
64448 64458 64468 64478 64488
64498 64508 64518 64528 64538
64548 64558 64568 64578 64588
64598 64608 64618 64628 64638
64648 64658 64668 64678 64688
64698 64708 64718 64728 64738
64748 64758 64768 64778 64788
64798 64808 64818 64828 64838
64848 64858 64868 64878 64888
64898 64908 64918 64928 64938
64948 64958 64968 64978 64988
64998 65008 65018 65028 65038
65048 65058 65068 65078 65088
65098 65108 65118 65128 65138
65148 65158 65168 65178 65188
65198 65208 65218 65228 65238
65248 65258 65268 65278 65288
65298 65308 65318 65328 65338
65348 65358 65368 65378 65388
65398 65408 65418 65428

c HEX 7
70018 70028 70038 70048 70058
70068 70078 70088 70098 70108
70118 70128 70138 70148 70158
70168 70178 70188 70198 70208
70218 70228 70238 70248 70258
70268 70278 70288 70298 70308
70318 70328 70338 70348 70358
70368 70378 70388 70398 70408
70418 70428 70438 70448 70458
70468 70478 70488 70498 70508
70518 70528 70538 70548 70558
70568 70578 70588 70598 70608
70618 70628 70638 70648 70658
70668 70678 70688 70698 70708
70718 70728 70738 70748 70758
70768 70778 70788 70798 70808
70818 70828 70838 70848 70858
70868 70878 70888 70898 70908
70918 70928 70938 70948 70958
70968 70978 70988 70998 71008
71018 71028 71038 71048 71058
71068 71078 71088 71098 71108
71118 71128 71138 71148 71158
71168 71178 71188 71198 71208
71218 71228 71238 71248 71258
71268 71278 71288 71298 71308
71318 71328 71338 71348 71358
71368 71378 71388 71398 71408
71418 71428 71438 71448 71458
71468 71478 71488 71498 71508
71518 71528 71538 71548 71558
71568 71578 71588 71598 71608
71618 71628 71638 71648 71658
71668 71678 71688 71698 71708

71718 71728 71738 71748 71758
71768 71778 71788 71798 71808
71818 71828 71838 71848 72798
71858 71868 71878 71888 71898
71908 71918 71928 71938 71948
71958 71968 71978 71988 71998
72008 72018 72028 72038 72048
72058 72068 72078 72088 72098
72108 72118 72128 72138 72148
72158 72168 72178 72188 72198
72208 72218 72228 72238 72248
72258 72268 72278 72288 72298
72308 72318 72328 72338 72348
72358 72368 72378 72388 72398
72408 72418 72428 72438 72448
72458 72468 72478 72488 72498
72508 72518 72528 72538 72548
72558 72568 72578 72588 72598
72608 72618 72628 72638 72648
72658 72668 72678 72688 72698
72708 72718 72728 72738 72748
72758 72768 72778 72788
72808 72818 72828 72838 72848
72858 72868 72878 72888 72898
72908 72918 72928 72938 72948
72958 72968 72978 72988 72998
73008 73018 73028 73038 73048
73058 73068 73078 73088 73098
73108 73118 73128 73138 73148
73158 73168 73178 73188 73198
73208 73218 73228 73238 73248
73258 73268 73278 73288 73298
73308 73318 73328 73338 73348
73358 73368 73378 73388 73398
73408 73418 73428 73438 73448
73458 73468 73478 73488 73498
73508 73518 73528 73538 73548
73558 73568 73578 73588 73598
73608 73618 73628 73638 73648
73658 73668 73678 73688 74088
73698 73708 73718 73728 73738
73748 73758 73768 73778 73788
73798 73808 73818 73828 73838
73848 73858 73868 73878 73888
73898 73908 73918 73928 73938
73948 73958 73968 73978 73988
73998 74008 74018 74028 74038
74048 74058 74068 74078
74098 74108 74118 74128 74138
74148 74158 74168 74178 74188
74198 74208 74218 74228 74238
74248 74258 74268 74278 74288
74298 74308 74318 74328 74338
74348 74358 74368 74378 74388
74398 74408 74418 74428 74438
74448 74458 74468 74478 74488
74498 74508 74518 74528 74538
74548 74558 74568 74578 74588
74598 74608 74618 74628 74638
74648 74658 74668 74678 74688
74698 74708 74718 74728 74738
74748 74758 74768 74778 74788
74798 74808 74818 74828 74838
74848 74858 74868 74878 74888
74898 74908 74918 74928 74938
74948 74958 74968 74978 74988
74998 75008 75018 75028 75038
75048 75058 75068 75078 75088
75098 75108 75118 75128 75138
75148 75158 75168 75178 75188
75198 75208 75218 75228 75238
75248 75258 75268 75278 75288
75298 75308 75318 75328 75338
75348 75358 75368 75378 75388
75398 75408 75418 75428
imp:n=1
c
c Pb inside inner vessel/collector
518 2 -10.52
(((-1076;-1078) 1273)
:(1273 -1276 1076.3 1078.3)
c dentro collettore 1

```

```

:(-1084 -2001 1276)
:(-1085 2001 -2002)
:(-1086 2002 -2003)
:(-1087 2003 -2004)
:(-1089 2004 -2005)
:(-1090 2005 -2006)
:(-1091 2006 -1088))
c dentro collettore 2
:(-550 -2001 1276)
:(-551 2001 -2002)
:(-552 2002 -2003)
:(-553 2003 -2004)
:(-554 2004 -2005)
:(-555 2005 -2006)
:(-556 2006 -1088))
c dentro collettore 3
:(-2010 -2001 1276)
:(-2011 2001 -2002)
:(-2012 2002 -2003)
:(-2013 2003 -2004)
:(-2014 2004 -2005)
:(-2015 2005 -2006)
:(-2016 2006 -1088))
c dentro collettore 4
:(-564 -2001 1276)
:(-565 2001 -2002)
:(-566 2002 -2003)
:(-567 2003 -2004)
:(-568 2004 -2005)
:(-569 2005 -2006)
:(-570 2006 -1088))
c dentro collettore 5
:(-2024 -2001 1276)
:(-2025 2001 -2002)
:(-2026 2002 -2003)
:(-2027 2003 -2004)
:(-2028 2004 -2005)
:(-2029 2005 -2006)
:(-2030 2006 -1088))
c dentro collettore 6
:(-578 -2001 1276)
:(-579 2001 -2002)
:(-580 2002 -2003)
:(-581 2003 -2004)
:(-582 2004 -2005)
:(-583 2005 -2006)
:(-584 2006 -1088))
c dentro collettore 7
:(-2038 -2001 1276)
:(-2039 2001 -2002)
:(-2040 2002 -2003)
:(-2041 2003 -2004)
:(-2042 2004 -2005)
:(-2043 2005 -2006)
:(-2044 2006 -1088))
c dentro collettore 8
:(-592 -2001 1276)
:(-593 2001 -2002)
:(-594 2002 -2003)
:(-595 2003 -2004)
:(-596 2004 -2005)
:(-597 2005 -2006)
:(-598 2006 -1088))
imp:n=1
c inner vessel
517 4 -7.74 (1273 -1274 ((147 -1072):(1075 -190)))
:(1273 -1275 ((1072 -1073):(1074 -1075))):(1076 -1077)
:(1078 -1079):(1276 -1277 1078.3 1076.3 546 547 1080 1081)
:((546 -548):(547 -549):(1080 -1082):(1081 -1083)) 1276 -1278)
c collettore 1 (asse x)
:(1084 -1092 -2001 1278)
:(1085 -1093 2001 -2002)
:(1086 -1094 2002 -2003)
:(1087 -1095 2003 -2004)
:(1089 -1096 2004 -2005)
:(1090 -1097 2005 -2006)
:(1091 -1098 2006 -1088))
c collettore 2 (asse x +458)
:(550 -557 -2001 1278)
:(551 -558 2001 -2002)
:(552 -559 2002 -2003)
:(553 -560 2003 -2004)
:(554 -561 2004 -2005)
:(555 -562 2005 -2006)
:(556 -563 2006 -1088))
c collettore 3 (asse y)
:(2010 -2017 -2001 1278)
:(2011 -2018 2001 -2002)
:(2012 -2019 2002 -2003)
:(2013 -2020 2003 -2004)
:(2014 -2021 2004 -2005)
:(2015 -2022 2005 -2006)
:(2016 -2023 2006 -1088))
c collettore 4 (asse -y +458)
:(564 -571 -2001 1278)
:(565 -572 2001 -2002)
:(566 -573 2002 -2003)
:(567 -574 2003 -2004)
:(568 -575 2004 -2005)
:(569 -576 2005 -2006)
:(570 -577 2006 -1088))
c collettore 5 (asse -x)
:(2024 -2031 -2001 1278)
:(2025 -2032 2001 -2002)
:(2026 -2033 2002 -2003)
:(2027 -2034 2003 -2004)
:(2028 -2035 2004 -2005)
:(2029 -2036 2005 -2006)
:(2030 -2037 2006 -1088))
c collettore 6 (asse -x +458)
:(578 -585 -2001 1278)
:(579 -586 2001 -2002)
:(580 -587 2002 -2003)
:(581 -588 2003 -2004)
:(582 -589 2004 -2005)
:(583 -590 2005 -2006)
:(584 -591 2006 -1088))
c collettore 7 (asse -y)
:(2038 -2045 -2001 1278)
:(2039 -2046 2001 -2002)
:(2040 -2047 2002 -2003)
:(2041 -2048 2003 -2004)
:(2042 -2049 2004 -2005)
:(2043 -2050 2005 -2006)
:(2044 -2051 2006 -1088))
c collettore 8 (asse y +458)
:(592 -599 -2001 1278)
:(593 -600 2001 -2002)
:(594 -601 2002 -2003)
:(595 -602 2003 -2004)
:(596 -603 2004 -2005)
:(597 -604 2005 -2006)
:(598 -605 2006 -1088))
c completamento in basso (affaccio diagrid)
:(-2061 1274)
:(1274 -1280 147 -2060)
:(1041 -1280 2062 -147 1042 543 1044 545)
imp:n=1
c barrel inferiore
512 4 -7.74 147 -1047 ((1102 1100 1103 (-1202:-1200:-1203) -1201)
:(-1103 -1104 1101 -1201)
:(1104 1100 1105 (-1204:-1200:-1205) -1201)
:(-1105 -1106 1101 -1201)
:(1106 1100 1107 (-1206:-1200:-1207) -1201)
:(-1107 -1108 1101 -1201)
:(1108 1100 -1210 -1201 (-1208:-1200))
:(1110 1111 -1212 -1200 (-1210:-1211))
:(1112 1113 -1214 -1211 (-1212:-1213))
:(1114 1115 -1216 -1213 (-1214:-1215))
:(-1117 1114 1118 (1217:-1214:-1218) -1216)
:(1116 -1216 1217 -1215)
:(-1119 1114 1120 (1219:-1214:-1220) -1216)
:(1116 -1216 1219 -1218)
:(-1121 1114 1122 (1221:-1214:-1222) -1216)
:(1116 -1216 1221 -1220)
:(1223 -1216 1114 -1222 (-1123:1116))
:(1225 -1214 -1123 1112 (-1125:1114))
:(1226 -1212 -1125 1110 (-1126:1112))
:(1227 -1210 -1126 1108 (-1127:1110))
:(1228 -1208 -1127 1230 (-1128:1108))
:(1106 -1127 -1130 (-1206:1227:1230) 1228)
:(1231 -1206 1228 -1128)
:(1104 -1127 -1131 (-1204:1227:1231) 1228)
:(1232 -1204 1228 -1128)

```

```

:(1102 -1127 -1132 (-1202:1227:1232) 1228)
:(1233 1228 -1127 -1202 (-1133:-1128))
:(1234 1227 -1126 -1133 (-1134:-1127))
:(1235 1226 -1125 -1134 (-1135:-1126))
:(1236 1225 -1123 -1135 (-1136:-1125))
:(1237 1223 -1136 1238 (-1137:-1123))
:(-1121 -1136 -1138 (1221:1236:1238) 1237)
:(1237 -1137 1139 1221)
:(-1119 -1136 -1139 (1219:1236:1239) 1237)
:(1237 -1137 1140 1219)
:(-1117 -1136 -1140 (1217:1236:1240) 1237)
:(1241 1237 -1136 1217 (-1141:-1137))
:(1242 1236 -1141 -1135 (-1142:-1136))
:(1243 1235 -1142 -1134 (-1143:-1135))
:(1244 1234 -1143 -1133 (-1144:-1134))
:(1245 1233 -1144 -1207 (-1145:-1133))
:(1107 -1144 -1132 (-1207:1244:1232) 1245)
:(1232 -1205 1245 -1145)
:(1105 -1144 -1131 (-1205:1244:1231) 1245)
:(1231 -1203 1245 -1145)
:(1103 -1144 -1130 (-1203:1244:1230) 1245)
:(1245 -1246 1130 -1144 (-1145:1146))
:(1244 -1247 1146 -1143 (-1144:1147))
:(1243 -1248 1147 -1142 (-1143:1148))
:(1242 -1249 1148 -1141 (-1142:1149))
:(1241 -1250 1149 -1222 (-1141:1150))
:(1122 1149 -1140 (-1222:-1249:1240) -1250)
:(1120 1149 -1139 (-1220:-1249:1239) -1250)
:(1118 1149 -1138 (-1218:-1249:1238) -1250)
:(1140 -1220 1150 -1250)
:(1139 -1218 1150 -1250)
:(-1250 -1215 1138 1149 (1150:1115))
:(-1249 -1213 1115 1148 (1149:1113))
:(-1248 -1211 1113 1147 (1148:1111))
:(-1247 -1200 1111 1146 (1147:1100))
:(-1246 -1201 1100 -1202 (1146:1101))
) imp:n=1
c barrel superiore
513 4 -7.74 1057 -190 ((1102 1100 1103 (-1202:-1200:-1203) -1201)
:(-1103 -1104 1101 -1201)
:(1104 1100 1105 (-1204:-1200:-1205) -1201)
:(-1105 -1106 1101 -1201)
:(1106 1100 1107 (-1206:-1200:-1207) -1201)
:(-1107 -1108 1101 -1201)
:(1108 1100 -1210 -1201 (-1208:-1200))
:(1110 1111 -1212 -1200 (-1210:-1211))
:(1112 1113 -1214 -1211 (-1212:-1213))
:(1114 1115 -1216 -1213 (-1214:-1215))
:(-1117 1114 1118 (1217:-1214:-1218) -1216)
:(1116 -1216 1217 -1215)
:(-1119 1114 1120 (1219:-1214:-1220) -1216)
:(1116 -1216 1219 -1218)
:(-1121 1114 1122 (1221:-1214:-1222) -1216)
:(1116 -1216 1221 -1220)
:(1223 -1216 1114 -1222 (-1123:1116))
:(1225 -1214 -1123 1112 (-1125:1114))
:(1226 -1212 -1125 1110 (-1126:1112))
:(1227 -1210 -1126 1108 (-1127:1110))
:(1228 -1208 -1127 1230 (-1128:1108))
:(1106 -1127 -1130 (-1206:1227:1230) 1228)
:(1231 -1206 1228 -1128)
:(1104 -1127 -1131 (-1204:1227:1231) 1228)
:(1232 -1204 1228 -1128)
:(1102 -1127 -1132 (-1202:1227:1232) 1228)
:(1233 1228 -1127 -1202 (-1133:-1128))
:(1234 1227 -1126 -1133 (-1134:-1127))
:(1235 1226 -1125 -1134 (-1135:-1126))
:(1236 1225 -1123 -1135 (-1136:-1125))
:(1237 1223 -1136 1238 (-1137:-1123))
:(-1121 -1136 -1138 (1221:1236:1238) 1237)
:(1237 -1137 1139 1221)
:(-1119 -1136 -1139 (1219:1236:1239) 1237)
:(1237 -1137 1140 1219)
:(-1117 -1136 -1140 (1217:1236:1240) 1237)
:(1241 1237 -1136 1217 (-1141:-1137))
:(1242 1236 -1141 -1135 (-1142:-1136))
:(1243 1235 -1142 -1134 (-1143:-1135))
:(1244 1234 -1143 -1133 (-1144:-1134))
:(1245 1233 -1144 -1207 (-1145:-1133))
:(1107 -1144 -1132 (-1207:1244:1232) 1245)
:(1232 -1205 1245 -1145)
:(1105 -1144 -1131 (-1205:1244:1231) 1245)
:(1231 -1203 1245 -1145)
:(1103 -1144 -1130 (-1203:1244:1230) 1245)
:(1245 -1246 1130 -1144 (-1145:1146))
:(1244 -1247 1146 -1143 (-1144:1147))
:(1243 -1248 1147 -1142 (-1143:1148))
:(1242 -1249 1148 -1141 (-1142:1149))
:(1241 -1250 1149 -1222 (-1141:1150))
:(1122 1149 -1140 (-1222:-1249:1240) -1250)
:(1120 1149 -1139 (-1220:-1249:1239) -1250)
:(1118 1149 -1138 (-1218:-1249:1238) -1250)
:(1140 -1220 1150 -1250)
:(1139 -1218 1150 -1250)
:(-1250 -1215 1138 1149 (1150:1115))
:(-1249 -1213 1115 1148 (1149:1113))
:(-1248 -1211 1113 1147 (1148:1111))
:(-1247 -1200 1111 1146 (1147:1100))
:(-1246 -1201 1100 -1202 (1146:1101))
) imp:n=1
c giunti barrel inferiore
514 4 -7.74
((1201:(1202 1200 1203):(1204 1200 1205):(1206 1200 1207)
:(1208 1200):(1210 1211):(1212 1213):(1214 1215):1216
:(-1217 1214 1218):(-1219 1214 1220):(-1221 1214 1222)
:(-1223 1214):(-1225 1212):(-1226 1210):(-1227 1208)
:(-1228):(-1230 -1227 1206):(-1231 -1227 1204)
:(-1232 -1227 1202)
:(-1233 -1227):(-1234 -1226):(-1235 -1225):(-1236 -1223)
:(-1237)
:(-1238 -1236 -1221):(-1239 -1236 -1219)
:(-1240 -1236 -1217)
:(-1241 -1236):(-1242 -1235):(-1243 -1234):(-1244 -1233)
:(-1245):(1207 -1244 -1232):(1205 -1244 -1231):(1203 -1244 -1230)
:(1246 -1244):(1247 -1243):(1248 -1242):(1249 -1241)
:1250:(1222 1249 -1240):(1220 1249 -1239):(1218 1249 -1238)
:(1215 1249):(1213 1248):(1211 1247):(1200 1246)) -1273
((1060 -1061):(1062 -1063):(1064 -1065))
) imp:n=1
c giunti barrel superiore
515 4 -7.74
((1201:(1202 1200 1203):(1204 1200 1205):(1206 1200 1207)
:(1208 1200):(1210 1211):(1212 1213):(1214 1215):1216
:(-1217 1214 1218):(-1219 1214 1220):(-1221 1214 1222)
:(-1223 1214):(-1225 1212):(-1226 1210):(-1227 1208)
:(-1228):(-1230 -1227 1206):(-1231 -1227 1204)
:(-1232 -1227 1202)
:(-1233 -1227):(-1234 -1226):(-1235 -1225):(-1236 -1223)
:(-1237)
:(-1238 -1236 -1221):(-1239 -1236 -1219)
:(-1240 -1236 -1217)
:(-1241 -1236):(-1242 -1235):(-1243 -1234):(-1244 -1233)
:(-1245):(1207 -1244 -1232):(1205 -1244 -1231):(1203 -1244 -1230)
:(1246 -1244):(1247 -1243):(1248 -1242):(1249 -1241)
:1250:(1222 1249 -1240):(1220 1249 -1239):(1218 1249 -1238)
:(1215 1249):(1213 1248):(1211 1247):(1200 1246)) -1273
((1066 -1067):(1068 -1069):(1070 -1071))
) imp:n=1
c Pb between barrel and internal cylinder
516 2 -10.52
((1201:(1202 1200 1203):(1204 1200 1205):(1206 1200 1207)
:(1208 1200):(1210 1211):(1212 1213):(1214 1215):1216
:(-1217 1214 1218):(-1219 1214 1220):(-1221 1214 1222)
:(-1223 1214):(-1225 1212):(-1226 1210):(-1227 1208)
:(-1228):(-1230 -1227 1206):(-1231 -1227 1204)
:(-1232 -1227 1202)
:(-1233 -1227):(-1234 -1226):(-1235 -1225):(-1236 -1223)
:(-1237)
:(-1238 -1236 -1221):(-1239 -1236 -1219)
:(-1240 -1236 -1217)
:(-1241 -1236):(-1242 -1235):(-1243 -1234):(-1244 -1233)
:(-1245):(1207 -1244 -1232):(1205 -1244 -1231):(1203 -1244 -1230)
:(1246 -1244):(1247 -1243):(1248 -1242):(1249 -1241)
:1250:(1222 1249 -1240):(1220 1249 -1239):(1218 1249 -1238)
:(1215 1249):(1213 1248):(1211 1247):(1200 1246)) -1273
((147 -1060):(1061 -1062):(1063 -1064):(1065 -1047)
:(1057 -1066):(1067 -1068))
)
c da qui in poi piombo ai collettori/pompe
:(1101:(1102 1100 1103):(1104 1100 1105):(1106 1100 1107)
:(1108 1100):(1110 1111):(1112 1113):(1114 1115):1116
:(-1117 1114 1118):(-1119 1114 1120):(-1121 1114 1122)
:(-1123 1114):(-1125 1112):(-1126 1110):(-1127 1108)
:(-1128):(-1130 -1127 1106):(-1131 -1127 1104)
:(-1132 -1127 1102)

```



```

153 2 -10.52 -101 104 -102 105 -103 106 -121 140 u=1 imp:n=1
c pin sustaining grid support
150 4 -7.74 (-109 112 -110 113 -111 114
(115:-118:116:-119:117:-120) 121 -107)
:(119 -116 -122):(119 -116 -123):(119 -116 -125)
:(118 -117 -124):(120 -115 -126):
(120 -115 118 -117 -127 -107):((-128:-129:-130:-131:-132:
-133) 120 118 -107):
((-134:-135:-136:-137:-138:-139) -117 -115 -107) u=1 imp:n=1
C Pb in pin sustaining grid support
151 2 -10.52 -115 118 -116 119 -117 120 121 -107 \#150 u=1 imp:n=1
c shroud
102 4 -7.74 -109 112 -110 113 -111 114 107 -108
(101:-104:102:-105:103:-106) u=1 imp:n=1
c fuel bundle
101 0 -101 104 -102 105 -103 106 107 -108 fill=12 u=1 imp:n=1
c pin lattice
100 2 -10.52 -1 4 -2 5 -3 6 lat=2 u=12 fill=-7:7 -7:7 0:0
12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12
12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12
12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12 12 12
12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12
12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12
12 11 11 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12
12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12
imp:n=1
c fuel
110 497 -10.494 10 -12 -23 22 vol=12.09513172 u=11 imp:n=1 \$ upper segment
111 498 -10.494 10 -12 -22 21 vol=12.09513172 u=11 imp:n=1 \$ medium segment
112 499 -10.494 10 -12 -21 20 vol=12.09513172 u=11 imp:n=1 \$ lower segment
c helium inside the hollow
120 3 -0.0008 -10 20 -23 u=11 imp:n=1
c helium gap
121 3 -0.0008 12 -13 28 -29 u=11 imp:n=1
c insulators
113 5 -6.0 -12 24 -20 u=11 imp:n=1 \$ insulator pellet
114 5 -6.0 -12 23 -25 u=11 imp:n=1 \$ insulator pellet
c spring rings
c 115 44 -7.95 -30:-31:-32:-33:-34:-35:-36:-37:-38:-39:
c -40:-41:-42:-43:-44:-45:-46:-47:-48:-49:-50:
c -51:-52:-53:-54 u=11 imp:n=1
c helium around the spring rings
122 3 -0.0008
c 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
c 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
c 51 52 53 54
-12 25 -29 u=11 imp:n=1
c sustaining cylinder
116 44 -7.95 (11 -12 -26 27):(-12 26 -24):(-12 28 -27) u=11 imp:n=1
c helium inside the sustaining cylinder
123 3 -0.0008 -11 27 -26 u=11 imp:n=1
c upper end cap
117 44 -7.95 -55:-56:-57:(-58:-59) u=11 imp:n=1
c lower end cap
118 44 -7.95 -60:-61:-62:(-63:-64) 65 66 67 u=11 imp:n=1
c cladding
119 44 -7.95 13 -14 71 -70 u=11 imp:n=1
c pin sustain grid and spacers
130 4 -7.74 -65:-66:-67 u=11 imp:n=1
c spacer grids
c upper grid
131 4 -7.74 (86 -87 ((77:-80:78:-81:76:-79) 90 92 94)):
(((-90 91):(-92 93):(-94 95)) 86 -87) u=11 imp:n=1
c medium grid
132 4 -7.74 (82 -83 ((77:-80:78:-81:76:-79) 90 92 94)):
(((-90 91):(-92 93):(-94 95)) 82 -83) u=11 imp:n=1
c lower grid
133 4 -7.74 (-84 85 ((77:-80:78:-81:76:-79) 90 92 94)):
(((-90 91):(-92 93):(-94 95)) -84 85) u=11 imp:n=1
c Pb
145 2 -10.52 (14 72 -73 \#131 \#132 \#133):(-72 62.1 58.1 \#130):
(73 57.1 58.1):(75 59):(-74 64 \#130) u=11 imp:n=1
c
C ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c
FUEL ASSEMBLY 2
c
c ccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c ballast unit
265 8 -19.25 -101 104 -102 105 -103 106 192 -191 193 u=2 imp:n=1 \$ tungsten
266 4 -7.74 (-101 104 -102 105 -103 106 195 -192 194):
(-194 199 196 -197 193):(-199 200 -198 193) u=2 imp:n=1
267 4 -7.74 (-101 104 -102 105 -103 106 191 -201 204):
(204 -203 201 -202):(205 -101 104 -102 105 -103 106 202)
u=2 imp:n=1
c upper empty section
261 4 -7.74 -109 112 -110 113 -111 114 187 -190
(101:-104:102:-105:103:-106) u=2 imp:n=1
c Pb in upper empty section
262 2 -10.52 -101 104 -102 105 -103 106 187 -188 u=2 imp:n=1
c Argon in upper empty section
263 7 -0.0006084 ((-101 104 -102 105 -103 106) 188 -200):
((-101 104 -102 105 -103 106) 200 -194 198 197):
(-192 200 -193):(-192 200 -195 -196 193):
(-192 194 -195 193):(192 -191 -193):(191 -202 -204):
(-101 104 -102 105 -103 106 201 -202 203):
(202 -205)
u=2 imp:n=1
c Argon outside the fuel element
264 7 -0.0006084 (109:-112:110:-113:111:-114) 188 u=2 imp:n=1
c Nose
260 4 -7.74 (174 -164 -162 183):(-175 -162 183):(-176 183 182):
(-176 -182):(-177):(-178):(-179):(-180):(-181)
u=2 imp:n=1
c funnel
258 4 -7.74 (-109 112 -110 113 -111 114 108 -160 158):
(160 -161 159 -109 112 -110 113 -111 114):
((-109 112 -110 113 -111 114 162) -164 161 -163
(165 166 167 168 169 170)): (164 -171 172 -173):
((-109 112 -110 113 -111 114 184) -186 171 -185):
(-109 112 -110 113 -111 114 186 -187 159)
u=2 imp:n=1
c Pb inside the funnel/nose
259 2 -10.52 (164 -171 -172):(182 -164 -183)
:(108 -160 -158):(160 -161 -159 181 180 179 178)
:(161 -164 -162 175 176 177 178 179 180 181 -174)
:(162 -163 (-165:-166:-167:-168:-169:-170))
:(186 -187 -159):(171 -186 -184) u=2 imp:n=1
c diagrid
256 4 -7.74 (150 157 -156):(150 144 155 -147) u=2 imp:n=1
c Pb
257 2 -10.52 (-157 (150:-153) 152):(150 156 -155)
:(146 (109:-112:110:-113:111:-114) -161)
:(143 147 -146)
:((109:-112:110:-113:111:-114) -143)
:(163 161 -164)
:((109:-112:110:-113:111:-114) -163)
:(164 -171 173)
:(185 171 -186)
:((109:-112:110:-113:111:-114) -185)
:(109:-112:110:-113:111:-114 186) -188 140) u=2 imp:n=1
c foot
254 4 -7.74 (-109 112 -110 113 -111 114 -140 145 141):
((-109 112 -110 113 -111 114 142) -145 147 (-143:146)):
(142 149 (-144:-150) -147 151):-152:(-151 153 -150) u=2 imp:n=1
c Pb inside the foot
255 2 -10.52 (-142:-149 151 -145):(-141 145 -140) u=2 imp:n=1
c lower empty section
252 4 -7.74 -109 112 -110 113 -111 114 -121 140
(101:-104:102:-105:103:-106) u=2 imp:n=1
c Pb in lower empty section
253 2 -10.52 -101 104 -102 105 -103 106 -121 140 u=2 imp:n=1
c pin sustaining grid support
250 4 -7.74 (-109 112 -110 113 -111 114
(115:-118:116:-119:117:-120) 121 -107)
:(119 -116 -122):(119 -116 -123):(119 -116 -125)
:(118 -117 -124):(120 -115 -126):
(120 -115 118 -117 -127 -107):((-128:-129:-130:-131:-132:
-133) 120 118 -107):
((-134:-135:-136:-137:-138:-139) -117 -115 -107) u=2 imp:n=1
C Pb in pin sustaining grid support
251 2 -10.52 -115 118 -116 119 -117 120 121 -107 \#250 u=2 imp:n=1
c shroud
202 4 -7.74 -109 112 -110 113 -111 114 107 -108
(101:-104:102:-105:103:-106) u=2 imp:n=1
c fuel bundle

```



