

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 07.04.00.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 12.10.01 Bulletin 01/41.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : FRAMATOME Société anonyme —
FR.

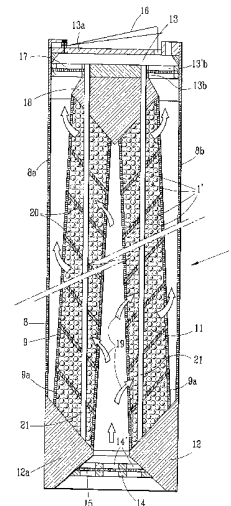
⑦2 Inventeur(s) : BLANPAIN PATRICK et GUESDON
BERNARD.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : CABINET LAVOIX.

⑤4 ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE NUCLEAIRE POUR UN REACTEUR REFROIDI PAR DE L'EAU LEGERE
COMPORTANT UN MATERIAU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE SOUS FORME DE PARTICULES.

⑤7 Le matériau combustible nucléaire est constitué par au moins un lit (11) de particules (1') de forme sensiblement sphérique ayant un diamètre compris entre 0,5 et 5 mm. La structure de maintien de l'assemblage de combustible (10) comporte un boîtier (8) de forme prismatique et au moins un panier (9) disposé à l'intérieur du boîtier (8) et renfermant au moins un lit (11) de particules de combustible nucléaire. Les embouts d'extrémité (12, 13) du boîtier sont traversés chacun par au moins une ouverture de passage d'eau, le ou les paniers comportant des parois poreuses traversées par des ouvertures d'une dimension inférieure au diamètre des particules de combustible (1') et disposées de manière que le ou les lits de particules de combustible (11) soient traversés par de l'eau de refroidissement du réacteur nucléaire entrant dans le boîtier (8) de l'assemblage de combustible par le premier embout d'extrémité (12) et sortant de l'assemblage de combustible par le second embout d'extrémité (13).



L'invention concerne un assemblage de combustible nucléaire pour un réacteur refroidi par de l'eau légère et en particulier pour un réacteur refroidi par de l'eau sous pression, comportant un matériau combustible nucléaire et une structure de maintien du matériau combustible nucléaire.

5 Les assemblages de combustible pour des réacteurs nucléaires refroidis par de l'eau légère comportent une structure de maintien ou ossature dans laquelle sont disposés des éléments de combustible nucléaire.

Dans le cas des réacteurs nucléaires refroidis par de l'eau sous pression, les assemblages de combustible sont constitués d'un faisceau de
10 crayons de combustible parallèles entre eux et maintenus à l'intérieur d'une ossature comportant des grilles-entretoises de maintien transversal des crayons, des tubes-guides de direction longitudinale parallèles aux crayons et des embouts d'extrémité de l'assemblage de combustible. Chacun des crayons de combustible est constitué par un tube, généralement en alliage
15 de zirconium, appelé gaine, dans lequel sont empilées, dans la direction axiale du tube, des pastilles de combustible nucléaire, par exemple des pastilles frittées d'oxyde d'uranium UO_2 .

L'eau de refroidissement du réacteur nucléaire circule dans la direction axiale des assemblages de combustible, en contact avec la surface ex-
20 térieure des gaines des crayons.

De tels assemblages de combustible qui sont utilisés dans un très grand nombre de réacteurs nucléaires de production d'énergie présentent cependant certains inconvénients.

En particulier, le combustible nucléaire qui est en contact avec le
25 matériau métallique de la gaine ne doit pas subir d'échauffement trop important ; on doit en effet éviter la formation de points chauds dans certaines zones des crayons de combustible, suivant leur longueur, pour éviter un endommagement de la gaine et/ou des réactions d'oxydation de la gaine au contact de l'eau de refroidissement ou de vapeur d'eau, avec production
30 d'hydrogène et donc avec des risques d'explosion.

Il en résulte qu'il est nécessaire de prévoir de très grandes marges de sécurité lors de la détermination des conditions de fonctionnement du réacteur nucléaire.

Dans les conditions de fonctionnement normal du réacteur nucléaire à eau sous pression, la température moyenne du combustible nucléaire est relativement élevée, de l'ordre de 600°C ; en outre, la puissance volumique est élevée, si bien qu'il faut prévoir un refroidissement intense de la gaine par l'eau de refroidissement du réacteur nucléaire.

En outre, du fait de la présence de matériaux métalliques au contact du combustible nucléaire, le combustible ne peut résister à des températures élevées, même pendant des durées très faibles. Le délai pendant lequel on peut assurer l'intégrité du combustible, en cas d'arrêt du refroidissement du réacteur nucléaire est donc très court. D'autre part, la limite d'utilisation des assemblages de combustible des réacteurs nucléaires à eau sous pression selon la conception actuelle est relativement basse, de l'ordre de 70 GWj/t. Cette limitation est due en particulier au fait qu'il n'est possible d'utiliser que des combustibles faiblement enrichis en éléments fissiles (au plus 5 %) dans les assemblages de combustible pour les réacteurs nucléaires à eau sous pression de conception actuelle. Il n'est pas possible également d'incorporer, dans le combustible de ces assemblages, des proportions relativement importantes de plutonium.

On connaît d'autre part des combustibles pour les réacteurs nucléaires à haute température (HTR) sous forme de particules de forme sphérique et de petites dimensions ayant un rayon de l'ordre de 1 ou 2 mm. Ces particules de combustible comportent un noyau constitué par le matériau combustible proprement dit tel que l'oxyde d'uranium UO_2 , une première couche périphérique de graphite à faible densité, plusieurs couches externes en graphite pyrolithique de plus forte densité et une couche de carbure de silicium SiC , enfin, une couche de graphite. Les particules sont elles-mêmes noyées dans une matrice en graphite.

Le graphite assure une certaine modération des réactions neutroniques ; le graphite de la première couche périphérique interne assure l'absorption de produits de fission dégagés par le combustible. Le combustible est entouré par la matrice en graphite modérateur qui est refroidi par de l'hélium.

L'utilisation de particules de combustible de forme sphérique et de petites dimensions est difficilement envisageable dans les réacteurs nucléaires refroidis par de l'eau et en particulier dans les réacteurs nucléaires refroidis par de l'eau sous pression.

