

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 122 028**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **21 03968**

⑤① Int Cl⁸ : **G 21 C 3/04 (2020.12), G 21 C 3/62**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Pastille combustible comprenant un insert métallique perfectionné.

②② Date de dépôt : 16.04.21.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 21.10.22 Bulletin 22/42.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 22.12.23 Bulletin 23/51.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public à caractère industriel et
commercial — FR.*

⑦② Inventeur(s) : PICARD COULON Emmanuelle.

⑦③ Titulaire(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public à caractère industriel et
commercial.*

⑦④ Mandataire(s) : CABINET HAUTIER.

FR 3 122 028 - B1



Description

Titre de l'invention : Pastille combustible comprenant un insert métallique perfectionné

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne le domaine des pastilles combustibles pour crayons combustibles de réacteurs nucléaire, et plus particulièrement des pastilles combustibles avec insert métallique. Elle trouve pour application particulièrement avantageuse le domaine des pastilles combustibles pour crayons combustibles de réacteurs nucléaires à eau légère, tels que les réacteurs à eau pressurisée (REP) et les réacteurs à eau bouillante (REB).

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Le cœur d'un réacteur est classiquement divisé en assemblages combustibles, chargés les uns à côté des autres dans la cuve du réacteur. Un assemblage est typiquement constitué d'un faisceau de crayons combustibles. Chaque crayon combustible comprend typiquement une pluralité de pastilles de matériaux combustibles nucléaires fissiles empilées à l'intérieur de la gaine.

[0003] La pastille combustible émet de la chaleur par des réactions de fission. Cette chaleur est conduite à travers la pastille combustible à la gaine puis est transférée au fluide caloporteur primaire. La chaleur émise est évacuée par le fluide caloporteur du cœur vers l'îlot conventionnel de la centrale nucléaire, pour la transformer en électricité.

[0004] Ainsi, la fonction primaire du crayon combustible est de produire, puis de transmettre la chaleur produite par les réactions de fission au sein du matériau combustible au fluide caloporteur. Les puissances linéiques moyennes en régime nominal d'une pastille combustible sont typiquement comprises entre 150 et 300 W/cm. La faible conductivité thermique des matériaux combustibles, et notamment des matériaux à base d'oxyde d'uranium, crée un fort gradient de température entre le centre et la périphérie de la pastille, par exemple de l'ordre de 600 à 700 °C en conditions normales.

[0005] En cas d'augmentation importante de la puissance, la température au cœur de la pastille s'accroît fortement, typiquement à une température supérieure à 1 500 °C, voire supérieure à 2 000 °C. Les contraintes mécaniques entre la pastille et la gaine s'accroissent sous l'effet des dilatations thermiques, du gonflement de la pastille et de la réduction du diamètre de la gaine due à son fluage sous l'effet de la pression du caloporteur. A ces températures, des produits de fission volatils corrosifs pour la gaine, tels que l'iode, peuvent en outre être relâchés par le centre plus chaud de la pastille. Ces phénomènes peuvent induire un phénomène de corrosion sous contrainte de la gaine, pouvant aller jusqu'à la rupture de la gaine. Ils sont communément désignés par

le terme « Interaction Pastille-Gaine - Corrosion Sous Contrainte », abrégé IPG-CSC

- [0006] Par ailleurs, en cas d'accident, par exemple de type perte de fluide caloporteur primaire, une élévation des températures des pastilles combustibles et de la gaine survient due à l'absence de refroidissement et aux puissances résiduelles du crayon. Des calculs de simulations ont montré que les conséquences thermiques temporelles de cet accident sur le crayon combustible sont d'autant moins importantes que les températures des pastilles combustibles sont basses en conditions normales avant l'accident.
- [0007] Pour remédier à ces inconvénients, des solutions existantes consistent à modifier le matériau combustible en modifiant la composition chimique du composé d'uranium pour obtenir une conductivité plus élevée. Ces solutions ont pour inconvénient d'induire un comportement différent en réacteur par rapport aux matériaux combustibles communément employés. Ces solutions nécessitent encore une recherche et un développement important pour qualifier ces combustibles à faible niveau de développement.
- [0008] Des pastilles comprenant des microstructures, comprenant des amas d'oxyde d'uranium entourés de fines parois métalliques, sont décrites dans la littérature. La conductivité thermique des pastilles combustibles résultante est accrue. Toutefois, en pratique, ces microstructures sont irrégulières et difficilement reproductibles. Les microstructures comprennent en effet des discontinuités des parois métalliques, des amas de métal et une porosité mal maîtrisée, dégradant les performances des pastilles combustibles.
- [0009] Il est par ailleurs connu du document Medvedev, et al. *Conductive inserts to reduce nuclear fuel temperature*, Journal of Nuclear Materials, Volume 531, 2020, un concept de pastille combustible comprenant un insert en molybdène doté de 6 ailettes radiales convergentes en un point au centre de la pastille, permettant d'augmenter la conductivité thermique d'une pastille d' UO_2 . Cette solution permet une augmentation de la conductivité thermique de la pastille mais elle reste en pratique limitée en termes de performances de la pastille. En effet, elle reste difficilement fabricable, présente une faible tenue sous irradiation avec un design mal adapté aux conditions d'irradiation. Dès lors, cette pastille ne garantit pas de ne pas aggraver le phénomène d'Interaction Pastille Gaine avec une corrosion sous contrainte (IPG-CSC).
- [0010] Un objet de la présente invention est donc de proposer une solution améliorant encore la sûreté des crayons de combustibles en réduisant les risques de détérioration de la gaine du crayon.
- [0011] Les autres objets, caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à l'examen de la description suivante et des dessins d'accompagnement. Il est entendu que d'autres avantages peuvent être incorporés.

RESUME

[0012] Pour atteindre cet objectif, selon un premier aspect on prévoit une pastille combustible comprenant :

- un matériau combustible nucléaire fissile, et
- au moins un insert métallique, disposé dans le matériau fissile et comprenant une pluralité d'ailettes, chaque ailette s'étendant radialement dans le matériau fissile, vers un pourtour extérieur de la pastille combustible,

[0013] Avantageusement, l'insert métallique comprend un corps central creux sur lequel est disposée la pluralité d'ailettes, chaque ailette s'étendant radialement depuis le corps central creux vers le pourtour extérieur de la pastille.

[0014] L'insert métallique est ainsi configuré pour récupérer l'énergie thermique émise par le matériau combustible, en autorisant une conduction thermique le long du corps central creux et une conduction radiale de cette énergie le long des ailettes. L'insert forme des chemins de conduction de l'énergie thermique circonférentiels par le corps central creux, et radiaux le long des ailettes. Ces chemins sont continus, pour une meilleure conduction thermique depuis le centre vers l'extérieur de la pastille combustible. L'insert permet en outre une conduction thermique selon une direction sensiblement parallèle à l'axe central A. Les températures maximales de la pastille combustible et de la gaine sont ainsi fortement réduites. Ces solutions de propagation se différencient donc clairement des solutions mettant en œuvre des structures d'inserts en nid d'abeille ou de grilles.

[0015] Lors du développement de l'invention, il a été mis en évidence qu'un insert comprenant des ailettes radiales montée sur un corps central creux permet une augmentation de la marge à fusion des pastilles combustibles. En effet, le centre de la pastille est le point le plus chaud de la pastille et les températures de fusion des métaux sont généralement inférieures à celle du matériau combustible, notamment pour un matériau combustible céramique. En cas d'augmentation importante de la puissance, ou en cas d'accident, la température au centre de la pastille combustible s'accroît fortement, par exemple à une température supérieure à 1 500 °C voire à 2 000 °C. Dès lors, la température pouvant être atteinte de la pastille combustible peut induire une fusion de l'insert métallique et la dégradation de sa structure.

[0016] Le corps central creux permet d'éloigner le métal du centre le plus chaud de la pastille combustible et ainsi offrir une bonne tenue de l'insert aux fortes élévations thermiques tout en permettant de façon surprenante une conduction thermique suffisante de la pastille combustible. Cette solution se démarque clairement des approches existantes, et notamment d'une structure dotée d'ailettes radiales convergentes en un point au centre de la pastille.

[0017] Selon un exemple, le corps central est rempli par le matériau combustible. Le corps

central creux forme une barrière physique autour du cœur de la pastille, apte à arrêter les produits de fission. Le corps central permet donc une compartimentalisation du cœur de la pastille combustible et donc un confinement des produits de fission corrosifs qui y sont générés. Le risque de corrosion de la gaine par IPG-CSC est minimisé. Cela permet en outre un retard à la rupture de la gaine en cas d'accident grâce à une baisse de la pression des produits de fission gazeux dans le crayon. Le risque d'altération de la gaine par les produits de fission corrosifs et les produits de fission gazeux est donc réduit.

[0018] Selon un exemple, le rapport entre une dimension externe de la section transversale de la pastille combustible et une dimension externe de la section transversale du corps central creux est sensiblement compris entre 2 et 4, de préférence entre 2,5 et 3,5, plus préférentiellement encore sensiblement égal à 3,2. Lors du développement de l'invention, il a été mis en évidence que ces dimensions relatives entre le pourtour extérieur de la pastille et le corps central creux permettent d'améliorer synergiquement l'extraction de l'énergie thermique depuis la zone la plus chaude de la pastille et l'augmentation de la marge à fusion de la pastille, par un éloignement adapté du métal du centre de la pastille combustible.

[0019] Selon un exemple, l'insert métallique comprend un corps externe configuré pour former le pourtour extérieur de la pastille combustible. Ainsi, le corps externe forme une barrière physique autour de la pastille, apte à arrêter les produits de fission. Le corps externe avec les ailettes et le corps central complète la compartimentalisation de la pastille combustible. Avec trois ailettes par exemple, trois compartiments fermés de matériau combustible sont créés entre les ailettes et le corps externe. Les produits de fission volatils agressifs pour la gaine se propagent notamment au niveau de fissures radiales dans le matériau combustible, allant du centre de la pastille vers son pourtour extérieur. Une fissure radiale débouchant sur la gaine entraîne une concentration des produits de fission volatils favorisant la corrosion de la gaine. Le corps externe complétant la compartimentalisation de la pastille combustible, il retient dans chaque compartiment les produits de fission créés localement par fission et évite cette concentration des produits de fission volatils en les confinant par rapport à la gaine, tout en améliorant l'échange thermique entre le matériau combustible et la gaine. Il en est de même pour les produits de fission gazeux qui sont retenus dans chaque compartiment et réduisent la pression interne du crayon et par conséquent réduisent les risques de détérioration de la gaine en cas d'accident.

[0020] Un deuxième aspect de l'invention concerne un crayon combustible comprenant au moins une pastille combustible, et de préférence une pluralité de pastilles combustibles, selon le premier aspect, entourée d'une gaine.

[0021] Un troisième aspect de l'invention concerne un assemblage pour réacteur nucléaire

comprenant un faisceau de crayons combustibles selon le deuxième aspect.

[0022] Un quatrième aspect de l'invention concerne un réacteur nucléaire comprenant un assemblage selon le troisième aspect.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0023] Les buts, objets, ainsi que les caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront mieux de la description détaillée d'un mode de réalisation de cette dernière qui est illustré par les dessins d'accompagnement suivants dans lesquels :

[0024] [Fig.1A] La [Fig.1A] représente une vue en coupe longitudinale d'une cuve d'un réacteur nucléaire selon un exemple de réalisation de l'invention.

[0025] [Fig.1B] La [Fig.1B] représente une vue en coupe longitudinale d'un crayon combustible selon un exemple de réalisation de l'invention.

[0026] [Fig.2A] La [Fig.2A] représente une vue en perspective de la pastille combustible selon un exemple de réalisation de l'invention dans lequel l'insert comprend un corps central et 4 ailettes.

[0027] [Fig.2B] La [Fig.2B] représente une vue en perspective de la pastille combustible selon un exemple de réalisation de l'invention dans lequel l'insert comprend en outre un corps externe.

[0028] [Fig.3] La [Fig.3] représente une vue en perspective de la pastille combustible selon un exemple de réalisation de l'invention dans lequel l'insert comprend un autre exemple de corps externe

[0029] [Fig.4] La [Fig.4] représente une vue en perspective de la pastille combustible selon un exemple de réalisation de l'invention dans lequel l'insert comprend 8 ailettes.

