(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 122 025***

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

(21) **N° d'enregistrement national :** **21 04033**

(51) Int Cl[8] : ***G 21 C 3/04*** *(2020.12), G 21 C 3/62*

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 19.04.21.

(30) **Priorité :**

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

(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 :**

( ) **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) :** FABREGUETTES Vincent et VALENTIN Bernard.

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

(74) **Mandataire(s) :** Cabinet NONY.

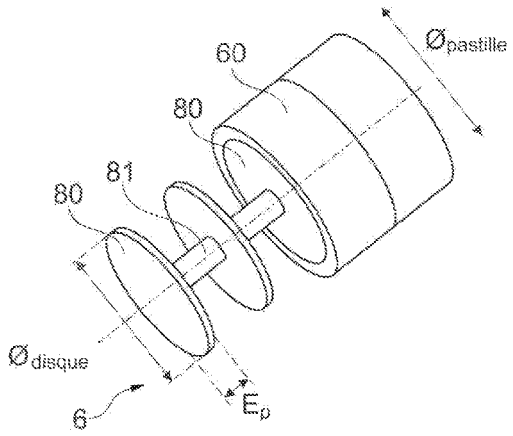
(54) Pastille de combustible nucléaire intégrant un insert métallique ou alliage métallique conducteur thermique à disques pleins et tige pleine reliant les disques selon l'axe central, Crayon et Assemblage de combustible nucléaire associés, utilisation en Réacteur à Eau sous Pression (REP).

(57) Pastille de combustible nucléaire intégrant un insert métallique ou alliage métallique conducteur thermique à section transversale en croix, Crayon et Assemblage de combustible nucléaire associés, utilisation en Réacteur à Eau sous Pression (REP).

L'invention concerne une pastille (6) de combustible nucléaire, comprenant :

un cylindre droit (60) de matière fissile d'axe central (X) dont la longueur et le diamètre définissent respectivement la longueur (H) et le diamètre () de la pastille;un insert (8) métallique ou en alliage métallique conducteur thermique, l'insert s'étendant sur la longueur de la pastille et comprenant au moins un disque plein centré sur l'axe central et une tige pleine s'étendant selon l'axe central et solidaire du disque plein, le rapport R entre le diamètre du disque () et le diamètre de la pastille () étant inférieur à 0,8.

Figure pour l'abrégé : Fig.3B



FR 3 122 025 - A1

Description

Titre de l'invention : Pastille de combustible nucléaire intégrant un insert métallique ou alliage métallique conducteur thermique à disques pleins et tige pleine reliant les disques selon l'axe central, Crayon et Assemblage de combustible nucléaire associés, utilisation en Réacteur à Eau sous Pression (REP).

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne le domaine des éléments combustibles pour les Réacteurs à Eau sous Pression ou Eau Pressurisée (REP) aussi désigné sous l'acronyme anglo-saxon PWR (Pressurized Water Reactor).

[0002] Plus précisément, elle se situe dans le domaine des combustibles de type céramique en oxyde d'uranium (UO_2).

[0003] L'invention vise essentiellement à améliorer les propriétés thermiques de ces combustibles, et ce tant en fonctionnement nominal qu'en situation d'Accidentelle de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP).

[0004] Par « réacteurs nucléaires », dans l'ensemble de la demande, on comprend le sens usuel du terme à ce jour, à savoir des centrales de production d'énergie à partir des réactions de fission nucléaires utilisant des éléments combustibles dans lesquels se produisent les fissions qui libèrent la puissance calorifique, cette dernière étant extraite des éléments par échange thermique avec un fluide caloporteur qui assure leur refroidissement.

[0005] Par « crayon de combustible nucléaire », dans l'ensemble de la demande, on comprend le sens officiel défini par exemple, dans le dictionnaire des Sciences et Techniques nucléaires, à savoir un tube étroit de faible diamètre, fermé à ses deux extrémités, constituant du cœur d'un réacteur nucléaire et contenant de la matière fissile. Ainsi, une « aiguille de combustible nucléaire » dont l'usage privilégie l'appellation est un crayon de combustible nucléaire au sens de la présente invention.

Technique antérieure

[0006] Les réacteurs nucléaires qui utilisent l'énergie de fission pour produire de la chaleur peuvent être classés dans plusieurs catégories différentes en fonction de leurs caractéristiques : la forme d'énergie finale produite (électricité , chaleur…), le type de flux neutronique (neutrons rapides ou neutrons thermalisés), le fluide refroidissement utilisé (métal liquide, eau…), l'état physique du fluide de refroidissement (solide, liquide ou gazeux), le niveau de pression du fluide de refroidissement (par exemple atmosphérique pour les Réacteurs à Eau Bouillante et élevée pour les REP) …

[0007] Une filière est actuellement très largement dominante industriellement dans le monde, celle des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP).

[0008] Un REP comprend essentiellement deux composants principaux : le circuit primaire qui constitue la partie nucléaire du réacteur, et le circuit secondaire qui constitue la partie non nucléaire de celui-ci. On peut se référer par exemple le schéma de principe sous le lien
https://fr/wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_%C3%a0_eau_pressuris%C3%A9e

[0009] Le circuit primaire comprend essentiellement un ensemble cuve avec les structures internes et les assemblages de combustible.

[0010] Le circuit secondaire comprend quant à lui essentiellement des équipements non nucléaires pour produire de l'électricité (tuyauterie, générateurs de vapeur, turbine …). Les générateurs de vapeur sont des échangeurs thermiques qui transfèrent la chaleur issue du cœur au fluide secondaire, i.e. de l'eau dans un REP, qui se vaporise puis va se détendre dans une turbine qui constitue avec l'alternateur le système de génération de l'énergie électrique.

[0011] Pour revenir au circuit primaire, celui-ci intègre la partie clé, dénommée cœur du réacteur. Le cœur regroupe l'ensemble des assemblages, qui sont au nombre de 157 dans un REP de la filière française. Une vue schématique d'un assemblage de combustible REP avec sa grappe de contrôle comprenant des crayons de matériau absorbant neutronique est montré à la [Fig.4] sous le lien :

[0012] http://www.cea.fr/Documents:monographies:combustibles-nucl%C3%A9aires_r%C3%A9acteurs-eau.pdf

[0013] Le cœur est lui-même placé dans une cuve qui constitue la deuxième barrière de confinement du combustible et de ses déchets de fission (appelé Produits de Fission ou PF).

[0014] Le cœur est refroidi par un fluide caloporteur, de l'eau à la pression de 150 bars, qui joue également le rôle de modérateur (ralentissement des neutrons), afin de favoriser la réaction de fission.

[0015] Ce cœur comprend également des structures internes assurant des fonctions spécifiques, telles que le maintien des assemblages, la canalisation du fluide caloporteur…, qui ne sont pas détaillées ici.

[0016] Les assemblages combustibles permettent de produire de l'énergie en tirant partie de la réaction de fission nucléaire d'un combustible composé pour faible partie de noyaux lourds fissiles - l'isotope 235 de l'uranium – ainsi que de l'isotope 238 de l'uranium qui lui n'est que fertile (il va produire du plutonium 239 par capture neutronique).

[0017] Ce combustible est introduit dans un cylindre de section transversale circulaire fermé à chacune de ces deux extrémités par un bouchon. Ce cylindre est dénommé crayon et décrit plus précisément ci-après. Le crayon est étanche et constituant la première

barrière de confinement.

[0018] Les crayons sont regroupés par paquet et agencés suivant un réseau au pas carré. Pour les familles d'installation de la filière française appelées « paliers » de 900 MWe et 1300MWe, le nombre est de 264 crayons auquel s'ajoutent 25 autres tubes, qui compose alors un assemblage qui incorpore également de nombreux éléments de structure (plaque de pied, grilles de maintien, un tube d'instrumentation, 24 tubes guide où coulissent 23 crayons de commande, plaque de tête, ressort de maintien, araignée pour la manipulation des crayons de commande) comme montré sur la [Fig.4] du document .pdf précité.

[0019] En [Fig.1], on a représenté un crayon de combustible nucléaire 1 selon l'état l'art qui est représenté dans sa configuration d'utilisation dans un réacteur nucléaire REP, c'est-à-dire en position verticale avec les pastilles 6 vers la partie inférieure comme précisé ci-dessous.

[0020] Le crayon 1 est constitué d'une gaine 2 classiquement en Zircaloy-4 (Zr4) fermée à chacune de ses extrémités par un bouchon respectivement supérieur 3 et inférieur 4 qui est soudé sur celle-ci. Ce crayon étanche est rempli d'hélium à 25 bars à froid pour contrebalancer en partie l'effet de la pression externe de 150 bars du fluide caloporteur.

