

⑫ **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

⑲ Numéro de dépôt: 84402629.4

⑤① Int. Cl.<sup>4</sup>: **F 22 B 1/06**  
**F 01 K 3/18**

⑳ Date de dépôt: 18.12.84

③① Priorité: 21.12.83 FR 8320469

④③ Date de publication de la demande:  
03.07.85 Bulletin 85/27

⑧④ Etats contractants désignés:  
BE DE GB IT NL

⑦① Demandeur: **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE**  
**Etablissement de Caractère Scientifique Technique et**  
**Industriel**  
**31/33, rue de la Fédération**  
**F-75015 Paris(FR)**

⑦② Inventeur: **Tilliette, Zéphyr**  
**71, Avenue J.B. Clément**  
**F-92140 Clamart(FR)**

⑦④ Mandataire: **Mongrédien, André et al,**  
**c/o BREVATOME 25, rue de Ponthieu**  
**F-75008 Paris(FR)**

⑤④ **Générateur de vapeur sodium-eau à tubes concentriques droits et à circulation de gaz dans l'espace annulaire.**

⑤⑦ **Générateur de vapeur sodium-eau à tubes concentriques droits et à circulation de gaz dans l'espace annulaire.**

Il comprend une enveloppe (40), une première et une seconde plaques à tubes (50, 52) délimitant une chambre d'évacuation du fluide intermédiaire ; un faisceau de tubes externes (72) raccordés à la plaque à tubes (50), un tube (70) interne étant disposé dans chaque tube externe, un métal liquide circulant à l'extérieur des tubes externes (72), une chambre d'admission (68) pour l'eau, qui est introduite dans les tubes internes (70), une chambre d'évacuation (58) pour la vapeur, une chambre d'admission (64) pour le fluide intermédiaire. Ce fluide circule entre les tubes internes (70) et les tubes externes (72). La chambre d'évacuation (60) du fluide intermédiaire est reliée à l'entrée d'un échangeur de chaleur (30) qui le refroidit. La chambre d'admission (64) du fluide intermédiaire est reliée à la sortie de cet échangeur (30).

Application aux réacteurs nucléaires refroidis par un métal liquide.

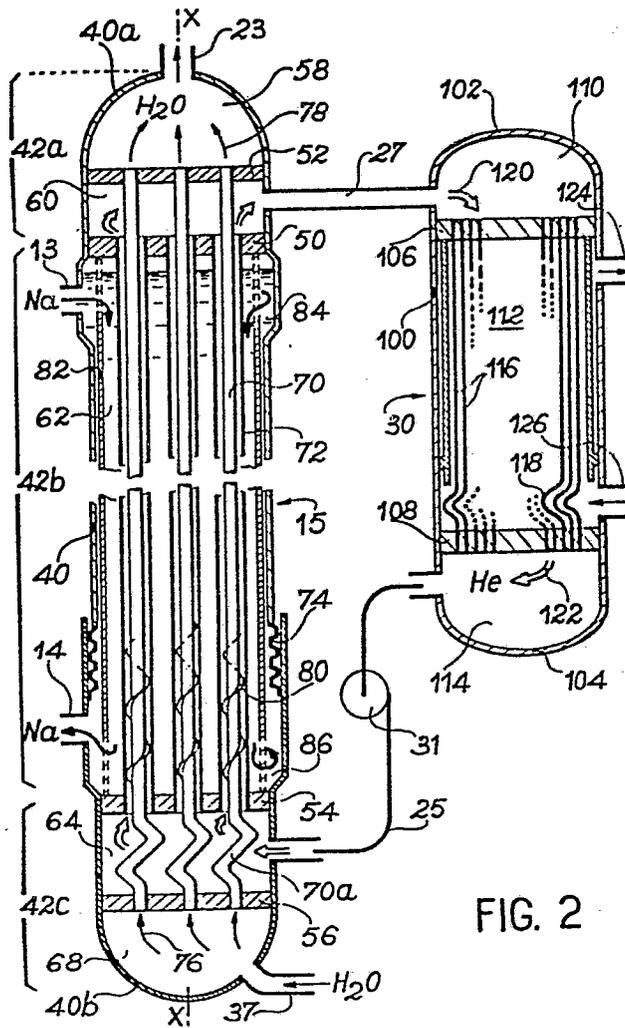


FIG. 2

Générateur de vapeur sodium-eau à tubes concentriques droits et à circulation de gaz dans l'espace annulaire.

5 L'invention concerne un générateur de vapeur pour le transfert indirect de chaleur entre un premier fluide constitué par un métal liquide et un deuxième fluide constitué par de l'eau, au moyen d'un fluide intermédiaire, le générateur de vapeur comprenant :

- 10 - une enveloppe présentant un axe longitudinal, ladite enveloppe comportant une zone d'échange de chaleur entre le premier et le second fluides et une première et une seconde zones d'admission-évacuation pour ces fluides, les première et seconde zones étant situées de part et d'autre de la zone d'échange ;
- 15 - un faisceau de tubes dits "tubes externes" raccordés à la première plaque à tubes, un tube dit "tube interne", étant disposé dans chaque tube externe coaxialement à celui-ci, une extrémité de chaque tube interne étant raccordée à la deuxième plaque à tubes,
- 20 - un orifice d'admission et un orifice d'évacuation étant prévus dans l'enveloppe pour le métal liquide, ce métal liquide circulant à l'extérieur des tubes externes,
- 25 - au moins une chambre d'admission pour l'eau, l'eau étant introduite dans les tubes internes,
- au moins une chambre d'évacuation pour la vapeur,
- 30 - au moins une chambre d'admission pour le fluide intermédiaire, ce fluide intermédiaire étant présent entre les tubes externes et internes,
- au moins une chambre d'évacuation pour le fluide intermédiaire.

35 On connaît déjà un échangeur de chaleur sodium-eau de ce type (FR-A-1 501 741). Dans cet échan-

geur, le métal liquide et l'eau sont séparés l'un de l'autre par un espace disposé pour contenir un fluide intermédiaire de transfert de chaleur.

L'échangeur comporte un fût cylindrique 30  
5 fermé à chacune de ses extrémités par une plaque à tubes épaisses 22, 25. Un fond bombé 41, 42 est accolé à chaque plaque à tubes. Des plaques à tubes intermédiaires 31 et 32 sont disposées dans le fût 30 entre les plaques 22 et 25. Un faisceau de tubes droits à  
10 double paroi s'étend entre les plaques 31 et 32. Le métal liquide, par exemple du sodium, circule extérieurement au faisceau des tubes à double paroi. La plaque à tubes 31 et la plaque 22 délimitent une chambre d'entrée pour le fluide intermédiaire. La plaque à  
15 tubes 32 et la plaque à tubes 25 déterminent une chambre d'évacuation pour ce fluide intermédiaire. Un raccord d'entrée 35 dans la chambre d'admission est fixé sur le fût. Un raccord d'évacuation 36 de sortie de la chambre d'évacuation du fluide intermédiaire est fixé  
20 à ce même fût. Le raccord d'entrée 35 est relié au réservoir d'un fluide de transfert de chaleur formant une barrière statique qui remplit l'intérieur des parties d'enveloppe 33, 34 ainsi que l'espace entre les tubes extérieurs 49 et les tubes intérieurs 46. Le  
25 raccord d'entrée 35 peut être utilisé pour ajuster le volume du fluide intermédiaire. Le raccord de sortie 36 est relié à un moyen de vidange convenable. Le fluide de transfert peut être un métal liquide, par exemple du sodium ou un mélange de sodium et de potas-  
30 sium, du plomb, du bismuth, du lithium ou un eutectique de plomb et de bismuth.