```

(-101 104 -102 105 -103 106 881 -882 883):(882 -885 -886) \$ into the ballast 1022 py -80.46491143
\#817 1023 p 1 0.577350269 0. -92.89529946
u=8 imp:n=1 1024 p 1 -0.577350269 0. -92.89529946 \$ fine secondo esagono
c foot 1025 py 126.9004209
854 4 -7.74 (-109 112 -110 113 -111 114 -140 145 141): 1026 p 1 0.577350269 0. 146.5047005
(((-109 112 -110 113 -111 114 142) -145 147 (-143:146))): 1027 p 1 -0.577350269 0. 146.5047005
(142 149 (-144:-150) -147 151):-152:(-151 153 -150) u=8 imp:n=1 1028 py -126.9004209
c Pb inside the foot 1029 p 1 0.577350269 0. -146.5047005
855 2 -10.52 (-142:-149 151 -145):(-141 145 -140) u=8 imp:n=1 1030 p 1 -0.577350269 0. -146.5047005
c upper and lower grids (as dummies) 1031 py 124.9004209
814 4 -7.74 (-871 867 -865):(-871 866 -868): 1032 p 1 0.577350269 0. 144.1952995
(868 -869 -885) u=8 imp:n=1 1033 p 1 -0.577350269 0. 144.1952995
c finger 1034 py -124.9004209
817 4 -7.74 (-888):(-867 -804 888.3) u=8 imp:n=1 1035 p 1 0.577350269 0. -144.1952995
c control rod clad 1036 p 1 -0.577350269 0. -144.1952995 \$ fine terzo esagono
803 44 -7.94 ((814 -815):(817 -818):(820 -821):(823 -824): 1040 cz 161.5 \$ cyl interno diagrid
(826 -827):(829 -830):(832 -833):(835 -836):(838 -839): 1041 cz 171.5 \$ cyl esterno diagrid
(841 -842):(844 -845):(847 -848)) 1042 c/y 0. -194.5 10. \$ diagrid holes
864 -861 u=8 imp:n=1 543 10 c/y 0. -194.5 10. \$ diagrid holes
c control rod caps 1044 c/x 0. -194.5 10. \$ diagrid holes
813 4 -7.74 ((-815:-818:-821:-824:-827:-830:-833:-836:-839: 545 11 c/x 0. -194.5 10. \$ diagrid holes
-842:-845:-848) 861 -866): 1047 pz 64.
((-815:-818:-821:-824:-827:-830:-833:-836:-839: 1057 pz 204.
-842:-845:-848) 865 -864) 1060 pz -163.
u=8 imp:n=1 1061 pz -157.
c boron carbide 1062 pz -64.
804 6 -2.22 (-813:-816:-819:-822:-825:-828:-831:-834: 1063 pz -58.
-837:-840:-843:-846) 1064 pz 56.
860 -862 u=8 imp:n=1 1065 pz 62.
c helium gap in control rod 1066 pz 206.
808 3 -0.0008 ((813 -814):(816 -817):(819 -820):(822 -823):(825 -826): 1067 pz 212.
(828 -829):(831 -832):(834 -835):(837 -838):(840 -841): 1068 pz 354.
(843 -844):(846 -847)) 864 -863 u=8 imp:n=1 1069 pz 360.
c insulator/reflector 1070 pz 502.
809 5 -6.0 ((-813:-816:-819:-822:-825:-828:-831:-834:-837: 1071 pz 508.
-840:-843:-846) 862 -863): 1072 pz 48.
((-813:-816:-819:-822:-825:-828:-831:-834:-837: 1073 pz 68.
-840:-843:-846) 864 -860) u=8 imp:n=1 1074 pz 200.
c He into the plenum 1075 pz 220.
812 3 -0.0008 ((-814:-817:-820:-823:-826: 1076 trc 0. 0. 188. 0. 0. 12. 192. 165.
-829:-832:-835:-838:-841:-844:-847) 1077 trc 0. 0. 188. 0. 0. 12. 197. 172.
863 -861) u=8 imp:n=1 1078 trc 0. 0. 80. 0. 0. -12. 192. 165.
c stopper 1079 trc 0. 0. 80. 0. 0. -12. 197. 172.
801 4 -7.74 (-101 104 -102 105 -103 106 801 -802 806): 1080 c/y 0. 134. 33.75 \$ hot Pb collector internal
(-101 104 -102 105 -103 106 802 -803 809): 546 10 c/y 0. 134. 33.75 \$ hot Pb collector internal
(804 -805 802 -810):(807 -808) u=8 imp:n=1 1081 c/x 0. 134. 33.75 \$ hot Pb collector internal
c SURFACE CARDS 547 11 c/x 0. 134. 33.75 \$ hot Pb collector internal
c REACTOR SURFACES 1082 c/y 0. 134. 36.75 \$ hot Pb collector external
c core and internal vessel 548 10 c/y 0. 134. 36.75 \$ hot Pb collector external
1272 cz 171.5 1083 c/x 0. 134. 36.75 \$ hot Pb collector external
1273 cz 165. 549 11 c/x 0. 134. 36.75 \$ hot Pb collector external
1274 cz 170. c collector curves
1275 cz 172. 2001 trc 0. 0. 97.25 0. 0. 73.5 225.8501222 216.1736637
1276 cz 192. 2002 trc 0. 0. 97.25 0. 0. 75.919266333 256.6492783 225.2024885
1277 cz 197. 2003 trc 0. 0. 97.25 0. 0. 80.592929998 295.1386417 233.2975115
1278 cz 211.5 2004 trc 0. 0. 97.25 0. 0. 87.202488538 353.5515656 239.9070700
1280 cz 180. 2005 trc 0. 0. 97.25 0. 0. 95.297511462 474.6492782 244.5807337
1281 cz 400. 2006 trc 0. 0. 97.25 0. 0. 104.326336336 1039.437198 247.
1282 cz 407. 1088 pz 427.25
1283 cz 188. c collettore 1
c diagrid 1084 rcc 170.5 0. 134. 60. 0. 0. 33.75
1001 py 38.02960059 1085 rcc 191.01189 0. 125.8594866 60. 0. 16.2810269 33.75
1002 p 1 0.577350269 0. 43.90470054 1086 rcc 209.38746 0. 121.6686708 60. 0. 34.51009838 33.75
1003 p 1 -0.577350269 0. 43.90470054 1087 rcc 225.86254 0. 118.5749961 60. 0. 59.7212279 33.75
1004 py -38.02960059 1089 rcc 239.31439 0. 109.7288142 60. 0. 104.3172917 33.75
1005 p 1 0.577350269 0. -43.90470054 1090 rcc 248.82628 0. 66.4010158 90. 0. 335.8845726 33.75
1006 p 1 -0.577350269 0. -43.90470054 1091 rcc 283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 33.75
1007 py 36.02960059 1092 rcc 170.5 0. 134. 60. 0. 0. 36.75
1008 p 1 0.577350269 0. 41.59529946 1093 rcc 191.01189 0. 125.8594866 60. 0. 16.2810269 36.75
1009 p 1 -0.577350269 0. 41.59529946 1094 rcc 209.38746 0. 121.6686708 60. 0. 34.51009838 36.75
1010 py -36.02960059 1095 rcc 225.86254 0. 118.5749961 60. 0. 59.7212279 36.75
1011 p 1 0.577350269 0. -41.59529946 1096 rcc 239.31439 0. 109.7288142 60. 0. 104.3172917 36.75
1012 p 1 -0.577350269 0. -41.59529946 \$ fine primo esagono 1097 rcc 248.82628 0. 66.4010158 90. 0. 335.8845726 36.75
1013 py 82.46491143 1098 rcc 283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 36.75
1014 p 1 0.577350269 0. 95.20470054 c collettore 2
1015 p 1 -0.577350269 0. 95.20470054 550 10 rcc 170.5 0. 134. 60. 0. 0. 33.75
1016 py -82.46491143 551 10 rcc 191.01189 0. 125.8594866 60. 0. 16.2810269 33.75
1017 p 1 0.577350269 0. -95.20470054 552 10 rcc 209.38746 0. 121.6686708 60. 0. 34.51009838 33.75
1018 p 1 -0.577350269 0. -95.20470054 553 10 rcc 225.86254 0. 118.5749961 60. 0. 59.7212279 33.75
1019 py 80.46491143 554 10 rcc 239.31439 0. 109.7288142 60. 0. 104.3172917 33.75
1020 p 1 0.577350269 0. 92.89529946 555 10 rcc 248.82628 0. 66.4010158 90. 0. 335.8845726 33.75
1021 p 1 -0.577350269 0. 92.89529946 556 10 rcc 283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 33.75

```

557 10 rcc 170.5 0. 134. 60. 0. 0. 36.75	c collettore 8
558 10 rcc 191.01189 0. 125.8594866 60. 0. 16.2810269 36.75	592 10 rcc 0. -170.5 134. 0. -60. 0. 33.75
559 10 rcc 209.38746 0. 121.6686708 60. 0. 34.51009838 36.75	593 10 rcc 0. -191.01189 125.8594866 0. -60. 16.2810269 33.75
560 10 rcc 225.86254 0. 118.5749961 60. 0. 59.7212279 36.75	594 10 rcc 0. -209.38746 121.6686708 0. -60. 34.51009838 33.75
561 10 rcc 239.31439 0. 109.7288142 60. 0. 104.3172917 36.75	595 10 rcc 0. -225.86254 118.5749961 0. -60. 59.7212279 33.75
562 10 rcc 248.82628 0. 66.4010158 90. 0. 335.8845726 36.75	596 10 rcc 0. -239.31439 109.7288142 0. -60. 104.3172917 33.75
563 10 rcc 283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 36.75	597 10 rcc 0. -248.82628 66.4010158 0. -90. 335.8845726 33.75
c collettore 3	598 10 rcc 0. -283.75000 136.73811 0. 0. 420. 33.75
2010 rcc 0. 170.5 134. 0. 60. 0. 33.75	599 10 rcc 0. -170.5 134. 0. -60. 0. 36.75
2011 rcc 0. 191.01189 125.8594866 0. 60. 16.2810269 33.75	600 10 rcc 0. -191.01189 125.8594866 0. -60. 16.2810269 36.75
2012 rcc 0. 209.38746 121.6686708 0. 60. 34.51009838 33.75	601 10 rcc 0. -209.38746 121.6686708 0. -60. 34.51009838 36.75
2013 rcc 0. 225.86254 118.5749961 0. 60. 59.7212279 33.75	602 10 rcc 0. -225.86254 118.5749961 0. -60. 59.7212279 36.75
2014 rcc 0. 239.31439 109.7288142 0. 60. 104.3172917 33.75	603 10 rcc 0. -239.31439 109.7288142 0. -60. 104.3172917 36.75
2015 rcc 0. 248.82628 66.4010158 0. 90. 335.8845726 33.75	604 10 rcc 0. -248.82628 66.4010158 0. -90. 335.8845726 36.75
2016 rcc 0. 283.75000 136.73811 0. 0. 420. 33.75	605 10 rcc 0. -283.75000 136.73811 0. 0. 420. 36.75
2017 rcc 0. 170.5 134. 0. 60. 0. 36.75	c completamento inner vessel in basso (affaccio diagrid)
2018 rcc 0. 191.01189 125.8594866 0. 60. 16.2810269 36.75	2060 pz -151.
2019 rcc 0. 209.38746 121.6686708 0. 60. 34.51009838 36.75	2061 trc 0. 0. -151. 0. 0. 37. 180. 170.
2020 rcc 0. 225.86254 118.5749961 0. 60. 59.7212279 36.75	2062 pz -231.
2021 rcc 0. 239.31439 109.7288142 0. 60. 104.3172917 36.75	c main vessel and internal vessel support
2022 rcc 0. 248.82628 66.4010158 0. 90. 335.8845726 36.75	2065 pz -216.
2023 rcc 0. 283.75000 136.73811 0. 0. 420. 36.75	2066 trc 0. 0. -351. 0. 0. 120. 300. 180.
c collettore 4	2067 trc 0. 0. -351. 0. 0. 120. 307.071067812 187.071067812
564 10 rcc 0. 170.5 134. 0. 60. 0. 33.75	2068 pz -351.
565 10 rcc 0. 191.01189 125.8594866 0. 60. 16.2810269 33.75	2070 box 205. -40. -351. 100. 0. 0. 0. 80. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
566 10 rcc 0. 209.38746 121.6686708 0. 60. 34.51009838 33.75	606 10 box 205. -40. -351. 100. 0. 0. 0. 80. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
567 10 rcc 0. 225.86254 118.5749961 0. 60. 59.7212279 33.75	2071 box 40. 205. -351. -80. 0. 0. 0. 100. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
568 10 rcc 0. 239.31439 109.7288142 0. 60. 104.3172917 33.75	607 10 box 40. 205. -351. -80. 0. 0. 0. 100. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
569 10 rcc 0. 248.82628 66.4010158 0. 90. 335.8845726 33.75	2072 box -205. 40. -351. -100. 0. 0. 0. -80. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
570 10 rcc 0. 283.75000 136.73811 0. 0. 420. 33.75	608 10 box -205. 40. -351. -100. 0. 0. 0. -80. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
571 10 rcc 0. 170.5 134. 0. 60. 0. 36.75	2073 box -40. -205. -351. 80. 0. 0. 0. -100. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
572 10 rcc 0. 191.01189 125.8594866 0. 60. 16.2810269 36.75	609 10 box -40. -205. -351. 80. 0. 0. 0. -100. 0. 0. 0. 150. \ \$ perforazioni de
573 10 rcc 0. 209.38746 121.6686708 0. 60. 34.51009838 36.75	2074 trc 0. 0. -231. 0. 0. -42. 400. 387.5
574 10 rcc 0. 225.86254 118.5749961 0. 60. 59.7212279 36.75	2075 trc 0. 0. -231. 0. 0. -42. 407. 394.5
575 10 rcc 0. 239.31439 109.7288142 0. 60. 104.3172917 36.75	2076 trc 0. 0. -273. 0. 0. -45 387.5 341.
576 10 rcc 0. 248.82628 66.4010158 0. 90. 335.8845726 36.75	2077 trc 0. 0. -273. 0. 0. -45 394.5 348.
577 10 rcc 0. 283.75000 136.73811 0. 0. 420. 36.75	2078 trc 0. 0. -318. 0. 0. -33 341. 294.
c collettore 5	2079 trc 0. 0. -318. 0. 0. -33 348. 307.
2024 rcc -170.5 0. 134. -60. 0. 0. 33.75	2080 trc 0. 0. -351. 0. 0. -50 294. 120.
2025 rcc -191.01189 0. 125.8594866 -60. 0. 16.2810269 33.75	2081 trc 0. 0. -351. 0. 0. -55 307. 125.
2026 rcc -209.38746 0. 121.6686708 -60. 0. 34.51009838 33.75	c main vessel argon free surface
2027 rcc -225.86254 0. 118.5749961 -60. 0. 59.7212279 33.75	2188 pz 457.6
2028 rcc -239.31439 0. 109.7288142 -60. 0. 104.3172917 33.75	c barrel
2029 rcc -248.82628 0. 66.4010158 -90. 0. 335.8845726 33.75	1100 px 145.35
2030 rcc -283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 33.75	1101 px 153.9
2031 rcc -170.5 0. 134. -60. 0. 0. 36.75	1102 p 1 1.732050808 0. 85.5
2032 rcc -191.01189 0. 125.8594866 -60. 0. 16.2810269 36.75	1103 p 1 -1.732050808 0. 188.1
2033 rcc -209.38746 0. 121.6686708 -60. 0. 34.51009838 36.75	1104 p 1 1.732050808 0. 136.8
2034 rcc -225.86254 0. 118.5749961 -60. 0. 59.7212279 36.75	1105 p 1 -1.732050808 0. 136.8
2035 rcc -239.31439 0. 109.7288142 -60. 0. 104.3172917 36.75	1106 p 1 1.732050808 0. 188.1
2036 rcc -248.82628 0. 66.4010158 -90. 0. 335.8845726 36.75	1107 p 1 -1.732050808 0. 85.5
2037 rcc -283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 36.75	1108 p 1 1.732050808 0. 239.4
c collettore 6	1110 p 1 1.732050808 0. 256.5
578 10 rcc -170.5 0. 134. -60. 0. 0. 33.75	1111 px 136.8
579 10 rcc -191.01189 0. 125.8594866 -60. 0. 16.2810269 33.75	1112 p 1 1.732050808 0. 273.6
580 10 rcc -209.38746 0. 121.6686708 -60. 0. 34.51009838 33.75	1113 px 128.25
581 10 rcc -225.86254 0. 118.5749961 -60. 0. 59.7212279 33.75	1114 p 1 1.732050808 0. 290.7
582 10 rcc -239.31439 0. 109.7288142 -60. 0. 104.3172917 33.75	1115 px 119.7
583 10 rcc -248.82628 0. 66.4010158 -90. 0. 335.8845726 33.75	1116 p 1 1.732050808 0. 307.8
584 10 rcc -283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 33.75	1117 p 1 -1.732050808 0. -85.5
585 10 rcc -170.5 0. 134. -60. 0. 0. 36.75	1118 px 94.05
586 10 rcc -191.01189 0. 125.8594866 -60. 0. 16.2810269 36.75	1119 p 1 -1.732050808 0. -136.8
587 10 rcc -209.38746 0. 121.6686708 -60. 0. 34.51009838 36.75	1120 px 68.4
588 10 rcc -225.86254 0. 118.5749961 -60. 0. 59.7212279 36.75	1121 p 1 -1.732050808 0. -188.1
589 10 rcc -239.31439 0. 109.7288142 -60. 0. 104.3172917 36.75	1122 px 42.75
590 10 rcc -248.82628 0. 66.4010158 -90. 0. 335.8845726 36.75	1123 p 1 -1.732050808 0. -239.4
591 10 rcc -283.75000 0. 136.73811 0. 0. 420. 36.75	1125 p 1 -1.732050808 0. -256.4
c collettore 7	1126 p 1 -1.732050808 0. -273.6
2038 rcc 0. -170.5 134. 0. -60. 0. 33.75	1127 p 1 -1.732050808 0. -290.7
2039 rcc 0. -191.01189 125.8594866 0. -60. 16.2810269 33.75	1128 p 1 -1.732050808 0. -307.8
2040 rcc 0. -209.38746 121.6686708 0. -60. 34.51009838 33.75	1130 px -42.75
2041 rcc 0. -225.86254 118.5749961 0. -60. 59.7212279 33.75	1131 px -68.4
2042 rcc 0. -239.31439 109.7288142 0. -60. 104.3172917 33.75	1132 px -94.05
2043 rcc 0. -248.82628 66.4010158 0. -90. 335.8845726 33.75	1133 px -119.7
2044 rcc 0. -283.75000 136.73811 0. 0. 420. 33.75	1134 px -128.25
2045 rcc 0. -170.5 134. 0. -60. 0. 36.75	1135 px -136.8
2046 rcc 0. -191.01189 125.8594866 0. -60. 16.2810269 36.75	1136 px -145.35
2047 rcc 0. -209.38746 121.6686708 0. -60. 34.51009838 36.75	1137 px -153.9
2048 rcc 0. -225.86254 118.5749961 0. -60. 59.7212279 36.75	1138 p 1 1.732050808 0. -85.5
2049 rcc 0. -239.31439 109.7288142 0. -60. 104.3172917 36.75	1139 p 1 1.732050808 0. -136.8
2050 rcc 0. -248.82628 66.4010158 0. -90. 335.8845726 36.75	1140 p 1 1.732050808 0. -188.1
2051 rcc 0. -283.75000 136.73811 0. 0. 420. 36.75	1141 p 1 1.732050808 0. -239.4

10141	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	0.369	10243	rcc	256.6019798	267.4348557	-100	0	0	700	0.7645
10142	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	0.476	10244	rcc	256.6019798	267.4348557	-100	0	0	700	0.9525
10143	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	0.7645	10245	rcc	256.6019798	267.4348557	-100	0	0	700	1.082
10144	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	0.9525	10246	rcc	256.6019798	267.4348557	-100	0	0	700	1.27
10145	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	1.082	10247	rcc	256.6019798	267.4348557	-100	0	0	700	1.3755
10146	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	1.27	10248	rcc	256.6019798	267.4348557	-100	0	0	700	1.5865
10147	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	1.3755	10251	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	0.369
10148	rcc	251.4966689	256.9131068	-100	0	0	700	1.5865	10252	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	0.476
10151	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	0.369	10253	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	0.7645
10152	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	0.476	10254	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	0.9525
10153	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	0.7645	10255	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	1.082
10154	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	0.9525	10256	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	1.27
10155	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	1.082	10257	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	1.3755
10156	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	1.27	10258	rcc	230.4531711	246.6883428	-100	0	0	700	1.5865
10157	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	1.3755	10261	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	0.369
10158	rcc	254.6220808	260.0385188	-100	0	0	700	1.5865	10262	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	0.476
10161	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	0.369	10263	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	0.7645
10162	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	0.476	10264	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	0.9525
10163	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	0.7645	10265	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	1.082
10164	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	0.9525	10266	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	1.27
10165	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	1.082	10267	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	1.3755
10166	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	1.27	10268	rcc	233.5856541	249.8208258	-100	0	0	700	1.5865
10167	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	1.3755	10271	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	0.369
10168	rcc	257.7474928	263.1639308	-100	0	0	700	1.5865	10272	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	0.476
10171	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	0.369	10273	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	0.7645
10172	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	0.476	10274	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	0.9525
10173	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	0.7645	10275	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	1.082
10174	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	0.9525	10276	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	1.27
10175	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	1.082	10277	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	1.3755
10176	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	1.27	10278	rcc	236.7110661	252.9462378	-100	0	0	700	1.5865
10177	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	1.3755	10281	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	0.369
10178	rcc	234.724096	245.5569719	-100	0	0	700	1.5865	10282	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	0.476
10181	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	0.369	10283	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	0.7645
10182	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	0.476	10284	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	0.9525
10183	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	0.7645	10285	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	1.082
10184	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	0.9525	10286	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	1.27
10185	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	1.082	10287	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	1.3755
10186	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	1.27	10288	rcc	239.836478	256.0716497	-100	0	0	700	1.5865
10187	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	1.3755	10291	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	0.369
10188	rcc	237.849508	248.6823839	-100	0	0	700	1.5865	10292	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	0.476
10191	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	0.369	10293	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	0.7645
10192	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	0.476	10294	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	0.9525
10193	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	0.7645	10295	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	1.082
10194	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	0.9525	10296	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	1.27
10195	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	1.082	10297	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	1.3755
10196	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	1.27	10298	rcc	242.96189	259.1970617	-100	0	0	700	1.5865
10197	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	1.3755	10301	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	0.369
10198	rcc	240.97492	251.8077958	-100	0	0	700	1.5865	10302	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	0.476
10201	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	0.369	10303	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	0.7645
10202	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	0.476	10304	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	0.9525
10203	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	0.7645	10305	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	1.082
10204	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	0.9525	10306	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	1.27
10205	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	1.082	10307	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	1.3755
10206	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	1.27	10308	rcc	246.087302	262.3224737	-100	0	0	700	1.5865
10207	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	1.3755	10311	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	0.369
10208	rcc	244.1003319	254.9332078	-100	0	0	700	1.5865	10312	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	0.476
10211	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	0.369	10313	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	0.7645
10212	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	0.476	10314	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	0.9525
10213	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	0.7645	10315	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	1.082
10214	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	0.9525	10316	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	1.27
10215	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	1.082	10317	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	1.3755
10216	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	1.27	10318	rcc	249.212714	265.4478857	-100	0	0	700	1.5865
10217	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	1.3755	10321	rcc	252.3381259	268.5732976	-100	0	0	700	0.369
10218	rcc	247.2257439	258.0586198	-100	0	0	700	1.5865	10322	rcc	252.3381259	268.5732976	-100	0	0	700	0.476
10221	rcc	250.3511559	261.1840318	-100	0	0	700	0.369	10323	rcc	252.3381259	268.5732976	-100	0	0	700	0.7645
10222	rcc	250.3511559	261.1840318	-100	0	0	700	0.476	10324	rcc	252.3381259	268.5732976	-100	0	0	700	0.9525
10223	rcc	250.3511559	261.1840318	-100	0	0	700	0.7645	10325	rcc	252.3381259	268.5732976	-100	0	0	700	1.082
10224	rcc	250.3511559	261.1840318	-100	0	0	700	0.9525	10326	rcc	252.3381259	268.5732976	-100	0	0	700	1.27
10225	rcc	250.3511559	261.1840318	-100	0	0	700	1.082	10327	rcc	252.3381259	268.5732976	-100	0	0	700	1.3755
10226	rcc	250.3511559	261.1840318	-100	0	0	700	1.27	10328	rcc	252.3381259						

10345	rcc	229.3147291	250.9663388	-100	0	0	700	1.082	10447	rcc	231.2946281	258.3626757	-100	0	0	700	1.3755
10346	rcc	229.3147291	250.9663388	-100	0	0	700	1.27	10448	rcc	231.2946281	258.3626757	-100	0	0	700	1.5865
10347	rcc	229.3147291	250.9663388	-100	0	0	700	1.3755	10451	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	0.369
10348	rcc	229.3147291	250.9663388	-100	0	0	700	1.5865	10452	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	0.476
10351	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	0.369	10453	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	0.7645
10352	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	0.476	10454	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	0.9525
10353	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	0.7645	10455	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	1.082
10354	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	0.9525	10456	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	1.27
10355	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	1.082	10457	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	1.3755
10356	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	1.27	10458	rcc	234.4200401	261.4880877	-100	0	0	700	1.5865
10357	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	1.3755	10461	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	0.369
10358	rcc	232.4401411	254.0917508	-100	0	0	700	1.5865	10462	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	0.476
10361	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	0.369	10463	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	0.7645
10362	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	0.476	10464	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	0.9525
10363	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	0.7645	10465	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	1.082
10364	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	0.9525	10466	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	1.27
10365	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	1.082	10467	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	1.3755
10366	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	1.27	10468	rcc	237.5454521	264.6134997	-100	0	0	700	1.5865
10367	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	1.3755	10471	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	0.369
10368	rcc	235.5655531	257.2171627	-100	0	0	700	1.5865	10472	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	0.476
10371	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	0.369	10473	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	0.7645
10372	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	0.476	10474	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	0.9525
10373	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	0.7645	10475	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	1.082
10374	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	0.9525	10476	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	1.27
10375	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	1.082	10477	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	1.3755
10376	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	1.27	10478	rcc	240.670864	267.7389116	-100	0	0	700	1.5865
10377	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	1.3755	10481	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	0.369
10378	rcc	238.6909651	260.3425747	-100	0	0	700	1.5865	10482	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	0.476
10381	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	0.369	10483	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	0.7645
10382	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	0.476	10484	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	0.9525
10383	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	0.7645	10485	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	1.082
10384	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	0.9525	10486	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	1.27
10385	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	1.082	10487	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	1.3755
10386	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	1.27	10488	rcc	243.796276	270.8643236	-100	0	0	700	1.5865
10387	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	1.3755	10491	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	0.369
10388	rcc	241.816377	263.4679867	-100	0	0	700	1.5865	10492	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	0.476
10391	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	0.369	10493	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	0.7645
10392	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	0.476	10494	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	0.9525
10393	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	0.7645	10495	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	1.082
10394	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	0.9525	10496	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	1.27
10395	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	1.082	10497	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	1.3755
10396	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	1.27	10498	rcc	246.921688	273.9897356	-100	0	0	700	1.5865
10397	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	1.3755	10501	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	0.369
10398	rcc	244.941789	266.5933986	-100	0	0	700	1.5865	10502	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	0.476
10401	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	0.369	10503	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	0.7645
10402	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	0.476	10504	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	0.9525
10403	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	0.7645	10505	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	1.082
10404	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	0.9525	10506	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	1.27
10405	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	1.082	10507	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	1.3755
10406	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	1.27	10508	rcc	220.7658082	253.2502937	-100	0	0	700	1.5865
10407	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	1.3755	10511	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	0.369
10408	rcc	248.067201	269.7188106	-100	0	0	700	1.5865	10512	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	0.476
10411	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	0.369	10513	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	0.7645
10412	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	0.476	10514	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	0.9525
10413	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	0.7645	10515	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	1.082
10414	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	0.9525	10516	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	1.27
10415	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	1.082	10517	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	1.3755
10416	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	1.27	10518	rcc	223.8982912	256.3827767	-100	0	0	700	1.5865
10417	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	1.3755	10521	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	0.369
10418	rcc	251.1926129	272.8442226	-100	0	0	700	1.5865	10522	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	0.476
10421	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	0.369	10523	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	0.7645
10422	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	0.476	10524	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	0.9525
10423	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	0.7645	10525	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	1.082
10424	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	0.9525	10526	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	1.27
10425	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	1.082	10527	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	1.3755
10426	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	1.27	10528	rcc	227.0237032	259.5081887	-100	0	0	700	1.5865
10427	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	1.3755	10531	rcc	230.1491151	262.6336007	-100	0	0	700	0.369
10428	rcc	225.0367331	252.1047807	-100	0	0	700	1.5865	10532	rcc	230.1491151	262.6336007	-100	0	0	700	0.476
10431	rcc	228.1692162	255.2372637	-100	0	0	700	0.369	10533	rcc	230.1491151	262.6336007	-100	0	0	700	0.7645
10432	rcc	228.1692162	255.2372637														

10551	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	0.369	10653	rcc	238.3798381	276.2807615	-100	0	0	700	0.7645
10552	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	0.476	10654	rcc	238.3798381	276.2807615	-100	0	0	700	0.9525
10553	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	0.7645	10655	rcc	238.3798381	276.2807615	-100	0	0	700	1.082
10554	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	0.9525	10656	rcc	238.3798381	276.2807615	-100	0	0	700	1.27
10555	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	1.082	10657	rcc	238.3798381	276.2807615	-100	0	0	700	1.3755
10556	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	1.27	10658	rcc	238.3798381	276.2807615	-100	0	0	700	1.5865
10557	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	1.3755	10661	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	0.369
10558	rcc	236.3999391	268.8844246	-100	0	0	700	1.5865	10662	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	0.476
10561	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	0.369	10663	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	0.7645
10562	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	0.476	10664	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	0.9525
10563	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	0.7645	10665	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	1.082
10564	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	0.9525	10666	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	1.27
10565	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	1.082	10667	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	1.3755
10566	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	1.27	10668	rcc	241.50525	279.4061735	-100	0	0	700	1.5865
10567	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	1.3755	10671	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	0.369
10568	rcc	239.5253511	272.0098366	-100	0	0	700	1.5865	10672	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	0.476
10571	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	0.369	10673	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	0.7645
10572	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	0.476	10674	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	0.9525
10573	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	0.7645	10675	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	1.082
10574	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	0.9525	10676	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	1.27
10575	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	1.082	10677	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	1.3755
10576	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	1.27	10678	rcc	212.2239582	255.5413197	-100	0	0	700	1.5865
10577	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	1.3755	10681	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	0.369
10578	rcc	242.650763	275.1352486	-100	0	0	700	1.5865	10682	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	0.476
10581	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	0.369	10683	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	0.7645
10582	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	0.476	10684	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	0.9525
10583	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	0.7645	10685	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	1.082
10584	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	0.9525	10686	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	1.27
10585	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	1.082	10687	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	1.3755
10586	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	1.27	10688	rcc	215.3493702	258.6667316	-100	0	0	700	1.5865
10587	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	1.3755	10691	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	0.369
10588	rcc	216.4948832	254.3958067	-100	0	0	700	1.5865	10692	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	0.476
10591	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	0.369	10693	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	0.7645
10592	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	0.476	10694	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	0.9525
10593	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	0.7645	10695	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	1.082
10594	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	0.9525	10696	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	1.27
10595	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	1.082	10697	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	1.3755
10596	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	1.27	10698	rcc	218.4818533	261.7992147	-100	0	0	700	1.5865
10597	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	1.3755	10701	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	0.369
10598	rcc	219.6202952	257.5212186	-100	0	0	700	1.5865	10702	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	0.476
10601	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	0.369	10703	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	0.7645
10602	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	0.476	10704	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	0.9525
10603	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	0.7645	10705	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	1.082
10604	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	0.9525	10706	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	1.27
10605	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	1.082	10707	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	1.3755
10606	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	1.27	10708	rcc	221.6072652	264.9246266	-100	0	0	700	1.5865
10607	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	1.3755	10711	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	0.369
10608	rcc	222.7527782	260.6537017	-100	0	0	700	1.5865	10712	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	0.476
10611	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	0.369	10713	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	0.7645
10612	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	0.476	10714	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	0.9525
10613	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	0.7645	10715	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	1.082
10614	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	0.9525	10716	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	1.27
10615	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	1.082	10717	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	1.3755
10616	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	1.27	10718	rcc	224.7326772	268.0500386	-100	0	0	700	1.5865
10617	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	1.3755	10721	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	0.369
10618	rcc	225.8781902	263.7791137	-100	0	0	700	1.5865	10722	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	0.476
10621	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	0.369	10723	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	0.7645
10622	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	0.476	10724	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	0.9525
10623	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	0.7645	10725	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	1.082
10624	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	0.9525	10726	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	1.27
10625	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	1.082	10727	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	1.3755
10626	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	1.27	10728	rcc	227.8580892	271.1754506	-100	0	0	700	1.5865
10627	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	1.3755	10731	rcc	230.9835011	274.3008626	-100	0	0	700	0.369
10628	rcc	229.0036022	266.9045256	-100	0	0	700	1.5865	10732	rcc	230.9835011	274.3008626	-100	0	0	700	0.476
10631	rcc	232.1290141	270.0299376	-100	0	0	700	0.369	10733	rcc	230.9835011	274.3008626	-100	0	0	700	0.7645
10632	rcc	232.1290141	270.0299376	-100	0	0	700	0.476	10734	rcc	230.9835011	274.3008626	-100	0	0	700	0.9525
10633	rcc	232.1290141	270.0299376	-100	0	0	700	0.7645	10735	rcc	230.9835011	274.3008626	-100	0	0	700	1.082
10634	rcc	232.1290141	270.0299376	-100	0	0	700	0.9525	10736	rcc	230.9835011	274.3008626	-100	0	0	700	1.27
10635	rcc	232.1290141	270.0299376	-100	0	0	700	1.082	10737	rcc	230.9835011	274.3008626	-100	0	0	700	1.3755
10636	rcc	232.1290141	270.0299376	-100	0	0											

10755	rcc	237.2343251	280.5516865	-100	0	0	700	1.082	10857	rcc	203.6891794	257.8252746	-100	0	0	700	1.3755
10756	rcc	237.2343251	280.5516865	-100	0	0	700	1.27	10858	rcc	203.6891794	257.8252746	-100	0	0	700	1.5865
10757	rcc	237.2343251	280.5516865	-100	0	0	700	1.3755	10861	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	0.369
10758	rcc	237.2343251	280.5516865	-100	0	0	700	1.5865	10862	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	0.476
10761	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	0.369	10863	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	0.7645
10762	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	0.476	10864	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	0.9525
10763	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	0.7645	10865	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	1.082
10764	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	0.9525	10866	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	1.27
10765	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	1.082	10867	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	1.3755
10766	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	1.27	10868	rcc	206.8145914	260.9506865	-100	0	0	700	1.5865
10767	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	1.3755	10871	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	0.369
10768	rcc	207.9601043	256.6797616	-100	0	0	700	1.5865	10872	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	0.476
10771	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	0.369	10873	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	0.7645
10772	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	0.476	10874	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	0.9525
10773	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	0.7645	10875	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	1.082
10774	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	0.9525	10876	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	1.27
10775	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	1.082	10877	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	1.3755
10776	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	1.27	10878	rcc	209.9400033	264.0760985	-100	0	0	700	1.5865
10777	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	1.3755	10881	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	0.369
10778	rcc	211.0855163	259.8051735	-100	0	0	700	1.5865	10882	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	0.476
10781	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	0.369	10883	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	0.7645
10782	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	0.476	10884	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	0.9525
10783	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	0.7645	10885	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	1.082
10784	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	0.9525	10886	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	1.27
10785	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	1.082	10887	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	1.3755
10786	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	1.27	10888	rcc	213.0724864	267.2085815	-100	0	0	700	1.5865
10787	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	1.3755	10891	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	0.369
10788	rcc	214.2109283	262.9305855	-100	0	0	700	1.5865	10892	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	0.476
10791	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	0.369	10893	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	0.7645
10792	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	0.476	10894	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	0.9525
10793	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	0.7645	10895	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	1.082
10794	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	0.9525	10896	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	1.27
10795	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	1.082	10897	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	1.3755
10796	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	1.27	10898	rcc	216.1978983	270.3339935	-100	0	0	700	1.5865
10797	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	1.3755	10901	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	0.369
10798	rcc	217.3434113	266.0630686	-100	0	0	700	1.5865	10902	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	0.476
10801	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	0.369	10903	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	0.7645
10802	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	0.476	10904	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	0.9525
10803	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	0.7645	10905	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	1.082
10804	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	0.9525	10906	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	1.27
10805	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	1.082	10907	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	1.3755
10806	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	1.27	10908	rcc	219.3233103	273.4594055	-100	0	0	700	1.5865
10807	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	1.3755	10911	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	0.369
10808	rcc	220.4688233	269.1884805	-100	0	0	700	1.5865	10912	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	0.476
10811	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	0.369	10913	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	0.7645
10812	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	0.476	10914	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	0.9525
10813	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	0.7645	10915	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	1.082
10814	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	0.9525	10916	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	1.27
10815	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	1.082	10917	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	1.3755
10816	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	1.27	10918	rcc	222.4487223	276.5848175	-100	0	0	700	1.5865
10817	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	1.3755	10921	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	0.369
10818	rcc	223.5942353	272.3138925	-100	0	0	700	1.5865	10922	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	0.476
10821	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	0.369	10923	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	0.7645
10822	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	0.476	10924	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	0.9525
10823	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	0.7645	10925	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	1.082
10824	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	0.9525	10926	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	1.27
10825	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	1.082	10927	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	1.3755
10826	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	1.27	10928	rcc	225.5741343	279.7102294	-100	0	0	700	1.5865
10827	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	1.3755	10931	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	0.369
10828	rcc	226.7196473	275.4393045	-100	0	0	700	1.5865	10932	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	0.476
10831	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	0.369	10933	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	0.7645
10832	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	0.476	10934	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	0.9525
10833	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	0.7645	10935	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	1.082
10834	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	0.9525	10936	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	1.27
10835	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	1.082	10937	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	1.3755
10836	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	1.27	10938	rcc	228.6995462	282.8356414	-100	0	0	700	1.5865
10837	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	1.3755	10941	rcc	196.2928425	255.8453756	-100	0	0	700	0.369
10838	rcc	229.8450592	278.5647164	-100	0	0	700	1.5865	10942	rcc	196.2928425	255.8453756	-100	0	0	700	0.476
10841	rcc	232.9704712	281.6901284	-100	0	0	700	0.369	10943	rcc	196.2928425	255.8453756	-100	0	0	700	0.7645

11165	rcc	184.6255806	255.0109896	-100	0	0	700	1.082	11267	rcc	215.8867714	286.2721804	-100	0	0	700	1.3755
11166	rcc	184.6255806	255.0109896	-100	0	0	700	1.27	11268	rcc	215.8867714	286.2721804	-100	0	0	700	1.5865
11167	rcc	184.6255806	255.0109896	-100	0	0	700	1.3755	11271	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	0.369
11168	rcc	184.6255806	255.0109896	-100	0	0	700	1.5865	11272	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	0.476
11171	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	0.369	11273	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	0.7645
11172	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	0.476	11274	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	0.9525
11173	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	0.7645	11275	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	1.082
11174	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	0.9525	11276	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	1.27
11175	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	1.082	11277	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	1.3755
11176	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	1.27	11278	rcc	139.7172289	215.5190758	-100	0	0	700	1.5865
11177	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	1.3755	11281	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	0.369
11178	rcc	187.7509925	258.1364015	-100	0	0	700	1.5865	11282	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	0.476
11181	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	0.369	11283	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	0.7645
11182	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	0.476	11284	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	0.9525
11183	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	0.7645	11285	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	1.082
11184	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	0.9525	11286	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	1.27
11185	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	1.082	11287	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	1.3755
11186	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	1.27	11288	rcc	142.8426409	218.6444878	-100	0	0	700	1.5865
11187	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	1.3755	11291	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	0.369
11188	rcc	190.8764045	261.2618135	-100	0	0	700	1.5865	11292	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	0.476
11191	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	0.369	11293	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	0.7645
11192	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	0.476	11294	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	0.9525
11193	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	0.7645	11295	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	1.082
11194	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	0.9525	11296	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	1.27
11195	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	1.082	11297	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	1.3755
11196	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	1.27	11298	rcc	145.9751239	221.7769709	-100	0	0	700	1.5865
11197	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	1.3755	11301	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	0.369
11198	rcc	194.0018165	264.3872255	-100	0	0	700	1.5865	11302	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	0.476
11201	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	0.369	11303	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	0.7645
11202	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	0.476	11304	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	0.9525
11203	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	0.7645	11305	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	1.082
11204	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	0.9525	11306	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	1.27
11205	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	1.082	11307	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	1.3755
11206	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	1.27	11308	rcc	149.1005359	224.9023828	-100	0	0	700	1.5865
11207	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	1.3755	11311	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	0.369
11208	rcc	197.1272285	267.5126375	-100	0	0	700	1.5865	11312	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	0.476
11211	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	0.369	11313	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	0.7645
11212	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	0.476	11314	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	0.9525
11213	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	0.7645	11315	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	1.082
11214	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	0.9525	11316	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	1.27
11215	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	1.082	11317	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	1.3755
11216	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	1.27	11318	rcc	152.2259479	228.0277948	-100	0	0	700	1.5865
11217	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	1.3755	11321	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	0.369
11218	rcc	200.2526404	270.6380494	-100	0	0	700	1.5865	11322	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	0.476
11221	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	0.369	11323	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	0.7645
11222	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	0.476	11324	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	0.9525
11223	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	0.7645	11325	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	1.082
11224	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	0.9525	11326	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	1.27
11225	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	1.082	11327	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	1.3755
11226	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	1.27	11328	rcc	170.9784197	246.7802666	-100	0	0	700	1.5865
11227	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	1.3755	11331	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	0.369
11228	rcc	203.3780524	273.7634614	-100	0	0	700	1.5865	11332	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	0.476
11231	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	0.369	11333	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	0.7645
11232	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	0.476	11334	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	0.9525
11233	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	0.7645	11335	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	1.082
11234	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	0.9525	11336	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	1.27
11235	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	1.082	11337	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	1.3755
11236	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	1.27	11338	rcc	174.1038317	249.9056786	-100	0	0	700	1.5865
11237	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	1.3755	11341	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	0.369
11238	rcc	206.5105354	276.8959444	-100	0	0	700	1.5865	11342	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	0.476
11241	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	0.369	11343	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	0.7645
11242	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	0.476	11344	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	0.9525
11243	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	0.7645	11345	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	1.082
11244	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	0.9525	11346	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	1.27
11245	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	1.082	11347	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	1.3755
11246	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	1.27	11348	rcc	177.2292436	253.0310906	-100	0	0	700	1.5865
11247	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	1.3755	11351	rcc	180.3546556	256.1565026	-100	0	0	700	0.369
11248	rcc	209.6359474	280.0213564	-100	0	0	700	1.5865	11352	rcc	180.3546556	256.1565026	-100	0	0	700	0.476
11251	rcc	212.7613594	283.1467684	-100	0	0	700	0.369	11353	rcc	180.3546556	256.1565026	-100	0	0	700	0.7645

11371	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	0.369	11473	rcc	138.578787	219.7829297	-100	0	0	700	0.7645
11372	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	0.476	11474	rcc	138.578787	219.7829297	-100	0	0	700	0.9525
11373	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	0.7645	11475	rcc	138.578787	219.7829297	-100	0	0	700	1.082
11374	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	0.9525	11476	rcc	138.578787	219.7829297	-100	0	0	700	1.27
11375	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	1.082	11477	rcc	138.578787	219.7829297	-100	0	0	700	1.3755
11376	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	1.27	11478	rcc	138.578787	219.7829297	-100	0	0	700	1.5865
11377	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	1.3755	11481	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	0.369
11378	rcc	186.6054796	262.4073265	-100	0	0	700	1.5865	11482	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	0.476
11381	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	0.369	11483	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	0.7645
11382	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	0.476	11484	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	0.9525
11383	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	0.7645	11485	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	1.082
11384	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	0.9525	11486	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	1.27
11385	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	1.082	11487	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	1.3755
11386	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	1.27	11488	rcc	141.7041989	222.9083417	-100	0	0	700	1.5865
11387	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	1.3755	11491	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	0.369
11388	rcc	189.7308915	265.5327385	-100	0	0	700	1.5865	11492	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	0.476
11391	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	0.369	11493	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	0.7645
11392	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	0.476	11494	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	0.9525
11393	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	0.7645	11495	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	1.082
11394	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	0.9525	11496	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	1.27
11395	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	1.082	11497	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	1.3755
11396	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	1.27	11498	rcc	144.836682	226.0408247	-100	0	0	700	1.5865
11397	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	1.3755	11501	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	0.369
11398	rcc	192.8563035	268.6581504	-100	0	0	700	1.5865	11502	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	0.476
11401	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	0.369	11503	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	0.7645
11402	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	0.476	11504	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	0.9525
11403	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	0.7645	11505	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	1.082
11404	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	0.9525	11506	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	1.27
11405	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	1.082	11507	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	1.3755
11406	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	1.27	11508	rcc	147.962094	229.1662367	-100	0	0	700	1.5865
11407	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	1.3755	11511	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	0.369
11408	rcc	195.9817155	271.7835624	-100	0	0	700	1.5865	11512	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	0.476
11411	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	0.369	11513	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	0.7645
11412	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	0.476	11514	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	0.9525
11413	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	0.7645	11515	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	1.082
11414	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	0.9525	11516	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	1.27
11415	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	1.082	11517	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	1.3755
11416	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	1.27	11518	rcc	151.0875059	232.2916487	-100	0	0	700	1.5865
11417	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	1.3755	11521	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	0.369
11418	rcc	199.1071274	274.9089744	-100	0	0	700	1.5865	11522	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	0.476
11421	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	0.369	11523	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	0.7645
11422	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	0.476	11524	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	0.9525
11423	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	0.7645	11525	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	1.082
11424	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	0.9525	11526	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	1.27
11425	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	1.082	11527	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	1.3755
11426	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	1.27	11528	rcc	154.2129179	235.4170607	-100	0	0	700	1.5865
11427	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	1.3755	11531	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	0.369
11428	rcc	202.2396105	278.0414574	-100	0	0	700	1.5865	11532	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	0.476
11431	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	0.369	11533	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	0.7645
11432	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	0.476	11534	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	0.9525
11433	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	0.7645	11535	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	1.082
11434	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	0.9525	11536	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	1.27
11435	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	1.082	11537	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	1.3755
11436	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	1.27	11538	rcc	157.3383299	238.5424726	-100	0	0	700	1.5865
11437	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	1.3755	11541	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	0.369
11438	rcc	205.3650225	281.1668694	-100	0	0	700	1.5865	11542	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	0.476
11441	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	0.369	11543	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	0.7645
11442	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	0.476	11544	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	0.9525
11443	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	0.7645	11545	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	1.082
11444	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	0.9525	11546	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	1.27
11445	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	1.082	11547	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	1.3755
11446	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	1.27	11548	rcc	160.4637419	241.6678846	-100	0	0	700	1.5865
11447	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	1.3755	11551	rcc	163.5891538	244.7932966	-100	0	0	700	0.369
11448	rcc	208.4904344	284.2922814	-100	0	0	700	1.5865	11552	rcc	163.5891538	244.7932966	-100	0	0	700	0.476
11451	rcc	211.6158464	287.4176933	-100	0	0	700	0.369	11553	rcc	163.5891538	244.7932966	-100	0	0	700	0.7645
11452	rcc	211.6158464	287.4176933	-100	0	0	700	0.476	11554	rcc	163.5891538	244.7932966	-100	0	0	700	0.9525
11453	rcc	211.6158464	287.4176933	-100	0	0	700	0.7645	11555	rcc	163.5891538	244.7932966	-100	0	0	700	1.082
11454	rcc	211.6158464	287.4176933	-100	0	0	700	0.9525	11556	rcc	163.5891538	244.7932966	-100	0	0	700	1.27
11455	rcc	211.6158464	287.4176933	-100	0	0	700	1.082	11557	rcc	163.5891538	244.7932966	-100	0	0	700	1.3755
11456	rcc	211.6158464	287.4176933	-100	0	0											

11575	rcc	169.8399778	251.0441205	-100	0	0	700	1.082	11677	rcc	201.1011686	282.3053113	-100	0	0	700	1.3755
11576	rcc	169.8399778	251.0441205	-100	0	0	700	1.27	11678	rcc	201.1011686	282.3053113	-100	0	0	700	1.5865
11577	rcc	169.8399778	251.0441205	-100	0	0	700	1.3755	11681	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	0.369
11578	rcc	169.8399778	251.0441205	-100	0	0	700	1.5865	11682	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	0.476
11581	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	0.369	11683	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	0.7645
11582	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	0.476	11684	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	0.9525
11583	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	0.7645	11685	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	1.082
11584	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	0.9525	11686	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	1.27
11585	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	1.082	11687	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	1.3755
11586	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	1.27	11688	rcc	204.2265805	285.4307233	-100	0	0	700	1.5865
11587	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	1.3755	11691	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	0.369
11588	rcc	172.9653897	254.1695325	-100	0	0	700	1.5865	11692	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	0.476
11591	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	0.369	11693	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	0.7645
11592	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	0.476	11694	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	0.9525
11593	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	0.7645	11695	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	1.082
11594	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	0.9525	11696	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	1.27
11595	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	1.082	11697	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	1.3755
11596	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	1.27	11698	rcc	207.3519925	288.5561353	-100	0	0	700	1.5865
11597	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	1.3755	11701	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	0.369
11598	rcc	176.0908017	257.2949445	-100	0	0	700	1.5865	11702	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	0.476
11601	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	0.369	11703	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	0.7645
11602	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	0.476	11704	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	0.9525
11603	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	0.7645	11705	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	1.082
11604	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	0.9525	11706	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	1.27
11605	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	1.082	11707	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	1.3755
11606	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	1.27	11708	rcc	134.307862	220.9284427	-100	0	0	700	1.5865
11607	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	1.3755	11711	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	0.369
11608	rcc	179.2162137	260.4203564	-100	0	0	700	1.5865	11712	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	0.476
11611	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	0.369	11713	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	0.7645
11612	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	0.476	11714	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	0.9525
11613	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	0.7645	11715	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	1.082
11614	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	0.9525	11716	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	1.27
11615	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	1.082	11717	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	1.3755
11616	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	1.27	11718	rcc	137.433274	224.0538547	-100	0	0	700	1.5865
11617	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	1.3755	11721	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	0.369
11618	rcc	182.3416257	263.5457684	-100	0	0	700	1.5865	11722	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	0.476
11621	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	0.369	11723	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	0.7645
11622	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	0.476	11724	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	0.9525
11623	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	0.7645	11725	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	1.082
11624	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	0.9525	11726	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	1.27
11625	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	1.082	11727	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	1.3755
11626	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	1.27	11728	rcc	140.565757	227.1863377	-100	0	0	700	1.5865
11627	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	1.3755	11731	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	0.369
11628	rcc	185.4670376	266.6711804	-100	0	0	700	1.5865	11732	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	0.476
11631	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	0.369	11733	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	0.7645
11632	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	0.476	11734	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	0.9525
11633	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	0.7645	11735	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	1.082
11634	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	0.9525	11736	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	1.27
11635	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	1.082	11737	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	1.3755
11636	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	1.27	11738	rcc	143.691169	230.3117497	-100	0	0	700	1.5865
11637	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	1.3755	11741	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	0.369
11638	rcc	188.5924496	269.7965924	-100	0	0	700	1.5865	11742	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	0.476
11641	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	0.369	11743	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	0.7645
11642	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	0.476	11744	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	0.9525
11643	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	0.7645	11745	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	1.082
11644	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	0.9525	11746	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	1.27
11645	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	1.082	11747	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	1.3755
11646	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	1.27	11748	rcc	146.816581	233.4371617	-100	0	0	700	1.5865
11647	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	1.3755	11751	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	0.369
11648	rcc	191.7178616	272.9220043	-100	0	0	700	1.5865	11752	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	0.476
11651	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	0.369	11753	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	0.7645
11652	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	0.476	11754	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	0.9525
11653	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	0.7645	11755	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	1.082
11654	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	0.9525	11756	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	1.27
11655	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	1.082	11757	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	1.3755
11656	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	1.27	11758	rcc	149.941993	236.5625736	-100	0	0	700	1.5865
11657	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	1.3755	11761	rcc	153.0674049	239.6879856	-100	0	0	700	0.369
11658	rcc	194.8432736	276.0474163	-100	0	0	700	1.5865	11762	rcc	153.0674049	239.6879856	-100	0	0	700	0.476
11661	rcc	197.9686855	279.1728283	-100	0	0	700	0.369	11763	rcc	153.0674049	239.6879856	-100	0	0	700	0.7645
11662	rcc	197.9686855	279.1728283														

11781	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	0.369	11883	rcc	190.5723486	277.1929293	-100	0	0	700	0.7645
11782	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	0.476	11884	rcc	190.5723486	277.1929293	-100	0	0	700	0.9525
11783	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	0.7645	11885	rcc	190.5723486	277.1929293	-100	0	0	700	1.082
11784	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	0.9525	11886	rcc	190.5723486	277.1929293	-100	0	0	700	1.27
11785	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	1.082	11887	rcc	190.5723486	277.1929293	-100	0	0	700	1.3755
11786	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	1.27	11888	rcc	190.5723486	277.1929293	-100	0	0	700	1.5865
11787	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	1.3755	11891	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	0.369
11788	rcc	159.3182289	245.9388096	-100	0	0	700	1.5865	11892	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	0.476
11791	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	0.369	11893	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	0.7645
11792	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	0.476	11894	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	0.9525
11793	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	0.7645	11895	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	1.082
11794	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	0.9525	11896	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	1.27
11795	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	1.082	11897	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	1.3755
11796	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	1.27	11898	rcc	193.6977606	280.3183413	-100	0	0	700	1.5865
11797	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	1.3755	11901	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	0.369
11798	rcc	162.4436408	249.0642215	-100	0	0	700	1.5865	11902	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	0.476
11801	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	0.369	11903	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	0.7645
11802	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	0.476	11904	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	0.9525
11803	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	0.7645	11905	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	1.082
11804	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	0.9525	11906	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	1.27
11805	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	1.082	11907	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	1.3755
11806	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	1.27	11908	rcc	196.8302436	283.4508243	-100	0	0	700	1.5865
11807	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	1.3755	11911	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	0.369
11808	rcc	165.5690528	252.1896335	-100	0	0	700	1.5865	11912	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	0.476
11811	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	0.369	11913	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	0.7645
11812	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	0.476	11914	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	0.9525
11813	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	0.7645	11915	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	1.082
11814	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	0.9525	11916	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	1.27
11815	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	1.082	11917	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	1.3755
11816	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	1.27	11918	rcc	199.9556556	286.5762363	-100	0	0	700	1.5865
11817	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	1.3755	11921	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	0.369
11818	rcc	168.6944648	255.3150455	-100	0	0	700	1.5865	11922	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	0.476
11821	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	0.369	11923	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	0.7645
11822	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	0.476	11924	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	0.9525
11823	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	0.7645	11925	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	1.082
11824	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	0.9525	11926	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	1.27
11825	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	1.082	11927	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	1.3755
11826	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	1.27	11928	rcc	203.0810676	289.7016483	-100	0	0	700	1.5865
11827	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	1.3755	11931	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	0.369
11828	rcc	171.8198768	258.4404575	-100	0	0	700	1.5865	11932	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	0.476
11831	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	0.369	11933	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	0.7645
11832	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	0.476	11934	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	0.9525
11833	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	0.7645	11935	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	1.082
11834	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	0.9525	11936	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	1.27
11835	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	1.082	11937	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	1.3755
11836	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	1.27	11938	rcc	130.0369371	222.0739557	-100	0	0	700	1.5865
11837	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	1.3755	11941	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	0.369
11838	rcc	174.9452887	261.5658694	-100	0	0	700	1.5865	11942	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	0.476
11841	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	0.369	11943	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	0.7645
11842	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	0.476	11944	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	0.9525
11843	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	0.7645	11945	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	1.082
11844	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	0.9525	11946	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	1.27
11845	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	1.082	11947	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	1.3755
11846	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	1.27	11948	rcc	133.162349	225.1993677	-100	0	0	700	1.5865
11847	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	1.3755	11951	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	0.369
11848	rcc	178.0707007	264.6912814	-100	0	0	700	1.5865	11952	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	0.476
11851	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	0.369	11953	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	0.7645
11852	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	0.476	11954	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	0.9525
11853	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	0.7645	11955	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	1.082
11854	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	0.9525	11956	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	1.27
11855	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	1.082	11957	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	1.3755
11856	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	1.27	11958	rcc	136.287761	228.3247796	-100	0	0	700	1.5865
11857	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	1.3755	11961	rcc	139.420244	231.4572627	-100	0	0	700	0.369
11858	rcc	181.1961127	267.8166934	-100	0	0	700	1.5865	11962	rcc	139.420244	231.4572627	-100	0	0	700	0.476
11861	rcc	184.3215247	270.9421053	-100	0	0	700	0.369	11963	rcc	139.420244	231.4572627	-100	0	0	700	0.7645
11862	rcc	184.3215247	270.9421053	-100	0	0	700	0.476	11964	rcc	139.420244	231.4572627	-100	0	0	700	0.9525
11863	rcc	184.3215247	270.9421053	-100	0	0	700	0.7645	11965	rcc	139.420244	231.4572627	-100	0	0	700	1.082
11864	rcc	184.3215247	270.9421053	-100	0	0	700	0.9525	11966	rcc	139.420244	231.4572627	-100	0	0	700	1.27
11865	rcc	184.3215247	270.9421053	-100	0	0	700	1.082	11967	rcc	139.420244	231.4572627	-100	0	0	700	1.3755
11866	rcc	184.3215247	270.9421053	-100	0	0											

11985	rcc	145.671068	237.7080866	-100	0	0	700	1.082	12087	rcc	176.9251877	268.9622064	-100	0	0	700	1.3755
11986	rcc	145.671068	237.7080866	-100	0	0	700	1.27	12088	rcc	176.9251877	268.9622064	-100	0	0	700	1.5865
11987	rcc	145.671068	237.7080866	-100	0	0	700	1.3755	12091	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	0.369
11988	rcc	145.671068	237.7080866	-100	0	0	700	1.5865	12092	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	0.476
11991	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	0.369	12093	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	0.7645
11992	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	0.476	12094	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	0.9525
11993	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	0.7645	12095	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	1.082
11994	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	0.9525	12096	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	1.27
11995	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	1.082	12097	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	1.3755
11996	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	1.27	12098	rcc	180.0505997	272.0876183	-100	0	0	700	1.5865
11997	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	1.3755	12101	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	0.369
11998	rcc	148.79648	240.8334986	-100	0	0	700	1.5865	12102	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	0.476
12001	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	0.369	12103	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	0.7645
12002	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	0.476	12104	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	0.9525
12003	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	0.7645	12105	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	1.082
12004	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	0.9525	12106	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	1.27
12005	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	1.082	12107	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	1.3755
12006	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	1.27	12108	rcc	183.1760117	275.2130303	-100	0	0	700	1.5865
12007	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	1.3755	12111	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	0.369
12008	rcc	151.9218919	243.9589106	-100	0	0	700	1.5865	12112	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	0.476
12011	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	0.369	12113	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	0.7645
12012	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	0.476	12114	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	0.9525
12013	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	0.7645	12115	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	1.082
12014	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	0.9525	12116	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	1.27
12015	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	1.082	12117	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	1.3755
12016	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	1.27	12118	rcc	186.3014236	278.3384423	-100	0	0	700	1.5865
12017	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	1.3755	12121	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	0.369
12018	rcc	155.0473039	247.0843226	-100	0	0	700	1.5865	12122	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	0.476
12021	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	0.369	12123	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	0.7645
12022	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	0.476	12124	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	0.9525
12023	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	0.7645	12125	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	1.082
12024	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	0.9525	12126	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	1.27
12025	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	1.082	12127	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	1.3755
12026	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	1.27	12128	rcc	189.4268356	281.4638543	-100	0	0	700	1.5865
12027	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	1.3755	12131	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	0.369
12028	rcc	158.1727159	250.2097345	-100	0	0	700	1.5865	12132	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	0.476
12031	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	0.369	12133	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	0.7645
12032	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	0.476	12134	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	0.9525
12033	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	0.7645	12135	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	1.082
12034	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	0.9525	12136	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	1.27
12035	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	1.082	12137	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	1.3755
12036	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	1.27	12138	rcc	192.5522476	284.5892662	-100	0	0	700	1.5865
12037	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	1.3755	12141	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	0.369
12038	rcc	161.2981279	253.3351465	-100	0	0	700	1.5865	12142	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	0.476
12041	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	0.369	12143	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	0.7645
12042	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	0.476	12144	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	0.9525
12043	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	0.7645	12145	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	1.082
12044	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	0.9525	12146	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	1.27
12045	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	1.082	12147	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	1.3755
12046	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	1.27	12148	rcc	195.6847306	287.7217493	-100	0	0	700	1.5865
12047	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	1.3755	12151	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	0.369
12048	rcc	164.4235398	256.4605585	-100	0	0	700	1.5865	12152	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	0.476
12051	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	0.369	12153	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	0.7645
12052	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	0.476	12154	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	0.9525
12053	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	0.7645	12155	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	1.082
12054	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	0.9525	12156	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	1.27
12055	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	1.082	12157	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	1.3755
12056	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	1.27	12158	rcc	128.8914241	226.3448807	-100	0	0	700	1.5865
12057	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	1.3755	12161	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	0.369
12058	rcc	167.5489518	259.5859704	-100	0	0	700	1.5865	12162	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	0.476
12061	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	0.369	12163	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	0.7645
12062	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	0.476	12164	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	0.9525
12063	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	0.7645	12165	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	1.082
12064	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	0.9525	12166	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	1.27
12065	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	1.082	12167	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	1.3755
12066	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	1.27	12168	rcc	132.016836	229.4702926	-100	0	0	700	1.5865
12067	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	1.3755	12171	rcc	135.1493191	232.6027757	-100	0	0	700	0.369
12068	rcc	170.6743638	262.7113824	-100	0	0	700	1.5865	12172	rcc	135.1493191	232.6027757	-100	0	0	700	0.476
12071	rcc	173.7997757	265.8367944	-100	0	0	700	0.369	12173	rcc	135.1493191	232.6027757	-100	0	0	700	0.7645
12072	rcc	173.79977															

12191	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	0.369	12293	rcc	172.6542628	270.1077193	-100	0	0	700	0.7645
12192	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	0.476	12294	rcc	172.6542628	270.1077193	-100	0	0	700	0.9525
12193	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	0.7645	12295	rcc	172.6542628	270.1077193	-100	0	0	700	1.082
12194	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	0.9525	12296	rcc	172.6542628	270.1077193	-100	0	0	700	1.27
12195	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	1.082	12297	rcc	172.6542628	270.1077193	-100	0	0	700	1.3755
12196	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	1.27	12298	rcc	172.6542628	270.1077193	-100	0	0	700	1.5865
12197	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	1.3755	12301	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	0.369
12198	rcc	141.400143	238.8535996	-100	0	0	700	1.5865	12302	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	0.476
12201	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	0.369	12303	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	0.7645
12202	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	0.476	12304	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	0.9525
12203	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	0.7645	12305	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	1.082
12204	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	0.9525	12306	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	1.27
12205	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	1.082	12307	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	1.3755
12206	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	1.27	12308	rcc	175.7796747	273.2331313	-100	0	0	700	1.5865
12207	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	1.3755	12311	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	0.369
12208	rcc	144.525555	241.9790116	-100	0	0	700	1.5865	12312	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	0.476
12211	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	0.369	12313	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	0.7645
12212	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	0.476	12314	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	0.9525
12213	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	0.7645	12315	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	1.082
12214	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	0.9525	12316	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	1.27
12215	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	1.082	12317	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	1.3755
12216	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	1.27	12318	rcc	178.9050867	276.3585433	-100	0	0	700	1.5865
12217	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	1.3755	12321	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	0.369
12218	rcc	147.650967	245.1044236	-100	0	0	700	1.5865	12322	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	0.476
12221	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	0.369	12323	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	0.7645
12222	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	0.476	12324	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	0.9525
12223	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	0.7645	12325	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	1.082
12224	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	0.9525	12326	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	1.27
12225	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	1.082	12327	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	1.3755
12226	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	1.27	12328	rcc	182.0304987	279.4839553	-100	0	0	700	1.5865
12227	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	1.3755	12331	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	0.369
12228	rcc	150.776379	248.2298355	-100	0	0	700	1.5865	12332	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	0.476
12231	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	0.369	12333	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	0.7645
12232	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	0.476	12334	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	0.9525
12233	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	0.7645	12335	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	1.082
12234	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	0.9525	12336	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	1.27
12235	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	1.082	12337	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	1.3755
12236	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	1.27	12338	rcc	185.1559107	282.6093672	-100	0	0	700	1.5865
12237	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	1.3755	12341	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	0.369
12238	rcc	153.9017909	251.3552475	-100	0	0	700	1.5865	12342	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	0.476
12241	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	0.369	12343	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	0.7645
12242	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	0.476	12344	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	0.9525
12243	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	0.7645	12345	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	1.082
12244	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	0.9525	12346	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	1.27
12245	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	1.082	12347	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	1.3755
12246	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	1.27	12348	rcc	188.2813226	285.7347792	-100	0	0	700	1.5865
12247	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	1.3755	12351	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	0.369
12248	rcc	157.0272029	254.4806595	-100	0	0	700	1.5865	12352	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	0.476
12251	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	0.369	12353	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	0.7645
12252	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	0.476	12354	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	0.9525
12253	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	0.7645	12355	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	1.082
12254	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	0.9525	12356	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	1.27
12255	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	1.082	12357	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	1.3755
12256	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	1.27	12358	rcc	191.4138057	288.8672623	-100	0	0	700	1.5865
12257	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	1.3755	12361	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	0.369
12258	rcc	160.1526149	257.6060715	-100	0	0	700	1.5865	12362	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	0.476
12261	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	0.369	12363	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	0.7645
12262	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	0.476	12364	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	0.9525
12263	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	0.7645	12365	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	1.082
12264	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	0.9525	12366	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	1.27
12265	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	1.082	12367	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	1.3755
12266	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	1.27	12368	rcc	130.8713231	233.7412176	-100	0	0	700	1.5865
12267	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	1.3755	12371	rcc	134.0038061	236.8737006	-100	0	0	700	0.369
12268	rcc	163.2780268	260.7314834	-100	0	0	700	1.5865	12372	rcc	134.0038061	236.8737006	-100	0	0	700	0.476
12271	rcc	166.4034388	263.8568954	-100	0	0	700	0.369	12373	rcc	134.0038061	236.8737006	-100	0	0	700	0.7645
12272	rcc	166.4034388	263.8568954	-100	0	0	700	0.476	12374	rcc	134.0038061	236.8737006	-100	0	0	700	0.9525
12273	rcc	166.4034388	263.8568954	-100	0	0	700	0.7645	12375	rcc	134.0038061	236.8737006	-100	0	0	700	1.082
12274	rcc	166.4034388	263.8568954	-100	0	0	700	0.9525	12376	rcc	134.0038061	236.8737006	-100	0	0	700	1.27
12275	rcc	166.4034388	263.8568954	-100	0	0	700	1.082	12377	rcc	134.0038061	236.8737006	-100	0	0	700	1.3755
12276	rcc	166.4034388	263.8568954	-100	0	0	700										

12395	rcc	140.25463	243.1245246	-100	0	0	700	1.082	12497	rcc	171.5087498	274.3786443	-100	0	0	700	1.3755
12396	rcc	140.25463	243.1245246	-100	0	0	700	1.27	12498	rcc	171.5087498	274.3786443	-100	0	0	700	1.5865
12397	rcc	140.25463	243.1245246	-100	0	0	700	1.3755	12501	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	0.369
12398	rcc	140.25463	243.1245246	-100	0	0	700	1.5865	12502	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	0.476
12401	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	0.369	12503	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	0.7645
12402	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	0.476	12504	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	0.9525
12403	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	0.7645	12505	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	1.082
12404	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	0.9525	12506	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	1.27
12405	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	1.082	12507	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	1.3755
12406	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	1.27	12508	rcc	174.6341617	277.5040563	-100	0	0	700	1.5865
12407	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	1.3755	12511	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	0.369
12408	rcc	143.380042	246.2499365	-100	0	0	700	1.5865	12512	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	0.476
12411	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	0.369	12513	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	0.7645
12412	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	0.476	12514	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	0.9525
12413	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	0.7645	12515	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	1.082
12414	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	0.9525	12516	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	1.27
12415	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	1.082	12517	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	1.3755