[0021] L'intérieur de la gaine est essentiellement divisé en deux compartiments, dont l'un 5 en partie haute, entre le haut de la colonne fissile et le bouchon supérieur 3, constitue une chambre d'expansion de gaz et l'autre loge la colonne fissile formée par l'empilement de pastilles de combustible nucléaire 6 qui s'étendent chacune selon la direction longitudinale XX' du crayon 1.

[0022] La chambre d'expansion est un volume libre destiné à recevoir les PF sous forme gazeuse, appelés usuellement Gaz de Fission (GdF).

[0023] Dans l'empilement représenté, chaque pastille 6 a sensiblement la même longueur ou hauteur H.

[0024] Un ressort hélicoïdal de compression 7, en général en Inconel®, est logé dans la chambre d'expansion 5 avec son extrémité inférieure en appui contre la face supérieure de la pastille 6 la plus en hauteur de l'empilement des pastilles et son autre extrémité en appui contre le bouchon 3 supérieur.

[0025] En sus du maintien de l'empilement de pastilles 6 selon l'axe longitudinal XX' et «l'absorption » au cours du temps du gonflement longitudinal des pastilles 6, l'autre fonction de ce ressort 7 est d'empêcher le flambage de la section de la gaine sur son mode d'ovalisation. Autrement dit, il doit empêcher l'extrême ovalisation de la section de la gaine.

[0026] La fonction primaire d'un crayon combustible est de produire, puis de transmettre la chaleur produite par les réactions de fission au sein du combustible.

[0027] A ce jour, une pastille combustible telle qu'elle est mise en œuvre dans un réacteur

REP, est constituée d'oxyde d'uranium UO2 enrichi en U235 à environ 5%, le complément étant de l'U238 fertile.

[0028] Chaque pastille dégage, par fission nucléaire, de l'énergie sous forme de chaleur et qui varie au cours du temps en fonction de l'usure du combustible mais aussi de la variation de l'altitude des crayons de commande.

[0029] La puissance ainsi dissipée est également fonction à la fois de la position de la pastille dans le crayon, la position du crayon dans l'assemblage et la position, de l'assemblage dans le cœur.

[0030] Cette puissance est évacuée vers la source froide du circuit primaire (l'eau primaire de refroidissement) en rencontrant un certain nombre d'obstacles thermiques que l'on peut synthétiser comme suit :

[0031]
- un fort gradient entre le centre et la périphérie de la pastille induit par la faible conductivité thermique de l'UO2;
- un gradient thermique radial entre pastille et gaine du crayon. En effet, le joint entre pastille et gaine, entièrement gazeux (de l'hélium) en début d'irradiation devient totalement comblé en début de second cycle. Toutefois, la rugosité de la pastille permet la présence discontinue de gaz qui n'est plus simplement de l'hélium mais comprend également des GdF : ainsi, le contact entre pastille et gaine n'est jamais parfait et crée donc, par sa résistance thermique, un gradient thermique radial;
- la conduction thermique radiale à travers la gaine;
- la résistance due à l'échange convectif radial entre la face externe de la gaine et le fluide caloporteur.

[0032] L'évacuation de la chaleur en régime de fonctionnement nominal et en régime incidentel et accidentel est régie par l'équation de conduction de la chaleur (ou équation de Fourier) avec dissipation d'énergie pour la pastille de combustible à laquelle s'ajoute l'équation de Newton qui modélise les échanges convectifs par un coefficient d'échange thermique entre la gaine et le fluide caloporteur.

[0033] Ces équations s'appliquent dans les situations incidentelles et accidentelles, tant que la géométrie du crayon (pastilles y compris) reste intègre et que le fluide caloporteur ne s'est pas vaporisé.

[0034] Des simulations numériques d'un accident de type Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), ont démontré l'intérêt, du point de vue des conséquences thermiques temporelles de cet accident, d'avoir au régime nominal donc initial de cette accident, un combustible le plus froid possible à cœur.

[0035] L'objectif principal est donc, en termes de sûreté, d'abaisser la thermique du crayon et plus particulièrement de la pastille de combustible.

[0036] La [Fig.2], issue de la publication [1] donne l'ordre de grandeurs des températures

dans une pastille de combustible en régime de fonctionnement nominal.

[0037] Il y a des différentes manières d'améliorer la fonction d'évacuation de la puissance produite par une pastille ou un empilement de pastille combustible UO2. Certaines caractéristiques pouvant difficilement être modifiées, comme par exemple le fluide primaire, le matériau de la gaine, la voie d'innovation la plus ouverte est celle de l'amélioration de la conductivité thermique de l'UO2.

[0038] Cette voie peut être divisée en deux catégories qui ont été explorées.

[0039] La première catégorie concerne l'amélioration de la conductivité thermique sans ajout d'une autre phase au sein du combustible UO2.

[0040] Cette première catégorie peut elle-même être subdivisée en trois sous-catégories comme suit :

[0041] - une modification de la forme du crayon, afin d'augmenter la surface d'échange entre source chaude et source froide. Cette modification est localisée par définition au niveau de chaque crayon d'un assemblage combustible. Cette solution a pour inconvénients majeurs de nécessiter une nouvelle conception de l'assemblage et d'avoir un impact éventuel sur la fabricabilité du crayon et les performances de l'assemblage;

[0042] - un changement de la nature du combustible en passant d'un oxyde combustible à un combustible meilleur conducteur de chaleur, par exemple un combustible métallique. Cette modification est localisée par définition au niveau de chaque pastille combustible. Cette solution a pour inconvénients majeurs d'induire un comportement différent en réacteur, de nécessiter une recherche et développement pour développer/qualifier ce nouveau combustible, de mettre au point des nouveaux procédés de fabrication et d'avoir à redéfinir le cycle aval du combustible;

[0043] - une combinaison des deux sous-catégories précédentes qui est un concept désigné sous le nom de LIGHTBRIDGE : voir notamment [2]. Ce concept consiste en un crayon de forme générale hélicoïdale dont la gaine renferme un combustible métallique, de l'UZr. En sus des inconvénients explicités pour les deux sous-catégories précédentes, cette solution a pour inconvénients majeurs de fortement diminuer la masse de matière fissile, typiquement d'environ 25% et de nécessiter de sur-enrichir la pastille en combustible U5.

[0044] La deuxième catégorie concerne l'amélioration de la conductivité thermique avec l'ajout d'une autre phase au sein du combustible UO2. L'ajout est localisé par définition au niveau de chaque pastille combustible.

[0045] Cette deuxième catégorie peut elle-même être subdivisée en trois sous-catégories comme suit :

[0046] - une dispersion de diamant, de graphène … à l'échelle du nanomètre. Cette solution ne semble pas pertinente à ce jour du point de vue de son comportement thermique. Les inventeurs estiment qu'il est toutefois difficile de statuer sur cette solution par

manque d'informations et de connaissances. Cette solution a pour inconvénients majeurs d'être uniquement à l'échelle d'un laboratoire et donc, avec de nécessiter une recherche et développement complète à faire pour le combustible, d'analyser la fabricabilité puis à mettre en œuvre une recherche et développement, et enfin de disposer d'aucun outil de modélisation;

[0047] - une dispersion homogène d'une seconde phase métallique à l'échelle microscopique avec l'objectif de diminuer la conductivité thermique de la pastille UO2 : voir notamment [1]. Cette solution a pour inconvénients majeurs d'induire une difficulté de fabrication et de nécessiter la finalisation puis la validation d'outils de modélisation existants;

[0048] - une dispersion hétérogène d'une seconde phase métallique à l'échelle macroscopique avec l'objectif de favoriser le flux thermique de la pastille UO2 vers la source froide. Cette seconde phase métallique se caractérise par un insert métallique au sein de la matière fissile de la pastille.

[0049] Un tel insert métallique est décrit sous deux conceptions distinctes dans la publication [3].

[0050] Une de ces conceptions, montrée à la figure 1a de cette publication [3] consiste en un ensemble de galettes réparties sur la longueur de la pastille. Cette conception améliore effectivement la thermique de la pastille combustible au centre. Cependant, l'analyse faite par les experts de la demanderesse sur cette conception montre que si, effectivement le choix des caractéristiques structurelles des galettes permet d'atteindre une réduction importante de la température de la pastille à cœur, en revanche ce choix génère potentiellement plusieurs inconvénients pouvant avoir des conséquences très gênantes sur le comportement de la pastille, voire même remettre totalement en cause la pertinence de la solution.