5 On ne connaissait pas jusqu'ici d'assemblages de combustible pour réacteurs nucléaires refroidis par de l'eau légère et en particulier pour des réacteurs nucléaires refroidis par de l'eau sous pression qui permettent d'éviter les inconvénients inhérents aux assemblages de combustible constitués de faisceaux de crayons et qui puissent être facilement adaptés à la
10 structure de réacteurs nucléaires de conception habituelle.

Le but de l'invention est donc de proposer un assemblage de combustible nucléaire pour un réacteur refroidi par de l'eau légère comportant un matériau combustible nucléaire et une structure de maintien du matériau combustible nucléaire, cet assemblage permettant de remédier aux inconvénients des assemblages de combustible comportant des faisceaux de
15 crayons, en particulier aux inconvénients dus à la présence d'une gaine métallique autour du combustible nucléaire et pouvant être utilisé dans des réacteurs nucléaires de type classique, associé à d'autres assemblages identiques pour constituer le cœur du réacteur ou encore en remplacement
20 d'un assemblage de type classique, l'assemblage étant entièrement compatible.

Dans ce but, le matériau combustible nucléaire est constitué par au moins un lit de particules de forme sensiblement sphérique ayant un diamètre compris entre 0,5 et 5 mm et la structure de maintien de l'assemblage de
25 combustible comporte un boîtier de forme prismatique ayant des parois latérales et deux embouts d'extrémité et au moins un panier disposé à l'intérieur du boîtier et renfermant l'au moins un lit de particules de combustible nucléaire, les embouts d'extrémité du boîtier étant traversés chacun par au moins une ouverture de passage d'eau et l'au moins un panier comportant
30 au moins une paroi poreuse traversée par des ouvertures d'une dimension inférieure au diamètre des particules de combustible et disposée de manière que l'au moins un lit de particules de combustible soit traversé par de l'eau de refroidissement du réacteur nucléaire entrant dans le boîtier de l'assem-

blage de combustible par un premier embout d'extrémité et ressortant de l'assemblage de combustible par un second embout d'extrémité.

Afin de bien faire comprendre l'invention, on va décrire, en se référant aux figures jointes en annexe, un mode de réalisation d'un assemblage de combustible suivant l'invention utilisable dans un réacteur nucléaire à eau sous pression de type classique et des particules de combustible nucléaire de l'assemblage de combustible.

La figure 1 est une vue en coupe d'une particule de combustible nucléaire de type connu et utilisée dans un réacteur HTR.

La figure 2 est une vue en coupe d'une particule d'un assemblage de combustible suivant l'invention pour un réacteur refroidi par de l'eau légère.

La figure 3 est une vue en coupe axiale d'un assemblage de combustible suivant l'invention pour un réacteur nucléaire à eau sous pression.

La figure 4 est une vue en coupe transversale de la partie inférieure d'un panier d'un assemblage de combustible suivant l'invention et suivant une variante.

La figure 5 est une vue en coupe transversale d'une partie supérieure d'un panier d'un assemblage de combustible suivant l'invention et suivant la variante de réalisation.

Sur la figure 1, on a représenté une particule de combustible de forme sphérique et présentant un diamètre de l'ordre d'un à deux millimètres telle qu'utilisée dans les réacteurs nucléaires à haute température HTR.

La particule de combustible, désignée de manière générale par le repère 1, comporte un noyau 2 de forme sphérique en un matériau combustible nucléaire, tel que le dioxyde d'uranium UO_2 . Autour du noyau sphérique, sont disposés, successivement, plusieurs couches en forme d'enveloppes sphériques superposées. Une première couche 3 est disposée directement en contact avec la surface extérieure du noyau 2 et constituée par du graphite à faible densité (de densité d de l'ordre de 1,0).

Autour de la couche de graphite poreux 3 est disposée une première couche de graphite pyrolithique 4 de densité supérieure (d de l'ordre de 1,6). Autour de la première couche de graphite pyrolithique 4 peut être disposée une seconde couche 5 de graphite pyrolithique dont la densité est supé-

rieure à la densité de la première couche (d de l'ordre de 2,4). Autour de la première ou de la seconde couche de graphite pyrolithique 5 est disposée une couche 6 de carbure de silicium SiC compacte et isolante (densité voisine de 3). Enfin, autour de la couche de carbure de silicium SiC 6 est disposée une couche externe 7 de graphite pyrolithique de plus forte densité que les couches internes (d voisine de 2,6).

La couche interne 3 de graphite poreux assure l'absorption de produits de fission dégagés par le combustible nucléaire sans entraîner un gonflement excessif de la particule.

Les couches externes 4, 5 de graphite pyrolithique assurent une certaine protection mécanique de la particule et la couche 6 de carbure de silicium une étanchéité au fluide.

La couche la plus externe 7 de graphite pyrolithique assure une protection mécanique de la particule et le contact avec la matrice en graphite.

Sur la figure 2, on a représenté une particule de combustible d'un assemblage de combustible suivant l'invention qui peut être utilisée dans un réacteur nucléaire refroidi par de l'eau.

La particule de combustible, désignée par le repère 1', comporte un noyau 2' en matériau combustible nucléaire réfractaire tel que le dioxyde d'uranium UO_2 .

La particule 1' pourrait comporter également un noyau renfermant d'autres combustibles nucléaires sous la forme d'oxydes réfractaires tels que de l'oxyde de thorium ou de plutonium ou sous la forme de carbures. De manière générale, le noyau en matériau combustible de la particule est constitué par des oxydes et/ou des carbures d'uranium et/ou de plutonium et/ou de thorium. De manière avantageuse, le noyau 2' de la particule 1' du combustible suivant l'invention peut être constitué sous forme mixte par exemple par de l'oxyde d'uranium et de l'oxyde de plutonium.

Le noyau 2' de la particule 1' est entouré par une couche périphérique 3' constituant une enveloppe sphérique d'enrobage en graphite poreux (d voisin de 1,0). La couche de graphite poreux 3' est elle-même entourée d'une ou de deux couches successives 4' et 5' de graphite pyrolithique de densité supérieure sous forme d'enveloppes sphériques d'enrobage. La

densité du graphite pyrolithique de la couche interne 4' peut être de l'ordre de 1,6 et la densité du graphite pyrolithique de la couche externe 5' de l'ordre de 2,4.

5 Autour de la couche externe 5' en graphite pyrolithique à plus forte densité est disposée une couche externe sphérique de recouvrement 6' en carbure de silicium de densité d voisine de 3.

