

EUR 4237 f,e

ASSOCIATION
EURATOM - BROWN BOVERI/KRUPP REAKTORBAU GMBH (BBK)

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES
CARACTERISTIQUES D'ELEMENTS COMBUSTIBLES
DANS UN REACTEUR A ELEMENTS SPHERIQUES

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FUEL
ELEMENTS IN PEBBLE-BED REACTORS

par/by

W. RAUSCH

1969



THTR 73

Travaux effectués à/Work performed at
BBK - Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Mannheim - Deutschland

Association N° 003-63-1 RGAD

Texte présenté au 12^e Colloque de Métallurgie au
Paper presented at the 12th Metallurgical Congress at the

Centre d'Etudes Nucléaires, Saclay - France

24-26 juin 1968 / June 24-26, 1968

AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission des Communautés Européennes.

Il est précisé que la Commission des Communautés Européennes, ses contractants, ou toute autre personne agissant en leur nom :

ne garantissent pas l'exactitude ou le caractère complet des informations contenues dans ce document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconque décrits dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privés;

n'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou procédés décrits dans le présent document.

Ce rapport est vendu dans les bureaux de vente indiqués en 4^e page de couverture

au prix de FF 6,—	FB 60,—	DM 4,80	Lit. 750	Fl. 4,30
-------------------	---------	---------	----------	----------

Prière de mentionner, lors de toute commande, le numéro EUR et le titre qui figurent sur la couverture de chaque rapport.

Le présent document a été reproduit à partir de la meilleure copie disponible.

LEGAL NOTICE

This document was prepared under the sponsorship of the Commission of the European Communities.

Neither the Commission of the European Communities, its contractors nor any person acting on their behalf :

Make any warranty or representation, express or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this document, or that the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this document may not infringe privately owned rights; or

Assume any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information apparatus, method or process disclosed in this document.

This report is on sale at the addresses listed on cover page 4

at the price of FF 6.—	FB 60.—	DM 4.80	Lit. 750	Fl. 4.30
------------------------	---------	---------	----------	----------

When ordering, please quote the EUR number and the title, which are indicated on the cover of each report.

Printed by Guyot, s.a.
Brussels, April 1969

This document was reproduced on the basis of the best available copy.

EUR 4237 f,e

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES CARACTÉRISTIQUES D'ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES DANS UN RÉACTEUR A ÉLÉMENTS SPHÉRIQUES, par W. RAUSCH

Association : Communauté Européenne de l'Energie Atomique - EURATOM
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH - BBK

THTR 73

Travaux effectués à BBK - Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH,
Mannheim (Allemagne)

Association N° 003-63-1 RGAD

Texte présenté au 12^e Colloque de Métallurgie

Centre d'Études Nucléaires de Saclay (France), 24-26 juin 1968

Luxembourg, avril 1969 - 38 pages - 9 figures - FB 60

Le cœur des réacteurs à haute température développés initialement par Brown Boveri/Krupp n'est pas constitué d'éléments combustibles prismatiques comme dans beaucoup d'autres réacteurs, mais au contraire est formé d'un ensemble d'éléments combustibles individuels mobiles formant un lit de boulets.

EUR 4237 f,e

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FUEL ELEMENTS IN PEBBLE-BED REACTORS, by W. RAUSCH

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH - BBK

THTR 73

Work performed at BBK - Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH,
Mannheim (Germany)

Association No. 003-63-1 RGAD

Paper presented at the 12th Metallurgical Congress

Centre d'Études Nucléaires de Saclay (France), June 24/26, 1968

Luxembourg, April 1969 - 38 Pages - 9 Figures - FB 60

The core of high-temperature reactors as first developed by Brown Boveri/Krupp does not consist of prismatic fuel elements as in most other reactors, instead it is made up of a pebble-bed of spherical mobile fuel elements. During operation these elements are continuously circulated. Optimally burnt-up or defect elements are discharged and replaced by new elements. All other elements

EUR 4237 f,e

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FUEL ELEMENTS IN PEBBLE-BED REACTORS, by W. RAUSCH

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH - BBK

THTR 73

Work performed at BBK - Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH,
Mannheim (Germany)

Association No. 003-63-1 RGAD

Paper presented at the 12th Metallurgical Congress

Centre d'Études Nucléaires de Saclay (France), June 24/26, 1968

Luxembourg, April 1969 - 38 Pages - 9 Figures - FB 60

The core of high-temperature reactors as first developed by Brown Boveri/Krupp does not consist of prismatic fuel elements as in most other reactors, instead it is made up of a pebble-bed of spherical mobile fuel elements. During operation these elements are continuously circulated. Optimally burnt-up or defect elements are discharged and replaced by new elements. All other elements

EUR 4237 f,e

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FUEL ELEMENTS IN PEBBLE-BED REACTORS, by W. RAUSCH

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH - BBK

THTR 73

Work performed at BBK - Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH,
Mannheim (Germany)

Association No. 003-63-1 RGAD

Paper presented at the 12th Metallurgical Congress

Centre d'Études Nucléaires de Saclay (France), June 24/26, 1968

Luxembourg, April 1969 - 38 Pages - 9 Figures - FB 60

The core of high-temperature reactors as first developed by Brown Boveri/Krupp does not consist of prismatic fuel elements as in most other reactors, instead it is made up of a pebble-bed of spherical mobile fuel elements. During operation these elements are continuously circulated. Optimally burnt-up or defect elements are discharged and replaced by new elements. All other elements

Pendant le fonctionnement du réacteur, ces éléments sont circulés d'une façon permanente. Les éléments combustibles qui ont atteint leur taux de combustion optimum ou les éléments défectueux sont déchargés et remplacés par de nouveaux éléments. Tous les autres éléments sont rechargés dans différentes régions du cœur suivant leurs caractéristiques neutroniques. La machine de déchargement est équipée de diverses installations pour le test des propriétés mécaniques et nucléaires de ces éléments. Quatre méthodes spéciales sont présentées ici qui permettent la détermination de caractéristiques importantes telles que : intégrité géométrique, masse, module d'élasticité, activité gamma, taux de combustion et comportement général au point de vue physique neutronique.

are fed back to different regions of the core according to their neutron-physical characteristics. The fuel handling facility is provided with several installations for the test of mechanical and nuclear properties of the elements. Four special methods are presented here which allow a determination of so important characteristics as : geometrical integrity, mass, Young's modulus, gamma-activity, burn-up and overall neutron-physical behaviour.

are fed back to different regions of the core according to their neutron-physical characteristics. The fuel handling facility is provided with several installations for the test of mechanical and nuclear properties of the elements. Four special methods are presented here which allow a determination of so important characteristics as : geometrical integrity, mass, Young's modulus, gamma-activity, burn-up and overall neutron-physical behaviour.

are fed back to different regions of the core according to their neutron-physical characteristics. The fuel handling facility is provided with several installations for the test of mechanical and nuclear properties of the elements. Four special methods are presented here which allow a determination of so important characteristics as : geometrical integrity, mass, Young's modulus, gamma-activity, burn-up and overall neutron-physical behaviour.

EUR 4237 f,e

ASSOCIATION
EURATOM - BROWN BOVERI/KRUPP REAKTORBAU GMBH (BBK)

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES CARACTERISTIQUES D'ELEMENTS COMBUSTIBLES DANS UN REACTEUR A ELEMENTS SPHERIQUES

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FUEL ELEMENTS IN PEBBLE-BED REACTORS

par/by

W. RAUSCH

1969



THTR 73

Travaux effectués à/Work performed at
BBK - Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Mannheim - Deutschland

Association N° 003-63-1 RGAD

Texte présenté au 12^e Colloque de Métallurgie au
Paper presented at the 12th Metallurgical Congress at the

Centre d'Etudes Nucléaires, Saclay - France

24-26 juin 1968 / June 24-26, 1968

RÉSUMÉ

Le cœur des réacteurs à haute température développés initialement par Brown Boveri/Krupp n'est pas constitué d'éléments combustibles prismatiques comme dans beaucoup d'autres réacteurs, mais au contraire est formé d'un ensemble d'éléments combustibles individuels mobiles formant un lit de boulets. Pendant le fonctionnement du réacteur, ces éléments sont circulés d'une façon permanente. Les éléments combustibles qui ont atteint leur taux de combustion optimum ou les éléments défectueux sont déchargés et remplacés par de nouveaux éléments. Tous les autres éléments sont rechargés dans différentes régions du cœur suivant leurs caractéristiques neutroniques. La machine de déchargement est équipée de diverses installations pour le test des propriétés mécaniques et nucléaires de ces éléments. Quatre méthodes spéciales sont présentées ici qui permettent la détermination de caractéristiques importantes telles que : intégrité géométrique, masse, module d'élasticité, activité gamma, taux de combustion et comportement général au point de vue physique neutronique.

MOTS-CLÉS

MATERIALS TESTING
FUEL ELEMENTS
SPHERES
MECHANICAL PROPERTIES
NUCLEAR PROPERTIES
BURNUP
HIGH TEMPERATURE
REACTORS

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES CARACTERISTIQUES D'ELEMENTS
COMBUSTIBLES DANS UN REACTEUR A ELEMENTS SPHERIQUES

INTRODUCTION (*)

Le réacteur AVR a atteint le 15 février 1968 sa pleine puissance de 15 MWe pour la première fois (figure 1). Le réacteur AVR a été développé et construit par la Sté. Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH. pour un ensemble de producteurs d'électricité, groupés dans la Sté. Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor GmbH. (AVR).