Cependant, dans un échangeur de ce type, le fluide intermédiaire est statique. Les échanges thermiques par convection étant pratiquement inexistants,  
35 l'échange de chaleur se fait essentiellement par con-

duction et il est nécessaire que le fluide intermédiaire possède une très bonne conductivité thermique. Par suite, le fluide intermédiaire est nécessairement un liquide, et de préférence, un métal liquide.

5 La présente invention a pour objet un générateur de vapeur du type métal liquide-eau comportant un fluide intermédiaire dynamique, un gaz au lieu d'un liquide.

10 De manière plus précise, le générateur de vapeur de l'invention est caractérisé en ce que le fluide intermédiaire circule entre les tubes internes et les tubes externes, la chambre d'évacuation du fluide intermédiaire étant reliée à l'entrée d'un petit échangeur de chaleur associé à ce générateur, la  
15 chambre d'admission du fluide intermédiaire étant reliée à la sortie de ce même échangeur. Le générateur de vapeur est également caractérisé en ce que le fluide intermédiaire est un gaz (ou un mélange de gaz) sous pression chimiquement neutre tel que l'hélium qui  
20 sépare efficacement le sodium de l'eau-vapeur et en ce que ce gaz circule activement et assure ainsi les transferts thermiques par convection.

Les avantages de l'invention sont nombreux et importants. Tout d'abord et en ce qui concerne la  
25 majeure partie de la puissance thermique échangée, le générateur de l'invention évite d'avoir recours à un circuit intermédiaire sodium-sodium. Il en résulte donc une simplification importante de l'installation nucléaire. Par ailleurs, il résout de manière satisfaisante la principale difficulté que l'on rencontre  
30 dans la réalisation d'un générateur de vapeur de ce type, à savoir la séparation du sodium et de l'eau de manière efficace. On sait en effet que l'eau et le sodium réagissent violemment l'un sur l'autre ; il est  
35 donc nécessaire de prévenir leur mélange. La présence

d'un gaz intermédiaire chimiquement pur et sous pression entre l'eau et le sodium constitue une barrière efficace. Le gaz n'entraîne pas une forte surépaisseur du tube qui le contient. Par ailleurs, la pression du gaz intermédiaire étant à peu près la moyenne entre celle du sodium et de la vapeur, il existe un étagement heureux pour la bonne utilisation des structures et des matériaux. Une fuite d'eau/vapeur, même significative, serait diluée et entraînée dans le circuit d'hélium qui est naturellement équipé d'un dispositif d'élimination d'eau de conception classique. En cas exceptionnel de fuite simultanée sur le tube d'hélium et sur le tube d'eau-vapeur correspondant, la dilution de cette eau-vapeur dans l'hélium soumis à une circulation intense serait telle que les effets sur le sodium seraient fortement atténués.

En ce qui concerne la transmission de chaleur, c'est la convection du fluide intermédiaire en circulation dans l'espace annulaire qui en est le facteur déterminant. Le coefficient de transmission de chaleur à travers cette paroi double se compare favorablement à celui des générateurs de vapeur à tubes à double paroi précontraints (Westinghouse, General Electric). A titre d'exemple, un générateur à tubes précontraints est décrit dans la revue "Nuclear Technology, vol 55, Nov. 1981". Cependant, la circulation du gaz intermédiaire implique un échange thermique extérieur car ce gaz emporte une puissance thermique de l'ordre de 6 à 7% de la puissance thermique totale. Cette énergie est efficacement utilisée comme complément de chauffage au cycle à vapeur et, plus particulièrement, à la resurchauffe de la vapeur moyenne pression après détente haute pression.

En outre, le générateur de vapeur de l'invention permet un piégeage des fuites d'eau sur le

circuit d'hélium et même son fonctionnement avec des fuites d'eau modérées. Ce concept à petite boucle extérieure permet de meilleures possibilités de réglage de puissance, de meilleures conditions de fonctionnement à charge partielle du réacteur.

Le "petit" circuit intermédiaire à circulation de gaz dispose de soufflantes à vitesse variable agissant sur le débit, de moyens de variation de pression et de dérivations de réglage par by-pass, ce qui est habituel sur de tels circuits. On peut donc l'adapter à tout niveau de fonctionnement et on dispose ainsi de moyens d'action souples complémentaires à ceux existant d'une part sur le circuit primaire de sodium et; d'autre part, sur le circuit eau-vapeur.

En ce qui concerne l'amélioration des conditions de fonctionnement à charge partielle, elle porte plus particulièrement sur la resurchauffe moyenne pression (resurchauffeur et entrée turbine HP). Dans le cas classique de resurchauffe par soutirage, les températures baissent à mesure que la charge diminue (diminution de la pression de soutirage). Dans l'invention, la vapeur HP resurchauffée est maintenue à une température à peu près constante par l'hélium, ce qui évite des transitoires thermiques et réduit sensiblement la diminution du rendement thermodynamique du cycle à vapeur.

Les sollicitations mécaniques et thermiques sont sensiblement atténuées en continu (vapeur HP à 12-14 MPa/400°C environ au lieu de 19 MPa/490°C) comme en transitoire (moindre efficacité thermique du gaz).

Le faisceau de tubes peut être réalisé avec des tubes de fabrication et de tolérance courantes. Ceci représente un net avantage par rapport aux tubes à double paroi à liaison mécanique par précontrainte qui nécessitent des tolérances spéciales, donc des tu-

bes beaucoup plus coûteux. Les matériaux employés sont courants et bien connus, en particulier en ce qui concerne le tube interne d'eau-vapeur pour lequel le fluage n'est pas à craindre à sa température de fonctionnement d'environ 400°C.

Selon une première réalisation le générateur de vapeur comporte quatre plaques à tubes situées deux par deux de part et d'autre de la zone d'échange thermique. A savoir, en partie haute du générateur, une première et une deuxième plaques et en partie basse une troisième et une quatrième plaques. La chambre d'admission du fluide intermédiaire est délimitée par la troisième et la quatrième plaques à tubes alors que la chambre d'évacuation du fluide intermédiaire est délimitée par la première et la seconde plaques à tubes. Les tubes externes sont raccordés aux première et troisième plaques à tubes, les tubes internes aux deuxième et quatrième plaques à tubes. Une canalisation d'admission du fluide intermédiaire étant raccordée à l'enveloppe dans la chambre d'admission ; une canalisation d'évacuation étant raccordée à l'enveloppe dans la chambre d'évacuation.

Selon une deuxième réalisation particulière, le générateur de vapeur comporte :

- une plaque à tubes dite "cinquième plaque à tubes", plus espacée axialement de la zone d'échange que la deuxième plaque à tubes, la cinquième plaque à tubes et la deuxième plaque à tubes délimitant une chambre d'évacuation de la vapeur,
- un premier et un deuxième tubes étant disposés à l'intérieur de chaque tube interne, le premier tube étant lui-même disposé à l'intérieur du deuxième tube, une extrémité du premier tube étant raccordée à une petite plaque à tubes, elle-même solidaire d'une boîte à eau, une extrémité de chaque deuxième tube

étant raccordée à la cinquième plaque à tubes, la deuxième extrémité des premier et deuxième tubes étant reliée de manière étanche de façon à déterminer une chambre annulaire qui contient un gaz, qui

5

peut être de l'air,

- chaque tube interne étant fermé sur son extrémité inférieure,

- chaque tube externe étant raccordé à une petite plaque à tubes, elle-même solidaire d'une boîte à hélium.

10

Un tel générateur de vapeur permet un meilleur ajustement entre les conditions de circulation et d'échange thermique concernant à la fois l'eau-vapeur et l'hélium, le fluide intermédiaire d'une part, le

15

fluide intermédiaire et le métal liquide d'autre part. Il permet de mieux adapter les diamètres des veines d'eau-vapeur et d'hélium. Par ailleurs, il permet une réduction de la longueur d'échange par l'augmentation des diamètres des tubes sodium-hélium et hélium-eau.