[0051] Les principales conséquences potentiellement négatives sont les suivantes :

[0052]
- une garantie hypothétique de la fonction thermique sous irradiation et de la tenue mécanique irradiation des galettes compte tenu de leur faible épaisseur;
- une tenue mécanique de la gaine non garantie, avec des gradients de température élevés et locaux sur celle-ci, typiquement de 100 à 300 °C/mm, qui sont dus aux contacts de chaque galette avec la gaine ;
- l'absence de certitude de ne pas aggraver le phénomène d'Interaction Pastille Gaine avec une Corrosion Sous Contrainte (IPG-CSC) ;
- un niveau de corrosion susceptible d'être présent sur la gaine en cours d'irradiation ;
- une fabricabilité des galettes métalliques dans un combustible céramique non démontrée avec notamment la possibilité du montage des galettes et l'absence de garantie d'un montage optimal de la colonne combustible.

[0053] Il existe un besoin d'améliorer la conception thermique de pastilles de combustible nucléaire, plus particulièrement à base d'oxydes UO2, afin de diminuer au maximum leur température à cœur, en régime de fonctionnement nominal pour un cœur de Réacteur à Eau sous Pression (REP) tout en respectant les contraintes suivantes :

[0054] - minimisation de la quantité de seconde phase apportée dans une pastille ;

[0055] - absence de dégradation à tout le moins dégradation limitée du comportement neutronique ;

[0056] - fabricabilité la plus aisée possible ;

[0057] - montage d'une colonne de combustible le plus simple possible ;

[0058] - absence des inconvénients précités de la conception montrée à la figure 1a de cette publication [3].

[0059] Le but de l'invention est de répondre au moins en partie à ce besoin.

Exposé de l'invention

[0060] Pour ce faire, l'invention concerne, sous l'un de ses aspects, une pastille de combustible nucléaire, comprenant :

[0061]
- un cylindre droit de matière fissile d'axe central (X) dont la longueur et le diamètre définissent respectivement la longueur (H) et le diamètre ($\varnothing_{pastille}$) de la pastille;
- un insert métallique ou en alliage métallique conducteur thermique, l'insert s'étendant sur la longueur de la pastille et comprenant au moins un disque plein centré sur l'axe central et une tige pleine s'étendant selon l'axe central et solidaire du disque plein, le rapport R entre le diamètre du disque ($\varnothing_{disque}$) et le diamètre de la pastille ($\varnothing_{pastille}$) étant inférieur ou égal à 0,8, de préférence compris entre 0,7 et 0,8.

[0062] Selon un mode de réalisation avantageux, la pastille comprend quatre disques pleins régulièrement espacés selon l'axe central (X), la tige pleine reliant les disques pleins entre eux.

[0063] Selon une première variante, chaque disque est plat.

[0064] Selon une deuxième variante, chaque disque est constitué d'une portion centrale traversée par la tige pleine et d'une portion annulaire autour de la portion centrale, la portion annulaire étant à deux faces sphériques de même diamètre qui sont opposées formant un anneau biconcave de plus grande épaisseur à l'axe central (X) et à la périphérie de la pastille.

[0065] Avantageusement, le matériau de l'insert est choisi parmi un alliage de zirconium, notamment le Zircaloy-4 (Zr4), le chrome (Cr), le Molybdène (Mo).

[0066] Avantageusement encore, la matière fissile du cylindre droit est choisie parmi l'oxyde d'uranium (IV) (UO2), l'oxyde mixte (U, Pu)O2 ou un mélange mixte à base

d'oxyde d'uranium et d'oxydes de plutonium retraités.

[0067] De préférence, le pourcentage massique de l'insert est compris entre 5 et 10 %.

[0068] L'invention concerne également un crayon de combustible nucléaire s'étendant selon une direction longitudinale (XX') comprenant :

[0069] - une pluralité de pastilles nucléaires telles que décrites précédemment, empilées les unes sur les autres ;

[0070] - une gaine en matériau transparent aux neutrons entourant l'empilement de pastilles.

[0071] Selon un mode de réalisation avantageux, le comprend une seule tige pleine s'étendant sur toute la longueur de l'empilement de pastilles nucléaires.

[0072] Avantageusement, la gaine est en alliage de zirconium, notamment en Zircaloy-4 (Zr4), ou en alliage M5® (ZrNbO).

[0073] L'invention concerne également un assemblage de combustible nucléaire comprenant une pluralité de crayons de combustible comme ci-avant et agencés entre eux selon un réseau.

[0074] L'invention concerne également l'utilisation d'une pastille de combustible nucléaire telle que décrite précédemment ou d'un crayon de combustible comme décrit ci-avant dans un réacteur à eau pressurisée (REP).

[0075] Ainsi, l'invention consiste essentiellement en une pastille de combustible nucléaire qui intègre, au sein d'un cylindre droit de matière fissile, un insert métallique à disque(s) plein(s) et tige pleine selon l'axe central, en tant que seconde phase métallique.

[0076] Avec un insert à disques pleins et tige pleine selon l'invention, la température à cœur d'une pastille n'est pas la plus basse parmi toutes les solutions envisageables.

[0077] En revanche, l'insert permet une baisse sensible de la température à cœur, tout en ne générant pas les inconvénients entrainés par les solutions de l'art antérieur, en particulier de la conception montrée à la figure 1b de cette publication [3].

[0078] La solution selon l'invention est un parfait compromis pour l'obtention simultanée de plusieurs performances sur un système complexe que constitue une pastille de combustible nucléaire.

[0079] Les avantages d'une pastille de combustible selon l'invention sont nombreux parmi lesquels on peut citer :

[0080] - une forte baisse de température maximale comparativement à celle d'une pastille selon l'état de l'art;

[0081] - une forte limitation des gradients thermiques locaux sur la gaine d'un crayon qui loge une pastille selon l'invention ;

[0082] - une fabricabilité simple;

[0083] - le maintien d'un procédé de montage usuel dans un crayon de combustible nucléaire ;

[0084] - une augmentation de la rétention des gaz de fission ;

[0085] - une limitation voire suppression du risque d'IPG-CSC car, par conception, la hauteur d'un motif composé d'UO2 est inférieur au diamètre de la pastille combustible (UO2 + insert métallique).

[0086] D'autres avantages et caractéristiques de l'invention ressortiront mieux à la lecture de la description détaillée d'exemples de mise en œuvre de l'invention faite à titre illustratif et non limitatif en référence aux figures suivantes.

Brève description des dessins

[0087] [Fig.1] la [Fig.1] est une vue schématique en coupe longitudinale d'un crayon de combustible nucléaire selon l'état de l'art, tel qu'il est mis en œuvre dans un réacteur nucléaire REP.

[0088] [Fig.2] la [Fig.2] illustre sous la forme d'une courbe les températures dans une pastille de combustible nucléaire selon l'état de l'art, en régime de fonctionnement nominal.

[0089] [Fig.3A] la [Fig.3A] est une vue schématique en perspective d'un motif M de base d'un crayon de combustible nucléaire dont la gaine loge une pastille de combustible avec un insert métallique à disques pleins et tige pleine selon l'invention.

[0090] [Fig.3B] la [Fig.3B] reprend la [Fig.3A] mais sans la présence de la gaine, i.e. uniquement la pastille de combustible avec un insert métallique à disques pleins et tige pleine selon l'invention.

[0091] [Fig.3C] la [Fig.3C] reprend la [Fig.3B] mais sans la présence du cylindre droit de matière fissile.

[0092] [Fig.4] la [Fig.4] est une vue issue de la simulation numérique montrant les champs de température pour la configuration de la [Fig.3A].

[0093] [Fig.5] la [Fig.5] est une vue issue de la simulation numérique montrant les champs de température pour la configuration de la [Fig.3C].

[0094] [Fig.6A] la [Fig.6A] est une vue schématique en perspective d'une pastille de combustible sans l'insert métallique selon l'invention.

[0095] [Fig.6B] la [Fig.6B] est une vue schématique en perspective de l'insert métallique selon l'invention.

[0096] [Fig.6C] la [Fig.6C] est une vue issue de la simulation numérique montrant le champ de température pour une configuration de pastille selon la [Fig.6A] avec un insert selon la [Fig.6B].

[0097] [Fig.7A] la [Fig.7A] est une vue schématique en perspective d'une variante de pastille de combustible sans l'insert métallique selon l'invention.

[0098] [Fig.7B] la [Fig.7B] reprend est une vue schématique en perspective d'une variante d'un disque plein de l'insert métallique selon l'invention.

[0099] [Fig.7C] la [Fig.7C] est une vue issue de la simulation numérique montrant le champ de température pour une configuration de pastille selon la [Fig.7A] avec un insert selon la [Fig.7B].

Description détaillée

[0100] Par souci de clarté, un même élément selon l'état de l'art et selon l'invention est désigné par une même référence numérique.

[0101] Les figures 1 et 2 ont déjà été commentées en préambule. Elles ne seront donc pas détaillées ci-après.