Ce réacteur est le premier réacteur de puissance dont le coeur n'est pas formé d'éléments prismatiques mais se présente sous la forme d'un lit d'environ 100.000 éléments combustibles sphériques.

En parallèle avec la construction du réacteur AVR, des travaux de développement ont été exécutés par la Sté. Brown Boveri/Krupp dans le cadre d'une association avec Euratom et la Kernforschungsanlage de Jülich, association dont le but principal était l'étude d'un réacteur prototype de 300 MWe; cette étude a été exécutée afin de pouvoir extrapoler la majeure partie des composants à des unités plus importantes (jusqu'à 1200 MWe) (1). Les résultats de ces études pour le prototype de 300 MWe seront présentés par l'Association THTR le 3.7.1968 à Jülich.

La décision de Brown Boveri/Krupp de commencer et de poursuivre ce développement particulier, et le support que ce concept a reçu sur base nationale et internationale, est dû à un nombre d'avantages particuliers:

- le remplacement d'éléments combustibles peut être exécuté lors de n'importe quelle condition de fonctionnement du réacteur,
- aucun excès de réactivité n'est nécessaire pour compenser le taux de combustion ce qui conduit à un investissement de combustible plus faible que dans d'autres réacteurs, une meilleure économie neutronique et une sécurité plus élevée,

(*) Manuscrit reçu le 9 septembre 1968.

- les propriétés mécaniques des éléments combustibles peuvent être déterminées régulièrement,
- un taux de combustion optimum peut être obtenu pour des fractions différentielles du combustible par un contrôle continu du taux de combustion.

Un avantage supplémentaire est dû au fait que la géométrie de l'élément combustible est la même pour tous les réacteurs de cette filière indépendamment de la puissance adoptée et du type de cycle de combustible choisi. L'expérience obtenue avec les éléments combustibles de réacteur AVR peut de ce fait être directement appliquée au prototype THTR et à ses successeurs. De plus, le cycle de combustible n'est pas lié au réacteur construit, mais peut être choisi librement et modifié d'une façon continue suivant les demandes du marché du combustible.

La figure 2 montre différents types d'éléments combustibles sphériques. Leur diamètre extérieur est toujours de 60 mm: ils sont tous dessinés pour prévoir une zone sans combustible allant jusqu'à 10 mm d'épaisseur. Le type no. I a été fabriqué à la Union Carbide Corporation pour la première charge du réacteur AVR et est caractérisé par une distribution homogène des particules enrobées dans la matrice interne de graphite.

Le type II appelé "élément combustible sphérique creux" a un dessin analogue, mais a l'avantage d'une température à coeur plus basse et d'une meilleure caractéristique de transfert de chaleur, car les particules de combustible sont distribuées sur une surface sphérique d'environ 40 mm de diamètre. Cet élément combustible a été développé par la firme Nukem et sera utilisé pour la seconde charge du réacteur AVR.

Un important résultat des travaux du projet THTR a été le développement de l'élément combustible en graphite pressé, également étudié par la Nukem, sous-contractant du projet THTR. Dans cet élément les particules sont aussi distribuées (comme pour le type I) d'une façon homogène dans la matrice formée de poudre de graphite, mais l'élément

est comprimé d'une façon semi-hydrostatique. Ce procédé de fabrication est particulièrement adapté à une production en série.

Les avantages de cet élément sont: faible coût de production, meilleur comportement mécanique et possibilité d'une teneur plus élevée en métal lourd que dans n'importe quel autre type d'élément. L'élément combustible comprimé sera utilisé pour les charges d'appoint ultérieures du réacteur AVR.

Ces éléments contiennent normalement: environ 200 g de graphite, jusqu'à 1 g de matériaux fissile (U235) et jusqu'à environ 20 g de matériaux fertiles (Th232 ou U238).

En plus des éléments combustibles, le réacteur comporte des éléments purement modérateurs formés de graphite et également, spécialement pendant la période de démarrage, des éléments de graphite contenant une certaine quantité de bore comme poison consommable.

La figure 3 montre une section de la cuve en béton précontraint du prototype de 300 MWe. Le montage est du type intégré, c'est-à-dire que les soufflantes et les échangeurs de chaleur sont montés à l'intérieur de la cuve.

Le coeur lui-même est limité par un assemblage de graphite cylindrique avec fond conique; le coeur comporte environ 675.000 éléments combustibles sphériques.

Afin d'exploiter les avantages de l'élément combustible mobile, le réacteur doit être équipé d'une machine de chargement et de déchargement qui permet la circulation continue des éléments et le contrôle de leurs propriétés.

La fréquence de circulation est telle que pendant sa durée de vie d'environ 3 ans, chaque élément passera en moyenne six fois par la machine de chargement et de déchargement. Ce chiffre conduit à une circulation minimum d'environ 150 éléments par heure. Afin de permettre l'extrapolation à des unités plus importantes, une fréquence de circulation d'environ 500 éléments par heure a été prévue pour le prototype THTR de 300 MWe.

Ceci impose des conditions sévères pour les différentes installations de test des propriétés des éléments combustibles: la fréquence de test doit être inférieure ou égale à un élément toutes les 6 secondes, comparée à environ un élément toutes les 60 secondes dans le réacteur AVR.

Lorsqu'un élément se présente dans la machine de déchargement, deux types de décisions doivent être prises:

- faut-il ou non décharger l'élément combustible et
- dans quelle section du coeur l'élément combustible doit-il être rechargé?

Le déchargement d'éléments combustibles est nécessaire dans le cas d'un défaut mécanique ou dans le cas d'éléments combustibles ayant atteint leur taux de combustion optimum.

Les autres éléments doivent être chargés dans différentes régions du coeur suivant le type d'élément et suivant son taux de combustion.

EQUIPEMENT DE CONTROLE POUR ELEMENTS COMBUSTIBLES SPHERIQUES

Les propriétés intéressantes peuvent être divisées en deux catégories:

- propriétés mécaniques et
- propriétés nucléaires.

1) Propriétés mécaniques

a. Contrôle dimensionnel

Un point très important dans le cadre des contrôles des propriétés mécaniques, est de s'assurer que des éléments combustibles brisés ou endommagés sont déchargés. Les spécifications pour l'élément combustible THTR définissent des éléments comme brisés ou endommagés si n'importe quel diamètre est plus petit que 58 mm.

En vue de détecter ces éléments, une machine appelée "scrap-separator" (séparateur de déchets) est installée dans le circuit (fig. 4).

Cette machine est basée sur le principe très simple qu'un élément combustible intact pourra rouler entre deux rails inclinés si leur écartement est plus petit que le diamètre de l'élément combustible.

Des éléments combustibles brisés ou des éléments qui par suite d'un dommage ont un diamètre plus petit que la distance entre les deux rails, par contre tomberont si, à l'aide de "divertisseurs" il est possible de vérifier pratiquement tous les diamètres des éléments combustibles. La disposition de ces rails sous une forme hélicoidale conduit à une disposition plus compacte pour la même longueur de parcours, mais aussi donne l'avantage supplémentaire que la fréquence de circulation des éléments peut être contrôlée.

Ce séparateur de déchets est indiqué sur la gauche de la figure 4, figure qui montre également l'équipement appelé "singulizer", comportant un disque tournant, ce qui permet le passage d'un élément à la fois à travers un trou d'une dimension appropriée. Le fonctionnement de ce séparateur de déchets a été testé d'une façon systématique avec différentes quantités d'éléments brisés ou endommagés. Il répond entièrement aux spécifications pour la séparation d'éléments défectueux, et la machine peut manipuler au moins trois à quatre fois plus d'éléments que la quantité prévue, c'est-à-dire 500 éléments par heure.

b. Autres propriétés mécaniques (Module d'élasticité, Masse)

Des études sont en cours pour permettre la mesure d'autres propriétés mécaniques comme par ex. le module d'élasticité et la masse avec un équipement qui a été employé avec grand succès pour l'examen pré- et post-irradiatoire des éléments combustibles.

Les principales parties de cet équipement sont schématisées à la figure 5. L'appareil comporte essentiellement une jauge de contrainte piézo-électrique avec un amplificateur de charge et une unité d'enregistrement, ce dernier équipement, dans le cas de notre montage expérimental, étant composé d'un oscilloscope et d'une caméra polaroïde. Un élément qui tombe d'une certaine hauteur sur la jauge de contrainte produit une impulsion caractéristique de la forme indiquée à la fig. 6.

Dans cette figure la force mesurée K en kilogrammes est portée en ordonnée en fonction du temps t en microsecondes. Les mesures ont montré que pour une chute de 1 m, la force maximum K_{\max} est de l'ordre de 500 kg et que la demi-largeur de l'impulsion est de l'ordre de 150 μ sec, ces deux valeurs étant liées d'une façon étroite au poids et à la valeur du module d'élasticité de l'élément.

Il est évident que l'intégrale de l'impulsion $\int k \cdot dt$ est proportionnelle à la quantité de mouvement de l'élément quand il frappe la jauge de contrainte et de ce fait, pour une hauteur de chute donnée, proportionnelle à la masse de l'élément combustible. D'autre part, la force maximum K_{\max} , d'après les données de Hertz (2) (3) dépend du module d'élasticité et de la masse. De ce fait, à partir de la connaissance de K_{\max} et de $\int k \cdot dt$, il est possible de déterminer indépendamment la masse et le module d'élasticité des éléments.

