

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI FISICA ED ASTRONOMIA “Galileo Galilei”  
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA



## Materiali di prima parete in reattori nucleari di prossima generazione

Relatore: prof. ALBERTO CARNERA

Laureando: ANDREA DA RUOS

ANNO ACCADEMICO 2014/2015



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Danneggiamento della Prima Parete</b>	<b>9</b>
2.1	Degradazione di forma e dimensione dei grani . . . . .	9
2.2	Erosione . . . . .	11
2.2.1	Formazione di uno strato deformato . . . . .	13
2.2.2	Forma del reticolo cristallino . . . . .	14
2.3	Ritenzione e rilascio del trizio . . . . .	15
2.4	Codeposizione del carbonio . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Scelta del Materiale</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>25</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>27</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

Per ottenere lo stato di plasma sono necessarie temperature estremamente elevate ( $> 10^8 K$ ); non esistendo materiali in grado di sopportare un simile stress termico, si sfrutta la quasi totale ionizzazione di un plasma per confinarlo magneticamente. I tokamak (dal russo: toroidal chamber with ma-

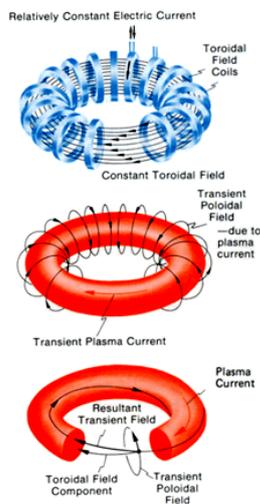


Figura 1.1: Configurazione magnetica: il campo toroidale è generato dalle bobine percorse da corrente (in alto); componente poligale del campo magnetico generato dalla corrente di plasma; composizione del moto toroidale e di deriva delle particelle che si avvicinano alle pareti (in basso).

gnetic coils), sfruttano una serie di bobine per generare un campo magnetico a toro che vincoli le particelle cariche a girare attorno all'asse di simmetria della macchina e un campo verticale che ne determini la posizione all'interno della camera.

La disomogeneità del campo magnetico toroidale e la sua curvatura generano velocità di deriva delle particelle, che acquisiscono una componente poloidale della velocità. Tale componente poloidale ( $v_{pol}$ ) è proporzionale al

gradinate del campo magnetico secondo

$$\frac{v_{pol}}{v_{\perp}} \simeq \frac{\rho}{R}$$

dove  $\rho$  è il raggio di Larmor dovuto al moto principale delle particelle,  $R$  è il raggio maggiore del toro e  $v_{\perp}$  è la componente della velocità perpendicolare al campo magnetico toroidale. Vista la dipendenza da  $T^{1/2}$  della velocità, questa risulta molto elevata e grazie alla componente poloidale la particella può eventualmente andare a sbattere contro la parete.

Le interazioni delle pareti con il plasma influiscono fortemente sul comportamento dei tokamak. L'erosione dovuta al plasma causa rilascio di impurità che lo raffreddano e diluiscono; la deposizione del materiale eroso sulle pareti modifica le proprietà di quest'ultime e può portare, a lungo termine, a stoccaggio del trizio a livelli pericolosi.

Un passo avanti nell'affrontare questo problema è stato fatto con l'introduzione del divertore, questo modifica la forma del campo di confinamento magnetico e conseguentemente il modo in cui si ripartiscono carburante, impurità, etc... come ora verrà spiegato. Il punto da cui partire nel rap-

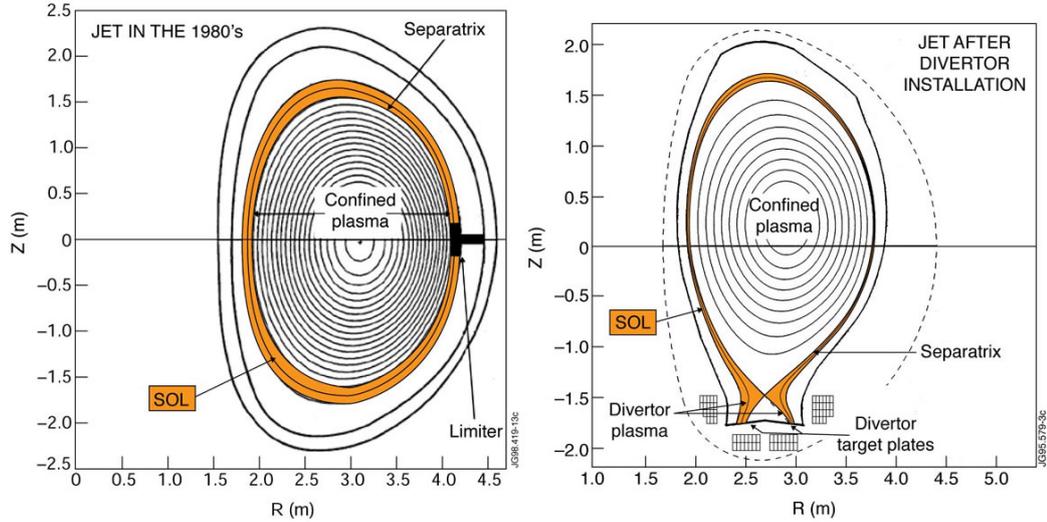


Figura 1.2: Camera principale di JET prima (sinistra) e dopo (destra) l'installazione del divertore.

presentare le relazioni tra nucleo e zone esterne del plasma e pareti è la potenza generata nel nucleo di plasma. La parte di potenza non irradiata per bremsstrahlung è trasportata trasversalmente alle linee di campo verso la edge region (figura 1.3); il plasma esterno ha una forte influenza sul plasma del nucleo e quindi sul tempo di confinamento.

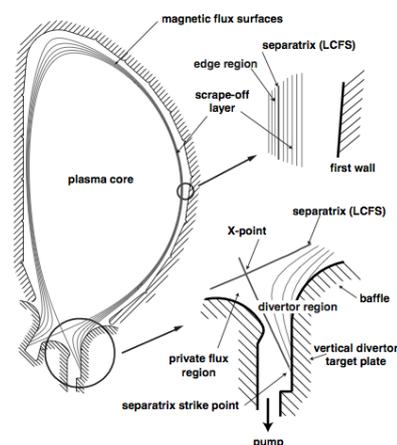


Figura 1.3: Sezione trasversale di camera di tokamak con ingrandimento della zona del divertore e dettaglio delle zone limitrofe del LCFS.