[0102] Dans les exemples ci-après, les pastilles de combustible selon l'invention et gaine sont créées à l'aide du logiciel de CAO commercialisé sous l'appellation « SolidWorks » puis modélisés, par un maillage et des calculs de conduction thermique en 3D, à l'aide de son module « Simulation Professionnel » dans la version 2019.

[0103] Dans l'ensemble des figures 3A à 7C, même si les différents éléments ne sont pas représentés exactement à l'échelle, l'insert à disques pleins et tige pleine selon l'invention est illustré tel qu'il est, i.e. à l'échelle macroscopique, dans un cylindre de matière fissile.

[0104] On a représenté en [Fig.3A] un motif de base M d'un crayon de combustible nucléaire 1 avec une gaine 2 logeant une pastille de combustible 6 selon l'invention.

[0105] Telle qu'illustré en [Fig.3B], la pastille 6 selon l'invention d'axe central (X) comprend un cylindre droit 60 de matière combustible oxyde dégageant de la puissance thermique et un insert métallique 8.

[0106] L'insert métallique 8 comprend une pluralité de disques pleins 80, de section circulaire, d'épaisseur égale Ep et régulièrement espacés les uns des autres sur la longueur H de la pastille et une tige pleine 81 qui s'étend selon l'axe central X et qui relie tous les disques pleins 80. La tige pleine 81 connecte donc thermiquement tous les disques 80 entre eux.

[0107] Le cylindre droit 60 est usiné avec un trou central 61 et au moins un évidement circulaire 62 afin d'y loger à la fois un disque plein 80 et la tige pleine 81.

[0108] La tige pleine 81 selon l'axe central, en matériau métallique bon conducteur de chaleur, remplace l'UO_2 (mauvais conducteur) dans la zone la plus chaude de la pastille 6.

[0109] La [Fig.3C] montre l'insert métallique 8 à lui seul, avec ses dimensions représentées, à savoir le diamètre O_{disque} des disques pleins 80, leur épaisseur constante Ep, le diamètre O_{axe}, de la tige pleine 81.

[0110] Le gain thermique d'une pastille 6 avec insert métallique 8 selon l'invention est évalué par comparaison avec la température maximale du combustible oxyde (notée ci-après $T_{max\ comb}$) d'une pastille cylindrique standard de section circulaire d'un REP en

service dans le palier 900 MWe de la filière française.

[0111] Le calcul sur un motif unique augmentant la température maximale du combustible, un empilement de quatre motifs M est nécessaire pour converger vers une valeur asymptote. Cet empilement de quatre motifs comprend donc un nombre de quatre disques pleins 80 régulièrement espacés le long d'une tige pleine 81.

[0112] La pastille cylindrique standard telle que montrée en figure 1 a les mêmes dimensions qu'une pastille 6 selon l'invention, i.e. un même diamètre $\varnothing_{pastille}$ et une même longueur H.

[0113] La puissance du motif de base M conforme à l'invention est de 373 W, ce qui correspond à des conditions standard de fonctionnement en régime nominal.

[0114] Le pourcentage de l'insert métallique 8 dans une pastille 6 est de 10 %. Son matériau est le même que celui de la gaine 2, à savoir du zircaloy 4 (Zr4).

[0115] Les dimensions géométriques d'une pastille 6 selon les figures 3A à 3C sont les suivantes :

[0116]
- diamètre de la pastille ($\varnothing_{pastille}$) égal à 8,36 mm ;
- diamètre d'un disque plein 80 ($\varnothing_{disque}$) égal à 6,71 mm (d'où un rapport R = $\varnothing_{disque}/\varnothing_{pastille}$ égal à 0,8;
- épaisseur d'un disque plein 80 (Ep) égale à 0,44 mm ;
- diamètre de la tige pleine 81 ($\varnothing_{axe}$) égal à 1,18 mm.

[0117] Avec cette géométrie, les disques pleins 80 de l'insert 8 ne sont jamais en contact avec la gaine 2 et ce quel que soit l'historique d'irradiation.

[0118] L'objectif d'une telle configuration est de limiter les gradients thermiques très locaux sur la gaine 2, typiquement de l'ordre d'au moins 150°C/mm s'il y avait un contact parfait entre disques et gaine, et ses conséquences sur la gaine 2.

[0119] La température $T_{max\ comb}$ d'une pastille de combustible standard est de 1093°C.

[0120] Le gain estimé sur $T_{max\ comb}$ dans ces conditions est environ de 247 °C.

[0121] Les figures 4 et 5 montrent les champs thermiques respectivement pour le motif de base M pour quatre pastilles 6, et l'insert métallique 8 à disques pleins 80 et tige pleine centrale 81. Les gradients locaux de température sur la gaine 2 sont réduits d'un facteur environ 6, pour être proches d'environ 25 °C/mm.

[0122] Afin de réduire le pourcentage massique de l'insert métallique 8 dans une pastille 6, les inventeurs proposent de remplacer le Zr4 par un matériau plus conducteur de chaleur.

[0123] Une étude paramétrique sur la puissance montre que les gains augmentent avec celle-ci comme le montre le tableau 1 ci-dessous.

[0124] On précise que dans ce tableau 1, les puissances retenues pour les calculs sont celles dissipées par une pastille de la colonne combustible et toutes les pastilles sont

supposées à la même puissance.

[0125] La puissance de 373 W est représentative de la puissance maximale d'une pastille REP standard en régime de fonctionnement nominal.

[0126] Une puissance de 500 W est déjà une puissance en condition accidentelle.

[0127] Le tableau 1 ci-dessous donne une estimation des gains potentiels en température (δT_{max} égal à $T_{maxcomb}$ pastille selon l'état de l'art - $T_{maxcomb}$ d'un insert 8 selon l'invention) en fonction de la puissance dissipée dans la pastille et pour un insert métallique 8 occupant 10% du volume de la pastille, le rapport $R = \varnothing_{disque}/\varnothing_{pastille}$ est égal à 0,8.

[0128] On précise que dans ce tableau 1, les valeurs δT_{max} 10% Cr_t, δT_{max} 10% Mo, δT_{max} 10% Zr, désignent les gains respectivement pour un insert en chrome, molybdène, et en zircaloy.

[0129] [Tableaux1]

Tableau 1

Puissance	Température maximale $T_{max\ comb}$ d'une pastille de combustible selon l'état de l'art	Gains en température maximale en fonction de la forme de l'insert 8 à quatre disques pleins 80		
		δT_{max} 10% Cr	δT_{max} 10% Mo	δT_{max} 10% Zr
300W	909°C	220°C	230°C	165°C
373W	1093°C	310°C	323°C	247°C
400W	1166°C	349°C	363°C	283°C
500W	1461°C	515°C	533°C	440°C

[0130] Différentes variantes géométriques de l'insert métallique 8 peuvent être envisagées, afin d'optimiser les paramètres de structure dimensionnels diamètre/épaisseur des disques, diamètre de l'axe central et le paramètre fonctionnel température maximale du combustible.

[0131] Le tableau 2 ci-dessous donne une estimation par calcules des gains potentiels en température (δT_{max} égal à $T_{maxcomb}$ pastille selon l'état de l'art - $T_{maxcomb}$ d'un insert 8 selon l'invention) en fonction de la puissance dissipée dans la pastille et pour un insert métallique 8 en Zr4 occupant 10% du volume de la pastille.

[0132] [Tableaux2]

Tableau 2

Puissance	Température maximale $T_{max\ comb}$ d'une pastille de combustible selon l'état de l'art	Gains en température maximale en fonction de la forme de l'insert 8 à quatre disques pleins 80					
		Ep					
		0,44mm			0,4mm	0,5mm	0,64mm
	$\varnothing_{disque}$	6,71mm	6,26mm	5,81mm	6,57mm	5,88mm	5,19mm
	$\varnothing_{axe}$	1,18mm	1,50mm	1,75mm	1,50mm	1,50mm	1,50mm
		$\varnothing_{disque}/\varnothing_{Pastille}$					
		0,803	0,749	0,695	0,786	0,703	0,621
		δT_{max} 10% Zr	δT_{max} 10% Zr	δT_{max} 10% Zr	δT_{max} 10% Zr	δT_{max} 10% Zr	δT_{max} 10% Zr
300W	909°C	165°C	166°C	166°C	169°C	162°C	154°C
373W	1093°C	247°C	246°C	246°C	251°C	242°C	230°C
400W	1166°C	283°C	282°C	281°C	287°C	277°C	264°C
500W	1461°C	440°C	438°C	436°C	445°C	431°C	414°C

[0133] De ce tableau 2, il ressort que les gains sont voisins dans la gamme 0,7 < $\varnothing_{disque}/\varnothing_{pastille}$ <0,8 avec un écart d'environ 10 °C. Ce faible écart s'explique par le fait que la diminution de $\varnothing_{disque}$(donc d'éloignement de la source froide) est compensé par augmentation de $\varnothing_{axe}$ dans une zone où le combustible est le plus chaud. Cette gamme (de 0,7 à 0,8) est un optimum et donne une marge géométrique pour le dimensionnement thermomécanique.