[0030] [Fig.5A] La [Fig.5A] représente une vue en perspective de la pastille combustible selon un exemple de réalisation de l'invention dans lequel l'insert comprend plusieurs jeux d'ailettes.

[0031] [Fig.5B] La [Fig.5B] représente une vue en perspective de la pastille combustible selon un exemple de réalisation de l'invention dans lequel la pastille combustible comprend plusieurs inserts métalliques.

[0032] [Fig.5C] La [Fig.5C] représente une vue de face de la pastille combustible selon l'exemple de réalisation illustré par l'une ou l'autre des figures 5A et 5B.

[0033] [Fig.5D] La [Fig.5D] représente deux vues en perspective de la pastille combustible selon un exemple de réalisation de l'invention dans lequel l'insert comprend quatre ailettes en hélice.

[0034] Les dessins sont donnés à titre d'exemples et ne sont pas limitatifs de l'invention. Ils constituent des représentations schématiques de principe destinées à faciliter la compréhension de l'invention et ne sont pas nécessairement à l'échelle des applications pratiques. En particulier les dimensions relatives entre la longueur et la largeur de la

pastille combustible, ainsi qu'entre le corps central et le pourtour externe de la pastille combustible, ne sont pas nécessairement représentatives de la réalité.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE

- [0035] Avant d'entamer une revue détaillée de modes de réalisation de l'invention, sont énoncées ci-après des caractéristiques optionnelles qui peuvent éventuellement être utilisées en association ou alternativement.
- [0036] Selon un exemple, le matériau combustible est une céramique nucléaire fissile. Selon un exemple, le matériau combustible est choisi parmi l'oxyde d'uranium, l'oxyde mixte d'uranium et de plutonium, l'oxyde mixte de thorium.
- [0037] Selon un exemple, le corps central creux présente un pourtour radial fermé délimitant un volume intérieur. Selon un exemple l'intérieur du corps creux est exempt d'ailette. Selon un exemple, l'intérieur du corps central est rempli uniquement de matériau combustible. Selon un exemple, l'intérieur du corps central est intégralement rempli de matériau combustible.
- [0038] Selon un exemple l'insert est configuré pour ne représenter qu'une proportion sensiblement inférieure ou égale à 15 %, de préférence sensiblement inférieure ou égale à 10 % du volume total de la pastille combustible.
- [0039] Selon un exemple l'insert est configuré pour représenter une proportion sensiblement supérieure ou égale à 5 % du volume total de la pastille combustible.
- [0040] Selon un exemple, l'insert est monobloc. Selon un exemple alternatif, le corps central avec ses ailettes et le corps externe sont distincts.
- [0041] Selon un exemple, le corps central et la pastille sont cylindriques et sont coaxiaux. Selon un exemple, le corps central, le corps externe et la pastille sont cylindriques et sont coaxiaux.
- [0042] Selon un exemple, la section transversale de la pastille combustible est sensiblement circulaire. Selon un exemple, la section transversale du corps central creux est sensiblement circulaire.
- [0043] Selon un exemple, la dimension externe de la section transversale de la pastille combustible est son diamètre externe. Selon un exemple, une dimension externe de la section transversale du corps central creux est son diamètre externe.
- [0044] L'axe central d'extension principale de la pastille combustible peut former un axe de révolution de la pastille.
- [0045] Selon un exemple, le corps externe présente une épaisseur sensiblement supérieure à 5 μm . Selon un exemple, le corps externe présente une épaisseur sensiblement inférieure à 25 μm . Selon un exemple, le corps externe présente une épaisseur sensiblement comprise entre 5 μm et 25 μm . Selon un exemple, l'insert métallique comprend entre 3 et 8 ailettes prises selon une section perpendiculaire à une direction

principale selon laquelle s'étend le corps central creux. Ce nombre d'ailette permet d'améliorer la conductivité thermique et de réduire fortement les températures maximales de la pastille combustible tout en limitant la quantité de métal dans la pastille. Ce nombre d'ailette, en synergie avec les épaisseurs décrites pour le corps central et pour les ailettes, permet une bonne fabricabilité et solidité de l'insert, et une bonne tenue en fonctionnement dans le temps.

[0046] Selon un exemple, les ailettes sont parallélépipédiques.

[0047] Selon un exemple, l'au moins une ailette, de préférence chaque ailette, présente une épaisseur sensiblement supérieure à 250 μm . Cette gamme d'épaisseur facilite la fabrication et la solidité de l'insert métallique et améliore la tenue en fonctionnement dans le temps de la pastille combustible. En outre, l'insert présente ainsi une meilleure résistance aux déformations et aux dilatations. Selon un exemple, l'au moins une ailette, de préférence chaque ailette, présente une épaisseur sensiblement inférieure à 450 μm . La quantité de métal dans la pastille est ainsi limitée. Selon un exemple, l'au moins une ailette, de préférence chaque ailette, présente une épaisseur sensiblement comprise entre 250 μm et 450 μm . L'épaisseur des ailettes, leur nombre et la fraction volumique l'insert métallique dans la pastille sont de préférence liés.

[0048] Selon un exemple, l'insert ne comprend pas de corps externe. De façon équivalente, le pourtour extérieur de la pastille est formé par le matériau combustible. Selon cet exemple, au moins une ailette, et de préférence chaque ailette, s'étend du corps central sans atteindre le pourtour extérieur de la pastille. Ainsi, un contact direct de la gaine et des ailettes est évité, ce qui minimise et de préférence évite un gradient thermique néfaste sur la gaine en contact avec la pastille. Le rapport du diamètre de l'insert avec ses ailettes sur le diamètre de la pastille, chaque diamètre étant pris selon une direction sensiblement perpendiculaire à l'axe central de la pastille, peut être inférieur à 1. Au moins une ailette, et de préférence chaque ailette, s'étend depuis le corps central creux jusqu'à une région située en bordure du pourtour extérieur de la pastille combustible. La région située en bordure, par rapport au pourtour extérieur de la pastille combustible, est située à une distance sensiblement inférieure à 20 %, de préférence sensiblement inférieure à 10%, et de sensiblement inférieure à 5%, du pourtour extérieur de la pastille combustible 1, selon une direction normale à la tangente au pourtour.

[0049] Selon un exemple, l'insert métallique comprenant un corps externe configuré pour former le pourtour extérieur de la pastille combustible, au moins une ailette, et de préférence chaque ailette, s'étend depuis le corps central creux jusqu'au corps externe de la pastille combustible. Ainsi, l'insert forme un chemin de continuité thermique jusqu'au corps externe qui répartit la chaleur uniformément sur la gaine.

[0050] Selon un exemple, le corps central creux et le corps externe sont reliés par au moins une ailette, de préférence par la pluralité d'ailettes. Ainsi, le matériau combustible est

compartimentalisé pour assurer la rétention des PF volatils et gazeux qui sont créés in situ.

- [0051] Selon un exemple, la pastille combustible présentant une longueur selon une direction parallèle, et de préférence confondue, avec un axe central d'extension principale de la pastille combustible, le corps central creux s'étend sur sensiblement toute la longueur de la pastille combustible. L'insert permet ainsi une continuité thermique du corps central sur toute la longueur de la pastille.
- [0052] Selon un exemple, la pastille présentant une longueur selon une direction parallèle, et de préférence confondue, avec un axe central d'extension principale de la pastille combustible, au moins une ailette, et de préférence la pluralité d'ailettes, s'étend sur sensiblement toute la longueur de la pastille combustible. L'insert permet ainsi une continuité thermique des ailettes sur toute la longueur de la pastille.
- [0053] Selon un exemple, au moins une ailette, et de préférence la pluralité d'ailettes, forme une hélice centrée sur le corps central creux.
- [0054] Selon un exemple, la pastille combustible présentant une longueur selon une direction parallèle, et de préférence confondue, avec un axe central d'extension principale de la pastille combustible, l'insert métallique comprend une pluralité de jeux d'ailettes. Chaque jeu d'ailettes peut comprendre au moins deux ailettes selon une section perpendiculaire à une direction principale selon laquelle s'étend le corps central creux. Chaque ailette de chaque jeu d'ailettes peut s'étendre sur une fraction seulement de la longueur de la pastille combustible. De préférence, la pluralité de jeux d'ailettes est répartie verticalement le long de la pastille combustible.
- [0055] Selon un exemple, pour au moins deux jeux d'ailettes disposés consécutivement le long de la pastille combustible, les ailettes d'un jeu d'ailettes sont désalignées par rapport aux ailettes d'au moins un jeu d'ailettes consécutif.
- [0056] Selon un exemple, pour au moins deux jeux d'ailettes disposés consécutivement le long de la pastille combustible, les ailettes d'un jeu d'ailettes sont alignées par rapport aux ailettes d'au moins un jeu d'ailettes consécutif.
- [0057] Selon un exemple, la pastille combustible comprend une pluralité d'inserts métalliques. De préférence, la hauteur des inserts selon une direction sensiblement parallèle à l'axe central de la pastille est sensiblement comprise entre 0,2 et 1 mm. De préférence, les inserts sont répartis verticalement à intervalle réguliers le long de la pastille combustible. Cela minimise la quantité de métal tout en répartissant les inserts dans la longueur de la pastille pour améliorer sa conductivité thermique.
- [0058] Selon un exemple, les inserts sont coaxiaux, par exemple consécutivement déposés selon une direction z sensiblement parallèle à l'axe central de la pastille.
- [0059] Selon un exemple, pour au moins deux inserts métalliques disposés consécutivement le long de la pastille combustible, les ailettes d'un insert métallique, par exemple les

ailettes d'un premier jeu d'ailettes d'un insert, sont désalignées par rapport aux ailettes d'au moins un insert métallique consécutif, par exemple les ailettes du premier jeu d'ailettes d'au moins un insert consécutif.

- [0060] Selon un exemple, pour au moins deux inserts métalliques disposés consécutivement le long de la pastille combustible, les ailettes d'un insert métallique, par exemple les ailettes d'un premier jeu d'ailettes d'un insert, sont alignées par rapport aux ailettes d'au moins un insert métallique consécutif, par exemple les ailettes du premier jeu d'ailettes d'au moins un insert consécutif.
- [0061] L'insert métallique est à base ou fait d'un métal. Selon un exemple, l'insert métallique est à base ou fait d'un métal présentant une conductivité thermique supérieure à la conductivité thermique du matériau combustible.
- [0062] Selon un exemple, l'insert métallique est à base ou fait d'un métal réfractaire, de préférence avec une absorption neutronique basse.
- [0063] De préférence, le métal choisi parmi le zircaloy, le chrome, le molybdène et leurs alliages.
- [0064] Selon un exemple, l'insert métallique comprend du platine. Selon un exemple, l'insert métallique est à base, voire est constitué de platine. De préférence, l'insert comprend une couche superficielle à base de platine, déposée de façon continue ou discontinue en surface de l'insert. De préférence, l'insert est à base d'un alliage comprenant du platine.
- [0065] Dans la présente demande de brevet, lorsque l'on indique que deux pièces sont distinctes, cela signifie que ces pièces sont séparées. Elles sont :
- positionnées à distance l'une de l'autre, et/ou
 - mobiles l'une par rapport à l'autre et/ou
 - solidaires l'une de l'autre en étant fixées par des éléments rapportés, cette fixation étant démontable ou non.
- [0066] Une pièce unitaire monobloc ne peut donc pas être constituée de deux pièces distinctes.
- [0067] Dans la description détaillée qui suit, il pourra être fait usage de termes tels que « longitudinal », « transversal », « supérieur », « inférieur », « haut », « bas », « avant », « arrière », « intérieur », « extérieur ». Ces termes doivent être interprétés de façon relative en relation avec la position normale de la pastille combustible dans le crayon. Par exemple, la direction « longitudinale » correspond à la direction d'extension principale de la pastille combustible, parallèle à l'axe central d'extension principale de la pastille combustible.
- [0068] On utilisera également un repère dont la direction longitudinale correspond à l'axe z, la direction transversale correspond à l'axe y et la direction avant/arrière correspond à l'axe x.