La superficie di campo chiusa più esterna è caratterizzata da uno zero nella sua componente magnetica poloidale noto come X-point, essa è nota come last closed flux surface (LCFS) o separatrice. Come si vede dalla figura 1.3, le linee di campo contenute della separatrice sono chiuse; come sostenuto da Federici [1], appena all'interno di questa, nella edge zone è presente un gran numero di impurità non completamente ionizzate e probabilmente qualche particella neutra. Una parte della potenza è trasportata verso la parete da radiazione e dalle particelle neutre, quella restante entra nella zona appena all'esterno della LCFS, nota come scrape-off layer (SOL), o per conduzione o per convezione; lo scrape-off layer così chiamata perchè la potenza è rapidamente catturata per conduzione di calore elettronica lungo le linee di campo aperte che sono deviate per intersecare pareti bersaglio in una zona per l'appunto chiamata divertore.

Il trasporto perpendicolarmente alle linee di campo continua, sempre per conduzione e/o convezione, nel SOL. In questa zona il rapporto tra componente perpendicolare e parallela alle linee di campo del trasporto fornisce la costante di ampiezza  $\lambda_p$  della potenza (distanza a cui questa è ridotta di un fattore  $1/e$ ), che di solito risulta essere tra i 3 e 10mm (stimata tra i 5 e i 30mm per ITER), la quale definisce quindi le condizioni dal plasma esterno responsabile delle interazioni con la prima parete. Le altre grandezze fondamentali per descrivere le interazioni con la prima parete sono, come vedremo, temperatura, densità, flusso di particelle e di potenza del plasma di bordo; per esse la costante di ampiezza è generalmente 2~5 volte maggiore di quella relativa alla potenza. Il punto in cui queste grandezze sono maggiori, quindi l'interazione con la parete è più intensa, è il punto di intersezione

della separatrice con la parete (detto strike point), appunto nella zona del divertore.

## Capitolo 2

# Danneggiamento della Prima Parete

Elevate temperature e flussi di ioni tendono a causare erosione, sputtering e assorbimento di isotopi dell'idrogeno. Non esistendo materiali inerti al plasma e quindi non soggetti a tali fenomeni va scelto quello (o quelli) che più si adatta a sopportare gli stress a cui sarà sottoposto.

Federici et al. [2] riportano come dati previsti per il funzionamento di ITER, nella zona del divertore, temperature intorno ai 1000 °C e flussi di particelle fino a  $10^{24} DT/m^2s$ . Per la sua elevata temperatura di fusione e soglia di sputtering il tungsteno (W) è uno dei materiali di prima parete più usati per la costruzione di divertori di nuova generazione.

Molti studi sono stati condotti sul comportamento di W in varie leghe quando sottoposto a condizioni simili a quelle di tokamak come ITER.

### 2.1 Degradazione di forma e dimensione dei grani

Negli esperimenti condotti da Greuner, Maier et al [3] diversi campioni di tungsteno (diverso spessore, composizione,...) sono stati esposti a flusso di H o a flusso misto di 94 H/6 He con temperature superficiali tra i 1500 °C e i 2000 °C e una fluenza sempre di circa  $10^{25}m^{-2}$ . Le superfici e le sezioni trasversali sono poi state studiate.

I grani del reticolo, esposti al flusso di particelle, subiscono variazione di forma dimensione con conseguente modifica delle proprietà meccaniche del materiale; oltre la soglia di ricristallizzazione è infatti stata rilevata una significativa degradazione di tali proprietà. Come possiamo osservare in fi-

gura 2.1 i grani tendono ad accrescersi. Confrontando i campioni esposti

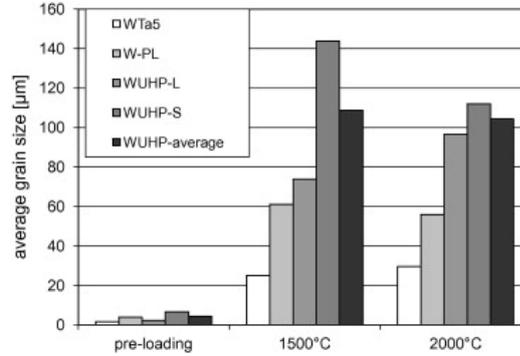


Figura 2.1: Aumento della dimensione media dei grani a seguito di irraggiamento nei diversi campioni

alle due diverse temperature si nota che nel passaggio da 1500 °C a 2000 °C non si hanno ulteriori crescite (si può quindi pensare a un processo a soglia). È interessante sottolineare che per l'ultra high purity tungsten (W-UHP) tra 1500 °C e 2000 °C resta costante la media tra le due direzioni di crescita (WUHP-average), tale asimmetria scompare nel campione a 2000 °C. Va osservato che la lega di tungsteno-tantalio (5%Ta) subisce l'incremento minore, probabilmente grazie alla stabilizzazione dei grani tipica delle soluzioni solide.

Per quanto riguarda forma e disposizione dei grani, bisogna distinguere i due casi di esposizione al solo idrogeno o a flusso misto. Diversamente da quanto accade ai campioni nel primo caso (non si ha formazione di vescicole, ma solo di cavità della dimensione delle decine di nm e le modifiche sono dominate da crescita dei grani e sputtering fisico), nel secondo, l'esposizione a flusso di 94 H/6 He ha mostrato cambiamenti significativi a superficie e substrato. Come si vede dalla figura 2.2 (parte in grigio chiaro) la morfologia del campione a seguito dell'esposizione è caratterizzata da un insieme di strutture morbide e ondulate, della dimensione del  $\mu\text{m}$ , collegate da cavità dell'ordine della decina di nm ed è qualitativamente identica per le due temperature superficiali di 1500 o 2000 °C. Non si hanno misure relative al contenuto di tali cavità, che permettano di dedurre se siano o meno riempite da gas. Un'analisi quantitativa rivela distinte differenze nei due diversi regimi di temperatura. I dati su numero e dimensione delle cavità mostrano un andamento bimodale (come si vede in figura 2.3) per il set a 1500 °C con due massimi a circa 50 e 150 nm; mentre sono chiaramente più spostati verso cavità più piccole ma più numerose i dati relativi al secondo set, contrariamente a quanto ci si aspetterebbe. Per equilibrio termodinamico