[0134] Il n'y a pas d'exploration au-delà du rapport $\varnothing_{disque}/\varnothing_{pastille}$ > 0,8 car cela accroît les gradients thermiques sur la gaine ce qui est encore plus pénalisant à puissance élevée et enlèverait des marges en situations incidentelles ou accidentelles mettant en jeu une augmentation de la puissance ou de la température par une cause externe.

[0135] Le tableau 3 ci-dessous récapitule les calculs pour évaluer l'influence du choix du matériau de l'insert métallique 8 sur les gains en température de l'UO2. Les calculs sont ici réalisés pour la géométrie la plus optimale du tableau précédent, i.e. $\varnothing_{disque}/\varnothing_{pastille}$ = 0,79 et pour une puissance de 373 W uniquement.

[0136] [Tableaux3]

Tableau 3

Pourcentage	Gains en température maximale en fonction en fonction du matériau de l'insert 8 à disques pleins 80		
	Cr	Mo	Zr
δT_{max} 5%	307°C	321°C	251°C
δT_{max} 7,5%	285°C	301°C	229°C
δT_{max} 10%	248°C	266°C	193°C

[0137] De ce tableau 3, il ressort que les gains sont substantiels même avec une fraction réduite à 5% de l'insert métallique 8. Ce tableau suggère que l'on pourrait baisser la quantité de métal dans la pastille de combustible plus particulièrement dans le cas d'un choix d'un matériau bon conducteur (Cr et Mo dans cette évaluation).

[0138] Le tableau 4 ci-dessous donne les températures atteintes par le combustible UO2, qui correspondent aux gains du tableau 3, ces températures sont comparées à une pastille de combustible selon l'état de l'art avec 10% de Zr4 pour proposer une fourchette de pourcentage cible de métal d'insert 8 dans une pastille de combustible 6.

[0139] [Tableaux4]

Tableau 4

Pourcentage	Température maximale $T_{max\ comb}$ en fonction du matériau de l'insert 8 à disques pleins 80		
	Cr	Mo	Zr
5%	845°C	827°C	899°C
7,5%	807°C	791°C	864°C
10%	785°C	772°C	841°C

[0140] Les calculs du tableau 4 révèlent que :

[0141]
- le choix du Cr ou du Mo permet de diminuer la quantité de l'insert métallique 8 dans une fourchette située entre 5% et 5,5% avec du Cr et 4,5% et 5% avec du Mo.
- dans ces gammes à faible ajout de métal :
  - la conception de la pastille devra être plus aboutie et satisfaire d'autres critères thermiques, thermomécaniques et/ou thermochimiques,
  - cela permet de limiter le sur-enrichissement nécessaire pour compenser la diminution de la masse d'uranium,

- la quantité de déchets à traiter sera plus limitée.

– les champs thermiques sont similaires à ceux du cas de référence initial ci-dessus ;

– par conception (choix du rapport $\varnothing_{disque}/\varnothing_{pastille} < 0,8$), les gradients locaux de température sur la gaine sont faibles (< 5%/mm) voire négligeables (< 0,5°C/mm). Ceux-ci ne sont donc plus un critère discriminatoire.

[0142] Une variante géométrique de l'insert métallique 8' consiste à modifier sa forme et ainsi, en lieu et place d'un disque plein plat 80, de réaliser un disque avec une portion centrale 82 traversée par la tige pleine 81 et d'une portion annulaire autour de la portion centrale, la portion annulaire 80b étant à deux faces sphériques de même diamètre qui sont opposées formant un anneau biconcave de plus grande épaisseur à l'axe central (X) et à la périphérie de la pastille.

[0143] Le tableau 5 ci-dessous récapitule les calculs pour évaluer l'influence du choix du matériau de l'insert métallique 8' sur les gains en température de l'UO2.

[0144] Les dimensions géométriques d'une pastille 6 étudiée sont les suivantes :

[0145] – diamètre de la pastille ($\varnothing_{pastille}$) égal à 8,36 mm ;

– diamètre d'un disque plein 80b ($\varnothing_{disque}$) égal à 6,57 mm (d'où un rapport R = $\varnothing_{disque}/\varnothing_{pastille}$ égal à 0,786;

– épaisseur maximale d'un disque plein 80b (Ep) égale à 1 mm en son centre et sa périphérie;

– diamètre de la tige pleine 81 ($\varnothing_{axe}$) égal à 1,5 mm.

[0146] [Tableaux5]

Tableau 5

Puissance	Gains en température maximale en fonction de la forme de l'insert 8 à quatre disques pleins 80b biconcaves par rapport à quatre disques pleins plats 80		
	δT_{max} 10% Cr	δT_{max} 10% Mo	δT_{max} 10% Zr
300W	-2°C	-5°C	5°C
373W	-3°C	-6°C	6°C
400W	-3°C	-6°C	6°C
500W	-4°C	-8°C	7°C

[0147] Les deux exemples de champ thermique ainsi que la température maximale du combustible dans le cas avec du Zr4 et de 10% sans combustible sont donnés figures 4 et 5 pour la pastille la plus chaude (les calculs ont été réalisés sur un empilement de quatre pastilles de combustible).

[0148] L'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits; on peut notamment combiner entre elles des caractéristiques des exemples illustrés au sein de variantes non illustrées.

[0149] D'autres variantes et améliorations peuvent être envisagées sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

Liste des références citées

[0150] [1]: Kim D.J. – Rhee Y.W. & al – "*Fabrication of Micro-Cell_UO2-Mo with enhanced thermal conductivity*", JNM 462 (2015) 289-295.

[0151] [2]: Malone J. – Totemeier A. – Shapiro N. – Vaidyanathan S. - Lightbridge Corp – " *Advanced Metallic Fuel for LWRs*", Nuclear Technology, 181:3 437-442 Nov 2012.

[0152] [3]: Medvedev P.G. & Mariani R.D. – "*Conductive inserts to reduce nuclear fuel*", JNM 531 (2020) 151966.

[0153] [4]: H. Bailly & al. – "*Le combustible nucléaire des réacteurs à eau sous pression et des réacteurs à neutrons rapides*" – Eyrolles 1996

Revendications

[Revendication 1] Pastille (6) de combustible nucléaire, comprenant :
un cylindre droit (60) de matière fissile d'axe central (X) dont la longueur et le diamètre définissent respectivement la longueur (H) et le diamètre ($\varnothing_{pastille}$) de la pastille;
un insert (8) métallique ou en alliage métallique conducteur thermique, l'insert s'étendant sur la longueur de la pastille et comprenant au moins un disque plein centré sur l'axe central et une tige pleine s'étendant selon l'axe central et solidaire du disque plein, le rapport R entre le diamètre du disque ($\varnothing_{disque}$) et le diamètre de la pastille ($\varnothing_{pastille}$) étant inférieur ou égal à 0,8, de préférence compris entre 0,7 et 0,8.

[Revendication 2] Pastille (6) selon la revendication 1, comprenant quatre disques pleins régulièrement espacés selon l'axe central (X), la tige pleine reliant les disques pleins entre eux.

[Revendication 3] Pastille (6) selon l'une des revendications 1 ou 2, chaque disque étant plat.

[Revendication 4] Pastille (6) selon l'une des revendications 1 ou 2, chaque disque étant constitué d'une portion centrale traversée par la tige pleine et d'une portion annulaire autour de la portion centrale, la portion annulaire (80b) étant à deux faces sphériques de même diamètre qui sont opposées formant un anneau biconcave de plus grande épaisseur à l'axe central (X) et à la périphérie de la pastille.

[Revendication 5] Pastille (6) selon l'une des revendications précédentes, le matériau de l'insert étant choisi parmi un alliage de zirconium, notamment le Zircaloy-4 (Zr4), le chrome (Cr), le Molybdène (Mo).

[Revendication 6] Pastille (6) selon l'une des revendications précédentes, la matière fissile du cylindre droit étant choisie parmi l'oxyde d'uranium(IV) (UO_2), l'oxyde mixte (U, Pu)O2 ou un mélange mixte à base d'oxyde d'uranium et d'oxydes de plutonium retraités.

[Revendication 7] Pastille (6) selon l'une des revendications précédentes, le pourcentage massique de l'insert étant compris entre 5 et 10 %.

[Revendication 8] Crayon de combustible nucléaire (1) s'étendant selon une direction longitudinale (XX') comprenant :
une pluralité de pastilles nucléaires (6) selon l'une des revendications précédentes, empilées les unes sur les autres ;
une gaine (2) en matériau transparent aux neutrons entourant l'empilement de pastilles.