10 La particule 1' d'un assemblage de combustible suivant l'invention ne comporte pas de couche externe en graphite pyrolithique à forte densité, la particule de combustible 1' étant destinée à venir en contact avec de l'eau renfermant différents additifs tels que l'acide borique et avec de la vapeur d'eau à haute température. La couche externe 6' en carbure de silicium présente un comportement satisfaisant en contact avec de l'eau ou de la vapeur, à la température et à la pression du circuit primaire du réacteur nucléaire.

15 Les particules de combustible 1' des assemblages de combustible suivant l'invention utilisées dans le cas des réacteurs nucléaires à eau sous pression présentent de préférence un diamètre de 1 à 2 mm, bien qu'il soit possible d'envisager la fabrication et l'utilisation de particules ayant un diamètre supérieur, par exemple un diamètre de l'ordre de 2,5 mm.

20 De manière générale, les particules des assemblages de combustible suivant l'invention pourront présenter des diamètres allant de 0,5 à 5 mm, suivant la température d'équilibre recherchée dans la particule en contact avec l'eau de refroidissement et la perte de charge acceptable sur la circulation de l'eau de refroidissement à travers le lit de particules des assemblages de combustible.

25 Sur la figure 3, on a représenté un assemblage de combustible selon l'invention désigné de manière générale par le repère 10, cet assemblage de combustible présentant des caractéristiques géométriques et dimensionnelles permettant son utilisation dans le cœur d'un réacteur nucléaire refroidi par de l'eau sous pression de type classique.

30 Les assemblages de combustible des réacteurs nucléaires à eau sous pression comportent généralement une ossature de maintien du faisceau de crayons combustibles présentant une forme générale prismatique

droite à section carrée, les grilles-entretoises de maintien des crayons de combustible et les embouts d'extrémité de l'assemblage de combustible ayant une forme carrée. La section carrée de l'assemblage de combustible présente un côté d'une longueur de l'ordre de 20 cm, la longueur axiale de
5 l'assemblage de combustible étant légèrement supérieure à 4 m.

L'assemblage de combustible suivant l'invention comporte un boîtier externe 8 et un ensemble de paniers 9 disposés à l'intérieur du boîtier 8 et renfermant chacun au moins un lit de particules 11 constitué par des particules de combustible nucléaire telles que la particule 1' qui a été décrite en
10 regard de la figure 2.

Le boîtier 8 de l'assemblage de combustible 10 de forme prismatique droite à section carrée comporte quatre parois latérales telles que 8a et 8b, un embout d'extrémité inférieur 12 et un embout d'extrémité supérieur 13.

La forme géométrique et les dimensions du boîtier 10 sont analogues
15 aux forme et dimensions de l'ossature d'un assemblage de combustible de type classique d'un réacteur nucléaire refroidi par de l'eau légère.

L'embout inférieur 12 de l'assemblage de combustible comporte un cadre massif 12a de forme extérieure parallélépipédique à section transversale carrée dont les montants ont une section sensiblement triangulaire ou trapézoïdale, comme représenté sur la figure 3.
20

Le cadre 12a est usiné à sa partie inférieure pour constituer des pieds d'appui de l'assemblage de combustible sur une plaque de support de cœur, traversés par des ouvertures permettant le positionnement de l'assemblage de combustible sur des pions en saillie par rapport à la face supérieure de la
25 plaque de support de cœur du réacteur nucléaire. Le positionnement de l'assemblage de combustible 10 suivant l'invention peut ainsi être réalisé de la même manière que le positionnement d'un assemblage de combustible de type classique par l'intermédiaire des pions de positionnement de la plaque de support de cœur.

30 Dans la partie centrale d'entrée du cadre 12a de l'embout 12 est fixée une plaque 14 traversée par des ouvertures de passage d'eau 14'. Une plaque 15 poreuse traversée par des ouvertures de petites dimensions est dis-

posée dans la partie d'entrée de l'embout 12 ou des grilles de filtration sont associées aux ouvertures 14' de passage d'eau de la plaque 14.

L'embout supérieur 13 de l'assemblage de combustible est réalisé de la même manière qu'un embout supérieur d'assemblages de combustible de type classique pour un réacteur nucléaire refroidi par de l'eau sous pression.

L'embout supérieur 13 comporte un cadre supérieur 13a assurant le positionnement de l'assemblage de combustible en-dessous de la plaque supérieure de cœur du réacteur nucléaire sur lequel sont fixés des ressorts à lame 16 de maintien de l'assemblage de combustible. L'embout 13 comporte de plus une plaque adaptatrice 13b solidaire du cadre 13a et comportant une ouverture périphérique 13'b de passage d'eau au travers de laquelle est placée une plaque poreuse 17 ou une grille traversée par des ouvertures de petites dimensions.

De manière générale, les parois latérales telles que 8a et 8b du boîtier 8 de l'assemblage de combustible, et les plaques 15 et 17 des embouts 12 et 13 réalisées sous forme poreuse comportent des ouvertures dont les dimensions sont inférieures au diamètre des particules 1' de combustible constituant le lit 11 à l'intérieur des paniers 9.

Sous la plaque adaptatrice 13b de l'embout supérieur 13, est fixée une pièce de montage 18 dans une disposition centrale.

Chaque panier 9 renfermant au moins un lit de particules 11 est délimité par une paroi 9a qui est de préférence inclinée en direction de l'axe central longitudinal de l'assemblage de combustible, du bas vers le haut. Les paniers 9 sont répartis autour de l'axe longitudinal du boîtier prismatique 8.

Les parois 9a des paniers 9 peuvent avoir par exemple une forme en tronc de pyramide ou une forme tronconique. Le canal central d'arrivée d'eau dans l'assemblage de combustible, dans le prolongement de l'ouverture de la plaque 14 de l'embout inférieur 12 présente une section décroissante du bas vers le haut. L'eau de refroidissement du réacteur nucléaire pénètre dans l'assemblage de combustible à travers l'embout inférieur et ressort de l'assemblage de combustible par la partie périphérique de la plaque adaptatrice 13'b de l'embout supérieur 13, après avoir traversé le lit de particules 11.

La paroi 9a délimitant chaque panier 9 est fixée, à son extrémité inférieure, sur le cadre 12a de l'embout 12 et, à son extrémité supérieure, sur la pièce centrale 18 de l'embout supérieur.

5 La paroi 9a de chaque panier 9 est traversée par des ouvertures réparties pratiquement suivant toute sa surface, ces ouvertures pouvant être de taille variable suivant la direction axiale de l'assemblage de combustible mais présentant toutefois une taille inférieure à la taille des particules 1' du lit 11.