Il est bien connu que le module d'élasticité pour le graphite augmente considérablement avec l'irradiation, de telle sorte que la connaissance de ce module permet l'évaluation de la dose intégrée neutronique de l'élément. Ce point est particulièrement important pour les éléments modérateurs constitués de graphite pur dont la dose d'irradiation ne peut pas être déterminée par une mesure du taux de combustion.

La connaissance de la masse de l'élément permet de séparer différents types d'élément comme p.ex. des éléments fertiles, dont le poids, en raison de leur teneur élevée en métal lourd, peut être de 10 % plus élevé que pour les autres éléments.

2. Propriétés nucléaires

a. Radioactivité

La méthode la plus aisée pour faire la distinction entre des éléments avec ou sans combustible est la mesure de leur activité gamma. Quoique l'activité d'éléments combustibles après leur passage dans le coeur puisse être de l'ordre d'environ 1000 Ci, l'activité d'éléments sans

combustible est seulement due à la contamination provenant du gaz et est de ce fait de plusieurs ordres de grandeur plus faible. La mesure est exécutée très simplement en faisant passer les éléments devant une chambre d'ionisation. Un collimateur limite le temps de mesure à quelques fractions de seconde.

b. Analyse du taux de combustion et comportement de physique neutronique

Plusieurs méthodes ont été à l'étude pour la détermination du taux de combustion, notamment: mesure de transmission de neutrons, comptage des neutrons de fission, spectroscopie gamma (4) et mesure de réactivité dans un assemblage critique.

La plupart de ces méthodes ne répondent pas à la condition sévère limitant le temps de mesure à moins de 6 secondes et l'emploi de différentes installations en parallèle devient très coûteux en raison de la complexité croissante de la machine de déchargement du combustible. Une autre difficulté pour la spectroscopie gamma avec le césium 137 comme indicateur de taux de combustion est le fait que le temps de refroidissement, en raison du faible nombre d'éléments combustibles dans le tube de décharge, peut être inférieur à 30 heures.

La seule méthode qui répond aux conditions est la mesure de réactivité. Cette méthode est basée sur le fait qu'un réacteur avec une suffisamment faible masse critique réagit avec grande sensibilité à l'insertion de matériaux fissiles, absorbant ou diffusant. La réactivité d'un échantillon par rapport à l'assemblage critique dépend non seulement de la quantité de matériaux introduits dans le réacteur, mais aussi de l'emplacement de cet échantillon dans le réacteur.

A la figure 7, les facteurs d'influence pour des éléments fissiles, absorbants et diffusants, sont donnés, la mesure ayant été faite point par point avec une technique d'un oscillateur, au réacteur SUR 100 de Garching (5). Nous voyons que pour des substances combustibles, la réactivité est toujours positive avec un maximum au centre du coeur, pour les substances diffusantes, la réactivité est toujours positive, mais avec un maximum aux deux limites du coeur, maxima qui sont dus à

l'effet de réflecteur de ces échantillons; pour des échantillons de substance absorbante, des réactivités négatives sont mesurées avec un minimum au coeur du réacteur.

Alors que la mesure avec une technique d'oscillateur prend entre 10 et 100 minutes, il est possible de limiter le temps de mesure à des fractions de seconde en utilisant le fait que pour une modification de réactivité, le changement du flux dû aux seuls neutrons prompts se produit en quelques millisecondes. En faisant simplement passer l'échantillon à travers l'assemblage critique, en environ 1 sec, la modification correspondante du flux neutronique est donnée principalement par les facteurs d'influence de l'échantillon. Dans le cas d'un échantillon mixte formé de substances fissile, absorbante et diffusante, comme nos éléments combustibles sphériques, les facteurs d'influence des matériaux constituants s'ajoutent au signal de l'élément combustible.

Pour développer cette méthode, l'Association THTR a décidé de installer une facilité critique spéciale de faible masse critique avec un chenal central permettant le passage d'éléments combustibles d'un diamètre de 60 mm. A la figure 8 une coupe schématique du réacteur ADIBKA 1 est montrée. Ce réacteur est un réacteur homogène liquide (type NAA-L77A), avec un réflecteur en graphite, une masse critique de 1150 g d'U235 (enrichi à 93 %) et un chenal central d'un diamètre intérieur de 68 mm.

Avec ce réacteur, des signaux pour les différents types d'éléments utilisés par le réacteur AVR, ont été mesurés en les faisant simplement rouler dans un tube incliné et ensuite à travers le chenal central horizontal du réacteur.

A la figure 9, les résultats de ces mesures sont indiqués. Le signal d'un élément uniquement modérateur suit d'une façon très proche les facteurs d'influence pour un matériau diffusant. Le signal d'un élément combustible montre un minimum beaucoup moins prononcé dans le centre du fait de la superposition du facteur d'influence du combustible. L'influence positive de la teneur fissile (1 g d'U235) est à peine masquée par l'influence négative du

matériau fertile absorbant des neutrons (5 g d' Th^{232}).

Le signal d'un élément contenant 175 mg de bore, est caractérisé par un minimum très marqué en raison de l'absorption par le bore.

Une évaluation détaillée du signal montre qu'avec cette méthode il est possible d'obtenir une précision sur le contrôle du taux de combustion d'éléments individuels meilleure que 10 %, avec un temps inférieur à une seconde pour la mesure.

Cette précision peut être considérée comme satisfaisante, du fait de la faible quantité de combustible par élément et du grand nombre d'éléments dans le coeur (10^5).

Les résultats montrent aussi qu'outre sa fonction de contrôle du taux de combustion, cette méthode permet de distinguer des éléments dont le comportement neutronique est particulier, comme par exemple des éléments avec poison consommable.

CONCLUSION

De toutes les diverses méthodes généralement employées pour les tests des propriétés des éléments combustibles, seules quelques-unes sont applicables aux éléments combustibles sphériques d'un réacteur à boulets en raison de l'exigence d'une mesure rapide. Seuls deux types de test peuvent être utilisés:

- ceux où dans un montage simple, différents éléments sont testés en parallèle
- ou ceux pour lesquels le temps d'interaction est très court et où la réponse est une simple impulsion dépendante en forme et en intensité des propriétés à mesurer.

Alors que la méthode du contrôle dimensionnel, comme exécuté par le séparateur de déchets, est typique du premier groupe - l'hélice est toujours remplie de divers éléments - toutes les autres méthodes décrites et spécialement les méthodes d'analyse d'impulsion par impact et d'analyse d'impulsion par neutrons pour la détermination du taux de combustion, sont typiques du deuxième groupe.

Ces deux dernières méthodes trouvent particulièrement une application étendue non seulement dans la machine de chargement des réacteurs à boulets, mais également pour le contrôle de la production d'éléments combustibles et pour l'examen pré- et post-irradiatoire de ces éléments ainsi que pour le test d'un grand nombre d'échantillons de matériaux nucléaires.

REFERENCES

- (1) R. HECKER, W. RAUSCH et R. SCHULTEN
"Development of High Temperature Thermal Reactors in Germany"
Giornate dell'Energie Nucleare 1966, Milano /EUR 3493.e, 1967
- (2) H. HERTZ
J. Math. (Crelles Journal) Vol. 92, 1881
- (3) S. TIMOSHENKO et J.N. GOODIER
"Theory of Elasticity"
Second Edition, McGraw Hill 1951, pp. 372 - 384
- (4) H. BUEKER
"Die Messung des Abbrandzustandes kugelförmiger Brennelemente mit
Hilfe eines hochauflösenden Halbleiter-Gammaspektrometers"
EUR 3071.d, 1966
- (5) P. HÖHNE
"Reaktor-Oszillator-Messungen am Siemens-Unterrichtsreaktor - SUR"
Kerntechnik, 6. Jg. (1964), 7/8, p. 355

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 - Coupe verticale du réacteur AVR, Jülich
- Fig. 2 - Types d'éléments combustibles
- Fig. 3 - Coupe du réacteur THTR
- Fig. 4 - Séparateur de déchets
- Fig. 5 - Equipement pour mesure de l'impact
- Fig. 6 - Résultats des mesures d'impact
- Fig. 7 - Facteurs d'influence du réacteur SUR 100 de Garching
- Fig. 8 - Section verticale schématique de l'installation critique
ADIBKA 1
- Fig. 9 - Signaux provoqués par des éléments AVR dans le réacteur
ADIBKA 1 , fonctionnant à une puissance de 5 watts.