[Revendication 9] Crayon (1) selon la revendication 8, comprenant une seule tige pleine s'étendant sur toute la longueur de l'empilement de pastilles nucléaires (6).

[Revendication 10] Crayon (1) selon la revendication 8 ou 9, la gaine étant en alliage de zirconium, notamment en Zircaloy-4 (Zr4), ou en alliage M5® (ZrNbO).

[Revendication 11] Assemblage de combustible nucléaire comprenant une pluralité de crayons de combustible selon l'une quelconque des revendications 8 à 10 et agencés entre eux selon un réseau.

[Revendication 12] Utilisation d'une pastille de combustible nucléaire (6) selon l'une des revendications 1 à 7 ou d'un crayon de combustible nucléaire (1) selon l'une des revendications 8 à 10 dans un réacteur à eau pressurisée (REP).

[Fig. 1]

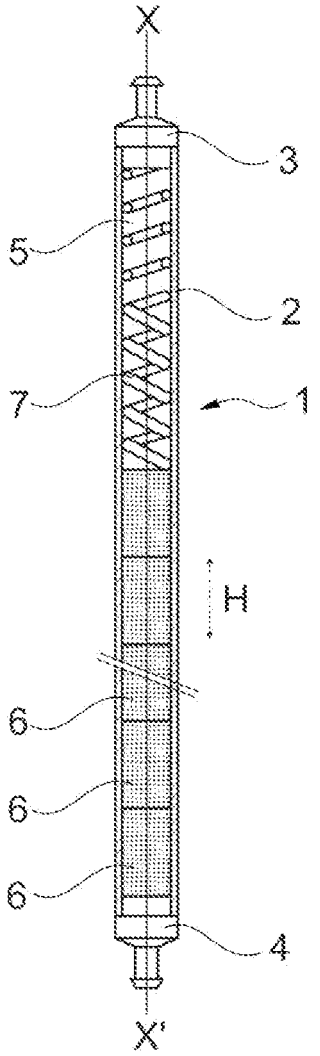


Fig. 1

[Fig. 2]

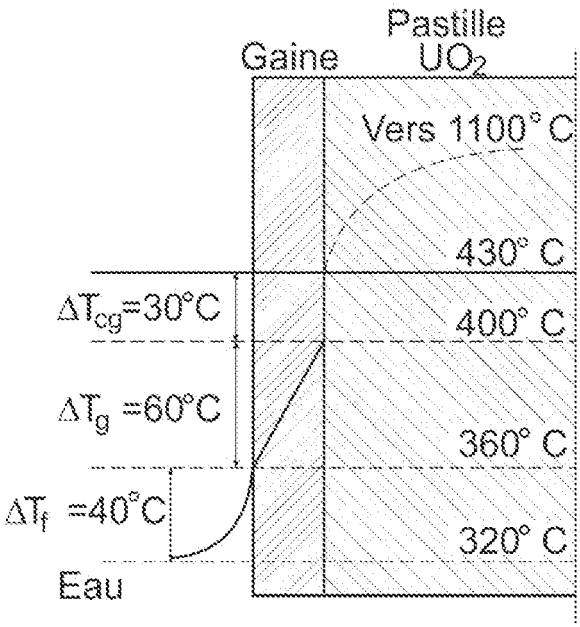


Fig. 2

[Fig. 3A]

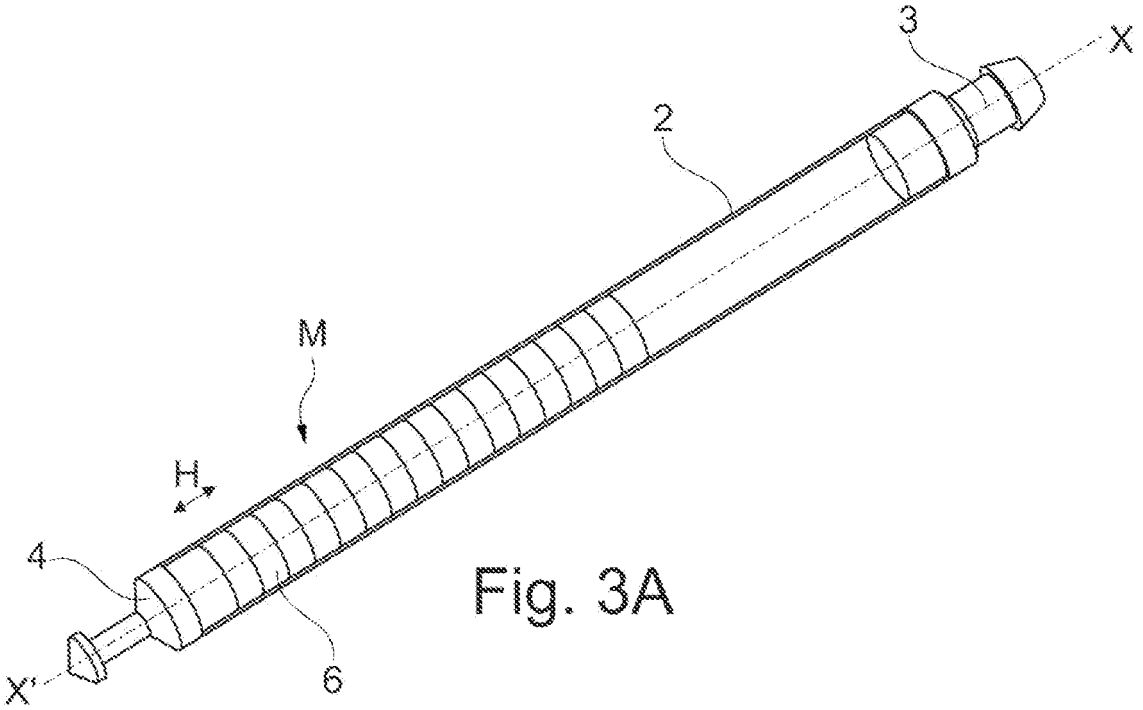


Fig. 3A

[Fig. 3B]

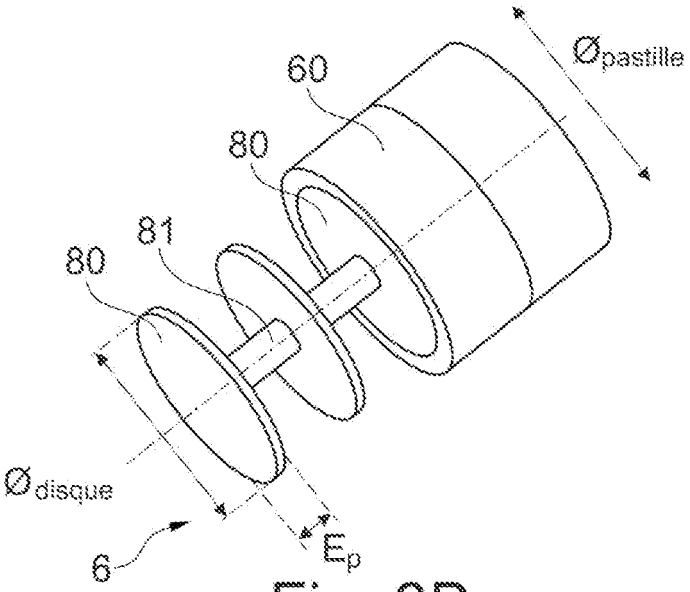


Fig. 3B

[Fig. 3C]

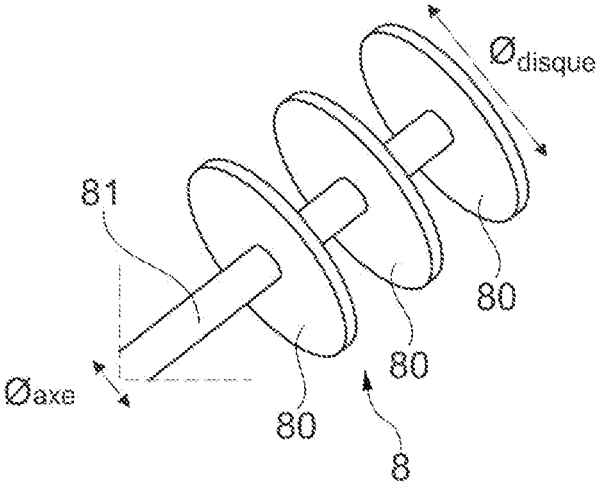


Fig. 3C

[Fig. 4]