- [0069] La section transversale est ainsi la section prise perpendiculaire à l'axe central d'extension principale de la pastille combustible, qui est parallèle à l'axe z.
- [0070] « Interne » désigne les éléments ou les faces tournées vers l'intérieur de la pastille combustible, par exemple tournées vers son axe central, et « externe » désigne les éléments ou les faces tournées vers l'extérieur de la pastille combustible, par exemple en étant opposées à son axe central.
- [0071] On entend par un paramètre « sensiblement égal/supérieur/inférieur à » une valeur donnée, que ce paramètre est égal/supérieur/inférieur à la valeur donnée, à plus ou moins 10 % près, voire à plus ou moins 5 % près, de cette valeur.
- [0072] Par un matériau « à base » d'un élément A on entend que ce matériau comprend l'élément ou l'espèce A, éventuellement complété par d'autres éléments ou espèces.
- [0073] Dans le cadre de la présente invention, les épaisseurs d'un élément ou d'une pièce sont prises selon une direction normale à la tangente à la surface de l'élément ou de la pièce.
- [0074] Par un cylindre, on entend un solide délimité par une surface de droites génératrices sensiblement parallèles et deux plans sensiblement parallèles, de préférence perpendiculaires aux droites génératrices. La section transversale d'un cylindre est préférentiellement circulaire mais pas nécessairement : elle peut être ovale, oblongue, ovoïde ou prismatique. Notons que le terme de « cylindre » inclut une forme sensiblement cylindrique, c'est à dire de forme cylindrique imparfaite, par exemple en lien avec des tolérances de fabrication.
- [0075] Les différents aspects de l'invention sont maintenant décrits selon plusieurs exemples de réalisation.
- [0076] De façon générale, un réacteur nucléaire 4 comprend une cuve 40 dans laquelle un cœur 41 est disposé, comme l'illustre par exemple la [Fig.1A]. Les pastilles combustibles 1 sont empilées dans une gaine 20 fermée à ses extrémités pour former un crayon combustible 2. Un faisceau de crayons 2 combustibles forme un assemblage 3. Ces crayons 2 sont typiquement liés par une structure rigide, par exemple constituée de tubes guides et de grilles. Les assemblages 3 sont disposés les uns à côté des autres dans la cuve 40 du réacteur 4. À titre d'exemple, on compte 157 assemblages 3 dans le cœur pour un réacteur d'une puissance de 900 MWe en France. Il existe différents types d'assemblages 3 dans le cœur selon la fonction principale qu'ils sont destinés à remplir. La pastille combustible 1 qui va être décrite en détail ci-dessous est de préférence portée par un crayon combustible 2 dans un assemblage 3 combustible.
- [0077] Un fluide caloporteur circule dans la cuve 40 pour extraire l'énergie thermique produite par les crayons combustibles, comme par exemple illustré par les flèches dans la cuve 40 en [Fig.1A]. Le fluide caloporteur est un liquide. Selon un exemple, le réacteur 4 est un réacteur nucléaire à eau légère (abrégié REL ou LWR de l'anglais

light water reactor). Un REL est un réacteur nucléaire dont le fluide caloporteur du combustible est de l'eau, aussi appelée eau légère en distinction avec de l'eau lourde. Les REL les plus courants sont les réacteurs à eau pressurisée (abrégé REP, ou PWR de l'anglais pressurized water reactor) et les réacteurs à eau bouillante (abrégé REB, ou BWR de l'anglais boiling water reactor). Dans la suite on se réfère à l'exemple non limitatif dans lequel le réacteur est un REL. Dans un REP, l'eau est typiquement à une pression sensiblement de 150 bar et à une température sensiblement de 320 °C. À titre d'exemple, nous pouvons citer les REP 900 MWe ou 1300 MWe de la filière française. Dans un REB, l'eau est typiquement à une pression sensiblement de 70 bar et à une température sensiblement de 215 °C.

[0078] Un crayon combustible 2 comprend généralement une pluralité de pastilles combustible 1 empilées selon une direction longitudinale, et entourées par une gaine 20, communément en Zircaloy, comme l'illustre par exemple la [Fig.1B]. La gaine 20 est fermée et étanche et constitue une première barrière de confinement. Elle peut présenter un diamètre compris entre 8 et 13 mm. Les pastilles combustibles 1 sont typiquement sous la forme de cylindres pleins de diamètre sensiblement compris entre 7 et 9 mm, par exemple sensiblement égal à 8,2 mm à froid, c'est-à-dire hors irradiation de la pastille, et de longueur L_1 sensiblement comprise entre 10 et 15 mm, par exemple sensiblement égale à 13,6 mm, comme par exemple illustré par la [Fig.2A]. Le diamètre à chaud, c'est-à-dire sous irradiation, d'une pastille combustible peut être sensiblement égal au diamètre interne de la gaine 20, par exemple de sensiblement 8,36 mm. En effet, le joint entre les pastilles combustible 1 et la gaine 20, entièrement gazeux en hélium en début d'irradiation, devient totalement comblé en début de second cycle d'irradiation. Le diamètre à chaud varie typiquement en fonction des conditions d'irradiation du crayon.

[0079] Une pastille combustible 1 comprend un matériau combustible 10 nucléaire, fissile sous irradiation en réacteur nucléaire. Ce matériau 10 est représenté en pointillé dans les figures représentant une vue d'ensemble de la pastille 1. Le matériau combustible 10 peut être une céramique combustible nucléaire. Le matériau combustible 10 peut par exemple être à base d'un oxyde d'uranium, par exemple de dioxyde d'uranium de formule UO_2 . Le dioxyde d'uranium peut être enrichi avec de l'uranium U_{235} , par exemple à environ 5% le complément étant de l' U_{238} fertile. Le matériau combustible 10 peut par exemple être à base d'un oxyde mixte (abrégé MOX, de l'anglais Mixed OXide) d'uranium et de plutonium $(U, Pu)O_2$, par exemple avec une teneur en Pu comprise entre 5 et 10% en masse par rapport à la masse totale d'U+Pu et de l'uranium appauvri, et/ou d'un oxyde mixte de thorium de formule $(U, Th)O_2$.

[0080] Ces matériaux combustibles en céramique sont généralement de faibles conducteurs thermiques. Lors du fonctionnement du réacteur, ceci induit de forts gradients

thermiques radiaux dans la pastille combustible, et donc de fortes contraintes thermomécaniques dans la pastille combustible. En fonctionnement nominal, la température d'une pastille combustible est de l'ordre de 1 000 °C au centre et de 400 à 500 °C à sa surface (ou pourtour extérieur 1a).

- [0081] En cas d'augmentation importante de la puissance, la température au centre ou cœur de la pastille s'accroît fortement, par exemple jusqu'à 1 500 °C, voire au-delà de 2 000 °C dans certains cas.
- [0082] Avec les dilatations thermiques et le gonflement de la pastille 1, il se produit une réduction du diamètre de la gaine 20 due à son fluage sous l'effet de la pression du caloporteur. Les contraintes de la pastille 1 sur la gaine 20 s'accroissent.
- [0083] A ces températures, des produits de fission (abrégé PF dans la suite) peuvent être relâchés. Parmi ces produits de fission, on distingue en particulier les produits de fission gazeux et les produits de fission volatils, pouvant aussi être désignés par produits de fission corrosifs. Les produits de fission gazeux sont typiquement des gaz rares, et notamment du xénon et/ou du krypton. Ces gaz créent des sollicitations thermomécaniques dans la pastille 1 et exercent une pression sur la gaine 20, pouvant aller jusqu'à sa rupture en conditions accidentelles. Les produits de fission volatils, tels que les tellures ou l'iode, sont corrosifs pour la gaine. Ces produits de fission sont notamment dégagés lors de forts transitoires de puissance.
- [0084] Ces PF volatils se propagent notamment au niveau de fissures radiales dans le matériau combustible, allant du centre le plus chaud de la pastille vers son pourtour extérieur. Ces fissures sont issues notamment des déformations du matériau combustible sous l'effet des sollicitations thermomécaniques. Une fissure radiale induit une concentration des PF volatils à proximité de la gaine, pouvant induire, avec les contraintes simultanées sur la gaine, une corrosion de la gaine, voire sa rupture.
- [0085] Un objectif est donc de retarder, et de préférence d'empêcher l'émission et la propagation des PF dans la pastille combustible 1.
- [0086] En outre en cas d'accident, il est important de pouvoir réduire les températures maximales des pastilles combustibles afin d'en réduire les conséquences thermiques temporelles et améliorer la sûreté des crayons.
- [0087] Pour remédier à cela, la pastille combustible 1 comprend en outre un insert 11 métallique. L'insert 11 est une structure métallique ou de façon équivalente un élément structurel métallique disposé dans le matériau combustible 10. L'insert 11 est configuré pour augmenter la conductivité thermique et réduire les températures maximales de la pastille 1 en formant une structure hautement conductrice de la chaleur évacuant radialement l'énergie thermique produite du centre vers la périphérie de la pastille. Cet insert 11 est en outre configuré pour confiner les PF au moins au centre de la pastille combustible 1 afin de limiter leur propagation vers le pourtour

extérieur de la pastille 1 et donc vers la gaine du crayon.

- [0088] Par ailleurs, l'insert 11 est de préférence configuré pour ne représenter qu'une proportion sensiblement inférieure ou égale à 15 %, de préférence sensiblement inférieure ou égale à 10 %, du volume de la pastille combustible 1. En outre, les métaux présentent généralement une légère absorption aux neutrons. Afin d'éviter un enrichissement supplémentaire en U235 de la pastille, il est préférable de limiter la quantité de métal présent dans la pastille combustible. Ces proportions minimisent le recours à un accroissement de l'enrichissement en uranium 235 de l'uranium du matériau combustible pour obtenir la même puissance de la pastille.
- [0089] Afin de concilier ces objectifs, l'insert 11 comprend un corps central 110 creux, sur lequel sont montées plusieurs ailettes 111 s'étendant radialement depuis le corps central creux vers le pourtour extérieur de la pastille combustible 11, comme illustré par exemple par la [Fig.2A]. Cette structure de l'insert 11 permet à la fois d'améliorer la conductivité thermique de la pastille, et ainsi de pouvoir réduire les températures maximales de la pastille de 200 à 600°C suivant les conditions tout en facilitant sa fabrication et en limitant la quantité de métal. De plus, grâce au corps central creux, la température de fusion de la pastille est augmentée par rapport aux solutions précédentes comprenant du métal au centre des pastilles.
- [0090] Le corps central 110 s'étend selon une direction principale sensiblement parallèle, et de préférence confondue, avec l'axe central A d'extension principale de la pastille combustible 1, cet axe étant sensiblement parallèle à la direction z. Selon un exemple préféré, le corps central 110 et la pastille forme une structure coaxiale. Dans la suite, on considère à titre non limitatif que le corps central 110 et la pastille sont cylindriques et sont coaxiaux.
- [0091] Selon un exemple, le corps central 110 présente un volume intérieur non rempli par le matériau combustible 10. Le volume intérieur peut être totalement exempt de matériau combustible. Toutefois, cela peut nécessiter un sur enrichissement coûteux en U₂₃₅ pour compenser le volume en moins de matériau combustible au cœur de la pastille pour dispenser la même puissance.
- [0092] Selon un exemple alternatif et préféré, le corps central 110 présente un volume intérieur rempli par le matériau combustible 10. Un avantage d'être rempli de combustible est d'éviter de sur enrichir en 235U le combustible restant pour dispenser la même puissance (moins coûteux). Le corps central 110 est en outre configuré pour confiner les PF au moins dans le centre de la pastille combustible 1 afin de limiter leur propagation vers le pourtour extérieur de la pastille 1 et donc vers la gaine du crayon. Les risques de corrosion par IPG/SCS sont réduits. L'intérieur du corps creux peut être exempt d'ailette. De préférence, le corps central 110 est intégralement rempli par le matériau combustible 10. Ainsi, le contact thermique entre le matériau combustible 10

et l'insert 11 est favorisé.

[0093] Comme par exemple illustré en [Fig.2A], les dimensions relatives entre le corps central 110 et le pourtour extérieur 1a de la pastille 1 peuvent être adaptées pour réduire significativement les températures maximales de la pastille et augmenter ses températures de fusion. Ainsi, l'extraction de l'énergie thermique peut être améliorée pour des températures de fonctionnement plus hautes que dans les solutions existantes. Le cœur de la pastille combustible peut donc s'élever à des températures supérieures à la température de fusion du métal de l'insert dans risquer une détérioration de l'insert.