10 De même, la répartition des trous traversant la paroi 9a des paniers 9 peut être variable suivant la direction axiale de l'assemblage de combustible, le but étant de répartir au mieux l'eau de refroidissement pénétrant dans l'assemblage de combustible à travers l'embout inférieur 12 et circulant d'abord axialement à l'intérieur du canal central entre les paniers 9, puis dans une direction transversale, de manière à traverser le lit de particules 11 pour s'écouler en sortie dans l'espace périphérique de l'assemblage de combustible autour des paniers 9. On a représenté la circulation de l'eau de refroidissement dans l'assemblage de combustible, de manière schématique par les flèches 19.

20 A l'intérieur du panier 9, dans une direction inclinée par rapport à l'axe longitudinal de l'assemblage de combustible peuvent être disposées des entretoises 20 qui peuvent être de forme variable suivant la forme des parois 9a des paniers 9 et qui sont fixées sur les parois 9a.

25 Ces entretoises, sensiblement parallèles entre elles, permettent de réaliser un renforcement de la tenue mécanique du panier, de maintenir le lit de particules dans la direction axiale de l'assemblage de combustible et de guider l'écoulement d'eau de refroidissement à travers le lit de particules 11.

30 De préférence, les entretoises 20 comportent des parois perforées, de manière à permettre une certaine circulation d'eau dans la direction axiale de l'assemblage de combustible, entre les différents compartiments délimités par les entretoises 20 et renfermant des parties successives du lit de particules 11. De plus, le lit de particules 11 est traversé axialement par des tubes-guides 21 fixés à leurs extrémités, respectivement, sur l'embout inférieur 12 et sur l'embout supérieur 13.

Les tubes-guides 21 permettent de réaliser le guidage, à l'intérieur de l'assemblage de combustible, de grappes absorbantes, pour le pilotage de la réactivité du cœur.

5 On cherchera autant que possible à garder une disposition des tubes-guides analogue à la disposition des tubes-guides dans un assemblage du réacteur nucléaire à eau sous pression de type classique.

Il est possible également de prévoir un tube-guide d'instrumentation à la partie centrale de l'assemblage de combustible, à l'intérieur du canal central.

10 Il est possible de répartir les particules de matériau combustible 1' suivant plusieurs lits 11, par exemple plusieurs lits disposés en parallèle dans une disposition sensiblement longitudinale de l'assemblage de combustible. En effet, la proportion volumique d'eau dans le lit de billes par rapport à la proportion de combustible nucléaire tel que l' UO_2 est relativement
15 faible dans le lit de particules comparée à la proportion d'eau et de matériau combustible dans un assemblage de combustible pour réacteur nucléaire à eau légère de type classique.

De ce fait, le combustible est sous-moderé à l'intérieur du lit de billes 11, si bien qu'on observe une dépression du flux neutronique, dans la partie
20 centrale du lit de particules. Des neutrons thermiques peuvent provenir de l'extérieur du lit 11.

Pour obtenir une répartition satisfaisante du flux neutronique dans le lit de particules, il est nécessaire de limiter l'épaisseur du lit de particules, dans la direction transversale de circulation de l'eau de refroidissement.

25 On peut envisager l'utilisation de plusieurs lits de particules successifs traversés par l'eau de refroidissement mais, dans ce cas, le nombre de lits de billes est limité par le fait qu'il faut limiter la perte de charge globale sur la circulation de l'eau de refroidissement à travers le cœur à une valeur de l'ordre de 2,5 à 3 bars, si l'on souhaite rester compatible avec la technologie
30 actuelle des réacteurs nucléaires.

Dans le cas où l'on utilise un panier 9 de forme pyramidale ou tronconique, l'eau de refroidissement pénétrant dans la direction axiale à travers l'embout inférieur 12 de l'assemblage de combustible est répartie suivant

toute la hauteur du lit de particules qui est traversé par des flux de direction transversale répartis sur une très grande section, par exemple une section de 20 à 100 fois plus forte que la section transversale de l'assemblage de combustible.

5 De ce fait, la vitesse de circulation de l'eau de refroidissement à travers le lit de particules peut être maintenue à une valeur faible, ce qui réduit d'autant les pertes de charge à la traversée du lit de particules.

10 Au lieu de paniers dont les parois ont des formes pyramidales ou tronconiques, on peut envisager d'utiliser des paniers ayant des parois tubulaires cylindriques dont la conception est beaucoup plus simple. Cependant, dans une telle réalisation, la vitesse axiale du fluide dans le canal d'entrée est particulièrement élevée, ce qui peut présenter des inconvénients.

15 Il serait possible également d'envisager des lits de particules de direction transversale répartis suivant la direction longitudinale de l'assemblage de combustible mais, dans ce cas, la perte de charge du fluide de refroidissement serait très élevée.

20 On peut également envisager l'utilisation de paniers présentant des formes plus complexes, comme représenté sur les figures 4 et 5, de manière à optimiser les conditions de circulation du fluide de refroidissement dans l'assemblage de combustible.

Comme il est visible sur la figure 4, la partie inférieure du panier comporte, à l'intérieur d'un cadre à section carrée, un passage d'entrée d'eau 22 de forme carrée suivant lequel est disposé un tube-guide 23.

25 La partie haute du panier présente une forme complexe en trèfle délimitant un passage d'eau 22' autour d'un obturateur à la partie centrale duquel est fixée la partie d'extrémité supérieure du tube-guide 23.

30 Du fait de l'utilisation de particules 1' de forme sphérique et de petites dimensions, la surface d'échange entre le combustible nucléaire et l'eau de refroidissement en circulation, à l'intérieur du lit de particules 11, est beaucoup plus importante que dans le cas d'assemblages de combustible de type classique, rapportée à la masse de matériau combustible nucléaire contenu dans l'assemblage de combustible, cette masse de matériau com-

bustible nucléaire étant sensiblement identique dans le cas d'un assemblage de combustible suivant l'art antérieur et dans le cas d'un assemblage de combustible suivant l'invention.

De ce fait, en fonctionnement normal de l'assemblage de combustible, l'écart de température nécessaire entre le combustible nucléaire et l'eau de refroidissement pour assurer l'évacuation de la puissance est sensiblement plus faible dans le cas d'un assemblage de combustible suivant l'invention.