EUR 4237 f,e

ASSOCIATION
EURATOM - BROWN BOVERI/KRUPP REAKTORBAU GMBH (BBK)

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES
CARACTERISTIQUES D'ELEMENTS COMBUSTIBLES
DANS UN REACTEUR A ELEMENTS SPHERIQUES

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FUEL
ELEMENTS IN PEBBLE-BED REACTORS

par/by

W. RAUSCH

1969



THTR 73

Travaux effectués à/Work performed at
BBK - Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Mannheim - Deutschland

Association N° 003-63-1 RGAD

Texte présenté au 12^e Colloque de Métallurgie au
Paper presented at the 12th Metallurgical Congress at the

Centre d'Etudes Nucléaires, Saclay - France

24-26 juin 1968 / June 24-26, 1968

ABSTRACT

The core of high-temperature reactors as first developed by Brown Boveri/Krupp does not consist of prismatic fuel elements as in most other reactors, instead it is made up of a pebble-bed of spherical mobile fuel elements. During operation these elements are continuously circulated. Optimally burnt-up or defect elements are discharged and replaced by new elements. All other elements are fed back to different regions of the core according to their neutron-physical characteristics. The fuel handling facility is provided with several installations for the test of mechanical and nuclear properties of the elements. Four special methods are presented here which allow a determination of so important characteristics as: geometrical integrity, mass, Young's modulus, gamma-activity, burn-up and overall neutron-physical behaviour.

KEYWORDS

MATERIALS TESTING
FUEL ELEMENTS
SPHERES
MECHANICAL PROPERTIES
NUCLEAR PROPERTIES
BURNUP
HIGH TEMPERATURE
REACTORS

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FUEL ELEMENTS IN
PEBBLE-BED REACTORS

INTRODUCTION (*)

On February 15, 1968, the AVR-reactor reached its full power of 15 MW_e for the first time (Fig. 1). The AVR-reactor has been developed and constructed by BROWN BOVERI / KRUPP Reaktorbau GmbH for a group of utilities, united as ARBEITSGEMEINSCHAFT VERSUCHSREAKTOR GmbH (AVR).

It is the first power reactor whose core is made up of a bed of about 100 000 spherical fuel elements.

In parallel to the construction of the AVR-reactor development work has been carried out by BROWN BOVERI / KRUPP in an association with EURATOM and KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH for a 300 MW_e prototype plant, with the possibility to extrapolate most of the components to units up to 1200 MW_e [1]. Design documents for this 300 MW_e prototype shall be presented by the THTR-association on July 3, 1968, in Jülich.

The decision of BROWN BOVERI / KRUPP to take up this special development and the support this concept received on a national and international basis is due to a number of remarkable advantages:

(*) Manuscript received on 9 September 1968.

- the exchange of fuel elements can be performed under all operation conditions
- no excess reactivity is needed to compensate burn-up with the consequence of lower fuel inventory, better neutron economy and higher inherent safety
- the mechanical properties of the fuel elements can be determined regularly
- optimum burn-up can be achieved for differential fractions of the fuel by continuous burn-up control

An additional advantage is given by the fact that the geometry of the fuel element is the same for a whole line of reactors independently of their power, and of their fuel cycle. The experience obtained with fuel elements in the AVR-reactor can therefore directly be applied to the THTR-prototype and its successors. Also the fuel cycle is not fixed with the construction of a power plant but can be chosen freely and changed continuously according to the demands of the fuel market.

Fig. 2 shows different types of spherical fuel elements. Their outer diameter is always 60 mm and all of them are provided with a fuel free zone of up to 10 mm thickness. Type I has been furnished by Union Carbide Corporation for the first charge of the AVR-reactor and is characterized by a homogeneous distribution of coated fuel particles in the inner graphite matrix.

Type II, the so-called "hollow-sphere element" is similar in design but has the advantage of lower central temperatures and better heat transfer characteristics as the fuel particles are distributed on a spherical surface of about 40 mm diameter. This element has been developed by NUKEM and shall be used for the second charge of the AVR-reactor.

One of the very important results of the THTR-project was the development of the pressed element, also by NUKEM, as a subcontractor of THTR. Here the particles are distributed similarly to Type I in a graphite matrix, but the whole element is pressed semihydrostatically from graphite powder, a process particularly suited for mass production.

The advantages of this element are: low production cost, better mechanical behaviour and the possibility for higher heavy metal content than with any other variant. The pressed element will be used for further make-up charges for the AVR-reactor.

The elements contain normally:

about 200 g of graphite

up to about 1 g of fissile material (^{235}U)

and up to 20 g of fertile material (^{232}Th or ^{238}U).

Besides there may be used pure moderator elements and also, especially during the start-up period, graphite elements containing a certain amount of boron as burnable poison.

Fig. 3 shows a section of the pressure vessel of the 300 MW_e THTR-prototype. It contains in integrated design the core and the heat exchangers with blowers.

The core is housed in a cylindrical graphite vessel with a conical bottom, it consists of 675 000 spherical elements.

To make use of the advantages of a mobile fuel element the system has to be provided with a fuel handling facility which allows the continuous circulation of the elements and the control of their properties.

The circulation frequency is such that during its lifetime of about 3 years every element passes through the fuel-handling facility six times in the average. This leads to a minimum circulation frequency of 150 elements per hour. To fulfil the condition of extrapolation to bigger units a circulation frequency of 500 elements per hour has been chosen for the 300 MW_e THTR-prototype.

This puts a very stringent condition on the different facilities for the test of fuel element properties: the test rate must be better than 1 element per 6 seconds, compared to only 1 element per 60 seconds as in the AVR-reactor.

After an element appears in the fuel handling facility two types of decisions have to be taken

- the decision if an element is to be discharged and
- the decision into which part of the core an element has to be charged.

The discharge of elements becomes necessary in case of mechanical defect or in case of optimally burnt-up elements.

The rest of the elements has to be fed to different regions of the core depending on the type of element and its burn-up.

TEST FACILITIES FOR SPHERICAL FUEL ELEMENTS

The properties of interest may be divided into two groups: mechanical properties and nuclear properties.

1^o Mechanical Properties

a. Dimensional Control

Concerning mechanical properties a very important point is dimensional control to make sure that broken or damaged elements are discharged. Specifications for THTR-fuel classify elements as broken or damaged if any of their diameters is smaller than 58 mm.

To detect such elements a so-called "scrap-separator" is installed (Fig. 4). It is based on a very simple principle namely that an intact fuel element can roll down between two inclined rails if their spacing is smaller than the diameter of the fuel element.

Breakages, or fuel elements which, as a result of damage, have a smaller diameter than the distance between the two rails, will fall between if, with the help of diverters, it is ensured that practically all diameters of the elements are tested. Joining these rails to a helix not only leads to a more compact arrangement for the same length of test course but also brings the advantage that the circulation frequency of the elements can be regulated.

In the lower part of Fig. 4 this scrap separator is shown which in this arrangement is coupled to a so-called "singulizer", a rotating disc at the end of the helix which through a hole of appropriate diameter, allows the passage of only one element after the other. The performance of this scrap separator has been tested thoroughly with varying amounts of broken and damaged elements. It satisfies specifications for separation of defect elements and the machine can handle a factor of 3 to 4 more than the required 500 elements per hour.

b. Further Mechanical Properties (Young's Modulus, Mass)

At the moment we are studying the possibility to test further mechanical properties as for instance Young's modulus and mass with an arrangement that has been employed with great success in pre- and post-irradiation examination of fuel elements.

The principal components of this arrangement are given in Fig. 5. It consists of a piezoelectric strain gauge with a load amplifier and a registration unit, in the case of our experimental set-up an oscilloscope and a polaroid camera. An element which drops from a certain height on the strain gauge produces a characteristic pulse as given in Fig. 6.

Here the measured force K in kilograms is given as a function of time t in microseconds. It turns out that for a drop height of 1 m the maximum force K_{\max} is of the order of 500 kg and the half-width of the pulse is of the order of 150 μsec , both values depending considerably on the weight and the value of Young's modulus of the element.

It is evident that the integral over the pulse $\int k \cdot dt$ is proportional to the momentum of the element when it impinges on the strain gauge and hence, for a given drop-height, proportional to the mass of the fuel element. On the other hand the maximum force K_{\max} , according to HERTZ [2][3] depends in a definite way both on Young's modulus and mass. Accordingly, from the knowledge of K_{\max} and $\int k \cdot dt$ it is possible to determine independently mass and Young's modulus for the element.

It is well known that Young's modulus for graphite increases considerably with irradiation so with the knowledge of this value it is possible to evaluate the neutron dose for the element. This may be especially important for pure moderator-elements whose irradiation dose cannot be determined from burn-up.

The knowledge of the mass of the element can help to separate different types of elements as for instance breed elements, whose weight, due to their higher heavy metal content, can be more than 10 % higher than that of all other elements.

2° Nuclear Properties

a. Radioactivity

The easiest way to discriminate between fuel-bearing- and non-fuel-bearing elements is by their gamma-activity. While the activity of fuel-bearing elements after passage of the core may be of the order of a thousand Curies, the activity of non-fuel-bearing elements is only due to contamination from the cooling-gas and accordingly is several orders of magnitude lower. The measurement is performed very simply by passing the elements in front of an ionization chamber. A collimator limits the time of measurement to fractions of a second.

b. Burn-up Analysis and Neutron-Physical Behaviour

Several methods were under consideration for the determination of burn-up, among them neutron transmission measurements, counting of fission neutrons, direct gamma-ray spectroscopy [4] and reactivity measurements in a critical facility.

Most of these methods do not meet the stringent condition of a time needed for measurement of less than 6 seconds and the use of several measurement facilities in parallel becomes very costly due to the increased complexity of the fuel handling facility. An additional difficulty for gamma-spectroscopy with ^{137}Cs as a burn-up indicator is the fact that the cooling-down time, due to the small number of fuel-elements in the discharge tube, can be less than 30 hours.