[0094] Pour cela, la pastille 1 présente une dimension D_1 prise entre deux points de sa section transversale opposés relativement à son axe central A, et le corps central 110 présente une dimension D_{110} prise entre deux points de sa section transversale opposés relativement à l'axe central A. La dimension D_1 peut plus particulièrement être le diamètre de la pastille 1. La dimension D_{110} peut plus particulièrement être le diamètre externe du corps central 110 creux. Le rapport entre D_1 et D_{110} peut être sensiblement compris entre 2 et 4, de préférence entre 2,5 et 3,5, plus préférentiellement encore sensiblement égal à 3,2. Notons que lorsque l'insert 11 comprend un corps externe 112 formant le pourtour extérieur 1a de la pastille, comme décrit plus en détail ultérieurement, le diamètre D_1 de la pastille 1 inclut le corps externe 122.

[0095] Comme par exemple illustré par la [Fig.2A], le corps central peut s'étendre sur une distance sensiblement supérieure ou égale à 80 %, de préférence sensiblement supérieure ou égale à 90 % de préférence sensiblement supérieure ou égale à 95 % de la longueur L_1 de la pastille 1, selon la direction z. De préférence, le corps central 110 s'étend sur sensiblement toute la longueur L_1 de la pastille combustible 1. Le corps central 110 forme ainsi un chemin en continuité thermique sur toute la longueur de la pastille 1. Le corps central 110 forme en outre un élément conférant une bonne tenue mécanique à l'insert 11. Le corps central 110 peut présenter au moins une extrémité 110a affleurant la surface du matériau combustible 10. De préférence, chaque extrémité 110a affleure la surface du matériau combustible 10. Selon un exemple alternatif et décrit plus en détail ultérieurement, le corps central 110 peut ne s'étendre que sur une fraction uniquement de la longueur L_1 , de façon fractionnée ou continue.

[0096] Selon un exemple, le corps central 110 est formé d'une paroi d'épaisseur comprise entre sensiblement 250 μm et 450 μm . Cette gamme d'épaisseur permet une bonne fabricabilité de l'insert et une rigidité suffisante du corps central 110. La quantité de métal dans la pastille est en outre limitée.

[0097] Comme par exemple illustré par la [Fig.2A], le pourtour extérieur 1a de la pastille 1 peut être formé par le matériau combustible 10, le matériau combustible 10 étant représenté en pointillé.

[0098] Comme par exemple illustré par la [Fig.2B], l'insert 11 métallique peut comprendre

un corps externe 112 configuré pour former le pourtour extérieur 1a de la pastille combustible 1, au moins pour son pourtour radial. Ainsi, le corps externe 112 complète la compartimentalisation du matériau combustible 10 pour confiner les PF. Par exemple, avec quatre ailettes, cinq compartiments de matériau combustible sont créés délimités par le corps central, les parois des ailettes et le pourtour extérieur. De préférence, le corps externe 112 et le corps central 110 forment une structure coaxiale. Le corps externe 112 peut plus particulièrement être cylindrique. De même que pour le corps central 110, le corps externe 112 peut s'étendre sur une distance sensiblement supérieure ou égale à 80 %, de préférence sensiblement supérieure ou égale à 90 % de préférence sensiblement supérieure ou égale à 95 % de la longueur L1 de la pastille 1. De préférence, le corps externe 112 s'étend sur sensiblement toute la longueur L1 de la pastille combustible 1. Le corps externe 112 forme ainsi un chemin en continuité thermique sur toute la longueur de la pastille 1. Le corps externe 112 peut ne s'étendre que sur une fraction uniquement de la longueur L1, de façon fractionnée ou continue.

[0099] Le corps externe peut être configuré pour former une surface sensiblement supérieure ou égale à 80 %, sensiblement supérieure ou égale à 90 %, de préférence sensiblement supérieure ou égale à 95 % de la surface extérieure de la pastille combustible 1. Le corps externe 112 peut comprendre au moins une, et de préférence deux surfaces 112a configurées pour recouvrir les extrémités longitudinales de la pastille 1 comme par exemple illustré en [Fig.3] par deux surfaces 112a chacune disposée dans un plan parallèle au plan (x, y).

[0100] Afin de minimiser la quantité de métal dans la pastille combustible 1, le corps externe 112 s'étendant potentiellement sur une surface importante de la pastille, son épaisseur peut être limitée. Par exemple, l'épaisseur du corps externe 112 peut être sensiblement comprise entre 5 μm et 25 μm . Cette gamme d'épaisseur permet notamment de former une barrière aux PF en minimisant la quantité de métal dans la pastille 1.

[0101] Selon un exemple, l'insert 11 métallique comprend entre 3 et 8 ailettes 111. Comme illustré par les figures 4 à 5C, ce nombre d'ailettes est pris selon une section perpendiculaire à une direction principale selon laquelle s'étend le corps central 110. Un insert métallique 11 peut comprendre uniquement entre 3 et 8 ailettes, par exemple selon la [Fig.4] et la [Fig.5B].

[0102] Selon un exemple, l'épaisseur des ailettes a été optimisée par le calcul à des valeurs comprises entre 250 à 450 μm suivant le nombre d'ailettes (voir tableau 5 et tableau 6) pour permettre une réduction des températures maximales de la pastille allant de 209°C à 611°C suivant les conditions de puissance.

[0103] Les ailettes 111, de préférence avec le corps central 110, peuvent s'étendre sur une distance sensiblement supérieure ou égale à 80 %, de préférence sensiblement su-

périeure ou égale à 90 % de préférence sensiblement supérieure ou égale à 95 % de la longueur L_1 de la pastille 1, comme par exemple illustré par la [Fig.2A]. De préférence, les ailettes s'étendent sur sensiblement toute la longueur L_1 de la pastille combustible 1. Les ailettes forment ainsi un chemin en continuité thermique sur toute la longueur de la pastille 1. Comme par exemple illustré par la [Fig.2A], les ailettes 111 peuvent s'inscrire dans un plan incluant la direction z et perpendiculaire au plan (x, y). Selon un autre exemple, illustré en [Fig.5D], les ailettes 111 peuvent former les pales d'une hélice autour de l'axe central A de la pastille combustible 1.

[0104] Selon un autre exemple, l'insert peut comprendre une pluralité de jeux d'ailettes, chaque jeu d'ailettes étant situé sur une section du corps central creux 110 et comprenant 3 à 8 ailettes, selon l'exemple de la [Fig.5A]. Ce nombre d'ailettes 111 permet de former un nombre de chemins suffisant pour conduire l'énergie thermique du centre vers la périphérie de la pastille 1. La fabrication de l'insert est en outre facilitée, et la quantité de métal introduit dans la pastille 1 est réduite, par rapport à un nombre d'ailettes supérieur à la gamme indiquée.

[0105] Selon un exemple, les ailettes 111 s'étendent depuis le corps central 110 creux jusqu'au pourtour extérieur 1a de la pastille combustible 1. Selon un autre exemple, comme illustré en [Fig.2A], et notamment lorsque l'insert 11 ne comprend pas de corps externe 112, une ailette 111, et de préférence chaque ailette 111, s'étend depuis le corps central creux jusqu'à une région située en bordure du pourtour extérieur de la pastille combustible. La région située en bordure, par rapport au pourtour extérieur de la pastille combustible, est située à une distance sensiblement inférieure à 20 %, de préférence sensiblement inférieure à 10%, et de sensiblement inférieure à 5%, du pourtour extérieur de la pastille combustible 1, selon une direction normale à la tangente au pourtour. Ainsi, l'insert forme un chemin radial de continuité thermique de longueur suffisante pour l'extraction de l'énergie thermique, tout en évitant d'engendrer un gradient thermique radial au niveau de la gaine. Selon un exemple, selon une direction normale à la tangente au pourtour de la pastille, la longueur d'une ailette 111, et de préférence de chaque ailette 111, est sensiblement égale à $(X \cdot D_1 - D_{110})/2$, $x = 90\%$ (70 à 95%) X étant sensiblement supérieur à 70 %, de préférence sensiblement inférieure à 95%, et de sensiblement inférieure à 90%, de D_1 .

[0106] Comme par exemple illustré par les figures 2B, et 4 à 5C, le corps central 110 et le corps externe 112 sont reliés par au moins une ailette 111, de préférence par chaque ailette 111. L'échange thermique avec la gaine est encore amélioré par un chemin thermique continu depuis le corps central 110 jusqu'au corps externe 112. En outre, la robustesse de l'insert 11 est améliorée.

[0107] L'insert 11 peut comprendre plusieurs jeux d'ailettes 111a, 111b, 111c, 111d, comme par exemple illustré en [Fig.5A]. Un jeu d'ailettes comprend une pluralité d'ailettes

disposées sur une portion du corps central creux 110. Ces jeux d'ailettes 111a, 111b, 111c sont de préférence consécutivement situés le long de la pastille 1 selon une direction parallèle à l'axe z. De préférence, les jeux d'ailettes 111a, 111b, 111c sont disposés à équidistance les uns des autres le long de la pastille 1 selon une direction parallèle à l'axe z, de préférence coaxialement avec l'axe central A. Le nombre de jeux d'ailettes peut par exemple être compris entre 2 et 6. La longueur des ailettes 111 suivant les jeux d'ailettes 111a, 111b, 111c peut être différente ou sensiblement égale. Selon un exemple, la longueur cumulée selon une direction parallèle à l'axe z des ailettes des différents jeux d'ailettes 111a, 111b, 111c peut être sensiblement égale à la longueur L_1 de la pastille 1. Selon un autre exemple, et comme illustré en [Fig.5A], la longueur cumulée selon une direction parallèle à l'axe z des ailettes des différents jeux d'ailettes 111a, 111b, 111c représente une fraction uniquement de la longueur L_1 de la pastille 1. Ainsi, la quantité de métal dans la pastille 1 est réduite et les chemins de conduction thermique sont répartis axialement le long de la pastille 1. Selon un exemple, la longueur de chaque jeu d'ailettes 111a, 111b, 111c selon une direction parallèle à l'axe z des ailettes d'au moins un, et de préférence de chaque, jeu d'ailettes 111a, 111b, 111c est sensiblement comprise entre 0,20 mm et 2 mm.

[0108] Selon un exemple alternatif ou complémentaire, la pastille 1 peut comprendre une pluralité d'inserts 11a, 11b, 11c, 11d, comme par exemple illustré en [Fig.5B]. Ces inserts 11a, 11b, 11c, 11d, sont de préférence consécutivement situés le long de la pastille 1 selon une direction parallèle à l'axe z, de préférence coaxialement avec l'axe central A. Ces inserts 11a, 11b, 11c, 11d peuvent être consécutivement déposés en contact les uns des autres. Selon cet exemple, la longueur cumulée selon une direction parallèle à l'axe z des inserts 11a, 11b, 11c, 11d peut être sensiblement égale à la longueur L_1 de la pastille 1. De préférence, chaque insert est séparé du ou des inserts adjacents par une portion de matériau combustible 10. Selon cet exemple, et comme illustré en [Fig.5B], la longueur cumulée selon une direction parallèle à l'axe z des inserts 11a, 11b, 11c, 11d représente une fraction uniquement de la longueur L_1 de la pastille 1. Ainsi, la quantité de métal dans la pastille 1 est réduite et les chemins de conduction thermique sont répartis le long de la pastille 1.

[0109] De préférence, les inserts 11a, 11b, 11c, 11d sont disposés à équidistance les uns des autres le long de la pastille 1 selon une direction parallèle à l'axe z. Le nombre d'inserts peut par exemple être compris entre 2 et 6. La longueur des différents inserts 11a, 11b, 11c, 11d peut être différente ou sensiblement égale. Selon un exemple, la longueur selon une direction parallèle à l'axe z d'au moins un, et de préférence de chaque, insert 11a, 11b, 11c est sensiblement comprise entre 0,2 mm et 1,5 mm, de préférence sensiblement comprise entre 0,20 mm et 2 mm.