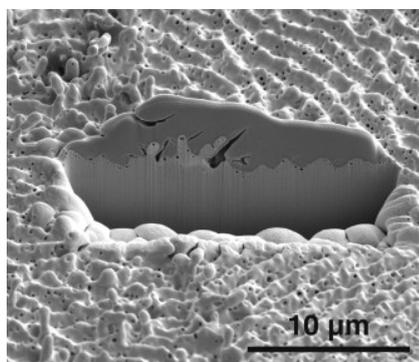


Figura 2.2: Sezione trasversale di W-PL dopo l'esposizione a 2000 °C a flusso misto. La parte in grigio scuro è dovuta alla preparazione per la scansione. Le modifiche morfologiche del campione sono visibili in grigio chiaro.

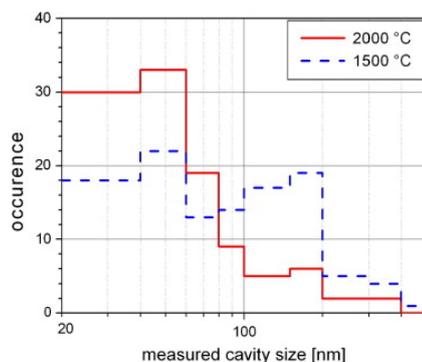


Figura 2.3: conteggio delle cavità in funzione della profondità per l'esposizione a 1500 °C e 2000 °C

infatti temperature maggiori comportano pressioni maggiori favorendo bolle di grossi dimensioni. Nel caso citato però non si ha semplice riscaldamento di He precedentemente stoccato, ma un flusso discontinuo di particelle di H e He che urtano durante l'esposizione, il campione è inoltre sottoposto a sforzi compressivi dovuti alla dilatazione termica; l'insieme di questi fattori potrebbe essere la causa della bimodale.

## 2.2 Erosione

Oltre alle modifiche morfologiche appena descritte, la superficie del tungsteno irradiato è soggetta ad erosione. Greuner, Maier et al [4] hanno studiato questo fenomeno attraverso l'impiantazione di marcatori nel reticolo di W, la distanza tra questi e la superficie a seguito dell'esposizione ha permesso di dedurre l'entità dell'erosione. La precisione di questo metodo (qualche

centinaio di nanometri) è tale da consentire la misura dell'erosione dei singoli grani (che dopo l'irraggiamento raggiungono dimensioni superiori ai  $60 \mu\text{m}$ ).

Le condizioni in cui è avvenuto l'esperimento sono simili a quelle presentate parlando dei grani: un flusso di 94% H/ 6% He di  $9 - 10.5 \text{ MW m}^{-2}$  e densità di particella di  $3.1 - 3.7 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  è stato proiettato con incidenza normale su diversi campioni a 4 diversi regimi di temperatura superficiale costante (600, 1000, 1500, 2000 °C) per una fluensa di  $1.7 - 6.9 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ . In

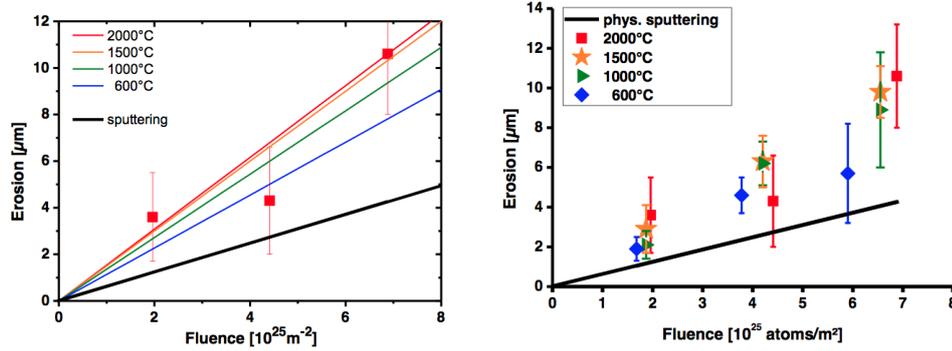


Figura 2.4: Andamento dell'erosione calcolato con i marcatori. Si nota il maggior tasso d'erosione rispetto al solo sputtering fisico (linea scura).

figura 2.4 è riportato l'andamento stimato dell'erosione per solo sputtering fisico nelle condizioni sopra descritta (linea scura). La prima informazione che si può evincere è che l'erosione totale è circa il doppio di quella aspettata per ogni temperatura e fluensa. Inoltre i plot evidenziano un incremento sistematico nella pendenza con l'aumentare della temperatura di superficie; è quindi sensato ipotizzare una dipendenza del tasso di erosione dalla temperatura.

Non sapendo a priori quanto i dati raccolti potessero adattarsi a una distribuzione statistica sull'erosione è stato necessario assumere la presenza di outlier; di conseguenza i dati sono stati analizzati con un metodo diverso dai minimi quadrati (molto sensibile agli outlier): una stima più robusta è stata ottenuta minimizzando gli scarti assoluti. Avendo zero erosione a zero fluensa si è assunto un modello lineare:

$$Y = a \cdot X$$

con  $Y :=$  erosione;  $X :=$  fluensa;  $a :=$  tasso di erosione. Con  $a$  ricavata per l'appunto via

$$\min_a \sum_i \frac{|Y_i - a \cdot X_i|}{\sigma_i}$$

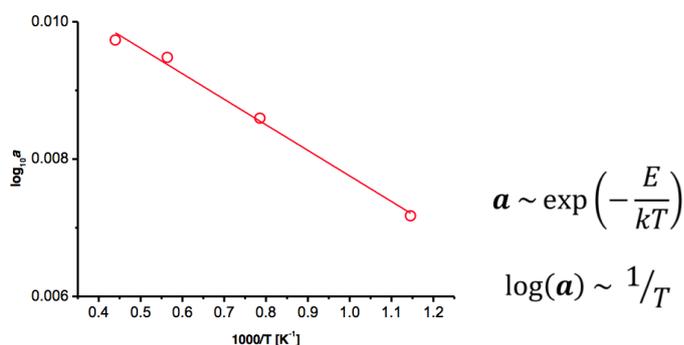


Figura 2.5: Interpolazione ed equazione di Arrhenius:  $\log(a)$  in funzione dell'inverso della temperatura. Come si vede i risultati (ottenuti minimizzando gli scarti assoluti), entro l'errore, cadono tutti all'interno del plot lineare.

questo metodo ha fornito risultati di  $a$  variabili da  $7.2 \times 10^{-3}$  (600 °C) a  $9.7 \times 10^{-3}$  (2000 °C) (la stima per lo sputtering fisico fornisce  $a = 4.1 \times 10^{-3}$  e si assume indipendente dalla temperatura).