En outre, du fait de la petite taille des particules, l'écart de température entre le centre de la particule (point le plus chaud) et la surface de la particule est également très faible. Il en résulte que le combustible nucléaire, dans le cas d'un assemblage de combustible suivant l'invention, est à une température moyenne à peine supérieure à celle de l'eau de refroidissement sous pression du réacteur nucléaire constituant le réfrigérant primaire. Dans des conditions habituelles de fonctionnement du réacteur nucléaire (eau de refroidissement à 310°C sous 155 bars), la température moyenne du combustible nucléaire UO_2 contenu dans les particules du combustible est inférieure à 330°C.

A titre de comparaison, la température du combustible dans le cas d'assemblages de type classique est voisine de 600°C, dans les conditions nominales de fonctionnement du réacteur nucléaire.

Le combustible nucléaire contenu dans l'assemblage de combustible suivant l'invention est donc un combustible relativement froid.

D'autre part, les particules de combustible 1' qui sont constituées uniquement par des matériaux réfractaires (oxyde, graphite et carbure de silicium) peuvent supporter des températures très élevées sans être détériorées. Les particules de combustible d'un assemblage suivant l'invention peuvent supporter une température d'au moins 1600°C et peuvent même résister à 2000°C pendant plusieurs heures sans que le combustible perde son intégrité.

Les marges entre la température de fonctionnement du réacteur nucléaire (310°C) et la température de détérioration des particules est telle qu'on peut envisager de disposer d'un délai important, pour intervenir après

un accident se traduisant par un manque d'eau de refroidissement dans le cœur du réacteur nucléaire.

En fait, l'intégrité de l'assemblage de combustible dépend essentiellement des caractéristiques du matériau de la structure des assemblages de combustible, c'est-à-dire le boîtier, le panier et les embouts de l'assemblage.

La très grande surface d'échange thermique entre le combustible et l'eau de refroidissement permet également d'envisager des marges beaucoup plus importantes en ce qui concerne le flux thermique critique (marge DNB). La capacité des particules à supporter un échauffement important permet d'espérer que, dans le cas où l'on atteint le flux thermique critique, l'intégrité de la première barrière constituée par les couches entourant le combustible de la particule sera préservée.

L'eau de refroidissement du réacteur renfermant de l'acide borique vient en contact avec la surface extérieure des particules de l'assemblage de combustible constituée par une couche de carbure de silicium SiC déposée sur une couche externe de graphite pyrolithique. La résistance de la couche de carbure de silicium SiC à l'attaque par l'eau borée ou par la vapeur est excellente, à la température de fonctionnement du réacteur nucléaire. En outre, les particules de combustible sont en contact avec un fluide sous une pression de 155 bars, ce qui est en fait un avantage, dans la mesure où la couche de carbure SiC résiste très bien sous des contraintes de compression mais supporte moins bien des contraintes de traction.

En outre, la couche externe de carbure de silicium des particules de combustible est chimiquement inerte vis-à-vis de l'eau ou de la vapeur, même à haute température. En cas d'accident grave sur le réacteur nucléaire, conduisant à une élévation très importante de la température du combustible, on n'a pas à craindre de risque de production d'hydrogène par interaction d'un matériau de gainage du combustible avec l'eau de refroidissement ou la vapeur.

Bien entendu, les matériaux constituant la structure de l'assemblage de combustible doivent eux-mêmes être chimiquement inertes vis-à-vis de l'eau de refroidissement du réacteur nucléaire, même à haute température.

On peut envisager des épuisements de décharge du réacteur nucléaire sensiblement plus élevés que ceux du combustible classique des réacteurs nucléaires à eau sous pression (60 GWj/t).

5 Pour parvenir à un épuisement de décharge de 120 GWj/t, il est nécessaire de prévoir l'utilisation d'un combustible nucléaire constitué par de l' UO_2 ayant un enrichissement en éléments fissiles de l'ordre de 10 %.

Pour compenser la réactivité initiale du combustible, on doit alors utiliser des poisons consommables.

10 Le gadolinium, qui est un élément très absorbant utilisé de manière courante comme poison consommable, n'est pas adapté aux assemblages comportant un combustible sous forme de particules. Le gadolinium très absorbant est généralement utilisé comme poison dans quelques crayons de combustible des assemblages, pour éviter un épuisement rapide du poison consommable. Dans le cas de petites particules, le gadolinium risque de
15 s'épuiser trop vite si on l'utilise en mélange dans l'ensemble du combustible nucléaire et d'autre part, dans le cas où l'on n'utilise le poison consommable que dans une partie des particules de combustible, il est très difficile de réaliser un mélange homogène des particules empoisonnées avec les particules qui ne le sont pas.

20 On préfère donc utiliser un poison moins absorbant que le gadolinium qui puisse être mélangé en petite quantité à la totalité du combustible UO_2 . On peut utiliser en particulier de l'erbium dont la résonance d'absorption se trouve vers 0,5 eV. Cette résonance d'absorption contribue à rendre plus négatif le coefficient modérateur, ce qui peut être avantageux si le rapport de modération est augmenté dans le cœur du réacteur nucléaire, pour améliorer les conditions de circulation de l'eau de refroidissement dans les assemblages de combustible.
25

30 La présence de carbone dans les couches d'enrobage des particules de combustible permet de garantir, qu'en cas de perte totale de l'eau de refroidissement dans le cœur du réacteur nucléaire, la modération des réactions nucléaires n'est jamais complètement nulle. En outre, du fait que le rapport de la surface au volume des particules de combustible est grand, le comportement du combustible en particules dans le cœur du réacteur nu-

cléaire est sensiblement différent du comportement d'un combustible classique, de sorte qu'il est possible d'envisager une proportion de plutonium dans le combustible nucléaire à base d'uranium plus importante que dans le cas des assemblages de combustible selon la conception actuelle (environ 11 % dans le combustible MOX).

Le combustible en particules est d'autre part chimiquement inerte et peut donc être stocké pendant de longues durées sans risque de détérioration et à moindre coût. En outre, du fait de la faible amplitude des variations de température des particules en fonction de la puissance dans le cœur, de la géométrie sphérique de ces particules et de la présence d'une couche de carbone à faible densité autour du combustible, les contraintes sur les couches d'enrobage des particules dues aux variations de température restent très faibles. Les variations de puissance dans le cœur du réacteur nucléaire ont donc une très faible influence sur la tenue des particules de combustible. En particulier, les limitations de reprise de charge après passage à l'arrêt à froid du réacteur nucléaire ou les limitations dues à l'interaction pastilles-gaines du combustible sont pratiquement supprimées ou peuvent être considérablement assouplies.