12416	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	1.27	12518	rcc	177.7595737	280.6294682	-100	0	0	700	1.5865
12417	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	1.3755	12521	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	0.369
12418	rcc	146.505454	249.3753485	-100	0	0	700	1.5865	12522	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	0.476
12421	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	0.369	12523	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	0.7645
12422	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	0.476	12524	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	0.9525
12423	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	0.7645	12525	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	1.082
12424	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	0.9525	12526	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	1.27
12425	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	1.082	12527	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	1.3755
12426	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	1.27	12528	rcc	180.8849857	283.7548802	-100	0	0	700	1.5865
12427	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	1.3755	12531	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	0.369
12428	rcc	149.630866	252.5007605	-100	0	0	700	1.5865	12532	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	0.476
12431	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	0.369	12533	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	0.7645
12432	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	0.476	12534	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	0.9525
12433	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	0.7645	12535	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	1.082
12434	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	0.9525	12536	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	1.27
12435	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	1.082	12537	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	1.3755
12436	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	1.27	12538	rcc	184.0103977	286.8802922	-100	0	0	700	1.5865
12437	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	1.3755	12541	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	0.369
12438	rcc	152.7562779	255.6261725	-100	0	0	700	1.5865	12542	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	0.476
12441	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	0.369	12543	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	0.7645
12442	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	0.476	12544	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	0.9525
12443	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	0.7645	12545	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	1.082
12444	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	0.9525	12546	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	1.27
12445	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	1.082	12547	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	1.3755
12446	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	1.27	12548	rcc	132.8582931	241.1446256	-100	0	0	700	1.5865
12447	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	1.3755	12551	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	0.369
12448	rcc	155.8816899	258.7515844	-100	0	0	700	1.5865	12552	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	0.476
12451	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	0.369	12553	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	0.7645
12452	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	0.476	12554	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	0.9525
12453	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	0.7645	12555	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	1.082
12454	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	0.9525	12556	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	1.27
12455	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	1.082	12557	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	1.3755
12456	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	1.27	12558	rcc	135.9837051	244.2700376	-100	0	0	700	1.5865
12457	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	1.3755	12561	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	0.369
12458	rcc	159.0071019	261.8769964	-100	0	0	700	1.5865	12562	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	0.476
12461	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	0.369	12563	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	0.7645
12462	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	0.476	12564	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	0.9525
12463	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	0.7645	12565	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	1.082
12464	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	0.9525	12566	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	1.27
12465	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	1.082	12567	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	1.3755
12466	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	1.27	12568	rcc	139.1091171	247.3954495	-100	0	0	700	1.5865
12467	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	1.3755	12571	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	0.369
12468	rcc	162.1325139	265.0024084	-100	0	0	700	1.5865	12572	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	0.476
12471	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	0.369	12573	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	0.7645
12472	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	0.476	12574	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	0.9525
12473	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	0.7645	12575	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	1.082
12474	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	0.9525	12576	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	1.27
12475	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	1.082	12577	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	1.3755
12476	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	1.27	12578	rcc	142.234529	250.5208615	-100	0	0	700	1.5865
12477	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	1.3755	12581	rcc	145.359941	253.6462735	-100	0	0	700	0.369
12478	rcc	165.2579258	268.1278204	-100	0	0	700	1.5865	12582	rcc	145.359941	253.6462735	-100	0	0	700	0.476
12481	rcc	168.3833378	271.2532323	-100	0	0	700	0.369	12583	rcc	145.359941	253.6462735	-100	0	0	700	0.7645
12482	rcc	168.3833378	271.2532														

12601	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	0.369	12703	rcc	147.3469111	261.0355393	-100	0	0	700	0.7645
12602	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	0.476	12704	rcc	147.3469111	261.0355393	-100	0	0	700	0.9525
12603	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	0.7645	12705	rcc	147.3469111	261.0355393	-100	0	0	700	1.082
12604	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	0.9525	12706	rcc	147.3469111	261.0355393	-100	0	0	700	1.27
12605	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	1.082	12707	rcc	147.3469111	261.0355393	-100	0	0	700	1.3755
12606	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	1.27	12708	rcc	147.3469111	261.0355393	-100	0	0	700	1.5865
12607	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	1.3755	12711	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	0.369
12608	rcc	151.610765	259.8970974	-100	0	0	700	1.5865	12712	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	0.476
12611	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	0.369	12713	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	0.7645
12612	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	0.476	12714	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	0.9525
12613	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	0.7645	12715	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	1.082
12614	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	0.9525	12716	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	1.27
12615	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	1.082	12717	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	1.3755
12616	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	1.27	12718	rcc	150.472323	264.1609513	-100	0	0	700	1.5865
12617	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	1.3755	12721	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	0.369
12618	rcc	154.7361769	263.0225094	-100	0	0	700	1.5865	12722	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	0.476
12621	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	0.369	12723	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	0.7645
12622	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	0.476	12724	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	0.9525
12623	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	0.7645	12725	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	1.082
12624	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	0.9525	12726	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	1.27
12625	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	1.082	12727	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	1.3755
12626	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	1.27	12728	rcc	153.597735	267.2863633	-100	0	0	700	1.5865
12627	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	1.3755	12731	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	0.369
12628	rcc	157.8615889	266.1479214	-100	0	0	700	1.5865	12732	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	0.476
12631	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	0.369	12733	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	0.7645
12632	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	0.476	12734	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	0.9525
12633	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	0.7645	12735	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	1.082
12634	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	0.9525	12736	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	1.27
12635	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	1.082	12737	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	1.3755
12636	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	1.27	12738	rcc	156.723147	270.4117753	-100	0	0	700	1.5865
12637	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	1.3755	12741	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	0.369
12638	rcc	160.9870009	269.2733333	-100	0	0	700	1.5865	12742	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	0.476
12641	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	0.369	12743	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	0.7645
12642	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	0.476	12744	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	0.9525
12643	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	0.7645	12745	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	1.082
12644	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	0.9525	12746	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	1.27
12645	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	1.082	12747	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	1.3755
12646	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	1.27	12748	rcc	159.848559	273.5371872	-100	0	0	700	1.5865
12647	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	1.3755	12751	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	0.369
12648	rcc	164.1124128	272.3987453	-100	0	0	700	1.5865	12752	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	0.476
12651	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	0.369	12753	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	0.7645
12652	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	0.476	12754	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	0.9525
12653	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	0.7645	12755	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	1.082
12654	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	0.9525	12756	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	1.27
12655	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	1.082	12757	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	1.3755
12656	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	1.27	12758	rcc	162.9739709	276.6625992	-100	0	0	700	1.5865
12657	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	1.3755	12761	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	0.369
12658	rcc	167.2378248	275.5241573	-100	0	0	700	1.5865	12762	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	0.476
12661	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	0.369	12763	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	0.7645
12662	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	0.476	12764	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	0.9525
12663	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	0.7645	12765	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	1.082
12664	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	0.9525	12766	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	1.27
12665	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	1.082	12767	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	1.3755
12666	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	1.27	12768	rcc	241.2789759	235.8625379	-100	0	0	700	1.5865
12667	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	1.3755	12771	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	0.369
12668	rcc	170.3632368	278.6495693	-100	0	0	700	1.5865	12772	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	0.476
12671	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	0.369	12773	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	0.7645
12672	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	0.476	12774	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	0.9525
12673	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	0.7645	12775	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	1.082
12674	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	0.9525	12776	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	1.27
12675	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	1.082	12777	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	1.3755
12676	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	1.27	12778	rcc	244.4114589	238.995021	-100	0	0	700	1.5865
12677	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	1.3755	12781	rcc	247.5368709	242.1204329	-100	0	0	700	0.369
12678	rcc	173.4886488	281.7749812	-100	0	0	700	1.5865	12782	rcc	247.5368709	242.1204329	-100	0	0	700	0.476
12681	rcc	176.6140607	284.9003932	-100	0	0	700	0.369	12783	rcc	247.5368709	242.1204329	-100	0	0	700	0.7645
12682	rcc	176.6140607	284.9003932	-100	0	0	700	0.476	12784	rcc	247.5368709	242.1204329	-100	0	0	700	0.9525
12683	rcc	176.6140607	284.9003932	-100	0	0	700	0.7645	12785	rcc	247.5368709	242.1204329	-100	0	0	700	1.082
12684	rcc	176.6140607	284.9003932	-100	0	0	700	0.9525	12786	rcc	247.5368709	242.1204329	-100	0	0	700	1.27
12685	rcc	176.6140607	284.9003932	-100	0	0	700	1.082	12787	rcc	247.5368709	242.1204329	-100	0	0	700	1.3755
12686	rcc	176.6140607	284.9003932	-100	0	0	700	1.27	12788</								

12805	rcc	253.7876948	248.3712569	-100	0	0	700	1.082	12907	rcc	264.3094437	253.4765679	-100	0	0	700	1.3755
12806	rcc	253.7876948	248.3712569	-100	0	0	700	1.27	12908	rcc	264.3094437	253.4765679	-100	0	0	700	1.5865
12807	rcc	253.7876948	248.3712569	-100	0	0	700	1.3755	12911	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	0.369
12808	rcc	253.7876948	248.3712569	-100	0	0	700	1.5865	12912	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	0.476
12811	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	0.369	12913	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	0.7645
12812	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	0.476	12914	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	0.9525
12813	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	0.7645	12915	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	1.082
12814	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	0.9525	12916	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	1.27
12815	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	1.082	12917	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	1.3755
12816	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	1.27	12918	rcc	267.4348557	256.6019798	-100	0	0	700	1.5865
12817	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	1.3755	12921	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	0.369
12818	rcc	256.9131068	251.4966689	-100	0	0	700	1.5865	12922	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	0.476
12821	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	0.369	12923	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	0.7645
12822	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	0.476	12924	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	0.9525
12823	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	0.7645	12925	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	1.082
12824	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	0.9525	12926	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	1.27
12825	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	1.082	12927	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	1.3755
12826	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	1.27	12928	rcc	246.6883428	230.4531711	-100	0	0	700	1.5865
12827	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	1.3755	12931	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	0.369
12828	rcc	260.0385188	254.6220808	-100	0	0	700	1.5865	12932	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	0.476
12831	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	0.369	12933	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	0.7645
12832	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	0.476	12934	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	0.9525
12833	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	0.7645	12935	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	1.082
12834	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	0.9525	12936	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	1.27
12835	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	1.082	12937	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	1.3755
12836	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	1.27	12938	rcc	249.8208258	233.5856541	-100	0	0	700	1.5865
12837	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	1.3755	12941	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	0.369
12838	rcc	263.1639308	257.7474928	-100	0	0	700	1.5865	12942	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	0.476
12841	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	0.369	12943	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	0.7645
12842	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	0.476	12944	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	0.9525
12843	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	0.7645	12945	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	1.082
12844	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	0.9525	12946	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	1.27
12845	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	1.082	12947	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	1.3755
12846	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	1.27	12948	rcc	252.9462378	236.7110661	-100	0	0	700	1.5865
12847	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	1.3755	12951	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	0.369
12848	rcc	245.5569719	234.724096	-100	0	0	700	1.5865	12952	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	0.476
12851	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	0.369	12953	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	0.7645
12852	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	0.476	12954	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	0.9525
12853	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	0.7645	12955	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	1.082
12854	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	0.9525	12956	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	1.27
12855	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	1.082	12957	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	1.3755
12856	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	1.27	12958	rcc	256.0716497	239.836478	-100	0	0	700	1.5865
12857	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	1.3755	12961	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	0.369
12858	rcc	248.6823839	237.849508	-100	0	0	700	1.5865	12962	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	0.476
12861	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	0.369	12963	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	0.7645
12862	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	0.476	12964	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	0.9525
12863	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	0.7645	12965	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	1.082
12864	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	0.9525	12966	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	1.27
12865	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	1.082	12967	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	1.3755
12866	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	1.27	12968	rcc	259.1970617	242.96189	-100	0	0	700	1.5865
12867	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	1.3755	12971	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	0.369
12868	rcc	251.8077958	240.97492	-100	0	0	700	1.5865	12972	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	0.476
12871	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	0.369	12973	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	0.7645
12872	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	0.476	12974	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	0.9525
12873	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	0.7645	12975	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	1.082
12874	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	0.9525	12976	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	1.27
12875	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	1.082	12977	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	1.3755
12876	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	1.27	12978	rcc	262.3224737	246.087302	-100	0	0	700	1.5865
12877	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	1.3755	12981	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	0.369
12878	rcc	254.9332078	244.1003319	-100	0	0	700	1.5865	12982	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	0.476
12881	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	0.369	12983	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	0.7645
12882	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	0.476	12984	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	0.9525
12883	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	0.7645	12985	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	1.082
12884	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	0.9525	12986	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	1.27
12885	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	1.082	12987	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	1.3755
12886	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	1.27	12988	rcc	265.4478857	249.212714	-100	0	0	700	1.5865
12887	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	1.3755	12991	rcc	268.5732976	252.3381259	-100	0	0	700	0.369
12888	rcc	258.0586198	247.2257439	-100	0	0	700	1.5865	12992	rcc	268.5732976	252.3381259	-100	0	0	700	0.476
12891	rcc	261.1840318	250.3511559	-100	0	0	700	0.369	12993	rcc	268.5732976	252.3381259	-100	0	0	700	0.7645
12892	rcc	261.1840318	250.3511559	-100	0	0	7										

13011	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	0.369	13113	rcc	258.3626757	231.2946281	-100	0	0	700	0.7645
13012	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	0.476	13114	rcc	258.3626757	231.2946281	-100	0	0	700	0.9525
13013	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	0.7645	13115	rcc	258.3626757	231.2946281	-100	0	0	700	1.082
13014	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	0.9525	13116	rcc	258.3626757	231.2946281	-100	0	0	700	1.27
13015	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	1.082	13117	rcc	258.3626757	231.2946281	-100	0	0	700	1.3755
13016	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	1.27	13118	rcc	258.3626757	231.2946281	-100	0	0	700	1.5865
13017	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	1.3755	13121	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	0.369
13018	rcc	250.9663388	229.3147291	-100	0	0	700	1.5865	13122	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	0.476
13021	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	0.369	13123	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	0.7645
13022	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	0.476	13124	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	0.9525
13023	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	0.7645	13125	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	1.082
13024	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	0.9525	13126	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	1.27
13025	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	1.082	13127	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	1.3755
13026	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	1.27	13128	rcc	261.4880877	234.4200401	-100	0	0	700	1.5865
13027	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	1.3755	13131	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	0.369
13028	rcc	254.0917508	232.4401411	-100	0	0	700	1.5865	13132	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	0.476
13031	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	0.369	13133	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	0.7645
13032	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	0.476	13134	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	0.9525
13033	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	0.7645	13135	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	1.082
13034	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	0.9525	13136	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	1.27
13035	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	1.082	13137	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	1.3755
13036	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	1.27	13138	rcc	264.6134997	237.5454521	-100	0	0	700	1.5865
13037	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	1.3755	13141	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	0.369
13038	rcc	257.2171627	235.5655531	-100	0	0	700	1.5865	13142	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	0.476
13041	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	0.369	13143	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	0.7645
13042	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	0.476	13144	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	0.9525
13043	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	0.7645	13145	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	1.082
13044	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	0.9525	13146	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	1.27
13045	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	1.082	13147	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	1.3755
13046	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	1.27	13148	rcc	267.7389116	240.670864	-100	0	0	700	1.5865
13047	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	1.3755	13151	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	0.369
13048	rcc	260.3425747	238.6909651	-100	0	0	700	1.5865	13152	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	0.476
13051	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	0.369	13153	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	0.7645
13052	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	0.476	13154	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	0.9525
13053	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	0.7645	13155	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	1.082
13054	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	0.9525	13156	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	1.27
13055	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	1.082	13157	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	1.3755
13056	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	1.27	13158	rcc	270.8643236	243.796276	-100	0	0	700	1.5865
13057	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	1.3755	13161	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	0.369
13058	rcc	263.4679867	241.816377	-100	0	0	700	1.5865	13162	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	0.476
13061	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	0.369	13163	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	0.7645
13062	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	0.476	13164	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	0.9525
13063	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	0.7645	13165	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	1.082
13064	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	0.9525	13166	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	1.27
13065	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	1.082	13167	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	1.3755
13066	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	1.27	13168	rcc	273.9897356	246.921688	-100	0	0	700	1.5865
13067	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	1.3755	13171	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	0.369
13068	rcc	266.5933986	244.941789	-100	0	0	700	1.5865	13172	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	0.476
13071	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	0.369	13173	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	0.7645
13072	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	0.476	13174	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	0.9525
13073	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	0.7645	13175	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	1.082
13074	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	0.9525	13176	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	1.27
13075	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	1.082	13177	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	1.3755
13076	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	1.27	13178	rcc	253.2502937	220.7658082	-100	0	0	700	1.5865
13077	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	1.3755	13181	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	0.369
13078	rcc	269.7188106	248.067201	-100	0	0	700	1.5865	13182	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	0.476
13081	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	0.369	13183	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	0.7645
13082	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	0.476	13184	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	0.9525
13083	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	0.7645	13185	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	1.082
13084	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	0.9525	13186	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	1.27
13085	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	1.082	13187	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	1.3755
13086	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	1.27	13188	rcc	256.3827767	223.8982912	-100	0	0	700	1.5865
13087	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	1.3755	13191	rcc	259.5081887	227.0237032	-100	0	0	700	0.369
13088	rcc	272.8442226	251.1926129	-100	0	0	700	1.5865	13192	rcc	259.5081887	227.0237032	-100	0	0	700	0.476
13091	rcc	252.1047807	225.0367331	-100	0	0	700	0.369	13193	rcc	259.5081887	227.0237032	-100	0	0	700	0.7645
13092	rcc	252.1047807	225.0367331	-100	0	0	700	0.476	13194	rcc	259.5081887	227.0237032	-100	0	0	700	0.9525
13093	rcc	252.1047807	225.0367331	-100	0	0	700	0.7645	13195	rcc	259.5081887	227.0237032	-100	0	0	700	1.082
13094	rcc	252.1047807	225.0367331	-100	0	0	700	0.9525	13196	rcc	259.5081887	227.0237032	-100	0	0	700	1.27
13095	rcc	252.1047807	225.0367331	-100	0	0	700	1.082	13197	rcc	259.5081887	227.0237032	-100	0	0	700	1.3755
13096	rcc	252.1047807	225.0367331	-100	0	0	700	1.27	13198</								

13215	rcc	265.7590126	233.2745271	-100	0	0	700	1.082	13317	rcc	273.1553496	235.2544261	-100	0	0	700	1.3755
13216	rcc	265.7590126	233.2745271	-100	0	0	700	1.27	13318	rcc	273.1553496	235.2544261	-100	0	0	700	1.5865
13217	rcc	265.7590126	233.2745271	-100	0	0	700	1.3755	13321	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	0.369
13218	rcc	265.7590126	233.2745271	-100	0	0	700	1.5865	13322	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	0.476
13221	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	0.369	13323	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	0.7645
13222	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	0.476	13324	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	0.9525
13223	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	0.7645	13325	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	1.082
13224	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	0.9525	13326	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	1.27
13225	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	1.082	13327	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	1.3755
13226	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	1.27	13328	rcc	276.2807615	238.3798381	-100	0	0	700	1.5865
13227	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	1.3755	13331	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	0.369
13228	rcc	268.8844246	236.3999391	-100	0	0	700	1.5865	13332	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	0.476
13231	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	0.369	13333	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	0.7645
13232	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	0.476	13334	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	0.9525
13233	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	0.7645	13335	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	1.082
13234	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	0.9525	13336	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	1.27
13235	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	1.082	13337	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	1.3755
13236	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	1.27	13338	rcc	279.4061735	241.50525	-100	0	0	700	1.5865
13237	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	1.3755	13341	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	0.369
13238	rcc	272.0098366	239.5253511	-100	0	0	700	1.5865	13342	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	0.476
13241	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	0.369	13343	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	0.7645
13242	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	0.476	13344	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	0.9525
13243	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	0.7645	13345	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	1.082
13244	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	0.9525	13346	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	1.27
13245	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	1.082	13347	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	1.3755
13246	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	1.27	13348	rcc	255.5413197	212.2239582	-100	0	0	700	1.5865
13247	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	1.3755	13351	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	0.369
13248	rcc	275.1352486	242.650763	-100	0	0	700	1.5865	13352	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	0.476
13251	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	0.369	13353	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	0.7645
13252	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	0.476	13354	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	0.9525
13253	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	0.7645	13355	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	1.082
13254	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	0.9525	13356	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	1.27
13255	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	1.082	13357	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	1.3755
13256	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	1.27	13358	rcc	258.6667316	215.3493702	-100	0	0	700	1.5865
13257	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	1.3755	13361	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	0.369
13258	rcc	254.3958067	216.4948832	-100	0	0	700	1.5865	13362	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	0.476
13261	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	0.369	13363	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	0.7645
13262	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	0.476	13364	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	0.9525
13263	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	0.7645	13365	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	1.082
13264	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	0.9525	13366	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	1.27
13265	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	1.082	13367	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	1.3755
13266	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	1.27	13368	rcc	261.7992147	218.4818533	-100	0	0	700	1.5865
13267	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	1.3755	13371	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	0.369
13268	rcc	257.5212186	219.6202952	-100	0	0	700	1.5865	13372	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	0.476
13271	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	0.369	13373	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	0.7645
13272	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	0.476	13374	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	0.9525
13273	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	0.7645	13375	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	1.082
13274	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	0.9525	13376	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	1.27
13275	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	1.082	13377	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	1.3755
13276	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	1.27	13378	rcc	264.9246266	221.6072652	-100	0	0	700	1.5865
13277	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	1.3755	13381	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	0.369
13278	rcc	260.6537017	222.7527782	-100	0	0	700	1.5865	13382	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	0.476
13281	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	0.369	13383	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	0.7645
13282	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	0.476	13384	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	0.9525
13283	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	0.7645	13385	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	1.082
13284	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	0.9525	13386	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	1.27
13285	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	1.082	13387	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	1.3755
13286	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	1.27	13388	rcc	268.0500386	224.7326772	-100	0	0	700	1.5865
13287	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	1.3755	13391	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	0.369
13288	rcc	263.7791137	225.8781902	-100	0	0	700	1.5865	13392	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	0.476
13291	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	0.369	13393	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	0.7645
13292	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	0.476	13394	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	0.9525
13293	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	0.7645	13395	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	1.082
13294	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	0.9525	13396	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	1.27
13295	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	1.082	13397	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	1.3755
13296	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	1.27	13398	rcc	271.1754506	227.8580892	-100	0	0	700	1.5865
13297	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	1.3755	13401	rcc	274.3008626	230.9835011	-100	0	0	700	0.369
13298	rcc	266.9045256	229.0036022	-100	0	0	700	1.5865	13402	rcc	274.3008626	230.9835011	-100	0	0	700	0.476
13301	rcc	270.0299376	232.1290141	-100	0	0	700	0.369	13403	rcc	274.3008626	230.9835011	-100	0	0	700	0.7645
13302	rcc	270.0															

13625	rcc	258.9707875	199.4182544	-100	0	0	700	1.082	13727	rcc	260.1163005	195.1473295	-100	0	0	700	1.3755
13626	rcc	258.9707875	199.4182544	-100	0	0	700	1.27	13728	rcc	260.1163005	195.1473295	-100	0	0	700	1.5865
13627	rcc	258.9707875	199.4182544	-100	0	0	700	1.3755	13731	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	0.369
13628	rcc	258.9707875	199.4182544	-100	0	0	700	1.5865	13732	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	0.476
13631	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	0.369	13733	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	0.7645
13632	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	0.476	13734	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	0.9525
13633	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	0.7645	13735	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	1.082
13634	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	0.9525	13736	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	1.27
13635	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	1.082	13737	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	1.3755
13636	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	1.27	13738	rcc	263.2417125	198.2727414	-100	0	0	700	1.5865
13637	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	1.3755	13741	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	0.369
13638	rcc	262.0961995	202.5436664	-100	0	0	700	1.5865	13742	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	0.476
13641	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	0.369	13743	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	0.7645
13642	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	0.476	13744	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	0.9525
13643	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	0.7645	13745	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	1.082
13644	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	0.9525	13746	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	1.27
13645	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	1.082	13747	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	1.3755
13646	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	1.27	13748	rcc	266.3671245	201.3981534	-100	0	0	700	1.5865
13647	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	1.3755	13751	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	0.369
13648	rcc	265.2216115	205.6690784	-100	0	0	700	1.5865	13752	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	0.476
13651	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	0.369	13753	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	0.7645
13652	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	0.476	13754	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	0.9525
13653	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	0.7645	13755	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	1.082
13654	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	0.9525	13756	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	1.27
13655	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	1.082	13757	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	1.3755
13656	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	1.27	13758	rcc	269.4925364	204.5235654	-100	0	0	700	1.5865
13657	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	1.3755	13761	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	0.369
13658	rcc	268.3470235	208.7944903	-100	0	0	700	1.5865	13762	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	0.476
13661	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	0.369	13763	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	0.7645
13662	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	0.476	13764	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	0.9525
13663	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	0.7645	13765	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	1.082
13664	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	0.9525	13766	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	1.27
13665	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	1.082	13767	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	1.3755
13666	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	1.27	13768	rcc	272.6250195	207.6560484	-100	0	0	700	1.5865
13667	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	1.3755	13771	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	0.369
13668	rcc	271.4795065	211.9269734	-100	0	0	700	1.5865	13772	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	0.476
13671	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	0.369	13773	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	0.7645
13672	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	0.476	13774	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	0.9525
13673	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	0.7645	13775	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	1.082
13674	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	0.9525	13776	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	1.27
13675	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	1.082	13777	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	1.3755
13676	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	1.27	13778	rcc	275.7504315	210.7814604	-100	0	0	700	1.5865
13677	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	1.3755	13781	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	0.369
13678	rcc	274.6049185	215.0523854	-100	0	0	700	1.5865	13782	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	0.476
13681	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	0.369	13783	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	0.7645
13682	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	0.476	13784	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	0.9525
13683	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	0.7645	13785	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	1.082
13684	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	0.9525	13786	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	1.27
13685	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	1.082	13787	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	1.3755
13686	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	1.27	13788	rcc	278.8758434	213.9068724	-100	0	0	700	1.5865
13687	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	1.3755	13791	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	0.369
13688	rcc	277.7303304	218.1777973	-100	0	0	700	1.5865	13792	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	0.476
13691	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	0.369	13793	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	0.7645
13692	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	0.476	13794	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	0.9525
13693	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	0.7645	13795	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	1.082
13694	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	0.9525	13796	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	1.27
13695	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	1.082	13797	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	1.3755
13696	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	1.27	13798	rcc	282.0012554	217.0322843	-100	0	0	700	1.5865
13697	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	1.3755	13801	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	0.369
13698	rcc	280.8557424	221.3032093	-100	0	0	700	1.5865	13802	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	0.476
13701	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	0.369	13803	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	0.7645
13702	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	0.476	13804	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	0.9525
13703	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	0.7645	13805	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	1.082
13704	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	0.9525	13806	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	1.27
13705	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	1.082	13807	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	1.3755
13706	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	1.27	13808	rcc	285.1266674	220.1576963	-100	0	0	700	1.5865
13707	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	1.3755	13811	rcc	214.3735629	143.9881539	-100	0	0	700	0.369
13708	rcc	283.9811544	224.4286213	-100	0	0	700	1.5865	13812	rcc	214.3735629	143.9881539	-100	0	0	700	0.476
13711	rcc	256.9908886	192.0219175	-100	0	0	700	0.369	13813	rcc	214.3735629	143.9881539	-100	0	0	700	0.7645

14035	rcc	259.2819145	183.4800676	-100	0	0	700	1.082	14137	rcc	216.6575178	135.453375	-100	0	0	700	1.3755
14036	rcc	259.2819145	183.4800676	-100	0	0	700	1.27	14138	rcc	216.6575178	135.453375	-100	0	0	700	1.5865
14037	rcc	259.2819145	183.4800676	-100	0	0	700	1.3755	14141	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	0.369
14038	rcc	259.2819145	183.4800676	-100	0	0	700	1.5865	14142	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	0.476
14041	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	0.369	14143	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	0.7645
14042	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	0.476	14144	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	0.9525
14043	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	0.7645	14145	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	1.082
14044	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	0.9525	14146	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	1.27
14045	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	1.082	14147	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	1.3755
14046	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	1.27	14148	rcc	219.7829297	138.578787	-100	0	0	700	1.5865
14047	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	1.3755	14151	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	0.369
14048	rcc	262.4073265	186.6054796	-100	0	0	700	1.5865	14152	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	0.476
14051	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	0.369	14153	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	0.7645
14052	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	0.476	14154	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	0.9525
14053	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	0.7645	14155	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	1.082
14054	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	0.9525	14156	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	1.27
14055	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	1.082	14157	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	1.3755
14056	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	1.27	14158	rcc	222.9083417	141.7041989	-100	0	0	700	1.5865
14057	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	1.3755	14161	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	0.369
14058	rcc	265.5327385	189.7308915	-100	0	0	700	1.5865	14162	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	0.476
14061	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	0.369	14163	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	0.7645
14062	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	0.476	14164	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	0.9525
14063	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	0.7645	14165	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	1.082
14064	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	0.9525	14166	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	1.27
14065	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	1.082	14167	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	1.3755
14066	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	1.27	14168	rcc	226.0408247	144.836682	-100	0	0	700	1.5865
14067	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	1.3755	14171	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	0.369
14068	rcc	268.6581504	192.8563035	-100	0	0	700	1.5865	14172	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	0.476
14071	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	0.369	14173	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	0.7645
14072	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	0.476	14174	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	0.9525
14073	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	0.7645	14175	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	1.082
14074	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	0.9525	14176	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	1.27
14075	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	1.082	14177	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	1.3755
14076	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	1.27	14178	rcc	229.1662367	147.962094	-100	0	0	700	1.5865
14077	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	1.3755	14181	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	0.369
14078	rcc	271.7835624	195.9817155	-100	0	0	700	1.5865	14182	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	0.476
14081	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	0.369	14183	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	0.7645
14082	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	0.476	14184	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	0.9525
14083	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	0.7645	14185	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	1.082
14084	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	0.9525	14186	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	1.27
14085	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	1.082	14187	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	1.3755
14086	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	1.27	14188	rcc	232.2916487	151.0875059	-100	0	0	700	1.5865
14087	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	1.3755	14191	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	0.369
14088	rcc	274.9089744	199.1071274	-100	0	0	700	1.5865	14192	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	0.476
14091	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	0.369	14193	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	0.7645
14092	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	0.476	14194	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	0.9525
14093	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	0.7645	14195	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	1.082
14094	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	0.9525	14196	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	1.27
14095	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	1.082	14197	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	1.3755
14096	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	1.27	14198	rcc	235.4170607	154.2129179	-100	0	0	700	1.5865
14097	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	1.3755	14201	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	0.369
14098	rcc	278.0414574	202.2396105	-100	0	0	700	1.5865	14202	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	0.476
14101	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	0.369	14203	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	0.7645
14102	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	0.476	14204	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	0.9525
14103	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	0.7645	14205	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	1.082
14104	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	0.9525	14206	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	1.27
14105	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	1.082	14207	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	1.3755
14106	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	1.27	14208	rcc	238.5424726	157.3383299	-100	0	0	700	1.5865
14107	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	1.3755	14211	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	0.369
14108	rcc	281.1668694	205.3650225	-100	0	0	700	1.5865	14212	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	0.476
14111	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	0.369	14213	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	0.7645
14112	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	0.476	14214	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	0.9525
14113	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	0.7645	14215	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	1.082
14114	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	0.9525	14216	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	1.27
14115	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	1.082	14217	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	1.3755
14116	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	1.27	14218	rcc	241.6678846	160.4637419	-100	0	0	700	1.5865
14117	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	1.3755	14221	rcc	244.7932966	163.5891538	-100	0	0	700	0.369
14118	rcc	284.2922814	208.4904344	-100	0	0	700	1.5865	14222	rcc	244.7932966	163.5891538	-100	0	0	700	0.476
14121	rcc	287.4176933	211.6158464	-100	0	0	700	0.369	14223	rcc	244.7932966	163.5891538	-100	0	0	700	0.7645
14122</																	

14241	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	0.369	14343	rcc	282.3053113	201.1011686	-100	0	0	700	0.7645
14242	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	0.476	14344	rcc	282.3053113	201.1011686	-100	0	0	700	0.9525
14243	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	0.7645	14345	rcc	282.3053113	201.1011686	-100	0	0	700	1.082
14244	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	0.9525	14346	rcc	282.3053113	201.1011686	-100	0	0	700	1.27
14245	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	1.082	14347	rcc	282.3053113	201.1011686	-100	0	0	700	1.3755
14246	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	1.27	14348	rcc	282.3053113	201.1011686	-100	0	0	700	1.5865
14247	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	1.3755	14351	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	0.369
14248	rcc	251.0441205	169.8399778	-100	0	0	700	1.5865	14352	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	0.476
14251	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	0.369	14353	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	0.7645
14252	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	0.476	14354	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	0.9525
14253	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	0.7645	14355	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	1.082
14254	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	0.9525	14356	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	1.27
14255	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	1.082	14357	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	1.3755
14256	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	1.27	14358	rcc	285.4307233	204.2265805	-100	0	0	700	1.5865
14257	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	1.3755	14361	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	0.369
14258	rcc	254.1695325	172.9653897	-100	0	0	700	1.5865	14362	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	0.476
14261	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	0.369	14363	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	0.7645
14262	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	0.476	14364	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	0.9525
14263	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	0.7645	14365	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	1.082
14264	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	0.9525	14366	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	1.27
14265	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	1.082	14367	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	1.3755
14266	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	1.27	14368	rcc	288.5561353	207.3519925	-100	0	0	700	1.5865
14267	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	1.3755	14371	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	0.369
14268	rcc	257.2949445	176.0908017	-100	0	0	700	1.5865	14372	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	0.476
14271	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	0.369	14373	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	0.7645
14272	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	0.476	14374	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	0.9525
14273	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	0.7645	14375	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	1.082
14274	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	0.9525	14376	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	1.27
14275	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	1.082	14377	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	1.3755
14276	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	1.27	14378	rcc	220.9284427	134.307862	-100	0	0	700	1.5865
14277	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	1.3755	14381	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	0.369
14278	rcc	260.4203564	179.2162137	-100	0	0	700	1.5865	14382	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	0.476
14281	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	0.369	14383	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	0.7645
14282	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	0.476	14384	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	0.9525
14283	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	0.7645	14385	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	1.082
14284	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	0.9525	14386	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	1.27
14285	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	1.082	14387	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	1.3755
14286	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	1.27	14388	rcc	224.0538547	137.433274	-100	0	0	700	1.5865
14287	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	1.3755	14391	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	0.369
14288	rcc	263.5457684	182.3416257	-100	0	0	700	1.5865	14392	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	0.476
14291	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	0.369	14393	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	0.7645
14292	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	0.476	14394	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	0.9525
14293	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	0.7645	14395	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	1.082
14294	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	0.9525	14396	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	1.27
14295	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	1.082	14397	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	1.3755
14296	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	1.27	14398	rcc	227.1863377	140.565757	-100	0	0	700	1.5865
14297	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	1.3755	14401	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	0.369
14298	rcc	266.6711804	185.4670376	-100	0	0	700	1.5865	14402	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	0.476
14301	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	0.369	14403	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	0.7645
14302	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	0.476	14404	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	0.9525
14303	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	0.7645	14405	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	1.082
14304	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	0.9525	14406	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	1.27
14305	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	1.082	14407	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	1.3755
14306	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	1.27	14408	rcc	230.3117497	143.691169	-100	0	0	700	1.5865
14307	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	1.3755	14411	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	0.369
14308	rcc	269.7965924	188.5924496	-100	0	0	700	1.5865	14412	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	0.476
14311	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	0.369	14413	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	0.7645
14312	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	0.476	14414	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	0.9525
14313	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	0.7645	14415	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	1.082
14314	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	0.9525	14416	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	1.27
14315	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	1.082	14417	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	1.3755
14316	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	1.27	14418	rcc	233.4371617	146.816581	-100	0	0	700	1.5865
14317	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	1.3755	14421	rcc	236.5625736	149.941993	-100	0	0	700	0.369
14318	rcc	272.9220043	191.7178616	-100	0	0	700	1.5865	14422	rcc	236.5625736	149.941993	-100	0	0	700	0.476
14321	rcc	276.0474163	194.8432736	-100	0	0	700	0.369	14423	rcc	236.5625736	149.941993	-100	0	0	700	0.7645
14322	rcc	276.0474163	194.8432736	-100	0	0	700	0.476	14424	rcc	236.5625736	149.941993	-100	0	0	700	0.9525
14323	rcc	276.0474163	194.8432736	-100	0	0	700	0.7645	14425	rcc	236.5625736	149.941993	-100	0	0	700	1.082
14324	rcc	276.0474163	194.8432736	-100	0	0	700	0.9525	14426	rcc	236.5625736	149.941993	-100	0	0	700	1.27
14325	rcc	276.0474163	194.8432736	-100	0	0	700	1.082	14427	rcc	236.5625736	149.941993	-100	0	0	700	1.3755
14326	rcc	276.0474163	194.8432736	-100	0	0	700	1.27	14428								

14445	rcc	242.8133976	156.1928169	-100	0	0	700	1.082	14547	rcc	274.0675173	187.4469366	-100	0	0	700	1.3755
14446	rcc	242.8133976	156.1928169	-100	0	0	700	1.27	14548	rcc	274.0675173	187.4469366	-100	0	0	700	1.5865
14447	rcc	242.8133976	156.1928169	-100	0	0	700	1.3755	14551	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	0.369
14448	rcc	242.8133976	156.1928169	-100	0	0	700	1.5865	14552	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	0.476
14451	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	0.369	14553	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	0.7645
14452	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	0.476	14554	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	0.9525
14453	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	0.7645	14555	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	1.082
14454	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	0.9525	14556	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	1.27
14455	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	1.082	14557	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	1.3755
14456	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	1.27	14558	rcc	277.1929293	190.5723486	-100	0	0	700	1.5865
14457	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	1.3755	14561	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	0.369
14458	rcc	245.9388096	159.3182289	-100	0	0	700	1.5865	14562	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	0.476
14461	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	0.369	14563	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	0.7645
14462	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	0.476	14564	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	0.9525
14463	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	0.7645	14565	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	1.082
14464	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	0.9525	14566	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	1.27
14465	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	1.082	14567	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	1.3755
14466	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	1.27	14568	rcc	280.3183413	193.6977606	-100	0	0	700	1.5865
14467	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	1.3755	14571	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	0.369
14468	rcc	249.0642215	162.4436408	-100	0	0	700	1.5865	14572	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	0.476
14471	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	0.369	14573	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	0.7645
14472	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	0.476	14574	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	0.9525
14473	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	0.7645	14575	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	1.082
14474	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	0.9525	14576	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	1.27
14475	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	1.082	14577	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	1.3755
14476	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	1.27	14578	rcc	283.4508243	196.8302436	-100	0	0	700	1.5865
14477	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	1.3755	14581	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	0.369
14478	rcc	252.1896335	165.5690528	-100	0	0	700	1.5865	14582	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	0.476
14481	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	0.369	14583	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	0.7645
14482	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	0.476	14584	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	0.9525
14483	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	0.7645	14585	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	1.082
14484	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	0.9525	14586	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	1.27
14485	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	1.082	14587	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	1.3755
14486	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	1.27	14588	rcc	286.5762363	199.9556556	-100	0	0	700	1.5865
14487	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	1.3755	14591	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	0.369
14488	rcc	255.3150455	168.6944648	-100	0	0	700	1.5865	14592	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	0.476
14491	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	0.369	14593	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	0.7645
14492	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	0.476	14594	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	0.9525
14493	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	0.7645	14595	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	1.082
14494	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	0.9525	14596	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	1.27
14495	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	1.082	14597	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	1.3755
14496	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	1.27	14598	rcc	289.7016483	203.0810676	-100	0	0	700	1.5865
14497	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	1.3755	14601	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	0.369
14498	rcc	258.4404575	171.8198768	-100	0	0	700	1.5865	14602	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	0.476
14501	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	0.369	14603	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	0.7645
14502	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	0.476	14604	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	0.9525
14503	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	0.7645	14605	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	1.082
14504	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	0.9525	14606	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	1.27
14505	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	1.082	14607	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	1.3755
14506	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	1.27	14608	rcc	222.0739557	130.0369371	-100	0	0	700	1.5865
14507	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	1.3755	14611	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	0.369
14508	rcc	261.5658694	174.9452887	-100	0	0	700	1.5865	14612	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	0.476
14511	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	0.369	14613	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	0.7645
14512	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	0.476	14614	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	0.9525
14513	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	0.7645	14615	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	1.082
14514	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	0.9525	14616	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	1.27
14515	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	1.082	14617	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	1.3755
14516	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	1.27	14618	rcc	225.1993677	133.162349	-100	0	0	700	1.5865
14517	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	1.3755	14621	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	0.369
14518	rcc	264.6912814	178.0707007	-100	0	0	700	1.5865	14622	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	0.476
14521	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	0.369	14623	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	0.7645
14522	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	0.476	14624	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	0.9525
14523	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	0.7645	14625	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	1.082
14524	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	0.9525	14626	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	1.27
14525	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	1.082	14627	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	1.3755
14526	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	1.27	14628	rcc	228.3247796	136.287761	-100	0	0	700	1.5865
14527	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	1.3755	14631	rcc	231.4572627	139.420244	-100	0	0	700	0.369
14528	rcc	267.8166934	181.1961127	-100	0	0	700	1.5865	14632	rcc	231.4572627	139.420244	-100	0	0	700	0.476
14531	rcc	270.9421053	184.3215247	-100	0	0	700	0.369	14633	rcc	231.4572627	139.420244	-100	0	0	700	0.7645
14532	rcc																

14651	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	0.369	14753	rcc	268.9622064	176.9251877	-100	0	0	700	0.7645
14652	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	0.476	14754	rcc	268.9622064	176.9251877	-100	0	0	700	0.9525
14653	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	0.7645	14755	rcc	268.9622064	176.9251877	-100	0	0	700	1.082
14654	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	0.9525	14756	rcc	268.9622064	176.9251877	-100	0	0	700	1.27
14655	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	1.082	14757	rcc	268.9622064	176.9251877	-100	0	0	700	1.3755
14656	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	1.27	14758	rcc	268.9622064	176.9251877	-100	0	0	700	1.5865
14657	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	1.3755	14761	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	0.369
14658	rcc	237.7080866	145.671068	-100	0	0	700	1.5865	14762	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	0.476
14661	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	0.369	14763	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	0.7645
14662	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	0.476	14764	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	0.9525
14663	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	0.7645	14765	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	1.082
14664	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	0.9525	14766	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	1.27
14665	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	1.082	14767	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	1.3755
14666	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	1.27	14768	rcc	272.0876183	180.0505997	-100	0	0	700	1.5865
14667	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	1.3755	14771	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	0.369
14668	rcc	240.8334986	148.79648	-100	0	0	700	1.5865	14772	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	0.476
14671	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	0.369	14773	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	0.7645
14672	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	0.476	14774	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	0.9525
14673	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	0.7645	14775	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	1.082
14674	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	0.9525	14776	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	1.27
14675	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	1.082	14777	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	1.3755
14676	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	1.27	14778	rcc	275.2130303	183.1760117	-100	0	0	700	1.5865
14677	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	1.3755	14781	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	0.369
14678	rcc	243.9589106	151.9218919	-100	0	0	700	1.5865	14782	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	0.476
14681	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	0.369	14783	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	0.7645
14682	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	0.476	14784	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	0.9525
14683	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	0.7645	14785	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	1.082
14684	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	0.9525	14786	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	1.27
14685	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	1.082	14787	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	1.3755
14686	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	1.27	14788	rcc	278.3384423	186.3014236	-100	0	0	700	1.5865
14687	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	1.3755	14791	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	0.369
14688	rcc	247.0843226	155.0473039	-100	0	0	700	1.5865	14792	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	0.476
14691	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	0.369	14793	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	0.7645
14692	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	0.476	14794	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	0.9525
14693	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	0.7645	14795	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	1.082
14694	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	0.9525	14796	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	1.27
14695	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	1.082	14797	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	1.3755
14696	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	1.27	14798	rcc	281.4638543	189.4268356	-100	0	0	700	1.5865
14697	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	1.3755	14801	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	0.369
14698	rcc	250.2097345	158.1727159	-100	0	0	700	1.5865	14802	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	0.476
14701	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	0.369	14803	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	0.7645
14702	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	0.476	14804	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	0.9525
14703	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	0.7645	14805	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	1.082
14704	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	0.9525	14806	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	1.27
14705	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	1.082	14807	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	1.3755
14706	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	1.27	14808	rcc	284.5892662	192.5522476	-100	0	0	700	1.5865
14707	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	1.3755	14811	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	0.369
14708	rcc	253.3351465	161.2981279	-100	0	0	700	1.5865	14812	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	0.476
14711	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	0.369	14813	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	0.7645
14712	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	0.476	14814	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	0.9525
14713	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	0.7645	14815	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	1.082
14714	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	0.9525	14816	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	1.27
14715	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	1.082	14817	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	1.3755
14716	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	1.27	14818	rcc	287.7217493	195.6847306	-100	0	0	700	1.5865
14717	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	1.3755	14821	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	0.369
14718	rcc	256.4605585	164.4235398	-100	0	0	700	1.5865	14822	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	0.476
14721	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	0.369	14823	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	0.7645
14722	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	0.476	14824	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	0.9525
14723	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	0.7645	14825	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	1.082
14724	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	0.9525	14826	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	1.27
14725	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	1.082	14827	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	1.3755
14726	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	1.27	14828	rcc	226.3448807	128.8914241	-100	0	0	700	1.5865
14727	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	1.3755	14831	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0	700	0.369
14728	rcc	259.5859704	167.5489518	-100	0	0	700	1.5865	14832	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0	700	0.476
14731	rcc	262.7113824	170.6743638	-100	0	0	700	0.369	14833	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0	700	0.7645
14732	rcc	262.7113824	170.6743638	-100	0	0	700	0.476	14834	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0	700	0.9525
14733	rcc	262.7113824	170.6743638	-100	0	0	700	0.7645	14835	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0	700	1.082
14734	rcc	262.7113824	170.6743638	-100	0	0	700	0.9525	14836	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0	700	1.27
14735	rcc	262.7113824	170.6743638	-100	0	0	700	1.082	14837	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0	700	1.3755
14736	rcc	262.7113824	170.6743638	-100	0	0	700	1.27	14838	rcc	229.4702926	132.016836	-100	0	0		

14855	rcc	235.7281876	138.2747311	-100	0	0	700	1.082	14957	rcc	266.9823074	169.5288508	-100	0	0	700	1.3755
14856	rcc	235.7281876	138.2747311	-100	0	0	700	1.27	14958	rcc	266.9823074	169.5288508	-100	0	0	700	1.5865
14857	rcc	235.7281876	138.2747311	-100	0	0	700	1.3755	14961	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	0.369
14858	rcc	235.7281876	138.2747311	-100	0	0	700	1.5865	14962	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	0.476
14861	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	0.369	14963	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	0.7645
14862	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	0.476	14964	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	0.9525
14863	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	0.7645	14965	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	1.082
14864	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	0.9525	14966	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	1.27
14865	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	1.082	14967	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	1.3755
14866	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	1.27	14968	rcc	270.1077193	172.6542628	-100	0	0	700	1.5865
14867	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	1.3755	14971	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	0.369
14868	rcc	238.8535996	141.400143	-100	0	0	700	1.5865	14972	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	0.476
14871	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	0.369	14973	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	0.7645
14872	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	0.476	14974	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	0.9525
14873	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	0.7645	14975	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	1.082
14874	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	0.9525	14976	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	1.27
14875	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	1.082	14977	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	1.3755
14876	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	1.27	14978	rcc	273.2331313	175.7796747	-100	0	0	700	1.5865
14877	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	1.3755	14981	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	0.369
14878	rcc	241.9790116	144.5255555	-100	0	0	700	1.5865	14982	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	0.476
14881	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	0.369	14983	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	0.7645
14882	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	0.476	14984	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	0.9525
14883	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	0.7645	14985	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	1.082
14884	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	0.9525	14986	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	1.27
14885	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	1.082	14987	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	1.3755
14886	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	1.27	14988	rcc	276.3585433	178.9050867	-100	0	0	700	1.5865
14887	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	1.3755	14991	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	0.369
14888	rcc	245.1044236	147.650967	-100	0	0	700	1.5865	14992	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	0.476
14891	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	0.369	14993	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	0.7645
14892	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	0.476	14994	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	0.9525
14893	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	0.7645	14995	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	1.082
14894	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	0.9525	14996	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	1.27
14895	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	1.082	14997	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	1.3755
14896	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	1.27	14998	rcc	279.4839553	182.0304987	-100	0	0	700	1.5865
14897	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	1.3755	15001	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	0.369
14898	rcc	248.2298355	150.776379	-100	0	0	700	1.5865	15002	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	0.476
14901	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	0.369	15003	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	0.7645
14902	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	0.476	15004	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	0.9525
14903	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	0.7645	15005	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	1.082
14904	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	0.9525	15006	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	1.27
14905	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	1.082	15007	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	1.3755
14906	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	1.27	15008	rcc	282.6093672	185.1559107	-100	0	0	700	1.5865
14907	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	1.3755	15011	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	0.369
14908	rcc	251.3552475	153.9017909	-100	0	0	700	1.5865	15012	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	0.476
14911	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	0.369	15013	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	0.7645
14912	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	0.476	15014	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	0.9525
14913	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	0.7645	15015	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	1.082
14914	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	0.9525	15016	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	1.27
14915	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	1.082	15017	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	1.3755
14916	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	1.27	15018	rcc	285.7347792	188.2813226	-100	0	0	700	1.5865
14917	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	1.3755	15021	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	0.369
14918	rcc	254.4806595	157.0272029	-100	0	0	700	1.5865	15022	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	0.476
14921	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	0.369	15023	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	0.7645
14922	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	0.476	15024	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	0.9525
14923	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	0.7645	15025	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	1.082
14924	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	0.9525	15026	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	1.27
14925	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	1.082	15027	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	1.3755
14926	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	1.27	15028	rcc	288.8672623	191.4138057	-100	0	0	700	1.5865
14927	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	1.3755	15031	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	0.369
14928	rcc	257.6060715	160.1526149	-100	0	0	700	1.5865	15032	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	0.476
14931	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	0.369	15033	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	0.7645
14932	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	0.476	15034	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	0.9525
14933	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	0.7645	15035	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	1.082
14934	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	0.9525	15036	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	1.27
14935	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	1.082	15037	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	1.3755
14936	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	1.27	15038	rcc	233.7412176	130.8713231	-100	0	0	700	1.5865
14937	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	1.3755	15041	rcc	236.8737006	134.0038061	-100	0	0	700	0.369
14938	rcc	260.7314834	163.2780268	-100	0	0	700	1.5865	15042	rcc	236.8737006	134.0038061	-100	0	0	700	0.476
14941	rcc	263.8568954	166.4034388	-100	0	0	700	0.369	15043	rcc	236.8737006	134.0038061	-100	0	0	700	0.7645
14942	rcc	26															

15061	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	0.369	15163	rcc	274.3786443	171.5087498	-100	0	0	700	0.7645
15062	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	0.476	15164	rcc	274.3786443	171.5087498	-100	0	0	700	0.9525
15063	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	0.7645	15165	rcc	274.3786443	171.5087498	-100	0	0	700	1.082
15064	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	0.9525	15166	rcc	274.3786443	171.5087498	-100	0	0	700	1.27
15065	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	1.082	15167	rcc	274.3786443	171.5087498	-100	0	0	700	1.3755
15066	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	1.27	15168	rcc	274.3786443	171.5087498	-100	0	0	700	1.5865
15067	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	1.3755	15171	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	0.369
15068	rcc	243.1245246	140.25463	-100	0	0	700	1.5865	15172	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	0.476
15071	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	0.369	15173	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	0.7645
15072	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	0.476	15174	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	0.9525
15073	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	0.7645	15175	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	1.082
15074	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	0.9525	15176	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	1.27
15075	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	1.082	15177	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	1.3755
15076	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	1.27	15178	rcc	277.5040563	174.6341617	-100	0	0	700	1.5865
15077	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	1.3755	15181	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	0.369
15078	rcc	246.2499365	143.380042	-100	0	0	700	1.5865	15182	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	0.476
15081	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	0.369	15183	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	0.7645
15082	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	0.476	15184	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	0.9525
15083	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	0.7645	15185	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	1.082
15084	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	0.9525	15186	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	1.27
15085	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	1.082	15187	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	1.3755
15086	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	1.27	15188	rcc	280.6294682	177.7595737	-100	0	0	700	1.5865
15087	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	1.3755	15191	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	0.369
15088	rcc	249.3753485	146.505454	-100	0	0	700	1.5865	15192	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	0.476
15091	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	0.369	15193	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	0.7645
15092	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	0.476	15194	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	0.9525
15093	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	0.7645	15195	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	1.082
15094	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	0.9525	15196	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	1.27
15095	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	1.082	15197	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	1.3755
15096	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	1.27	15198	rcc	283.7548802	180.8849857	-100	0	0	700	1.5865
15097	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	1.3755	15201	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	0.369
15098	rcc	252.5007605	149.630866	-100	0	0	700	1.5865	15202	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	0.476
15101	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	0.369	15203	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	0.7645
15102	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	0.476	15204	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	0.9525
15103	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	0.7645	15205	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	1.082
15104	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	0.9525	15206	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	1.27
15105	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	1.082	15207	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	1.3755
15106	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	1.27	15208	rcc	286.8802922	184.0103977	-100	0	0	700	1.5865
15107	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	1.3755	15211	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	0.369
15108	rcc	255.6261725	152.7562779	-100	0	0	700	1.5865	15212	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	0.476
15111	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	0.369	15213	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	0.7645
15112	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	0.476	15214	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	0.9525
15113	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	0.7645	15215	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	1.082
15114	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	0.9525	15216	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	1.27
15115	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	1.082	15217	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	1.3755
15116	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	1.27	15218	rcc	241.1446256	132.8582931	-100	0	0	700	1.5865
15117	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	1.3755	15221	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	0.369
15118	rcc	258.7515844	155.8816899	-100	0	0	700	1.5865	15222	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	0.476
15121	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	0.369	15223	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	0.7645
15122	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	0.476	15224	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	0.9525
15123	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	0.7645	15225	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	1.082
15124	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	0.9525	15226	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	1.27
15125	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	1.082	15227	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	1.3755
15126	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	1.27	15228	rcc	244.2700376	135.9837051	-100	0	0	700	1.5865
15127	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	1.3755	15231	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	0.369
15128	rcc	261.8769964	159.0071019	-100	0	0	700	1.5865	15232	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	0.476
15131	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	0.369	15233	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	0.7645
15132	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	0.476	15234	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	0.9525
15133	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	0.7645	15235	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	1.082
15134	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	0.9525	15236	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	1.27
15135	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	1.082	15237	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	1.3755
15136	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	1.27	15238	rcc	247.3954495	139.1091171	-100	0	0	700	1.5865
15137	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	1.3755	15241	rcc	250.5208615	142.234529	-100	0	0	700	0.369
15138	rcc	265.0024084	162.1325139	-100	0	0	700	1.5865	15242	rcc	250.5208615	142.234529	-100	0	0	700	0.476
15141	rcc	268.1278204	165.2579258	-100	0	0	700	0.369	15243	rcc	250.5208615	142.234529	-100	0	0	700	0.7645
15142	rcc	268.1278204	165.2579258	-100	0	0	700	0.476	15244	rcc	250.5208615	142.234529	-100	0	0	700	0.9525
15143	rcc	268.1278204	165.2579258	-100	0	0	700	0.7645	15245	rcc	250.5208615	142.234529	-100	0	0	700	1.082
15144	rcc	268.1278204	165.2579258	-100	0	0	700	0.9525	15246	rcc	250.5208615	142.234529	-100	0	0	700	1.27
15145	rcc	268.1278204	165.2579258	-100	0	0	700	1.082	15247	rcc	250.5208615	142.234529	-100	0	0	700	1.3755
15146	rcc	268.1278204	165.2579258	-100	0	0	700	1.27	15248								