Per studiare la dipendenza del tasso di erosione dalla temperatura i vari valori di  $a$  sono stati interpolati con quelli di  $T$  in un Arrhenius plot (che descrive un meccanismo attivato termicamente). Si può quindi dedurre la presenza di un meccanismo di erosione attivato termicamente in cui, l'energia di attivazione, indicata come  $E$ , estrapolata dal coefficiente angolare, si trova corrispondere a circa 0.04eV.

Possibili meccanismi: i dati mostrano che la quantità di materiale eroso supera il valore predetto dallo spauttering e evidenziano un meccanismo di erosione attivato termicamente. Valutiamo le due interpretazioni più plausibili.

### 2.2.1 Formazione di uno strato deformato

La figura 2.6 ci mostra l'ingrandimento della sezione trasversale dei campioni sottoposti al flusso di particelle (nel caso di massima fluenza) per le 4 diverse temperature superficiali. Mentre a 600 °C si osservano solo strutture simili a piccole crepe localizzate, alle altre temperature si riconosce la formazione delle cavità già descritte parlando dei grani (come detto non ci sono dati che permettano di capire se queste siano o meno riempite da gas).

Per ottenere una maggiore comprensione a livello quantitativo di questo fenomeno, sono stati misurati gli spessori degli strati affetti da formazione di cavità alle diverse temperature nei casi di massima e minima fluenza. I risultati sulla profondità sono sotto esposti in funzione della fluenza, sono

state inoltre riportate le righe relative allo stopping range di idrogeno ed elio (figura 2.7).

Entro l'errore, la profondità di formazione a 600 °C coincide con lo stopping range di H, mentre per le altre temperature si è rilevata una profondità di circa 4 volte superiore allo stopping range di H, inoltre i risultati degli altri tre campioni (1000, 1500, 2000 °C), entro l'errore, coincidono per il più basso valore della fluenza; questo comportamento sottolinea la presenza di una temperatura di soglia, compresa tra i 600 °C e i 1000 °C. Oltre tale soglia non c'è ulteriore aumento della profondità affetta da formazione di cavità (similmente a quanto osservato per la crescita dei grani).

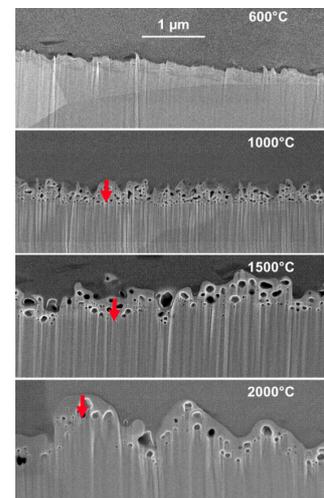


Figura 2.6: Ingrandimento ( $\mu\text{m}$ ) della sezione trasversale dei campioni dopo l'esposizione alle 4 diverse temperature. Si distingue chiaramente come a 600 °C non si abbia formazione di cavità; a 1000 °C si sono già formate le prime; nel passaggio tra 1500 °C e 2000 °C le dimensioni di queste si riducono.

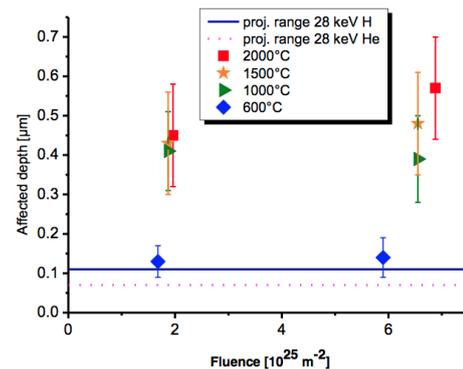


Figura 2.7: Formazione delle cavità in funzione della fluenza alle diverse temperature. Si nota l'andamento a soglia. Come riferimento compaiono anche gli stopping power dei H e He di energia di 28keV.

### 2.2.2 Forma del reticolo cristallino

è stata riscontrata una direzione preferenziale per i campioni esposti a 1500 °C e 2000 °C nel reticolo del tungsteno col piano (110) parallelo alla superficie

di loading. Altri studi hanno evidenziato che lungo questa direzione si ha incremento del tasso di erosione fino al 10% (spiegabile qualitativamente considerando che i piano (110) sono quelli con la distanza planare maggiore); ciò sarebbe in accordo con la maggiore erosione riscontrata campioni esposti alle temperature più alte, ma non riesce a spiegare l'aumento del tasso di erosione del 35% tra l'esposizione a 600 °C e 2000 °C.

## 2.3 Ritenzione e rilascio del trizio

Gli isotopi dell'idrogeno, al cui flusso sono sottoposte le pareti, permeano in quest'ultime per poi diffondere all'interno di esse e depositarsi.