The only method which meets these conditions is the reactivity measurement. It is

based on the fact that a reactor with a sufficiently small critical mass reacts with high sensitivity to the insertion of fissile, absorbing and scattering material. The reactivity of a sample with respect to a critical facility not only depends on the amount of material introduced into the reactor but also on the location of the sample in the reactor.

In Fig. 6 the relative importance for typical fissile, absorbing and scattering materials is given as measured point by point with an oscillator technique on the SUR 100 facility at Garching [5]. We see that for fissile substances the reactivity is always positive with a maximum in the core center; for scattering substances the reactivity is also positive but with maxima at both core edges, which are due to the reflector effect of such samples; samples of absorbing substances, however, correspond to negative reactivities with a minimum in the core center.

While the measurement by oscillator technique takes between 10 and 100 minutes, it is possible to abbreviate the time of measurement to fractions of a second by consequently making use of the fact that for a change in reactivity the change in flux due to prompt neutrons alone occurs in a few milliseconds. By simply passing a sample through a critical facility in about one second the resultant change in neutron flux is given primarily by the importance function of the sample. In case of a mixed sample made up of fissile, absorbing and scattering substances as our spherical fuel elements are, the relative importance of the constituent materials adds up to the signal of the fuel element.

To develop this method the THTR-association decided to install a special critical facility of low critical mass with a central channel wide enough for passage of

60 mm diameter fuel elements. In Fig. 7 a schematic cross section of the reactor "ADIBKA 1" is shown. It is a homogeneous liquid reactor of the waterboiler type (NAA-L77A), graphite reflected, with a critical mass of 1150 g of ^{235}U (93 % enriched) and with a central channel of 68 mm inner diameter.

With this reactor signals have been measured for the different types of elements as used in the AVR-reactor by simply rolling them down an inclined tube and on through the horizontal central channel of the reactor.

In Fig. 8 the results of these measurements are given. The signal of a pure moderator element follows closely the importance function for scattering material. The signal of a fuel element shows a much less pronounced minimum in the center due to the superposition of the relative importance of the fuel. The positive influence of the fissile content (1 g of ^{235}U) is hardly masked by the negative influence of the neutron absorbing fertile material (5 g of ^{232}Th).

The signal of a boronated element, containing 175 mg of boron, is characterized by an extreme minimum due to the absorption by boron.

A closer evaluation of the signal shows that with this method it is possible to obtain an accuracy in burn-up control of individual elements of better than 10 %, with a time of less than 1 second needed for measurement.

This accuracy is quite satisfying considering the small amount of fuel per element and the great number of some 10^5 elements in the core.

The results also show that besides burn-up control this method is very appropriate to distinguish elements of special neutron-physical behaviour as for instance elements with burnable poison.

CONCLUSION

Of the many methods generally employed for the test of fuel element properties only very few are applicable to spherical fuel elements in a pebble-bed reactor because of the necessary quick sequence of elements. Only two types of tests can be applied:

- those where in a simple facility several elements can be tested in parallel
- or those where the time of interaction is very short and where the response is a simple pulse dependent in shape and pulse height on the interesting properties.

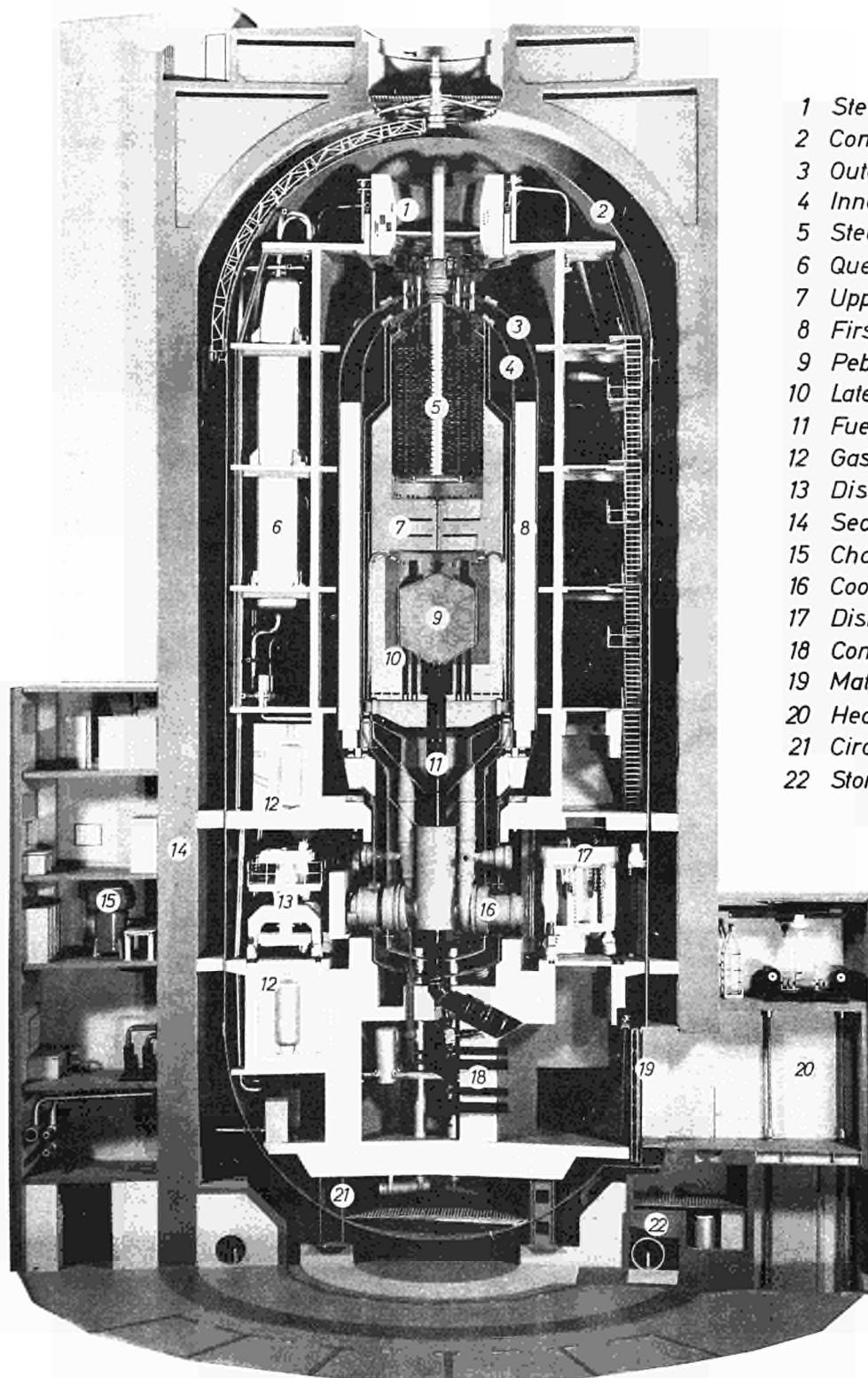
While the method of dimensional control as performed with the scrap separator is typical for the first group - the helix is always filled with several elements - all other methods described and especially the methods of impact pulse analysis and neutron pulse analysis for the determination of burn-up are typical for the second group.

Especially these last two methods may find wider application not only in the fuel handling facility of pebble-bed reactors but also for the control of fuel element production and for pre- and post-irradiation examination of test elements as well as for the test of any great number of samples of nuclear material.

LITERATURE

- [1] R. HECKER, W. RAUSCH and R. SCHULTEN
"Development of High Temperature Thermal Reactors in Germany"
Giornate dell'Energia Nucleare 1966, Milano, EUR 3493.e, 1967
- [2] H. HERTZ
J. Math. (Crelles Journal) Vol. 92, 1881
- [3] S. TIMOSHENKO and J.N. GOODIER
"Theory of Elasticity"
Second Edition, McGraw Hill 1951, pp 372 - 384
- [4] H. BUEKER
"Die Messung des Abbrandzustandes kugelförmiger Brennelemente mit Hilfe
eines hochauflösenden Halbleiter-Gammaspektrometers"
EUR 3071.d, 1966
- [5] P. HÖHNE
"Reaktor-Oszillator-Messungen am Siemens-Unterrichtsreaktor - SUR"
Kerntechnik, 6. Jg. (1964), 7/8, p. 355

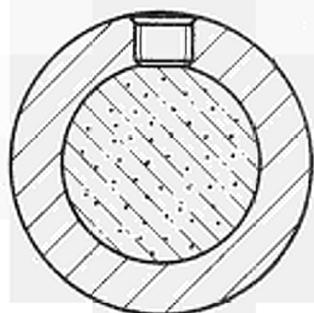
Sectional View of AVR-Reactor, Jülich



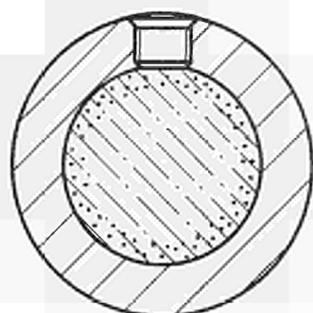
- 1 Steam Header
- 2 Containment
- 3 Outer Pressure Vessel
- 4 Inner Pressure Vessel
- 5 Steam Generator
- 6 Quench Tank
- 7 Upper Reflector
- 8 First Biological Shield
- 9 Pebble bed Core
- 10 Lateral and Bottom Reflector
- 11 Fuel Discharge Pipe
- 12 Gas Purification System
- 13 Dismantling Machinery
- 14 Second Biological Shield
- 15 Charge room for Fuel Elements
- 16 Cooling Gas Circulators
- 17 Dismantling Machinery for Circulators
- 18 Components of Fuel-handling System
- 19 Material Lock
- 20 Heavy Load Elevator
- 21 Circular Bottom Support
- 22 Storage Channel for Spent Fuel Elements