```

75 pz 49.595
82 pz -1.
83 pz 1.
84 pz -47.995
85 pz -49.995
86 pz 44.005
87 pz 46.005
30 tz 0. 0. 31.2432 0.4 0.05 0.05
31 tz 0. 0. 31.7296 0.4 0.05 0.05
32 tz 0. 0. 32.2160 0.4 0.05 0.05
33 tz 0. 0. 32.7024 0.4 0.05 0.05
34 tz 0. 0. 33.1888 0.4 0.05 0.05
35 tz 0. 0. 33.6752 0.4 0.05 0.05
36 tz 0. 0. 34.1616 0.4 0.05 0.05
37 tz 0. 0. 34.6480 0.4 0.05 0.05
38 tz 0. 0. 35.1344 0.4 0.05 0.05
39 tz 0. 0. 35.6208 0.4 0.05 0.05
40 tz 0. 0. 36.1072 0.4 0.05 0.05
41 tz 0. 0. 36.5936 0.4 0.05 0.05
42 tz 0. 0. 37.0800 0.4 0.05 0.05
43 tz 0. 0. 37.5664 0.4 0.05 0.05
44 tz 0. 0. 38.0528 0.4 0.05 0.05
45 tz 0. 0. 38.5392 0.4 0.05 0.05
46 tz 0. 0. 39.0256 0.4 0.05 0.05
47 tz 0. 0. 39.5120 0.4 0.05 0.05
48 tz 0. 0. 39.9984 0.4 0.05 0.05
49 tz 0. 0. 40.4848 0.4 0.05 0.05
50 tz 0. 0. 40.9712 0.4 0.05 0.05
51 tz 0. 0. 41.4576 0.4 0.05 0.05
52 tz 0. 0. 41.9440 0.4 0.05 0.05
53 tz 0. 0. 42.4304 0.4 0.05 0.05
54 tz 0. 0. 42.9168 0.4 0.05 0.05
c upper end cap surfaces
55 rcc 0. 0. 43.16 0. 0. 1.84 0.465
56 rcc 0. 0. 45. 0. 0. 2.5 0.525
57 trc 0. 0. 47.5 0. 0. 0.5 0.525 0.4
58 rcc 0. 0. 48. 0. 0. 1.595 0.4
59 sph 0. 0. 49.595 0.4
c lower end cap surfaces
60 rcc 0. 0. -86. 0. 0. -2 0.465
61 rcc 0. 0. -88. 0. 0. -1 0.525
62 trc 0. 0. -89. 0. 0. -0.5 0.525 0.4
63 rcc 0. 0. -89.5 0. 0. -3.095 0.4
64 sph 0. 0. -92.595 0.4
65 c/y 0. -91.195 0.2
66 c/y 0. -91.995 0.2
67 box -0.075 -2. -91.995 0.15 0. 0. 0. 4. 0. 0. 0. -2.185
c grid surfaces
90 c/z 0.346410185 0.599999986 0.167720323
91 c/z 0.346410185 0.599999986 0.142720323
92 c/z 0.346410185 -0.599999986 0.167720323
93 c/z 0.346410185 -0.599999986 0.142720323
94 c/z -0.692820323 0. 0.167720323
95 c/z -0.692820323 0. 0.142720323
76 py 0.66782032
77 p 1 0.577350269 0. 0.7711324865
78 p 1 -0.577350269 0. 0.7711324865
79 py -0.66782032
80 p 1 0.577350269 0. -0.7711324865
81 p 1 -0.577350269 0. -0.7711324865
c pin lattice
1 py 0.692820323
2 p 1 0.577350269 0. 0.8
3 p 1 -0.577350269 0. 0.8
4 py -0.692820323
5 p 1 0.577350269 0. -0.8
6 p 1 -0.577350269 0. -0.8
c element shroud internal surfaces
101 p 1 1.732050808 0. 15.8
102 px 7.9
103 p 1 -1.732050808 0. 15.8
104 p 1 1.732050808 0. -15.8
105 px -7.9
106 p 1 -1.732050808 0. -15.8
c element shrouf external surfaces
109 p 1 1.732050808 0. 16.6
110 px 8.3
111 p 1 -1.732050808 0. 16.6
112 p 1 1.732050808 0. -16.6
113 px -8.3
114 p 1 -1.732050808 0. -16.6
c pin lattice z borders
107 pz -92.995
108 pz 52
c pin support grid internal surfaces
115 p 1 1.732050808 0. 15.4
116 px 7.7
117 p 1 -1.732050808 0. 15.4
118 p 1 1.732050808 0. -15.4
119 px -7.7
120 p 1 -1.732050808 0. -15.4
121 pz -98
122 box -7.8 -0.4 -96.1 15.6 0. 0. 0. 0.8 0. 0. 0. 1.6 \\\$ traverse
123 box -7.8 -3.36 -96.1 15.6 0. 0. 0. 0.8 0. 0. 0. 1.6 \\\$ traverse
124 box -7.8 -6.32 -96.1 15.6 0. 0. 0. 0.8 0. 0. 0. 1.6 \\\$ traverse
125 box -7.8 2.56 -96.1 15.6 0. 0. 0. 0.8 0. 0. 0. 1.6 \\\$ traverse
126 box -7.8 5.52 -96.1 15.6 0. 0. 0. 0.8 0. 0. 0. 1.6 \\\$ traverse
127 box -0.075 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida centrale
128 box -1.275 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida -
129 box -2.475 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida --
130 box -3.675 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida ---
131 box -4.875 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida ----
132 box -6.075 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida -----
133 box -7.275 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida +
134 box 1.125 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida ++
135 box 2.325 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida +++
136 box 3.525 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida ++++
137 box 4.725 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida +++++
138 box 5.925 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida ++++++
139 box 7.125 -10. -96.8 0.15 0. 0. 0. 20. 0. 0. 0. 4. \\\$ guida ++++++
c lower empty section
140 pz -137
c assembly foot
141 cz 7.7
142 trc 0. 0. -146.5 0. 0. -22.5 7.7 4.
143 trc 0. 0. -156. 0. 0. -11. 9.584014469 7.8
144 trc 0. 0. -167. 0. 0. -2.5 6.4 4.
145 pz -146.5
146 pz -156.
147 pz -167.
148 pz -169.5
149 cz 4.
150 CZ 5.
151 pz -268.5
152 trc 0 0 -273 0. 0. -7. 5. 0.1
153 pz -273.
c diagrid planes
c 147 piano d'appoggio
155 pz -177
156 pz -212
157 pz -222
c Funnel geometries
158 trc 0 0 52. 0. 0. 8. 7.9 7.
159 cz 7.
160 pz 60.
161 pz 79.6
162 trc 0. 0. 79.6 0. 0. 17.5 7. 3.
163 trc 0. 0. 79.6 0. 0. 17.5 9.584014469 4.
164 pz 97.1
165 rcc 0. 4. 84. 0. 4. 16. 2.1
166 rcc 3.464101615 2. 84. 3.464101615 2. 16. 2.1
167 rcc 3.464101615 -2. 84. 3.464101615 -2. 16. 2.1
168 rcc 0. -4. 84. 0. -4. 16. 2.1
169 rcc -3.464101615 -2. 84. -3.464101615 -2. 16. 2.1
170 rcc -3.464101615 2. 84. -3.464101615 2. 16. 2.1
171 pz 140.1
172 cz 3.
173 cz 4.
185 trc 0. 0. 151.1 0. 0. -11. 9.584014469 4.
184 trc 0. 0. 151.1 0. 0. -11. 7. 3.
186 pz 151.1
187 pz 155.1
c nose surfaces
174 pz 93.5
175 trc 0. 0. 93.5 0. 0. -3.8 3.9 2.25
176 trc 0. 0. 89.7 0. 0. -8.2 2.25 1.5
177 trc 0. 0. 81.5 0. 0. -0.5 1.5 1.35
178 trc 0. 0. 81. 0. 0. -0.5 1.35 1.28
179 trc 0. 0. 80.5 0. 0. -0.5 1.28 1.07
180 trc 0. 0. 80. 0. 0. -0.5 1.07 0.84
181 trc 0. 0. 79.5 0. 0. -0.5 0.84 0.42
182 pz 84.
183 cz 1.2
c Pb free surface

```

188 pz 357.6
 c upper empty section
 190 pz 510.
 c ballast unit surfaces
 191 pz 496.
 192 pz 452
 193 cz 1.25
 194 pz 446.
 195 cz 6.1
 196 trc 0. 0. 446. 0. 0. -4. 6. 3.2
 197 trc 0. 0. 446. 0. 0. -7.4 7.5 3.2
 198 cz 3.2
 199 pz 438.6
 200 pz 436.
 201 pz 498.
 202 pz 502.
 203 cz 7.1
 204 cz 6.
 205 cz 3.
 c
 c CONTROL ROD assembly SURFACES
 701 cz 1.45
 702 cz 1.49
 703 cz 1.55
 704 c/z 0. 3.3 1.45
 705 c/z 0. 3.3 1.49
 706 c/z 0. 3.3 1.55
 707 c/z 2.795383832 1.65 1.45
 708 c/z 2.795383832 1.65 1.49
 709 c/z 2.795383832 1.65 1.55
 710 c/z 2.795383832 -1.65 1.45
 711 c/z 2.795383832 -1.65 1.49
 712 c/z 2.795383832 -1.65 1.55
 713 c/z 0. -3.3 1.45
 714 c/z 0. -3.3 1.49
 715 c/z 0. -3.3 1.55
 716 c/z -2.795383832 -1.65 1.45
 717 c/z -2.795383832 -1.65 1.49
 718 c/z -2.795383832 -1.65 1.55
 719 c/z -2.795383832 1.65 1.45
 720 c/z -2.795383832 1.65 1.49
 721 c/z -2.795383832 1.65 1.55
 722 c/z 1.5875 6.157883832 1.45
 723 c/z 1.5875 6.157883832 1.49
 724 c/z 1.5875 6.157883832 1.55
 725 c/z 4.445383832 4.507883832 1.45
 726 c/z 4.445383832 4.507883832 1.49
 727 c/z 4.445383832 4.507883832 1.55
 728 c/z 6.095383832 1.65 1.45
 729 c/z 6.095383832 1.65 1.49
 730 c/z 6.095383832 1.65 1.55
 731 c/z 6.095383832 -1.65 1.45
 732 c/z 6.095383832 -1.65 1.49
 733 c/z 6.095383832 -1.65 1.55
 734 c/z 4.445383832 -4.507883832 1.45
 735 c/z 4.445383832 -4.507883832 1.49
 736 c/z 4.445383832 -4.507883832 1.55
 737 c/z 1.5875 -6.157883832 1.45
 738 c/z 1.5875 -6.157883832 1.49
 739 c/z 1.5875 -6.157883832 1.55
 740 c/z -1.5875 -6.157883832 1.45
 741 c/z -1.5875 -6.157883832 1.49
 742 c/z -1.5875 -6.157883832 1.55
 743 c/z -4.445383832 -4.507883832 1.45
 744 c/z -4.445383832 -4.507883832 1.49
 745 c/z -4.445383832 -4.507883832 1.55
 746 c/z -6.095383832 -1.65 1.45
 747 c/z -6.095383832 -1.65 1.49
 748 c/z -6.095383832 -1.65 1.55
 749 c/z -6.095383832 1.65 1.45
 750 c/z -6.095383832 1.65 1.49
 751 c/z -6.095383832 1.65 1.55
 752 c/z -4.445383832 4.507883832 1.45
 753 c/z -4.445383832 4.507883832 1.49
 754 c/z -4.445383832 4.507883832 1.55
 755 c/z -1.5875 6.157883832 1.45
 756 c/z -1.5875 6.157883832 1.49
 757 c/z -1.5875 6.157883832 1.55
 768 7 pz 244.5
 766 7 pz 242.
 761 7 pz 239.
 769 7 pz 226.
 763 7 pz 104.
 762 7 pz 34.
 760 7 pz -34.
 764 7 pz -37.
 765 7 pz -40.
 767 7 pz -42.5
 770 cz 8.05
 771 cz 7.
 c SAFETY ROD assembly SURFACES
 c stopper
 801 pz -73.55
 802 pz -70.55
 803 pz -69.05
 804 cz 1.5
 805 cz 2.
 806 trc 0. 0. -70.55 0. 0. -2.598076211 1.5 0.05
 807 trc 0. 0. -59.05 0. 0. -4 3.75 1.5
 808 trc 0. 0. -59.05 0. 0. -4 4.327350269 2.077350269
 809 cz 7.8
 810 pz -63.05
 c rods
 813 c/z 1.905255888 0. 1.45
 814 c/z 1.905255888 0. 1.49
 815 c/z 1.905255888 0. 1.55
 816 c/z -0.952627944 -1.65 1.45
 817 c/z -0.952627944 -1.65 1.49
 818 c/z -0.952627944 -1.65 1.55
 819 c/z -0.952627944 1.65 1.45
 820 c/z -0.952627944 1.65 1.49
 821 c/z -0.952627944 1.65 1.55
 822 c/z 0.911652933 5.170240703 1.45
 823 c/z 0.911652933 5.170240703 1.49
 824 c/z 0.911652933 5.170240703 1.55
 825 c/z 4.021733326 3.437134951 1.45
 826 c/z 4.021733326 3.437134951 1.49
 827 c/z 4.021733326 3.437134951 1.55
 828 c/z 5.25 0. 1.45
 829 c/z 5.25 0. 1.49
 830 c/z 5.25 0. 1.55
 831 c/z 4.021733326 -3.437134951 1.45
 832 c/z 4.021733326 -3.437134951 1.49
 833 c/z 4.021733326 -3.437134951 1.55
 834 c/z 0.911652933 -5.170240703 1.45
 835 c/z 0.911652933 -5.170240703 1.49
 836 c/z 0.911652933 -5.170240703 1.55
 837 c/z -2.625 -4.54663337 1.45
 838 c/z -2.625 -4.54663337 1.49
 839 c/z -2.625 -4.54663337 1.55
 840 c/z -4.933386259 -1.795605752 1.45
 841 c/z -4.933386259 -1.795605752 1.49
 842 c/z -4.933386259 -1.795605752 1.55
 843 c/z -4.933386259 1.795605752 1.45
 844 c/z -4.933386259 1.795605752 1.49
 845 c/z -4.933386259 1.795605752 1.55
 846 c/z -2.625 4.54663337 1.45
 847 c/z -2.625 4.54663337 1.49
 848 c/z -2.625 4.54663337 1.55
 860 8 pz -42.
 861 8 pz 58.
 863 8 pz 45
 862 8 pz 42.
 864 8 pz -45.
 870 cz 8.05
 871 cz 7.
 865 8 pz -48.
 866 8 pz 61.
 867 8 pz -50.5
 868 8 pz 63.5
 869 8 pz 68.5
 888 8 trc 0. 0. -63. 0. 0. -2.598076211 1.5 0.05
 c ballast unit surfaces
 891 8 pz 154.5
 892 8 pz 84.5
 893 cz 1.25
 894 8 pz 78.5
 895 cz 6.1
 896 8 trc 0. 0. 78.5 0. 0. -4. 6. 3.2
 897 8 trc 0. 0. 78.5 0. 0. -7.4 7.5 3.2
 898 cz 3.2
 899 8 pz 71.1
 880 8 pz 68.5
 881 8 pz 156.5

```

882 8 pz 160.5
883 cz 7.1
884 cz 6.
885 cz 3.
886 8 pz 167.5
c
c
c
c assembly borders
251 p 1 1.732050808 0. 17.1
252 px 8.55
253 p 1 -1.732050808 0. 17.1
254 p 1 1.732050808 0. -17.1
255 px -8.55
256 p 1 -1.732050808 0. -17.1
257 pz -300
258 pz 100
c DATA CARDS
c COORDINATES TRANSFORMATION
c
c coordinate transformation for CR sliding (0. 0. 0. means B4C midplane on Core midplc
c maximum value for POS= 0. 0. 160.
c nominal position POS=0. 0. -47. (B4C 17 cm into the core)
TR7 0. 0. -22.75 1. 0. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 1. 1
c coordinate transformation for sR sliding (0. 0. 0. means B4C midplane on Core midpl
c maximum value down for POS= 0. 0. -7.55 (full inserted)
c nominal position POS=0. 0. 84. (B4C edge 12 cm upper than the edge of the active zo
TR8 0. 0. 84. 1. 0. 0. 0. 1. 0. 0. 0. 1. 1
c rotazione 45$ \degree$ antiorario dell'asse y
TR10 0. 0. 0.
0.707106781 0.707106781 0 0.707106781 -0.707106781 0. 0. 0. 1. 1
c rotazione 45$ \degree$ antiorario dell'asse x
TR11 0. 0. 0.
0.707106781 0.707106781 0 0.707106781 -0.707106781 0. 0. 0. 1. 1
C
c SOURCE/KCODE
kcode 100000 1 10 15
ksrc 0.2 0. 0. \ $ punto centrale
-102.4 0. 0. -51.1 0. 0. 51.5 0. 0. 102.8 0. 0.
-51.1 59.23613762 0. 0.2 59.23613762 0. 51.5 59.23613762 0.
-51.1 -59.23613762 0. 0.2 -59.23613762 0. 51.5 -59.23613762 0.
0.2 88.85420643 0.
0.2 -88.85420643 0.
C
c PRINT AND DUMP
c NDP:print tallies after xxx stories (xxx cycles in kcode) or after -xxx minutes
c NDM:dump after xxx stories (xxx cycles in kcode) or after -xxx minutes
c MCT:flag for printing ASCII file for subsequent needs (cfr. 3-143) 0: no ASCII
c NDMP:number of dump on runtp file 0=all preserved; x=last x preserved
c DMMP:flag for TFC (cfr. 3-143) 0=default
c NDP NDM MCT NDMP DMMP
prdmp 5 10 0 2 0
C
c MATERIALS
c material 1: liquid Pb-reflector
m1 nlib=71c
82204 1.4
82206 24.1
82207 22.1
82208 52.4
c
c material 2: liquid Pb-core coolant
m2 nlib=71c
82204 1.4
82206 24.1
82207 22.1
82208 52.4
c
c material 3: helium
m3 nlib=72c
2004 -1.0 gas=1
c
c nuovo T91 secondo il D7
m4 nlib=71c
6000 -0.1
14028 -0.459332
14029 -0.024168
14030 -0.0165
23000 -0.2
24050 -0.375609
24052 -7.532983
24053 -0.870606
24054 -0.220801
25055 -0.6
26054 -4.984826
26056 -81.149302
26057 -1.907557
26058 -0.258315
28058 -0.134394
28060 -0.053553
28061 -0.002367
28062 -0.00767
28064 -0.002016
41093 -0.1
42092 -0.141499
42094 -0.090347
42095 -0.157292
42096 -0.166745
42097 -0.096564
42098 -0.246858
42100 -0.100696
c
c Ti 15-15 (CDT-UTFISSM-P9P0-007)
m44 nlib=72c
5010 -0.001105
5011 -0.004895
6000 -0.09
14028 -0.780864
14029 -0.041085
14030 -0.02805
15031 -0.045
22046 -0.031679
22047 -0.02919
22048 -0.295383
22049 -0.022128
22050 -0.02162
24050 -0.605148
24052 -12.136473
24053 -1.402644
24054 -0.355735
25055 -1.5
26054 -3.703844
26056 -60.295861
26057 -1.41736
26058 -0.191934
28058 -10.415517
28060 -4.150385
28061 -0.183421
28062 -0.594415
28064 -0.156263
42092 -0.212248
42094 -0.135521
42095 -0.235937
42096 -0.250117
42097 -0.144846
42098 -0.370287
42100 -0.151044
c
c material 5: insulator (taken from MYRRHA)
m5 nlib=71c
8016 -25.7226
39089 -4.0162
40090 -35.6267
40091 -7.8558
40092 -12.1398
40094 -12.5705
40096 -2.0683
c
c material 6: B4C with 90%B-10
m6 nlib=71c
6000 1.0
5010 3.6
5011 0.4
c
c Argon
m7 nlib=71c
18040 1.
c
c Tungsten
m8 nlib=71c
74182 0.2650
74183 0.1431

```