Otsuka, Tanabe et al. [5,6] hanno studiato il comportamento di due diversi campioni di ferrite (F82H) dello spessore di 2.6mm rivestita da uno strato di W depositato per plasma-spray, uno in ambiente (dimensione delle particelle di 50 $\mu m$ ) e uno sotto vuoto (17 $\mu m$ ), (porosità dei rivestimenti rispettivamente del 6% e 0.6%), esposti a scariche a bagliore (dc) di idrogeno contenente trizio ( $T/H = 10^{-4}$ ). L'esposizione è stata condotta per entrambi i campioni sia a 180 °C che 300 °C per un periodo di 2h, la distribuzione del trizio all'interno dei campioni è stata poi misurata per tritium imaging plate (TIP) technique, la cui risoluzione spaziale è di 50 $\mu m$ . Dall'immagine sopra si nota che, a parte l'elevata concentrazione di T in un primo strato dello spessore di qualche centinaio di  $\mu m$ , la distribuzione nel rivestimento è quasi uniforme; dai profili di concentrazione fatti parallelamente alla superficie esposta si vede che il trizio si distribuisce uniformemente anche in tale direzione. La microstruttura porosa del rivestimento infatti permette a T di diffondere attraverso i pori e muoversi lungo i bordi dei grani per poi essere assorbito da questi o intrappolato sulla loro superficie. Il trizio assorbito dai grani, insieme a quello legato, causa il profilo piatto (inteso come privo di picchi isolati) che abbiamo visto (ricordiamo la risoluzione del TIP 50 $\mu m \geq$  dimensione dei grani, che quindi non è in grado di evidenziare i picchi di concentrazione in corrispondenza dei grani).

La maggior concentrazione osservata nel tungsteno depositato a vuoto (VPS-W), rispetto a quello depositato in atmosfera (APS-W), quando esposto a 180 °C, può quindi essere attribuita alla maggior superficie di grani a disposizione vista la loro minor dimensione. Mentre alle temperature più alte il più veloce processo di diffusione all'interno dei grani e il minor intrappolamento da parte di questi in corrispondenza della superficie danno il profilo piatto che vediamo in figura 2.8.

Nonostante la minor solubilità dell'idrogeno nel tungsteno rispetto alla ferrite, osserviamo una maggior concentrazione di trizio nel rivestimen-

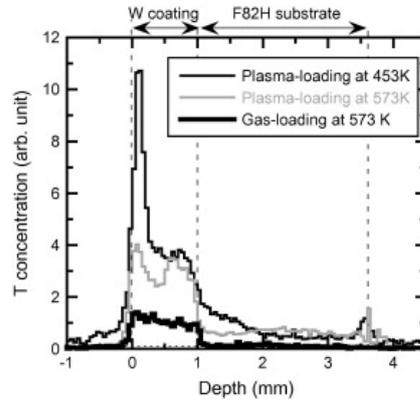


Figura 2.8: Profili di profondità del trizio del APS-W esposto a plasma o gas a diverse temperature.

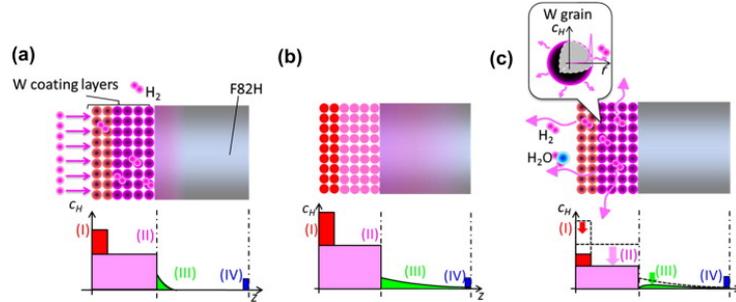


Figura 2.9: Schematizzazione del metodo di intrappolamento degli isotopi di H in prossimità dei grani nei primi momenti dell'esposizione al plasma (a), appena dopo l'esposizione (b), dopo stoccaggio o ricottura (c).

to; questo, insieme alle considerazioni sopra, consolida il modello del trizio fortemente legato in prossimità e all'interno dei grani.

Il forte picco di concentrazione in prossimità della superficie sembra dovuto a difetti nel reticolo, probabilmente ossidi con legami  $-OT$ , introdotti dall'esposizione come ipotizzato in riferimento [10]. La figura 2.8 (APS-W) da una conferma all'idea dei siti di intrappolamento introdotti dall'esposizione al plasma: si vede il picco per l'esposizione a plasma a  $180^\circ\text{C}$ , ma non si vede lo stesso fenomeno per l'esposizione a gas.

Alcuni dei campioni esposti sono stati poi immagazzinati per diversi periodi di tempo, altri sono stati sottoposti a ricottura a  $400^\circ\text{C}$  o a  $600^\circ\text{C}$  per 10 minuti per studiarne il rilascio di trizio. In figura 2.9 vediamo una rappresentazione schematica del processo: in fase d'esposizione gli isotopi dell'idrogeno si accumulano in prossimità o all'interno dei grani per poi ricombinarsi come  $H_2$ ; durante lo stoccaggio o la ricottura l'idrogeno ricombinato desorbe. Dal

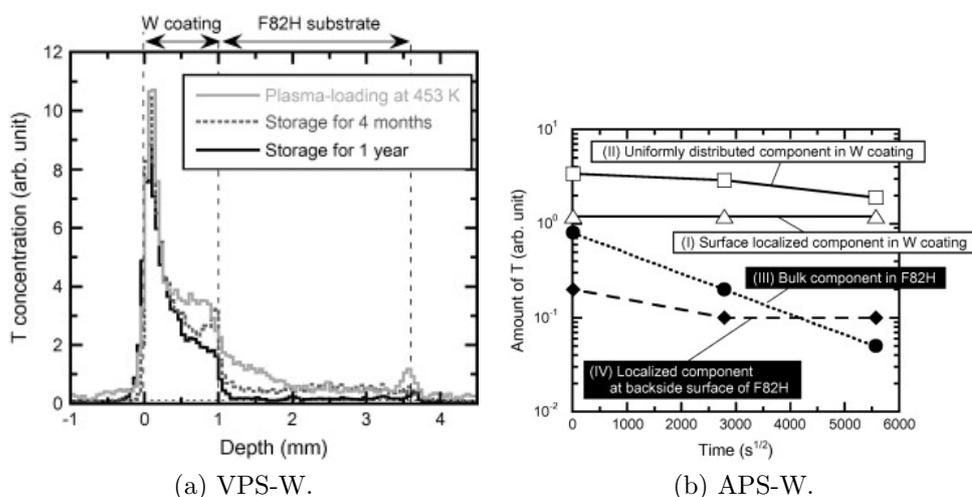


Figura 2.10: Desorbimento del trizio dal tungsteno esposto a plasma, a seguito di stoccaggio di 4 mesi o un anno. La componente in prossimità della superficie risulta pressoché invariata a causa dei siti di intrappolamento intridotti dall'esposizione al plasma.

profilo a dall'interpolazione riportati possiamo anche vedere in che quantità avviene il desorbimento: nella zona di profilo piatto, in cui, come detto, gli isotopi sono legati in prossimità o all'interno dei grani la concentrazione di trizio è circa dimezzata dopo un anno, mentre è pressoché invariata in prossimità dei difetti creati dall'esposizione, a indicarne il forte legame (figura 2.10).