20

Dans une variante de réalisation, on prévoit des ailettes dans l'espace annulaire où circule le fluide intermédiaire, ce qui permet de réduire encore la longueur d'échange.

25

Enfin, point très important, chacun des tubes internes peut se dilater librement et individuellement comme dans la première réalisation, mais surtout dans cette configuration chaque tube externe sodium-gaz intermédiaire peut également se dilater librement et individuellement. Cette caractéristique

30

améliore la fiabilité fonctionnelle et mécanique du générateur de vapeur.

Les possibilités d'accès aux extrémités des tubes d'arrivée d'eau et d'hélium sont améliorées grâce à la présence des boîtes à eau et à hélium latérales (implantation de diaphragmes ou obturation de tubes fuitards).

35

L'invention est exposée ci-après plus en détail à l'aide de dessins représentant seulement un mode d'exécution :

5 - la figure 1 est une vue schématique de l'ensemble d'une installation de production d'électricité au moyen d'un réacteur nucléaire qui utilise un générateur de vapeur réalisé conformément à l'invention,

10 - la figure 2 est une vue schématique en coupe d'un premier mode de réalisation d'un générateur de vapeur de l'invention représenté avec un échangeur de chaleur associé pour le refroidissement du fluide intermédiaire,

15 - la figure 3 est une vue schématique en coupe verticale d'un autre mode de réalisation d'un générateur de vapeur réalisé conformément à l'invention,

20 - la figure 4 représente une section selon la ligne IV-IV de la figure 3 d'un tube à parois multiples du faisceau de tubes de l'échangeur de la figure 3,

- la figure 5 est une vue en coupe verticale du mode de réalisation du générateur de vapeur représenté sur les figures 3 et 4,

25 - la figure 6 est une vue schématique montrant un dispositif de refroidissement du réacteur à l'arrêt utilisant les avantages du circuit d'hélium.

On a représenté sur la figure 1 une vue d'ensemble d'une installation nucléaire comportant un réacteur nucléaire refroidi par un métal liquide, par exemple du sodium.

30 D'une manière classique, une chaudière nucléaire comme par exemple celle du réacteur français Super Phénix comporte un circuit de sodium primaire, qui comprend le coeur du réacteur et transporte la

35

chaleur que dégage ce dernier dans des échangeurs intermédiaires ; un circuit secondaire dont le but est d'éviter toute interaction entre le sodium primaire radioactif et l'eau-vapeur. Ce circuit secondaire transporte la chaleur des échangeurs intermédiaires jusqu'aux générateurs de vapeur. Enfin, la chaudière comprend un circuit eau/vapeur qui part des générateurs et alimente les groupes turbo-alternateurs.

Dans le cas de l'invention, le circuit de sodium secondaire n'existe pas. Le sodium primaire est introduit directement dans le générateur de vapeur dans lequel il transmet la majeure partie de sa chaleur (92-93%) à l'eau à vaporiser.

Comme représenté sur la figure 1, le coeur 10 est contenu dans une cuve 11 remplie d'un métal liquide tel que le sodium. La cuve 11 est logée dans un puits de cuve 12 en béton faisant partie du bâtiment réacteur 16. Des pompes 18 envoient le sodium primaire à l'intérieur des générateurs de vapeur. Dans l'exemple représenté, les générateurs de vapeur 15 sont répartis en quatre groupes de plusieurs générateurs de vapeur. Chacun des groupes de générateurs est alimenté par une pompe de sodium primaire 18. Après son passage dans les générateurs de vapeur, le sodium retourne à la cuve 11 pour repasser dans le coeur 10 et le cycle reprend.

L'eau pénètre dans le générateur de vapeur 15 à l'état liquide et en ressort à l'état de vapeur pour pénétrer dans la turbine 22 du groupe turbo-alternateur. Comme on le verra par la suite, l'eau peut être introduite soit à la base du générateur, soit à sa partie supérieure. La turbine 22 comprend un étage haute pression 22a, un étage moyenne pression 22b et un étage basse pression 22c. Elle entraîne un alternateur 24. La vapeur est envoyée par la canalisation 23

dans l'étage haute pression 22a. A la sortie de cet étage, elle est envoyée dans un sécheur 24 puis dans une resurchauffe moyenne pression 26 par soutirage vapeur. Conformément à une caractéristique de l'invention, la vapeur traverse ensuite une deuxième resurchauffe à moyenne pression 30 qui utilise la chaleur du fluide intermédiaire réchauffé dans le générateur de vapeur. La vapeur est ensuite dirigée vers l'étage moyenne pression 22b de la turbine par la canalisation 32, puis vers l'étage basse pression 22c par la canalisation 34. La vapeur est condensée dans le condenseur 35. Dans l'exemple représenté, un réfrigérant atmosphérique 38 constitue la source froide 35 associée au condenseur 35. L'eau de condensation retourne au générateur de vapeur par la canalisation 37. On remarque que, sur cette figure, la canalisation 37 aboutit à la partie supérieure du générateur. Elle pourrait toutefois être raccordée également à sa base.

L'installation comporte encore un circuit de gaz sous pression de faible puissance thermique (6 à 7% de la puissance totale). De préférence, ce gaz est de l'hélium. Ce choix présente plusieurs avantages : l'hélium est chimiquement neutre. Il ne réagit ni avec le sodium ni avec l'eau. Il n'exige pas l'emploi d'aciers différents de ceux couramment utilisés aux températures de fonctionnement élevées d'un générateur de ce type. Il possède de bonnes caractéristiques thermiques et thermodynamiques. Sa conductivité thermique est sensiblement plus élevée que celle de l'air ou du gaz carbonique, sa chaleur spécifique est plus de quatre fois supérieure à celle du sodium liquide, mais sa masse spécifique est 120 à 150 fois plus faible. L'hélium est utilisable à échelle industrielle. Son écoulement sollicite peu les structures. Dans le cas de son utilisation dans un échangeur auxi-

liaire placé dans une cuve de réacteur, on profite de l'avantage qu'il n'absorbe pas les neutrons.

L'hélium est introduit à la base du générateur de vapeur par la canalisation 25. Il ressort à sa  
5 partie supérieure. Il est amené au resurchauffeur moyenne pression 30 par la canalisation 27. Dans ce resurchauffeur 30, qui est l'échangeur extérieur associé au générateur 15, l'hélium cède la quantité de  
10 chaleur relativement faible qu'il a emmagasiné en traversant le générateur 15. L'hélium refroidi retourne au générateur de vapeur.

On a représenté sur la figure 2 un générateur de vapeur 15 réalisé conformément à l'invention, relié à un échangeur de chaleur 30 qui constitue un  
15 appareil qui apporte un complément de chaleur au cycle à vapeur, une resurchauffe de vapeur moyenne pression au moyen du petit circuit intermédiaire d'hélium. Le générateur de vapeur comporte une enveloppe 40 de forme longitudinale cylindrique à section droite et présentant un axe longitudinal X-X vertical. L'enveloppe  
20 est fermée à sa partie supérieure par un fond bombé 40a et à sa partie inférieure par un fond 40b. Elle est divisée en trois parties selon l'axe longitudinal, à savoir une zone d'échange de chaleur entre le premier et le second fluides, une première zone d'admission-  
25 évacuation pour ces deux fluides, et une seconde zone d'admission-évacuation pour ces mêmes fluides. Les zones d'admission-évacuation sont situées de part et d'autre de la zone d'échange. Par zone d'admission-  
30 évacuation, il faut entendre une zone dans laquelle les fluides sont introduits et/ou évacués.