```

74184 0.3064
74186 0.2843
c
c water
m9 nlib=71c
1001 2
8016 1
c
c helium gap
m99 nlib=71c
2004 0.50000000
29063 0.17287500
29065 0.07712500
74182 0.06625000
74183 0.03577500
74184 0.07660000
74186 0.07107500
c
c
c MOX: 27.8%Pu (atom%) outer fuel
m194 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 7.417E-06
92235 9.946E-04
92236 2.451E-05
92238 2.421E-01
94238 2.169E-03
94239 5.268E-02
94240 2.490E-02
94241 5.608E-03
94242 7.038E-03
95241 1.201E-03
c
c
m195 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 7.417E-06
92235 9.946E-04
92236 2.451E-05
92238 2.421E-01
94238 2.169E-03
94239 5.268E-02
94240 2.490E-02
94241 5.608E-03
94242 7.038E-03
95241 1.201E-03
c
c
m196 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 7.417E-06
92235 9.946E-04
92236 2.451E-05
92238 2.421E-01
94238 2.169E-03
94239 5.268E-02
94240 2.490E-02
94241 5.608E-03
94242 7.038E-03
95241 1.201E-03
c
c
m294 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 7.417E-06
92235 9.946E-04
92236 2.451E-05
92238 2.421E-01
94238 2.169E-03
94239 5.268E-02
94240 2.490E-02
94241 5.608E-03
94242 7.038E-03
95241 1.201E-03
c
c
m295 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 7.417E-06
92235 9.946E-04
92236 2.451E-05
92238 2.421E-01
94238 2.169E-03
94239 5.268E-02
94240 2.490E-02
94241 5.608E-03
95241 1.201E-03
94242 7.038E-03
95241 1.201E-03
c
c
m296 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 7.417E-06
92235 9.946E-04
92236 2.451E-05
92238 2.421E-01
94238 2.169E-03
94239 5.268E-02
94240 2.490E-02
94241 5.608E-03
94242 7.038E-03
95241 1.201E-03
c
c
c MOX: 21.7%Pu (atom%) inner fuel
c
m497 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 8.044E-06
92235 1.079E-03
92236 2.659E-05
92238 2.625E-01
94238 1.693E-03
94239 4.112E-02
94240 1.944E-02
94241 4.378E-03
94242 5.493E-03
95241 9.376E-04
m498 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 8.044E-06
92235 1.079E-03
92236 2.659E-05
92238 2.625E-01
94238 1.693E-03
94239 4.112E-02
94240 1.944E-02
94241 4.378E-03
94242 5.493E-03
95241 9.376E-04
m499 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 8.044E-06
92235 1.079E-03
92236 2.659E-05
92238 2.625E-01
94238 1.693E-03
94239 4.112E-02
94240 1.944E-02
94241 4.378E-03
94242 5.493E-03
95241 9.376E-04
c
c
m597 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 8.044E-06
92235 1.079E-03
92236 2.659E-05
92238 2.625E-01
94238 1.693E-03
94239 4.112E-02
94240 1.944E-02
94241 4.378E-03
94242 5.493E-03
95241 9.376E-04
m598 nlib=73c
8016 6.633E-01
92234 8.044E-06
92235 1.079E-03
92236 2.659E-05
92238 2.625E-01
94238 1.693E-03
94239 4.112E-02
94240 1.944E-02
94241 4.378E-03
94242 5.493E-03
95241 9.376E-04
m599 nlib=73c
8016 6.633E-01

```

92234 8.044E-06
92235 1.079E-03
92236 2.659E-05
92238 2.625E-01
94238 1.693E-03
94239 4.112E-02

94240 1.944E-02
94241 4.378E-03
94242 5.493E-03
95241 9.376E-04

Appendice B

Specifiche tecniche della strumentazione neutronica, attualmente disponibile, analizzata nello studio

In questa appendice sono riportate le specifiche tecniche della strumentazione analizzata in questo studio, in particolare:

- *CFUE32 fission chamber* [42]
- *CFUC06 fission chamber* [43]
- *ARi Self Powered Neutron Detectors* [44]
- *KWD Nuclear Instruments Self Powered Neutron Detectors* [45]
- *Thermocoax Self Powered Neutron Detectors* [46]

Neutron detector

7mm diameter in-core fission chamber

Applications

- ✓ Detection of thermal neutrons in flux range 10^3 to 10^{13} n.cm⁻².s⁻¹
- ✓ In-core measurements (up to 600°C)

Features

- ✓ Watertight stainless steel structure
- ✓ Integral high immunity, mineral insulated cable

Nuclear characteristics			
Sensitivity to thermal neutrons ¹ :	Pulse mode	10^{-3}	c.s ⁻¹ /n.cm ⁻² .s ⁻¹
	Fluctuation mode	4×10^{-29}	A ² .Hz ⁻¹ /n.cm ⁻²
	Current mode	10^{-16}	A/n.cm ⁻² .s ⁻¹
Neutron flux range:	Pulse mode ²	$10^3 - 10^8$	n.cm ⁻² .s ⁻¹
	Fluctuation mode	$10^7 - 3 \times 10^{12}$	n.cm ⁻² .s ⁻¹
	Current mode ³	$10^9 - 10^{13}$	n.cm ⁻² .s ⁻¹
Gamma sensitivity:		10^{-10}	A/Gy. h ⁻¹
Exposure limits:	Thermal neutrons ⁴	max 2×10^{19}	n.cm ⁻²
	Gamma exposure	max 10^9	Gy
	Gamma dose rate	max 10^4	Gy.h ⁻¹

Electrical characteristics			
Insulating resistance at 400V ⁵ :	Nominal at 20°C	min 10^{12}	Ω
	Detector +9m cable at 350°C	min 5×10^8	Ω
Operating voltage:	Nominal up to 600°C	400	V
	Maximum at 20°C	600	V
	Limit with no radiation	800	V
Charge collection time ⁶ :		150	ns
Cable:	Capacitance	170	pF/m
	Characteristic impedance	50	Ω
	Attenuation	0.34	dB/m

Mechanical and physical characteristics			
Detector:	Materials:	Case, electrodes	Stainless steel (Co<0.05 %)
		Insulator	Al ₂ O ₃
		Brazing	Copper
	Sensitive layer:	Uranium enriched in ²³⁵ U	>90%
Filling gas (pressure)			Argon (at 900 kPa)
Dimensions:	Nominal diameter	7	mm
	Detector length	150	mm
	Overall length, on request ⁷	max 12	m
	Sensitive length	56	mm
Cable:	Type ⁸ : high immunity, mineral insulator	6 coax	
	External diameter	6mm	
	Insulator	MgO	
	Curvature radius ⁹	min 60 mm	
Connector:	Type ¹⁰	HN, waterproof	
	CFUE32/F ⁷	Female	
	CFUE32/M ⁷	Male	
	Insulator	Al ₂ O ₃	

Notes.

Unless otherwise stated, all characteristics are given at 20°C

¹ Values depending on the characteristics and the calibration of the measurement equipment. The pulse sensitivity is calculated from the (α-neutron) discrimination curve for a discriminating threshold corresponding to a counting rate of 0.01 c.s⁻¹.

² Pulse mode operating range for a measurement equipment with a resolution shorter than the collection time of the detector.

³ Current mode operating range: the lower limit of the current mode operating range depends on the electronics (specially on the input amplifier) and on the signal / parasitic current ratio (parasitic current = leakage current + gamma current + α-current). The upper limit is depending both on the detector and the electronics (loss of linearity).

⁴ Flux corresponding to a 1 % sensitivity loss of the detector.

⁵ The insulating resistance measurement includes the α-current.

⁶ Charge collection time: the measured value depends on the electronics and on the cable capacitance.

⁷ The type of connector (male or female) as well as the overall length (detector + cable + connector) constitute the version code to be mentioned in the detector reference after the basic type number. For example CFUE32/F5 indicates a detector with a female connector and a 5 m overall length.

⁸ Our "6 coax" cable is the 1 Zs FCAc 60 referenced cable from Thermocoax.

⁹ This is the smallest irreversible curvature radius.

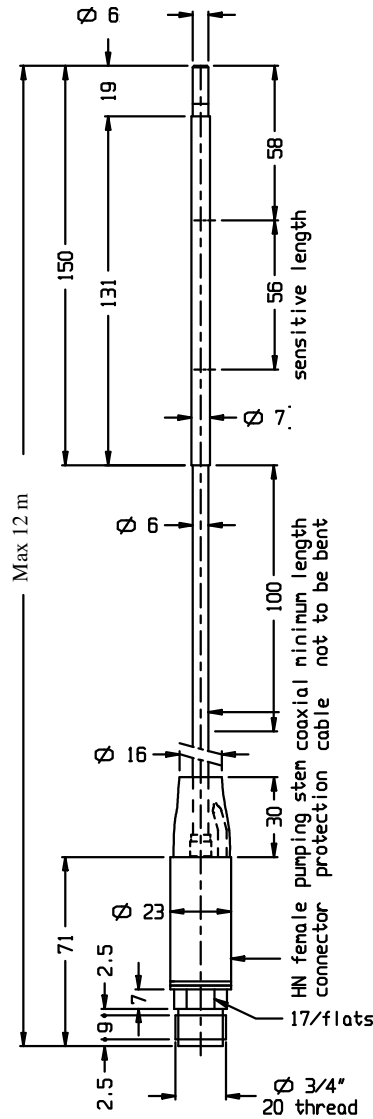
¹⁰ In order to avoid humidity penetration during storage, the connector is closed with a cap to be removed just before use. As a general rule, prevent any humidity penetration at the connection level (refer to "Instructions for use and handling" in the package). Other connector types are possible. To be required when ordering.

¹¹ Including gamma effect (at least 10^4 Gy.h⁻¹). The maximum operating temperature is indicated for pulse operating mode. The leakage current in the cables increases rapidly with temperature. It is therefore necessary to take into account this characteristic, which limits the maximum temperature.

Neutron detector

CFUE32

Outline (dimensions in mm)



Limiting values	Max
Operating temperature ¹¹	600 °C

Neutron detector

CFUC06

High-temperature fission chamber

Application

- ✓ Detection of neutrons at temperature up to 600°C

Features

- ✓ High sensitivity
- ✓ Very high immunity against interferences

Nuclear characteristics			
Sensitivity to thermal neutrons ¹ :	Pulse mode	1	$\text{c.s}^{-1}/\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
	Fluctuation mode	4×10^{-26}	$\text{A}^2.\text{Hz}^{-1}/\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
	Current mode	2×10^{-13}	$\text{A}/\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Neutron flux range :	Pulse mode ²	1 - 10^5	$\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Gamma sensitivity:		7×10^{-9}	$\text{A}/\text{Gy}.\text{h}^{-1}$
Exposure limits:	Thermal neutrons ³	max 2×10^{19}	n.cm^{-2}
Gamma radiation:	Exposure	max 10^9	Gy
	Dose rate	max 10^4	Gy.h^{-1}

Electrical characteristics

Insulating resistance at 600V ⁴ :	Between signal and outer shell	min 10^{12}	Ω
	Between HV and outer shell	min 10^{12}	Ω
	Between signal and HV	min 10^{13}	Ω
Operating voltage:	Nominal up to 600°C	400	V
	Maximum at 20°C	600	V
	Limit with no radiation	1300	V
Charge collection time ⁵ :		350	ns
Cable:	Capacitance	170	pF/m
	Characteristic impedance	50	Ω
	Attenuation	0.34	dB/m

Mechanical and physical characteristics

Detector:	Materials:	Case, electrodes Insulator Brazing	Inconel (Co<0.05%) Al_2O_3 NiCuAu
	Sensitive layer:	Uranium enriched in ^{235}U	>90%
Filling gas ⁶ (pressure)			Argon (at 350 kPa)
Dimensions:	Nominal diameter	48	mm
	Detector length	372	mm
	Overall length, on request ⁷	max 12	m
	Sensitive length	230	mm
Cable:	Type ⁸ : high immunity, mineral insulator	6 coax	
	External diameter	6 mm	
	Insulator Curvature radius ⁹	MgO min 60 mm	
Connector:	Type ¹⁰	HN, watertight	
	CFUC06/F ⁷	female	
	CFUC06/M ⁷	male	
	Insulator	Al_2O_3	

Notes.

Unless otherwise stated, all characteristics are given at 20°C

¹ Values depending on the characteristics and the calibration of the measurement equipment. The pulse sensitivity is calculated from the (α -neutron) discrimination curve for a discriminating threshold corresponding to a counting rate of 1 c.s⁻¹.

² Pulse mode operating range for a measurement equipment with a resolution shorter than the collection time of the detector.

³ Flux corresponding to a 1% sensitivity loss of the detector.

⁴ For sensible fission chambers ($s > 0.1 \text{ c.s}^{-1}/\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$), the α -current is predominant in relation to the leakage current from the insulators. The insulating resistance is then measured by the ratio $\Delta U/\Delta I$ of the I=f(U) curve determined without any ionizing radiation.

⁵ Charge collection time: the measured value depends on the electronics and on the cable capacitance. Shorter collection times are reached on request.

⁶ For other gas filling, on request.

⁷ The type of connector (male or female) and the overall length (detector + cable + connector) constitute the version code to be mentioned in the detector reference after the basic type number. For example CFUC06/F5 indicates a female connector and 5 m overall length.

⁸ Our "6 coax" cable is the 1 Zs FCAc 60 referenced cable from Thermocoax.

⁹ This is the smaller curvature radius allowing one reversible deformation.

¹⁰ In order to avoid humidity penetration during storage, the connector is closed with a cap to be removed just before use. As a general rule, prevent any humidity penetration at the connection level (refer to "Instructions for use and handling" in the package). Other connector types are possible on special request.

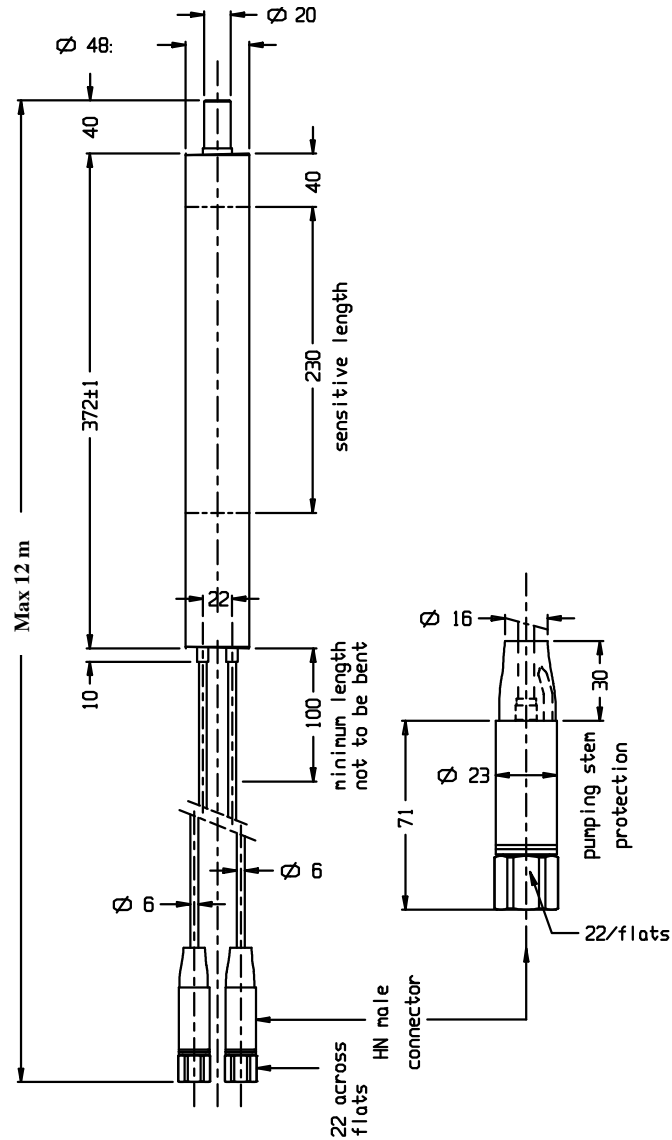
¹¹ Including temperature increase due to gamma radiation (effective above 10^4 Gy.h^{-1}). The maximum operating temperature is indicated for pulse operating mode. The leakage current in the cables increases rapidly with temperature. It is therefore necessary to take into account this characteristic, which limits the maximum temperature so that the ratio of wanted signal/parasitic signal remains acceptable.

¹² Vibration test conditions: frequency 60 Hz, amplitude $\pm 1.5 \text{ mm}$.

Neutron detector

CFUC06

Outline (dimensions in mm)



Limiting values	Max
Operating temperature ¹¹	600 °C
Vibration (any axis) ¹²	200 m.s ⁻²
Shock (perpendicular axis)	500 m.s ⁻²

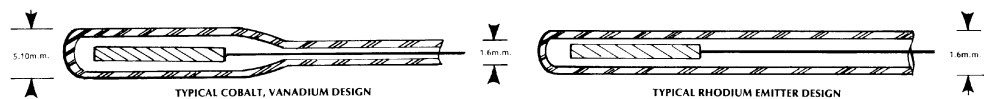
NEUTRON DETECTORS

SELF POWERED NEUTRON DETECTORS

Self-powered neutron detectors are devices that produce a positive charge on an electrode by emitting electrons when exposed to radiation. When the electrode has a high activation cross section for (η, β) reactions, electrons will flow from it and produce an electron current which is proportional to the neutron flux. The electrons flow up the wire attached to the electrode replacing escaping beta particles (beta decay). The term "self-powered" is derived from the induced current produced in the irradiation.

The main components of a self-powered neutron detector system are a metallic sheath (collector) which surrounds a coaxial insulant that isolates and electrically insulates the emitter and its connected leadwire. (See fig. 1)

Fig. #1 Coaxial Neutron Detectors



For greatest accuracy in a self-powered neutron detector system a background detector should be initially included to measure the flow of parasitic electrons produced by all of the materials in the system.

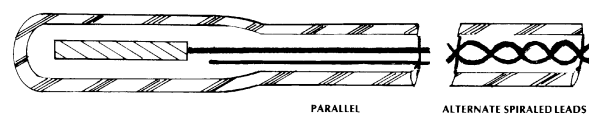
A background detector is of identical construction as the self-powered neutron detector except that the emitter is not included. (See fig. 2)

Fig. #2 Background Detector



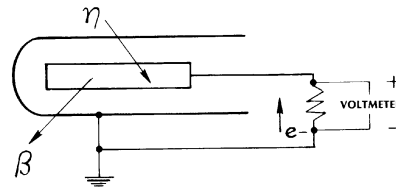
For some special applications the emitter and background detector can be enclosed in the same sheath—generally without an increase in the outside sheath diameter. The two wires may be parallel or spiralled around each other. (See fig. 3)

Fig. #3 Biaxial Neutron Detector



The electron current signal produced can be read out on a millivoltmeter, a multi-point recorder, a data logger or a computer. The attachment of the detectors to the read out device is achieved by adding a dropping resistor between the emitter and ground. (See fig. 4)

Fig. #4 Typical Circuit



The amount of the neutron flux measured depends on the choice of sensitive material used for the emitter its purity, mass and dimensions.

The response time, which is defined as the time necessary for an emitter to indicate 63% of a neutron flux step function (instantaneous variation) is dependent on the half-life of the radioisotope created by the irradiation of the emitter material. Various emitter materials and their characteristics are shown in table II.

All emitter materials gradually lose sensitivity because of burn-up, but their burn-up rate is less than the fuel burn-up rate. Rhodium, for example, will last more than four times longer than U235. Emitter life is primarily a function of the depletion rate and is directly proportional to the expended current. For rhodium, the depletion rate curve is mathematically well enough defined so that a detector's remaining sensitivity can be determined.

When cobalt is selected as the emitter material, Compton and photo electrons will be emitted during irradiation by internal conversion of gamma rays produced when a neutron is captured. The escaping electrons cause a positive charge to be induced on the emitting electrode. The gamma rays are emitted in 10^{-14} seconds for cobalt. Because of this quick response, self-powered neutron detectors with cobalt emitters are called prompt neutron detectors.

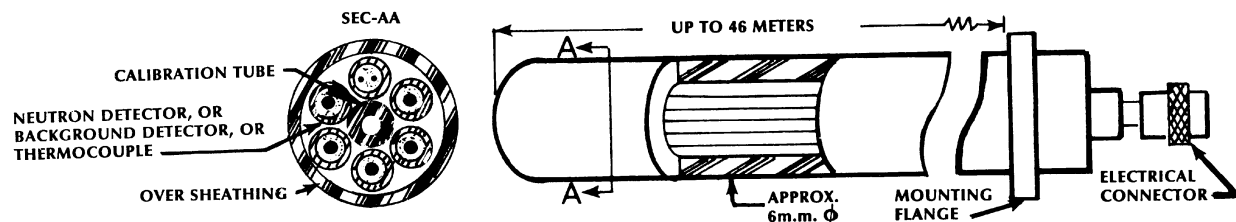
The diameter range of emitter materials is limited because electrons emitted deep in the electrode may not have sufficient range to escape. Average diameters of rhodium, vanadium and cobalt emitters that have performed acceptably in water moderated reactors are 0.5mm (.020"), 1.0mm (.040") and 2.0mm (.080") respectively. With emitter diameter at a maximum; length, and the corresponding mass of the emitter are the main variables for sensitivity adjustment. The minimum design length of the detector is based on the flux field and must produce a signal large enough to overcome parasitic signals and insulation resistance drop due to operating temperature. The maximum emitter length is limited by the reactor or loop design.

Sheath and collector materials are commonly 300 series stainless steel or Inconel* with purities for low neutron capture cross section. The sheath material should be compatible with the reactor coolant and wall thickness must be heavy enough to hold the ceramic insulation in compaction. A relatively heavy sheath wall may be useful in reducing parasitic currents that can be produced if the detector is operated in a protective tube which emits significant electron flux.

Magnesium oxide and aluminum oxide are the primary materials used for insulation in self-powered neutron detectors. Magnesium oxide has the lower capture cross section of the two materials and is generally preferred for cable insulation. Insulation resistance changes due to both temperature and neutron flux are about the same for both materials providing they are of very high purity.

S.P.N.D.'s are used for in-core power measurements, flux mapping, fuel management, verification of reactor core physics, thermal calculations of flux peaks and power peaks. They provide physical flexibility, permanent operation, low perturbation to flow or flux and high accuracy at low cost. There is no better instrument buy on the market.

Fig. #5



For additional information on the cable portion of self-powered neutron detectors see ARi Bulletin 4.2.

Multiple detector assemblies with self-powered neutron detectors at staggered intervals that are closely controlled to small length dimensional tolerances are available in overall lengths to 46 meters (150 feet). (See Fig. 5)

Manufactured designs have included thermocouples, background detectors, calibration tubes, pressure differential readout tubes in conjunction with S.P.N.D.'s in either a solid or flexible outer protective sheath.

All detectors are tested and certified at ARi Industries, Inc. For additional information on metallurgical and non-destructive capabilities of ARi Industries, Inc. see Bulletin 10.0.

*TM of International Nickel Corporation

NEUTRON DETECTORS

TABLE 1 CHARACTERISTICS OF SENSITIVE ELEMENT

Stable Element	Thermal Neutron Cross Sect.	Half Life	Maximum B Energy	B-Current Generated	Burnout Rate In 10 ¹³ nv	Neutron [ⓐ] Sensitivity
	(Barns)	(Sec)	(MeV)	(A/nv-g)	(%/mo)	(A/nv-cm)
103Rhodium [ⓑ]	150	42	2.44	1.5 x 10 ⁻¹⁹	0.23	1.2 x 10 ⁻²¹
59Cobalt [ⓒ]	37	Prompt	—	3.7 x 10 ⁻²¹	0.1	1.6 x 10 ⁻²³
51Vanadium	4.5	226	2.6	8.5 x 10 ⁻²¹	0.013	7.7 x 10 ⁻²³

Notes: [ⓐ]Values are for 0.5mm emitter diameter in 1.5mm sheath.
[ⓑ]Rhodium also has an 8% yield with half life of 264 sec.
[ⓒ]Cross section is for total neutron interactions not for radiation of beta rays.

TABLE 2 CONFIGURATION OF DETECTOR [ⓐ]

Sensitive Element	Insulation Material [ⓑ]	Sheath Material	Wire Dia.	Sheath Dia.	Overall Dia. Probe Head	Emitter Dia.
			mm	mm	mm	mm
103Rhodium	MgO	Inconel 600 or 300 series St/St	0.25	1.5	1.5	0.5
103Rhodium	MgO		0.15	1.0	1.5	0.5
59Cobalt	MgO		0.25	1.5	4.75	2.0
51Vanadium	MgO		0.25	1.5	2.0	1.0

Notes: [ⓐ]Emitter length and weight are variable.
[ⓑ]Alternate insulation of Al₂O₃ is available.

HOW TO ORDER

1. Refer to tables 1 & 2 and select emitter material. Specify its length and diameter.
2. Select the collector material (sheath) and specify its diameter for lead section and probe head.
3. Select the insulation material.
4. Refer to figures 1 and 3 and specify either coaxial or biaxial design, if biaxial, choose either parallel or spiralled construction.
5. Specify length of the lead section and the quantity of detectors desired.
6. Connectors, plugs, jacks, or flexible leadwire will be attached as required.
7. Multiple detector assemblies will be supplied. Ordering information should include the quantity and location of emitters, thermocouples, background detectors and calibration or pressure differential tubes. These assemblies may be bundled but commonly are contained in an oversheath. Lengths can be built up to 46 meters long.

CONTACT YOUR LOCAL ARI REPRESENTATIVE

ARI Industries Inc

381 ARI Court, Addison, IL 60101 USA
 Phone: 630-953-9100
 Telefax: 630-953-0590

Toll Free 1-800-AEROPAK
 (1-800-237-6725)

*Specifications for SPN detectors with cobalt, rhodium and vanadium**

	<i>5503-Co-210</i>	<i>5503-Rh-50</i>	<i>5503-V-100</i>
Detector			
Emitter material	Cobalt	Rhodium	Vanadium
Emitter diameter	2 mm	0.7 mm	2 mm
Emitter weight	6 g	0.2 g	2 g
Sensitive length (other length upon request)	210 mm	50 mm	100 mm
Insulator	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Collector material	Inconel 600	Inconel 600	Inconel 600
Outer diameter of detector	3.7 mm	2.5 mm	3.5 mm
Cable			
Length on request type, thermocoax single or twin lead			
Insulator	Al ₂ O ₃ or MgO	Al ₂ O ₃ or MgO	Al ₂ O ₃ or MgO
Sheat material	Inconel 600	Inconel 600	Inconel 600
Outer diameter of cable	1 or 2 mm	1 mm	1 or 2 mm
Characteristics			
Measured quantity	neutron flux	neutron flux	neutron flux
Thermal neutron signal at 10 ¹⁴ n•cm ⁻² •s ⁻¹	0.54 μA	0.87 μA	0.51 μA
Gamma signal	0.01 μA	0.002 μA	0.007 μA
Insulation resistance (detector + 15 m cable)			
20°C	> 10 ¹² Ω	> 10 ¹² Ω	> 10 ¹² Ω
300°C	>5•10 ⁸ Ω	>5•10 ⁸ Ω	>5•10 ⁸ Ω
Response time	10 ⁻¹⁴ s	1.1 min	5.5 min
Burn-up rate per month at 10 ¹⁴ n•cm ⁻² •s ⁻¹	1.0%	3.9%	0.12%
Lifetime	20 years	3 years	20 years

* Other emitter materials such as platinum and Inconel can be offered on request.



KWD Nuclear Instruments AB, Box 1001, SE-61129 Nyköping, Sweden.

Phone +46 155 28 03 70 Fax. +46 155 26 31 10

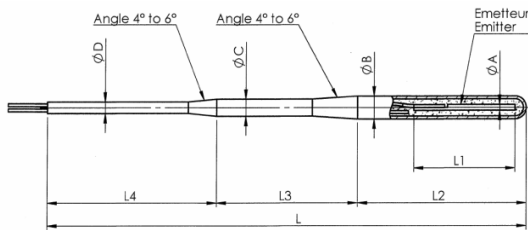
E- mail: info@kwdni.se www.kwdni.se



In Core Instrumentation for Gen 3 & 4 reactors

Neutron thermal flux measurement

Research reactors and fusion reactors.



Dimensions according to your specification

- Emitter: diameter Ø A, length L1.
- Collector: diameter Ø B, length L2
- Mineral insulated extension cable length L3+L4, swage possible on two diameters Ø C and Ø D otherwise same OD than collector.
- Connector: LEMO®, Ceramic metal seal or soft extension lead wires

Emitter	Rhodium Rh 103	Silver Ag 109	Vanadium V51	Cobalt Co 59	Platinum Pt 195
Cross section (Barns)	140	113	5,66	37	8,1
Burn-up rate per year in flux of 3×10^{21} n/cm ²	34%	17,4%	1,5%	11,2%	2,7%
Response time (63%)	68 s	51s	5,4 mn	<50 ms	<50 ms
Sensitivity for an emitter of Ø 1 mm (A/n.cm.s)	$0,2 \times 10^{-20}$	$0,14 \times 10^{-20}$	$1,8 \times 10^{-22}$	$0,7 \times 10^{-22}$	$0,9 \times 10^{-22}$

NEUTROCOAX®

Self Powered Detectors SPND

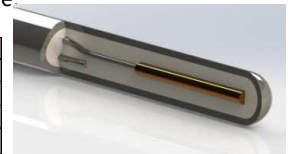


- Built on specification
- Cost effective sensor compared to others technologies
- Linear signal versus neutron flux

Collector & extension cable can be continuous (Linear type) or in two welded sections (modular type).

Outer sheath: stainless steel 316L or 304 or Inconel® 600.
Mineral insulant : MgO or Al₂O₃

Wide range of emitter: Rhodium, Vanadium, Silver , Cobalt , Platinum , Inconel...
Single or Dual lead wire.



THERMOCOAX
from vision to reality

Appendice C

Pubblicazioni basate sul lavoro svolto

In questa appendice sono riportate le pubblicazioni attualmente disponibili alla comunità scientifica, che traggono le basi da questo lavoro di dottorato. In particolare,

- «Fast Neutron-Flux Monitoring Instrumentation for Lead Fast Reactors: A Preliminary Study on Fission Chamber Performances» [47]
- «Evaluation of the Current Fast Neutron Flux Monitoring Instrumentation applied to LFR Demonstrator ALFRED: capabilities and limitations» [48]
- «On capabilities and limitations of current fast neutron-flux monitoring instrumentation for the DEMO LFR ALFRED» [49]
- «Studio di fattibilità di sonde per la misura dei flussi neutronici di un reattore LFR. Concettualizzazione di test sperimentali preliminari sul reattore TAPIRO» [27]
- «Verifica di fattibilità di sonde commerciali per la misura dei flussi neutronici in reattori raffreddati al piombo. Proposta di studio teorico-sperimentale di SPND innovativi ottimizzati per reattori LFR» [32]
- «Studio teorico di SPND innovativi ottimizzati per misure di flusso neutronico in noccioli di reattori veloci» [50]

Essendo le pubblicazioni [47] [48] [49] maggiormente rilevanti, di seguito se ne riporta la versione integrale.

**C.1 *FAST NEUTRON-FLUX MONITORING INSTRUMENTATION FOR LEAD FAST REACTORS:
A PRELIMINARY STUDY ON FISSION CHAMBER PERFORMANCES***

ICONE22-31011

**FAST NEUTRON-FLUX MONITORING INSTRUMENTATION FOR LEAD FAST
REACTORS: A PRELIMINARY STUDY ON FISSION CHAMBER PERFORMANCES**

Luigi Lepore

SAPIENZA, University of Rome
SBAI Department
Via Antonio Scarpa, 14 - 00161 Rome – Italy
luigi.lepore@uniroma1.it

Romolo Remetti

SAPIENZA, University of Rome
SBAI Department
Via Antonio Scarpa, 14 - 00161 Rome – Italy
romolo.remetti@uniroma1.it

Mauro Cappelli

ENEA UTFISST-MEPING
Casaccia Research Center
Via Anguillarese, 301 - 00123 Rome – Italy
mauro.cappelli@enea.it

ABSTRACT

Although Sodium Fast Reactors (SFRs) are the most investigated solutions for the future fast-flux facilities so far, Lead Fast Reactors (LFRs) promise to be a very competitive alternative thanks to their peculiarity concerning coolant-safety, fuel cycle and waste management.

Nevertheless, the development of LFRs presents today some drawbacks still to be solved. Due to the harder neutron flux, the current instrumentation developed for SFRs is likely to be extended to LFRs as a first attempt. Otherwise, new monitoring instrumentation could be developed in order to assure more tailored results. Different measurement technologies can be considered for fast flux monitoring and flux absolute measurements in order to provide a reliable and quick calibration of the overall reactor neutron instrumentation. The goal of this paper is to study the validity of typical fast reactor fission chamber designs (e.g. SuperPhénix fission chambers), indicating which are the limitations when used in a LFR environment. Afterwards, alternative detector solutions with enhanced sensitivity and response will be proposed.

INTRODUCTION

Today and for the near future, nuclear power reactors play an important role into the world energy scenario [1] [2].

In 2002, the properly founded Generation IV International Forum (GIF) gave the Roadmap [3] about the developing of sustainable nuclear power engineering, acknowledging some reactor facilities as Generation IV Reactors. The six chosen

types have been selected relating to their potential capabilities to comply the requested goals about sustainability, safety and reliability, economics, proliferation resistance and physical protection. Those objectives may be accomplished by combining more technologies together, i.e. producing electricity by means of a traditional and well-known Light Water Reactor (LWR), whose nuclear fuel wastes can be burned in a Fast Breeder Reactor (FBR) or in a subcritical Accelerator-Driven System (ADS). This arrangement or the adoption of “adiabatic” fast reactor makes it possible to realize a closed fuel cycle relating to Minor Actinides (MAs): this represents a fundamental improvement because High Level Wastes confinement times can be reduced significantly from 10^6 - 10^7 years to 10^2 - 10^3 years according to preliminary evaluations. Fast Reactors (FR) seem to have a crucial role in this scenario [4].

From the '50 onwards, the goal of the fast flux facilities was the fertile conversion into artificial fissile. On this basis, a lot of experimental reactors have been realized with good results, especially using sodium as a coolant (Sodium Fast Reactors, SFRs); lead-cooled systems were also taken into account but they were abandoned soon due to compatibility problems between lead and other materials (with the exception of the URSS that built a lot of vessels powered by a Lead-cooled Fast Reactor, LFR). It should be noted that the term LFR can be applied also to a lead-bismuth eutectic (LBE), composed of 45.0 at. % Pb and 55.0 at. % Bi.

Presently, FR's main projects consider three different media as coolant: sodium, lead and gases. Each one presents its own advantages and drawbacks but only liquid metal solutions are now really investigated and sodium facilities are the most widespread.

Even though there is not a lot of experimental data on lead reactors and some issues are to be solved in order to realize an enduring and reliable reactor, there are some peculiarities about LFRs that make them worthy enough to be experimented. Heavy Liquid Metal Coolants have several key inherent properties that can potentially reduce the cost and improve the safety of a LFR compared to SFRs of the same electrical power level. Some experts believe that LFRs can even be economically competitive with Light Water Reactors (LWRs). These two are the main drivers of interest in LFR development together with the traditional sustainability benefits of fast reactors, especially as Small Modular Reactors (SMRs) [5].

From the engineering point of view, Pb is a low pressure coolant and does not interact vigorously with water/steam or air: that feature makes it possible to eliminate the need for an intermediate cooling circuit, reducing the plant capital cost and enhancing plant reliability. Moreover, lead has a low absorption of neutrons: this permits the reactor fuel-pin lattice to be opened up by increasing the coolant volume fraction without a significant reactivity penalty and with benefits for a natural circulation regime for coolant. In addition, experiments carried out at the Forschungszentrum Karlsruhe [5] [6] have shown that iodine, cesium, and cesium-iodide (i.e. fission products having low melting and boiling points) are absorbed and immobilized by lead-bismuth eutectic at temperatures ranging from 400 °C to 600 °C. Thus, the heavy liquid metal coolant is a trap for these low melting point and low boiling point radionuclides.

The major disadvantages of choosing Pb as coolant concern: 1) the high density which limits the system size by the need to accommodate seismic events; 2) the chemical compatibility with the structural materials, because hot lead is very corrosive, especially when the level of the oxygen dissolved into the coolant increases; 3) risk of coolant freezing, enhanced in a loop-type configuration; 4) lack of sufficient experience in comparison with the SFRs.

Presently, there are many ongoing LFR projects in the World: ELFR (ELSY) [5], ALFRED [7], SSTAR [5], SVBR [5], BREST [5], PBWFR [5], SLPLFR [5], PEACER [5], MYRRHA [8], etc., and the interest in such a subject is growing and growing.

Generally, the common procedure adopted during reactor design focuses first on neutronics and thermal-hydraulics topics while side-systems (auxiliary, sub-systems, etc.) are faced in the following steps. In the authors' opinion, this methodology could not be successful into innovative projects such as LFRs, because some auxiliary could need to change the original project of the core, and a parallel approach is viewed as more convenient.

This paper focuses on Instrumentation & Control (I&C) issues, usually insufficiently addressed in the literature. In particular, this work aims at verifying if LFR harder spectrum can affect the performance of monitoring instrumentation currently used in other fast reactors such as SFRs. Also, this approach may help in the identification of a possible control strategy, i.e., according to detector's capabilities and sensitivities, to give some hints in positioning the counters into the vessel.

Usually, fission chambers are used in FRs as flux monitoring instrumentation. The goal of the study is to compare the performances of a selected fission detector when exposed to both a sodium and a lead spectrum.

In particular, fast reactor spectra have been calculated through MCNPX simulations, together with the assessment of the fission chamber performances in those different environments.

REFERENCE REACTOR

The goal of this paper requires to assume a reactor design reference both for SFRs and LFRs category: the French SUPER-PHÉNIX [9] [10] as sodium reference reactor, and the DEMO project [11] as lead reference reactor.

Super-Phénix is widely known as reference for large FBR facility employing sodium. Demo represents the current ELFR (European LFR) size-scaled concept. The choice has been made also depending on the availability of sufficient data for the implementation of the MCNPX simulations.

Pb coolant: advantages	Pb coolant: drawbacks
<ul style="list-style-type: none"> - possibility to realize a MOX equilibrium (BR=1 and in-vessel minor actinides transmutation); - more reliable coolant in comparison with sodium: no fires, no violent exothermic interaction with air/water; - suitable conditions for natural circulation in decay heat removal systems; - simpler primary circuit: no intermediate heat exchanger; - no coolant boiling; - well coupled with small modular concept: lower flux means more safety and material robustness; - inherent retention of fission product. 	<ul style="list-style-type: none"> - chemical compatibility and corrosion/erosion of structure's materials, cladding and instrumentation; - harder neutron spectrum in comparison with SFR: enhanced neutron-induced deformation of materials; - heaviness: the coolant density obliges to small sizes of vessels because of the seismic risk; - lack of experiences about coolant and lead-cooled cores: needs to acquire operational data to support the preliminary project and probabilistic safety assessment.

Tab. 1 – Advantages and drawbacks of Lead-cooled Fast Reactor vs. Sodium Fast Reactor.

SUPER-PHÉNIX

Super-Phénix was born from the previous and successful Phénix facility (565 MWth), in a project size-scaled to a commercial power plant of 3000 MWth. Owned by Electricité de France (EDF), Super-Phénix 1 (SPX), worldwide the first large SFR, was connected to the grid on 14 January 1986. Full power was reached on 9 December 1986 [10] [12].

The SPX had a MOX-fueled core arranged in a hexagonal-lattice 364 Fuel Assemblies (FAs) plus 233 elements as radial breeding blanket. Each FA was composed of 271 pins organized in a 9 rings hexagonal-lattice shrouded by an external duct. The core presents two different-enriched zone with an overall active length of 195 cm. Fuel pins had 8.5 mm OD pins meanwhile breeding pins had 10.5 mm OD.

About materials, AISI 316 had been chosen as cladding and structural steel.

More details about are reported in Reference [9] [10] [12].

DEMO

Afterwards the lead fast reactor acknowledgement by GIF in 2002, the European LFR community proposed the ELSY (European Lead-cooled SYstem) concept, an innovative 600 MWe pool-type LFR fully complying with Generation IV goals. The main objective of the neutronic design was related to the need of demonstrating the key issue of the adiabaticity of the fuel cycle (unitary breeding ratio nearby the burning of in-core self-produced MAs), reachable with a particularly hard neutron spectrum along with a high power density corresponding to a neutron flux magnitude of 10^{15} - 10^{16} n/cm²s at the core center.

The Demo project results in a 300 MWth MOX-fueled core arranged in a square-lattice 24 FAs (Fuel Assembly). Each FA is ductless and organized in a 28x28 square-lattice composed of 774 active pins with a central channel as driveline for control/safety rod insertion. The core presents two different-enriched zone with an overall active length of 65 cm. In order to limit the fuel temperature peak, 6 mm OD pins has been chosen along with hollow fuel pellets. The pin pitch is about 1.422: it assures coolant flow-channel large enough to guarantee a lead velocity less than 2 m/s.

Due to neutronics and chemical compatibility requirements, as cladding and structural steel the aluminized FMS T91 has been selected.

More details about are reported in Reference [11][13].

NEUTRON SPECTRA

The fast spectra needed for the fission chamber's performances analysis have been calculated my means of MCNPX code [14], which solves the particle transport equation through a Monte Carlo approach. It represents a powerful tool versus deterministic methods because it allows simulating real geometries and materials without the need to homogenize cells or regions due to computational difficulties. The statistical representativeness of results requires only to run several million particles in order to sample all regions sufficiently: because of

that, run-times can be extremely long, depending on the technical specifications of the machine it runs on.

Here, the physics of the problem, the large geometry dimensions, the nature of the results and the requested precision obligate to long run-times, from 48 up to 72 hours on a commercial PC host in the UTFISST-MEPING Laboratory at the ENEA Casaccia Research Center [15] (Tab. 2).

PC Technical Specification of interest		
Operating System	Windows 8.1	
CPU: Intel Core i7-3770	# of Cores	4
	Clock speed	3.40 GHz
RAM (total):	12 GB	
Graphics	NVIDIA GeForce GT 640	

Tab. 2 – PC technical specifications of interest.

The version of the code installed on is MCNPX 2.7.0; ENDF/B (2008 release) cross-section libraries have been implemented.

After the definition of geometries, materials and densities, the MCNPX criticality simulation needs the 'kcode' routine for generating a given number of neutron cycles by which the evaluation of the keff comes. On the first cycle, the fission neutron starting points must be entered, so a 'ksrc' card is combined with the previous; on the second cycle ongoing, the fission neutron starting points come from the previous cycle, evaluating where fission reactions occur. The 'kcode' card does not provide the neutron energy spectrum.