Anche per ricottura si ha desorbimento; come ci si può aspettare lo strato superficiale richiede i più alti valori di temperatura ed ha comunque il più basso tasso di rilascio (figura 2.11). È interessante osservare il trend della quantità di trizio con il variare della temperatura. Mentre a  $400^\circ\text{C}$  la concentrazione di trizio è pressoché invariata, a  $600^\circ\text{C}$  è drasticamente diminuita; sembra che il processo avvenga a soglia. È già stato osservato un comportamento a soglia parlando della modifica dei grani e dal momento che il modello presentato per la ritenzione del trizio prevede il suo intrappolamento in prossimità dei grani stessi, è sensato confrontare le due situazioni. Osservando il tasso di rilascio del deuterio in funzione della temperatura possiamo trarre un'altra conferma del rilascio dell'idrogeno a soglia. In referenza [2] viene proposta una stima basata sul recombination-limited model per il calcolo del trizio accumulato, questa fornisce 800g accumulati alla fine della basic performance phase (BPP della durata prevista di 10 anni). Federici et al. osservano che tale modello andrebbe implementato con il fenomeno della saturazione.

Riprendendo i risultati di Otsuka, Tanabe et al. [6] si nota infatti che

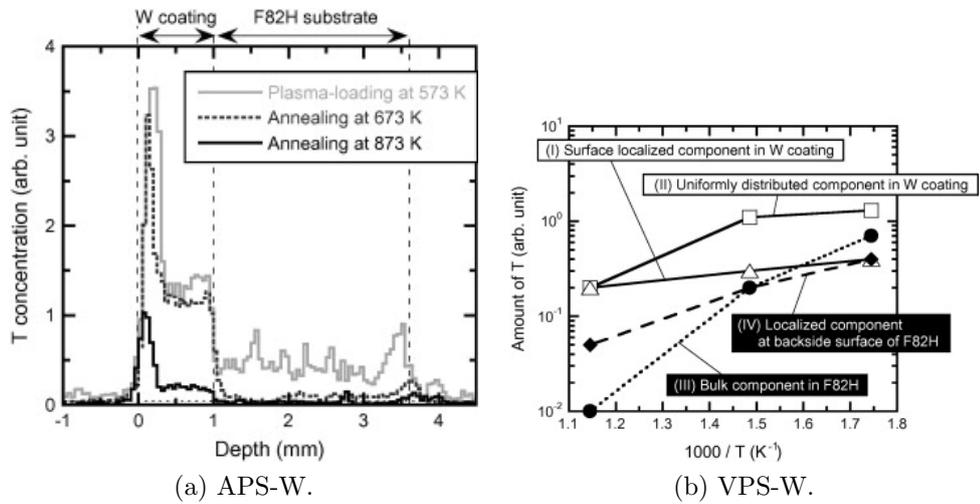


Figura 2.11: Desorbimento del trizio dal tungsteno esposto a plasma, a seguito di ricottura a 400 °C e 600 °C.

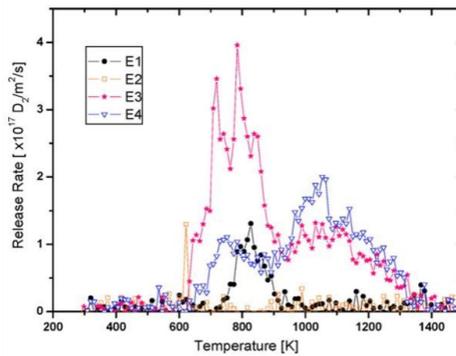


Figura 2.12: Desorbimento del deuterio da VPS-W in funzione della temperatura. E1, . . . ,E4 si riferiscono all'esposizione a plasma a 4 diverse temperature tra i 40 e i 450 °C (temperature esatte non riportate).

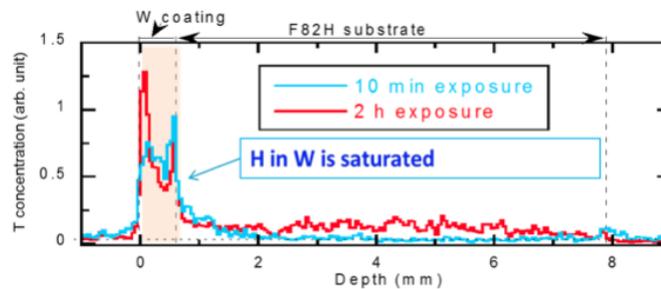


Figura 2.13: Saturazione durante l'esposizione a 200 °C.

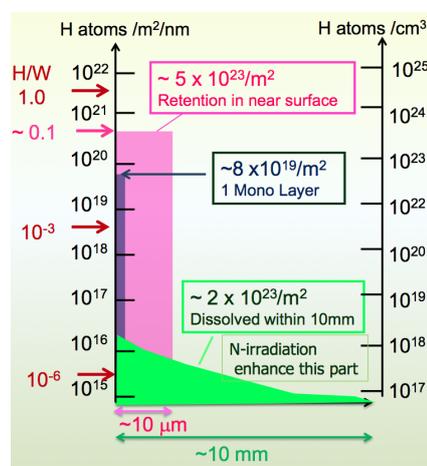


Figura 2.14: Capacità massima di ritenzione di H in W. Sono evidenziati anche i termini dovuti ai legami indotti in prima superficie (mono layer) e dovuti alla diffusione.

nella zona di profilo piatto la quantità di trizio accumulata dopo 10 min di esposizione o dopo 2h è identica; il trizio è quindi saturato intorno e all'interno dei grani. Nello strato in prossimità della superficie inoltre il rapporto tra atomi di idrogeno e tungsteno è costante ( $\sim 0.1$ ), come ci si aspetterebbe in caso di saturazione. Implementando la saturazione la stessa stima prevede un accumulo di 105g di trizio.