Dans l'exemple de réalisation représenté, la référence 42a désigne la première zone d'admission-  
35 évacuation, située à la partie supérieure du générateur. La zone centrale d'échange est désignée par la

référence 42b. La deuxième zone d'admission-évacuation 42c est située à la base du générateur de vapeur. Dans un générateur tel que celui de l'invention, qui utilise trois fluides, il y a trois orifices d'admission et trois orifices d'évacuation pour ces fluides, soit au total six canalisations d'admission ou d'évacuation. Ces canalisations sont réparties entre les deux zones d'admission-évacuation 42a et 42c. Dans la réalisation représentée sur la figure 2, le sodium est amené par la canalisation 13 à la partie supérieure de la zone d'échange 42b. Il circule de haut en bas dans cette zone d'échange avant de ressortir à la partie inférieure par la canalisation 14 pour retourner vers le coeur du réacteur.

L'eau est amenée par la canalisation 37 à la partie inférieure du générateur de vapeur. La vapeur est évacuée par la canalisation 23 à la partie supérieure du générateur.

Le gaz intermédiaire, c'est-à-dire l'hélium, est amené à la base du générateur de vapeur dans la zone d'admission-évacuation 42c par la canalisation 25. L'hélium circule de bas en haut à contre courant par rapport au fluide chauffant qu'est le sodium. Il est évacué du générateur de vapeur dans la zone 42a. Il est conduit par la canalisation 27 à l'échangeur 30 dans lequel il est refroidi. L'hélium refroidi est introduit à nouveau à la base du générateur de vapeur après avoir été recomprimé par une soufflante 31.

Le volume intérieur délimité par l'enveloppe 40 est divisé en plusieurs chambres par des plaques épaisses en acier disposées perpendiculairement à l'axe longitudinal X-X de l'enveloppe et espacées axialement. Ces plaques délimitent des volumes intérieurs séparés les uns des autres. Ces plaques sont percées d'orifices répartis, dans lesquels sont fixés

des tubes. Dans l'exemple de réalisation représenté, le générateur comporte quatre plaques. Une première et une deuxième plaques à tubes sont disposées à la partie supérieure du générateur. La première plaque à tubes 50 constitue la limite entre la zone centrale d'échange 42b et la zone supérieure d'admission-évacuation 42a. La deuxième plaque à tubes 52 est située au-dessus de la première plaque 50.

A la partie inférieure du générateur, on trouve une troisième plaque 54 et une quatrième plaque 56. La plaque 54 constitue la limite entre la zone centrale d'échange 42b et la zone d'admission-évacuation 42c. La plaque 56 est située sous la plaque 54. La plaque 52 délimite avec le fond supérieur 40a de l'enveloppe 40 un volume intérieur 58. La plaque 50 et la plaque 52 espacées axialement délimitent entre elles un volume 60. La plaque 50 et la plaque 54 délimitent entre elles le volume 62 qui constitue la zone d'échange proprement dite. La plaque 54 et la plaque 56 délimitent entre elles un volume 64. Enfin, la plaque 56 délimite avec le fond inférieur de l'enveloppe un volume 68.

Le générateur de vapeur comporte également un faisceau de tubes répartis selon une section transversale. Plus précisément, le faisceau de tubes est constitué par deux séries de tubes, une série de tubes internes et une série de tubes externes disposés coaxialement. L'extrémité supérieure de chaque tube interne 70 est fixée à la plaque 52. Son extrémité inférieure est fixée à la plaque à tubes 56. L'extrémité supérieure de chaque tube externe 72 est fixée à la plaque à tubes 50. L'extrémité inférieure de chaque tube externe 72 est fixée à la plaque à tubes 54.

Le fait que les tubes du générateur sont droits conduit à des problèmes de dilatation différen-

tielle entre le faisceau de ces tubes et l'enveloppe externe du générateur. Ces problèmes sont résolus d'une part par la présence d'une zone de souplesse 70a sur les tubes internes 70. Cette zone est prévue dans  
5 la chambre 64. Par ailleurs, un soufflet de dilatation 74 est prévu sur l'enveloppe 40 pour compenser les différences de dilatation entre le faisceau de tubes externes et l'enveloppe.

L'eau est introduite dans la chambre 68 qui  
10 forme une boîte à eau à la partie inférieure du générateur par la canalisation 37 ; elle pénètre dans les tubes 70 dans lesquels elle circule de bas en haut (flèche 76) elle ressort des tubes 70 (flèche 78) sous forme de vapeur dans la chambre 58 qui constitue un  
15 collecteur d'évacuation.

Le fluide intermédiaire, à savoir l'hélium, est introduit dans la chambre 64 d'admission. L'hélium pénètre dans l'espace annulaire compris entre les tubes internes 70 et les tubes externes 72. Avantageusement et à titre d'exemple, un fil 80 est enroulé en spirale autour des tubes internes 70. Ce fil a une fonction de centrage du tube interne par rapport au tube externe. D'autre part, l'effet d'hélice qui en résulte allonge le parcours du fluide intermédiaire,  
20 augmente la turbulence et donc améliore l'échange de chaleur entre le gaz et respectivement le sodium et l'eau-vapeur. Ce dispositif peut être remplacé ou complété par des ailettes sur la surface extérieure du tube interne. L'hélium chaud est recueilli dans la  
25 chambre d'évacuation 60 avant d'être dirigé vers l'échangeur de chaleur 30.

Le sodium chaud est amené par la canalisation 13 à la partie supérieure de la zone d'échange 42b. Il est réparti autour de la virole interne 82 au  
35 moyen d'une chambre annulaire 84. Il franchit la viro-

le 82 à sa partie supérieure et circule de haut en bas entre les tubes externes 72. A la partie inférieure de la zone d'échange 42b, le sodium passe sous la virole 82 ; il est recueilli dans l'espace annulaire 86 avant  
5 d'être évacué hors du générateur par la canalisation 14.

L'échangeur de chaleur 30 est un échangeur de type classique. Il comporte une enveloppe externe 100 présentant un fond supérieur 102 bombé et un fond  
10 inférieur 104 également bombé. A l'intérieur de l'enveloppe 100 se trouvent une plaque à tubes supérieure 106 et une plaque à tubes inférieure 108. La plaque à tubes 106 délimite avec le fond 102 une chambre d'admission 110 pour l'hélium. La plaque à tubes 106 et la  
15 plaque à tubes 108 délimitent entre elles une zone d'échange de chaleur entre l'hélium et la vapeur moyenne pression provenant de la turbine. La plaque à tubes 108 délimite avec le fond 104 une chambre d'évacuation 114 pour l'hélium. A l'intérieur de l'envelop-  
20 pe 100, entre les plaques 106 et 108 se trouve un faisceau de tubes 116. Les tubes sont fixés à une extrémité à la plaque 106 et à l'autre extrémité à la plaque 108. Ils sont régulièrement répartis et comportent une zone de souplesse 118 destinée à compenser  
25 les dilatations différentielles. L'hélium pénètre à l'intérieur des tubes 116 (flèche 120). Il parcourt ces tubes de haut en bas et ressort à la partie inférieure de l'échangeur (flèche 122) dans la chambre d'évacuation 114. La vapeur est introduite à la partie  
30 inférieure de la zone d'échange par la canalisation 124. Elle circule entre les tubes de bas en haut et ressort à la partie supérieure de la zone d'échange par la canalisation 126. Cette description de l'échangeur 30 n'est donnée qu'à titre d'exemple car cet ap-  
35 pareil se prête à d'autres modes de réalisation.

On a représenté sur la figure 5 une vue en coupe verticale d'un deuxième mode de réalisation d'un générateur de vapeur conforme à l'invention et, sur les figures 3 et 4, une vue schématique qui donne le principe d'une cellule tubulaire élémentaire. La figure 4 est une vue en section selon la ligne IV-IV de la figure 3 de ce tube représenté à une échelle encore plus grande.