Dans le cas de l'utilisation d'assemblages de combustible dans un cœur constitué entièrement de combustible en particules suivant l'invention, la répartition volumique des éléments dans le cœur du réacteur nucléaire, pour obtenir un rapport de modération V_m/V_u égal à 2 est la suivante:

- structure de l'assemblage de combustible : 4 %,
- combustible UO_2 : 24 %,
- enrobage du combustible : 24 %,
- eau de refroidissement dans le lit de particules : 24 %,
- eau de refroidissement en dehors du lit de particules : 24 %.

La proportion volumique totale du lit de particules entouré d'eau de modération est donc de 72 % et la proportion d'eau totale de 48 %.

Ces proportions peuvent être comparées aux proportions correspondantes dans le cas d'un cœur constitué d'assemblages de type classique, dont la répartition volumique est la suivante :

- combustible UO_2 : 30 %,

- structure des assemblages de combustible : 10 %,
- eau : 60 %.

Dans le cas d'un réacteur classique, l'eau de refroidissement circule à une vitesse de 4,5 à 5 m/s à l'intérieur des assemblages de combustible.

5 Dans le cas d'assemblages de combustible suivant l'invention à lits verticaux de particules, comme représenté sur la figure 3, la vitesse de l'eau traversant le lit de particules est très faible, comme indiqué plus haut, et les pertes de charge sont faibles. Cependant, dans ce cas, la surface disponible pour l'eau circulant en dehors du lit de particules, donc dans les canaux
10 d'entrée et de sortie de l'assemblage de combustible, est au plus égale à 24 % de la section droite de l'assemblage de combustible, ce qui conduit au minimum à des vitesses de circulation d'eau de 12 m/s dans les canaux. Il est cependant possible d'envisager diverses solutions pour limiter la vitesse de circulation d'eau dans les parties d'entrée et de sortie des assemblages
15 de combustible, par exemple en augmentant le rapport de modération.

Pour obtenir un lit de particules à l'intérieur des assemblages de combustible ayant des caractéristiques de perméabilité au passage de l'eau sensiblement constantes, il est nécessaire d'utiliser des particules parfaitement sphériques et toutes de même taille qui sont empilées de manière
20 sensiblement compacte. On peut atteindre un taux de compacité de 66 % par vibro-compactage des particules au remplissage du panier.

Dans le cas où la paroi du panier renfermant le lit de particules subit un perçage ou une rupture, des particules peuvent se répandre dans l'assemblage de combustible. Dans ce cas, le boîtier, fermé à ses extrémités
25 par des plaques de filtration des embouts, assure le confinement des particules de combustible.

L'invention ne se limite pas au mode de réalisation qui a été décrit.

C'est ainsi qu'on peut envisager des assemblages de combustible renfermant des particules dont le matériau combustible, les dimensions ou la
30 constitution des couches d'enrobage sont différentes de celles qui ont été décrites.

Les particules de combustible selon l'invention peuvent par exemple comporter une seule couche de graphite pyrolithique autour de la couche de

graphite poreux à faible densité, cette couche étant recouverte de la couche externe de carbure de silicium SiC.

5 Le ou les paniers renfermant le ou les lits de particules de matériau combustible à l'intérieur des assemblages de combustible peuvent présenter des formes différentes de celles qui ont été décrites.

Le boîtier des assemblages de combustible peut également présenter une forme et des dimensions extérieures différentes de celles d'un assemblage de combustible d'un réacteur nucléaire à eau sous pression de type classique.

10 De manière générale, les assemblages de combustible suivant l'invention peuvent comporter un boîtier dont la forme et les dimensions sont celles d'un assemblage de combustible d'un réacteur nucléaire refroidi par de l'eau de type quelconque, par exemple un assemblage de combustible d'un réacteur nucléaire à eau bouillante ou d'un réacteur VVER.

15 De manière générale, l'invention s'applique dans le cas de tous les réacteurs nucléaires refroidis par de l'eau légère.

REVENDEICATIONS

1.- Assemblage de combustible nucléaire pour un réacteur refroidi par de l'eau légère, comportant un matériau combustible nucléaire (1') et une structure de maintien (8, 9) du matériau combustible nucléaire (1'), caracté-
5 risé par le fait que le matériau combustible nucléaire (1') est constitué par au moins un lit (11) de particules (1') de forme sensiblement sphérique ayant un diamètre compris entre 0,5 et 5 mm et que la structure de maintien (8, 9) comporte un boîtier (8) de forme prismatique ayant des parois latérales (8a, 8b) et deux embouts (12, 13) d'extrémité et au moins un panier (9) disposé à
10 l'intérieur du boîtier (8) et renfermant l'au moins un lit (11) de particules (1') de combustible nucléaire, les embouts d'extrémité (12, 13) du boîtier (8) étant traversés chacun par au moins une ouverture de passage d'eau et l'au moins un panier (9) comportant au moins une paroi poreuse (9a) traversée par des ouvertures d'une dimension inférieure au diamètre des particules de
15 combustible (1') et disposée de manière que l'au moins un lit (11) de particules de combustible (1') soit traversé par de l'eau de refroidissement du réacteur nucléaire entrant dans le boîtier de l'assemblage de combustible par un premier embout d'extrémité (12) et sortant de l'assemblage de combustible (10) par un second embout d'extrémité (13).

20 2.- Assemblage de combustible suivant la revendication 1, caractérisé par le fait que chacune des particules (1') de forme sphérique comporte un noyau sphérique (2') en un matériau combustible nucléaire, tel que le dioxyde d'uranium (UO_2) entouré par une enveloppe d'enrobage en graphite poreux (3'), elle-même entourée par au moins une enveloppe en graphite
25 pyrolithique (4', 5') et une couche externe de recouvrement (6') en carbure de silicium (SiC).

3.- Assemblage de combustible suivant la revendication 2, caractérisé par le fait qu'il comporte, autour de l'enveloppe sphérique d'enrobage (3') en graphite poreux, d'une densité voisine de 1,0, une première enveloppe sphé-
30 rique (4') en graphite pyrolithique d'une densité voisine de 1,6, puis une seconde enveloppe sphérique d'enrobage (5') en graphite pyrolithique d'une densité voisine de 2,4 et enfin la couche externe sphérique (6') de carbure de silicium d'une densité voisine de 3.