## 2.4 Codeposizione del carbonio

Alcune zone del divertore vengono costruite in compositi in fibra di carbonio (CFC). A causa dell'elevato tasso di erosione dei CFC la particelle rimesse finiscono nel plasma dove sono ionizzate da elettroni energetici e ridepositate sulle armature in tungsteno insieme a particelle del carburante come deuterio e trizio (si parla infatti di codeposizione). Questo fenomeno può rappresentare un rischio per la sicurezza; infatti misure di laboratorio hanno mostrato che gli strati codepositati, quando esposti all'atmosfera, possono decomporsi e rilasciare trizio a temperature  $\geq 250$  °C. È stato infatti posta come norma di sicurezza un accumulo di trizio massimo di 1000g, oltre il quale le operazioni devono essere sospese e le pareti pulite [2].

Per studiare questo fenomeno campioni di tungsteno su un supporto di grafite sono stati esposti a plasma e del gas di CD4 è stato pompato per simulare la presenza di impurità a diverse temperature del substarto. Le condizioni del plasma durante l'esperimento sono state mantenute circa le stesse, con un flusso di ioni di  $(7 \times 10^{21} - 2 \times 10^{22}) m^{-2} s^{-1}$  per simulare i

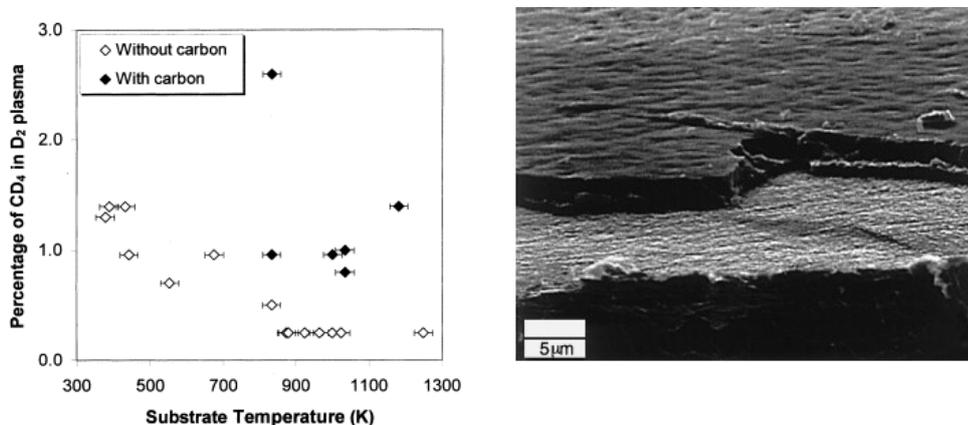


Figura 2.15: Presenza o meno di carbonio depositato al variare della temperatura del substrato e della percentuale di  $CD_4$  pompato (sinistra). Film di carbonio depositato a 2.6% di impurità pompata e temperatura del substrato di 850K (destra).

parametri di ITER. La durata dell'esposizione è stata variata da 45 a 120 min [7]. Con 1% di  $CD_4$ , ad una temperatura del substarto di 850K (a temperature più basse non si è osservata deposizione), si sono iniziate a vedere particelle di carbonio sulla superficie del tungsteno, soprattutto lungo i bordi rugosi che fungono da siti di nucleazione. Nell'immagine di destra (figura 2.15) vediamo come al 2.6% di  $CD_4$  si depositi un film di carbonio di superficie ondulata. È importante notare che a 850K (temperatura a cui operano le pareti in tungsteno nel lower baffle di ITER), se la concentrazione di  $CD_4$  scende allo 0.5% non si rileva formazione di strati di carbonio.

Il depositarsi o meno del carbonio, insieme alla temperatura del substarto, sono i fattori dominanti per quanto concerne la ritenzione di isotopi dell'idrogeno. Nei due casi:

**Superficie del tungsteno non contaminata.** In questo caso la quantità di isotopi accumulati è maggiore alle basse temperature ( $< 700$ ). Una possibile spiegazione è che il deuterio si accumuli sotto forma di bolle di  $D_2$  alle basse temperature (qualcosa di simile era stato osservato parlando dell'impiantazione del trizio) e che all'aumentare della temperatura le molecole vengano rilasciate in situ.

**Superficie del tungsteno contaminata dal carbonio.** Rispetto al caso precedente, si ha maggior accumulo di isotopi (alle temperature a cui si ha deposizione di carbonio); ciò dimostra che la maggior parte del deuterio si trova nel film di carbonio. I triangoli pieni rappresentano il caso in cui lo strato di carbonio copre più del 50% del campione di tungsteno, la figura 2.16 quindi indica che i film di carbonio tendono

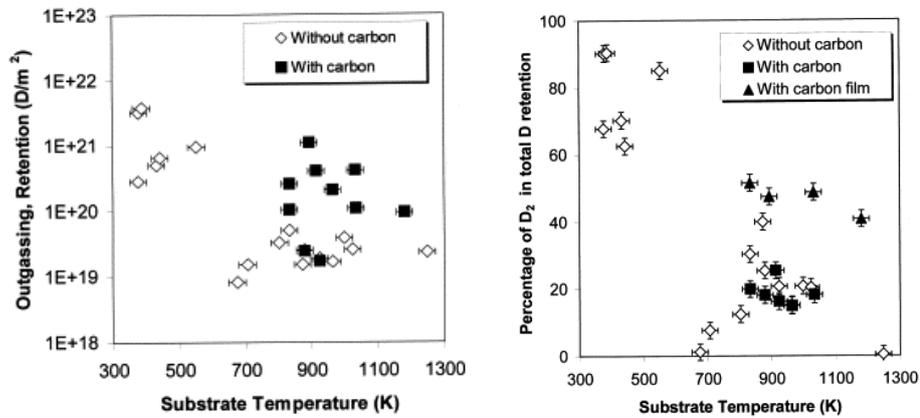


Figura 2.16: Deuterio accumulato in funzione della temperatura del substrato con e senza carbonio depositato (sinistra). Percentuale di deuterio molecolare sul totale del deuterio a vari gradi di deposizione del carbonio (destra).

a intrappolare più deuterio molecolare rispetto al tungsteno a queste temperature.