0 2 4 6 8 10m
1 3 5 7 9

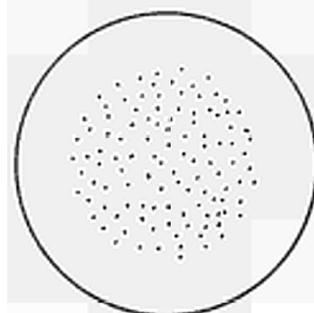
Fig. 1



Type I
UCC-Element

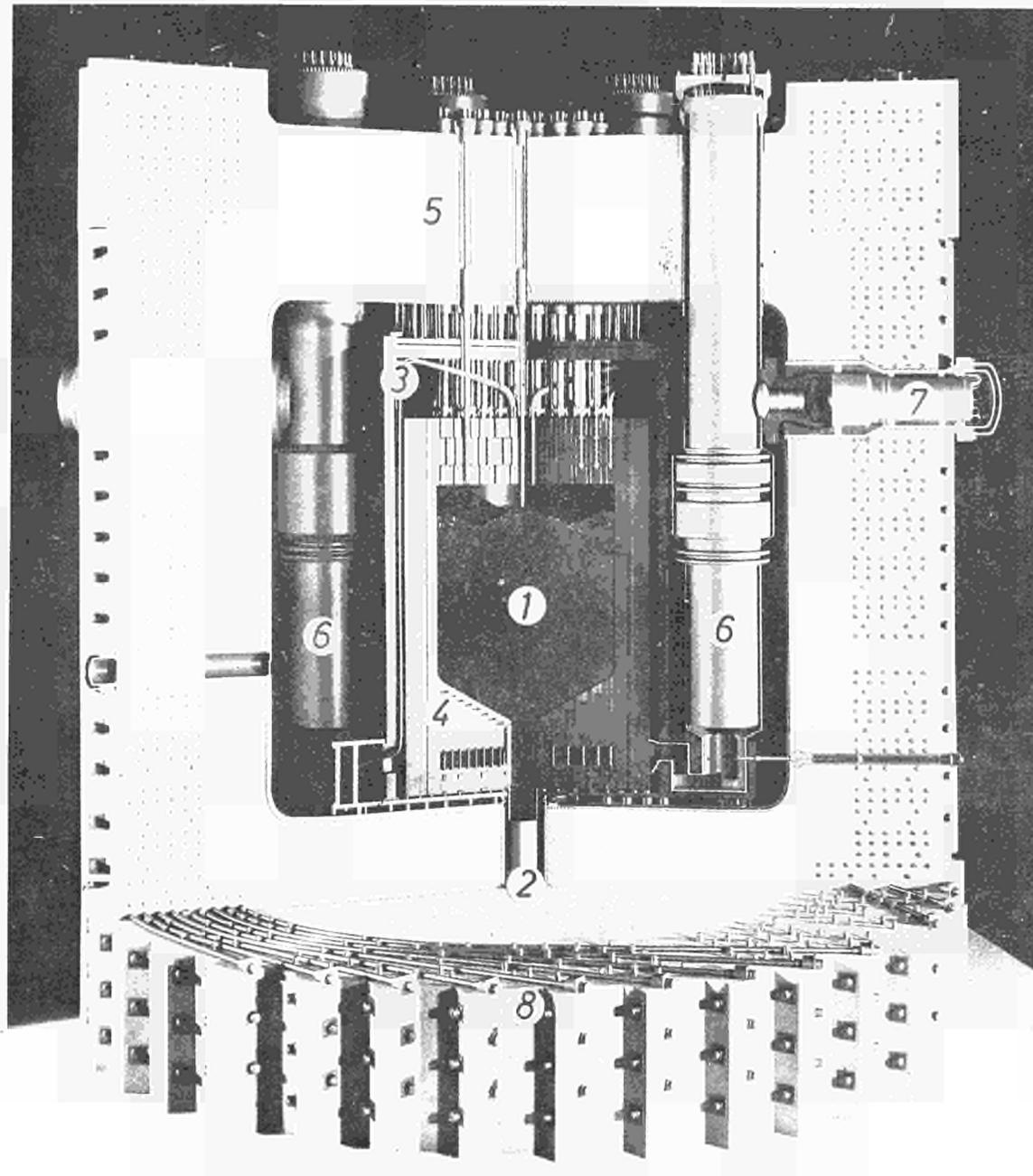


Type II
Hollow-Sphere Element



Type III
Pressed Element

Fig. 2



- 1 Pebble-Bed Core (675 000 Elements)
- 2 Discharge Tube
- 3 Charge - Tube
- 4 Graphite - Reflector
- 5 Absorber - Rods
- 6 Heat-Exchanger
- 7 Blower
- 8 Prestressed Concrete Pressure Vessel with Cables