The spectrum tallying needs to input "the question": the 'f1' tally has been introduced to count the neutron crossing a fixed surface, discretizing their energies as a multi-channel analyzer. The choice regarding energy binning for discretizing particles is crucial because bins too narrow allow phenomena fine-following with higher uncertainty; bins too large cause lower uncertainties, but averaged results. I.e., the used PC has some trouble in the sampling the range 1 eV – 10 MeV with 1 eV-wide bins because the requested precision constrains to choose too long runtimes (e.g. one week and beyond). Because of that, the tally energy binning has been chosen 0.1 keV-wide into 100 eV-1 keV range and 1 keV-wide into the 1 keV-10 MeV range; there is no tallying under 10 eV and above 10 MeV. This setting is kept for both simulations.

In the following, more details about the simulations and results are provided.

RESULTS FOR SUPER-PHÉNIX

According to the available data, the Super-Phénix reactor has been simulated only in its core region, constructing every single FA with its pins and shroud, neglecting top, bottom and pin’s wirespacer. Referring to the pins, the internal plenum spring and insulating pellet has not been included due to the lack of data. Fuel regions #1 and #2, radial blanket elements and reflector elements have been constructed precisely. Geometrical data about shield elements was unknown thus a homogeneous mix of steel and coolant has been supposed for them. Control rods were ignored.

The so arranged core has been inserted into a homogeneous mix of steel and sodium, in order to simulate the vessel’s internals and coolant.

	Inner Core [atomic %]	Outer Core [atomic %]	Blanket [atomic %]
¹⁶ O	11.866169	11.867350	11.847220
¹⁷ O	0.004511	0.004511	0.004504
²³⁵ U	13.474306	14.342311	0.176297
²³⁸ U	73.783308	72.803611	87.971980
²³⁹ Pu	0.259355	0.404912	-
²⁴⁰ Pu	0.256176	0.288652	-
²⁴¹ Pu	0.152996	0.172392	-
²⁴² Pu	0.103179	0.116260	-

Tab. 3 - Isotopic composition for fuel used into Super-Phénix simulation.

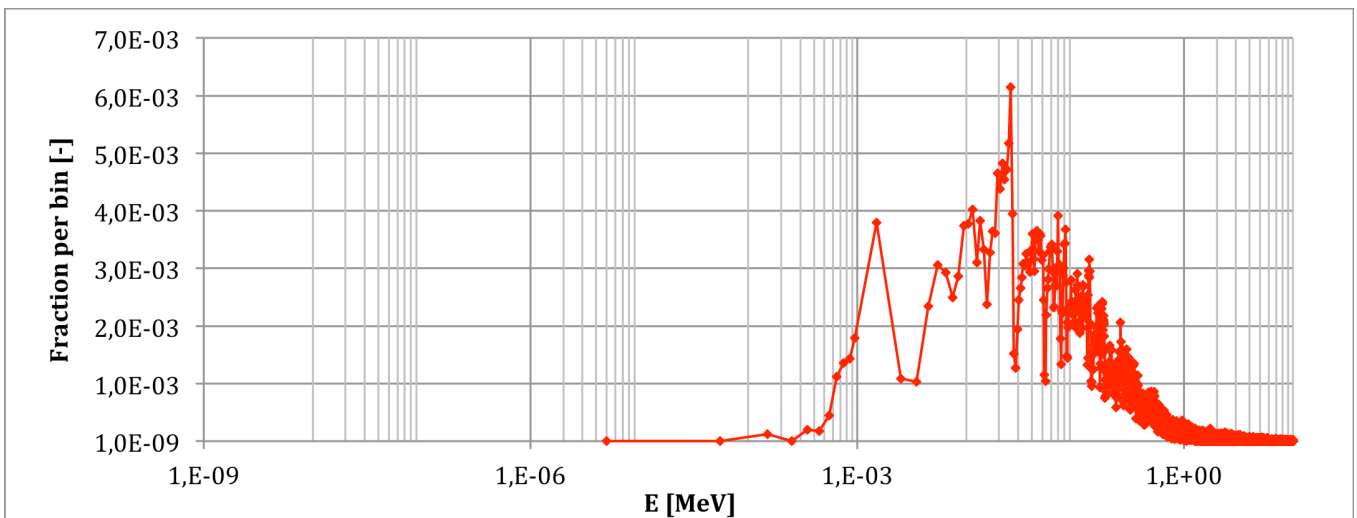


Fig. 1 - Normalized neutron spectrum in Super-Phénix, corresponding to the core center. The wells into the spectrum are due to the radiative capture by coolant and structural materials.

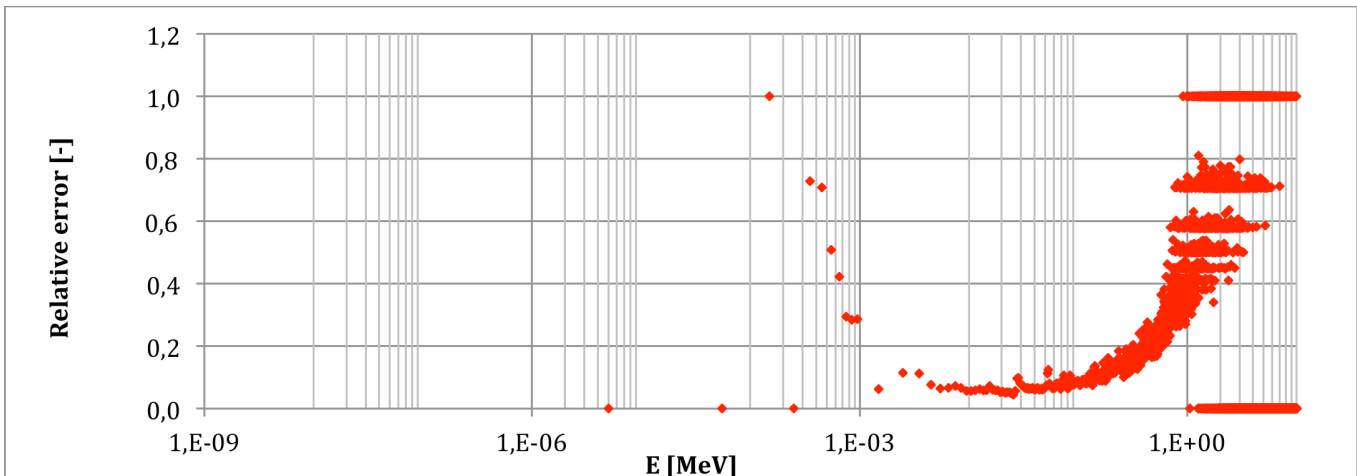


Fig. 2 - Relative error per bin corresponding to the Super-Phénix spectrum tally. The region of interest [1-500] keV presents errors $R < 0.2$ which are generally acceptable.

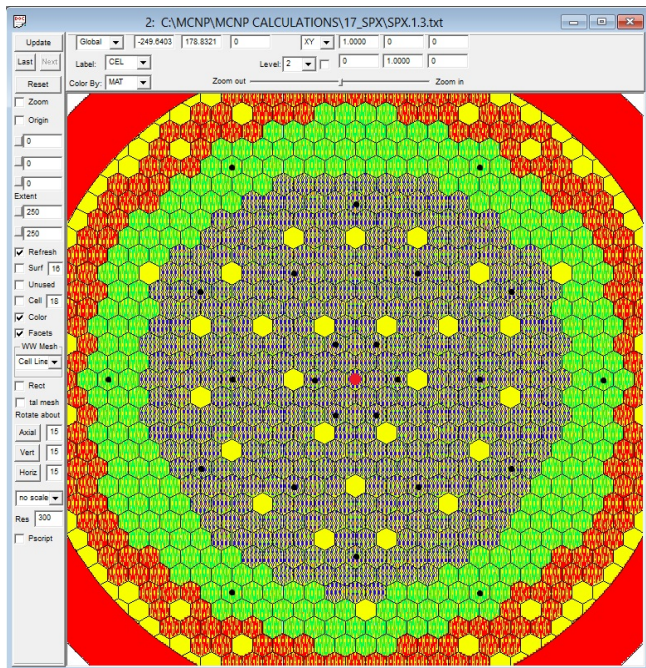


Fig. 3 - Super-Phénix core into MCNPX. Black dots are the ksrc points; the red dot is the tally.

Materials and densities are derived from [9], even if the isotopic composition of plutonium has been supposed (from literature) because the overall Pu amount was known only (cfr. Tab. 3).

In order to uniformly sample the core from the first cycle ongoing, 24 ksrc points (4 rings of 6 point each) have been entered into the input (cfr. Fig. 3).

Each cycle runs 50000 neutrons from their birth to their death; the number of cycles run is 2000, cutting the first 15 in order to limit the initial oscillation effects on results.

The insertion of the tally in the core center need the elimination of the central pin: its removing is plenty acceptable; the geometry of the tally consists in a right circular cylinder 1 cm OD and 15 cm tall. The f1 tally is a surface current tally normalized by the total neutron run, thus 50000 n/cycle x (2000-15 cycles)=99250000 n. That amount has allowed maintaining the tally relative error $R < 0.2$ for the region of interest.

The spectrum reported into Fig. 1 presents a typical saw-shape, with some wells corresponding to the radiative-capture cross-sections of coolant and structural materials: indeed the voids lie into the mayor resonances of ^{23}Na , ^{28}Si , ^{55}Mn , ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{57}Fe , ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni . The average energy lies around 175 keV.

The errors reduction (cfr. Fig.2) may request more neutrons (not possible with the used PC) or the application of non-analog simulation with variance-reduction techniques.

RESULTS FOR DEMO

By the available data, even the Demo reactor has been simulated in its core region only, constructing every single FA with its pins and control rod driveline, neglecting top, bottom

and spacing grids. Referring to the pins, the internal plenum spring and insulating pellet has not been included due to the lack of data. Fuel regions #1 and #2 have been simulated precisely; no data was available about shield elements, thus they were simulated through a homogeneous mix of steel and coolant. Control rods were ignored.

The so arranged core has been inserted into a homogeneous mix of steel and lead, in order to simulate the vessel's internals and coolant.

References for materials and densities can be found in [11].

Each cycle runs 50000 neutrons from their birth to their death; the number of cycles run is 1000, cutting the first 15 in order to limit the initial oscillation effects on result.

Because of the core small dimensions, none of the fuel pins has been removed to place the geometry for the tally. Indeed, the control rod driveline nearest to the core center has been used to put in the right circular cylinder tallying the flux. About dimension, the same ones of the previous simulation are adopted: 1 cm OD, 15 cm tall. The f1 tally is a surface current tally normalized by the total neutron run, thus 50000 n/cycle x (1000-15 cycles)=49250000 n. That amount has allowed maintaining the tally relative error $R < 0.2$ for the region of interest.

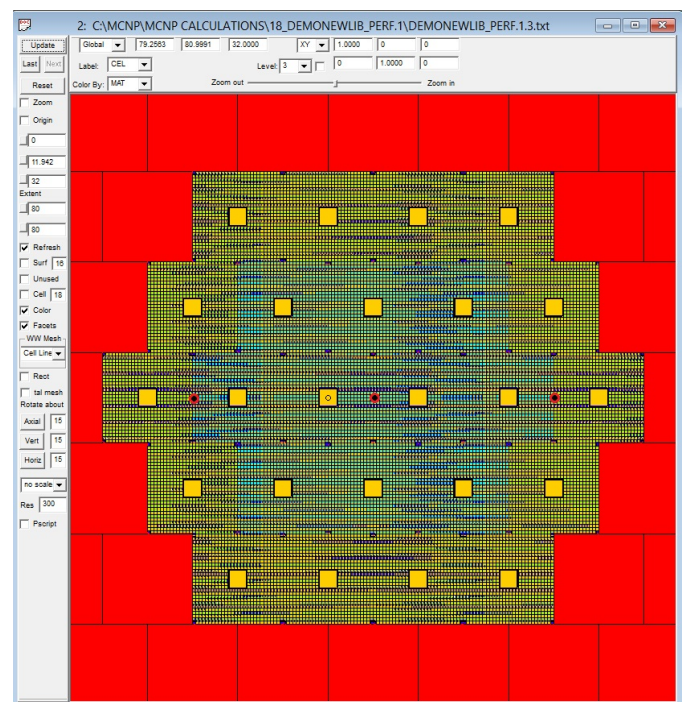


Fig. 4 - Demo core into MCNPX. Red-circled dots are the ksrc point; the black circle into the control-rod driveline near to the center is the tally.

The spectrum reported into Fig. 5 presents a saw-shape also, with some wells corresponding to the radiative-capture cross-sections of coolant and structural materials: indeed the voids lie into the mayor resonances of ^{28}Si , ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{55}Mn , ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{57}Fe , ^{206}Pb .

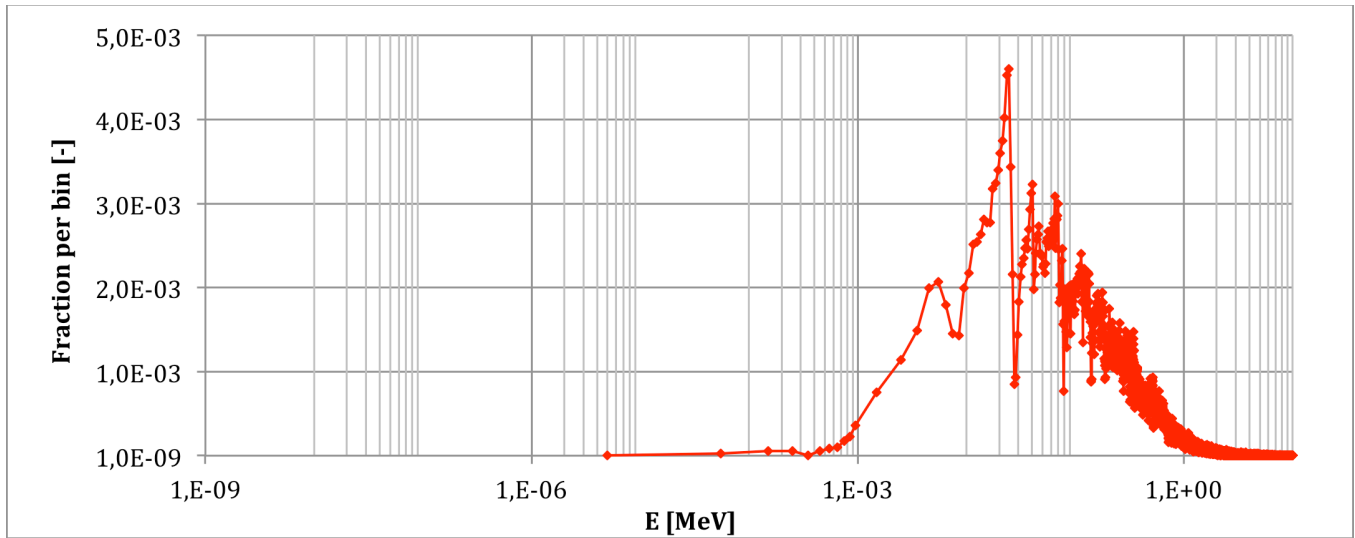


Fig. 5 - Normalized neutron spectrum in Demo, near to the core center. The wells into the spectrum are due to the radiative capture by coolant and structural materials.

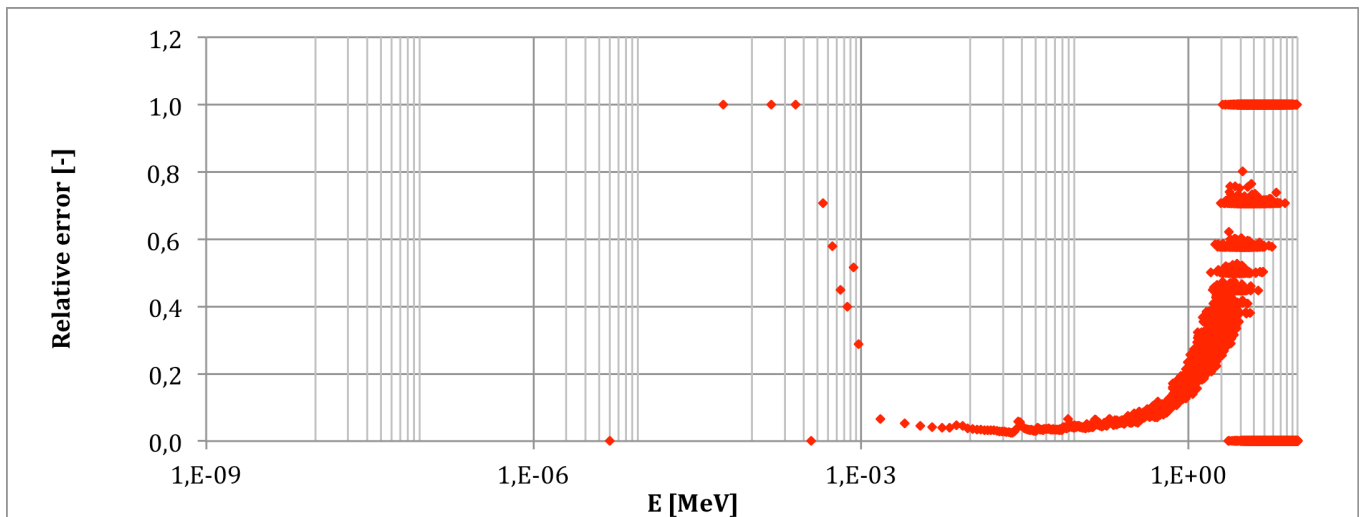


Fig. 6 - Relative error per bin corresponding to the Demo spectrum tally. The region of interest [1-500] keV presents errors $R < 0.2$ which are generally acceptable. The small dimensions in confront with Super-Phénix assure smaller relative errors.

At a first glance, the Demo spectrum appears harder than the Super-Phénix one; indeed, its average energy lies around 237 keV while the peak slips to right.

The simulation presents lower relative errors in confront with SPX (cfr. Fig. 6): no more cycles or nonanalog techniques are request as improvement.

NEUTRON INSTRUMENTATION PERFORMANCES

Fission counters are foreseen to be the best option for fast reactor applications because of the in-core harsh thermo-hydraulic conditions (400-500 °C with a few bar flowing metal coolant). It is because of the fission reaction high Q-value which makes fission products very energetics, causing a lot of

ion pairs (electric useful signal) without the need of an applied electric field so high to drive charges (usually 100-300 V are required vs. 1000-2000 V for other gas detectors).

The choice for the fission chamber type to test into the previous reactor spectra has been made due to available design data. It is known that fission chambers used into the Super-Phénix project have been manufactured by the PHOTONIS under the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) supervision [16]. No geometrical detailed data are available.

The counter implemented into the simulation is the medium-size multiple-plate fission chamber B165 by Atomic Energy Research Establishment (AERE) whose geometrical data have been taken from reference [17].

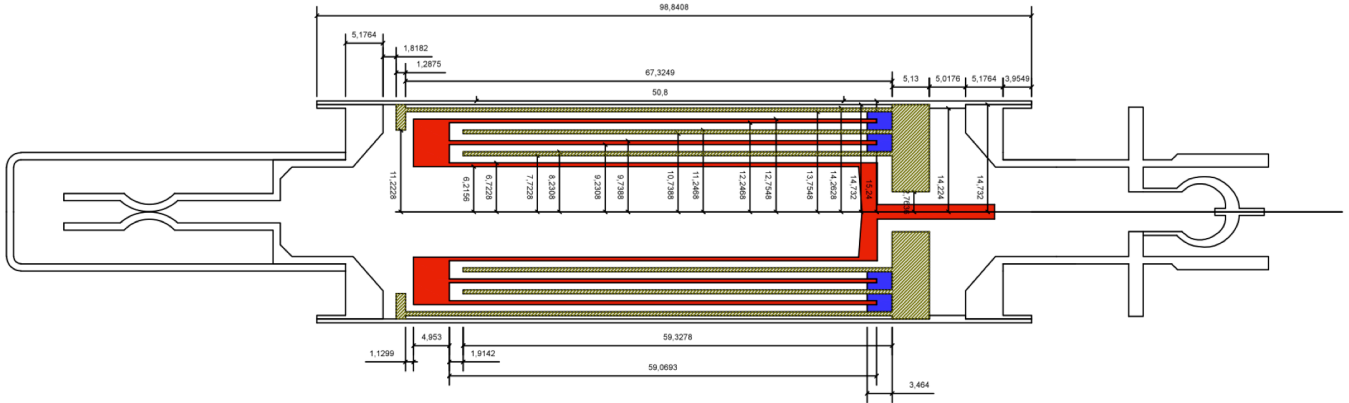


Fig. 7 - Multiple-plate coaxial-cylinders fission chamber B165 by AERE: the anode in red, the cathode in brown stripes, the alumina insulator in blue. All dimensions are in [mm].

The Fig. 7 shows the B165 cross-section: the counter is 30.48 mm OD and about 150 mm tall; electrodes and external shroud are 0.508 mm thick; the spacing between them results in 0.1 mm. The total cathode coated area is 165 cm² distributed on 5 different surfaces in front of the anode. About materials, it has been chosen to refer to selections by Photonis for fission chambers used into Super-Phénix: the simulated coating is a 3.8 mg/cm² pure ²³⁵U layer; the filling gas mixture is argon +4% N₂ at 4 bar; wall and electrodes are made of Inconel 600, such as extracted from the Photonis CFUC06 fission counter technical specifications [18].

Compared with the scheme previously shown, the B165 design implemented into the MCNPX code has been slightly geometrically simplified on the end caps, as shown in Fig. 8. Performances are rated in terms of “*fission efficiency*”: in other word,

$$\varepsilon_{fission} = \frac{\text{entering neutrons causing fission}}{\text{overall entering neutrons}} = \frac{\int_E \varphi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot N \cdot V dE}{S \int_E \varphi'(E) dE} [=] \left[\frac{\text{fission/s}}{\text{n/s}} \right]$$

where

- $\varphi(E)$ is the energy neutron flux entering the coating;
- σ_f is the microscopic fission cross-section of the coating;
- N is the atomic density of the coating;
- V is the volume of the coating;
- S is the detector external surface;
- $\varphi'(E)$ is the energy neutron flux entering the detector.

The fission rate into the coating material is proportional to the output detector signal (pulses or current), but fission events that really contribute to the electric signal creation are less than the overall occurred into the fissile layer. This is due to the fission products range because not all of them succeed to exit

the coating and enter the gas, contributing to ion-pairs production and, ultimately, to the signal. Thus, all performances rated afterward are overestimated, because they are scored in terms of fission events into the detector.

Before the evaluations of the B165 performances in SFR and LFR environments, a ‘thermal test’ has been implemented: in other word, the chamber has been exposed to monoenergetic 0.025 eV neutrons.

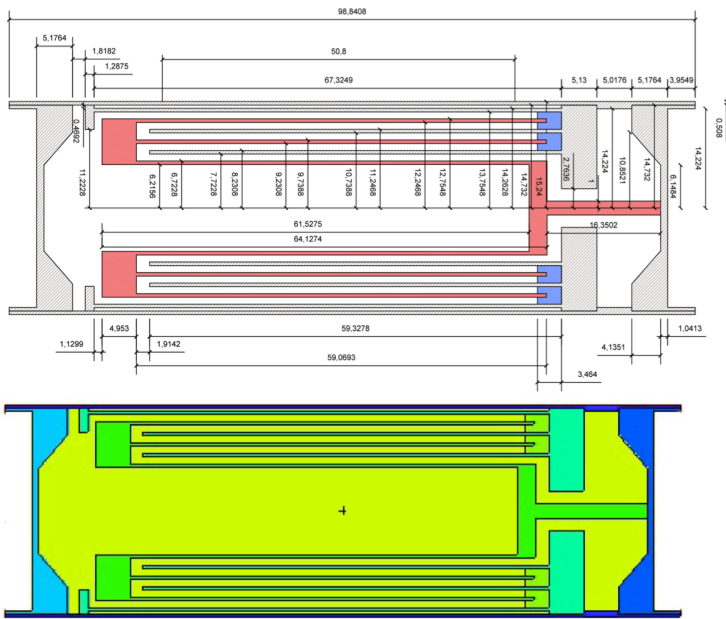
The simulation has been set as following: with the help of a dummy run, a constant C has been evaluated for making the term $S \int_E \varphi'(E) dE$ equal to 1; a f4 tally (imposed on the fissile coating cell, and multiplied by C , the fission neutron cross-section and the atomic density) evaluated the term $\int_E \varphi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot N \cdot V dE = 0.669713$ fission/cm³; multiplying by the volume of the coating $V=0.0329993$ [cm³], the final result is

$$\varepsilon_{fission_TH} = \frac{\int_E \varphi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot N \cdot V dE}{S \int_E \varphi'(E) dE} = 2.21\%$$

The value agrees with the generally adopted values for fission chamber efficiency (which ranges into 0.5-1%) [19]: this is an overestimate because, as mentioned before, the simulation counts the total fission reaction into the coating, not the particles generating the electric useful signal.

PERFORMANCES INTO THE SUPER- PHÉNIX SPECTRUM

The simulation consisted in flooding the detector external surface with a lot of neutron (nps=10000000), making the term $S \int_E \varphi'(E) dE$ equal to 1 into the efficiency equation. Their energies (provided into the source definition, ‘sdef’ card) have been taken from the neutron spectrum calculated above. The same tally structure used into the previous ‘thermal test’ gives



B165 coating specifications	
Coated surface [cm ²]	165
Coated length [mm]	50.8
Coating thickness [μm]	2
Coating volume [cm ³]	0.033
Coating mass [mg]	0.627
²³⁵ U density [g/cm ³]	19.0
Atomic density [atoms/cm ³]	1.61E+21

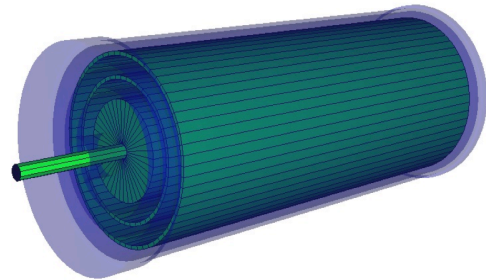


Fig. 8 - Model of the B165 fission counter implemented into the MCNPX code. Referring to the original design, the end caps have been simplified.

$\int_E \varphi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot N \cdot V dE = 0.00226706$ fission/cm³; multiplying by the volume of the coating, $V=0.0329993$ [cm³] the final result is

$$\varepsilon_{\text{fission_SFR}} = \frac{\int_E \varphi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot N \cdot V dE}{S \int_E \varphi'(E) dE} = 0.0075\%$$

As expected, the spectrum hardening compared with thermal neutron-energies leads to an efficiency drop of two magnitudes because of the shape of the fission cross-section.

PERFORMANCES INTO THE DEMO SPECTRUM

The simulation consisted in flooding the detector external surface with a lot of neutrons ($nps=10000000$) and setting $S \int_E \varphi'(E) dE = 1$. The neutron energies (provided into the source

definition, 'sdef' card) have been taken from the neutron spectrum calculated above. The same tally structure used into the previous 'thermal test' gives

$\int_E \varphi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot N \cdot V dE = 0.00224502$ fission/cm³; multiplying by the volume of the coating $V=0.0329993$ [cm³], the final result is

$$\varepsilon_{\text{fission_LFR}} = \frac{\int_E \varphi(E) \cdot \sigma_f(E) \cdot N \cdot V dE}{S \int_E \varphi'(E) dE} = 0.0074\%$$

As expected, even for LFR an efficiency drop happens compared with thermal neutron energies.

CONCLUSIONS

Fission chamber performances into different environments			
	0.025 eV neutrons	SFR Super-Phénix	LFR Demo
B165: $\varepsilon_{\text{fission}}$	2.21%	0.0075%	0.0074%

Tab. 4 - Summary of the simulated B165 fission counter efficiencies.

The results shown in Tab.4 highlight that the spectrum hardening into LFR vs SFR slightly affects the fission chamber performances. This may be due to the ²³⁵U fission cross-section shape: in the region of interest [1-1000] keV, the resonances overlapping causes the fission microscopic cross-section to be barely constant and slowly decreasing from 4 to 1 barn.

However, it must be noted that the fission cross-section resonance peaks lie just below 2 keV, thus any change into the neutron spectrum low-energy tail may affect significantly the counter performances. The increasing of the low-energy tail may be due to different causes, such as fuel lattice variations,

different fuel element design from one reactor to another, the selected position for the detector, etc.

Therefore, in order to assess the sensitivity of a given detector in a given reactor position, the precise local spectrum is required, i.e. adopting an external-control strategy (positioning detectors all around the core, not into) changes performances significantly, because the spectrum undergoes gradual softening moving from the center to the edge of reactor vessel.

As summarized in Tab. 4, fission chamber efficiencies from thermal to fast neutron-energies differ of two magnitudes and over. The drop can be overtaken into FR because of the higher flux, generally 10^{15} - 10^{16} n/cm²s, compared with LWR applications (10^{14} n/cm²s), hence no problems in full-power reactor monitoring are foreseen.

The capability of the instrumentation for the monitoring of the FRs zero-power condition and during the rising to the full-power condition still needs to be assessed. Poor detector efficiency combined with low values for the neutron flux may cause a blind window where fission chamber's electrical signals can be undetectable from the background. Future work will be focused on the improvement of fission detector efficiencies in order to fill the gap.

NOMENCLATURE

symbol	description	units
$\varphi(E)$	energy neutron flux	[n/cm ² s]
$\varphi'(E)$	energy neutron flux	[n/cm ² s]
σ_f	microscopic fission cross-section	[barn]
N	atomic density	[atoms/cm ³]
V	volume	[cm ³]
E	energy	[eV]
S	surface	[cm ²]
ε	efficiency	[-]

REFERENCES

- [1] Exxon Mobil, *The Outlook for Energy: a view to 2040*, 2014
- [2] University of Chicago, *The economic future of Nuclear Power*, 2004
- [3] Generation IV International Forum, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, GIF 002-00, 2002
- [4] M. Salvatores, G. Palmiotti, *Radioactive waste partitioning and transmutation within advanced fuel cycles: achievements and challenges*, Progress in Particle and Nuclear Physics, January 2011
- [5] IAEA, *Status of Fast Reactor Research and technology development*, TECDOC-1691, Vienna, 2012
- [6] Technical University of Monaco, Garching bei München (TUM), *Lead-Cooled Fast Reactor*, Monaco, 2011.
- [7] A. Alemberti, *The ALFRED project on Lead-cooled Fast Reactor*, ESNII Conference 'Advanced fission research in Horizon 2020', Brussels, 2012

[8] IAEA, *Power Reactors and sub-critical blanket systems with lead and lead-bismuth as coolant and/or target material*, TECDOC-1348, Vienna, 2003

[9] Alan E. Waltar, Donald R. Todd, Pavel V. Tsvetkov, *Fast Spectrum Reactors*, 2011

[10] IAEA, *Fast Reactor Database: 2006 Update*, TECDOC-1531, Vienna, 2006

[11] S. Bortot, P.C. Camprini, G. Grasso, C. Artioli, *Conceptual core design stud for a high flux LFR demonstrator*, Progress in Nuclear Energy, January 2012

[12] IAEA, *Liquid Metal Cooled Reactors: Experience in Design and Operation*, TECDOC-1569, Vienna, 2007

[13] C.P. Tzanos, J.J. Sienicki, A. Moiseyev, C.F. Smith, M. de Caro, W.G. Halsey, N. Li, P. Hosemann, J. Zhang, A. Bolind, *Interim Status Report on Lead-Cooled Fast Reactor Research and Development*, ANL-GENIV-101, ANL, 2008

[14] D.B. Pelowitz (Ed.), MCNPX™ User's Manual Version 2.7.0, LA-CP-11-00438, Los Alamos, 2011

[15] DESKTOP IDEACENTRE K430, *Data sheet*, www.lenovo.com

[16] J.P. Trapp, S. Hann, L. Martin, J.L. Perrin, M. Tixier, *High temperature fission chamber: state-of-the-art*, Proceedings of the Specialist's Meeting 'In-core instrumentation and core assessment', Mito-shy, 1996.

[17] W. Abson, P.G. Salmon, S. Pyrah, *The design, performance and use of fission counters*, Proceedings of the IEE – Part B: Radio and Electronic Engineering, Vol. 105, 1958

[18] Photonis, *Neutron and gamma detectors*, Technical Specifications

[19] N. Ensslin, S. Kreiner, D. Reilly, H. Smith, *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials – Chapter 13 'Neutron Detectors'*, NUREG/CR-5550, LLNL, 1991

**C.2 *EVALUATION OF THE CURRENT FAST NEUTRON
FLUX MONITORING INSTRUMENTATION APPLIED
TO LFR DEMONSTRATOR ALFRED:
CAPABILITIES AND LIMITATIONS***

**EVALUATION OF THE CURRENT FAST NEUTRON FLUX MONITORING
INSTRUMENTATION APPLIED TO LFR DEMONSTRATOR ALFRED:
CAPABILITIES AND LIMITATIONS**

Luigi Lepore
SAPIENZA, University of Rome
SBAI Department
Via Antonio Scarpa, 14 - 00161
Rome – Italy
luigi.lepore@uniroma1.it

Romolo Remetti
SAPIENZA, University of Rome
SBAI Department
Via Antonio Scarpa, 14 - 00161
Rome – Italy
romolo.remetti@uniroma1.it

Mauro Cappelli
ENEA UTFISST-MEPING
Casaccia Research Center
Via Anguillarese, 301 - 00123
Rome – Italy
mauro.cappelli@enea.it

Keywords: LFR, fast neutron instrumentation, fission chambers, SPNDs.

ABSTRACT

Among Gen IV projects for future nuclear power plants, Lead Fast Reactors (LFR) seem to be a very interesting solution due to their benefits in terms of fuel cycle, coolant-safety and waste management. The novelty of the matter causes some open issues about coolant chemical aspect, structural aspects, monitoring instrumentation, etc. Particularly hard neutron flux spectra would make traditional neutron instrumentation unfit to all reactor conditions, i.e. source, intermediate, and power range.

Identification of new models of nuclear instrumentation specialized for LFR neutron flux monitoring asks for an accurate evaluation of the environment the sensor will work in. In this study, thermal-hydraulics and chemical conditions for LFR core environment will be assumed, as the neutron flux will be studied extensively by means of the Monte Carlo transport code MCNPX. The core coolant's high temperature drastically reduces the candidate instrumentation, because only some kind of fission chambers and Self Powered Neutron Detectors can be operated in such an environment.

This work aims to evaluate the capabilities of the available instrumentation (usually designed for Sodium Fast Reactors, SFRs) when exposed to the neutron spectrum derived from ALFRED, a pool-type small-power LFR project to demonstrate the feasibility of this technology into the European framework..

This paper shows that such instruments do follow the power evolution, but they are not completely suitable to detect the whole range of reactor power. Some improvements are then possible in order to increase the signal-to-noise ratio, by

optimizing each instrument in the range of reactor power, such to get the best solution.

Some new detector designs are here proposed, and the possibilities for prototyping and testing by means of a fast reactor investigated.

1. INTRODUCTION

Nowadays the Fast Reactor R&D domain has known important improvements, due mainly to the goals proposed by Gen IV International Forum (Generation IV International Forum, 2002)(Salvatores, et al., 2011).

Among the proposed solution, Lead-cooled Fast Reactors have recently gained a position despite the fact the main drawback about this coolant, i.e. its chemical compatibility with materials, has not yet been solved. Experimentations with Pb-coolant started in 60's in U.S. but they were abandoned soon. In parallel, Soviet Union developed some land prototypes oriented to conceive a small lead-cooled fast reactor for marine propulsion. The Soviet experience was successful compared to the Americans': the last LFR propelled submarine was dismissed in 1996, after few tens of proper duty. However, both countries acknowledged the corrosion processes and chemical compatibility with materials as the main limitation for this technology.

Today R&D in material science made the lead-coolant attractive once again for critical (power reactor) and sub-critical applications (ADS, Accelerator Driven System), due to some advantages on safety, if compared with sodium. As a

consequence in the last decade, lead applications for fast reactor experienced a boost.

Inside the European Framework, ongoing LFR projects are MYRRHA and ALFRED, the first a sub-critical demonstrator for ADS-type plant (whose operability will confirm the possibility to close the uranium fuel cycle by means of burning all the long-lived actinides), the second being a medium-power demonstrator reactor for electricity production (SCK-CEN)(Alemberti, 2012).

Considering that the SFR technology can count on decades of reactor-years operation, LFR technology appears today not much investigated as it would deserve.

On the basis of a previous work presented by the authors in (Lepore, et al., 2014), this paper here focuses on I&C issues about the Demonstrator ALFRED, aiming at showing that the reference neutron instrumentation currently available for SFR may be not completely suitable when transferred to LFR.

2. METHODOLOGY

Choosing the best detector for monitoring a certain physical quantity requires the determination of the environment conditions to be monitored, because some external constraints can limit the sensor functioning or its applicability. Moreover, after the verification of the sensor usability, its performances must be verified as well: unexpected variation can be produced by external conditions different from standard/reference point, e.g. a pressure sensor output can be affected by the temperature of the environment it is installed in.

Neutron-flux monitoring instrumentation performances are usually tested in factory by means of thermal neutron while fast response is never evaluated. This is due to the fact that in Light Water Reactor –the most widespread type of reactor in the world– sensors monitor most of all thermal neutrons in every position they are placed, because the variation of sensor positioning significantly affects the magnitude of the neutron flux, but does not the energy distribution of neutrons.

Fast Reactors behave quite differently. The energy spectrum of neutrons significantly varies its averaged energy moving from the center to the edge of the core. This means that the detector sensitivity varies substantially with positioning because the spectrum-averaged cross-section of the reaction it uses for counting neutrons is no more constant. In other words, detector performances into a fast reactor environment are practically unknown, because different neutron energy spectra lead to detecting capability strongly related to the positioning.

The selection of the correct LFR instrumentation for neutron-flux monitoring requires: 1) the identification of sensors robust enough to resist the reactor core thermal-hydraulic conditions, 2) the ‘actualization’ of their performances to the particular LFR neutron environment.

The so-called ‘actualization’ has been here realized by means of Monte Carlo calculation by MCNPX, with the mathematical procedure shown below.

A neutron detector response, R (cps or current), is proportional to the cross-section of the used reaction ‘ i ’ weighted by the energy spectrum of neutrons that hit the sensor [1]. The more the cross-section varies with the energy, the more the detector sensitivity can change significantly with the spectrum variation. Referring to equation [1], the local value $\bar{\sigma}_i(\vec{r})$ provides information about detector sensitivity in position \vec{r} while its multiplication by local flux $\varphi(E, \vec{r})$ gives the local response $R(\vec{r})$ of the instrument.

$$R(\vec{r}) \propto \int \sigma_i(E) \varphi(E, \vec{r}) dE = \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \int \varphi(E, \vec{r}) dE \quad [1]$$

$$R_{fast}(\vec{r}) \propto \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast} \int p(\vec{r}) \psi(E) \Big|_{fast} dE \quad [2]$$

$$R_{thermal}(\vec{r}) \propto \bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{thermal} \int p(\vec{r}) \psi(E) \Big|_{thermal} dE$$

$$ESCF(\vec{r}) = \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast}}{\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{thermal}} \equiv \frac{\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast}}{\bar{\sigma}_i \Big|_{thermal}} \quad [3]$$

$$S(\vec{r}) \Big|_{fast} = ESCF(\vec{r}) \cdot S \Big|_{thermal} \quad [4]$$

MCNPX can easily calculate $\bar{\sigma}_i(\vec{r})$ values into [1].

Varying the shape factor $\psi(E)$ of the neutron flux $\varphi(E, \vec{r}) = p(\vec{r}) \psi(E)$, e.g. once with fast neutron flux, once with thermal neutron flux, it is possible to calculate the theoretical fast and thermal responses respectively.

Focusing on energy-averaged cross sections $\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast}$ and $\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{thermal}$ it is possible to calculate the Energy Spectrum Correction Factor $ESCF(\vec{r})$ [3], which is useful for actualizing the performances given by the technical specifications of detector (rated by thermal neutrons) to the current application. Because $\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{thermal}$ refers to the factory instrument-testing with thermal neutron, it does not depend on reactor position \vec{r} ; therefore, we can indicate it as $\bar{\sigma}_i \Big|_{thermal}$. This value has been calculated with a single MCNPX run with the Maxwell-Boltzmann energy spectrum corresponding to $T=293$ K.

For the fast neutron spectrum, multiple calculations of $\bar{\sigma}_i(\vec{r}) \Big|_{fast}$ have been conducted for each reactor position suitable for installing the detector. So, a set of $ESCF(\vec{r})$ corrections has been evaluated for each studied location [3]. Then, the fast sensitivity of the instrument has been updated, retrieving $S(\vec{r}) \Big|_{fast}$ values related to reactor position \vec{r} [4].

Section §5 shows the results of the methodology applied to ALFRED.

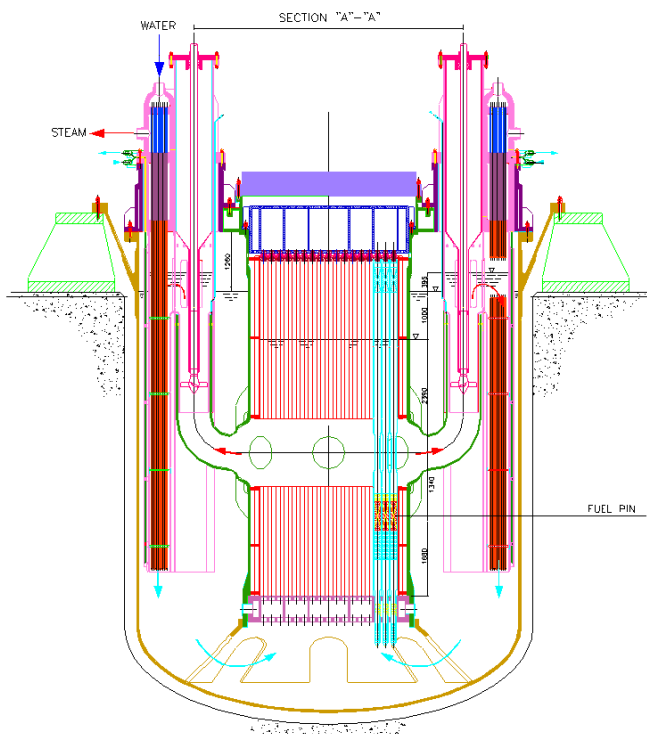


Figure 1 - ALFRED vertical cross-section.

3. REFERENCE LFR REACTOR

The LFR Demonstrator called ALFRED has been proposed in the context of the LEADER Project (2010-2013). Its goal is to demonstrate the feasibility of LFR power reactors, in order to acquire experience for future larger plants like ELFR, European Lead Fast Reactor.

ALFRED (Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator) is a 300 MW_{th} pool-type fast reactor cooled by pure lead, fueled with uranium and plutonium mixed oxides, operating around core temperatures of 500 °C. The core is composed of 171 Fuel Assemblies (FAs) with two fuel zone enriched differently, 12 Control Rods (CRs) and 4 Safety Rods (SRs), 108 reflector elements in the dummy belt.

The CRs' shutdown system is based on buoyancy effect with rods inserting from the bottom of the core; SRs' shutdown system's rods pneumatically penetrate the core from the top.

The secondary circuit operates with water/superheated steam at 18 MPa, removing heat from the reactor pool by means of 8 bayonet-tube Steam Generators (SGs) immersed into the lead coolant. Two independent totally passive Decay Heat Removal (DHR) systems connect directly to the 8 principal SGs in order to remove residual decay heat after the loss of the primary heat removal by secondary circuit.

All structures are conceived for being easy disassembled, speeding up inspections and maintenance.

Lead aggressiveness and erosion phenomena are dominated by fine controlling of coolant chemicals and flow

velocity. The best materials to be employed seem to be austenitic low-carbon steels (e.g. AISI 216 L), ferritic-martensitic steels (e.g. T91) and titanium steels. Moreover, protective coatings can be applied to those materials, increasing their robustness. Because of lead high melting-point (327.4 °C) the coolant 'cold' temperature must be at least 400 °C in order to prevent local freezing. Coolant is not pressurized because core voiding risk is very low (the partial pressure at 400 °C is 2.8E-5 Pa while boiling point at 0.1 MPa is 1745 °C); only few bars of inert gas are foreseen (in order to reduce the contact with the air and the oxygen concentration in coolant: this limits the corrosion processes).

More constructive details about the reactor can be found in (Alemberti, 2013).

4. AVAILABLE NEUTRON INSTRUMENTATION FOR HIGH TEMPERATURE ENVIRONMENT

Little cores in dimensions (like ALFRED) usually uses out-of-core neutron detectors as control instrumentation, because cores result strongly coupled; in-core monitoring may be useful for providing data about power (and flux) spatial distribution, in order to optimize the fuel cycle.

This work focuses on both categories: some miniaturized sensors designed for being installed into fuel-pin lattice are analyzed along normal-sized detectors for dedicated installation all around the core. Only prompt detectors are taken into account, while instrumentation usable for flux-shape analysis has been evaluated but not analyzed in detector-response study in §5.

The main drawback for instrumentation to be put into the reactor environment is the temperature limiting the applicable technologies for measuring the neutron flux to some kinds of Fission Chambers (FCs) and Self Powered Neutron Detectors (SPNDs) only.

A fission chamber behaves as an electrical condenser: an electrode (usually the cathode) is coated with a thin layer of fissile deposit; when neutrons induce fission events, one of the fission fragment enters the inert gas causing multiple ionization events, it is the starting point of the whole charge creation process. The collection of the electron to the anode originates the electric signal which can be measured.

SPNDs must be divided into two categories: beta-decay-based SPNDs and prompt-gamma-based SPNDs. For the first category, the absorbed neutron produces a nuclide which emits an electron in decaying; this electron has energy enough to overcome the insulating material between the emitter and the collector electrode: the collection of the beta particles produces the voltage pulse. It is clear that magnitude and collection time of the pulse/current value retrievable is related to the decay constant of the particular nuclide used: beta-decay-based SPNDs give only delayed responses. Vanadium and rhodium SPNDs belong to this family.

Supplier	Product Code	Thermal neutron sensitivity			Diameter [mm]	Length [mm]
		Pulse [cps/nv]	MSV [A^2Hz^{-1}/nv]	Current [A/nv]		
Photonis	CFUC06	1	$4 \cdot 10^{-26}$	$2 \cdot 10^{-13}$	48	412
Photonis	CFUE32	0,001	$4 \cdot 10^{-29}$	$1 \cdot 10^{-16}$	7	150
Photonis	CFUE43	-	$3 \cdot 10^{-31}$	$7 \cdot 10^{-17}$	7	85,5

Table 1 - Reference data of the current available Fission Chambers (Photonis)(Photonis) suitable for Demonstrator ALFRED.

Supplier	Product Code	Thermal neutron sensitivity	Emitter dimensions [mm]	Overall dimensions [mm]	Thermal burn-up [%/month/nv]
		Current [A/nv]			
KWD Instruments	5503-V-100	$5,1 \cdot 10^{-21}$	D=2; L=100	D=3,5	$1,2 \cdot 10^{-15}$
KWD Instruments	5503-Rh-50	$8,7 \cdot 10^{-21}$	D=0,7; L=50	D=2,5	$3,9 \cdot 10^{-14}$
KWD Instruments	5503-Co-210	$5,4 \cdot 10^{-21}$	D=2; L=210	D=3,7	$1,0 \cdot 10^{-14}$
ARi Industries	V-type	$1,54 \cdot 10^{-21}$	D=0,5; L=200	D=1,5	$1,3 \cdot 10^{-15}$
ARi Industries	Rh-type	$2,4 \cdot 10^{-20}$	D=0,5; L=200	D=1,5	$2,3 \cdot 10^{-14}$
ARi Industries	Co-type	$3,2 \cdot 10^{-22}$	D=0,5; L=200	D=1,5	$1,0 \cdot 10^{-14}$

Table 2 - Reference data of the current available Self Powered Neutron Detectors (ARi Industries)(KWD Nuclear Instruments) suitable for Demonstrator ALFRED.

Gamma-based SPNDs use prompt-gamma ray de-excitation after the neutron capture by a certain atom. The gamma ray (practically concomitant with the capture event) may interact with insulator and collector materials by photoelectric effect, Compton effect, pair production events producing collectable electrons, usable for generating a current from the instrument. Cobalt and hafnium SPNDs belong to this category. The response readiness of the electric signal makes such detectors suitable for controlling purposes.

FCs must be supplied with few hundred volts, while SPNDs do not need supply voltage, making power and signal drive-lines in-and-out of the reactor vessel quite simple in comparison with detectors that need some thousand volts to work (e.g. BF_3 or boron lined proportional counters).

In order to improve chemical robustness against the coolant, detectors could be coated with protective layer for direct-installing into lead. However, the best solution seems to be the employ of instrumentation guide tubes in order to protect detectors from direct contact with the coolant, making the handling/replacing/substitution easier as well as their disposal at the end-of-life. The inert gas pressurization of lead is not important to selection of detectors. Table 1 and Table 2 report the neutron instrumentation currently available for SFR which could suit the monitoring needs for ALFRED.

Nuclear neutron flux monitoring instrumentation is usually operated in three different modes, namely *Pulse* mode, *Mean Square Voltage* (MSV) mode and *Current* mode.

The pulse mode can be used with flux magnitudes up to 10^6 n/(cm²s) which corresponds often to zero-power condition (or source range). The neutron-counting needs to cut the pulses caused by background gammas, therefore detector using high Q-value neutron-sensitive reaction are preferred.

With neutron flux from 10^6 n/(cm²s) to 10^{12} n/(cm²s), the power is into the intermediate range and MSV mode is operated: the discrimination of gammas background is based on quite different charge releasing and rising time between electric signal produced by gammas and neutrons. This mode can be used when the reaction for detecting neutron does not use gammas as the primary radiation to produce electric signal into the detector (e.g. prompt-SPND cannot be operated in such a way).

From 10^{12} n/(cm²s) up to 10^{16} n/(cm²s), which is the reactor power range, the current mode is applied: the detector behaves as a current-mode ion chamber, where a current constant signal is retrieved (this method works when gamma background is negligible because gammas are no way observable from neutrons).

In ALFRED, the installation of detectors in proximity of the core causes the neutron flux to be so high that detectors must be operated directly in MSV (if possible) and current mode, according to the power level. As a consequence, the study in §5 will show sensitivity and detector response concerning such modes.

5. APPLICATION OF THE METHODOLOGY TO ALFRED

The methodology described in §2 has been applied to the ALFRED reactor, evaluating the capability of the selected instrumentation in neutron flux monitoring.

The study has shown that power monitoring needs most of all MSV and Current Modes for detector operation: on this basis, only those results will be reported.

instrumentation sensitivity and response have been actualized to some reactor positions suitable for installing the

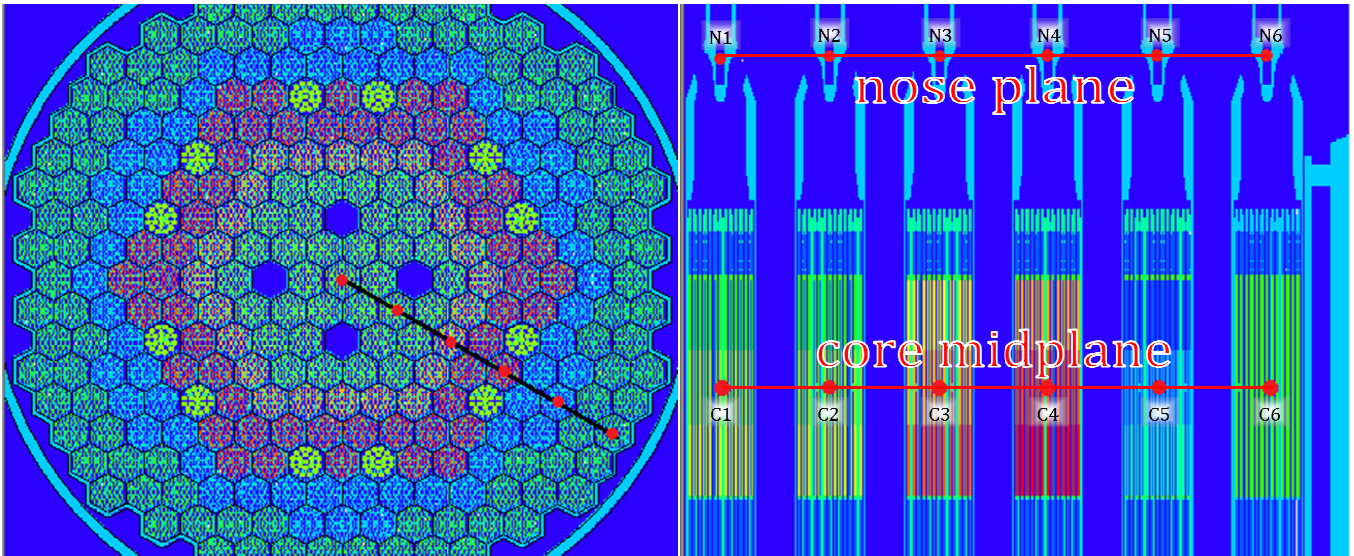


Figure 2 - plane (left) and points investigated for calculating detectors' fast sensitivities and responses (right).

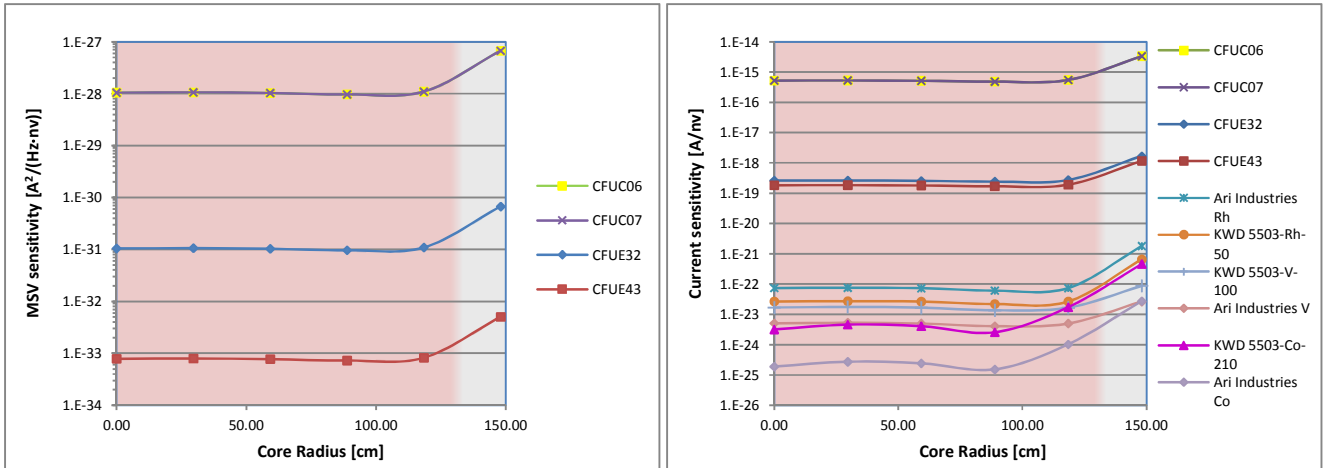


Figure 3 - MSV and Current fast sensitivities for studied detectors on ALFRED Demonstrator core mid-plane. Color shade means where the point belongs: dots on red background are in-core; dots on gray background are in-reflector. The radial points positioning is shown in Figure 2.