[0110] Selon un exemple, les ailettes 111 d'un insert et/ou d'un jeu d'ailettes sont réparties

radialement autour du corps central 110. Plus particulièrement, les ailettes 111 d'un insert et/ou d'un jeu d'ailettes sont consécutivement séparées par un même intervalle angulaire, par exemple sensiblement égal à 360° divisé par la somme du nombre d'ailettes 111.

- [0111] Selon un exemple, entre différents inserts et/ou différents jeux d'ailettes, les ailettes 111 sont alignées entre elles de sorte que, dans une projection selon un plan perpendiculaire à l'axe central A, les ailettes 111 sont confondues.
- [0112] Selon l'exemple illustré en [Fig.5C], entre différents inserts et/ou différents jeux d'ailettes, les ailettes 111 peuvent être réparties radialement de sorte que, en projection selon un plan perpendiculaire à l'axe central A, les ailettes 111 entre différents inserts et/ou différents jeux d'ailettes sont distinctes. De façon équivalente, les ailettes 111 entre différents inserts et/ou différents jeux d'ailettes sont disposées dans des plans distincts. Les ailettes 111 entre différents inserts et/ou différents jeux d'ailettes peuvent être consécutivement séparées par un même intervalle angulaire, par exemple sensiblement égal à 360° divisé par le nombre total d'ailettes 111 (pour tous les jeux d'ailettes et/ou tous les inserts). Ainsi, la quantité de métal dans la pastille 1 est réduite et les chemins de conduction thermique sont répartis en trois dimensions dans le volume de la pastille 1. Par exemple, les ailettes 111 entre différents inserts et/ou différents jeux d'ailettes forment une hélice le long de la pastille 1, selon une direction parallèle à l'axe z.
- [0113] Les ailettes 111 peuvent présenter une épaisseur sensiblement égale à l'épaisseur de la paroi du corps central 110, par exemple une épaisseur comprise entre $250\ \mu\text{m}$ et $450\ \mu\text{m}$. Cette gamme d'épaisseur, pour les ailettes 111 et/ou pour le corps central 110, facilite la fabrication de l'insert métallique et améliore sa tenue dans le temps sous irradiation en réacteur. En outre, les ailettes 111 présentent ainsi une meilleure résistance aux déformations et aux dilatations du matériau combustible 10.
- [0114] L'insert 11 est à base ou fait d'un métal, de préférence à base ou fait d'un métal réfractaire. Par exemple, le métal est choisi parmi du zircaloy, du chrome ou du molybdène. Des propriétés de ces métaux sont indiquées dans le tableau 1. Ces métaux sont des métaux réfractaires avec des sections efficaces de capture de neutrons thermique relativement faibles et présentent une conductivité thermique supérieure à l' UO_2 , sensiblement comprise entre 2 et $4\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Le molybdène et le chrome sont préférés pour leur température de fusion plus élevée. Le zircaloy présente l'avantage de présenter une bonne transparence aux neutrons. En revanche, sa température de fusion et sa conductivité thermique sont plus basses que les deux autres métaux.

[0115] [Tableaux1]

Propriétés/Métal	Cr	Mo	Zr
Conductivité W/m ⁻¹ .K ⁻¹ (25°C)	94	139	13,7
T fusion (°C)	1907	2623	1855
Section de capture thermique (Barn, soit 1 .10 ⁻²⁸ m ² dans le système international des unités)	3,05	2,48	0,01

[0116] Le matériau combustible 10 peut être dopé avec au moins un additif à base d'alcalino-terreux, par exemple le baryum Ba, et/ou à base d'un élément du groupe platine, aussi désigné platinoïde. Le métal alcalino-terreux est apte à piéger les PF. Ce piège peut être un métal alcalino-terreux (par exemple le baryum et/ou le strontium et/ou le calcium) ou un oxyde de métal alcalinoterreux (par exemple BaO, et/ou SrO ou CaO, ou BaO₂, ou SrO₂ ou CaO₂), ainsi que les mélanges et les combinaisons des espèces précitées. Le matériau combustible 10 peut comporter, par exemple en surface ou près de sa surface, au moins un matériau anticorrosion de la gaine comprenant au moins un métal alcalino-terreux. Le matériau anticorrosion peut former un revêtement interne de la gaine. Selon un exemple, le matériau anticorrosion présente une épaisseur sensiblement comprise entre 50 µm et 70 µm, permettant ainsi d'éviter la corrosion jusqu'à un taux de combustion de 10 at%.

[0117] Le matériau combustible 10 peut comporter, par exemple en surface ou près de sa surface, au moins un élément anticorrosion de la gaine appartenant au groupe platine, pouvant être du palladium ou du ruthénium ou du rhodium ou de l'osmium ou de l'iridium ou du platine, de manière à former des composés de tellures et/ou d'iodures avec cet élément du groupe platine et les PF générés. Ce dopage permet à la fois une augmentation de la conductivité thermique du matériau combustible, et permet une meilleure rétention des PF corrosifs. L'élément anticorrosion peut former un revêtement interne de la gaine. Selon un exemple, la quantité en élément du groupe platine est sensiblement supérieure ou égale à la quantité totale en tellure et/ou en iode, produit par la fission au taux de combustion maximale visé du matériau combustible 10. Les nombres de moles de tellure et d'iode créés dans le combustible sont voisins de 1,15276.10⁶ moles de tellure/at%/g de combustible oxyde d'uranium et de 6,69344.10⁷ moles d'iode/at%/g de combustible oxyde d'uranium. Ainsi, la quantité calculée de palladium pour former un composé de type PdTe pour un taux de combustion de 20 at%, est de 1 g de palladium ce qui représente 2 µm environ de palladium répartis sur toute la surface externe des pastilles ou toute la surface interne de la gaine au niveau de la colonne fissile.

- [0118] Selon un exemple alternatif ou complémentaire, l'insert 11 comprend un élément du groupe platine, pouvant être du palladium ou du ruthénium ou du rhodium ou de l'osmium ou de l'iridium ou de préférence du platine. Selon un exemple, l'insert métallique est à base, voire est constitué de, platine. De préférence, l'insert 11 comprend une couche superficielle à base de platine, déposée de façon continue ou discontinue en surface de l'insert. La couche superficielle peut présenter une épaisseur sensiblement inférieure ou égale à 5 μm , de préférence inférieure ou égale à 2 μm . De préférence, l'insert 11 est à base d'un alliage comprenant du platine. Ainsi, l'insert 11 est apte à former des composés de tellures et/ou d'iodures et ainsi améliorer le piégeage des PF corrosifs.
- [0119] La présente description prévoit également de combiner les caractéristiques détaillées dans les exemples précédents. Par exemple on peut prévoir un insert 11 comprenant un corps externe 112 reliant entre eux une pluralité de jeux d'ailettes, chaque jeu étant rattaché à un corps central 110, ou encore que chaque insert 11 comprenne un corps externe 112, les corps externes 112 n'étant pas continus le long de la pastille 1.
- [0120] La pastille combustible 1 peut être fabriquée par fabrication additive. L'insert 11 et le matériau combustible 10 peuvent être formés couche par couche pour obtenir la pastille 1. Selon un autre exemple, l'insert peut être formé par extrusion ou par moulage. Le matériau combustible 10 peut être ajouté à l'insert 11, par exemple en ajoutant le matériau combustible 10 sous forme de poudre puis par frittage.
- [0121] Le corps externe 112 peut être fabriqué par fabrication additive. Selon un autre exemple, le corps externe 112 est formé par dépôt physique en phase vapeur pour limiter son épaisseur.
- [0122] Exemples particuliers de réalisation
- [0123] Des simulations ont été effectuées pour étudier les différents modes de réalisation décrits. Les pastilles sont créées à l'aide d'un logiciel de CAO commercialisé sous l'appellation « SolidWork » et modélisées par maillage. Des calculs en conduction thermique en trois dimensions 3D sont effectués sur ces pastilles à l'aide de son module « Simulation Professionnel » dans sa version 2019. Le gain en conductivité thermique est évalué par comparaison avec la température maximale du matériau combustible d' UO_2 d'une pastille standard d'un REP 900 MWe de la filière française.
- [0124] Pour les exemples suivants, les puissances linéiques des pastilles sont prises égales à 300 W/cm, correspondant à une puissance normale de fonctionnement des crayons REP et à 500 W/cm relevant plus du domaine accidentel.
- [0125] Pour les exemples suivants, les dimensions de la pastille 1 et de l'insert 11 sont indiquées dans le tableau 2. Selon cet exemple, la pastille 1, le corps central 110 creux et le corps externe 112 sont cylindriques et de section circulaire.

[0126] [Tableaux2]

Diamètre de la pastille combustible (mm)	8,36
Longueur L_1 de la pastille combustible (mm)	13,7
Diamètre extérieur du corps central (mm)	2,6
Épaisseur de la paroi du corps central (μm)	250 à 450
Nombre d'ailettes	3 à 8
Longueur des ailettes (mm)	2,88
Épaisseur de métal des ailettes (μm)	250 à 450
Épaisseur de la paroi du corps externe (μm)	5 à 25

[0127] Les températures au centre de la pastille pour un insert avec et sans corps central 110 sont décrites dans le tableau 3. Sans corps central, l'insert comprend 4 ailettes convergentes en un point au centre de la pastille.

[0128] [Tableaux3]

Puissance (W/cm)	T ($^{\circ}\text{C}$) au centre de la pastille pour un insert avec 4 ailettes et corps central	T ($^{\circ}\text{C}$) au centre de la pastille pour un insert avec 4 ailettes sans corps central	Écart ($^{\circ}\text{C}$) de températures à fusion au centre de la pastille (avec corps central – sans corps central)
500	801	970	169

[0129] Avec le corps central 110, le métal est éloigné du centre de la pastille, point le plus chaud de la pastille. Les températures calculées à 500 W/cm sont abaissées à 801 $^{\circ}\text{C}$ avec un insert comprenant un corps central creux, au lieu de 970 $^{\circ}\text{C}$ au centre de la pastille ce qui permet de gagner environ 169 $^{\circ}\text{C}$ sur les marges à fusion du concept avec corps central par rapport au concept sans corps central avec les ailettes convergentes en un point. Il a été observé que ces écarts radiaux de température s'accroissent avec la puissance (cf. tableaux 5 et 6)

[0130] L'influence thermique du corps externe 112 sur les températures de la pastille 1 a été calculée pour une puissance linéique de 300 W/cm (cf. tableau 4). Le gradient thermique dans l'épaisseur de la couche du corps externe (ΔT) s'élève à 2,09 $^{\circ}\text{C}$ pour

25 μm d'épaisseur de Zircaloy. Les résultats de calcul pour des épaisseurs de cylindre plus fines avec d'autres métaux sont donnés sur le tableau qui suit. Pour des épaisseurs plus faibles et des conductivités plus importantes, ce qui est le cas pour le Cr et le Mo, ce gradient devient inférieur à 1°C . Cela signifie que l'influence thermique du corps externe est faible sur les températures maximales des pastilles. L'intérêt du corps externe est notamment de permettre une compartimentalisation du matériau combustible nucléaire avec ses PF.

[0131] [Tableaux4]

300 W/ cm	Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$) pour épaisseur de 25 μm	ΔT ($^\circ\text{C}$) pour épaisseur de 5 μm
Zr	13,70	2,09	0,42
Cr	94,00	0,30	0,06
Mo	139,00	0,21	0,04

[0132] Cette fine couche de métal a démontré son efficacité vis-à-vis de la réduction du relâchement des PF volatils ou gazeux dans un combustible CERMET jusqu'à des taux de combustion significatifs. En effet, des pastilles de CERMETS ($\text{UO}_2\text{-Mo}$) ont été fabriquées avec et sans dépôt de Mo de 5 μm d'épaisseur pour former le corps externe, les pastilles étant par ailleurs identiques. Ces pastilles ont été introduites dans des crayons séparés qui ont été irradiés en réacteur expérimental jusqu'à un taux de combustion élevé de 55 GWj/tU .

[0133] Après irradiation, les crayons ont fait l'objet d'examens destructifs. Le relâchement des PF gazeux a été mesuré à l'intérieur de la gaine du crayon à 2,1% des gaz de fission produits pour les crayons avec les pastilles sans la couche de molybdène alors qu'il est resté beaucoup plus bas à moins de 0,029% pour les crayons avec les pastilles recouvertes de molybdène.