Fig. 3

BBC / KRUPP

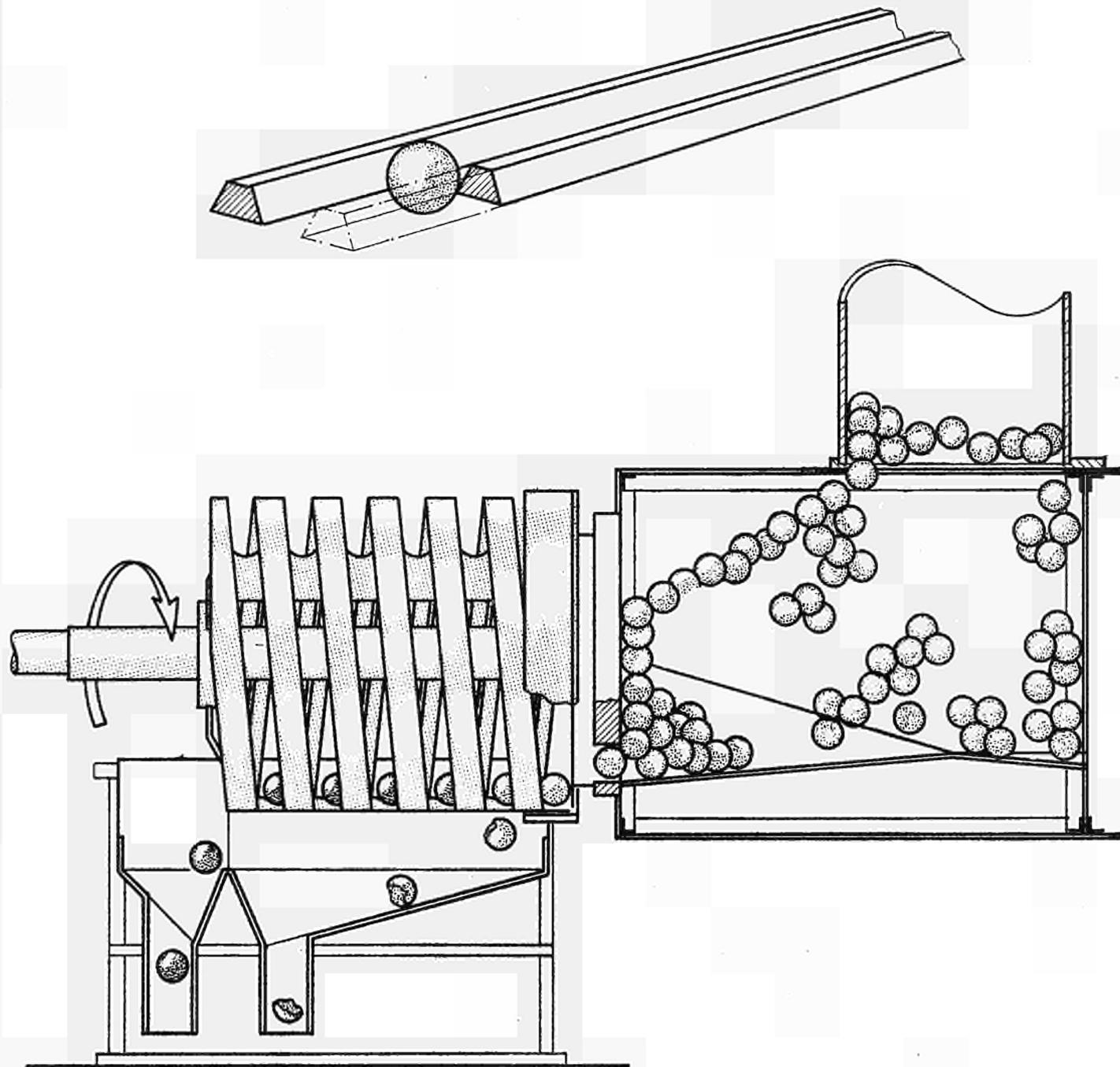
Sectional View of THTR Pressure Vessel

THTR

68.12-3

THTR

68.12-4



Scrap separator

Fig. 4

BBC / KRUPP

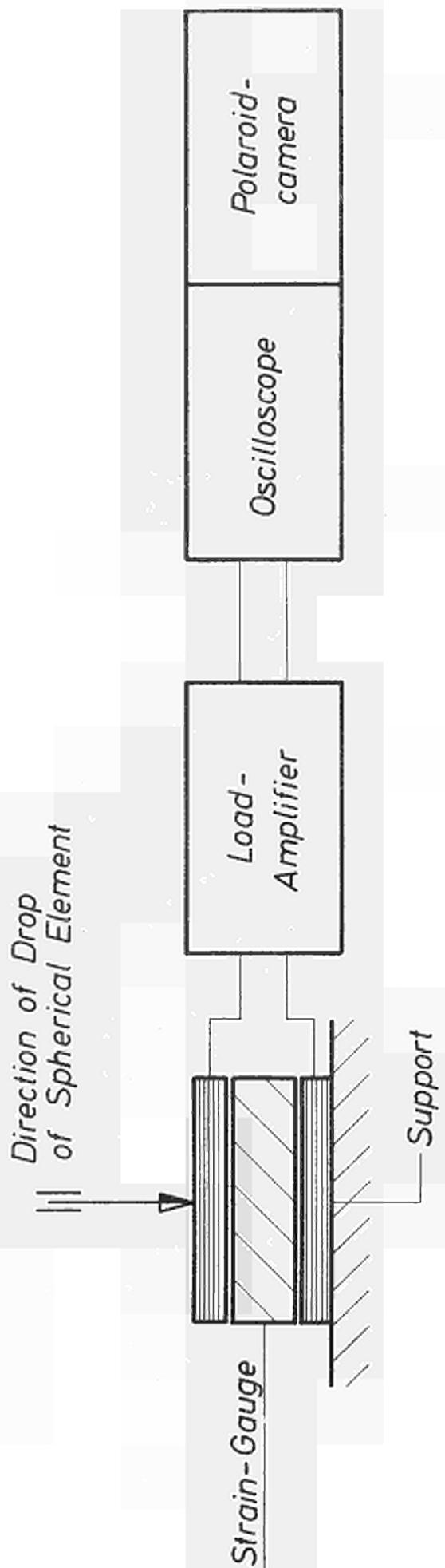
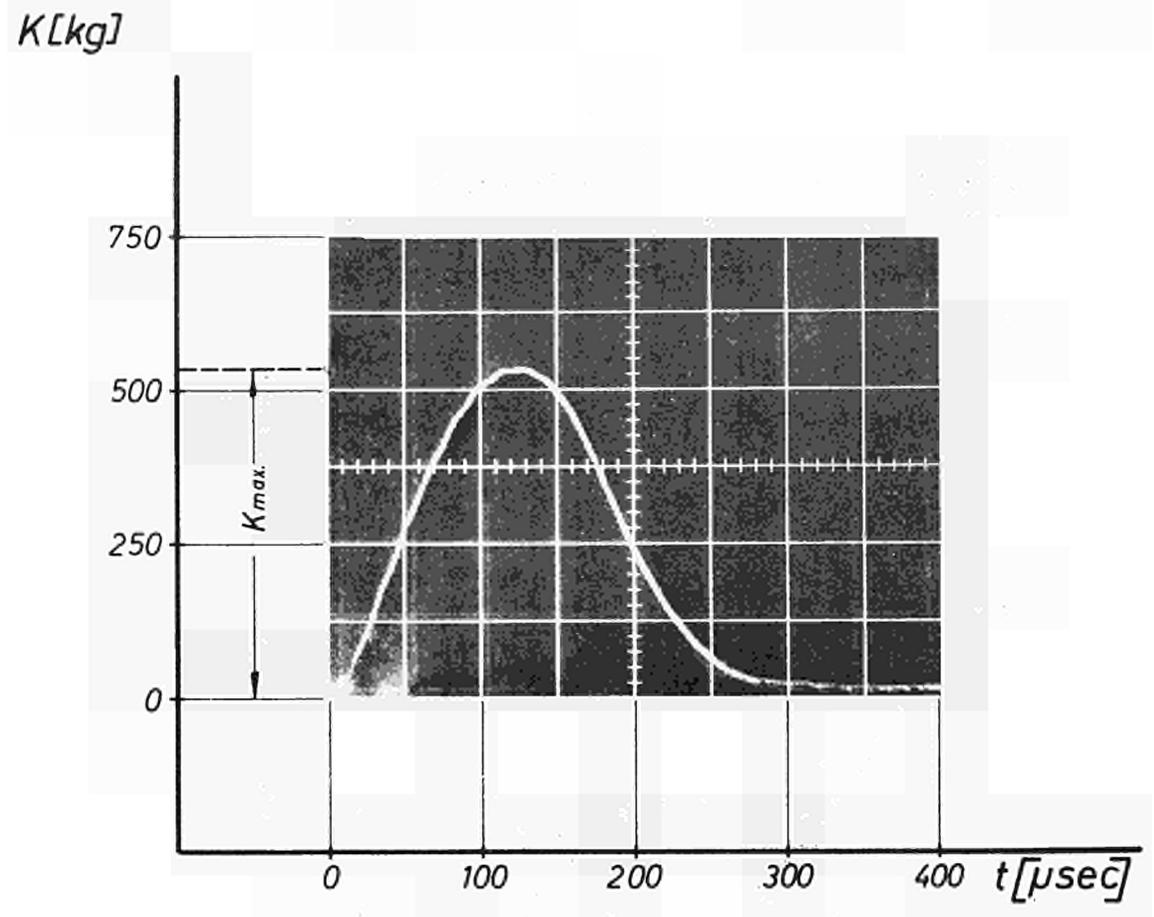


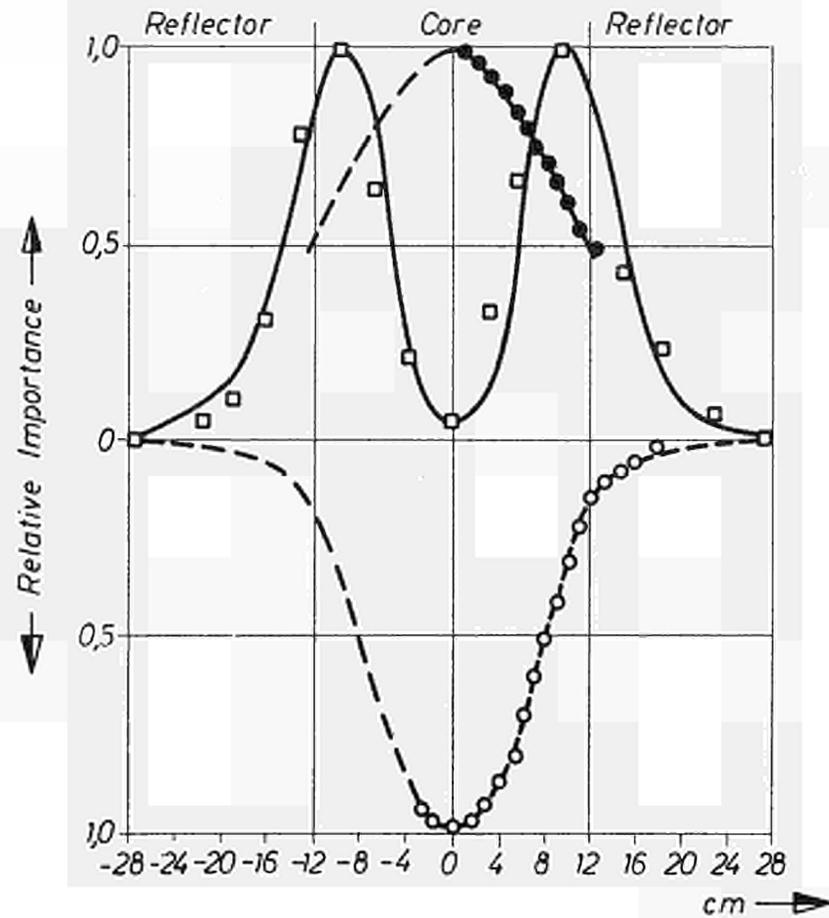
Fig. 5



Result of Impact Measurement

Fig. 6

68.12-7



Fissile (U235) ●—●—● with HÖHNE
 Moderator (Graphit) □—□—□ } HÖHNE [5]
 Absorber (Cd) ○—○—○