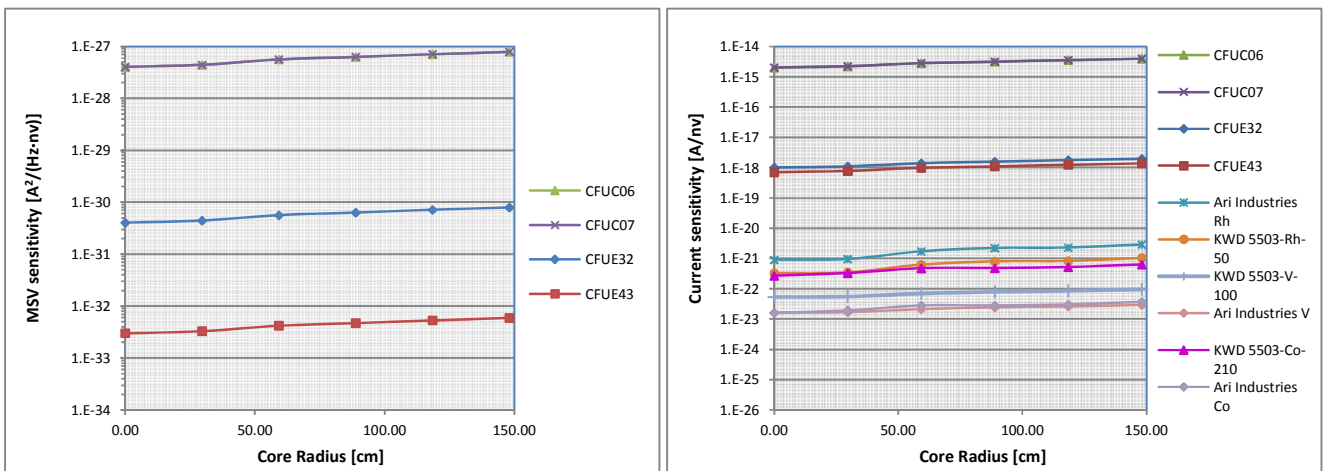


Figure 4 - MSV and Current fast sensitivities for studied detectors on ALFRED Demonstrator nose plane. Gray background means that all points are out-of-core. The radial points positioning is shown in Figure 2.

detectors: two planes have been taken as reference, named “core mid-plane” and “nose-plane”, each one provided with six tally point for energy-averaged cross-section and neutron flux calculation (Figure 2).

Figure 3 and Figure 4 show significant variations in detector fast sensitivity $S(\vec{r})|_{fast}$ with position \vec{r} : each detector experiences improvements in sensitivity for out-of-core installation due to the reduction of the averaged-energy of neutron spectra and cross-sections’ shapes which generally increase when energy reduces.

Unfortunately, moving from the center of the core through the edges, the flux magnitude $p(\vec{r})$ decreases stronger than those sensitivity gains; therefore detector responses globally reduce moving away from the core center.

Figures 5 to 8 report main results obtained for Photonics fission chambers CFUE32, CFUE43, CFUC06 and KWD SPND 5503-Co-210 responses vs. positioning (as function of power), where each graph shows the applicability window of the instrument between two red lines.

Figure 5 shows that the CFUE32 detector presents the best response in ALFRED environment, being capable in following the neutron flux evolution from zero-power till the full power, both for in-core and out-of-core installation on core mid-plane and nose-plane. The main drawback is the durability of the instrument (Figure 6) because full power makes the detector out-of-service in about six months, even if installed out-of-core. It means that this fission chamber is not suitable for monitoring full power; it is sensitive enough to monitor successfully the zero-power and the rising toward full power, keeping the detector workability for some years.

CFUE43 is less sensitive if compared with CFUE32; therefore it has a good behavior starting from 300 kW up to full power. The durability issue is the same of the CFUE32 even with reduced sensitivity, because maximum burn-up is achieved when 1% loss in sensitivity is reached, according to supplier datasheet. For the sake of brevity, CFUE43 graphs are omitted.

CFUC06 appears to be too sensitive for the installation in core proximity, because retrieved signals are too strong. This instrument can correctly monitor the low power range only. For the sake of brevity, CFUC06 graphs are omitted as well.

Fission chambers appear to be not suitable for monitoring reactor nominal power: they can only follow the lower decades of reactor power.

As SPNDs are concerned the KWD 5503-Co-210 response (Figure 7) shows that this instrument can be operated only at nominal power, when neutron population is high enough to let the response entering into the operability window of the detector. In comparison with fission chambers, SPNDs have an intrinsically lower sensitivity which makes them usable only into the power range; moreover, they are particularly suitable for in-core installation because of their robustness and durability (Figure 8): at maximum power, the burn-up rate is about 1 % per year of full-power. It must be also noted, that the studied instrument has a very little quantity of sensitive

material: larger volume of emitter can be introduced into the sensor if more sensitivity is needed. These properties make prompt-SPND very promising as core instrumentation for neutron flux control purposes.

6. PROPOSAL FOR NEW DETECTOR DESIGNS FOR CUSTOMIZED APPLICATION IN LFR

This work shows that fission chambers are sensitive enough to follow the start-up and the intermediate range of the reactor power properly, keeping detector workability for some years or more. Variations of FC sensitivity cannot resolve the durability issue of these instruments which no way can be used for continuous monitoring of the power range in core proximity.

FCs can be optimized in design and operation for low/intermediate power monitoring, customizing sensitivity and signal-to-noise ration decade per decade, by controlling some important parameters of the instrument. One of the main drawbacks is the increasing leakage current coming through the insulator material when the temperature rises; using artificial diamond can ensure better electrical resistivity in comparison with the commonly used alumina. Fissile consumption and fission product build-up are two detrimental effects which increase with neutron fluence of the instrument. The first effect can be compensated with a self-breeding FC where burned fissile atoms can be replaced with fissile production by neutron capture on fertile material. Fission product build-up can only increase with fluence: a perspective could be the washing of the inert gas into the instrument by means of a venting channel in order to mitigate the negative effects of the radioactive fission fragments. Moreover, a venting channel could be useful for changing the working gas pressure of the detector, optimizing this value according to the specific needs of the operated mode (Pulse, MSV or Current).

Different possibilities are envisaged for a new layout of fission chambers, even if this customization may be not so necessary as for instrumentation for full power monitoring.

Self Powered Neutron Detectors can be used successfully to overcome fission chambers’ drawbacks in full power monitoring: they are simple, sensitive enough to detect neutron fluxes in power range and robust enough to last few years in reactor full power conditions. Therefore, prompt-SPNDs can have a key role into LFR core neutron flux monitoring and control.

Usually SPNDs are used for in-core monitoring purposes in order to retrieve neutron-flux shape information both axially and radially; such an information is not relevant to reactor safety, therefore delayed responses by the instruments are accepted (this is the field of application of rhodium and vanadium SPNDs, the most used). Prompt-SPND like cobalt-SPNDs are not so used: hence, their evolution experiences a steady-state.

Hereafter, new perspectives for cobalt-SPND are proposed, in order to customize this kind of detector for the LFR

environment. As shown above, the studied cobalt-SPND succeeds in full power continuous monitoring, but stronger response by the instrument could be more reliable and easy to

retrieve. This goal is reachable by adding sensitive material to the instrument because the electric signal strength depends on the number of capture reaction only; alternatively, some

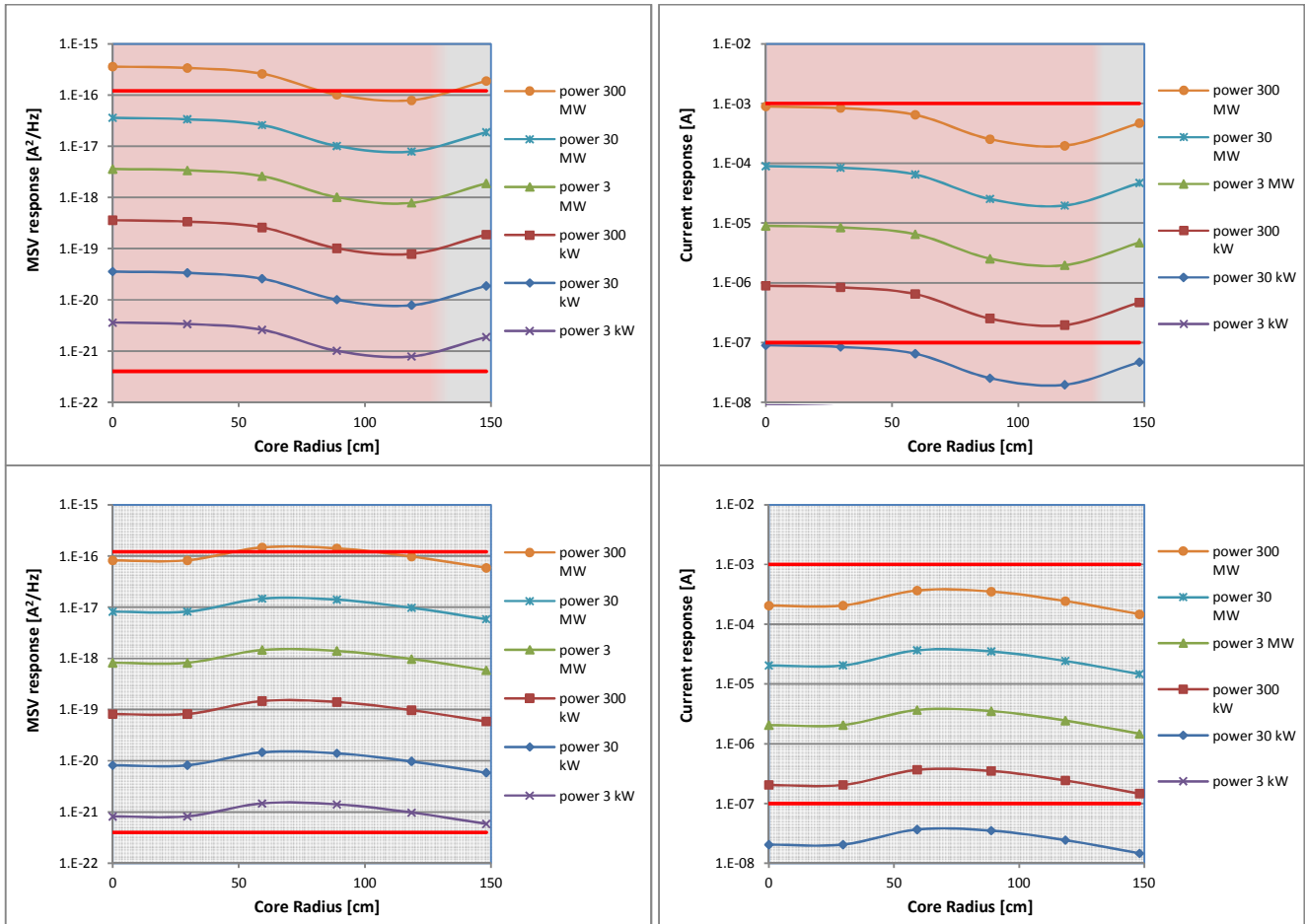


Figure 5 - Photonis CFUE32 responses in MSV and Current modes on core mid-plane (up) and nose mid-plane (down) versus power. The radial points positioning is shown in Figure 2. Red lines represent the limits between which the instrument is usable.

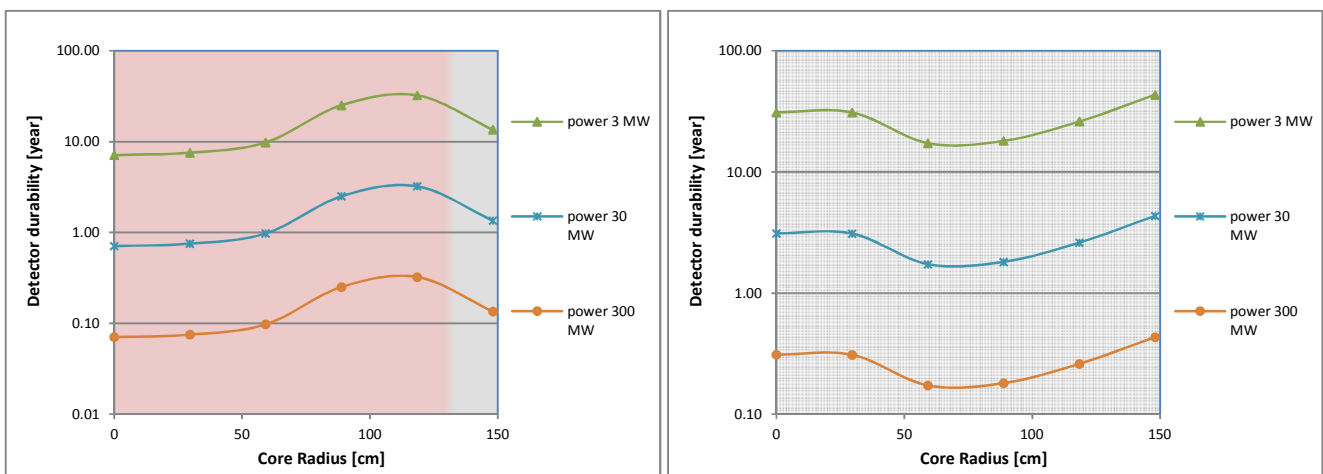


Figure 6 - Photonis CFUE32 durability on core mid-plane (left) and nose mid-plane (right). The radial points positioning is shown in Figure 2. The end of life on the instrument by the supplier corresponds to 1% loss of sensitivity.

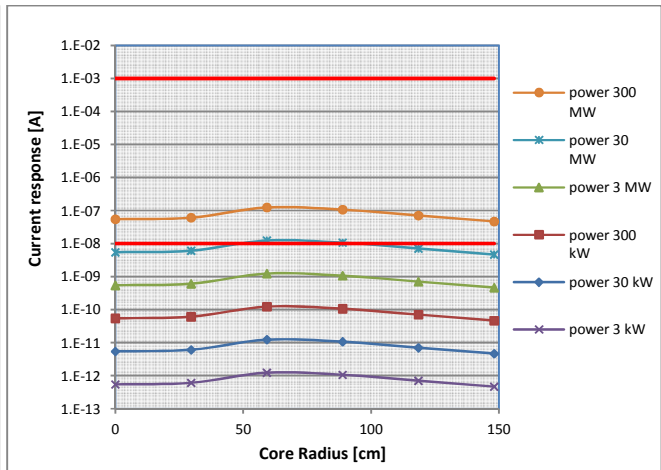
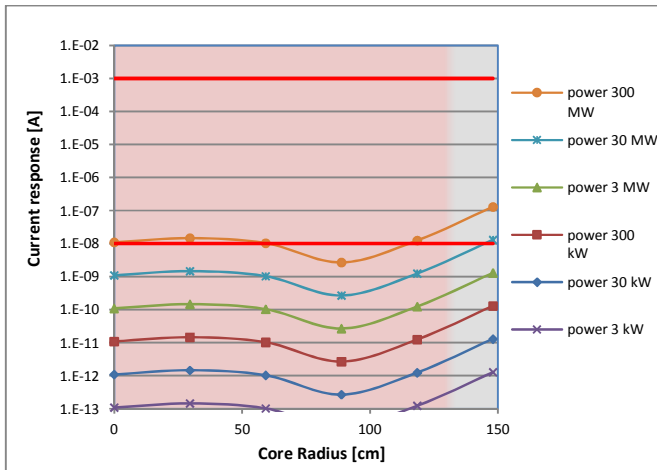


Figure 7 - KWD 5503-Co-210 responses in Current mode on core mid-plane (left) and nose mid-plane (right) versus power. The radial points positioning is shown in Figure 2. Red lines represent the limits between which the instrument is usable.

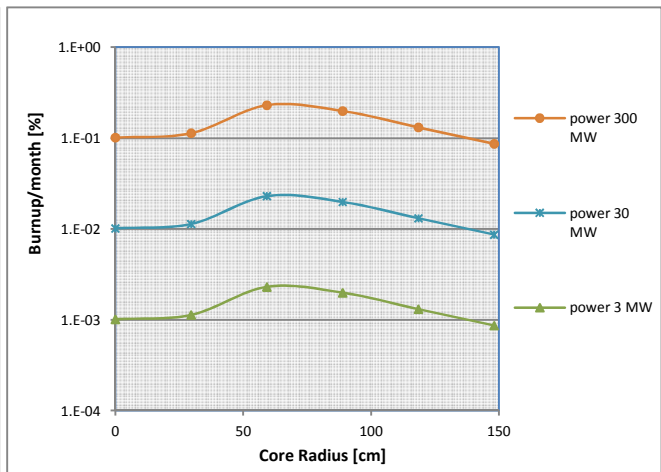
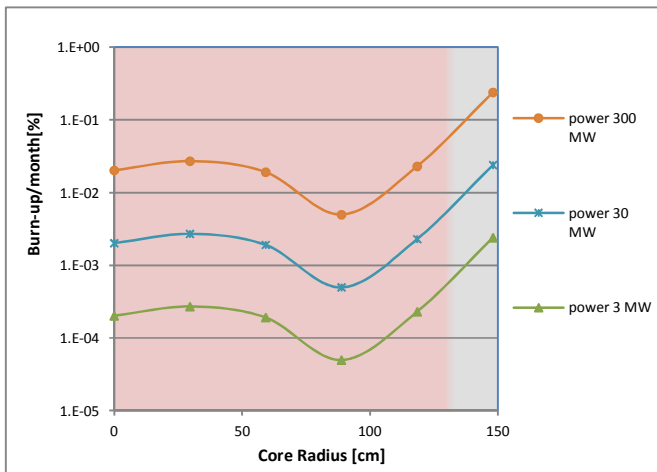


Figure 8 - KWD 5503-Co-210 Burn-up rate on core mid-plane (left) and nose mid-plane (right). The radial points positioning is shown in Figure 2. No data are available about maximum burn-up tolerated by this instrument.

instruments can be electrically put in parallel for collecting greater current in magnitude. An assembly design for SPNDs could be useful for driving activation probes also, in order to calibrate periodically the detector. Moreover, the assembly design could behave better in reliability analysis because it is more difficult that all parallel detectors fail simultaneously.

SPNDs are originally non radioactive, because they become radioactive only when exposed to a neutron flux. It means that detector construction is pretty easy because no radioactive manipulation is needed, as for fission chambers, which do imply the manipulation of alpha-emitters. This peculiarity makes SPNDs cheap and fast to be manufactured, allowing the installation of more sensors in a single batch and their substitution after irradiation not so expensive.

7. CONCLUSION AND FUTURE DEVELOPMENTS

The simulations conducted into this study show that the LFR Demonstrator ALFRED can be supplied with some kind of Fission Chamber and SPND currently available as control instrumentation, but those detectors are not completely suitable for this kind of reactor.

Improvements can be made in detector designs in order to customize sensitivities as requested by neutron monitoring needs of the peculiar reactor.

In particular, fission chambers seem to be the best solution for low power monitoring while SPND can be applied with high neutron flux only, i.e. in power range.

Fission Chambers has been experimented in SFR fluxes in the '70ies (Trapp, et al.) while prompt-SPNDs seem to have no concrete irradiation experience in such an environment.

Some significant improvements about cobalt-SPNDs will be studied in the future steps of this work. Future development will include the possibility to test a commercially available

detector in fast-fluxes similar to LFR environment by means of the ENEA TAPIRO Fast Reactor facility. The irradiation will be a preliminary step for the experimental verification of performances rated by MNCPX. Once the simulation procedure has been validated, the proposed modifications to the current detectors will be studied extensively and a custom-made cobalt-SPND can be prototyped.

NOMENCLATURE

Key	Description	Units
$R(\vec{r})$	local detector response	[A ² /Hz] or [A]
$\sigma_i(E)$	microscopic cross-section of reaction i used by detector	[barn]
$\bar{\sigma}_i(\vec{r})$	energy-averaged local cross-section of reaction i used by detector	[barn]
$\varphi(E, \vec{r})$	local neutron flux per unit energy	[n/(cm ² ·s·E)]
$p(\vec{r})$	neutron flux magnitude factor	[n/(cm ² ·s)]
$\psi(E)$	neutron flux energy spectrum shape factor	[1/E]
$ESCF(\vec{r})$	local Energy Spectrum Correction Factor	[-]
$S(\vec{r})$	local detector sensitivity	[A ² /(Hz·nv)] or [A/nv]

REFERENCES

Alemberti Alessandro ELFR, The European Lead Fast Reactor Design, Safety Approach and Safety Characteristics [Report]: Technical Meeting / Ansaldo Nucleare. - Dresden : [s.n.], 2012. - http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-03-19-03-23-TM-NPTD/14_TM-Safety-Dresden_Italy_Alemberti.pdf.

Alemberti Alessandro The Lead Fast reactor: Demonstrator ALFRED and ELFR Design [Report]: technical report at International Conference on FAST REACTORS AND RELATED FUEL CYCLES. - Paris : [s.n.], 2013. - <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-03-04-03-07-CF-NPTD/T2.1/T2.1.alemberti.pdf>.

ARI Industries Self Powered Neutron Detectors [Online]. - http://www.ariindustries.com/catalog/self_powered_neutron_detectors.pdf.

Generation IV International Forum A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems [Conference]. - 2002. - GIF 02-00.

KWD Nuclear Instruments Self Powered Neutron Detectors [Online]. - <http://www.kwdnuclearinstruments.se/self-powered-neutron-detectors>.

Lepore Luigi, Remetti Romolo and Cappelli Mauro Fast Neutron-Flux Monitoring Instrumentation for Lead Fast Reactors: A Preliminary Study on Fission Chamber Performances [Conference] // 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22). - Prague : ASME, 2014. - Vol. Volume 6. - p. 9. - Paper No. ICONE22-31011.

Photonis Photonis fission chamber for in-core use [Online]. - <http://www.photonis.com/nuclear/products/fission-chambers-for-in-core-use/>.

Photonis Photonis fission chamber for out-of-core use [Online]. - <http://www.photonis.com/nuclear/products/fission-chambers-for-out-of-core-use/>.

Salvatores M. and Palmiotti G. Radioactive waste partitioning and transmutation within advanced fuel cycles: achievements and challenges [Journal] // Progress in Particle and Nuclear Physics. - 2011.

SCK-CEN Myrrha: an Accelerator Driven System (ADS) [Online]. - <http://myrrha.sckcen.be/en/MYRRHA/ADS>.

Trapp J. P. [et al.] High temperature fission chambers: state-of-the-art [Online]. - <https://www.oecd-neo.org/science/rsd/ic96/4-3.pdf>.

C.3 ON CAPABILITIES AND LIMITATIONS OF CURRENT FAST NEUTRON-FLUX MONITORING INSTRUMENTATION FOR THE DEMO LFR ALFRED

On Capabilities and Limitations of Current Fast Neutron Flux Monitoring Instrumentation for the Demo LFR ALFRED

Luigi Lepore

SAPIENZA, University of Rome,
SBAI Department, Via Antonio Scarpa,
14-00161 Rome, Italy
e-mail: luigi.lepore@uniroma1.it

Romolo Remetti

SAPIENZA, University of Rome,
SBAI Department, Via Antonio Scarpa,
14-00161 Rome, Italy
e-mail: romolo.remetti@uniroma1.it

Mauro Cappelli

ENEA FSN-FUSPHY-SCM,
Frascati Research Center,
Via Enrico Fermi,
45-00044 Frascati (Rome), Italy
e-mail: mauro.cappelli@enea.it

Among GEN IV projects for future nuclear power plants, lead-cooled fast reactors (LFRs) seem to be a very interesting solution due to their benefits in terms of fuel cycle, coolant safety, and waste management. The novelty of this matter causes some open issues about coolant chemical aspects, structural aspects, monitoring instrumentation, etc. Particularly, hard neutron flux spectra would make traditional neutron instrumentation unfit to all reactor conditions, i.e., source, intermediate, and power range. Identification of new models of nuclear instrumentation specialized for LFR neutron flux monitoring asks for an accurate evaluation of the environment the sensor will work in. In this study, thermal hydraulics and chemical conditions for the LFR core environment will be assumed, as the neutron flux will be studied extensively by the Monte Carlo transport code MCNPX (Monte Carlo N-Particles X-version). The core coolant's high temperature drastically reduces the candidate instrumentation because only some kinds of fission chambers and self-powered neutron detectors can be operated in such an environment. This work aims at evaluating the capabilities of the available instrumentation (usually designed and tailored for sodium-cooled fast reactors) when exposed to the neutron spectrum derived from the Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator, a pool-type LFR project to demonstrate the feasibility of this technology into the European framework. This paper shows that such a class of instrumentation does follow the power evolution, but is not completely suitable to detect the whole range of reactor power, due to excessive burnup, damages, or gamma interferences. Some improvements are possible to increase the signal-to-noise ratio by optimizing each instrument in the range of reactor power, so to get the best solution. The design of some new detectors is proposed here together with a possible approach for prototyping and testing them by a fast reactor. [DOI: 10.1115/1.4033697]

1 Introduction

Nowadays, the fast reactor R&D domain has known important improvements, due mainly to the goals proposed by the GEN IV International Forum [1,2].

Among the proposed solutions, lead-cooled fast reactors (LFRs) have recently gained a position despite the fact that the main drawback about this coolant, i.e., its chemical compatibility with materials, has not yet been solved. Experiments with Pb coolant started in the 1960s in the United States, but they were abandoned soon. In parallel, the Soviet Union developed some land prototypes oriented to conceive a small LFR for marine propulsion. The Soviet Union's experience with lead-bismuth eutectic (LBE, not pure lead) was successful compared with the Americans': the last LFR propelled submarine was dismissed in 1996, after some tens of years of proper duty. However, both countries acknowledged the corrosion processes and chemical compatibility with materials as the main limitation for this technology [3].

Today, R&D in Materials Science makes the lead-coolant attractive once again for critical (power reactor) and subcritical applications [accelerator-driven system (ADS)], due to some advantages with safety, if compared with sodium. As a consequence, in the last decade, lead applications for fast reactors experienced a boost.

Inside the European framework, ongoing LFR projects are the Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA) and Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator (ALFRED), the first being a subcritical demonstrator for

an ADS-type plant (whose operability will confirm the possibility to close the uranium fuel cycle by burning all the long-lived actinides), and the second being a medium-power demonstrator reactor for electricity production [4,5]. Currently, MYRRHA is the European pilot plant for the lead technology.

Considering that the sodium-cooled fast reactor (SFR) technology can count on decades of reactor years operation, LFR technology appears today not much investigated as it would deserve.

On the basis of a previous work presented by the authors [6], this paper focuses on I&C issues regarding the demonstrator ALFRED, aiming at showing that the reference neutron instrumentation currently available for SFRs may not be completely suitable when transferred to LFRs. Compared with [7], this work benefits from updated calculations on the ALFRED simulation model, showing new considerations about the applicability of the analyzed instrumentation.

2 Methodology

Choosing the best detector for monitoring a certain physical quantity requires the determination of the environmental conditions to be monitored because some external constraints can limit the sensor functioning or its applicability. Moreover, after the verification of the sensor usability, its performances should be verified as well: Unexpected variation can be produced by external conditions different from a standard/reference point, e.g., a pressure sensor output can be affected by the temperature of the environment in which it is installed.

Neutron flux monitoring instrumentation performances are usually tested in the factory by thermal neutrons while fast response is

Manuscript received October 7, 2015; final manuscript received August 30, 2016; published online October 12, 2016. Assoc. Editor: Leon Cizelj.

never evaluated. This is due to the fact that in a light-water reactor—the most widespread type of reactor in the world—sensors monitor most of all thermal neutrons in every position they are placed, because the variation of sensor positioning significantly affects the magnitude of the neutron flux but does not affect the energy distribution of neutrons.

Fast reactors behave quite differently. The averaged energy of the neutron spectrum significantly varies when moving from the center to the edge of the core. It means that the detector sensitivity varies substantially with positioning because the spectrum-averaged cross-section of the reaction it uses for counting neutrons is no longer constant. In other words, detector performances into a fast reactor environment are practically unknown because different neutron energy spectra lead to detecting capability strongly related to the positioning.

The selection of the correct LFR instrumentation for neutron flux monitoring requires: (1) the identification of sensors robust enough to resist the reactor core thermal-hydraulic conditions, (2) the “actualization” of their performances to the particular LFR neutron environment, and (3) the evaluation of external constraints that may reduce the counter applicability or lifetime.

The so-called actualization has been here realized by the Monte Carlo transport code MCNPX [8], with the mathematical procedure shown below.

A neutron detector response, R (count per second or current), is proportional to the cross-section of the involved reaction i weighted by the energy spectrum of neutrons that hit the sensor (1). The more the cross-section varies with the energy, the more the detector sensitivity can change significantly with the spectrum variation. Referring to Eq. (1), the local value $\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)$ provides information about detector sensitivity in position $\rightarrow r$, while its multiplication by local flux $\varphi(E, \rightarrow r)$ gives the local response $R(\rightarrow r)$ of the instrument

$$R(\rightarrow r) \propto \int \sigma_i(E) \varphi(E, \rightarrow r) dE = \bar{\sigma}_i(\rightarrow r) \int \varphi(E, \rightarrow r) dE \quad (1)$$

$$R_{\text{fast}}(\rightarrow r) \propto \bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{fast}} \int p(\rightarrow r) \psi(E)|_{\text{fast}} dE$$

$$R_{\text{thermal}}(\rightarrow r) \propto \bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{thermal}} \int p(\rightarrow r) \psi(E)|_{\text{thermal}} dE \quad (2)$$

$$\text{ESCF}(\rightarrow r) = \frac{\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{fast}}}{\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{thermal}}} \equiv \frac{\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{fast}}}{\bar{\sigma}_i|_{\text{thermal}}} \quad (3)$$

$$S(\rightarrow r)|_{\text{fast}} = \text{ESCF}(\rightarrow r) \cdot S|_{\text{thermal}} \quad (4)$$

MCNPX, with its proper utilities called “tallies,” can calculate $\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)$ values in (1) with no difficulties. Varying the shape factor $\psi(E)$ of the neutron flux $\varphi(E, \rightarrow r) = p(\rightarrow r)\psi(E)$, e.g., once with fast neutron flux, once with thermal neutron flux, it is possible to calculate the theoretical fast and thermal responses, respectively.

Focusing on energy-averaged cross-sections $\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{fast}}$ and $\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{thermal}}$, it is possible to calculate the energy spectrum correction factor $\text{ESCF}(\rightarrow r)$ (3), which is useful for actualizing the performances given by the technical specifications of the detector (rated by thermal neutrons) to the current application. Because $\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{thermal}}$ refers to the factory instrument testing with thermal neutron, it does not depend on reactor position $\rightarrow r$; therefore, we can indicate it as $\bar{\sigma}_i|_{\text{thermal}}$. This value has been calculated with a single MCNPX run with the Maxwell–Boltzmann neutron energy spectrum corresponding to $T = 293$ K.

For the fast neutron spectra, multiple calculations of $\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)|_{\text{fast}}$ have been conducted for each reactor position suitable for installing the detector. So, a set of $\text{ESCF}(\rightarrow r)$ corrections has been evaluated, a single value for each studied location (3). Then, the fast sensitivity of the instrument has been updated, retrieving $S(\rightarrow r)|_{\text{fast}}$ values related to reactor position $\rightarrow r$ (4).

Section 5 shows the results of the methodology applied to ALFRED.

Once the correct sensitivity has been calculated, the process of instrumentation selection for a certain position needs to evaluate other parameters, such as the usable lifetime of the detector or the interferences it may experience.

First of all, lifetime can be calculated as the acceptable “aging” of the sensitive volume of the counter, i.e., when a certain maximum burnup value has been achieved. It must be noted, however, that this duration could be theoretical because other constraints may shorten the detector lifetime, e.g., the achievement of the gamma dose limit as advised by the manufacturer.

According to the analyzed detector, the causes that may limit the detector workability should be evaluated by the operator. With a deep knowledge of the matter, he selects the constraints that the counter has not to overcome; then, he can foresee the effective instrument’s lifetime.

To make the selection process successful, it is strongly recommended to match the theoretical considerations with the experimental tests, step by step. It is not infrequent that the real tests lead to the discovery of unconsidered aspects that may cause unexpected variations from the expected results.

3 Reference LFR and Simulation Model

The LFR demonstrator called ALFRED has been proposed in the context of the LEADER Project (Lead-cooled European Advanced DEMonstration Reactor, 2010–2013). Its goal is to demonstrate the feasibility of LFR power reactors and to acquire experience for future larger plants like the European Lead Fast Reactor Project.

ALFRED is a 300 MW_{th} pool-type fast reactor cooled by pure lead, fueled with uranium and plutonium mixed oxides, and operating at core temperatures of 400–480°C in–out with 550°C the hottest cladding temperature.

The core is composed of 171 fuel assemblies with two fuel zones, 12 control rods (CRs), 4 safety rods (SRs), and 108 reflector elements in the dummy belt.

The CRs’ shutdown system is based on the buoyancy effect with rods inserting from the bottom of the core; SRs’ shutdown system’s rods pneumatically penetrate the core from the top.

The secondary circuit operates with water/superheated steam at 18E + 6 Pa, removing heat from the reactor pool by eight bayonet tube steam generators (SGs) immersed into the lead coolant. Two independent totally passive decay heat removal systems connect directly to the eight principal SGs to remove residual decay heat after the loss of the primary heat removal by the secondary circuit. A vertical cross-section of ALFRED is presented in Fig. 1.

All structures are conceived for being easily disassembled, speeding up inspections and maintenance.

Lead aggressiveness and erosion phenomena are dominated by fine controlling of coolant chemistry and flow velocity. The best materials to be employed seem to be austenitic low-carbon steels (e.g., AISI 316 L), ferritic–martensitic steels (e.g., T91), and titanium steels. Moreover, protective coatings can be applied to those materials, increasing their robustness. Because of lead’s high melting point (327.4°C), the coolant “cold” temperature must be at least 400°C to prevent local freezing. Coolant is not pressurized because the core voiding risk is very low (the partial pressure at 400°C is 2.8E – 5 Pa while boiling point at 0.1E + 6 Pa is 1745°C); only a few bars of inert gas are foreseen (to reduce the contact with the air, and keep the oxygen concentration in coolant: such a control limits the corrosion processes).

More constructive details about ALFRED can be found in Ref. [9].

To reproduce neutron and gamma radiation fields in the position the neutron flux instrumentation is foreseen to be employed, ALFRED has been reproduced into the Monte Carlo code MCNPX in a very detailed way, as to get significant values in terms of spectra and magnitudes of both neutron and gamma fluxes. The simulation

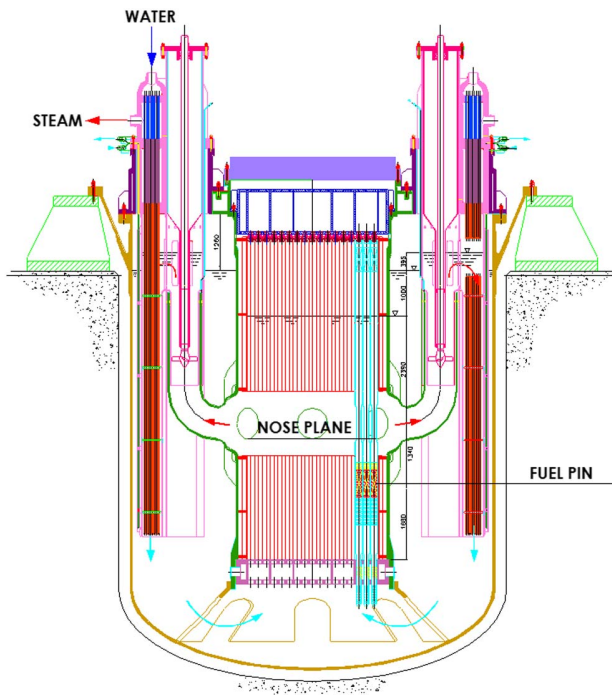


Fig. 1 ALFRED vertical cross-section [9]

model is very complex: Currently, the MCNPX input deck of the reactor reaches 50,000 lines in length, including all the structure surrounding the core. For easiness of running the code, the reactor pit cover has not been included as the main pumps immersed into the lead coolant because those elements are quite far from the core itself and their influences on neutron fluxes near the core may be neglected.

High parallel computing (HPC) resources have been involved, giving the authors the possibility to improve their previous results. Calculations required running time of a single simulation in the order of 300,000 h × core to get the accuracies as desired.

4 Available Neutron Instrumentation for High-Temperature Environment

Small size cores (like ALFRED), usually use out-of-core neutron detectors as control instrumentation because cores result strongly coupled. In nuclear reactor kinetics, it means that a local perturbation propagates all around; then a local effect has global consequences. Paraphrasing to reactor control, in-core perturbation can be easily revealed from out-of-core measurements. In-core monitoring may be useful for providing data about power (and flux) spatial distribution, as to optimize the fuel cycle.

This work focuses on both categories: some miniaturized sensors designed for being installed into fuel-pin lattice are analyzed along with normal-sized detectors for dedicated installation all around the core. Only prompt detectors are taken into account, while instrumentation usable for spatial flux shape analysis only has been evaluated but not analyzed in detector response study in Section 5.

The main drawback for instrumentation to be put into a fast reactor environment is the temperature. Applicable technologies for measuring the neutron flux are limited to some kinds of fission chambers (FCs), and self-powered neutron detectors (SPNDs).

A FC behaves as an electrical condenser: an electrode (usually the cathode) is coated with a thin layer of fissile deposit; when neutrons induce fission events, one of the fission fragments enters the inert gas causing multiple ionization events. It is the starting point of

Table 1 Reference data of the currently available FCs [13,14] suitable for Demonstrator ALFRED

Supplier	Product code	Thermal neutron sensitivity			Diameter [mm]	Length [mm]
		Pulse [cps/nv]	MSV [A^2Hz^{-1}/nv]	Current [A/nv]		
Photonis	CFUC06	1	4×10^{-26}	2×10^{-13}	48	412
Photonis	CFUE32	0.001	4×10^{-29}	1×10^{-16}	7	150
Photonis	CFUE43	-	3×10^{-31}	7×10^{-17}	7	85.5

the whole charge creation process. The electron collection to the anode originates a measurable electric signal.

SPNDs must be divided into two categories: beta-decay-based SPNDs and prompt gamma-based SPNDs. For the first category, the absorbed neutron produces a nuclide that emits an electron while decaying; this electron has energy enough to overcome the insulating material between the emitter and the collector electrode: The collection of the beta particles produces the voltage pulse. It is clear that magnitude and collection time of the measurable signal are strongly related to the decay constant of the nuclide used. Beta-decay-based SPNDs give only delayed responses. Vanadium and rhodium SPNDs belong to this family.

Gamma-based SPNDs use prompt gamma ray de-excitation after the neutron capture by a certain atom. The gamma ray (practically concomitant with the capture event) may interact with insulator and collector materials by photoelectric effect, Compton effect, and pair production events, producing collectable electrons. Cobalt and Hafnium SPNDs belong to this category. The fast response time of the electric signal makes such detectors suitable for controlling purposes.

FCs must be supplied with a few hundred volts, whereas SPNDs do not need the supply voltage, making power and signal drivelines in-and-out of the reactor vessel quite simple in comparison with detectors that need some thousands of volts to work (e.g., BF_3 or boron-lined proportional counters).

To improve chemical robustness against the coolant, detectors could be coated with a protective layer for direct installing into lead. However, the best solution seems to be the use of instrumentation guide tubes to protect detectors from direct contact with the coolant, making the handling/replacing/substitution easier as well as their disposal at the end of life. The inert gas pressurization of lead is not important for the selection of detectors. Tables 1 and 2 report the neutron instrumentation currently available for SFR, which could suit the monitoring needs for ALFRED.

Nuclear reactor neutron flux monitoring instrumentation is usually operated in three different modes, namely pulse mode, mean square voltage (MSV) mode, and current mode.

The pulse mode can be used with flux magnitudes up to $1E + 6$ n/(cm^2s), which corresponds often to zero-power condition (or source range). This limit was calculated on the hypothesis that the detector sensitivity is 1 cps/nv (taking into account that such a low-neutron radiation field needs a detector sensitivity as high as possible), and the sensor signal pulse width is significantly smaller than 1 μs . Less sensitive instruments, e.g., 0.01 cps/nv, could tolerate pulse mode till $1E + 8$ n/(cm^2s), but they could be too "blind" for reactor safe monitoring and start-up. The neutron counting needs to cut the pulses caused by background gammas; therefore, detectors using high Q-value reactions for sensing neutrons are preferred.

With neutron flux from $1E + 6$ n/(cm^2s) to $1E + 12$ n/(cm^2s), the power is into the intermediate range and MSV mode is operated: the discrimination of gammas background is based on quite different charge releasing and pulse height between electric signals produced by gammas and neutrons. SPNDs, however, cannot be used in such a way.

From $1E + 12$ n/(cm^2s) up to $1E + 16$ n/(cm^2s), which is the reactor power range, the current mode is applied: the detector

Table 2 Reference data of the currently available SPNDs [18,19] suitable for demonstrator ALFRED

Supplier	Product code	Thermal neutron sensitivity		Overall dimensions [mm]	Thermal burnup [%/month/nv]
		Current [A/nv]	Emitter dimensions [mm]		
KWD Instruments	5503-V-100	5.1×10^{-21}	$D = 2; L = 100$	$D = 3.5$	1.2×10^{-15}
KWD Instruments	5503-Rh-50	8.7×10^{-21}	$D = 0.7; L = 50$	$D = 2.5$	3.9×10^{-14}
KWD Instruments	5503-Co-210	5.4×10^{-21}	$D = 2; L = 210$	$D = 3.7$	1.0×10^{-14}
ARi Industries	V-type	1.54×10^{-21}	$D = 0.5; L = 200$	$D = 1.5$	1.3×10^{-15}
ARi Industries	Rh-type	2.4×10^{-20}	$D = 0.5; L = 200$	$D = 1.5$	2.3×10^{-14}
ARi Industries	Co-type	3.2×10^{-22}	$D = 0.5; L = 200$	$D = 1.5$	1.0×10^{-14}

behaves as a current-mode ion chamber, where a current constant signal is retrieved (this method works only when the gamma background is negligible because gammas cannot be discriminated by neutrons).

In ALFRED, the installation of detectors in proximity of the core causes the neutron flux to be so high that detectors must be operated directly in MSV (if possible) and current modes, according to the power level. As a consequence, the study in Section 5 will show sensitivity and detector response concerning such modes.

5 Application of the Methodology to ALFRED

The methodology described in Section 2 has been applied to the ALFRED reactor, evaluating the capability of the selected instrumentation for neutron flux monitoring.

The study [7] has shown that power monitoring requires most of all MSV and current modes for detector operation. Instrumentation sensitivity and response have been actualized and updated to some reactor positions suitable for installing detectors.

In previous works, two reference planes were considered, and called “core mid-plane” and “nose plane,” each one provided with six tally points for energy-averaged cross-section and neutron flux calculation (Fig. 2, left). In this work, new installation points are being considered with a less-invasive approach into the fuel, without failing the neutron core monitoring needs. Two axial segments are being considered (the core central pin—C points—and a reflector pin facing the active zone—R points), leaving the radial segment only on nose plane—N points (Fig. 2, right). The detectors’ new positioning has been inspired by the experience acquired with Super-Phénix reactors [10–12].

In these positions, neutron and gamma fluxes have been calculated. Results are shown in Table 3. About neutrons, a more detailed representation of neutron spectra in N1–N4 positions is given in Fig. 4.

As can be easily foreseen, the magnitude of the neutron flux reaches the higher values near the fuel active zone, points C1–C4 and R1–R4. Installation sites farther away, such as points N1–N4 on the nose plane, experience the loss of an order of magnitude in neutron flux if compared with previous points (Fig. 3).

About the neutron energy distribution, for brevity, only some spectra will be presented, e.g., the comparison between the points N1, N2, N3, N4 on the nose plane (Fig. 4), whose variations are easier to understand at a glance. Indeed, spectra vary significantly moving from one position to another, due to the distribution of materials that cause absorption and scattering of neutrons.

As stated in previous works, the sensitivity of the instrumentation may vary significantly (to two orders of magnitude) according to the neutron spectra and peculiar shapes of the reaction cross-sections corresponding to the sensitive materials of the counters.

Among the instrumentation listed in Tables 1 and 2, only the Photonis CFUE32 FC and KWD SPND 5503-Co-210 results will be presented here. Figs. 5 and 6 show significant variations in detector fast sensitivity $S(\rightarrow r)|_{\text{fast}}$ with position $\rightarrow r$: Each detector experiences improvements in sensitivity for out-of-core installation due to the reduction of the averaged energy of neutron spectra and cross-section shapes that generally increase when energy reduces.