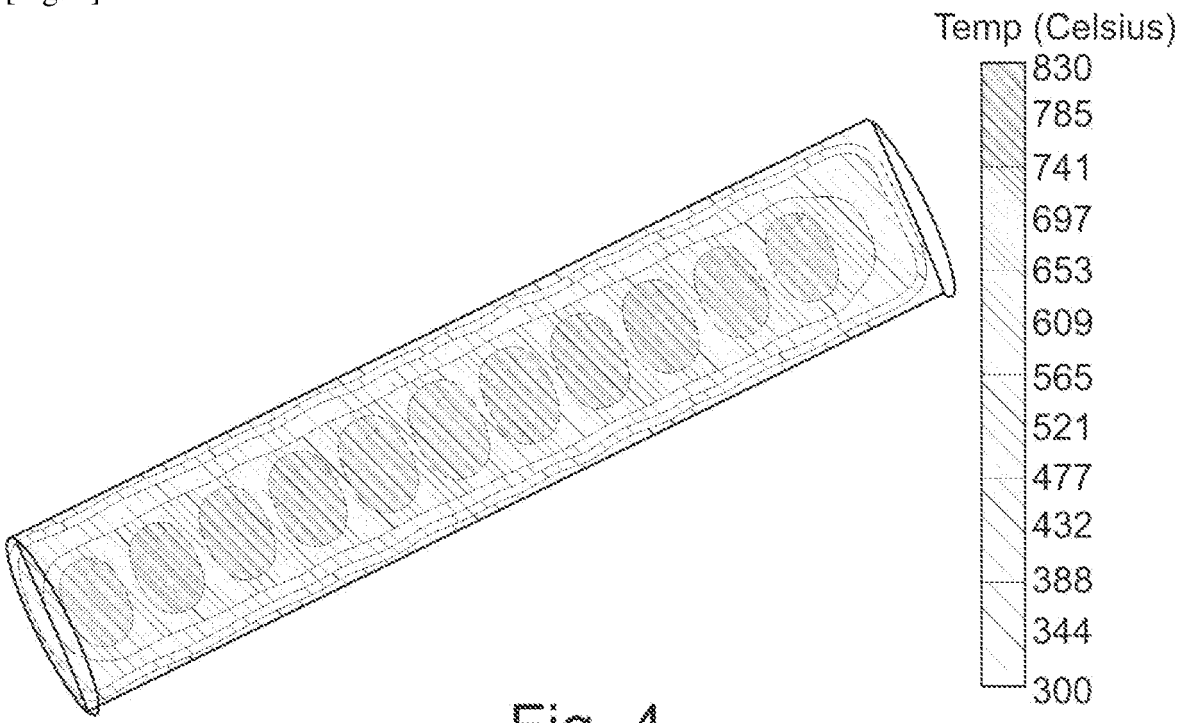


Fig. 4

[Fig. 5]

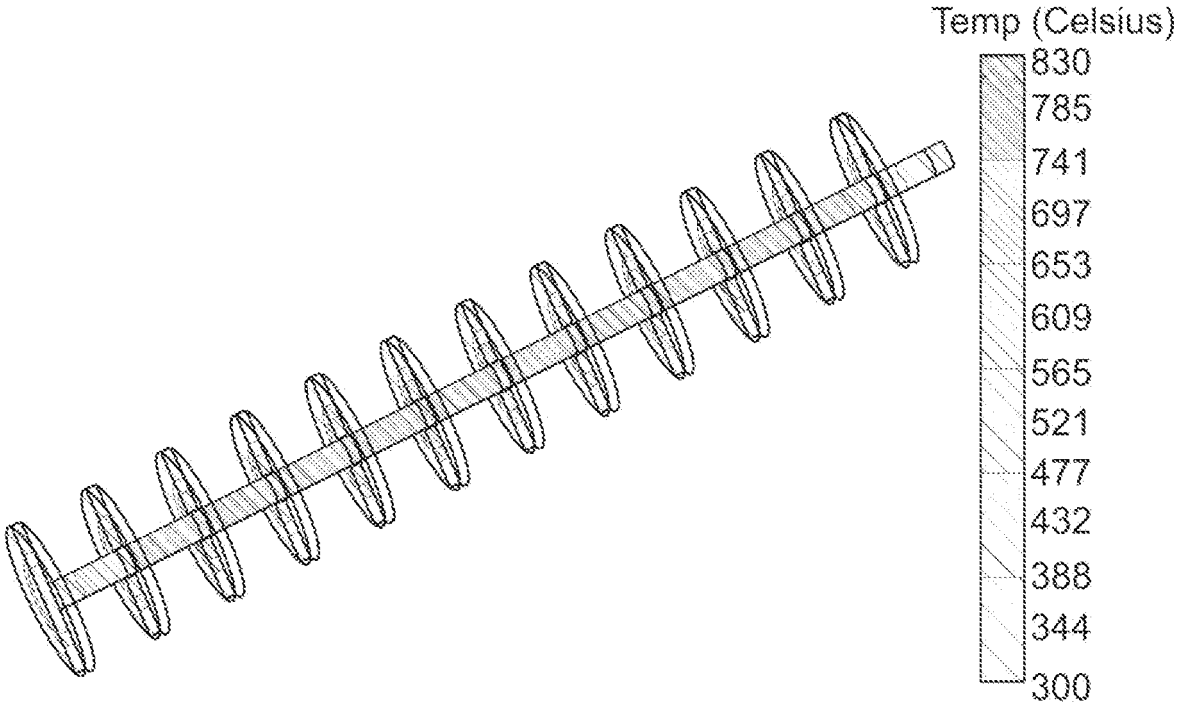


Fig. 5

[Fig. 6A]

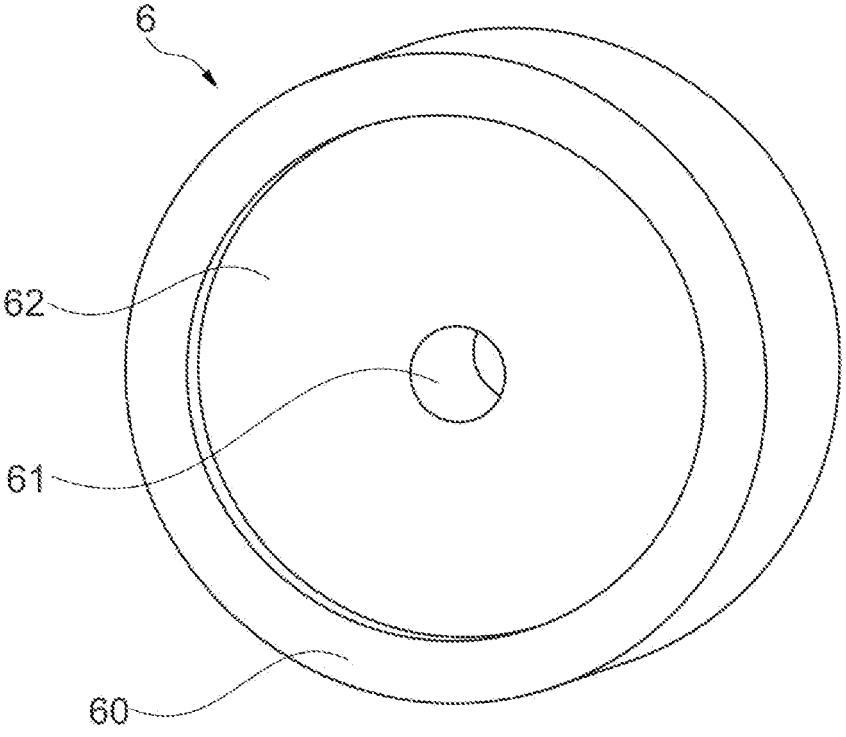


Fig. 6A

[Fig. 6B]

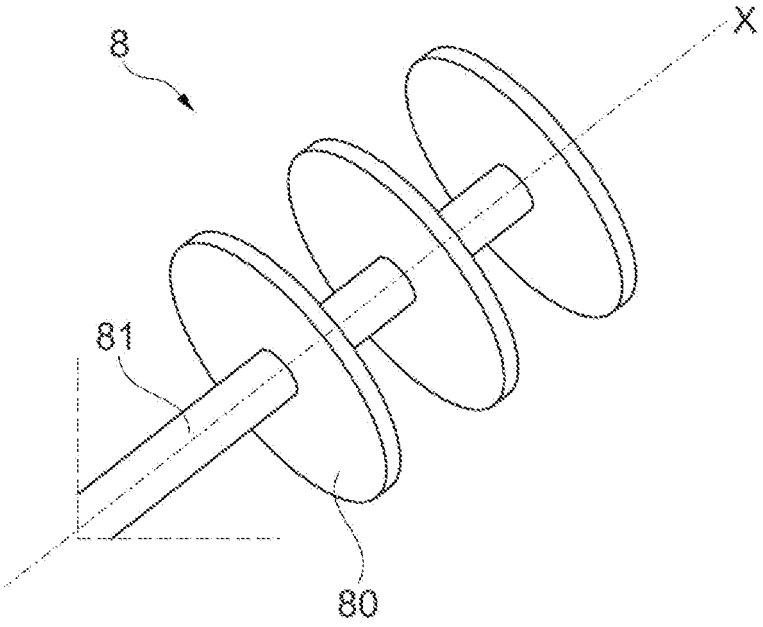


Fig. 6B

[Fig. 6C]