[0134] Les températures maximales des pastilles 1 sont calculées et comparées à celles (T_{std}) d'une pastille combustible standard dans les tableaux 5 et 6 pour des inserts 11 avec 3 à 8 ailettes en zirconium pour plusieurs épaisseurs d'ailettes, entre 250 et 450 μm . Entre ces exemples le corps externe garde une épaisseur constante. Les températures maximales calculées sans corps externe sont identiques à 2°C près (cf. Tableau 4).

[0135] [Tableaux5]

Nombre d'ailettes	3					4			
Epaisseur d'une ailette (μm)	250	300	350	400	450	250	300	350	400
% volumique de métal (Zr) par rapport au volume de pastille	7,3%	8,7 %	10,0%	11,3%	12,6%	8,6%	10,2%	11,9	13,4
T°C maximale à 300 W/cm ($T_{\text{std}}=909^{\circ}\text{C}$)	700	690	669	650	625	690	670	660	650
T°C maximale à 500 W/cm ($T_{\text{std}}=1461^{\circ}\text{C}$)	940	925	925	870	840	920	905	890	890

[0136] [Tableaux6]

Nombre d'ailettes	5			6	7	8
Epaisseur d'une ailette (μm)	250	300	350	250	250	250
% volumique de métal (Zr) par rapport au volume de pastille	9,9%	11,8%	13,7%	11,2	12,5	13,9
T°C maximale à 300 W/cm ($T_{\text{std}}=909^{\circ}\text{C}$)	666	660	630	658	650	630
T°C maximale à 500 W/cm ($T_{\text{std}}=1461^{\circ}\text{C}$)	906	875	860	891	870	860

[0137] Dans tous les cas, les gains en températures maximales calculés sont compris entre 209 et 289°C à 300 W/cm. Ces gains déjà élevés s'accroissent encore avec la puissance et varient entre 521 à 611°C à 500 W/cm.

[0138] Avec un insert en molybdène ou en chrome dont les conductivités thermiques sont supérieures à celles du Zircaloy (cf. tableau 7), les gains en températures maximales sont accrus par rapports aux précédents gains décrits dans les tableaux 5 et 6 de 49°C pour le chrome et de 58°C pour le molybdène pour une puissance de 300 W/cm et 10% vol. de métal et sont accrus de 68°C pour le chrome et 83°C pour le molybdène pour

une puissance de 500 W/cm pour le même % vol. de métal. Un autre exemple de gain en température est donné pour 5% de volume de métal par rapport au volume total de la pastille dans ce même tableau.

[0139] [Tableaux7]

Nature du métal de l'insert	Mo		Cr	
% volumique de métal par rapport au volume de pastille	10% vol.	5% vol.	10% vol.	5% vol.
Gains en température maximale à 300 W/cm par rapport au Zircaloy	58°C	51°C	49°C	42°C
Gains en température maximale 500 W/cm par rapport au Zircaloy	83°C	70°C	68°C	53°C

[0140] Au vu de la description qui précède, il apparaît clairement que l'invention propose une pastille combustible améliorant la sûreté des crayons de combustibles en réduisant les risques de détérioration de la gaine du crayon. La pastille combustible présente une conductivité thermique améliorée et permet de réduire fortement les températures maximales de la pastille en conditions normales et en conditions plus accidentelles avec des températures calculées beaucoup plus basses par rapport aux solutions existantes. Les conséquences thermiques temporelles de cet accident sur le crayon sont par conséquent moins importantes. La pastille combustible permet en outre de réduire le risque de corrosion de la gaine par les PF par IPG-CSC grâce, entre autres, au corps central. Enfin, la pastille présente une tenue à haute température plus élevée grâce à une température de fusion supérieure à celle des solutions existantes présentant du métal disposé au centre de la pastille.

[0141] L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisations précédemment décrits et s'étend à tous les modes de réalisation couverts par l'invention. La présente invention ne se limite pas aux exemples précédemment décrits. Bien d'autres variantes de réalisation sont possibles, par exemple par combinaison de caractéristiques précédemment décrites, sans sortir du cadre de l'invention. En outre, les caractéristiques décrites relativement à un aspect de l'invention peuvent être combinées à un autre aspect de l'invention.

[0142] Les exemples détaillés en description le sont en référence à une géométrie cylindrique de la pastille et de l'insert métallique. Les caractéristiques décrites sont toutefois applicables à d'autres géométries de l'insert et/ou de la pastille, par exemple une géométrie en étoile ou polyédrique.

Revendications

- [Revendication 1] Pastille combustible (1) comprenant :
- un matériau combustible (10) nucléaire fissile et
 - au moins un insert (11) métallique disposé dans le matériau combustible (10) et comprenant une pluralité d'ailettes (111), chaque ailette (111) s'étendant radialement dans le matériau combustible (10), vers un pourtour extérieur (1a) de la pastille combustible (1),
- dans laquelle l'insert (11) métallique comprend un corps central (110) creux (10), sur lequel est disposée la pluralité d'ailettes (111), chaque ailette (111) s'étendant radialement depuis le corps central (110) creux vers le pourtour extérieur (1a) de la pastille combustible (1), caractérisée en ce que le corps central (110) creux est partiellement rempli, de préférence entièrement rempli de matériau combustible (10).
- [Revendication 2] Pastille combustible (1) selon la revendication précédente dans laquelle le rapport entre une dimension externe (D_1) de la section transversale de la pastille combustible (1) et une dimension externe (D_{110}) de la section transversale du corps central (110) creux est compris entre 2 et 4.
- [Revendication 3] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle l'insert (11) métallique comprend un corps externe (112) configuré pour former le pourtour extérieur (1a) de la pastille combustible (1).
- [Revendication 4] Pastille combustible selon la revendication précédente dans laquelle le corps externe (112) présente une épaisseur sensiblement comprise entre 5 μm et 25 μm .
- [Revendication 5] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle l'insert (11) métallique comprend entre 3 et 8 ailettes (111) prises selon une section perpendiculaire à une direction principale selon laquelle s'étend le corps central creux.
- [Revendication 6] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle, l'insert (11) métallique comprenant un corps externe (112) configuré pour former le pourtour extérieur (1a) de la pastille combustible (1), au moins une ailette (111), et de préférence la pluralité d'ailettes, s'étend depuis le corps central (110) creux jusqu'au corps externe (112) de la pastille combustible (1).

- [Revendication 7] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle l'au moins une ailette (111) présente une épaisseur comprise entre 250 μm et 450 μm .
- [Revendication 8] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle, la pastille présentant une longueur (L_1) selon une direction parallèle avec un axe central (A) d'extension principale de la pastille combustible (1), au moins une ailette (111) s'étend sur sensiblement toute la longueur (L_1) de la pastille combustible (1).
- [Revendication 9] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans laquelle, la pastille combustible (1) présentant une longueur (L_1) selon une direction parallèle avec un axe central (A) d'extension principale de la pastille combustible (1), l'insert (11) métallique comprend une pluralité de jeux d'ailettes (111a, 111b, 111c, 111d), chaque jeu d'ailettes (111a, 111b, 111c, 111d) comprenant au moins deux ailettes (111) selon une section perpendiculaire à une direction principale selon laquelle s'étend le corps central creux, chaque ailette (111) de chaque jeu d'ailettes (111a, 111b, 111c, 111d) s'étendant sur une fraction seulement de la longueur (L_1) de la pastille combustible (1), la pluralité de jeux d'ailettes (111a, 111b, 111c, 111d) étant répartie le long de la pastille combustible (1) selon une direction parallèle à l'axe central d'extension principale de la pastille combustible.
- [Revendication 10] Pastille combustible (1) selon la revendication précédente dans laquelle, pour au moins deux jeux d'ailettes (111a, 111b, 111c, 111d) disposés consécutivement le long de la pastille combustible (1), les ailettes (111) d'un jeu d'ailettes (111a, 111b, 111c, 111d) sont désalignées par rapport aux ailettes (111) d'au moins un jeu d'ailettes consécutif (111a, 111b, 111c, 111d).
- [Revendication 11] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle, la pastille combustible (1) présentant une longueur (L_1) selon une direction parallèle avec un axe central (A) d'extension principale de la pastille combustible, le corps central (110) creux s'étend sur toute la longueur (L_1) de la pastille combustible (1).
- [Revendication 12] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans laquelle la pastille combustible (1) comprend une pluralité d'inserts (11a, 11b, 11c, 11d) métalliques répartis le long de la pastille combustible (1) selon une direction parallèle à l'axe central d'extension principale de la pastille combustible.
- [Revendication 13] Pastille combustible (1) selon la revendication précédente dans laquelle,

pour au moins deux inserts (11a, 11b, 11c, 11d) métalliques disposés consécutivement le long de la pastille combustible (1), les ailettes (111) d'un insert métallique (11a, 11b, 11c, 11d) sont désalignées par rapport aux ailettes (111) d'au moins un insert métallique consécutif (11a, 11b, 11c, 11d).

- [Revendication 14] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle l'insert (11) métallique est à base d'un métal présentant une conductivité thermique supérieure à la conductivité thermique du matériau combustible (10).
- [Revendication 15] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle l'insert (11) métallique est à base d'un métal réfractaire, de préférence choisi parmi le zircaloy, le chrome, le molybdène et leurs alliages.
- [Revendication 16] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le matériau combustible (10) est choisi parmi l'oxyde d'uranium, l'oxyde mixte d'uranium et de plutonium, l'oxyde mixte de thorium.
- [Revendication 17] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle l'insert (11) métallique comprend du platine.
- [Revendication 18] Pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle l'insert est configuré pour représenter une proportion sensiblement inférieure ou égale à 15 % du volume total de la pastille combustible (1).
- [Revendication 19] Crayon combustible (2) comprenant au moins une pastille combustible (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, entourée d'une gaine.
- [Revendication 20] Assemblage (3) pour réacteur nucléaire (4) comprenant un faisceau de crayons combustibles (2) selon la revendication précédente.
- [Revendication 21] Réacteur nucléaire (4) comprenant au moins un assemblage (3) selon la revendication précédente.

[Fig. 1A]

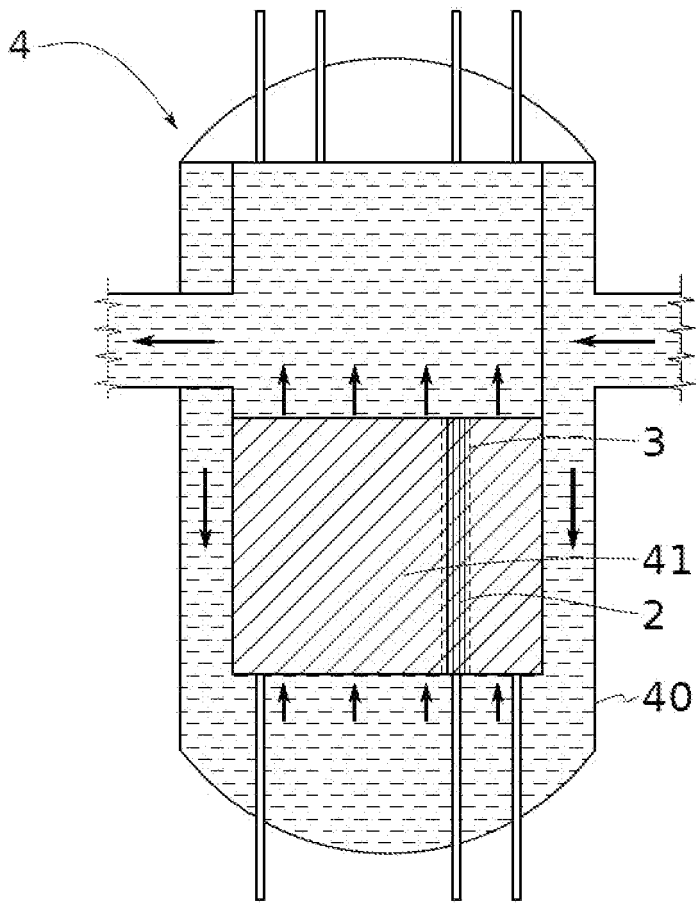


FIG. 1A

[Fig. 1B]