4.- Assemblage de combustible suivant l'une quelconque des revendications 2 et 3, caractérisé par le fait que le noyau en matériau combustible (2') de la particule de combustible (1') est constitué par des oxydes et/ou des carbures d'uranium et/ou de plutonium et/ou de thorium.

5
5.- Assemblage de combustible suivant l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé par le fait que l'au moins un panier (9) renfermant le lit de particules (11) comporte une paroi fixée à ses extrémités, respectivement, sur le premier embout d'extrémité (12) et sur le second embout d'extrémité (13) de l'assemblage de combustible et inclinée vers l'axe du boîtier dans la direction allant du premier vers le second embout (12, 13) de l'assemblage de combustible, l'eau de refroidissement traversant l'ouverture du premier embout d'extrémité (12) de l'assemblage de combustible pénétrant à l'intérieur du panier (9) à travers sa paroi.

15
6.- Assemblage de combustible suivant la revendication 5 comportant au moins un ensemble de paniers (9) répartis autour de l'axe du boîtier prismatique (8) de l'assemblage de combustible.

7.- Assemblage de combustible suivant la revendication 5, caractérisé par le fait que la paroi du panier (9) présente la forme d'un tronc de pyramide.

20
8.- Assemblage de combustible suivant la revendication 5, caractérisé par le fait que la paroi du panier (9) présentent une forme tronconique.

25
9.- Assemblage de combustible suivant l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisé par le fait que des entretoises (20) sont fixées successivement à distance l'une de l'autre dans la direction axiale du boîtier (8) de l'assemblage de combustible, à l'intérieur du ou des paniers (9), de manière à séparer le lit de particules (11) en parties de lit successives dans la direction axiale du boîtier de l'assemblage de combustible et à guider l'eau de refroidissement traversant le lit de particules (11).

30
10.- Assemblage de combustible suivant l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé par le fait que des tubes (21) de guidage de crayons absorbants les neutrons sont disposés dans la direction axiale du boîtier (8) de l'assemblage de combustible, à l'intérieur de l'au moins un lit de particules (11) à l'intérieur de l'au moins un panier (9).

11.- Assemblage de combustible suivant l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé par le fait que les parois latérales du boîtier (8) de l'assemblage de combustible sont réalisées sous forme poreuse et traversées par des ouvertures d'une dimension inférieure aux dimensions des particules de combustible (1') et que des plaques de filtration (15, 17) traversées par les ouvertures de dimensions inférieures aux dimensions des particules sont disposées dans des ouvertures de passage d'eau de refroidissement à travers l'embout inférieur (12) et à travers l'embout supérieur (13) de l'assemblage de combustible.

12.- Assemblage de combustible suivant l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé par le fait que le boîtier (8) de l'assemblage de combustible présente une forme prismatique droite à section carrée et des dimensions analogues aux dimensions d'un assemblage de combustible d'un réacteur nucléaire à eau sous pression de type classique.

1/3

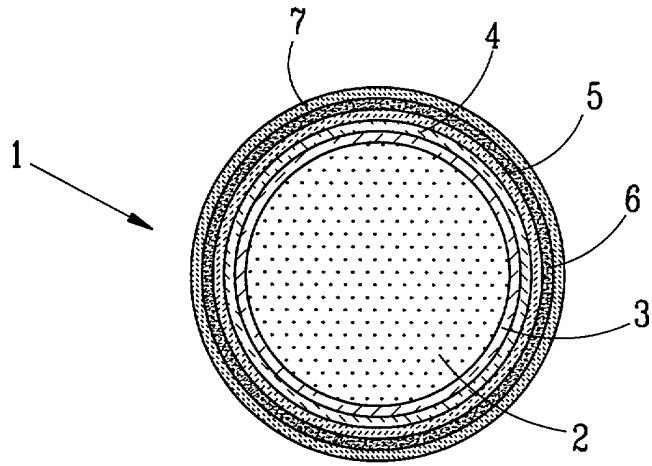


FIG. 1

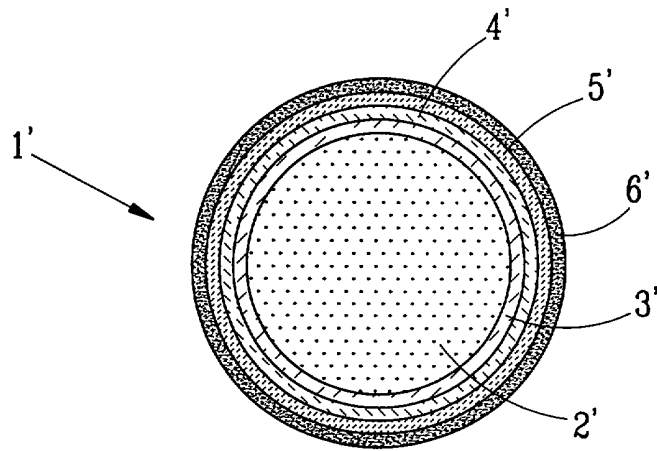


FIG. 2

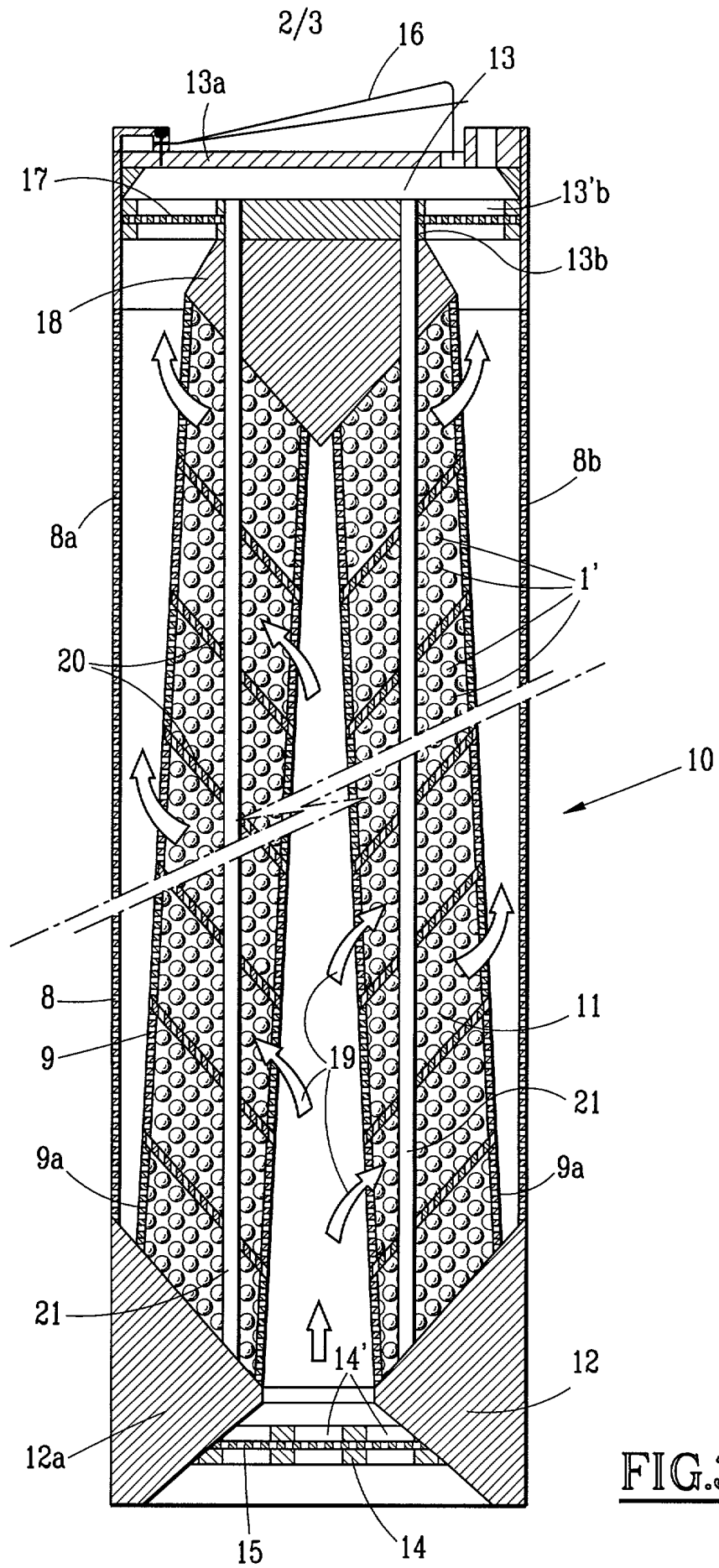
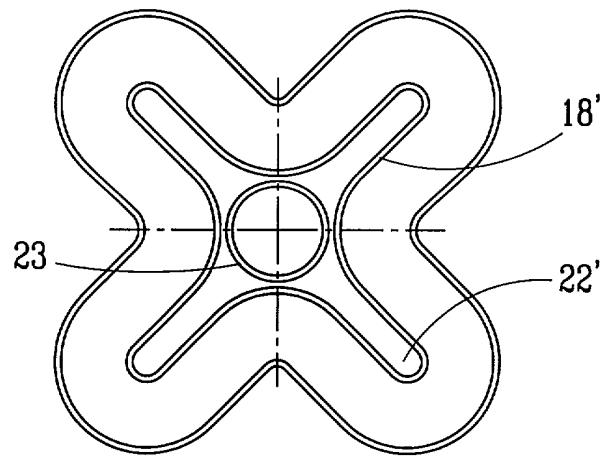
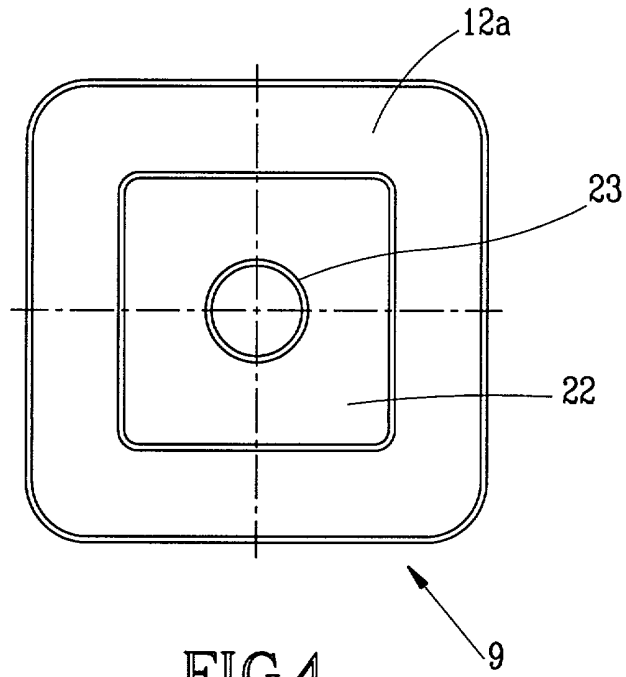


FIG. 3

3/3



DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	DE 44 33 032 C (KERNFORSCHUNGSANLAGE JUELICH) 4 janvier 1996 (1996-01-04) * colonne 9, ligne 9 - ligne 34 * * colonne 10, ligne 47 - colonne 11, ligne 1; figures 1,2 *	1,5,11	G21C3/07 G21C3/12
A	FR 1 365 541 A (UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY) 3 novembre 1964 (1964-11-03) * page 5, colonne de gauche, ligne 37 - colonne de droite, ligne 29 *	1-5,11	
A	DE 44 31 290 C (KERNFORSCHUNGSANLAGE JUELICH) 4 janvier 1996 (1996-01-04) * revendications 1,3,4; figures 1-4 *	1-4	
A	FR 2 143 137 A (GRACE W R LTD) 2 février 1973 (1973-02-02) * page 4, ligne 4 - page 16, ligne 10; figures 1-6 *	1-5,12	
A	GB 1 243 374 A (BRITISH NUCLEAR DESIGN AND CONSTRUCTION LIMITED) 18 août 1971 (1971-08-18) * revendications 1,2,4; figure 1 *	1,10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) G21C
A	FR 2 003 700 A (KERNFORSCHUNGSANLAGE JUELICH) 14 novembre 1969 (1969-11-14) * revendications 1-5 *	1-4	
A	DE 42 27 795 A (SIEMENS AG) 24 février 1994 (1994-02-24) * revendications 1,2 *	1-4	
A	GB 1 074 426 A (MINNESOTA MINING AND MANUFACTURING COMPANY) * revendications 1-4,6 *	1-4	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
7 novembre 2000		Deroubaix, P	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			