È stato inoltre osservato che le molecole di deuterio che si ricombinano all'interno del tungsteno portano alla formazione di vescicole e deformazioni superficiali; oltre al danno meccanico queste fungono anche da siti di nucleazione per il carbonio depositato. Con l'ottica di superare questa difficoltà si sta studiando la possibilità di costruire divertori completamente in tungsteno [1] (come programmato per la seconda fase di ITER [9]).



# Capitolo 3

## Scelta del Materiale

Secondo altre previsioni le pareti del divertore raggiungeranno temperature superiori a  $1700\text{ }^\circ\text{C}$  [8]. Tuttavia, oltre a test sulla reazione del materiale a varie temperature, sono state effettuate prove per quanto concerne gli shock termici e fatica termica nell'intervallo operativo dei parametri sotto esposizione a fasci di idrogeno e/o elio.

Simulazioni su diversi campioni sono state condotte al JUDITH. L'esposizione è stata condotta a  $200\text{ }^\circ\text{C}$  e  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , con una potenza variabile tra i  $0.19\text{ MW}/\text{m}^2$  e i  $1.13\text{ MW}/\text{m}^2$ , per un totale di 100 (fino anche a 1000) impulsi della durata di  $1\text{ ms}$ . Mentre profonde crepe sono state rilevate su leghe di W-5 vol.%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e W-5wt%Ta, il W-1 vol.%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> si è dimostrato il materiale più promettente non mostrando, a quelle condizioni, alcuna crepa (test simili sono stati condotti sul W puro per avere un parametro di riferimento; su questo sono state rilevate molte crepe, i bordi delle quali inoltre hanno iniziato a sciogliersi).

Gli esperimenti a regime hanno constatato il verificarsi dei fenomeni che sono stati fino ad ora descritti (crescita dei grani, formazione di cavità, fenomeni di erosione complementari allo sputtering fisico, . . .).

Un altro motivo per valutare l'utilizzo di leghe di tungsteno è la possibilità di ridurre l'elevato tasso di ossidazione lineare del suo stato puro ( $1.4 \times 10^{-2}\text{ mg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ), che nel caso di DEMO (circa  $1000\text{ m}^2$  di prima parete) porterebbe ad un rilascio di mezza tonnellata di ossidi di tungsteno all'ora. Aggiungendo al tungsteno elementi in grado di formare ossidi si avrebbe, alle alte temperature, la crescita di uno strato capace di annichilirsi con l'ossigeno; durante le operazioni normali inoltre, la superficie di questo materiale si comporterebbe come se composto di solo tungsteno per via dello sputtering preferenziale tipico delle leghe.

Buoni risultati in termini di ossidazione si erano ottenuti con il sistema W-Cr-Si, con la pecca della formazione di silicati di tungsteno, fragili e quindi

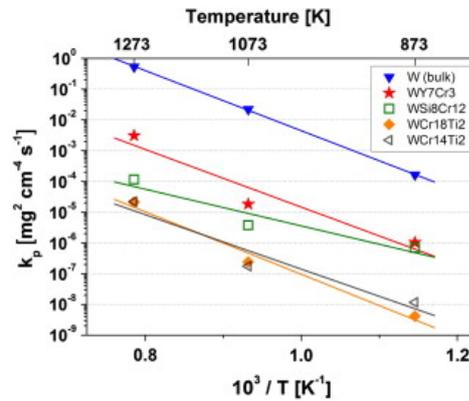


Figura 3.1: Tasso di ossidazione parabolico di tungsteno puro (come riferimento) e diverse leghe di tungsteno.

poco lavorabili. La lega W-Cr-Ti si è rivelata un'alternativa, priva di silicio, promettente. Come possiamo vedere dal grafico di Arrhenius del tasso di ossidazione parabolico (figura 3.1), il W-Cr-Ti (il cui tasso di ossidazione è 4 volte inferiore a quello del W puro; a sottolineare la funzionalità delle leghe) si è dimostrato anche migliore delle leghe con silicio. Una proprietà importante (già osservata parlando della crescita dei grani) di alcune leghe è la presenza di una fase intergranulare capace di inibire la crescita dei grani.

Un altro candidato come materiale di prima parete, per le zone esposte ad un flusso di calore moderatamente alto, è il VPS-W (di cui si è parlato in tema di impiantazione del trizio); esso infatti combina i vantaggi del tungsteno come materiale di prima parete con la possibilità di coprire ampie zone e di riparare parti danneggiate.

# Capitolo 4

## Conclusioni

Lo scopo di questa tesi vuole essere quello di fornire un quadro generale sui fenomeni a cui sono sottoposte le prime pareti nei tokamak, argomento fondamentale per lo sviluppo di questi a livelli sempre più alti sia in ambito di ricerca che con un occhio rivolto alla futura produzione di energia. Vista la vastità di questo argomento la descrizione è limitata alle prime pareti del divertore.

I vari argomenti non sono trattati fin nel loro specifico, ognuno di essi infatti porta con se un mondo tutto che non potrebbe essere esposto in toto nemmeno se queste poche pagine gli fossero interamente dedicate; l'obbiettivo è quindi offrire vari spunti dai quali prendere coscienza dell'importanza e della necessità della ricerca in ognuno di questi ambiti.



# Bibliografia

- [1] G. Federici et al., 2001 Nucl. Fusion 41 1967.
- [2] G. Federici, et al., J. Nucl. Mater 266-269 (1999) 14-29.
- [3] H. Greuner et al., J. Nucl. Mater 442 (2013) S256-S260.
- [4] H. Maier et al., Phys. Scr. T159 (2014) 014019.
- [5] T. Otsuka, T. Tanabe, K. Tokunaga, Phys. Scr. T145 (2011) 014035.
- [6] T. Otsuka, T. Tanabe, K. Tokunaga, J. Nucl. Mater 438 (2013) S1048-S1051.
- [7] F.C. Sze, L. Chousal, R.P. Doerner et al., J. Nucl. Mater 266-269 (1999) 1212-1218.
- [8] M. Reith et al., J. Nucl. Mater 432 (2013) 482-500.
- [9] Y. Ueda et al., J. Nucl. Mater 415 (2011) S92-S95.
- [10] T. Otsuka e T. Tanabe 2010 Fusion Eng. Des. 85 1437-41.