Le volume intérieur délimité par l'enveloppe 40 est divisé en plusieurs chambres par des plaques épaisses en acier disposées perpendiculairement à l'axe longitudinal XX de l'enveloppe et espacées axialement. Ces plaques délimitent des volumes séparés les uns des autres. Elles sont percées d'orifices répartis dans lesquels sont fixés des tubes.

Dans le cas du mode de réalisation représenté sur les figures 3 à 5, le générateur comporte trois plaques disposées selon une section transversale de l'enveloppe. Ces plaques sont respectivement la plaque 50, dite première plaque, à laquelle est fixée une extrémité des tubes externes 72, la plaque 52, dite deuxième plaque, à laquelle est fixée une extrémité des tubes internes 70 et une troisième plaque 130 plus espacée axialement de la zone centrale que les plaques 50 et 52. La plaque 130 est le fond supérieur du générateur. Elle est surmontée par un prolongement de l'enveloppe cylindrique 40. La plaque 130 et la plaque 52 déterminent entre elles une chambre 58 pour l'évacuation de la vapeur. La plaque 50 et la plaque 52 déterminent entre elles une chambre 60 d'évacuation de l'hélium. La première plaque 50 détermine avec le fond bombé 40b inférieur de l'enveloppe le volume 62 qui constitue la zone d'échange du générateur de vapeur.

Le générateur de vapeur comporte encore une ou plusieurs petites plaques à tubes 133. Ces plaques

beaucoup sont plus petites en diamètre que les plaques 50, 52 ou 130. En pratique il y a plusieurs plaques 133 identiques. Le plan de ces plaques est parallèle à l'axe longitudinal XX du générateur de vapeur. Elles sont situées à la partie supérieure de celui-ci sur la paroi latérale de l'enveloppe 40. Une boîte à eau 133a avec sa conduite d'arrivée 37 est fixée à chaque plaque 133.

Le générateur comporte encore des plaques à tubes 134 beaucoup plus petites en diamètre que les plaques 50, 52 ou 130. Elles sont situées à la partie inférieure du générateur et réparties sur la paroi de l'enveloppe 40. Une boîte à hélium 134a avec sa conduite d'arrivée d'hélium 25 est fixée à chaque plaque 134.

Dans cet exemple de réalisation, la zone d'admission-évacuation 42a située à la partie supérieure du générateur s'étend sensiblement selon son axe longitudinal jusqu'à la première plaque à tubes 50. L'eau est introduite dans cette zone. Le fluide intermédiaire, à savoir l'hélium et la vapeur, sont évacués dans cette zone. La zone centrale 42b d'échange s'étend pratiquement jusqu'au fond inférieur 40b de l'échangeur. Le sodium primaire est introduit à la partie supérieure de cette zone. La zone 42c d'admission-évacuation inférieure comporte l'admission d'hélium par la canalisation 25 et l'évacuation du sodium primaire par la canalisation 14.

La particularité de ce mode de réalisation qui se rattache au concept de tubes dits "à baïonnette" réside dans les moyens qui permettent d'amener depuis le haut du générateur de vapeur l'eau d'alimentation à l'extrémité inférieure de la zone d'échange. Alors que dans le mode de réalisation de la figure 2, ces moyens sont constitués par la plaque à tubes 56 et

la boîte à eau 68, disposées à la base du générateur de vapeur, dans le mode de réalisation des figures 3 à 5, l'eau est amenée depuis la partie supérieure du générateur de vapeur à la partie inférieure de chaque tube interne par un premier tube 135 entouré d'un second tube 136. Chaque tube 135 possède une première et une seconde extrémités. La première extrémité est fixée à la plaque à tubes 133 située à la partie supérieure latérale de l'enveloppe 40 du générateur. Chaque tube 136 présente une première et une seconde extrémité. La première extrémité est fixée à la plaque à tubes 130. La deuxième extrémité de chaque tube 136, située à la partie inférieure du générateur de vapeur, est reliée de manière étanche à la deuxième extrémité du tube 135 qu'il entoure. Les parois des tubes 135 et 136 délimitent un espace annulaire 138 débouchant à sa partie supérieure à l'air ambiant régnant au-dessus de la plaque 130. Cet espace annulaire est rempli d'un gaz stagnant qui constitue une isolation thermique efficace.

On a représenté sur la figure 4 une vue à échelle agrandie par rapport à la figure 3 en section d'un ensemble modulaire de tubes multiples du type plongeur dits "à baïonnette" présentés sur la figure 3. Cet ensemble comporte quatre tubes concentriques, respectivement de l'intérieur vers l'extérieur : le premier tube 135, le deuxième tube 136, le tube interne 70, le tube externe 72. Le tube double constitué par les premier et deuxième tubes 135 et 136 se dilate librement à ses deux extrémités. Il est centré dans la veine de vapeur par un fil hélicoïdal (non représenté) ou un autre moyen approprié. Le tube interne peut comporter des ailettes 70a qui ont pour but d'accroître l'échange de chaleur entre le gaz intermédiaire et la paroi du tube. La présence d'ailettes permet de rac-

courcir la longueur de la zone d'échange 42a. Par ailleurs, le diamètre du tube interne 70 étant plus important, la surface d'échange est accrue. Ceci constitue un autre facteur qui permet de réduire la longueur de la zone d'échange.

5 On a représenté sur la figure 5 une réalisation de l'échangeur conforme au principe exposé en référence aux figures 3 et 4, mais plus proche d'une réalisation réelle. Alors que sur la figure 3 on n'a  
10 représenté qu'un seul tube plongeur à parois multiples à échelle agrandie, afin de distinguer les quatre tubes qui le constituent, on a représenté sur la figure 5 plusieurs de ces tubes qui constituent le faisceau de l'échangeur. Le faisceau de tubes 136 est fixé à sa  
15 partie supérieure sur la plaque à tubes 130 ; le faisceau de tubes 70 est fixé à sa partie supérieure sur la plaque à tubes 52 ; le faisceau des tubes extérieurs 72 est fixé à sa partie supérieure sur la plaque à tubes 50 et, à sa partie inférieure aux petites  
20 plaques à tubes latérales 134. Deux de ces plaques ont été représentées sur la figure 5 mais, dans la pratique, elles pourraient être plus nombreuses.

Dans la réalisation de l'échangeur des figures 3 à 5, l'eau pénètre à la partie supérieure de  
25 l'échangeur, parcourt le premier tube selon le sens vertical, de haut en bas, contourne l'extrémité des premier et deuxième tubes (flèche 140 sur la figure 3). La veine de génération de vapeur est constituée par l'espace annulaire compris entre les tubes 70 et  
30 72. La vaporisation est ascendante. Comme dans le cas du premier mode de réalisation, l'évacuation de la vapeur se fait par le haut du générateur.

La lame d'air séparant le tube d'arrivée d'eau et la veine de vaporisation joue le rôle d'isolation thermique. La circulation du sodium est descen-  
35

dante et extérieure aux tubes à parois multiples. La circulation de l'hélium est ascendante.

Les avantages de ce mode de réalisation sont de permettre un meilleur ajustement entre les conditions de circulation et d'échange thermique concernant à la fois l'eau-vapeur et l'hélium d'une part, l'hélium et le sodium d'autre part. Il permet par ailleurs une réduction de la longueur d'échange en augmentant les diamètres des tubes sodium-hélium et surtout hélium-eau. Cela conduit à une réduction de la longueur d'échange. Cette longueur est encore réduite par la présence d'ailettes. Les tubes d'amenée d'eau, à savoir les tubes 135 peuvent se dilater librement et individuellement. Le tube interne 70 d'eau/vapeur fixé à une de ses extrémités à la plaque à tubes 52 et fermé à son autre extrémité, peut se dilater librement. Les tubes externes 72 raccordés individuellement aux plaques à tubes 134 par des coudes peuvent également se dilater librement et individuellement. Il en résulte une absence de contraintes de dilatation thermique différentielle entre chaque tube pris individuellement et entre le faisceau et l'enveloppe extérieure du générateur de vapeur. Ceci, compte tenu des propriétés d'échange thermique du sodium liquide permet d'adopter un écoulement longitudinal donc simple et non perturbateur de ce sodium liquide. Enfin, les possibilités de l'accès aux extrémités des tubes d'arrivée d'eau et d'hélium sont améliorées grâce à la configuration des boîtes à eau et à hélium latérales.