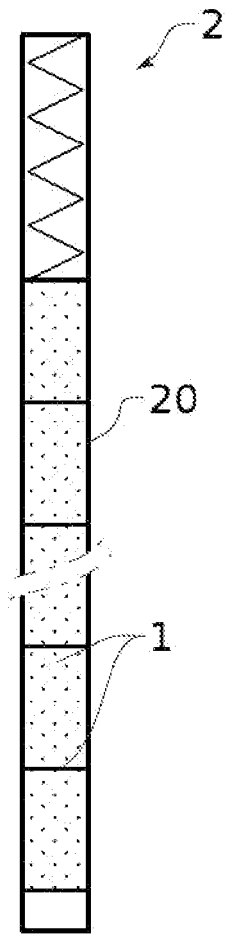


FIG. 1B

[Fig. 2A]

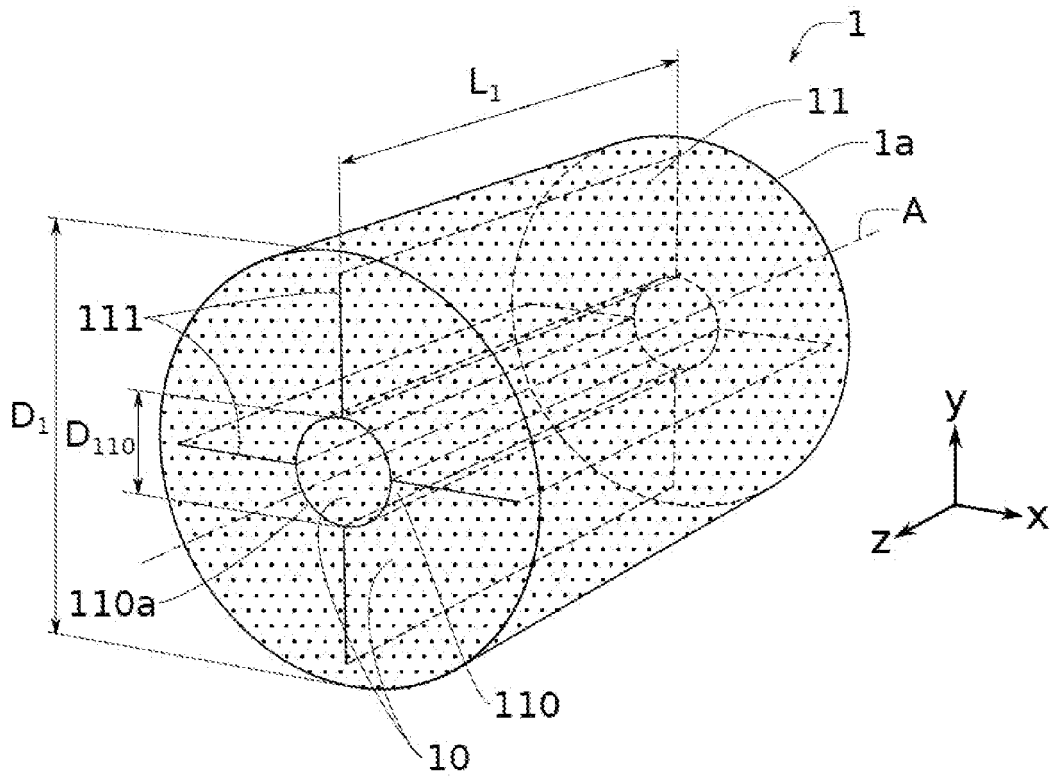


FIG. 2A

[Fig. 2B]

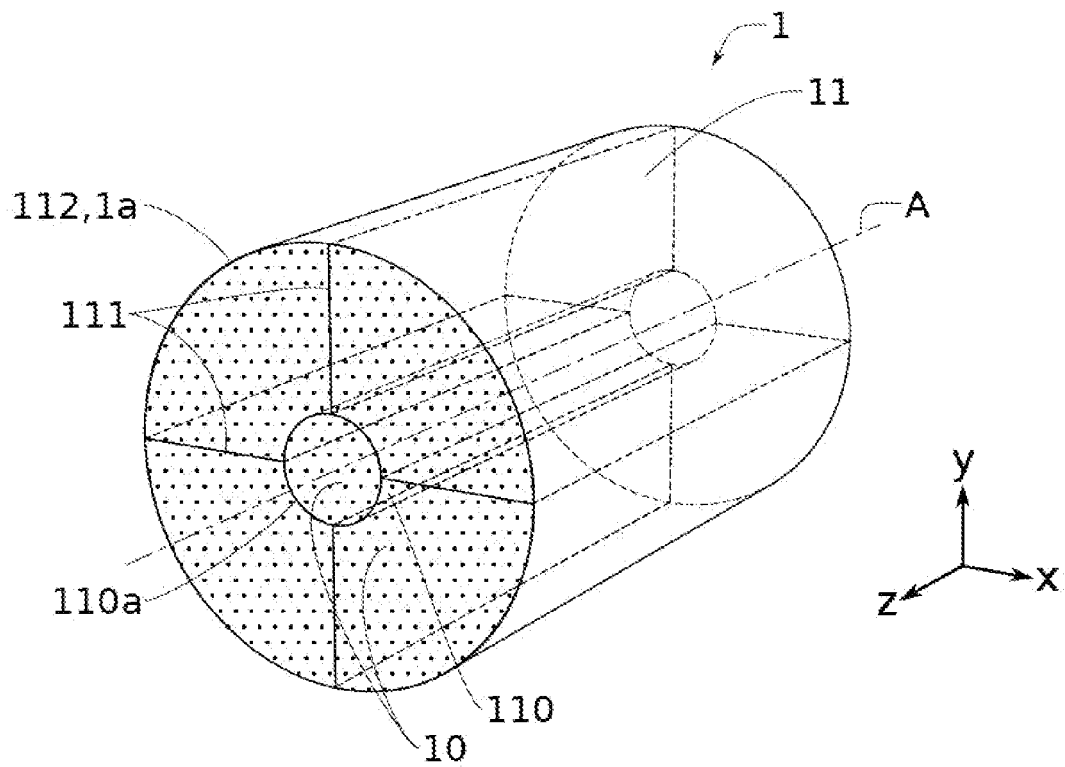


FIG. 2B

[Fig. 3]

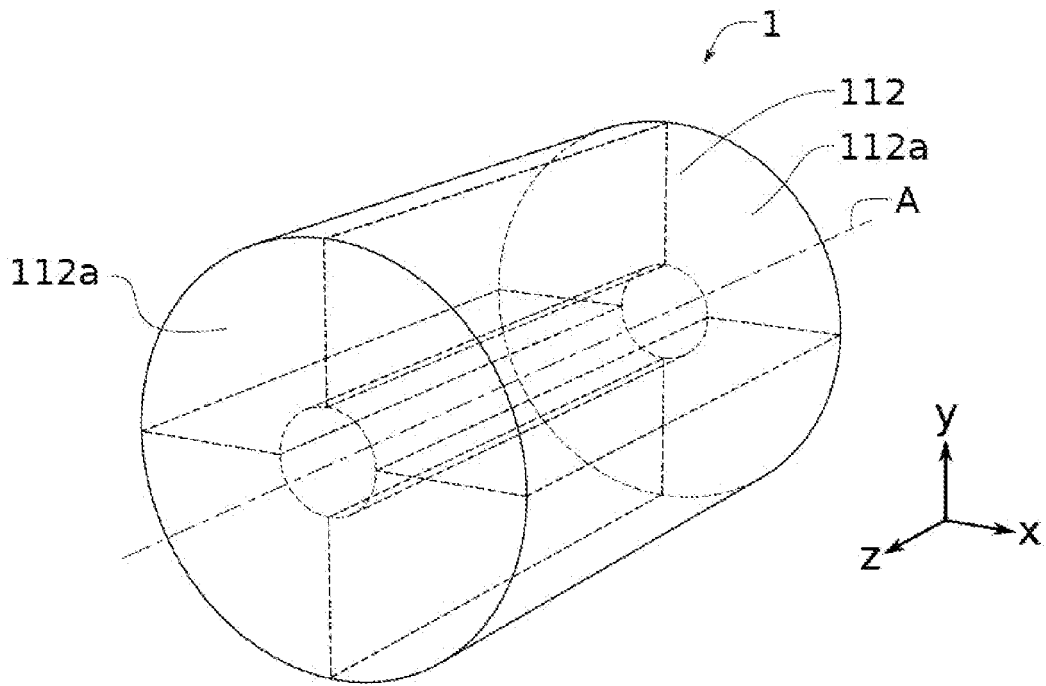


FIG. 3

[Fig. 4]

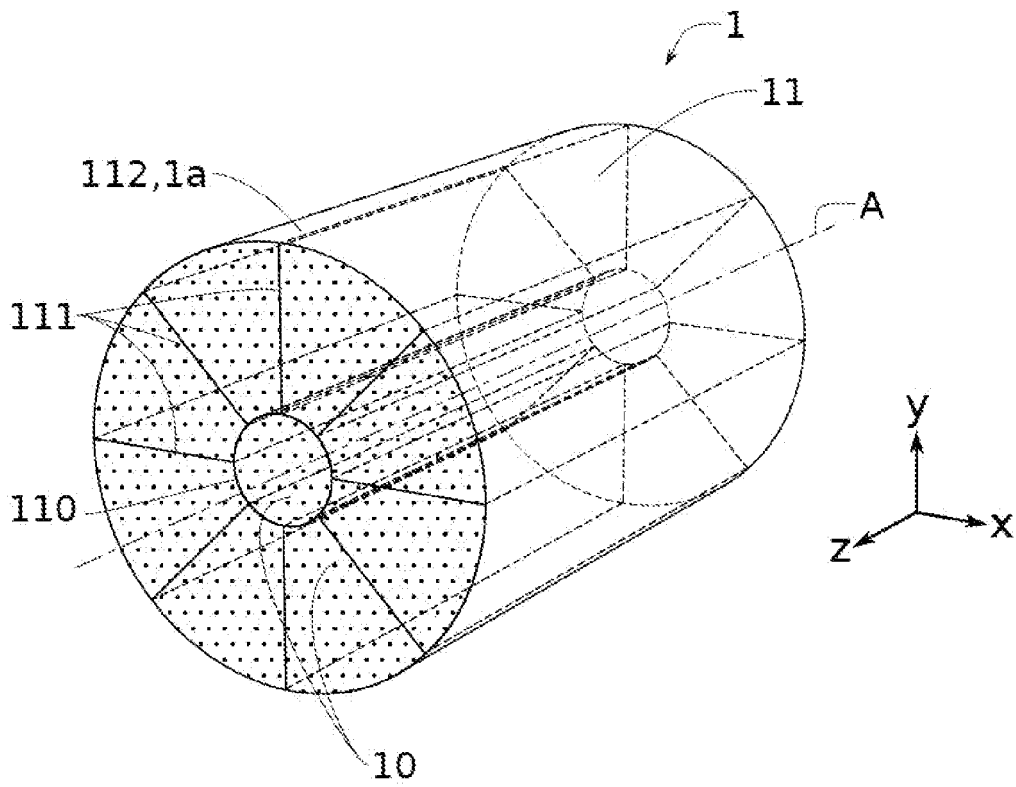


FIG. 4

[Fig. 5A]