Unfortunately, moving from the center of the core through the edges, the flux magnitude $p(\rightarrow r)$ decreases more strongly than those sensitivity gains; therefore, detector responses globally reduce moving away from the core center.

Figs. 7 and 8 show the detector responses in the current mode, $R(\rightarrow r)$, versus different positioning and three different reactor power levels at 0.1%, 10%, and 100% of the nominal thermal power. Even if signals are proportional, schematics of responses at different power levels can help the operator in detectors’ selection by comparison with constraints on response values.

About the Photonis CFUE32 FC, it must be noted that the combination among pulse, MSV, and current modes makes the detector operative—theoretically—from zero to the maximum power. Electrical signals are strong enough to be considered as reliable. Because of the high sensitivity, the counter is able to monitor a very low neutron population but also suffers an excessive burnup when power rises. If operated at nominal power, the counter could last only a few months, as stated in previous works [7].

Thanks to the updated calculations in this work, new constraints about workability of the instrument showed up: (1) the

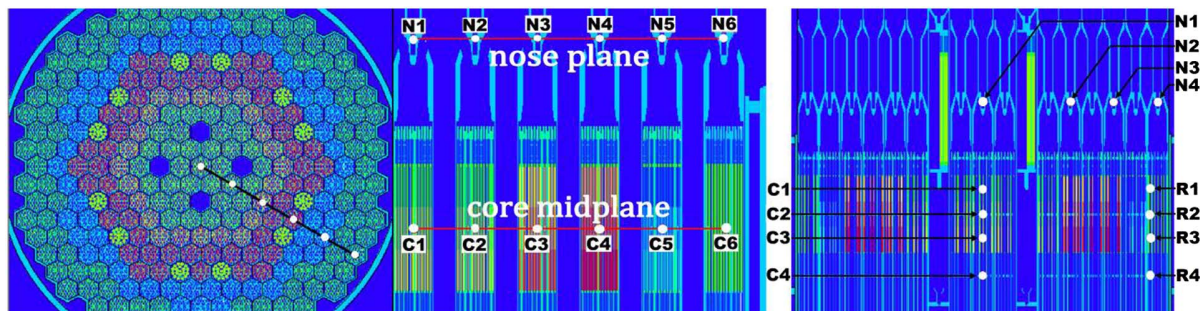


Fig. 2 Core plane and points investigated for calculating detectors’ fast sensitivities and responses in previous works (left). New detector’s positioning for calculation in this work (right)

Table 3 Neutron and gamma fluxes specification in positions suitable for installing neutron detectors

	Neutron flux [n/(cm ² s)] @ 300 MW _{th}	Averaged energy [keV]	Thermal (<0.2 eV)	Epithermal (>0.2 eV, <0.1 keV)	Fast (>0.1 keV)
N1	2.47E + 14 (±1%)	26	0.08%	18.91%	81.01%
N2	1.47E + 15 (±1%)	50	0.02%	14.35%	85.62%
N3	2.88E + 14 (±1%)	16	0.21%	28.50%	71.29%
N4	1.33E + 14 (±2%)	13	0.26%	32.60%	67.15%
C1	3.10E + 15 (±0.3%)	150	0.00%	0.90%	99.10%
C2	3.71E + 15 (±0.3%)	150	0.00%	0.73%	99.27%
C3	3.21E + 15 (±0.4%)	150	0.00%	0.93%	99.07%
C4	2.88E + 14 (±1%)	16	0.21%	28.50%	71.29%
R1	7.00E + 14 (±0.8%)	70	0.01%	5.35%	94.64%
R2	7.55E + 14 (±1%)	120	0.00%	5.06%	94.93%
R3	6.15E + 14 (±1%)	120	0.01%	5.43%	94.56%
R4	2.73E + 14 (±0.8%)	33	0.10%	18.53%	81.38%

	Neutron flux [n/(cm ² s)] @ 300 MW _{th}	Gamma flux [γ/(cm ² s)] @ 300 MW _{th}	Averaged γ energy [keV]	Air kerma free-in-air rate [Gy/s] @ 300 MW _{th}	γ/n flux rates
N1	2.47E + 14 (±1%)	1.65E + 12 (±18%)	950	5.5(±13%)	0.0067
N2	1.47E + 15 (±1%)	1.38E + 12 (±9%)	1450	14(±18%)	0.0009
N3	2.88E + 14 (±1%)	1.29E + 12 (±15%)	1250	8.3(±14%)	0.0039
N4	1.33E + 14 (±2%)	3.62E + 12 (±12%)	900	26.4(±22%)	0.0272
C1	3.10E + 15 (±0.3%)	4.23E + 14 (±2%)	500	1457(±6%)	0.1365
C2	3.71E + 15 (±0.3%)	5.40E + 14 (±2%)	450	1767(±6%)	0.1456
C3	3.21E + 15 (±0.4%)	4.70E + 14 (±4%)	500	1536(±7%)	0.1464
C4	2.88E + 14 (±1%)	1.64E + 13 (±4%)	900	93(±6%)	0.0569
R1	7.00E + 14 (±0.8%)	1.39E + 14 (±8%)	500	438(±12%)	0.1986
R2	7.55E + 14 (±1%)	1.42E + 14 (±5%)	600	566(±16%)	0.1881
R3	6.15E + 14 (±1%)	1.59E + 14 (±18%)	450	472(±13%)	0.2585
R4	2.73E + 14 (±0.8%)	4.21E + 12 (±8%)	900	22.2(±12%)	0.0154

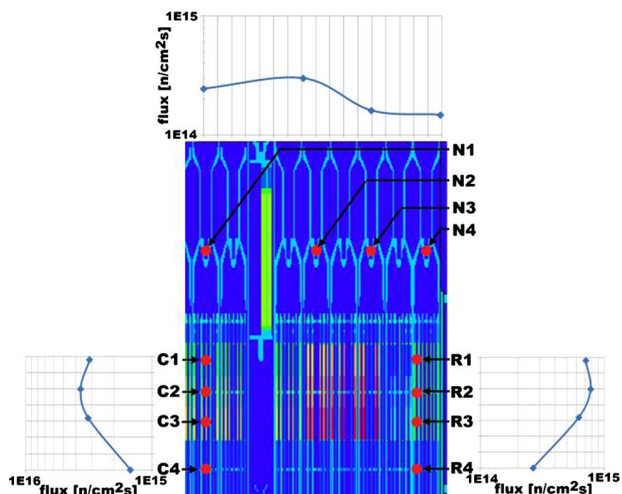


Fig. 3 Neutron flux magnitude trend in positions suitable for installing neutron detectors

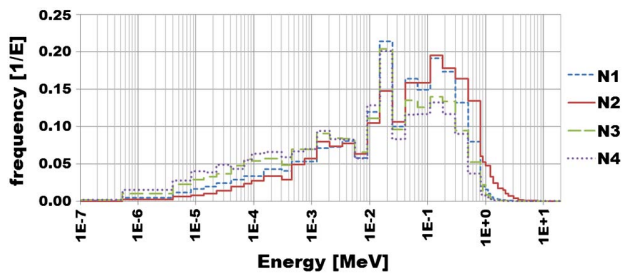


Fig. 4 Neutron flux spectra comparison of N1–N4 ‘nose plane’ points. The averaged energy of the spectrum varies significantly due to scattering and absorber materials

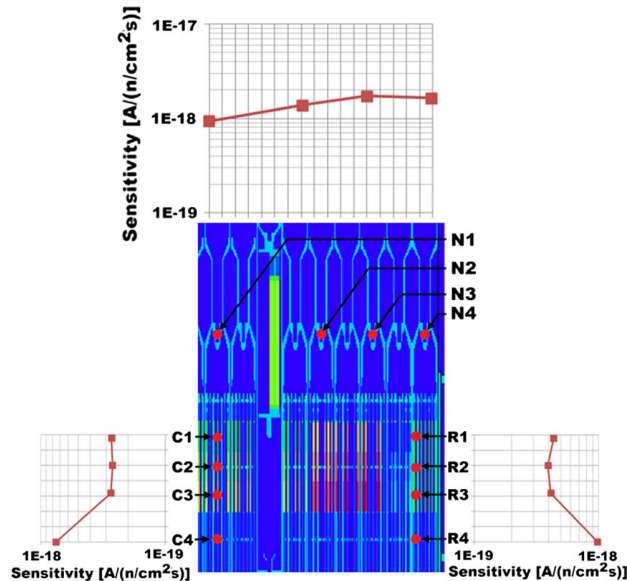


Fig. 5 Photonis CFUE32 FC current mode sensitivity in the positions studied in demonstrator ALFRED (uncertainty <1%)

maximum tolerable rate of free-in-air kerma stated by the manufacturer (~3 Gy/s [13,14]) makes the detector operable till 300 kW_{th} and (2) gamma interferences in the current mode have to be evaluated very carefully because of the instrument sensitivity to gamma radiation. This issue is critical for installations near the fuel active zone because gamma interferences are negligible some meters away from the core, e.g., on nose plane points or outside the reactor vessel.

It is clear that typical miniaturized FCs (activated by ²³⁵U) could be useful in monitoring the start-up and the lower section of the

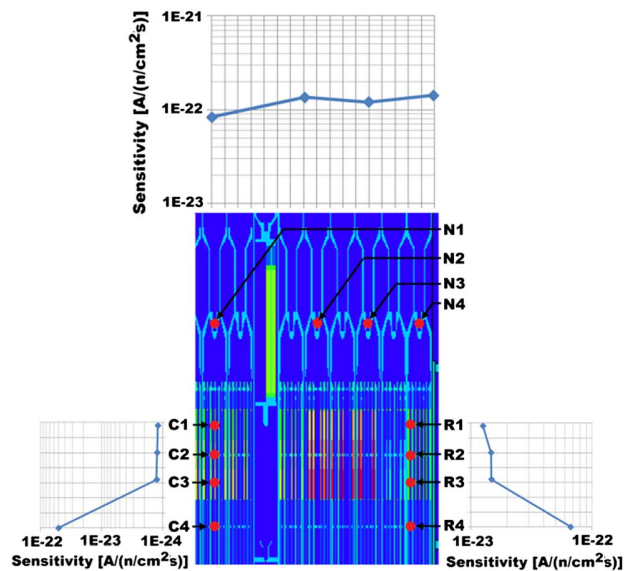


Fig. 6 KWD 5503-Co-210 SPND current mode sensitivity in the positions studied in demonstrator ALFRED (uncertainty <1%)

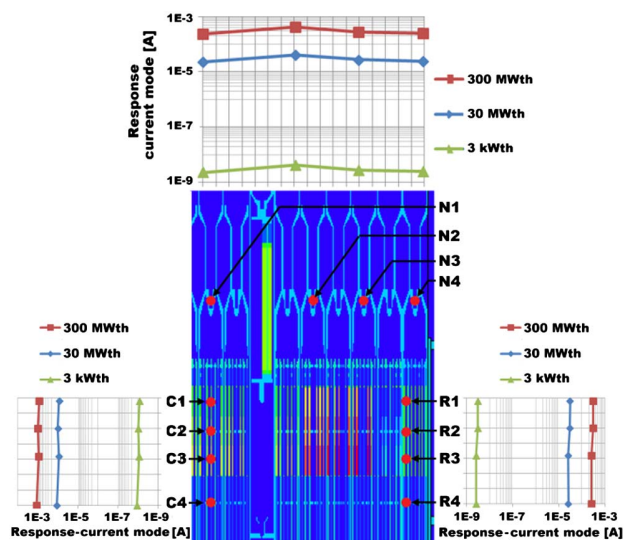


Fig. 7 Photonis CFUE32 FC current mode response in the positions studied in demonstrator ALFRED (uncertainty <5%)

intermediate range of reactor power (till 300 kW_{th} in ALFRED). When such a maximum power is reached, FCs must be driven away from the core and placed in rest positions or for monitoring new points far from the active zone, e.g., in the rear of the heat exchangers, using those objects as shielding.

About KWD SPND 5503-Co-210, in previous works [7], the author showed that the operation of those instruments requires a neutron population of some MW in magnitude to get neutron fluxes sufficient to produce reliable outgoing signals. Its sensitivity, some decades lower than Photonis CFUE32 FC, ensures the possibility of a fixed installation in the fuel element lattice, enabling the operation of detectors only when a certain minimum power is reached. The durability of this sensor is less critical than in uranium FCs, as the burnup rate is significantly lower, i.e., burnup at 1% per year at full power.

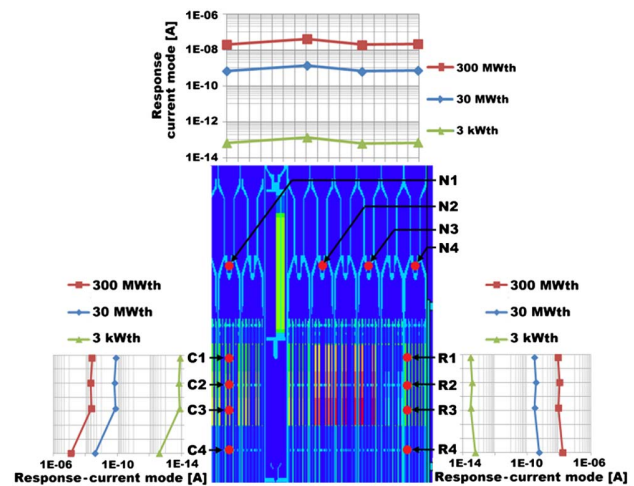


Fig. 8 KWD 5503-Co-210 SPND current mode response in the positions studied in demonstrator ALFRED (uncertainty <5%)

In this work, the gamma field was characterized throughout free-in-air kerma (doses are reported in Table 3) as a primary evaluation for analyzing the gamma contribution to the sensors' signals. This aspect is being studied and an extensive treatment will be included in the continuation of this work. Qualitatively, it can be stated that this issue is critical with the sensor installed into the core active zone, where gamma flux intensities and averaged energies find their maxima. Installation points into the reflector surrounding the core suffer this issue slightly. Points on the nose plane are protected from the gamma radiation interference due to the lead plenum above the active zone of the reactor core.

It must also be noted, however, that the studied instrument has very little quantity of sensitive material: a larger volume of emitter can be introduced into the sensor if more sensitivity is needed. It must be noted, however, that a detector's sensitivity is not proportional to the increase in sensitive material because geometrical considerations have to be taken into account.

At this stage of the work, prompt SPNDs seem to be very promising as in-core instrumentation for neutron-flux control purposes in the power range.

6 Proposal for New Detector Designs for Customized Application in LFR

This work shows that FCs are sensitive enough to follow the start-up and the intermediate range of the reactor power properly, keeping detector workability for some years or more. Variations of FC sensitivity cannot resolve the durability issue of these instruments, which in no way can be used for continuous monitoring of the power range in core proximity.

FCs can be optimized in design and operation for low/intermediate power monitoring, customizing sensitivity and signal-to-noise ratio decade per decade, by controlling some important parameters of the instrument. One of the main drawbacks is the increasing leakage current coming through the insulator material when the temperature rises; an artificial diamond can ensure better electrical resistivity in comparison with the commonly used alumina. Fissile consumption and fission product buildup are two detrimental effects that increase with neutron fluence of the instrument. The first effect can be compensated with a self-breeding FC, where burned fissile atoms can be replaced with fissile production by neutron capture on fertile material. Fission product buildup can only increase with fluence: a perspective could be the washing of the inert gas into the instrument by a venting channel to mitigate the negative effects

of the radioactive fission fragments. Moreover, a venting channel could be useful for changing the working gas pressure of the detector, optimizing this value according to the specific needs of the operated mode (pulse, MSV, or current modes).

Different possibilities are envisaged for a new layout of FCs, even if this customization may be not so necessary for instrumentation for full power monitoring.

SPNDs can be used successfully to overcome FCs drawbacks in full power monitoring: they are simple, sensitive enough to detect neutron fluxes in the power range, and robust enough to last a few years in reactor full power conditions. Therefore, prompt SPNDs can have a key role into LFR core neutron flux monitoring and control.

Usually, SPNDs are used for in-core monitoring purposes to retrieve neutron flux shape information both axially and radially, but such information is not relevant to reactor safety; therefore, delayed responses by the instruments are accepted (this is the field of application of rhodium and vanadium SPNDs, the most used). Prompt SPND like cobalt SPNDs are not so used and hence their evolution experiences a steady state.

Hereafter, new perspectives for cobalt SPNDs (or more generally prompt-SPNDs) are proposed to customize this kind of detector for the LFR environment. As shown above, the studied instrument succeeds in full power continuous monitoring, but stronger response by the instrument could be more reliable and easy to retrieve. This goal is reachable by adding sensitive material to the instrument because the electric signal strength depends on the number of capture reaction only; alternatively, some instruments can be electrically put in parallel for collecting currents greater in magnitude. An assembly design for SPNDs could be useful for driving activation probes, and calibrating periodically the detector. Moreover, the assembly design could behave better in reliability analysis because it is more difficult that all parallel detectors fail simultaneously.

SPNDs are originally nonradioactive because they become radioactive only when exposed to a neutron flux. It means that detector construction is pretty easy because no radioactive manipulation is needed, as with FCs, which do imply the manipulation of alpha emitters. This peculiarity makes SPNDs cheap and fast to be manufactured, allowing the installation of more sensors in a single batch and their substitution after irradiation not so expensive.

7 Conclusion and Future Developments

The simulations conducted in this study show that the LFR demonstrator, ALFRED, can be supplied with some kind of FCs and SPNDs currently available as in-core control instrumentation, but those detectors could be not completely suitable for this kind of reactor.

Improvements can be made in detector designs to customize sensitivities, as requested by neutron monitoring needs of the peculiar reactor.

FCs seem to be the best and unique solution for monitoring the reactor power at the lower decades of neutron flux, i.e., at start-up and intermediate range. Because of their removal when a certain power is reached (to preserve the integrity of the instruments), handling devices must be studied and included into the reactor design, maybe with some guide tubes dedicated for neutron detectors.

SPNDs seem to be the best compromise for monitoring the higher decades of neutron flux, i.e. when reactor is operated at power range. They can be installed in a fixed configuration and used only when the neutron population becomes sufficient to produce reliable signals. Gamma interferences must be evaluated carefully in positions inside the core active zone. Different materials, with lower sensitivity to the gamma radiation, can be evaluated.

Although FCs were experimented in SFR fast fluxes in the 1970s [15], prompt SPNDs seem to have no concrete irradiation experience in such an environment.

Due to the lack of R&D about prompt SPNDs, some significant improvements are envisaged: because of that, those detectors will be

the focus of the future steps of this work. In order to optimize the SPND design by MCNPX, some experimental tests of commercial SPNDs carried out at the ENEA TAPIRO Fast Reactor facility [16] have been reconstructed into the Monte Carlo code. The successful reproduction of the experimental results validates the simulation model for those instruments, elevating MCNPX as a design tool. Future developments will include an extensive study on SPND modifications; new designs of custom-made prompt SPND could be prototyped and new tests scheduled.

Acknowledgment

The authors would like to express special thanks to Dr. Mario Carta, head of ENEA Casaccia FSN-FISS-RNR, and Dr. Lina Quintieri of ENEA Casaccia INMRI Institute for their precious advice and infinite disposability in dialogue. A special thanks goes to all ENEA/UTICT technicians, in particular to Eng. Guido Guarnieri, for their perseverance, disposability, and competency in solving all issues about HPC. The computing resources and the related technical support used for this work have been provided by CRES-CO/ENEAGRID High Performance Computing infrastructure and the staff [17]. CRES-CO/ENEAGRID High Performance Computing infrastructure is funded by ENEA, the Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, and by Italian and European Research Programmes; see <http://www.cresco.enea.it/english> for more information. This work was partially supported by the Research Contract PAR2014, ADPFIS – LP2 – 089, Italian Ministry for Economic Development and ENEA.

Nomenclature

C^i	= measurement point 'i' on core central axial traverse referring Fig. 2
cps	= count per second [s^{-1}]
E	= Energy [MeV]
ESCF($\rightarrow r$)	= local Energy Spectrum Correction Factor [-]
fast	= fast, referring to fast neutron
Gy	= Gray [J/kg], absorbed dose or kerma unit measurement
$h \times core$	= computational power [hour-core]
n	= neutrons
nv	= neutron flux, equivalent to $p(\rightarrow r)$
N^i	= measurement point 'i' on nose plane radial traverse referring Fig. 2
$p(\rightarrow r)$	= neutron flux magnitude factor [$n/(cm^2 \cdot s)$]
$\rightarrow r$	= vector for position
$R(\rightarrow r)$	= local detector response [A^2/Hz] or [A]
R^i	= measurement point 'i' on reflector axial traverse referring Fig. 2
$S(\rightarrow r)$	= local detector sensitivity [$A^2/(Hz \cdot nv)$] or [A/nv]
T	= temperature [$^{\circ}C$] or [K]
th	= thermal, referring to thermal power
thermal	= thermal, referring to thermal neutron
y	= year
$\varphi(E, \rightarrow r)$	= local neutron flux per unit energy [$n/(cm^2 \cdot s \cdot E)$]
$\psi(E)$	= neutron flux energy spectrum shape factor [1/E]
$\sigma_i(E)$	= microscopic cross-section of reaction i used by detector [barn]
$\bar{\sigma}_i(\rightarrow r)$	= energy-averaged local cross-section of reaction i used by detector [barn]

References

- [1] Generation IV International Forum, 2002, "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems," GIF-002-00.
- [2] Salvatores, M., and Palmiotti, G., 2011, "Radioactive Waste Partitioning and Transmutation within Advanced Fuel Cycles: Achievements and Challenges," *Prog. Particle Nucl. Phys.*, **66**(1), pp. 144–166.

- [3] Lepore, L., Remetti, R., and Cappelli, M., 2013, "Analisi Dei Sistemi di Strumentazione e Controllo Previsivi in Alcuni Progetti su Reattori al Piombo Attualmente in Sviluppo a Livello Internazionale," ENEA-MSE Report Rds/2013/030, http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/nucleare-iv-gen/2012/2013-030.pdf.
- [4] SCK-CEN, 2016, "MYRRHA: An Accelerator Driven System (ADS)," *SCK-CEN*, <http://myrrha.sckcen.be/en/MYRRHA/ADS>.
- [5] Alemberti, A., 2012, "The European Lead Fast Reactor Design, Safety Approach and Safety Characteristics," ELFR, Dresden, https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2012/2012-03-19-03-23-TM-NPTD/14_TM-Safety-Dresden_Italy_Alemberti.pdf.
- [6] Lepore, L., Remetti, R., and Cappelli, M., 2014, "Fast Neutron-Flux Monitoring Instrumentation for Lead Fast Reactors: A Preliminary Study on Fission Chamber Performances," 22nd International Conference on Nuclear Engineering Proceedings (ICONE22), V006T13A016, ASME, Prague, 9.
- [7] Lepore, L., Remetti, R., and Cappelli, M., 2015, "Evaluation of the Current Fast Neutron Flux Monitoring Instrumentation Applied to LFR Demonstrator ALFRED: Capabilities and Limitations," 23rd International Conference on Nuclear Engineering Proceedings (ICONE23), Makuhari Messe, Chiba, Japan, JSME.
- [8] Briesmeister, J. F., 2016, "MCNP-A General Purpose Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport," www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/044/18044302.pdf.
- [9] Alemberti, A., 2013, "The Lead Fast Reactor: Demonstrator ALFRED and ELFR Design," Paris, <https://www.iaea.org/nuclearenergy/nuclearpower/Downloadable/Meetings/2013/2013-03-04-03-07-CF-NPTD/T2.1/T2.1.alemberti.pdf>.
- [10] Gauthier, J. C., Granget, G., and Martini, M., 1989, "Techniques de Mesures Neutroniques au Demarrage de SPX2," Proceedings of a Specialists' Meeting on in Core Instrumentation and Reactor Assessment, CEA, Cadarache.
- [11] Perriguer, J. C., Berlin, C., Gauthier, J. C., and Gourdon, J., 1989, "In Core Neutronic Measurements in an Industrial Environment. Assessment of the Performances of the In-Vessel Neutronic Measurements Chains of SUPER-PHENIX 1," Proceedings of the Specialists' Meeting on in Core Instrumentation and Reactor Assessment, CEA.
- [12] Nervi, J. C., Marmonier, P., Eyraud, A., Perriguer, J. C., Rouches, P., and Verset, L., 1987, "Experimental Devices Used for Start-Up Operations of the SUPER-PHENIX Core," International Conference, ANS/ENS, Richland.
- [13] Photonis, 2015, "Photonis Fission Chamber for In-Core Use," <https://www.photonis.com/en/product/fission-chambers-core-use>.
- [14] Photonis, 2015, "Photonis Fission Chamber for Out-of-Core Use," <https://www.photonis.com/en/product/fission-chambers-out-core-use>.
- [15] Trapp, J. P., Haan, S., Martin, L., Perrin, J. L., and Tixier, M., 1997, "High Temperature Fission Chambers: State-of-the-Art," In-Core Instrumentation and Reactor Core Assessment. Proceedings of a Specialist Meeting, NEA, Mito-shi, Japan.
- [16] Angelone, M., Kliks, A., Pillon, M., Batistoni, P., Fischer, U., and Santagata, A., 2014, "Development of Self-Powered Neutron Detectors for Neutron Fluxmonitoring in HCLL and HCPB ITER-TBM," *Fusion Eng. Des.*, **89**, p. 2194–2198.
- [17] Ponti, G., 2014, "The role of medium size facilities in the HPC ecosystem: the case of the new CRESCO4 cluster integrated in the ENEAGRID infrastructure," International Conference on High Performance Computing and Simulation, IEEE.
- [18] ARi Industries, 2015, "Self Powered Neutron Detectors," http://www.arindustries.biz/wp-content/uploads/2015/02/019_self_powered_neutron_detectors.pdf.
- [19] KWD Nuclear Instruments, 2016, "Self Powered Neutron Detectors," <http://www.kwdnuclearinstruments.se/self-powered-neutron-detectors>.

Bibliografia

- [1] BP. *Statistical Review of World Energy, June 2015*. 2016. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>.
- [2] TERNA. *Bilanci Nazionali*. 2016. URL: <http://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/statisticheeprevisioni/bilancienergiaelettrica/bilancinazionali.aspx>.
- [3] D. Vandeplassche e L. Medeiros Romão. «Accelerator Driven Systems». In: *International Particle Accelerator Conference 2012, Contributions to the Proceedings*. A cura di IEEE. ISBN 978-3-95450-115-1. New Orleans, Luisiana, USA, 2012.
- [4] Generation IV international Forum. *main website*. 2016. URL: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public.
- [5] Maurizio Cumo. *Impianti Nucleari*. A cura di Casa Editrice Università La Sapienza. Roma, 2008.
- [6] TUM Università Tecnica di Monaco. *Lead-Cooled Fast Reactor*. 2010. URL: <http://www.notech.mw.tum.de/fileadmin/w00bil/www/documents/pdf/lectures/Nuk5Adds/lfr.pdf>.
- [7] IAEA. *Status of Fast Reactor Research and Technology Development*. Technical Report IAEA-TECDOC-1691. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012.
- [8] RisøNational Laboratory. *Russian Nuclear Power Plants for Marine Applications*. Report. Roskilde, Denmark: Norwegian Radiation Protection Authority, 2006.
- [9] IAEA. *Predicted radionuclide release from marine reactor dumped in the Kara Sea*. Technical Report IAEA-TECDOC-938. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997.
- [10] Craig Smith. *Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) Design: Safety, Neutronics, Thermal Hydraulics, Structural Mechanics, Fuel, Core, and Plant Design*. Technical Report. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2010.
- [11] T. Allen e D. C. Crawford. «Lead-Cooled Fast Reactor Systems and the Fuels and Material Challenges». In: *Science and Technology of Nuclear Installations 2007* (2007).
- [12] V. Domnich et al. «Boron Carbide: Structure, Properties and Stability under Stress». In: *Journal of American Ceramic Society* 94 (2011).
- [13] A. Alemberti et al. *Lead-cooled Fast Reactor (LFR) Risk and Safety Assessment White Paper*. 2014. URL: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-11/rswg_lfr_white_paper_final_8.0.pdf.
- [14] Alessandro Alemberti. *GIF Lead-cooled Fast Reactor Development Status*. 2016. URL: https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2016/2016-04-11-04-12-INPRO/016_Lead_Fast_Reactor.pdf.
- [15] Gregg W. McKinney. *MCNPX User's Manual Version 2.7.0*. Technical Report. New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory, 2011.
- [16] J. F. Briesmeister. *MCNP - A general purpose Monte Carlo code for neutron and photon transport*. Technical Report Report LA - 12625. New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory, 1993.

- [17] R. A. Forster e T. N. K. Godfrey. «A general purpose Monte Carlo code for neutron and photon transport». In: *Proceedings of the joint Los Alamos National Laboratory - Commissariàt à l'Energie Atomique Meeting*. A cura di Commissariàt à l'Energie Atomique. Cadarache, France, 1985.
- [18] Los Alamos National Laboratory. *RSICC CODE PACKAGE CCC-810 ABSTRACT*. 2016. URL: <https://rsicc.ornl.gov/codes/ccc/ccc8/ccc-810.html>.
- [19] G. Ponti et al. «The role of medium size facilities in the HPC ecosystem: the case of the new CRESCO4 cluster integrated in the ENEAGRID infrastructure». In: *Proceedings of the 2014 International Conference on High Performance Computing and Simulation*. A cura di IEEE. no. 6903807. Bologna, Italy, 2014, pp. 1030–1033.
- [20] Giovanni Bracco. *HPC in ENEA, stato dei Cluster e dei CED CRESCO a Portici*. 2015. URL: http://www.afs.enea.it/bracco/papers/Portici20151104_IncontroCINECA_v1.pdf.
- [21] J. Janssens, L. Mansani e A. Alemberti. *Reactor Design Summary Report of the ETDR, further development recommendations*. Technical Report WP3 - DEL032-2013. Leader Project, 2013.
- [22] E. Bubelis, K. Mikitjuk e W. Hering. *Plant data for the safety analysis of the ETDR (ALFRED)*. Technical Report WP5 - TEC058-2012. Leader Project, 2012.
- [23] F. Manni, L. Mansani e A. Alemberti. *Description, functional sizing and drawing of the main components of the EDTR control and shutdown rods*. Technical Report WP3 - TEC073-2014. Leader Project, 2013.
- [24] J. C. Gauthier, G. Granget e M. Martini. «Techniques de mesures neutroniques au démarrage de SPX2». In: *Proceedings of a Specialists' Meeting on IN CORE INSTRUMENTATION AND REACTOR ASSESSMENT*. A cura di CEA. Cadarache, France, 1989.
- [25] J. C. Perriguer et al. «In core neutronic measurements in an industrial environment. Assessment of the performances of the in-vessel neutronic measurements chains of SUPERPHÉNIX 1». In: *Proceedings of a Specialists' Meeting on IN CORE INSTRUMENTATION AND REACTOR ASSESSMENT*. A cura di CEA. Cadarache, France, 1989.
- [26] J. C. Nervi et al. «Experimental Devices used for Start-up Operations of the SUPERPHÉNIX core». In: *International Conference*. A cura di IEEE. Richland, USA, 1987.
- [27] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli. *Studio di fattibilità di sonde per la misura dei flussi neutronici di un reattore LFR. Concettualizzazione di test sperimentali preliminari sul reattore TAPIRO*. Technical Report FISS-LP2-052. ENEA ADP PAR 2013, 2014.
- [28] J.P. Trapp et al. «High temperature fission chamber: state-of-the-art». In: *In-core instrumentation and core assessment*. Mito-shi, Japan, 1996.
- [29] CRC. *Handbook, CRC material Science and Engineering*. 2000. URL: <https://www.memsnet.org/material/aluminumoxideal2o3bulk/>.
- [30] Glenn Elert. *Resistivity of Carbon, Diamond - The Physics Factbook*. 2004. URL: <http://hypertextbook.com/facts/2004/KerryRemulla.shtml>.
- [31] J.W. Vandersande e L.D. Zoltan. «Using high-temperature electrical resistivity measurements to determine the quality of diamond films». In: *Diamond and related Material* (1995).
- [32] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli. *Verifica di fattibilità di sonde commerciali per la misura dei flussi neutronici in reattori raffreddati al piombo. Proposta di studio teorico-sperimentale di SPND innovativi ottimizzati per reattori LFR*. Technical Report FISS-LP2-052. ENEA ADP PAR 2014, 2015.
- [33] M. Angelone et al. «Development of self-powered neutron detectors for neutron flux monitoring in HCLL and HCPB ITER-TBM». In: *Fusion Engineering and Design* 89 (2014).

- [34] G. Bignan et al. «Direct Experimental Tests and Comparison between Sub-miniature Fission Chambers and SPND for Fixed In-core Instrumentation of LWR». In: *In-core instrumentation and core assessment*. Mito-shi, Japan, 1996.
- [35] S. Guru e D. Wehe. «Instantaneous flux measurements using the background signal of the rhodium self-powered neutron detector». In: *Annals of Nuclear Energy* 19 (4) (1992).
- [36] C. Blandin e S. Breaud. «Selective and prompt self-powered neutron detectors for characterization of mixed radiation fields in reactors». In: *Reactor Dosimetry: Radiation Metrology and Assessment*, Philadelphia, USA, 2001.
- [37] W. Todt. «Characteristics of Self-powered Neutron Detectors Used in Power Reactors». In: *In-core instrumentation and core assessment*. Mito-shi, Japan, 1996.
- [38] T. Seidenkranz et al. *Experiences with prompt self-powered detectors in nuclear reactors of WWER type*. 2016. URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/009/18009870.pdf.
- [39] B. Pehlivanovic et al. «Comparison of unfolding approaches for monoenergetic and continuous fast-neutron energy spectra». In: *Radiation Measurements* 49 (2013) (2013).
- [40] Vitisha Suman e P.K. Sarkar. «Neutron spectrum unfolding using genetic algorithm in a Monte Carlo simulation». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 737 (2014) (2014).
- [41] Hosseini Sayed Abolfazl. «Neutron spectrum unfolding using artificial neural network and modified least square method». In: *Radiation Physics and Chemistry* 126 (2016) (2016).
- [42] Photonis. *CFUE32 fission chamber*. 2016. URL: <https://www.photonis.com/uploads/datasheet/ngd/CFUE32.pdf>.
- [43] Photonis. *CFUC06 fission chamber*. 2016. URL: <https://www.photonis.com/uploads/datasheet/ngd/CFUC06.pdf>.
- [44] ARi Industries. *Self Powered Neutron Detectors*. 2014. URL: http://www.ariindustries.com/catalog/self_powered_neutron_detectors.pdf.
- [45] KWD Nuclear Instruments. *Self Powered Neutron Detectors*. 2014. URL: <http://www.kwdnuclearinstruments.se/self-powered-neutron-detectors>.
- [46] Thermocoax. *Self Powered Neutron Detectors*. 2016. URL: <http://www.thermocoax.com/market/thermal-sensing-solutions-for-nuclear-industry/nuclear-spnd/>.
- [47] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli. «Fast Neutron-Flux Monitoring Instrumentation for Lead Fast Reactors: A Preliminary Study on Fission Chamber Performances». In: *Proceedings of the 2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering*. A cura di ASME. ICONE22-31011. Prague, Czech Republic, 2014.
- [48] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli. «Evaluation of the Current Fast Neutron Flux Monitoring Instrumentation applied to LFR Demonstrator ALFRED: capabilities and limitations». In: *Proceedings of the 2015 23rd International Conference on Nuclear Engineering*. A cura di JSME. ICONE23-1447. Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2015.
- [49] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli. «On capabilities and limitations of current fast neutron-flux monitoring instrumentation for the DEMO LFR ALFRED». In: *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science* 2(4).NERS-15-1205, doi: 10.1115/1.4033697 (2016).
- [50] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli. *Studio teorico di SPND innovativi ottimizzati per misure di flusso neutronico in noccioli di reattori veloci*. Technical Report LP2-A3f. ENEA ADP PAR 2015, 2016.

Ringraziamenti Istituzionali

Roma, 9 dicembre 2016

Vorrei fare un ringraziamento, ripercorrendo la mia storia, a coloro che hanno scientificamente e moralmente contribuito allo sviluppo di questo lavoro.

In primis, la Dott.ssa Lina Quintieri, persona di infinita disponibilità ed incommensurabile dolcezza, per la pazienza e l'attenzione dimostratemi nel corso di questi tre anni, a partire da quella prima volta in cui -non conoscendola- entrai timoroso nel suo ufficio non sapendo che cosa avrei trovato. Ho un ricordo di quel momento: una scrivania piena di documenti, a testimonianza dell'impegno profuso nel lavoro e della mole di attività da gestire contemporaneamente. Anche la mia scrivania, nel tempo, sarebbe diventata così: ora lo so. Principiante del metodo Monte Carlo e dei codici di riferimento del settore, Lina ha contribuito ad indirizzare la via, aiutandomi -con il suo consiglio- ad orientare correttamente lo studio, in tutto il corso del lavoro.

Ringrazio il Dott. Mario Carta per la preziosa collaborazione ed il sempre valido supporto. Con sommo dispiacere, questa esperienza di dottorato non ha avuto la possibilità di corredarsi di una sezione sperimentale, nonostante il Dott. Carta mi incentivasse continuamente, con il suo interesse e la sua esperienza, a continuare ad investigare nella ricerca sull'argomento di questa tesi, essendo lo studio condotto ampiamente necessitante di verifiche operative, data la pregnanza delle applicazioni nei contesti della reattoristica GEN IV e delle sorgenti di neutroni a flusso intenso. Sono sicuro che avrei imparato immensamente da lui, se avessimo avuto la disponibilità operativa ad impiantare esperimenti atti a validare le conclusioni da me raggiunte.

Ringrazio i tecnici di ENEA-UTICT, ed in particolare l'Ing. Guido Guarnieri per il supporto costantemente fornito alla risoluzione dei problemi legati all'installazione ed al corretto funzionamento dei codici di calcolo sull'infrastruttura CRESCO4. Guido è stato in assoluto il primo a sopportare le mie deficienti e scarse conoscenze d'informatica nei riguardi di questo super-computer con cui sono così affine a collaborare. A seguire, ringrazio anche l'Ing. Giovanni Bracco e l'Ing. Fiorenzo Ambrosino, che -soprattutto all'ultimo- sono accorsi in mio aiuto.

Ringrazio il Laboratorio ENEA/FSN/FISS/RNR di Casaccia, in particolare nella persona del Dott. Orlando Fiorani, per il supporto fornitomi, nell'ultimo anno, per quanto concerne le simulazioni Monte Carlo del reattore *TAPIRO*, con tutte le informazioni e il materiale del caso messi a mia disposizione.

Mi auguro che le proficue occasioni di collaborazione non terminino qui, ma si protraggano nel futuro per molto, molto tempo.

Ringraziamenti Personali

Roma, 9 dicembre 2016

Siamo di nuovo alla resa dei conti.

E questa volta i conti sono lunghi: tre anni sono volati, ma quello che si portano dietro è immensamente grande dentro di me. La mente è affollata e vivida di ricordi, esperienze, raggiungimenti, delusioni, paure. Tre anni complicati, ma belli, con la soddisfazione più grande di tutte: quella di sperimentarsi in ciò che si desidera fare nella vita, e trovarsi a proprio agio, dormendo anche 5 ore per notte, ma senza mai pentirmi o immusonirmi di fronte all'ennesima sveglia alle 06:00 del mattino per andare alla fermata della navetta ENEA.

Se dovessi racchiudere tutto in una parola, riassumerei in *soddisfazione*. E se sono arrivato qui, lo devo a molte, tante persone, che -dopo la mia famiglia- hanno creduto in me, dandomi una possibilità.

Questa storia comincia il 5 novembre 2012, quando il Prof. Remetti smette di essere per me *il Professore* e diventa Romolo. Un po' strana all'inizio questa confidenza, ma presto modificata in usanza quotidiana. Non lo sapevo allora, ma stavo entrando nel mondo complesso e meraviglioso delle misure nucleari e della radioprotezione, allora conosciuto semplicemente dalle slide del corso, ed oggi il mestiere che voglio fare nella vita.

Ne segue che un primo enorme, gigante GRAZIE va a Romolo, per avermi dato la possibilità di iniziare questo percorso. A questo, nel tempo si sono aggiunti tanti altri "grazie", costruiti nella collaborazione e nella fiducia di ogni giorno.

Un ringraziamento cronologicamente conseguente va a Mauro Cappelli e Francesco Cordella di ENEA: grazie al loro lavoro e la loro passione, è nata l'idea di questo studio che -proposto a Romolo nel giugno 2013- è divenuto il mio lavoro di dottorato, a valle della vittoria di questo concorso, iniziato così, tanto per non lasciar nulla d'intentato.

A Mauro devo preziosi consigli sull'impostazione del lavoro, sulla scrittura degli articoli, sul come si sta al mondo, quello del lavoro, che non sempre lascia spazio a persone "troppo buone", che non realizzano quanto sia necessario combattere per raggiungere i propri obiettivi.

A Francesco devo le innumerevoli occasioni di confronto tecnico, in tutto e per tutto, l'infinita disponibilità di tempo a qualsiasi mio bisogno, e le grasse risate nella pausa alla macchinetta del caffè o negli inconvenienti della vita di laboratorio.

La storia continua con Nadia Cherubini, o meglio, si approfondisce visto che il primo ricordo che ho di Nadia è una lezione sulle *Tecniche Neutroniche di Correlazione Temporale* durante il corso di Romolo. Ho difficoltà a scrivere di Nadia, perché mi ricorda molto mia madre, e ciò mi commuove. Le devo sicuramente l'accoglienza e la disponibilità che le sono congeniali, perché per lei tutti sono importanti, specialmente gli studenti. Grazie per le innumerevoli possibilità di crescita ricevute e per quelle -sono sicuro- che potrò avere. Probabilmente, lei ha creduto in me prima che ci credessi io stesso.

Nadia mi porta immediatamente nella mente Giuseppe Marzo. Augusto lo ometto, perché altrimenti penso a lui con una corona d'alloro in testa. Grazie a Giuseppe per il vulcano d'idee che è, per la disponibilità a lavorare e confrontarci in tutte le ore della giornata, *vis-à-vis* e per telefono, e per la paziente supervisione e revisione degli articoli. Anche lui, probabilmente, ha creduto in me prima che ci credessi io stesso.

Non posso a questo punto non ricordarmi di Giada, o Giadina, come la chiamo io. Abbiamo avuto il piacere di cominciare a lavorare nell'ambito del progetto EDEN, per me lavoro e per lei tesi, e -da allora- la nostra collaborazione a stretto contatto continua ogni giorno, essendo anche lei Dottoranda, come -ahimè- lo sono stato io. Grazie a Giada per l'infinita pazienza a sopportarmi (so che posso essere pesante), a raccogliere le mie lamentele e tristezze, ma anche per il condividere le gioie di questo lavoro così bello ed entusiasmante.

Seguono Mauro Capone ed Alfonso Compagno, per la disponibilità ad ascoltare le mie idee nel lavoro di squadra ed al supporto ricevuto quando ne ho avuto bisogno. Diciamo che ce ne siamo inventate di tutti i colori, pur di affrontare e superare le difficoltà incontrate.

Come poi non ringraziare Tiziana Guarcini, *mamma* di CATNUC alla pari di Nadia, per la gestione di tutte le nostre carte (vero Giada?) e per i momenti *dolci* regalatici insieme alla Bricca del fido Niccolò Ratto (qui Tiziana storcerà il naso)? E a seguire Ermanno Piccinelli, Danilo Casagrande, Ettore Ceresani, Salvatore Fiore, Pietro Coletta e Letizia Cozzella?

Ed un pensiero anche per Gian Marco Contessa, alias il *Conte*. Mi ricordo il timore che riserbavo nei suoi confronti al nostro primo incontro, quando il caro Giuseppe entrò un giorno nella mia stanza dicendomi 'il mio EQ vorrebbe incontrarti'! E dentro di me: perché io? Un timore ingiustificato, ma non potevo saperlo. Da allora in avanti la collaborazione con Gian Marco è stata ed è occasione di confronto ad ogni livello, con una sollecitazione continua alla scrittura di nuovi articoli e cimento in nuove attività.

In ultimo, ma non ultimo, Alessandro Dodaro, che silenziosamente si occupa con passione, dedizione e pazienza delle esigenze di tutti. In un certo senso, veglia sopra tutti noi, e fa un po' il lavoro sporco, preoccupandosi delle relazioni con il mondo esterno, lasciando a noi la parte migliore, quella degli esperimenti in laboratorio. Tutto va bene finché a mensa non occupi il suo posto di fronte Tiziana.

Un pensiero va anche a tutti gli studenti che "mi sono passati per le mani" in questi anni, per quello che mi hanno consentito di dar loro e per quello che loro hanno dato a me.

Forse mi verrebbe da dire di più, ma risulterei eccessivo.

A tutti, un caro abbraccio.

Vostro,

Luigi