L'utilisation du gaz chimiquement neutre qu'est l'hélium peut s'étendre aux fonctions de refroidissement du réacteur à l'arrêt, c'est-à-dire pour le refroidissement du sodium primaire lorsque les pompes principales ne fonctionnent plus. A titre d'exemple parmi d'autres, le circuit intermédiaire d'hélium

du générateur de vapeur décrit dans l'invention est  
raccordé comme représenté sur la figure 6, à un échangeur  
150 dimensionné pour le refroidissement du réac-  
teur à l'arrêt et placé en dérivation sur la canalisa-  
5 tion 27 d'évacuation du fluide intermédiaire hors du  
générateur 15 et sur la canalisation d'admission 25 du  
fluide intermédiaire dans ce générateur. A la diffé-  
rence de cette solution qui repose sur l'utilisation  
en secours des générateurs de vapeur des boucles prin-  
10 cipales, on peut également envisager une dérivation du  
circuit intermédiaire d'hélium raccordé à un échangeur  
de chaleur 151 placé dans la cuve du réacteur. Ces  
deux solutions peuvent également être utilisées con-  
jointement et d'autres sont envisageables.

15 L'utilisation de l'hélium présente de nom-  
breux avantages pour cette fonction. Il est chimique-  
ment neutre, conduit à des coefficients d'échange de  
chaleur modérés, donc à des transitoires et des chocs  
thermiques moins sévères. Il ne s'active pas sous  
20 rayonnement neutronique, il se purifie facilement. Le  
rejet final de chaleur peut se faire sur de l'eau ou  
sur de l'air. Toutefois, l'échangeur sera plus compact  
dans le premier cas.

REVENDICATIONS

1. Générateur de vapeur pour le transfert indirect de chaleur entre un premier fluide constitué par un métal au moyen un deuxième fluide constitué par de l'eau, au moyen d'un fluide intermédiaire, le générateur de vapeur (15) comprenant :
- 5 - une enveloppe (40) présentant un axe longitudinal (XX), ladite enveloppe (40) comportant une zone (42b) d'échange de chaleur entre le premier et le  
10 second fluides et une première et une seconde zones d'admission-évacuation (42a, 42b) pour ces fluides, les première et seconde zones d'admission-évacuation étant situées de part et d'autre de la zone d'échange (42b), une première et une seconde plaques  
15 à tubes (50, 52) espacées axialement et délimitant une chambre d'évacuation du fluide intermédiaire étant disposées dans la première zone d'admission-évacuation ;
  - 20 - un faisceau de tubes dits "tubes externes" (72) étant raccordés à la première plaque à tubes (50), un tube (70) dit "tube interne", étant disposé dans chaque tube externe coaxialement à celui-ci, une extrémité de chaque tube interne (70) étant raccordée à la deuxième plaque à tubes (52),
  - 25 - un orifice d'admission et un orifice d'évacuation étant prévus dans l'enveloppe (40) pour le métal liquide, ce métal liquide circulant à l'extérieur des tubes externes (72),
  - 30 - au moins une chambre d'admission (68) pour l'eau, l'eau étant introduite dans les tubes internes (70),  
- au moins une chambre d'évacuation (58) pour la -  
vapeur,
  - 35 - au moins une chambre d'admission (64) pour le fluide intermédiaire, ce fluide intermédiaire étant présent entre le tube externe (72) et le tube interne (70),

caractérisé en ce que le fluide intermédiaire chimiquement compatible avec le premier et le second fluides est un gaz sous pression qui circule entre les tubes internes (70) et les tubes externes (72), la chambre d'évacuation (60) du fluide intermédiaire étant reliée à l'entrée d'un échangeur de chaleur (30) servant à refroidir ce gaz sous pression, la chambre d'admission (64) du fluide intermédiaire étant reliée à la sortie de cet échangeur (30).

10           2. Générateur de vapeur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le gaz sous pression est de l'hélium.

15           3. Générateur de vapeur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le gaz sous pression est un mélange de gaz sous pression compatible.

20           4. Générateur de vapeur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'échangeur de chaleur (30) est constitué par un appareil qui apporte un complément de chaleur au cycle à vapeur.

25           5. Générateur de vapeur selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'échangeur de chaleur (30) est un resurchauffeur de vapeur pour turbine à vapeur.

30           6. Générateur de vapeur selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la chambre d'admission pour le fluide intermédiaire est délimitée par une troisième et une quatrième plaques (54, 56) à tubes espacées axialement et situées dans ladite deuxième zone d'admission-évacuation (42c), les tubes externes (72) étant raccordés à ladite troisième plaque à tubes (54), les tubes internes (70) étant raccordés à la quatrième plaque à tubes (56), une canalisation (25) d'admission du fluide intermédiaire étant raccordée à l'enveloppe (40) dans ladite

35

deuxième zone d'admission-évacuation (42c) entre la troisième et la quatrième plaques à tubes.

7. Générateur de vapeur selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte :

- 5 - une plaque à tubes (130), dite "cinquième plaque à tubes", plus espacée axialement de la zone d'échange (42b) que la deuxième plaque à tubes (52), la cinquième plaque à tubes (130) et la deuxième plaque à tubes (52) délimitant une chambre (58) d'évacuation
- 10 de la vapeur,
- un certain nombre de cellules tubulaires élémentaires comportant chacune : un premier et un deuxième tubes (135, 136) étant disposés à l'intérieur de chaque tube interne (70), le premier tube (135)
- 15 étant lui-même disposé à l'intérieur du deuxième tube (136), une extrémité du premier tube (135) étant raccordée à une petite plaque à tubes latérale (133), elle-même solidaire d'une boîte à eau (133a), une extrémité de chaque deuxième tube (136) étant
- 20 raccordée à la cinquième plaque à tubes (130), la deuxième extrémité des premier et deuxième tubes étant reliée de manière étanche de façon à déterminer un espace annulaire (138) qui contient de l'air ambiant stagnant,
- 25 - chaque tube interne (70) étant fermé à son extrémité inférieure,
- chaque tube externe (72) étant raccordé à une petite plaque à tubes (134), elle-même solidaire d'une boîte à hélium (137a).