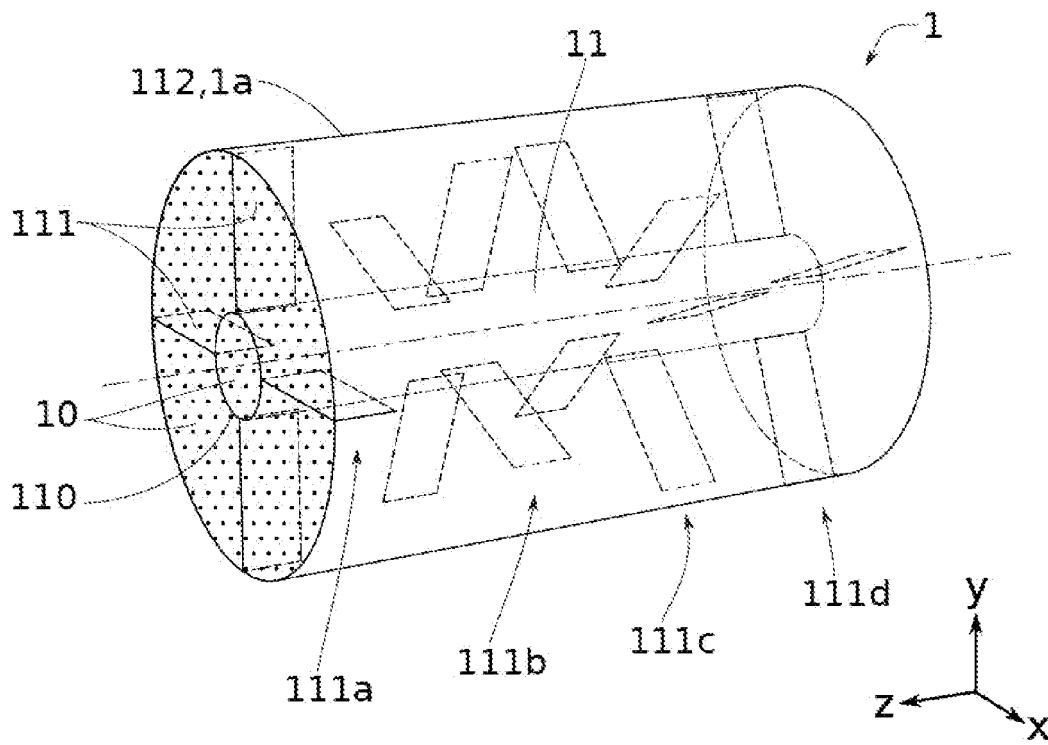


FIG. 5A

[Fig. 5B]

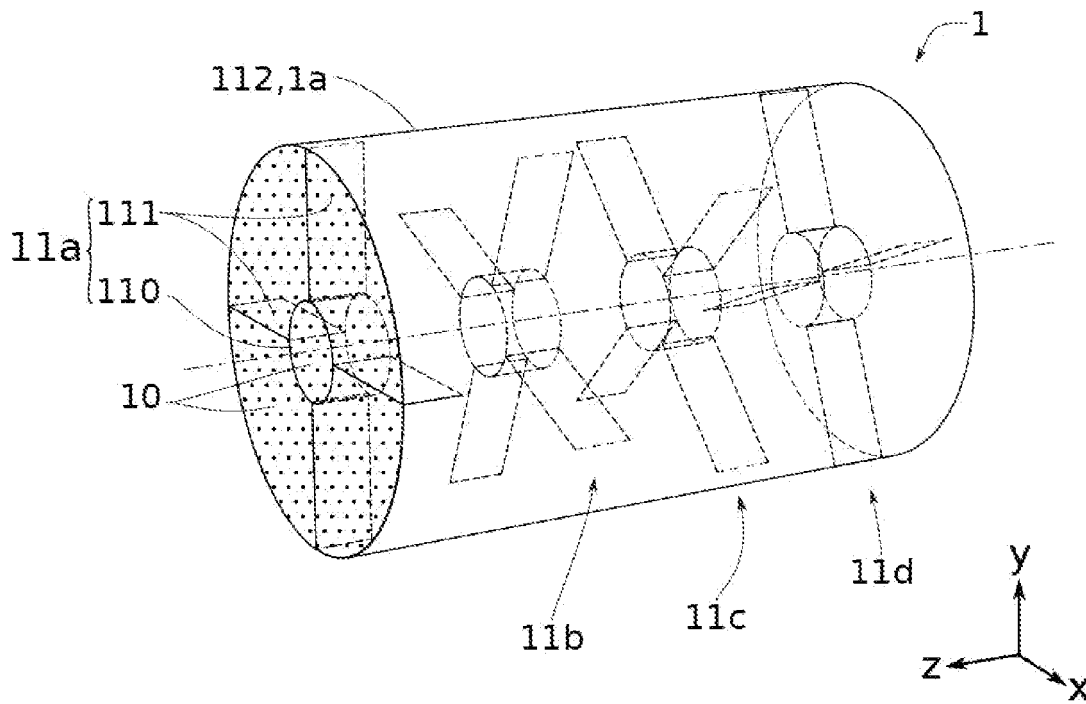


FIG. 5B

[Fig. 5C]

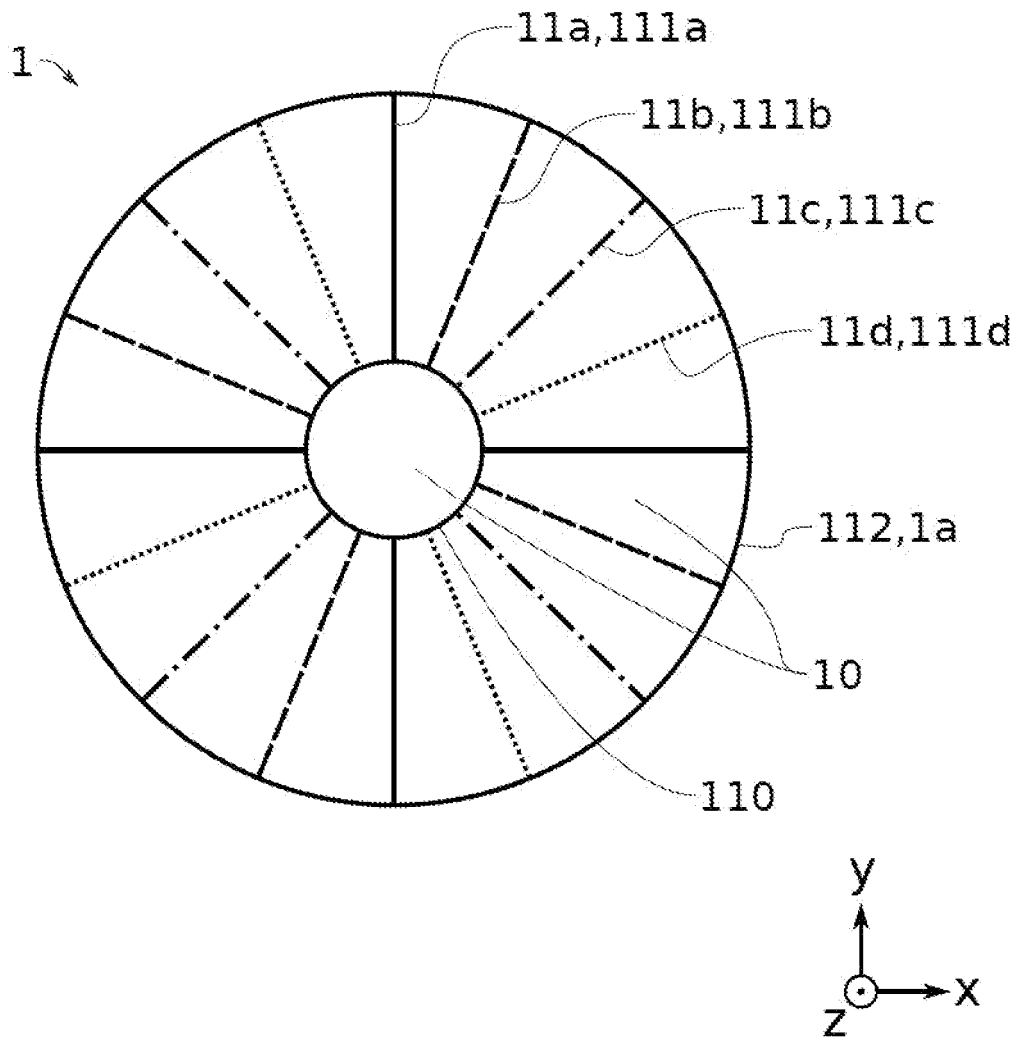


FIG. 5C

[Fig. 5D]

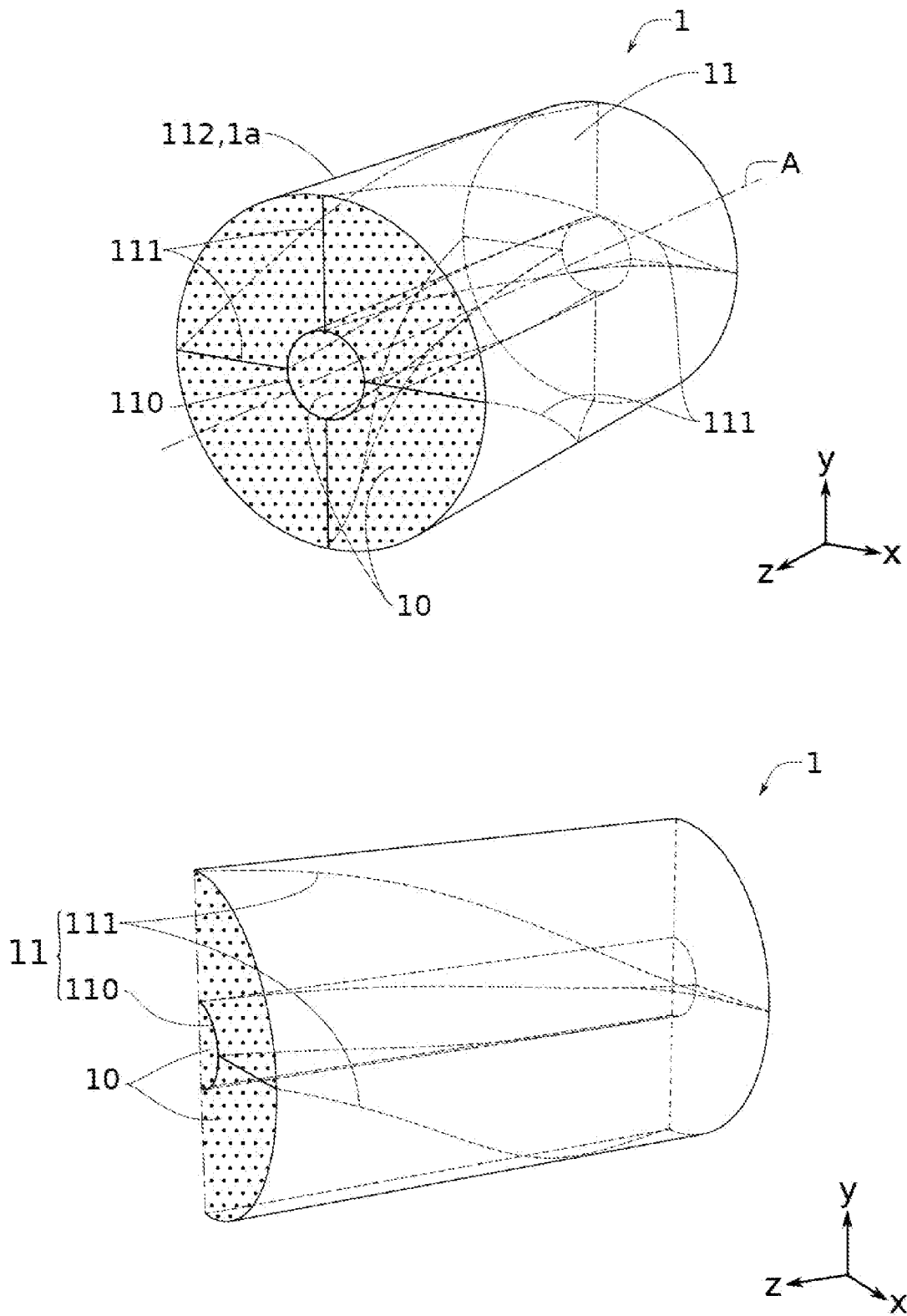


FIG. 5D

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

JP S58 147677 A (NIPPON KAKUNENRYO
KAIHATSU KK) 2 septembre 1983 (1983-09-02)

FR 1 239 850 A (GEN ELECTRIC)
26 août 1960 (1960-08-26)

JP H06 7099 U (JAPAN NUCLEAR FUEL
DEVELOPMENT INCORPORATED COMPANY)
28 janvier 1994 (1994-01-28)

JP H10 26684 A (NIPPON NUCLEAR FUEL DEV;
TOSHIBA CORP; HITACHI LTD)
27 janvier 1998 (1998-01-27)

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT