

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2024/256546 A1

(43) Date de la publication internationale
19 décembre 2024 (19.12.2024)

(51) Classification internationale des brevets :

G21C 1/16 (2006.01) G21C 15/04 (2006.01)
G21C 3/28 (2006.01) G21C 15/26 (2006.01)
G21C 3/62 (2006.01) G21D 9/00 (2006.01)
G21C 5/12 (2006.01)

(71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
[FR/FR] ; 25 rue Leblanc, Bat Le Ponant, 75015 PARIS
(FR).

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP2024/066378

(72) Inventeur : HOURCADE, Edouard ; 150 chemin Robert
Gravier, 13100 AIX EN PROVENCE (FR).

(22) Date de dépôt international :

13 juin 2024 (13.06.2024)

(74) Mandataire : CABINET NONY ; 11 rue Saint-Georges,
75009 PARIS (FR).

(25) Langue de dépôt :

français

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

FR2306024 13 juin 2023 (13.06.2023) FR

(54) Title: HEAT-GENERATING NUCLEAR REACTOR WITH LIQUID METAL COOLANT AND CORE COMPRISING COOLANT-SEALED TUBES EACH HOUSING "TRISO" NUCLEAR FUEL PARTICLES

(54) Titre : REACTEUR NUCLEAIRE CALOGENE A CALOPORTEUR EN METAL LIQUIDE ET A CŒUR COMPRENANT DES TUBES ETANCHES AU CALOPORTEUR LOGEANT CHACUN DES PARTICULES DE COMBUSTIBLE NUCLEAIRE, DITES TRISO

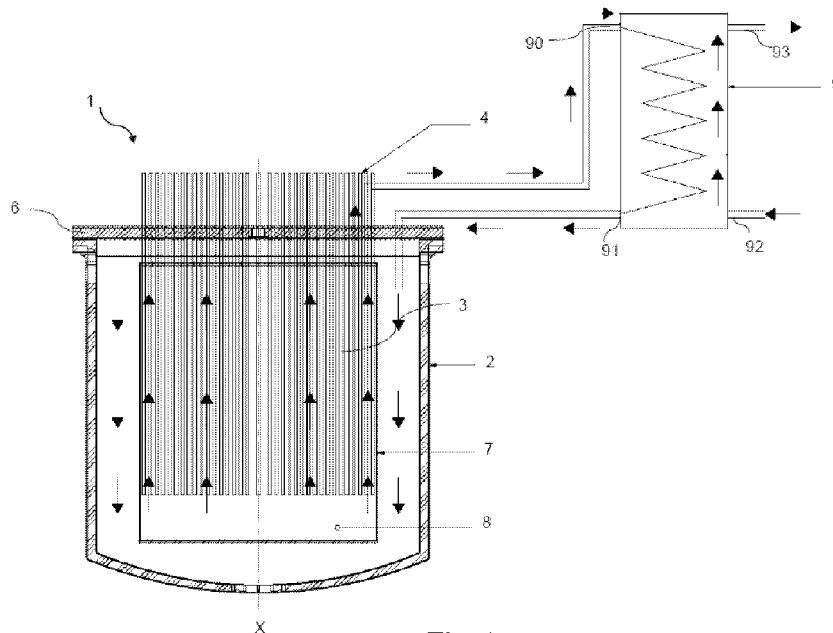


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a liquid-metal-cooled nuclear reactor (1), comprising a vessel (2), called primary vessel, which exhibits symmetry of revolution about a central axis (X), filled with a coolant containing at least one liquid metal as reactor primary circuit coolant, the vessel comprising a core (3) comprising a plurality of sealed and fixed hollow tubes (4), arranged parallel to the axis X such that, when the reactor is in operation, the liquid metal circulates in contact with their outer periphery, each hollow tube (4) housing a stack of fuel assemblies (5), housing TRISO nuclear fuel particles (50) mixed with a matrix (51).

[Suite sur la page suivante]



WO 2024/256546 A1

MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasienn (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
 - en noir et blanc ; la demande internationale telle que déposée était en couleur ou en échelle de gris et est disponible sur PATENTSCOPE pour téléchargement.
-

(57) Abrégé : L'invention concerne un réacteur nucléaire (1) refroidi par métal liquide, comprenant une cuve (2), dite cuve primaire, axisymétrique autour d'un axe central (X), remplie d'un fluide caloporteur à au moins un métal liquide en tant que fluide caloporteur du circuit primaire du réacteur, la cuve comprenant un cœur (3) comprenant une pluralité de tubes (4) creux, étanches et fixes, agencés parallèles à l'axe X de sorte qu'en fonctionnement du réacteur le métal liquide circule en contact avec leur périphérie extérieure, chaque tube creux (4) logeant un empilement d'assemblages combustibles (5), logeant des particules de combustible nucléaire (50), dites TRISO, mélangées à une matrice (51).

Description

Titre: Réacteur nucléaire calogène à caloporteur en métal liquide et à cœur comprenant des tubes étanches au caloporteur logeant chacun des particules de combustible nucléaire, dites TRISO.

5 **Domaine technique**

La présente invention concerne le domaine des réacteurs nucléaires à combustibles solides refroidis avec un(des) fluide(s) caloporteur(s) de type métal liquide, notamment avec du sodium liquide.

L'invention a ainsi pour objectif principal de fournir un réacteur nucléaire à vocation calogène qui fonctionne à basse pression, typiquement inférieure à 5 bars et qui est destiné à fournir une puissance thermique relativement élevée, de l'ordre de quelques dizaines à centaines de MWth.

En particulier, l'invention vise à réaliser un couplage principalement thermique entre un réacteur nucléaire et un site de production industrielle par exemple des installations chimiques pour la production d'ammoniac ou de carbonate de sodium.

Par « à vocation calogène », on entend ici et dans le cadre de l'invention, une installation nucléaire, une centrale nucléaire ou un réacteur nucléaire dont la puissance peut être dédiée majoritairement à la fourniture de chaleur. La puissance d'un réacteur à vocation calogène peut être à 100% pour fournir de la chaleur. Dans sa configuration calogène, une faible part de sa puissance peut tout de même servir à fournir de l'électricité.

Bien que décrite en référence à un réacteur nucléaire refroidi par du sodium liquide, l'invention peut s'appliquer à tout autre métal liquide, tel que le plomb, comme fluide caloporteur d'un circuit primaire de réacteur nucléaire.

Également, bien que décrite en référence à un réacteur à fonctionnement en spectre thermique, l'invention peut aussi s'appliquer aux réacteurs à spectres à neutrons rapides.

L'invention peut s'appliquer aux réacteurs de petite puissance ou SMR en anglais (acronyme de « Small Modular Reactor »), typiquement d'une puissance de fonctionnement inférieure ou égale à 150MWth.

Par « réacteur SMR », on entend ici et dans le cadre de l'invention, le sens technologique usuel, à savoir un réacteur nucléaire à fission, de taille et puissance plus faibles que celles des réacteurs conventionnels REP, qui est fabriqué en usine et transporté sur un site d'implantation nucléaire pour y être installé.

5 **Technique antérieure**

Un des sujets actuels de développements pour les réacteurs nucléaires concerne les réacteurs dits calogènes destinés à fournir une puissance thermique.

Parmi les différentes solutions technologiques existantes qui fournissent de la chaleur à partir d'une fission nucléaire, il est communément admis qu'à ce jour, les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont les plus adaptés pour fournir de la chaleur à relativement basse température.

Autrement dit, les REP sont ceux qui permettent de fournir immédiatement un niveau de puissance de quelques dizaines de MWth, à des fins principalement de fourniture de chaleur dite urbaine, c'est-à-dire dans des réseaux urbains, pour des villes/agglomérations de plusieurs centaines de milliers d'habitants.

Les réacteurs à eau bouillante (REB) ont pour vocation la production de vapeur dans un circuit primaire directement exploitée dans un groupe turbo-alternateur, afin de produire de l'électricité.

La chaleur industrielle, à des niveaux supérieurs à ceux requis pour la chaleur urbaine, en général supérieurs à 500 °C, représente aujourd'hui plus de 20 % de la demande d'énergie mondiale.

Plus précisément, le marché mondial de la chaleur s'élève à environ 57 000 TWh, dont environ la moitié provient de la demande industrielle, c'est-à-dire par des sites de production industrielle : [1].

Il est déjà admis que des solutions telles que les réacteurs SMR pourraient contribuer dans une certaine mesure à remplacer les 75 % de la chaleur industrielle alimentée par le pétrole, le charbon et le gaz naturel.

Outre leur simplicité d'usage et la compacité qui leur permettraient d'être transportables par voie terrestre, les réacteurs SMR candidats devront présenter une sûreté intrinsèque.

L'inventeur a fait le bilan des technologies matures existantes qui pourraient être mises en œuvre dans des réacteurs nucléaires SMR pour fournir de la chaleur à relativement haute température sur site à des industries difficiles à décarboner par l'électricité, telles que les installations de production d'ammoniac ou de carbonate de sodium.

- 5 Les réacteurs à haute température (ou HTR pour « High Temperature Reactor ») sont des réacteurs à spectre thermique, à modérateur graphite et refroidis par un fluide caloporteur dit « transparent » aux neutrons. Ils offrent la possibilité d'atteindre des hautes températures de fluide caloporteur, typiquement de l'ordre de 750°C à la sortie du cœur.

Dans les concepts récents, ce fluide caloporteur est l'hélium sous pression. Dans un autre concept récent, le démonstrateur de la société Kairos Power, nommé Hermès, il a été envisagé un caloporteur dit ionique constitué de sels fondus à base de sels de fluorure.

Dans un réacteur HTR, le combustible nucléaire mis en œuvre consiste en des particules dites TRISO (acronyme pour « TRIStructural ISOtrope »). Chacune des particules est formée d'un noyau en oxyde d'uranium revêtu de couches à base de composés carbonés qui servent de première barrière de confinement pour retenir les produits de fission. Les particules ont ainsi l'aspect de billes de 1 millimètre d'épaisseur environ. Elles sont compactées dans des matrices en graphite (appelées compacts ou boulets) de telle sorte que le caloporteur n'est pas en contact direct avec la première barrière de confinement.

L'architecture des réacteurs HTR est généralement de type à boucle, c'est-à-dire avec des échangeurs de chaleur entre circuits primaire et secondaire reliés au cœur par des connexions tubulaires, et met en œuvre des circulateurs fluides, i.e. les pompes, soufflantes, et des échangeurs de chaleurs vers les fluides du circuit secondaire, qui peuvent être de l'hélium, de l'eau sous pression, du CO₂ supercritique...

Dans les réacteurs HTR, le transfert thermique entre la première barrière de confinement et le caloporteur est assuré par conduction à travers les interfaces constituées par les matrices de graphite dans lesquelles les particules TRISO sont compactées.

Les réacteurs HTR présentent les avantages majeurs suivants :

- les particules de combustible TRISO mises en œuvre permettent d'accommoder des températures et pressions importantes en cas de situations incidentelles ou accidentelles.

Typiquement, la température des combustibles peut être supérieure à 1500°C et la pression interne du caloporteur (hélium) comprise entre 10 et 100 bars ;

- un spectre de neutrons peut être très thermique, ce qui entraîne un coefficient modérateur et Doppler élevé, typiquement égal à $-15\text{pcm}/^\circ\text{C}$, et donc conduit à une variation rapide de la puissance du réacteur lors de variations de la température au sein du graphite et/ou du combustible ;
- le cœur possède une forte inertie thermique du fait de la masse de graphite et permet donc de limiter les impacts des chocs thermiques, chauds ou froids ;
- combinés à une faible valeur de la puissance volumique, typiquement égale à $2\text{W}/\text{cm}^3$, les avantages précités entraînent l'élimination en pratique du risque d'accident grave, c'est-à-dire d'une fusion généralisée du cœur et d'une relocalisation du combustible fondu.

Les inconvénients majeurs des réacteurs HTR peuvent être résumés comme suit :

- comme mentionné, une valeur maximale de la puissance volumique qui est faible car en partie imposée par le respect de l'intégrité de la première barrière de confinement en cas de dépressurisation rapide du caloporteur gaz ;
- des risques de sureté résiduels qui sont liés aux risques de dispersion de matière radioactive en cas d'entrée d'air, i.e. des risques de feux de graphite ou d'eau (risques d'explosions vapeur suite à production d'hydrogène) ;
- un encombrement de la chaudière (cuve primaire) qui est relativement élevé du fait d'un caloporteur gaz primaire peu dense qui impose notamment une taille conséquente des composants pour l'extraction de la chaleur, et d'une configuration du circuit primaire à boucle qui implique un agencement étalé des composants dans plusieurs locaux disjoints ;
- un besoin d'électricité de puissance sur le site, typiquement de plusieurs dizaines de MWe en fonction de la puissance de la chaudière, qui est indispensable pour assurer le fonctionnement de l'installation, en particulier pour l'alimentation des circulateurs pour le gaz primaire ;
- un ratio puissance thermique produite / puissance électrique consommée pour la circulation du fluide primaire plus défavorable pour les HTR refroidis au gaz que pour les autres technologies de réacteurs, refroidis par des fluides incompressibles (eau, métaux liquides, etc.).

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR), refroidis au métal liquide, notamment au sodium (RNR-Na), et plus particulièrement ceux de quatrième génération fournissent également une chaleur à des niveaux de température compatibles avec les requis des sites de production industriels. Typiquement, les températures du sodium primaire en sortie du cœur sont de l'ordre de 550°C.

La filière des réacteurs à neutrons rapides a été développée pour permettre une meilleure gestion du combustible nucléaire, notamment par une gestion durable du stock de plutonium et par la capacité à valoriser l'inventaire de l'isotope 238 de l'uranium, isotope peu valorisable dans les réacteurs à neutrons thermiques.

Les réacteurs à neutrons rapides à combustible solide reposent sur une séparation physique entre le combustible solide et le caloporteur en métal liquide, par une enveloppe (crayon ou aiguille) formant une première barrière physique de confinement (gainage). Le combustible en lui-même est constitué de matériaux solides aux températures de fonctionnement visées (notamment sous la forme d'oxydes, de carbures de silicium (SiC) ou encore nitrures de matériaux fissiles ou bien directement sous forme d'alliage métallique). Les enveloppes sont assemblées en faisceaux et baignent avec l'ensemble des autres composants du circuit primaire (barres de matériau absorbant neutroniques, échangeurs, instrumentation) directement dans le caloporteur en métal liquide qui assure donc le transfert thermique.

La cuve d'un réacteur RNR est généralement conçue pour être suspendue à une dalle métallique elle-même reliée à un puits de cuve en génie civil.

Les avantages majeurs des réacteurs RNR refroidis au métal liquide, en particulier des RNR-Na, sont qu'ils permettent d'envisager la fermeture du cycle du combustible (possibilité de surgénération) et la gestion de certains déchets de haute activité à vie longue (américium, etc...) et qu'ils présentent une densité de puissance élevée, typiquement de l'ordre de 200 W/cm³.

Cependant, les RNR-Na connus présentent les inconvénients majeurs suivants :

- la nécessité d'une circulation du sodium en convection forcée en raison de la forte densité de puissance ;
- l'impossibilité d'éliminer tout risque d'accident de fusion du cœur, par conception (risques de perte de débit primaire global ou local, risques de remontée intempestive des barres d'absorbant neutronique, etc.)

- la nécessité de prévoir de nombreux équipements pour empêcher un accident de fusion du cœur ou limiter les conséquences associées ;
 - une physique du cœur complexe avec notamment un couplage important entre les effets thermiques et les caractéristiques géométriques du cœur ;
- 5 - du fait du spectre à neutrons rapides, la nécessité de protections neutroniques spécifiques (activation des structures, des produits de corrosions, du fluide secondaire etc.) ;
- du fait d'une puissance résiduelle du combustible élevée, la nécessité d'infrastructures spécifiques pour la manutention des assemblages combustibles (hottes sous gaz réfrigérées) ou leur stockage (stockage interne, barillet, piscines) ainsi que pour la manutention des
- 10 autres composants sodés (puits de lavage, traitement particulier de certains assemblages combustibles, des protections neutroniques supérieures si non étanches, etc.).

Il existe donc un besoin d'améliorer les réacteurs nucléaires à combustible solide refroidis au métal liquide ou au gaz, à vocation calogène à des fins de fourniture de chaleur pour des sites de production industrielle notamment afin de pallier les inconvénients précités.

- 15 Le but de l'invention est de répondre au moins en partie à ce besoin.

Exposé de l'invention

Pour ce faire, l'invention concerne, sous l'un de ses aspects, un réacteur nucléaire refroidi par métal liquide, comprenant une cuve, dite cuve primaire, axisymétrique autour d'un axe central (X), remplie d'un fluide à au moins un métal liquide en tant que fluide caloporteur

20 du circuit primaire du réacteur, la cuve comprenant un cœur comprenant une pluralité de tubes creux, étanches et fixes, agencés parallèles à l'axe X de sorte qu'en fonctionnement du réacteur, le métal liquide circule en contact avec leur périphérie extérieure, chaque tube creux logeant un empilement d'assemblages combustibles, logeant des particules de combustible nucléaire, dites TRISO, mélangées à une matrice.

- 25 Selon une variante de réalisation avantageuse, la matrice dans laquelle sont mélangées les particules TRISO est sous la forme d'un bloc compact.

Selon un mode de réalisation avantageux, le réacteur comprend une structure formant un redan, d'axe central confondu avec celui de la cuve primaire, la structure étant agencée dans la cuve primaire pour séparer l'intérieur de celle-ci en une zone centrale et une zone

30 périphérique de sorte qu'en fonctionnement du réacteur, le caloporteur à métal liquide, circule par convection naturelle, selon une boucle fermée depuis le bas de la zone centrale

où est agencé le cœur de réacteur au sein duquel les réactions de fission se produisent, à partir duquel il s'élève par échauffement, jusqu'au haut de la zone centrale où il entre par une entrée d'au moins un échangeur de chaleur à l'extérieur de la cuve de réacteur pour ressortir par une sortie de l'échangeur puis vers le haut de la zone périphérique pour
5 descendre vers le bas de la zone périphérique où il est dévié vers le cœur du réacteur.

Selon une configuration de fonctionnement en réacteur à spectre thermique, le cœur de réacteur loge au moins un matériau modérateur.

Le cœur du réacteur peut également comprendre un réflecteur en matériau modérateur agencé en dessous de chaque tube étanche.

- 10 Le cœur du réacteur peut comprendre également au moins deux blocs en matériau modérateur agencés autour de chaque tube étanche en laissant circuler le métal liquide autour et au contact de ce dernier.

Selon une variante de réalisation avantageuse, chaque tube étanche comprend une partie tubulaire borgne formant un doigt de gant dans lequel les assemblages combustibles sont
15 empilés au préalable du fonctionnement du réacteur.

Le métal liquide du caloporteur peut être choisi parmi le sodium (Na), le plomb (Pb) ou un alliage plomb-bismuth (Pb-Bi).

Le matériau de la matrice des particules TRISO et/ou du cœur peut être en graphite.

Le matériau constitutif des tubes étanches peut être une céramique.

- 20 Selon un autre mode de réalisation avantageux, le réacteur comprend un système de contrôle de la réactivité constitué soit par des barres de contrôle internes à la cuve primaire.

Dans le cadre de l'invention, on entend par « matériau modérateur », tout matériau qui permet de ralentir les neutrons. Au sens usuel, l'énergie cinétique d'un neutron rapide est supérieure à 1MeV, tandis que celle d'un neutron thermique est inférieure à 1eV,
25 typiquement de l'ordre de 0,025eV. On pourra se référer à la publication [2], et en particulier à la figure 4, qui indique, pour plusieurs types de réacteurs, la fraction thermique et la fraction rapide du flux neutronique.

Ainsi, l'invention consiste essentiellement en un réacteur nucléaire à caloporteur à métal liquide, notamment du sodium liquide, et d'un assemblage combustible solide sous la forme

de particules TRISO compactées dans une matrice empilé avec d'autres assemblages, dans des tubes étanches, qui séparent le combustible du flux de métal liquide.

Ainsi, le flux de métal liquide circule à l'extérieur d'une barrière étanche. Cela garantit une absence de contamination en fonctionnement normal du métal liquide, caloporteur primaire, par les produits de fission car deux barrières étanches indépendantes le séparent de la matière fissile contenue dans les particules TRISO.

La conception du réacteur selon l'invention permet en substance de combiner les avantages des réacteurs HTR et ceux des réacteurs RNR refroidis au métal liquide.

Plus particulièrement, la conception du réacteur selon l'invention permet d'augmenter significativement la densité de puissance des réacteurs HTR existants. En effet, la mise en œuvre d'un métal liquide à faible pression, typiquement de 1 à 2 bars, en remplacement de l'hélium sous pression, typiquement à 10 à 100 bars permet un fonctionnement normal du réacteur avec des températures de combustible plus élevées que celle des HTR existants, les particules TRISO pouvant supporter ces températures plus élevées.

Par ailleurs, la séparation physique entre le combustible des particules TRISO et le flux de métal liquide offre des avantages significatifs.

Tout d'abord, cela permet une manipulation simple du combustible (insertion dans les tubes étanches fixes), puisque l'assemblage n'est pas en contact avec le métal liquide et, par conséquent, il n'y a pas besoin d'opérations de nettoyage. De manière plus générale, le combustible, les barres de contrôle ainsi que l'essentiel de l'instrumentation constitué par des composants « consommables » ou ayant besoin de manière régulière d'un remplacement ou d'une inspection, sont positionnés dans une zone fluide distincte de celle du caloporteur primaire en métal liquide. Cette caractéristique permet une manutention de composants non pollués par le caloporteur en métal liquide afin de protéger l'essentiel des composants consommables de toute interaction avec le métal.

Typiquement, l'inventeur estime cette densité de puissance à environ 10 MW/m^3 avec du sodium liquide soit une valeur 5 fois supérieure à celle d'un réacteur HTR. Considéré parallèlement à la robustesse thermique des particules TRISO, cela permet un refroidissement par rayonnement lors de la manipulation du combustible irradié, même avec une puissance résiduelle élevée, immédiatement après l'arrêt de la réaction de fission. Compte tenu à la fois du coefficient d'échange thermique élevé du sodium liquide et de la

densité de puissance (bien inférieure à celle des réacteurs à neutrons rapides refroidis au métal liquide), le transfert thermique entre le combustible et le métal liquide peut être atteint par simple conduction thermique.

5 Le poids neutronique d'un assemblage combustible est faible, ce qui permet un ravitaillement en ligne simple, c'est-à-dire à pleine puissance, sans fortes perturbations neutroniques. Ce ravitaillement en ligne permet une disponibilité accrue du réacteur, et réduit les risques inhérents aux opérations de ravitaillement en réduisant la pression temporelle sur cette opération critique.

10 Les caractéristiques des particules TRISO permettent également d'obtenir un stockage à sec en racks, refroidis uniquement par ventilation, puis par rayonnement une fois mis en fûts, quelques semaines après le déchargement du cœur.

Au final, le réacteur selon l'invention peut fonctionner avec un métal liquide primaire sous faible pression et à température élevée, typiquement de l'ordre de 750°C en sortie du cœur pour du sodium liquide, ce qui permet au final de garantir au réacteur sa vocation calogène
15 à des fins de fourniture de chaleur pour des sites de production industrielle, par exemple des installations chimiques pour la production d'ammoniac ou de carbonate de sodium.

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.

20 **Brève description des dessins**

[Fig 1] la figure 1 est une vue schématique en coupe longitudinale d'un réacteur nucléaire refroidi au métal liquide selon l'invention, avec une configuration d'échangeur à boucle.

[Fig 1A] la figure 1A est une vue de détail de la figure 1, au niveau d'un tube étanche logeant des assemblages à particules TRISO entre deux blocs en matériau modérateur.

25 [Fig 2] la figure 2 est une autre vue en coupe transversale et en perspective d'un réacteur nucléaire refroidi au métal liquide selon l'invention, avec une configuration d'échangeur à boucle.

[Fig 2A] la figure 2A est une vue en perspective montrant l'insertion d'un assemblage à particules TRISO au niveau d'un tube étanche du cœur de la figure 2.

[Fig 3] la figure 3 est une vue en coupe transversale d'un cœur d'un réacteur nucléaire selon l'invention, montrant les agencements relatifs entre assemblages combustibles, tubes étanches, et blocs en matériau modérateur.

Description détaillée

5 Dans l'ensemble de la présente demande, les termes « vertical », « inférieur », « supérieur », « bas », « haut », « dessous » et « dessus » sont à comprendre par référence par rapport à une cuve primaire remplie d'un métal liquide d'un réacteur nucléaire selon l'invention, telle qu'elle est en configuration verticale de fonctionnement.

Les flèches symbolisent la circulation du sodium liquide primaire dans la cuve de réacteur
10 et dans l'échangeur entre circuit primaire et secondaire.

On a représenté en figures 1 à 3, un réacteur nucléaire refroidi au métal liquide et à combustibles sous la forme de particules TRISO selon l'invention.

Un tel réacteur 1 comporte une cuve primaire 2 ou cuve de réacteur remplie de sodium liquide, qui est un cylindre droit d'axe central X et à l'intérieur de laquelle est présent le
15 cœur 3 où sont implantés une pluralité de tubes étanches fixes 4 logeant des assemblages combustibles amovibles 5 à particules 50 de combustible TRISO, qui génèrent l'énergie thermique par les fissions du combustible. Le sodium liquide est donc le caloporteur du circuit primaire : il emmagasine et transporte la chaleur du cœur 3.

Comme montré à la figure 1A, chaque tube étanche fixe peut comprendre une partie tubulaire
20 borgne formant un doigt de gant dans lequel les assemblages combustibles 5 sont empilés au préalable du fonctionnement du réacteur. Le cas échéant, ils peuvent être remplacés pendant le fonctionnement du réacteur. L'agencement de chaque tube étanche 4 est tel que son ouverture par laquelle sont empilés les assemblages combustibles est à distance du métal liquide primaire.

25 Les combustibles nucléaires solides sont des assemblages 5 logeant des particules TRISO 50 compactées dans une matrice en matériau modérateur 51, de préférence en graphite. Chacune de ces particules est formée d'un noyau en oxyde d'uranium revêtue de couches à base de composés carbonés qui servent de première barrière de confinement pour retenir les produits de fission.

30 De manière optionnelle, une gaine 52, notamment en graphite peut entourer la matrice 51.

Comme visible également sur cette figure 3, on peut prévoir une configuration en anneau du compact 50, 51 et au centre de cette dernière un volume 53 vide ou rempli de gaz inerte, de préférence en hélium, à basse pression. Ce volume 53 permet de limiter la température à cœur du combustible et permet en outre d'accommoder les dilatations éventuelles de la matrice 51.

Chaque assemblage étanche 5 peut être à section transversale extérieure hexagonale (figure 2A) ou cylindrique (figure 3).

Le revêtement extérieur des particules TRISO constitue la principale barrière de confinement pour les matières radioactives contenues dans le cœur 3.

10 Une dalle de supportage 6 supporte la cuve primaire 2 ainsi que le poids du métal liquide du circuit primaire et des composants internes. Cette dalle 6 est agencée à l'aplomb du cœur 3 et vient fermer la cuve primaire 2 pour contenir le métal liquide, assurer le rôle de barrière entre ledit métal liquide et le milieu extérieur.

15 La cuve de réacteur 2 est séparée en deux zones distinctes par une structure de séparation constituée d'au moins une virole 7 agencée à l'intérieur de la cuve réacteur 2. Ce dispositif de séparation est également connu sous l'appellation de redan.

20 Comme symbolisé par les flèches en figure 1, le redan 7 est agencé dans la cuve primaire 2 en formant une cheminée centrale, pour séparer l'intérieur de la cuve primaire 10 en une zone centrale et une zone périphérique de sorte qu'en fonctionnement du réacteur, le métal liquide circule par convection naturelle selon une boucle depuis le bas de la zone centrale où est agencé le cœur de réacteur 3 au-dessus d'un sommier 8, à partir duquel il s'élève par échauffement jusqu'au haut de la zone centrale où il entre par une entrée 90 d'au moins un échangeur de chaleur 9 à l'extérieur de la cuve de réacteur 2 pour ressortir par une sortie de l'échangeur 91 puis vers le haut de la zone périphérique pour descendre vers le bas de la zone périphérique où il est dévié vers le cœur 3.

25 Ainsi, en fonctionnement normal, le métal liquide primaire circule donc uniquement en convection naturelle dans la cuve de réacteur 2 en boucle fermée à travers au moins un échangeur 9 et échange sa chaleur au sein de celui-ci avec un fluide secondaire qui entre froid par l'entrée 92 et ressort chaud par sa sortie 93. Typiquement, la température du fluide 30 secondaire à la sortie 93 peut être égale à 700°C.

La forme du redan 7 permet d'améliorer la circulation par convection naturelle du métal liquide.

Le réacteur 1 comprend un système de contrôle de la réactivité non représenté qui peut être constitué par des barres de contrôle internes à la cuve primaire 2.

- 5 La cuve de réacteur 2 comprend un ciel, usuellement appelé ciel de pile, qui peut être rempli d'un gaz inerte, tel que de l'argon ou encore de l'hélium, au-dessus du métal liquide. Ce ciel permet d'une part d'absorber la dilatation thermique du métal liquide au sein de la cuve de réacteur, lorsqu'il subit une variation de niveau, et d'autre part, de récupérer les produits de fission gazeux générés par les fissions nucléaires au sein des combustibles.
- 10 Un agencement avantageux d'un tube étanche 4 logeant un empilement des assemblages combustibles 5 est montré à la figure 1A. Le tube étanche 4, de préférence en céramique, est agencé entre au moins deux blocs en matériau modérateur 20, de préférence en graphite. Cet agencement permet au métal liquide primaire de circuler autour et au contact du tube étanche dans un espace E bien défini.
- 15 Un réflecteur 21 en matériau modérateur, de préférence en graphite, peut être agencé en dessous d'un tube étanche 4.

Un agencement avantageux est montré à la figure 3 pour des tubes étanches 4 et assemblages combustibles 5 à section transversale cylindrique droite. Un tube 4 est agencé entre deux blocs 20 en matériau modérateur, de préférence en graphite, agencés côte-à-côte en laissant
20 un espace e entre eux et un espace plus grand E dans lesquels le métal liquide circule lors du fonctionnement du réacteur.

Comme visible également sur cette figure 3, on peut prévoir un volume de remplissage d'un gaz inerte, de préférence de l'hélium, entre un assemblage combustible 5 et l'intérieur du tube étanche 5 afin d'améliorer l'interface thermique pour la conduction thermique de la
25 chaleur dégagée par la fission des particules TRISO.

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.

D'autres variantes et modes de réalisation peuvent être envisagés sans pour autant sortir du
30 cadre de l'invention.

On peut envisager d'autres métaux liquides que le sodium pour le fluide primaire : il peut s'agir du plomb (Pb) ou d'un alliage plomb-bismuth (Pb-Bi).

On peut également envisager d'autres matériaux que le graphite pour la matrice des particules TRISO et/ou du cœur par exemple l'aluminium.

- 5 Comme montré à la figure 2, le réacteur 1 peut comprendre une enceinte étanche 10, en béton pour loger la cuve primaire 2.

Liste des références citées

- [1]: "*High-temperature gas-cooled reactors and industrial heat applications*", NEA No. 7629, OECD, Paris, 2022.
- 10 [2]: Jiri Krepel et al. "*Self-Sustaining Breeding in Advanced Reactors: Characterization of Selected Reactors*", Encyclopedia of Nuclear Energy 2021, Pages 801-819. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197257001239?via%3Dihub>

Revendications

1. Réacteur nucléaire (1) refroidi par métal liquide, comprenant une cuve (2), dite cuve primaire, axisymétrique autour d'un axe central (X), remplie d'un fluide caloporteur à au moins un métal liquide en tant que fluide caloporteur du circuit primaire du réacteur, la cuve
5 comprenant un cœur (3) comprenant une pluralité de tubes (4) creux, étanches et fixes, agencés parallèles à l'axe X de sorte qu'en fonctionnement du réacteur le métal liquide circule en contact avec leur périphérie extérieure, chaque tube creux (4) logeant un empilement d'assemblages combustibles (5), logeant des particules de combustible nucléaire (50), dites TRISO, mélangées à une matrice (51).
- 10 2. Réacteur nucléaire (1) selon la revendication 1, la matrice dans laquelle sont mélangées les particules TRISO étant sous la forme d'un bloc compact.
3. Réacteur nucléaire (1) selon l'une des revendications 1 ou 2, comprenant une structure formant un redan (7), d'axe central confondu avec celui de la cuve primaire, la structure étant agencée dans la cuve primaire pour séparer l'intérieur de celle-ci en une zone centrale
15 et une zone périphérique de sorte qu'en fonctionnement du réacteur, le caloporteur à métal liquide, circule par convection naturelle, selon une boucle fermée depuis le bas de la zone centrale où est agencé le cœur du réacteur au sein duquel les réactions de fission se produisent, à partir duquel il s'élève par échauffement, jusqu'au haut de la zone centrale où il entre par une entrée (90) d'au moins un échangeur de chaleur (9) à l'extérieur de la cuve
20 de réacteur pour ressortir par une sortie de l'échangeur (91) puis vers le haut de la zone périphérique pour descendre vers le bas de la zone périphérique où il est dévié vers le cœur du réacteur.
4. Réacteur nucléaire (1) selon l'une des revendications précédentes, le cœur de réacteur logeant au moins un matériau modérateur.
- 25 5. Réacteur nucléaire (1) selon la revendication 4, le cœur du réacteur comprenant un réflecteur en matériau modérateur agencé en dessous de chaque tube étanche.
6. Réacteur nucléaire (1) selon la revendication 4 ou 5, le cœur du réacteur comprenant au moins deux blocs en matériau modérateur agencés autour de chaque tube étanche en laissant circuler le métal liquide autour et au contact de ce dernier.

7. Réacteur nucléaire selon l'une des revendications précédentes, chaque tube étanche comprenant une partie tubulaire borgne formant un doigt de gant dans lequel les assemblages combustibles sont empilés au préalable du fonctionnement du réacteur.
8. Réacteur nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le métal liquide du caloporteur étant choisi parmi le sodium (Na), le plomb (Pb) ou un alliage plomb-bismuth (Pb-Bi).
9. Réacteur nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le matériau de la matrice des particules TRISO et/ou du cœur étant en graphite.
10. Réacteur nucléaire selon l'une des revendications précédentes, le matériau constitutif des tubes étanches étant une céramique.
11. Réacteur nucléaire (1) selon l'une des revendications précédentes, comprenant un système de contrôle de la réactivité constitué soit par des barres de contrôle internes à la cuve primaire.

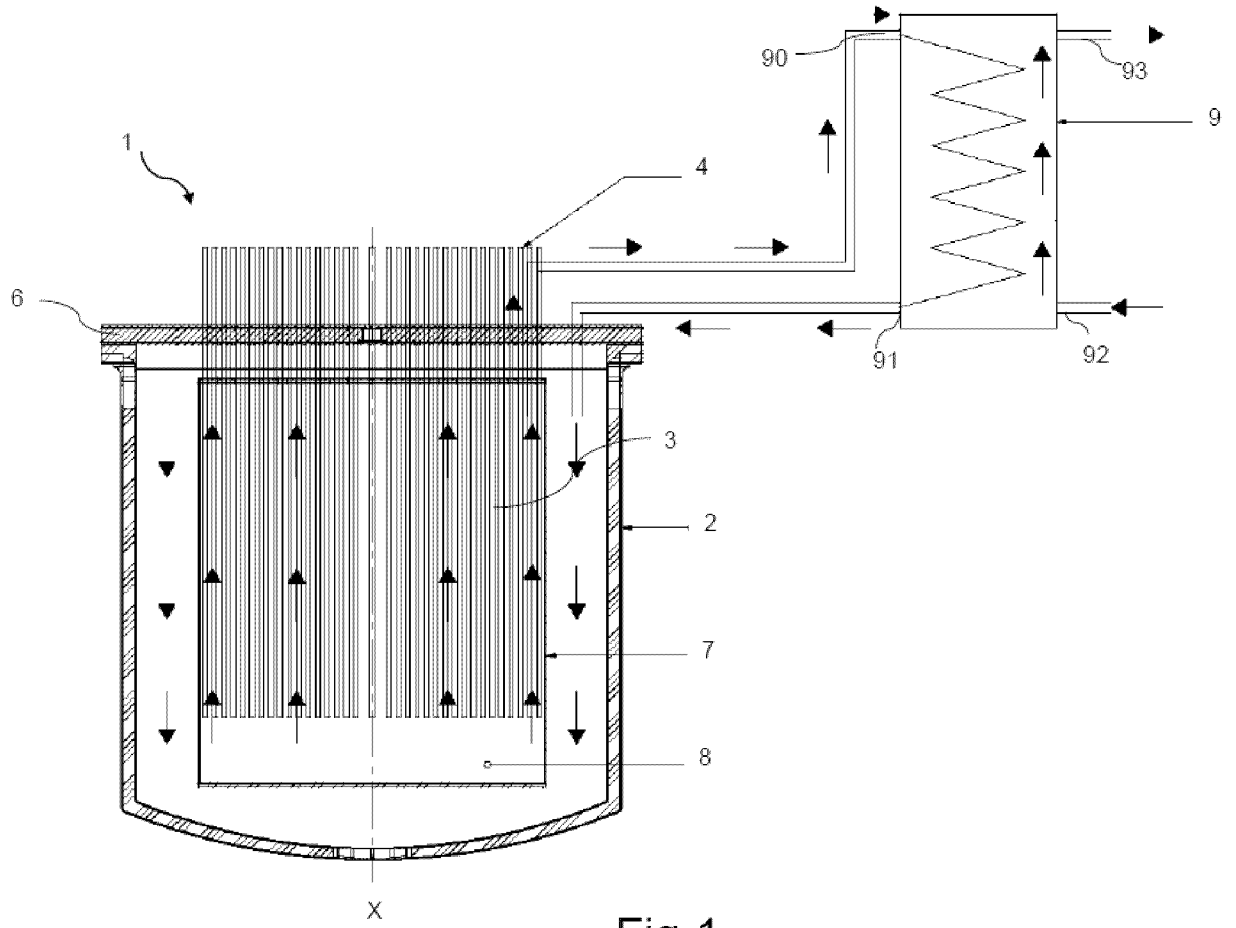


Fig.1

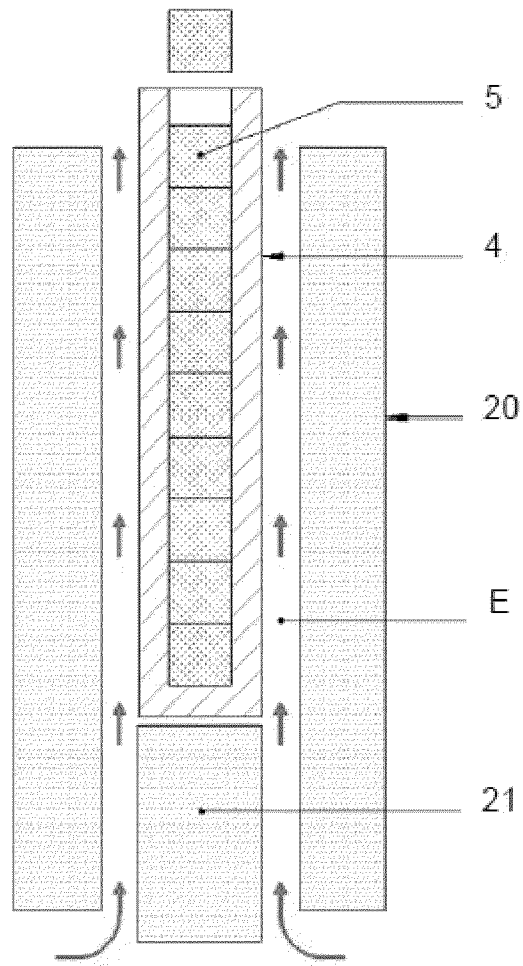


Fig. 1A

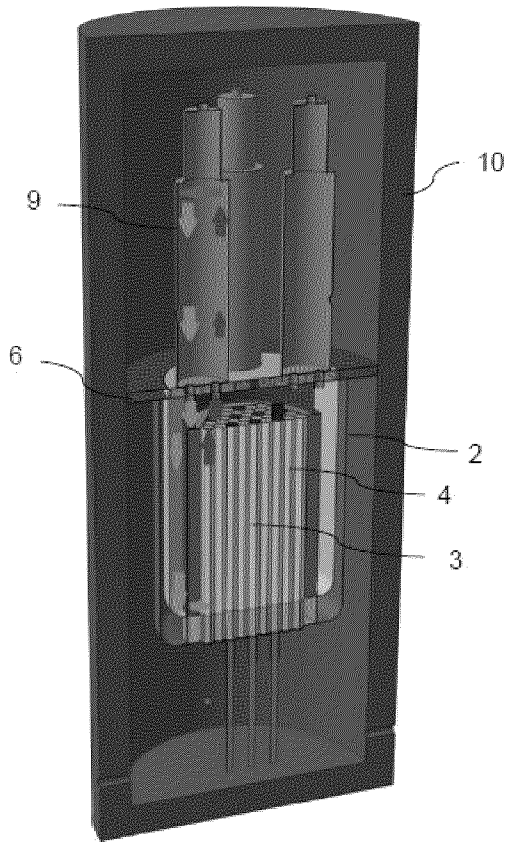


Fig.2

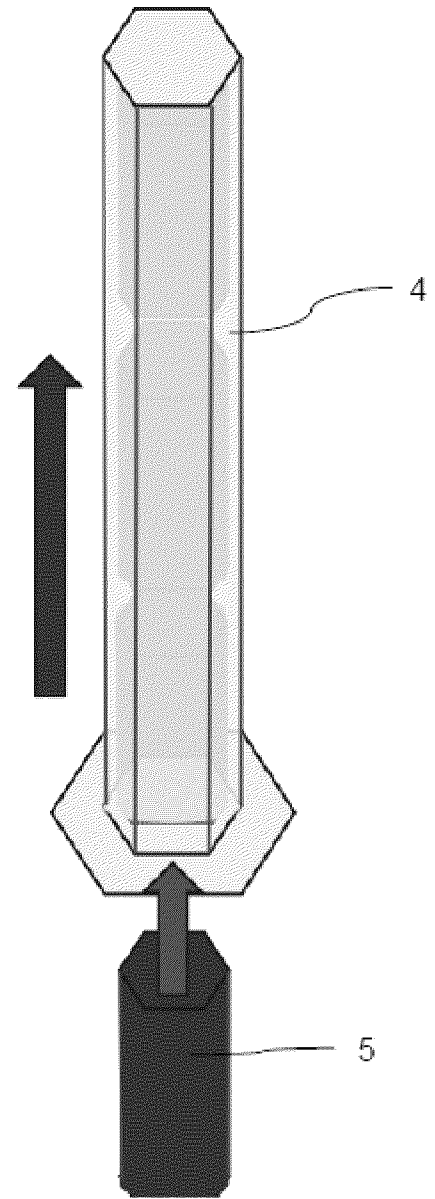


Fig.2A

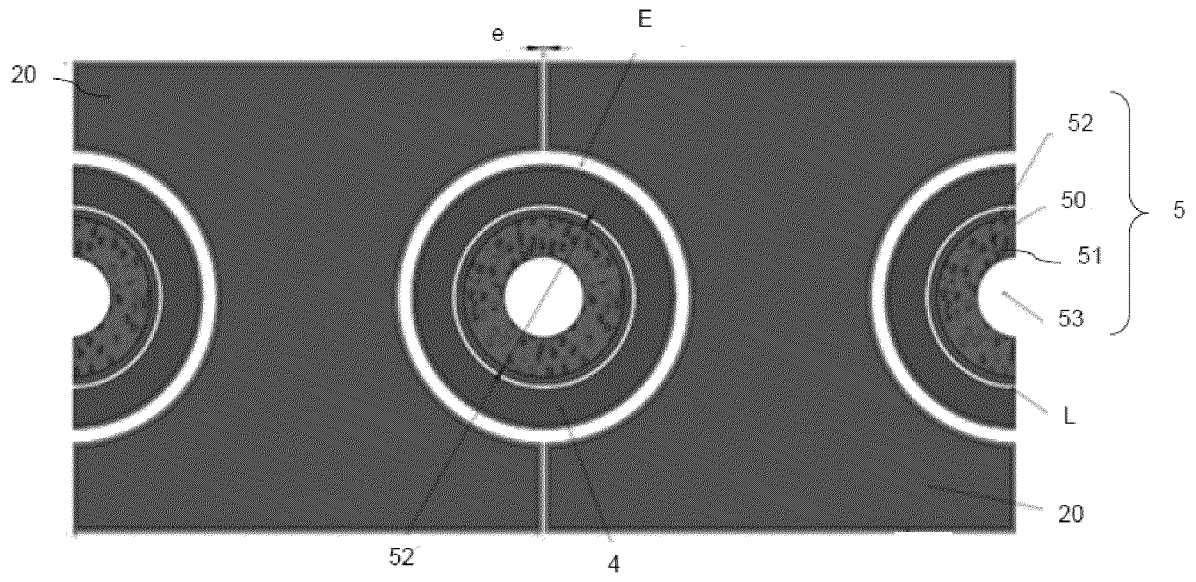


Fig.3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/066378

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>G21C 1/16</i> (2006.01)i; <i>G21C 3/28</i> (2006.01)n; <i>G21C 3/62</i> (2006.01)n; <i>G21C 5/12</i> (2006.01)n; <i>G21C 15/04</i> (2006.01)n; <i>G21C 15/26</i> (2006.01)n; <i>G21D 9/00</i> (2006.01)n		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G21C; G21D		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	CN 216528052 U (MIDDLE GUANGDONG NUCLEAR RES INSTITUTE LIMITED COMPANY ET AL.) 13 May 2022 (2022-05-13) paragraphs [0029] - [0043]; figures 1-3	1,2,4,6,8-10 3,5,7,11
X A	US 11495363 B2 (BWXT ADVANCED TECH LLC [US]) 08 November 2022 (2022-11-08) figures 1-10 column 1, line 31 - line 37 column 4, line 19 - line 25 column 5, line 66 - column 6, line 48 column 7, line 53 - column 8, line 7	1,2,4-9,11 3,10
X A	DULERA I V ET AL. "High temperature reactors" <i>JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS, ELSEVIER B.V, NETHERLANDS</i> , Vol. 383, No. 1-2, 15 December 2008 (2008-12-15), pages 183-188, [retrieved on 2008-09-24] ISSN: 0022-3115, XP025675257 section 3; figures 1-3; table 2	1-5,7-11 6
X A	CN 116230261 A (UNIV SHANGHAI JIAOTONG) 06 June 2023 (2023-06-06) paragraphs [0030] - [0033], [0036], [0045]; claims 1-10; figures 1-3	1,2,4-6,8,11 3,7,9,10
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 23 July 2024		Date of mailing of the international search report 06 August 2024
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands (Kingdom of the) Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Grivas, Symeon Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2024/066378

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	216528052	U	13 May 2022	NONE			
US	11495363	B2	08 November 2022	US	2020373027	A1	26 November 2020
				WO	2020223604	A1	05 November 2020
CN	116230261	A	06 June 2023	NONE			

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2024/066378

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G21C1/16 ADD. G21C3/28 G21C3/62 G21C5/12 G21C15/04 G21C15/26 G21D9/00 Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB				
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G21C G21D				
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche				
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO- Internal				
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS				
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées		
X	CN 216 528 052 U (MIDDLE GUANGDONG NUCLEAR RES INSTITUTE LIMITED COMPANY ET AL.) 13 mai 2022 (2022-05-13)	1, 2, 4, 6, 8-10		
A	alinéas [0029] - [0043]; figures 1-3 -----	3, 5, 7, 11		
X	US 11 495 363 B2 (BWXT ADVANCED TECH LLC [US]) 8 novembre 2022 (2022-11-08)	1, 2, 4-9, 11		
A	figures 1-10 colonne 1, ligne 31 - ligne 37 colonne 4, ligne 19 - ligne 25 colonne 5, ligne 66 - colonne 6, ligne 48 colonne 7, ligne 53 - colonne 8, ligne 7 ----- -/-	3, 10		
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;"><input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</td> <td style="width: 50%; border: none;"><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</td> </tr> </table>			<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe			
* Catégories spéciales de documents cités:				
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention			
"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date	"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément			
"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)	"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier			
"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens	"&" document qui fait partie de la même famille de brevets			
"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée				
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale			
23 juillet 2024	06/08/2024			
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Fonctionnaire autorisé Grivas, Symeon			

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	DULERA I V ET AL: "High temperature reactors", JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS, ELSEVIER B.V, NETHERLANDS, vol. 383, no. 1-2, 15 décembre 2008 (2008-12-15), pages 183-188, XP025675257, ISSN: 0022-3115 [extrait le 2008-09-24]	1-5,7-11
A	section 3; figures 1-3; tableau 2 -----	6
X	CN 116 230 261 A (UNIV SHANGHAI JIAOTONG) 6 juin 2023 (2023-06-06)	1,2,4-6, 8,11
A	alinéas [0030] - [0033], [0036], [0045]; revendications 1-10; figures 1-3 -----	3,7,9,10

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2024/066378

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CN 216528052	U	13-05-2022	AUCUN	

US 11495363	B2	08-11-2022	US 2020373027 A1	26-11-2020
			WO 2020223604 A1	05-11-2020

CN 116230261	A	06-06-2023	AUCUN	