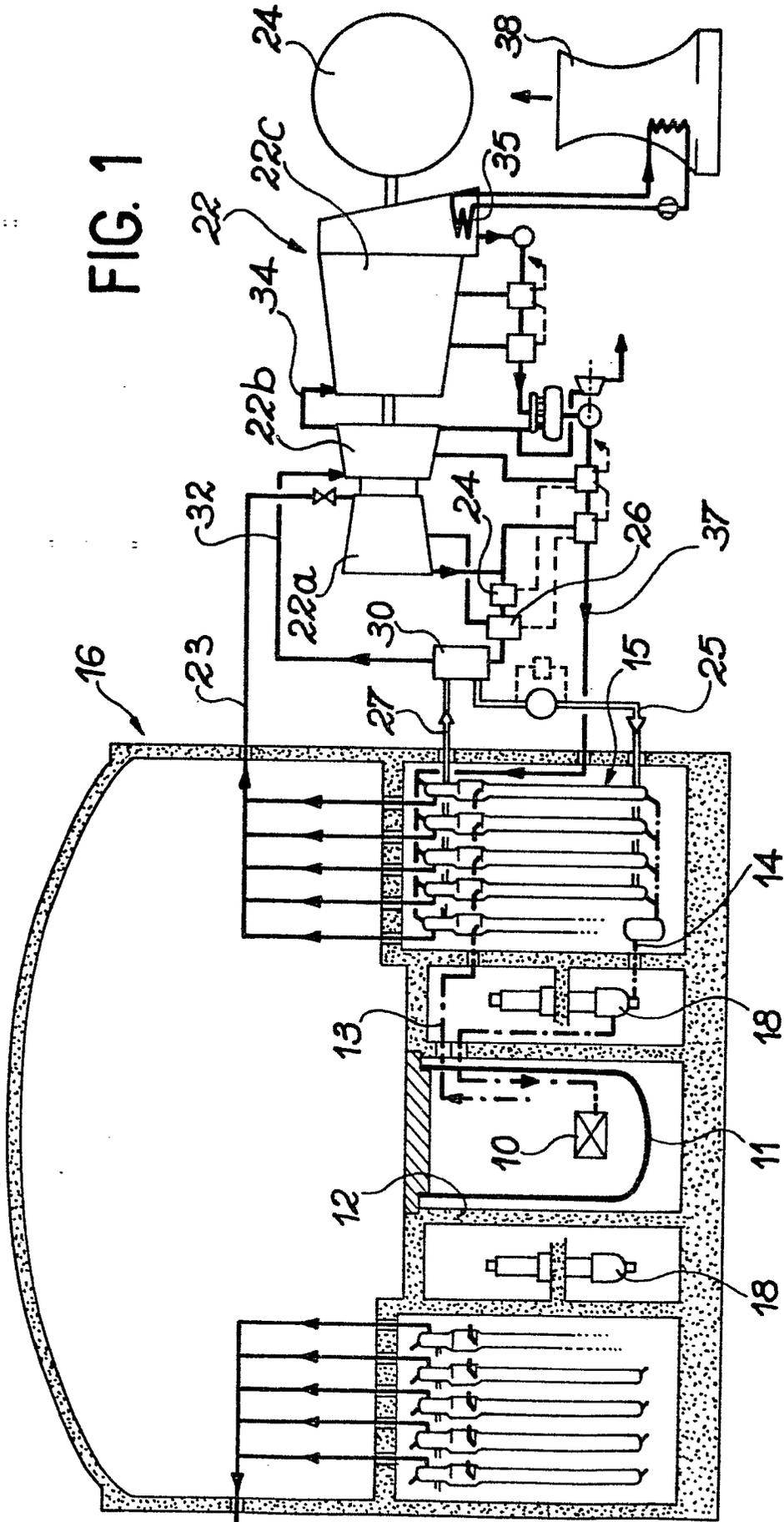
30 8. Générateur de vapeur selon la revendication 7, caractérisé en ce que le tube interne (70) est muni d'ailettes (70a).

35 9. Générateur de vapeur selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'un échangeur de chaleur (150) pour le refroidissement du

réacteur à l'arrêt est raccordé en dérivation sur la canalisation d'évacuation (27) du fluide intermédiaire hors du générateur de vapeur (15) et sur la canalisation d'admission (25) du fluide intermédiaire dans le générateur de vapeur (15).

10. Générateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'un échangeur de chaleur (151) placé dans la cuve d'un réacteur, pour le refroidissement du réacteur à l'arrêt est raccordé en dérivation sur la canalisation (27) du fluide secondaire hors du générateur de vapeur (15) et sur la canalisation d'admission (25) du fluide intermédiaire dans le générateur de vapeur (15).