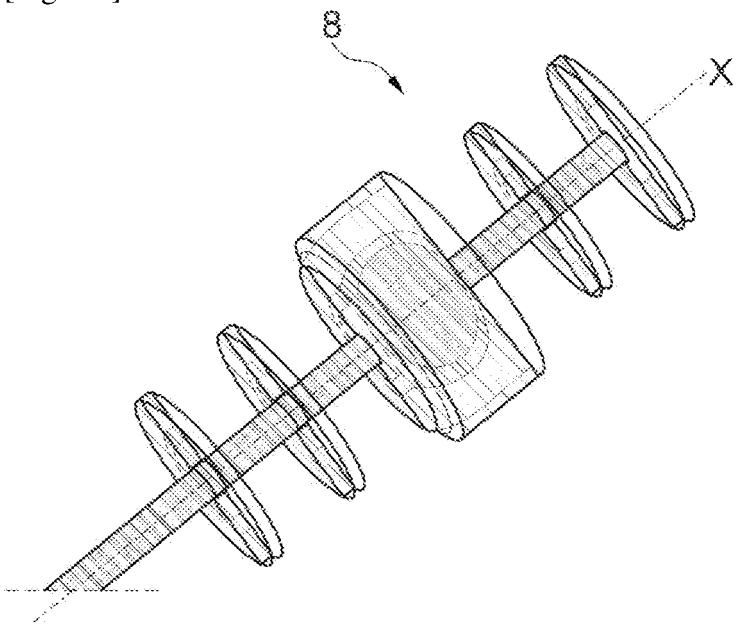


Fig. 6C

[Fig. 7A]

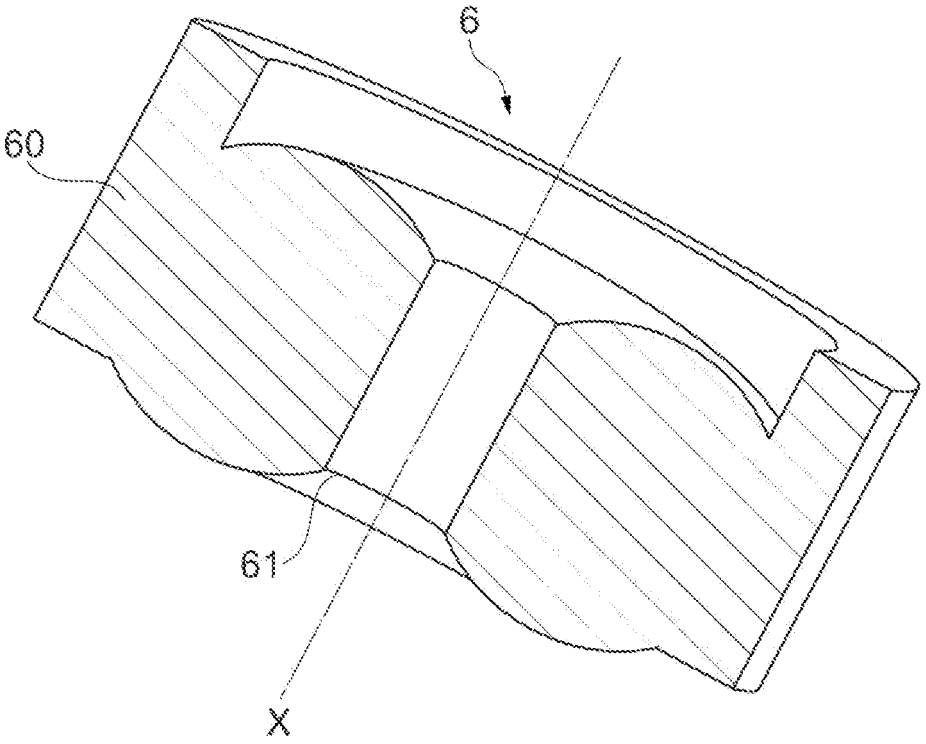


Fig. 7A

[Fig. 7B]

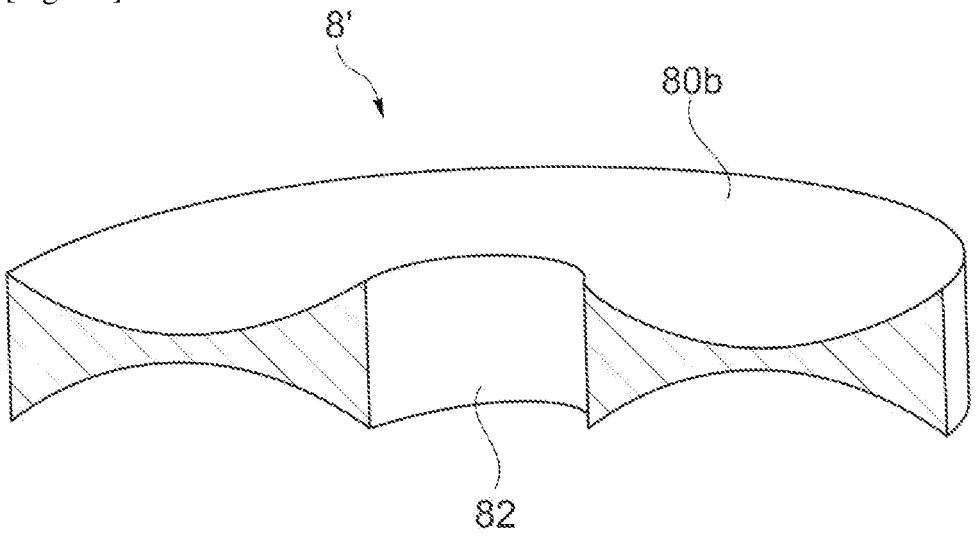


Fig. 7B

[Fig. 7C]

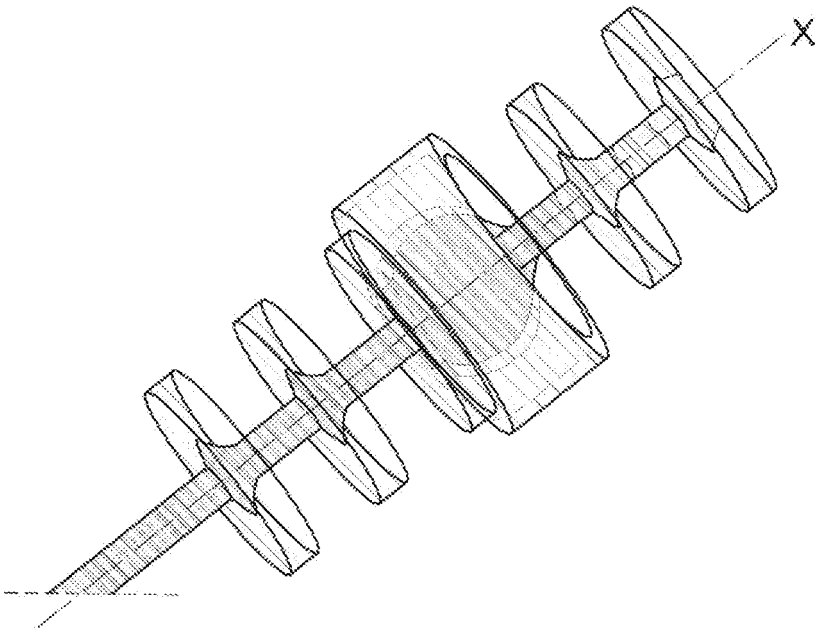


Fig. 7C

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement national

FA 895162
FR 2104033

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	US 9 666 310 B1 (MARIANI ROBERT D [US]) 30 mai 2017 (2017-05-30) * colonne 9, ligne 56 - colonne 10, ligne 3; figure 5 *	1-12	G21C3/04 G21C3/62
A	JP H02 73192 A (NIPPON NUCLEAR FUEL DEV) 13 mars 1990 (1990-03-13) * alinéa [0001]; figures 1-4 *	1-12	

DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)

G21C

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
26 novembre 2021	Sewtz, Michael

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

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2104033 FA 895162

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 26-11-2021
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 9666310 B1	30-05-2017	AUCUN	
JP H0273192 A	13-03-1990	AUCUN	

EPO FORM P0465