Importance Functions
of the SUR 100,
Garching

Fig.7

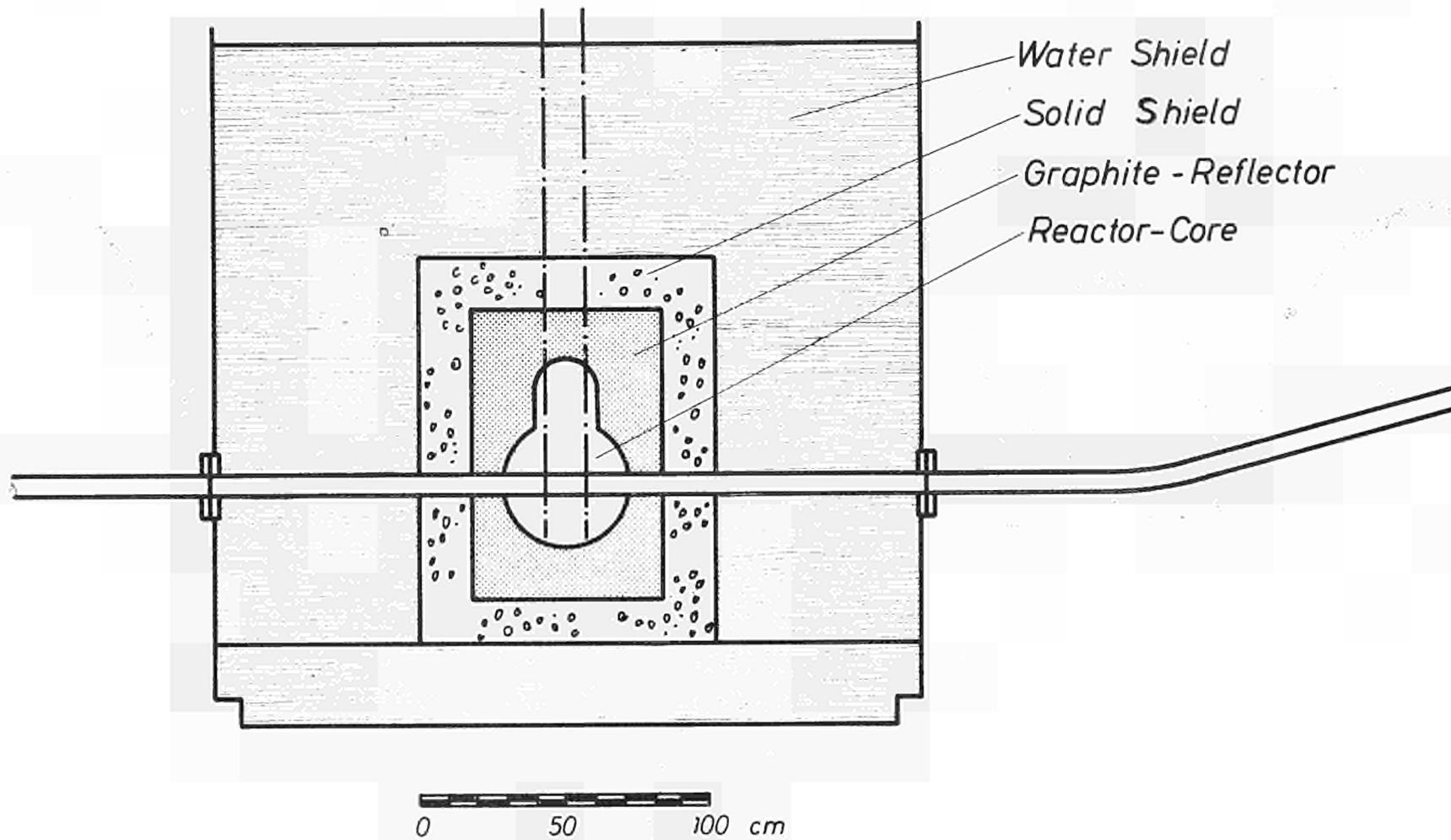
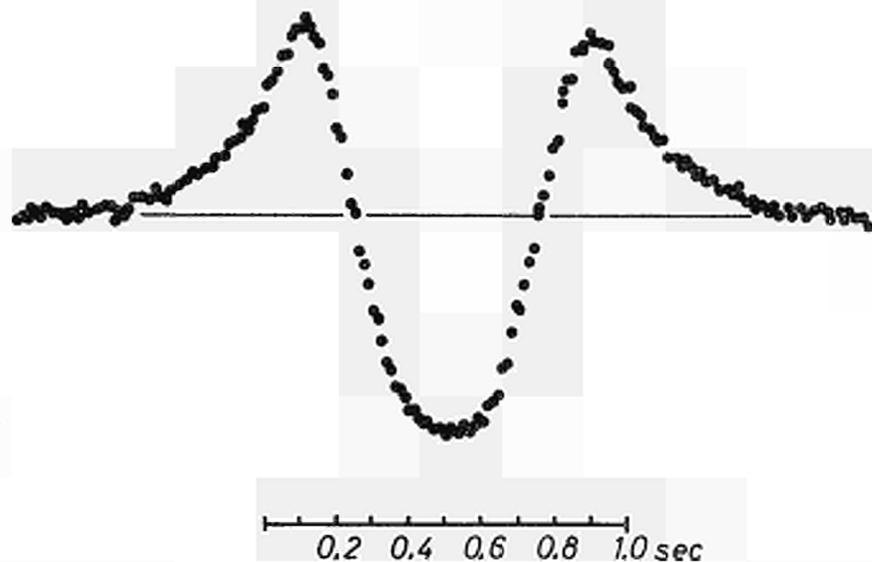
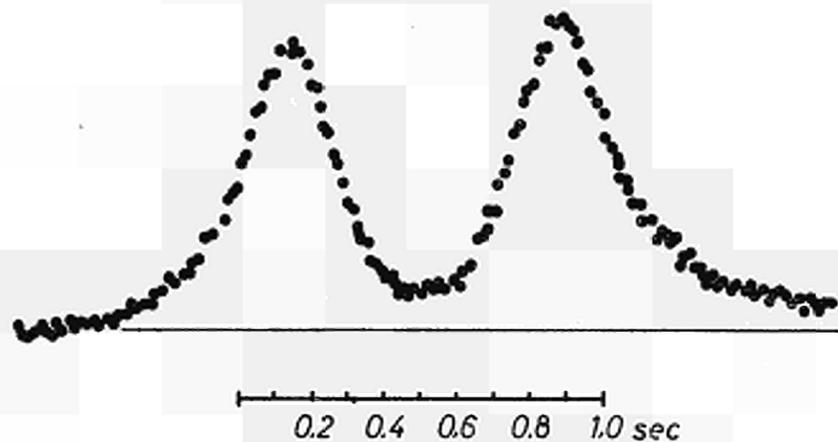


Fig. 8

Boron-Element



Moderator Element



Fuel-Element

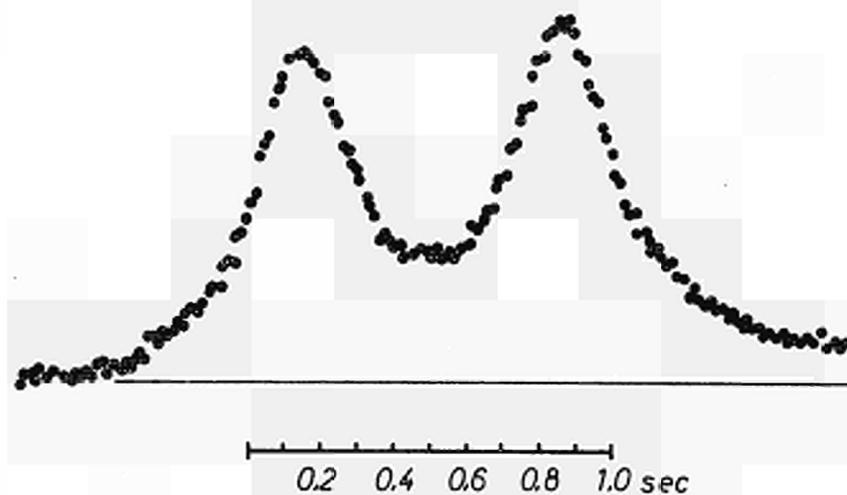


Fig. 9

BBC / KRUPP

Signals from AVR Elements, ADIBKA 1. 5 Watts

THTR

68.12-9

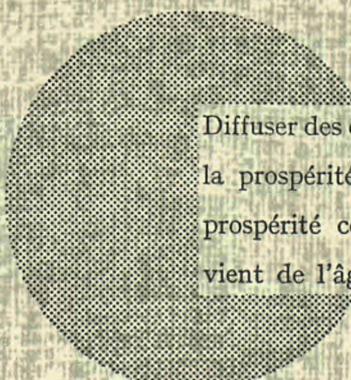
AVIS AU LECTEUR

Tous les rapports Euratom sont signalés, au fur et à mesure de leur publication, dans le périodique mensuel **EURATOM INFORMATION**, édité par le Centre d'information et de documentation (CID). Pour souscrire un abonnement (1 an : FF 75, FB 750) ou recevoir un numéro spécimen, prière d'écrire à :

Handelsblatt GmbH
"Euratom Information"
Postfach 1102
D-4 Düsseldorf (Allemagne)

ou à

Centrale de vente des publications
des Communautés européennes
37, rue Glesener
Luxembourg



Diffuser des connaissances c'est distribuer de la prospérité — j'entends la prospérité collective et non la richesse individuelle — et cette prospérité contribue largement à la disparition du mal qui nous vient de l'âge des ténèbres.

Alfred Nobel

BUREAUX DE VENTE

Tous les rapports Euratom sont vendus dans les bureaux suivants, aux prix indiqués au verso de la première page de couverture (lors de la commande, bien indiquer le numéro EUR et le titre du rapport, qui figurent sur la première page de couverture).

CENTRALE DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

37, rue Glesener, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBLAD
Leuvenseweg 40-42 - Brussel

LUXEMBOURG

CENTRALE DE VENTE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
37, rue Glesener - Luxembourg

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15^e

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

UNITED KINGDOM

H. M. STATIONERY OFFICE
P. O. Box 569 - London S.E.1

EURATOM — C.I.D.
29, rue Aldringer
L u x e m b o u r g

CDNA042372AC