FIG. 1



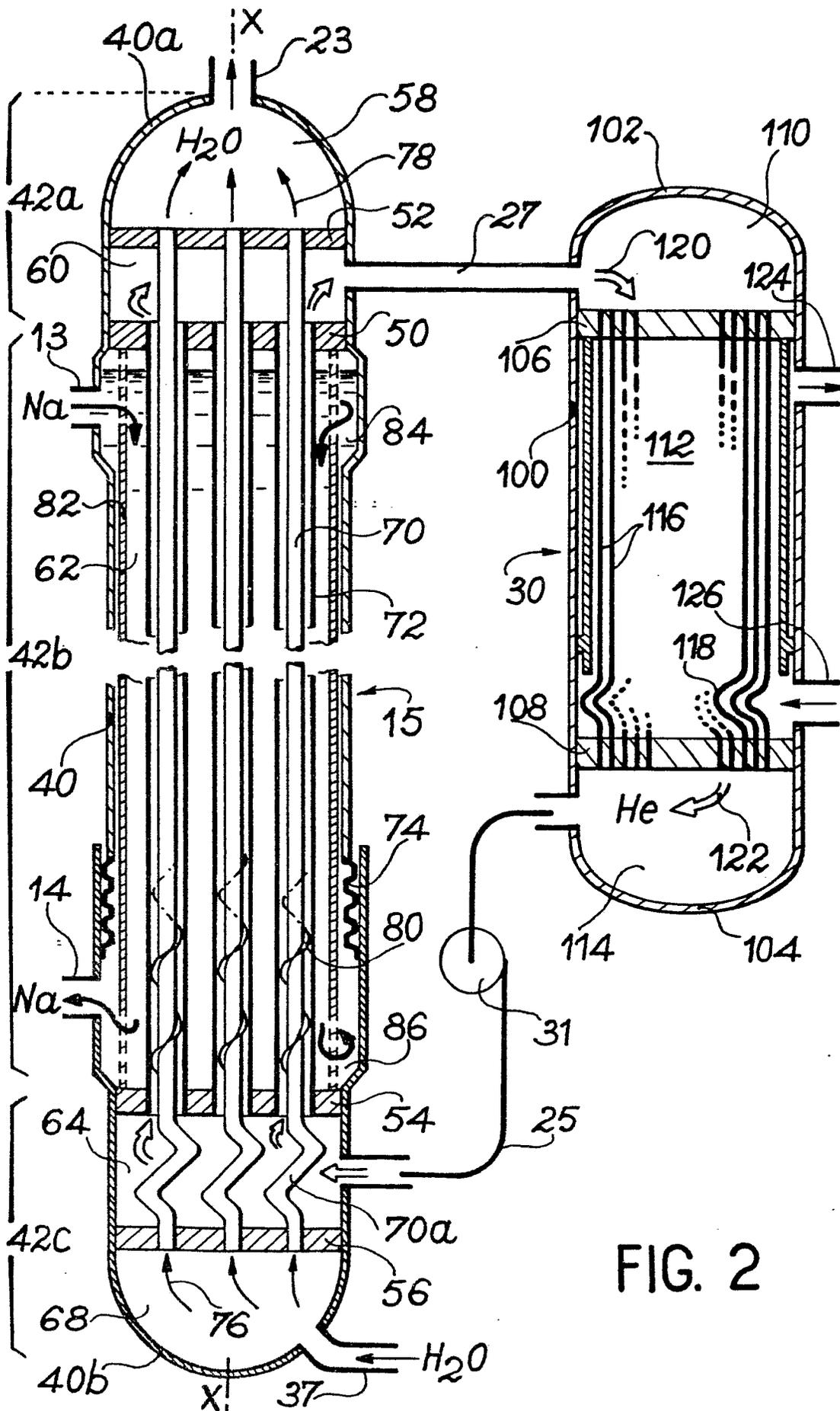


FIG. 2

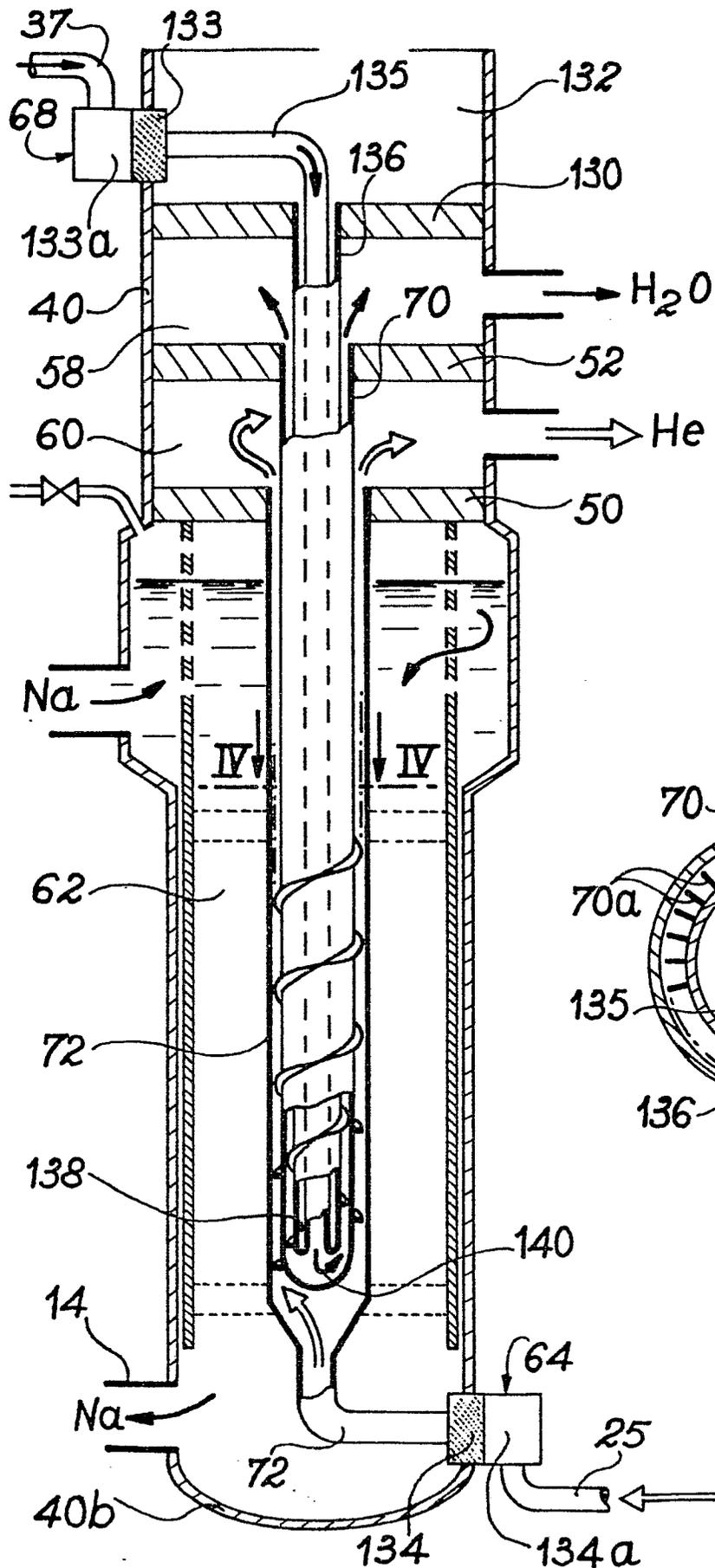


FIG. 4

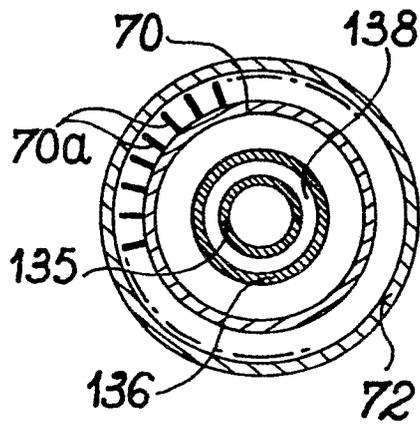


FIG. 3

FIG. 5

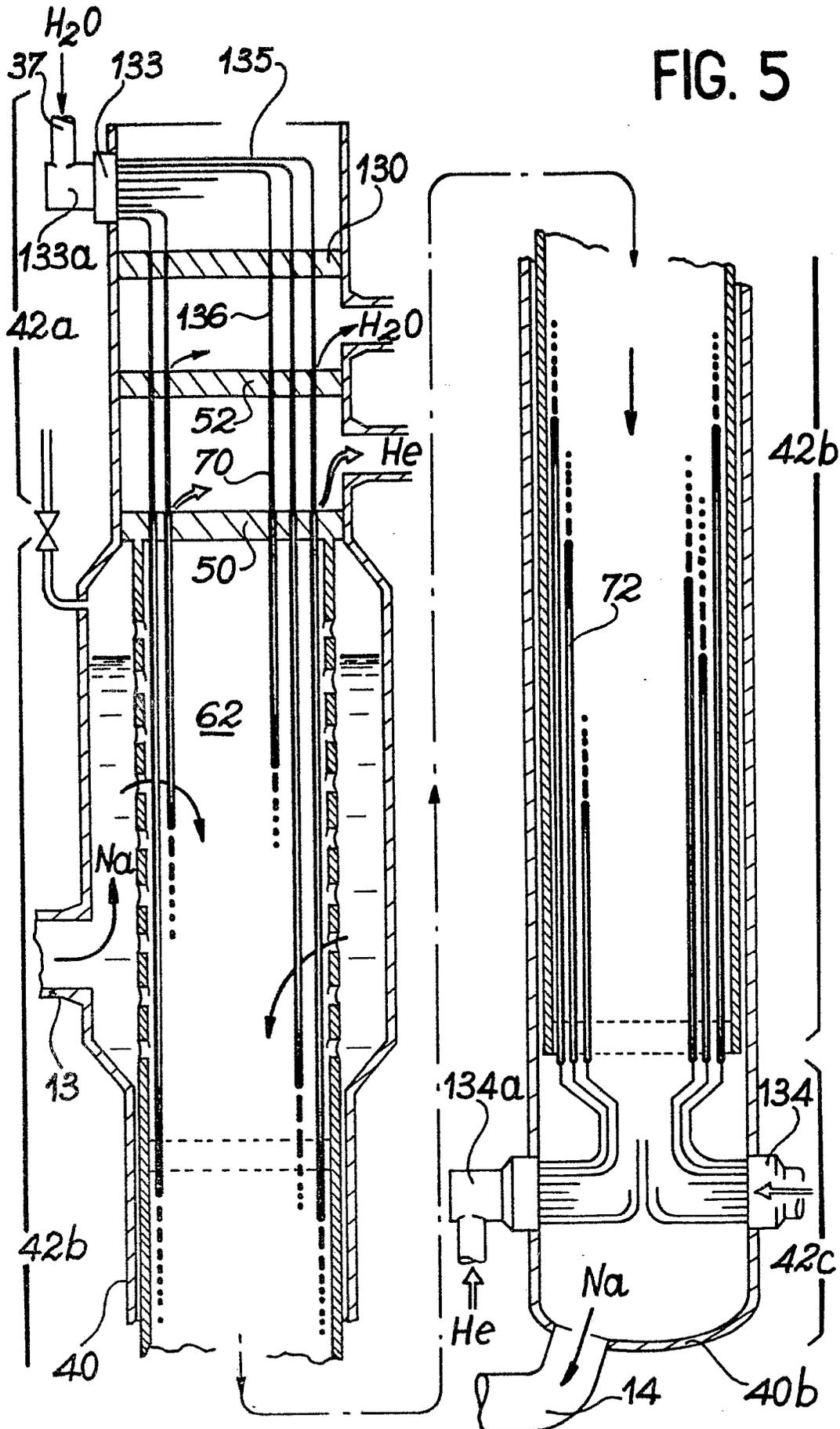


FIG. 6

