

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
16 décembre 2010 (16.12.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/142693 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G21C 17/00 (2006.01) G21D 3/04 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2010/058030

(22) Date de dépôt international :
8 juin 2010 (08.06.2010)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0953770 8 juin 2009 (08.06.2009) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
AREVA NP [FR/FR]; Tour AREVA - 1 Place Jean Millier, F-92400 Courbevoie (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : ROYERE, Christian [FR/FR]; 22 rue du Docteur Roux, F-92140 Clamart (FR).

(74) Mandataire : LEBKIRI, Alexandre; 10 rue de la Pépinière, F-75008 Paris (FR).

(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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : METHOD FOR DETERMINING THE MAXIMUM OPERATING VALUES OF A NUCLEAR REACTOR TO AVOID DAMAGE BY PELLETT-CLADDING INTERACTION

(54) Titre : PROCÉDE DE DETERMINATION DE VALEURS LIMITES D'EXPLOITATION D'UN REACTEUR NUCLEAIRE POUR EVITER L'ENDOMMAGEMENT PAR INTERACTION PASTILLE-GAINE

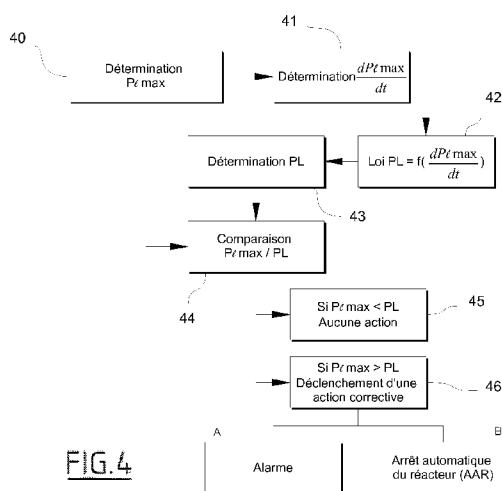


FIG.4

- 40 Determining $P_2^{\max}$
41 Determining $dP_2^{\max}/dt$
42 $PL_{law} = f(dP_2^{\max}/dt)$
43 Determining PL
44 $P_2^{\max} / PL$ comparison
45 If $P_2^{\max} < PL$
No action
46 If $P_2^{\max} > PL$
Triggering a corrective action
A Alarm
B Automatic shut-down of the reactor (ASD)

(57) Abstract : The present invention relates to a method for protecting against fuel cladding failure caused by pellet-cladding interaction in a pressurised-water reactor, characterised in that the method comprises steps which involve determining the maximum linear power density ($P_2^{\max}$) of the fuel rods and the drift of said linear power density over time (formula 1); determining a linear power density threshold (PL) according to said drift of said maximum linear power density (formula 1); comparing said maximum linear power density ($P_2^{\max}$) with said linear power density threshold (PL); triggering an alarm and/or a corrective action to stop the power augmentation if said maximum linear power density ($P_2^{\max}$) is no lower than said predetermined linear power density threshold (PL).

(57) Abrégé : La présente invention concerne un procédé de protection contre les ruptures de gaines de combustible par interaction pastille-gaine d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes consistant à déterminer la puissance linéique maximale ($P_2^{\max}$) des crayons combustibles et la dérivée de ladite puissance linéique en fonction du temps (formule 1); déterminer un seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique (formule 1); comparer ladite puissance linéique maximale ($P_2^{\max}$) avec ledit seuil de puissance linéique (PL); déclencher une alarme et/ou une action corrective pour stopper l'augmentation de puissance si ladite puissance linéique maximale ($P_2^{\max}$) est supérieure ou égale au dit seuil de puissance linéique déterminé (PL).

**PROCEDE DE DETERMINATION DE VALEURS LIMITES D' EXPLOITATION D' UN
REACTEUR NUCLEAIRE POUR EVITER L' ENDOMMAGEMENT
PAR INTERACTION PASTILLE-GAINE**

5

La présente invention concerne un procédé de détermination de valeurs limites d'exploitation d'un réacteur nucléaire pour éviter l'endommagement dû à l'interaction pastille-gaine.

L'invention s'applique particulièrement, mais pas exclusivement aux réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP).

La figure 1 illustre schématiquement un tel réacteur nucléaire 1 à eau pressurisée qui comporte de façon classique :

- un cœur 2,
- des générateurs de vapeur 3 (un par boucle), un seul générateur de vapeur étant représenté,
- une turbine 4 couplée à un générateur 5 d'énergie électrique, et
- un condenseur 6.

Le réacteur 1 comprend également un circuit primaire 8 équipé de pompes 9 (une pompe par boucle), une seule pompe étant représentée, dans lequel circule de l'eau sous pression, selon le trajet matérialisé par les flèches. Cette eau remonte notamment vers le cœur 2 pour y être réchauffée en assurant la réfrigération du cœur 2. L'eau assure également une fonction de modération, c'est-à-dire de ralentissement des neutrons produits par le combustible nucléaire.

Le circuit primaire 8 comprend en outre un pressuriseur 10 permettant de réguler la pression de l'eau circulant dans le circuit primaire 8.

L'eau du circuit primaire 8 alimente également les générateurs de vapeur 3 où elle est refroidie en assurant la vaporisation d'eau circulant dans un circuit secondaire 12.

2

La vapeur produite par les générateurs 3 est canalisée par le circuit secondaire 12 vers la turbine 4 puis vers le condenseur 6 où cette vapeur est condensée par échange de chaleur indirect avec de l'eau de refroidissement circulant dans le condenseur 6.

5 Le circuit secondaire 12 comprend en aval du condenseur 6 une pompe 13 et un réchauffeur 14.

Le cœur 2 comprend des assemblages combustibles 16 qui sont chargés dans une cuve 18. Un seul assemblage 16 est représenté sur la figure 1, mais le cœur comprend une pluralité d'assemblages 16.

10 Les assemblages combustibles 16 comportent des crayons de combustible nucléaire formés, de manière classique, d'une gaine en alliage, à base de zirconium, renfermant un empilement de pastilles de combustible nucléaire à base d'oxyde d'uranium ou d'un mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium.

15 Le réacteur 2 comporte des grappes de contrôle 20 qui sont disposées dans la cuve 18 au-dessus de certains assemblages 16. Une seule grappe 20 est représentée sur la figure 1, mais le cœur 2 comporte plusieurs dizaines de grappes de contrôle 20, par exemple soixante.

20 Les grappes de contrôle 20 peuvent être déplacées par des mécanismes 22 pour venir s'insérer dans les assemblages combustibles 16 qu'elles surplombent.

De façon classique, chaque grappe de contrôle 20 comporte des crayons de contrôle en matériau absorbant les neutrons.

25 Ainsi, le déplacement vertical de chaque grappe 20 permet de régler la réactivité du réacteur 1 et autorise des variations de la puissance globale P fournie par le cœur 2 depuis la puissance nulle jusqu'à la puissance nominale PN, en fonction de l'enfoncement des grappes de contrôles 20 dans les assemblages combustibles 16.

Il peut être utile, en effet, notamment dans des pays comme la France

3

où 80% de l'électricité est produite par des réacteurs nucléaires, que la puissance globale fournie par les réacteurs varie afin de s'adapter aux besoins du réseau électrique qu'ils alimentent ; on parle alors de suivi de réseau.

- 5 En particulier, il est souhaitable de pouvoir faire fonctionner les réacteurs à puissance réduite pendant une longue période où la demande du réseau est faible, avant de revenir si nécessaire à la puissance nominale PN.

 Lorsque le réacteur nucléaire fonctionne à sa puissance nominale PN,
10 le combustible nucléaire des pastilles est, selon le terme employé dans la technique, conditionné.

 Le conditionnement se caractérise essentiellement par la fermeture d'un jeu radial entre les pastilles et la gaine, due au fluage de la gaine et au gonflement des pastilles.

- 15 Ainsi, plus spécifiquement, on distinguera les étapes suivantes lors du conditionnement de chaque pastille :

 - sous l'effet de la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du crayon de combustible, la gaine se déforme radialement de façon progressive par fluage vers l'intérieur du crayon. Par ailleurs, les produits de
20 fission, qui sont majoritairement retenus dans la pastille, induisent un gonflement de celle-ci. Durant cette phase, la sollicitation de la gaine du point de vue des contraintes est uniquement le fait de la pression différentielle existant entre l'extérieur et l'intérieur du crayon. Les contraintes dans la gaine sont des contraintes de compression ;

- 25 - le contact entre la pastille et la gaine s'amorce au bout d'un intervalle de temps qui dépend essentiellement des conditions locales d'irradiation (puissance, flux neutronique, température, ...) et du matériau de la gaine. En réalité, le contact s'établit de façon progressive sur une période qui débute par un contact mou suivi par l'établissement d'un contact fort. La pression de

contact de l'oxyde de la pastille sur la face interne de la gaine conduit à une inversion des contraintes dans la gaine qui deviennent positives et tendent à solliciter la gaine en traction ;

5 - le gonflement de la pastille se poursuit et impose alors sa déformation à la gaine vers l'extérieur. En régime permanent établi, cette expansion est suffisamment lente pour que la relaxation du matériau de la gaine permette un équilibre des efforts dans la gaine. Dans ces conditions, le niveau des contraintes en traction est modéré (quelques dizaines de MPa) et ne présente pas de risque vis-à-vis de l'intégrité de la gaine.

10 Ainsi, en régime permanent, le risque de rupture de la gaine par interaction pastille-gaine (IPG) est faible du fait de l'équilibre thermomécanique présent dans la gaine à des niveaux de contraintes assez faibles. En revanche, le risque de rupture de la gaine intervient lorsque la puissance fournie par le crayon de combustible varie fortement.

15 En effet, une augmentation de puissance engendre une augmentation de la température dans le crayon. Etant donnée la différence des caractéristiques mécaniques (coefficient de dilation thermique, module d'Young) et de la différence de température entre la pastille en oxyde d'uranium et la gaine en alliage de zirconium, la pastille va se dilater
20 davantage que la gaine et imposer sa déformation à cette dernière.

 Par ailleurs, la présence d'un espace entre la gaine et la pastille de produits de fission corrosifs, tels que l'iode, crée les conditions de la corrosion sous contrainte. Ainsi, la déformation imposée par la pastille à la gaine lors d'un transitoire, ou variation, de puissance peut provoquer un
25 endommagement ou une rupture de la gaine, classiquement nommé par rupture de gaine par IPG.

 Or, une telle rupture de gaine n'est pas admissible pour des raisons de sûreté puisqu'elle pourrait provoquer la libération de produits de fission dans le circuit primaire du réacteur.

5

Des transitoires de puissance, c'est-à-dire des variations de puissance, peuvent se produire lors d'un fonctionnement normal du réacteur, c'est-à-dire dans les situations dites de catégorie 1. En effet, des variations de puissance peuvent être nécessaires notamment pour s'adapter aux besoins en énergie électrique du réseau. Des transitoires de puissance plus sévères peuvent également se produire dans des situations accidentelles dites de catégorie 2, suite par exemple à une augmentation excessive de charge, un retrait incontrôlé de groupe(s) de grappes, une dilution d'acide borique ou encore une chute de grappes non détectée. Ces différentes situations sont notamment décrites dans la demande FR-2 846 139.

Le risque de rupture de gaine par IPG n'intervient que lors d'une augmentation significative de la puissance linéique locale dissipée par les pastilles de combustibles.

Lors d'un transitoire accidentel de catégorie 2, la puissance atteinte localement dans le combustible peut augmenter rapidement et être deux à trois fois supérieure à la puissance nominale, cette augmentation rapide de puissance, due à l'augmentation du niveau de puissance et/ou à la déformation de la distribution de la puissance, entraîne une dilatation importante des pastilles, augmentant par conséquent les contraintes en surface interne de la gaine.

Le risque de rupture de gaine par IPG intervient également au cours d'une remontée rapide à 100% de la puissance nominale (PN) faisant suite à un fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire (FPPI). En effet, lors d'un FPPI, le combustible tend à se déconditionner. Le déconditionnement du combustible se caractérise par la réouverture du jeu radial entre les pastilles et la gaine ainsi que par la reprise du fluage de la gaine. Le retour rapide à 100% de la puissance nominale engendre une augmentation rapide des contraintes internes de la gaine à une valeur supérieure aux contraintes internes en fonctionnement nominal à 100% avant le FPPI, risquant de

6

rompre la gaine des combustibles.

Afin de garantir l'intégrité des crayons vis-à-vis de la rupture des gaines par IPG, les réacteurs nucléaires à eau pressurisée comporte des moyens d'arrêt automatique du réacteur lorsque la puissance linéique maximale des crayons combustibles dépasse un seuil limite de puissance, également appelé seuil d'arrêt automatique du réacteur (AAR).

Dans les REP actuels, ce seuil limite de puissance est dimensionné en fonction de la puissance linéique locale conduisant à la rupture de la gaine lors des augmentations les plus importantes de la puissance linéique, c'est-à-dire lors des transitoires accidentels de catégorie 2 et/ou les remontées rapides de puissance suite à un FPPI.

Cependant, lors de transitoires de classe 1 (transitoires normaux d'exploitation), le risque de rupture de la gaine intervient pour une puissance linéique locale plus importante que lors des transitoires de catégories 2, la cinétique d'évolution de la puissance des transitoires de catégories 1 étant suffisamment lente pour permettre une relaxation des contraintes par fluage.

Ainsi, le dimensionnement actuel du seuil limite de puissance ne permet pas d'obtenir une flexibilité accrue d'exploitation des réacteurs nucléaires à eau pressurisée, notamment en suivi de réseau, la marge d'exploitation étant trop réduite par la faible valeur du seuil d'arrêt automatique du réacteur.

Dans ce contexte, l'invention vise à résoudre les problèmes mentionnés en permettant une exploitation plus souple du réacteur nucléaire.

A cette fin, l'invention propose un procédé de protection contre les ruptures de gaines de combustible par interaction pastille-gaine d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée, ledit procédé comportant les étapes consistant à :

- déterminer la puissance linéique maximale des crayons combustibles

et la dérivée de ladite puissance linéique en fonction du temps ;

- déterminer un seuil de puissance linéique en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ;
- comparer ladite puissance linéique maximale avec ledit seuil de puissance linéique ;
- déclencher une alarme et/ou une action corrective pour stopper l'augmentation de puissance si ladite puissance linéique maximale est supérieure ou égale au dit seuil de puissance linéique déterminé.

On entend par le terme puissance linéique, la puissance thermique produite par unité de longueur active de l'assemblage combustible.

Grâce à l'invention, il est possible d'adapter la valeur du seuil limite de puissance linéique en fonction de la cinétique d'évolution de la puissance linéique maximale des crayons combustibles. La puissance linéique maximale dans les crayons combustibles est déterminée à partir de mesures de paramètres de fonctionnement fournies par une instrumentation du cœur formée par des capteurs, des logiciels de calcul classiques, des moyens de stockage des données.

Ainsi, pour un transitoire de puissance accidentel de catégorie 2 le seuil limite de puissance linéique sera fixé préférentiellement à une limite basse, sensiblement vers 450 W/cm afin de se préserver du risque important de rupture des gaines par IPG, alors que pour un transitoire de catégorie 1 avec une augmentation plus lente de la puissance linéique, le seuil limite de puissance linéique peut être fixé à une valeur plus haute, sensiblement jusqu'à 590 W/cm, le risque de rupture de gaines par IPG étant plus faible.

Le seuil limite haut équivalent à une puissance linéique maximale sensiblement égale à 590 W/cm permet notamment de protéger le réacteur contre la fusion du combustible.

A cet effet, une courbe de corrélation du seuil de puissance linéique en fonction de la dérivée de la puissance linéique maximale est stockée dans

8

les moyens de stockage de l'instrumentation du cœur.

Selon une autre caractéristique, le procédé est tel que l'action corrective est un arrêt dudit réacteur nucléaire.

Selon une autre caractéristique, le procédé est tel qu'il comporte les
5 étapes consistant à :

- déterminer un seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale;
- comparer ladite puissance linéique maximale des crayons combustibles au dit seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale ;
- 10 - déclencher une alarme si ladite puissance linéique maximale est supérieure ou égale au dit seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale.

Avantageusement, le procédé comporte une étape consistant à diminuer la puissance du réacteur lorsque ladite alarme dudit seuil limite
15 d'alarme de la puissance linéique maximale est déclenchée.

Avantageusement, ledit seuil limite d'alarme est déterminé par minoration dudit seuil de puissance linéique et intervient avant ledit seuil de puissance linéique (PL).

Avantageusement, ledit seuil limite d'alarme de la puissance linéique
20 maximale correspond à 94% du seuil de puissance linéique.

Selon une autre caractéristique, le procédé est tel l'étape de détermination dudit seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ($\frac{dPl_{\max}}{dt}$) est réalisé au moyen d'une
fonction linéaire.

L'invention a également pour objet un dispositif de protection basé sur des mesures de l'instrumentation interne et/ou externe du cœur mettant en œuvre le procédé selon l'invention caractérisé en ce qu'il comporte :

- des moyens pour déterminer la puissance linéique maximale ($Pl_{\max}$)

9

des crayons combustibles (24) et la dérivée de ladite puissance linéique en fonction du temps ($\frac{dP\ell_{\max}}{dt}$) ;

- des moyens pour déterminer un seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ($\frac{dP\ell_{\max}}{dt}$) ;
- 5 - des moyens pour comparer ladite puissance linéique maximale ($P\ell_{\max}$) avec ledit seuil de puissance linéique (PL) ;
- des moyens pour déclencher une alarme et/ou une action corrective pour stopper l'augmentation de puissance si ladite puissance linéique maximale ($P\ell_{\max}$) est supérieure ou égale au dit seuil de puissance
- 10 linéique déterminé (PL).

Selon une autre caractéristique, ledit dispositif comporte des moyens de pilotage de grappe(s) de contrôle permettant de diminuer la puissance du cœur et/ou d'arrêter le réacteur.

- Selon une autre caractéristique, ledit dispositif comporte des moyens
- 15 de stockage pour stocker la fonction permettant la détermination dudit seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ($\frac{dP\ell_{\max}}{dt}$).

- D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront plus clairement de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et
- 20 nullement limitatif, en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

- la figure 1 illustre schématiquement un réacteur nucléaire à eau pressurisée ;
- la figure 2 représente un assemblage combustible d'un réacteur nucléaire à eau pressurisé ;
- 25 - la figure 3 représente un crayon de combustible nucléaire de l'assemblage combustible illustré à la figure 2 ;

10

- la figure 4 représente un schéma synoptique du procédé de détermination de valeurs limites d'exploitation d'un réacteur nucléaire selon l'invention ;

5 - la figure 5 est une représentation graphique illustrant un exemple de loi de corrélation du procédé de détermination de valeurs limites d'exploitation d'un réacteur nucléaire selon l'invention.

Dans toutes les figures, les éléments communs portent les mêmes numéros de référence.

10 La figure 1 a déjà été décrite précédemment en référence à la présentation générale de l'invention.

La figure 2 représente un assemblage combustible 23 d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée.

15 L'assemblage combustible 23 comprend de manière classique un réseau de crayons combustibles 24 et un squelette 26 de support des crayons 24.

Le squelette 26 comprend, de façon classique :

- un embout inférieur 28 et un embout supérieur 30 disposés aux extrémités longitudinales de l'assemblage 23,
- des tubes-guides 21, reliant les deux embouts 26 et 28, destinés à
- 20 recevoir des crayons de contrôles des grappes 20,
- des grilles entretoises 32 de maintien des crayons 24.

Comme illustré à la figure 3, chaque crayon combustible 24 comprend, une gaine 33 sous forme d'un tube fermé à son extrémité inférieure par un bouchon inférieur 34 et à son extrémité supérieure par un

25 bouchon supérieur 35. Le crayon 24 contient une série de pastilles 36 empilées dans la gaine 33 et prenant appui contre le bouchon inférieur 34. Un ressort de maintien 38 est disposé dans le tronçon supérieur de la gaine 33 pour prendre appui sur le bouchon supérieur 35 et sur la pastille 36 supérieure.

Généralement, les pastilles 36 sont en oxyde d'uranium et la gaine 33 est en alliage de zirconium.

Sur la figure 3, qui correspond à un crayon combustible 24 avant irradiation, il existe un jeu radial J entre les pastilles 36 et la gaine 33, compris par exemple entre 100 et 300 μm . Cela est illustré plus particulièrement sur la partie cerclée agrandie de la figure 3.

Chaque pastille 36 a une forme sensiblement cylindrique avec des chanfreins (non représentés) entre des faces d'extrémités et sa face latérale. Un évidement 37 en calotte sphérique est ménagé dans chaque face d'extrémité, sensiblement au centre de celle-ci.

Afin de garantir un bon échange thermique dans les crayons 24 avant l'entrée en contact des pastilles 36 avec la gaine 33 lors du conditionnement des pastilles 36, le crayon 24 est, en outre, rempli d'un gaz thermiquement conducteur, tel que l'hélium. La pression de gaz contribue également à différer, dans le temps, le fluage en compression de la gaine 33.

Lorsque le réacteur va fonctionner, par exemple à sa puissance globale nominale PN, le combustible nucléaire des pastilles 36 va être conditionné.

Le conditionnement se caractérise essentiellement par la fermeture du jeu J entre les pastilles 36 et la gaine 33, due au fluage de la gaine 33 et au gonflement des pastilles 36.

Ainsi, plus spécifiquement, on distingue les étapes suivantes pour chaque pastille 36 lors du conditionnement :

- sous l'effet de la différence de pression entre l'extérieur (eau du circuit primaire) et l'intérieur du crayon 24, la gaine 33 se déforme progressivement radialement par fluage vers l'intérieur du crayon 24. Par ailleurs, les produits de fission, qui sont majoritairement retenus dans la pastille 36, induisent un gonflement de celle-ci. Durant cette phase, la sollicitation de la gaine 33 du point de vue des contraintes est uniquement

12

due à la pression différentielle existant entre l'extérieur et l'intérieur du crayon 24. Les contraintes dans la gaine 33 sont des contraintes de compression ;

- le contact entre la pastille 36 et la gaine 33 s'amorce au bout d'un
5 intervalle de temps qui dépend essentiellement des conditions locales d'irradiation (puissance, flux neutronique, température, ...) et du matériau de la gaine 33. En réalité, le contact s'établit de façon progressive sur une période qui débute par un contact mou suivi par l'établissement d'un contact fort. La pression de contact de l'oxyde de la pastille 36 sur la face interne de
10 la gaine 33 conduit à une inversion des contraintes dans la gaine 33 qui deviennent positives et tendent à solliciter la gaine 33 en traction ;

- le gonflement de la pastille 36 se poursuit et impose alors sa déformation à la gaine 33 vers l'extérieur. En régime permanent établi, cette expansion est suffisamment lente pour que la relaxation du matériau de la
15 gaine 33 permette un équilibre des efforts dans la gaine 33. Dans ces conditions, le niveau des contraintes en traction est modéré (quelques dizaines de MPa) et ne présente pas de risque vis-à-vis de l'intégrité de la gaine 33.

Au cours d'un transitoire de puissance de catégorie 2, la température
20 des pastilles 36 peut dépasser largement 1200°C. Cette température correspond au domaine d'activation du fluage thermique du combustible à base d'uranium. Sous l'effet de la haute température, le matériau des pastilles 36 a tendance à s'écouler vers le centre des pastilles 36 mises en compression, et donc à combler les évidements 37. En conséquences, les
25 contraintes sur les surfaces latérales des pastilles 36, qui comparativement restent froides (température inférieure à 1000°C), vont diminuer et ainsi la poussée des pastilles 36 sur la gaine sera également réduite.

Au cours de ce transitoire de puissance de catégorie 2, la gaine 33 impose une rétroaction sur les faces latérales des pastilles 36. Du fait du

13

champ de température régnant au sein du combustible, les faces latérales des pastilles 36 restent relativement froides et demeurent donc fragiles et susceptibles de se microfissurer sous l'effet de la rétroaction imposée par la gaine 33.

5 Ainsi, lors d'un transitoire de catégorie 2, des contres réactions pastilles 36-gaine 33 peuvent s'instaurer, s'opposant toutes deux aux effets instantanés des déplacements différentiels d'origine thermique conduisant à un risque de rupture par IPG.

10 Pour rappel, les transitoires de catégorie 2, limitatifs vis-à-vis du risque de rupture par IPG, sont dus notamment à l'un des événements suivants :

- augmentation excessive de charge,
- retrait incontrôlé de groupe(s) de grappes 20,
- chute de grappe(s) 20,
- 15 - dilution d'acide borique.

Il est connu que les transitoires accidentels de catégorie 2 induisent les variations de puissances plus fortes et plus rapides dans le cœur 2 que les transitoires de classe 1.

20 Pour garantir l'intégrité des crayons 24 vis-à-vis de l'interaction pastille 36-gaine 33, le réacteur nucléaire 1 comporte des moyens de protection réglés de façon à contrôler le fonctionnement du réacteur 1 de sorte que, notamment lors d'un transitoire de catégorie 2, la puissance linéique maximale P_{ℓ} max dans les crayons 24 reste inférieure à un seuil limite PL.

25 La puissance linéique P_{ℓ} effective dans les crayons 24 est estimée, à partir des mesures de paramètres de fonctionnement fournies par des capteurs, par des logiciels de calculs classiques stockés dans une mémoire des moyens de protection.

Dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée, les moyens de protection sont notamment réalisés par un Système de Protection Intégré

14

Numérique, également appelé SPIN, ou par un système équivalent basé sur les mesures de l'instrumentation interne et/ou externe du cœur du réacteur.

Par exemple, le SPIN est formé par un ensemble d'équipements électroniques et électriques qui à partir de mesures issues de chaînes d'instrumentation et en les comparant aux seuils limites, élabore des signaux d'alarme, de réduction automatique de la puissance ou d'arrêt automatique du réacteur.

Le procédé selon l'invention permet notamment d'améliorer ces moyens de pilotage et notamment les dispositifs de type SPIN ou autre système équivalent, basés sur la mesure de l'instrumentation interne et/ou externe du cœur.

Le procédé de détermination de valeurs limites d'exploitation d'un réacteur nucléaire pour éviter l'endommagement dû à l'interaction pastille-gaine est illustré par le schéma synoptique de la figure 4.

La première étape illustrée, par le bloc 40, consiste à déterminer la puissance linéique maximale $P_{\ell \text{ max}}$ des crayons combustibles 24 au moyen des mesures de paramètres de fonctionnement fournies par les capteurs et par les logiciels de calculs stockés dans une mémoire des moyens de protection.

On calcule dans une deuxième étape, illustré par le bloc 41, la dérivée de la puissance linéique maximale par rapport au temps $\frac{dP_{\ell \text{ max}}}{dt}$, afin d'évaluer la cinétique d'évolution de la puissance linéique dans les crayons 24. Cette dérivée de la puissance linéique permet de fournir, aux moyens de protection, une information sur le type de transitoire, catégorie 1 ou 2, subit par le réacteur nucléaire en plus de la valeur maximale de la puissance linéique des crayons combustibles. Cette deuxième étape est réalisée simultanément avec la détermination de la puissance linéique maximale $P_{\ell \text{ max}}$.

15

Dans une troisième étape, illustrée par le bloc 43, on détermine un seuil limite de puissance linéique PL, en fonction de la valeur de la dérivée de la puissance linéique déterminée précédemment. Pour cela, une loi de variation, illustrée par le bloc 42, est stockée dans la mémoire des moyens
5 de protection. Un exemple de loi est illustré particulièrement par le graphique de la figure 5.

Selon un premier mode de réalisation de l'invention, la loi de corrélation entre la dérivée de la puissance linéique en fonction du temps et le seuil limite de puissance PL est représentée par une fonction linéaire
10 variant entre deux seuils extrêmes, un seuil haut et un seuil bas.

Ainsi, en fonction de la cinétique d'évolution de la puissance linéique, la loi de variation permet d'adapter le seuil limite de puissance PL en fonction de l'augmentation plus ou moins rapide de la puissance linéique des crayons 24, c'est-à-dire en fonction de la sévérité des transitoires.

15 Pour un transitoire accidentel de catégorie 2 impliquant une augmentation rapide de la puissance linéique P_l , c'est-à-dire pour une dérivée de la puissance linéique en fonction du temps élevée, des crayons combustibles conduisant à un risque élevé de rupture par IPG, le seuil limite de puissance linéique est faible, préférentiellement de l'ordre de 450W/cm.

20 Pour un transitoire normal d'exploitation, de catégorie 1 avec une augmentation de puissance linéique P_l lente, c'est-à-dire pour une dérivée de la puissance linéique en fonction du temps faible, le risque de rupture des gaines par IPG au seuil de 450W/cm est inexistant, le seuil limite de puissance pour ce type de transitoire est plus important, préférentiellement
25 de l'ordre de 590W/cm. Ce seuil sensiblement égal à 590 W/cm permet notamment de protéger le réacteur contre la fusion du combustible.

L'étape suivante, illustrée par le bloc 44, consiste à comparer la valeur de la puissance linéique maximale P_l max déterminée lors de la première étape avec le seuil limite de puissance linéique PL dépendant de la cinétique

d'évolution de la puissance linéique des crayons combustibles 24.

Le bloc 45 illustre le cas où la puissance linéique maximale $P_l \text{ max}$ est inférieure au seuil limite de puissance PL, dans ce cas les moyens de protection n'enclenchent pas d'action corrective visant à diminuer la
5 puissance globale P du réacteur.

En revanche, si la puissance linéique maximale $P_l \text{ max}$ est supérieure au seuil limite de puissance PL, alors les moyens de protection enclenchent soit une alarme, soit une action corrective (typiquement une insertion de grappes de commande) permettant de réduire la puissance globale P du
10 réacteur, voire l'arrêt automatique du réacteur.

En effet, le seuil limite de puissance PL est déterminé préférentiellement afin de correspondre à un d'arrêt automatique du réacteur (AAR).

Afin de se prémunir d'un arrêt automatique du réacteur, un deuxième
15 seuil, dit seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale SA, est dimensionné afin de prévenir l'approche du seuil limite de puissance PL correspondant à une action d'arrêt d'urgence du réacteur.

Le seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale SA est inférieur au seuil limite de puissance PL et correspond avantageusement au
20 seuil limite de puissance PL minoré d'un certain pourcentage, par exemple 6%.

A cet effet, le procédé selon l'invention comporte également les étapes consistant à :

- déterminer le seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale
25 SA à partir du seuil limite de puissance linéique PL ;
- comparer la puissance linéique maximale des crayons combustibles au seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale SA.

Ainsi, l'invention a pour objet un procédé de détermination de valeurs limites d'exploitation d'un réacteur nucléaire pour éviter l'endommagement

des gaines par interaction pastille-gaine.

Le procédé selon l'invention est mise en œuvre par un dispositif de protection du cœur du réacteur basé sur les mesures de l'instrumentation interne et/ou externe du cœur du réacteur.

- 5 Le procédé selon l'invention permet de relaxer le seuil limite de puissance ainsi que le seuil d'alarme qui en découle et permet d'augmenter la souplesse d'exploitation du réacteur tout en garantissant une protection efficace contre les ruptures de gaines par IPG, lors des transitoires accidentels de catégorie 2.
- 10 Bien entendu, l'invention n'est pas limitée au mode de réalisation qui vient d'être décrit.

REVENDICATIONS

1. Procédé de protection contre les ruptures de gaines de combustible par interaction pastille-gaine d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes consistant à :
 - déterminer la puissance linéique maximale ($P_{\ell \text{ max}}$) des crayons combustibles (24) et la dérivée de ladite puissance linéique en fonction du temps ($\frac{dP_{\ell \text{ max}}}{dt}$) ;
 - déterminer un seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ($\frac{dP_{\ell \text{ max}}}{dt}$) ;
 - comparer ladite puissance linéique maximale ($P_{\ell \text{ max}}$) avec ledit seuil de puissance linéique (PL) ;
 - déclencher une alarme et/ou une action corrective pour stopper l'augmentation de puissance si ladite puissance linéique maximale ($P_{\ell \text{ max}}$) est supérieure ou égale au dit seuil de puissance linéique déterminé (PL).
2. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que ladite action corrective est un arrêt dudit réacteur nucléaire.
3. Procédé selon la revendication 2 caractérisé en ce que ledit procédé comporte les étapes consistant à :
 - déterminer un seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale (SA) ;
 - comparer ladite puissance linéique maximale ($P_{\ell \text{ max}}$) des crayons combustibles (24) au dit seuil limite d'alarme de la

19

puissance linéique maximale (SA) ;

- déclencher une alarme si ladite puissance linéique maximale ($P_{\ell \max}$) est supérieure ou égale au dit seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale (SA).

5

4. Procédé selon la revendication 3 caractérisé en ce qu'il comporte une étape consistant à diminuer la puissance du réacteur lorsque ladite alarme dudit seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale (SA) est déclenchée.

10

5. Procédé selon l'une des revendications 3 à 4 caractérisé en ce que ledit seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale (SA) est déterminé par minoration dudit seuil de puissance linéique (PL) et intervient avant ledit seuil de puissance linéique (PL).

15

6. Procédé selon la revendication 5 caractérisé en ce que ledit seuil limite d'alarme de la puissance linéique maximale (SA) correspond à 94% dudit seuil de puissance linéique (PL).

20

7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6 caractérisé en ce que l'étape de détermination dudit seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ($\frac{dP_{\ell \max}}{dt}$) est réalisé au moyen d'une fonction linéaire.

25

8. Dispositif de protection basé sur des mesures de l'instrumentation interne et/ou externe du cœur mettant en œuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 7 caractérisé en ce qu'il comporte :
 - des moyens pour déterminer la puissance linéique maximale ($P_{\ell \max}$)

max) des crayons combustibles (24) et la dérivée de ladite puissance linéique en fonction du temps ($\frac{dP\ell_{\max}}{dt}$) ;

- des moyens pour déterminer un seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ($\frac{dP\ell_{\max}}{dt}$) ;
- des moyens pour comparer ladite puissance linéique maximale ($P\ell_{\max}$) avec ledit seuil de puissance linéique (PL) ;
- des moyens pour déclencher une alarme et/ou une action corrective pour stopper l'augmentation de puissance si ladite puissance linéique maximale ($P\ell_{\max}$) est supérieure ou égale au dit seuil de puissance linéique déterminé (PL).

9. Dispositif de protection selon la revendication 8 caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de pilotage de grappe(s) de contrôle permettant de diminuer la puissance du cœur et/ou d'arrêter le réacteur.

10. Dispositif de protection selon l'une des revendications 8 à 9 caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de stockage pour stocker la fonction permettant la détermination dudit seuil de puissance linéique (PL) en fonction de ladite dérivée de ladite puissance linéique ($\frac{dP\ell_{\max}}{dt}$).

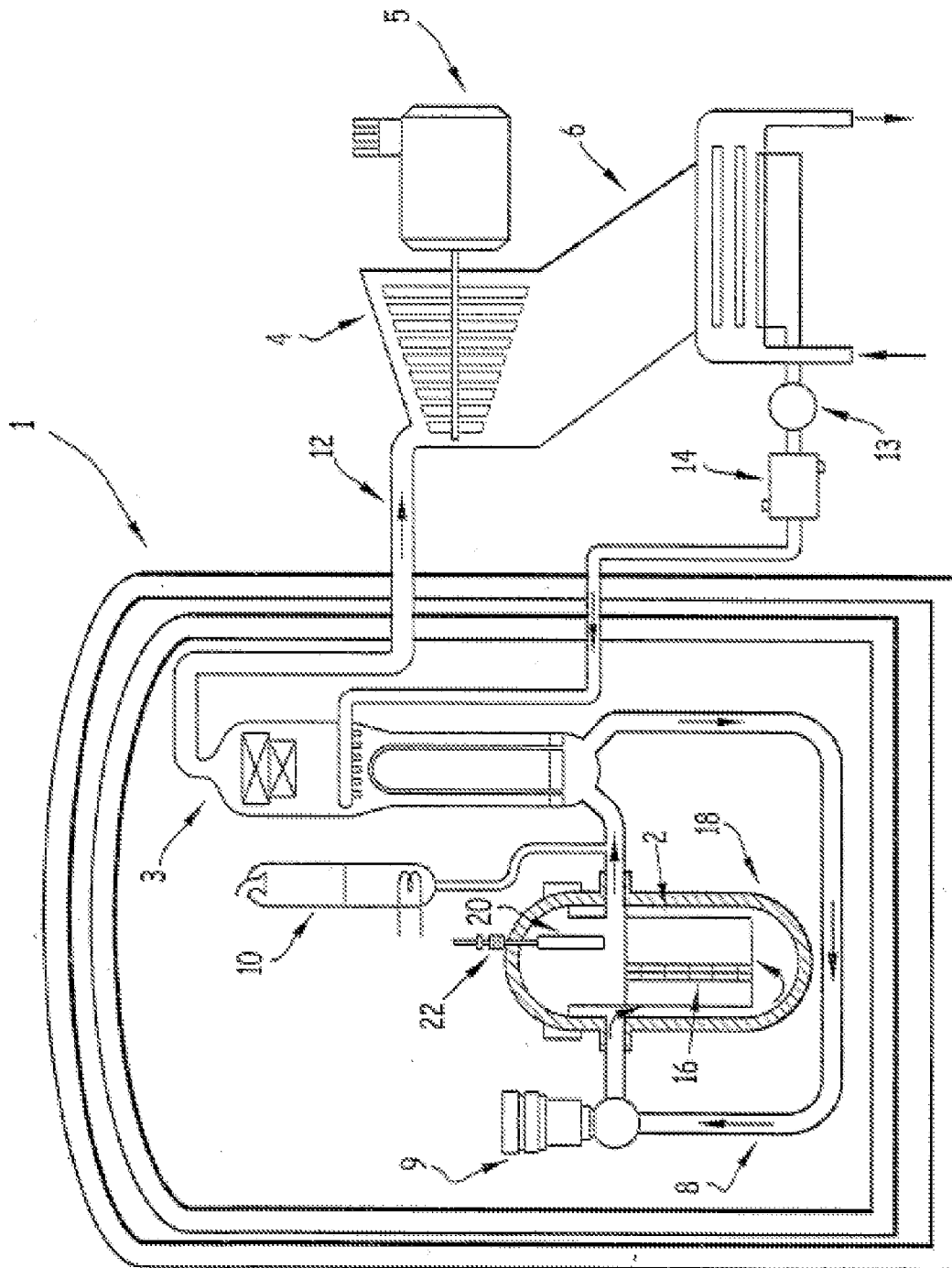


FIG. 1

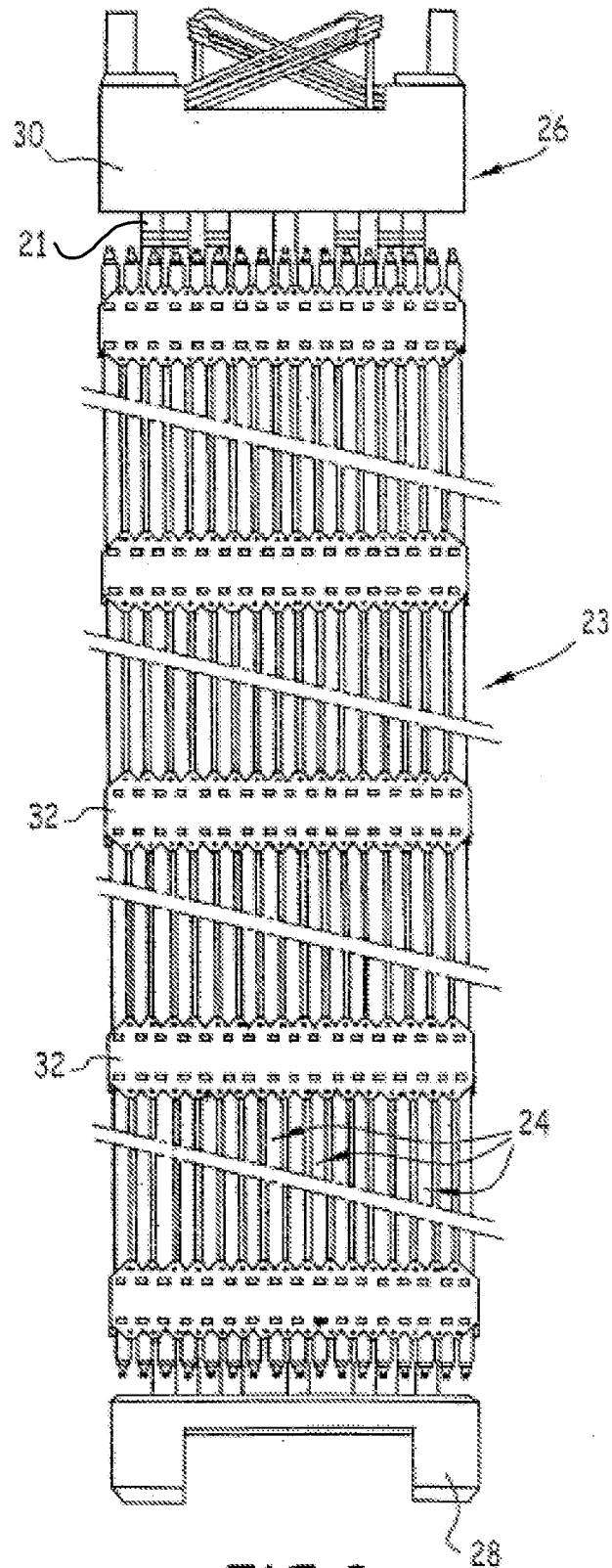


FIG. 2

3/4

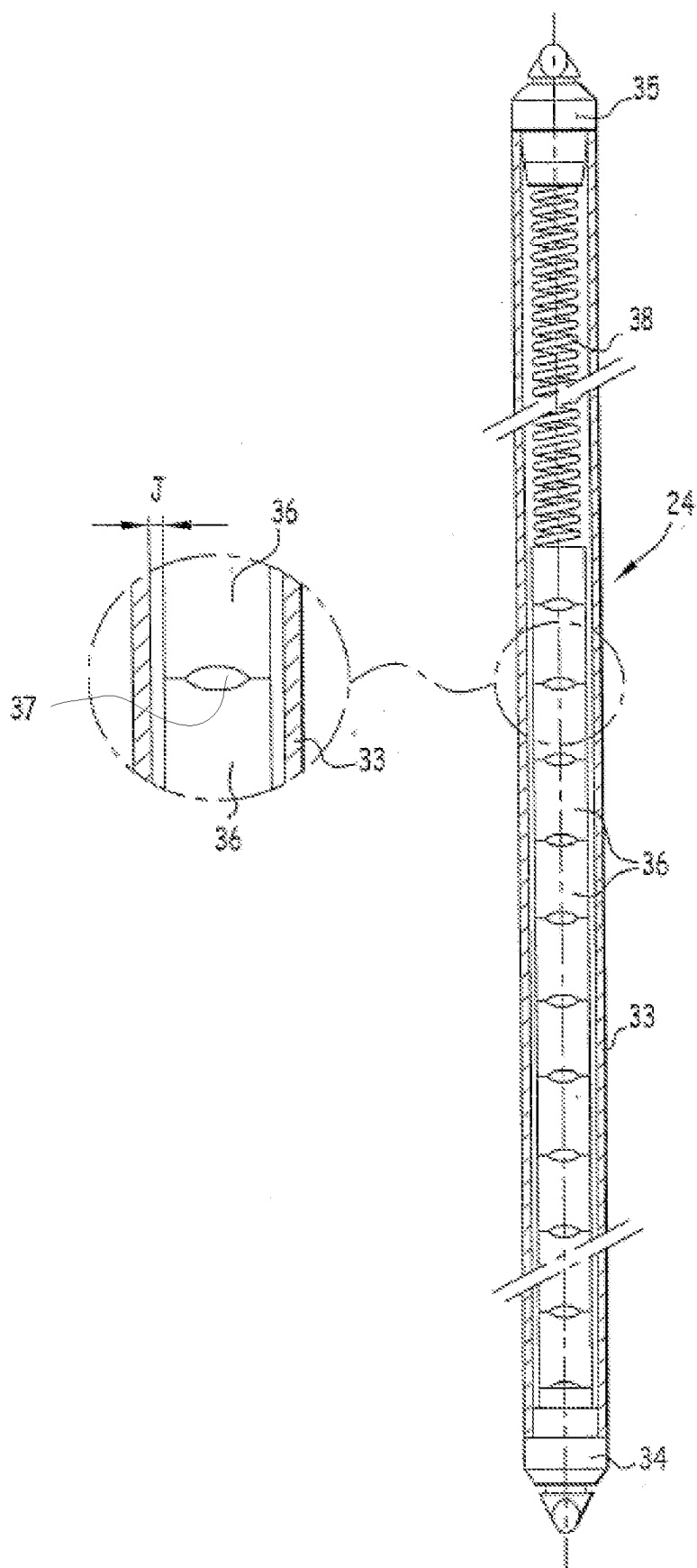


FIG. 3

4/4

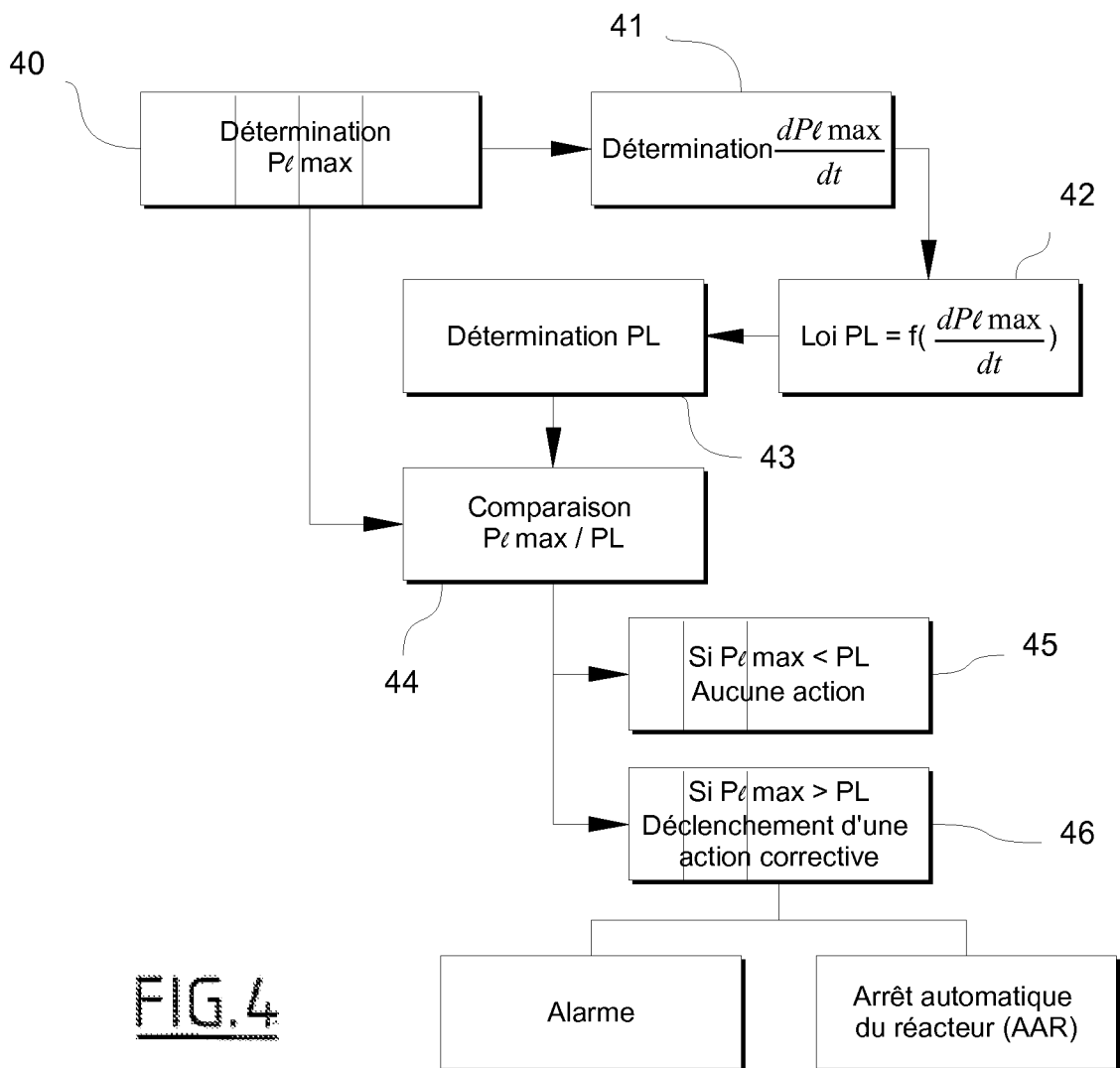


FIG. 4

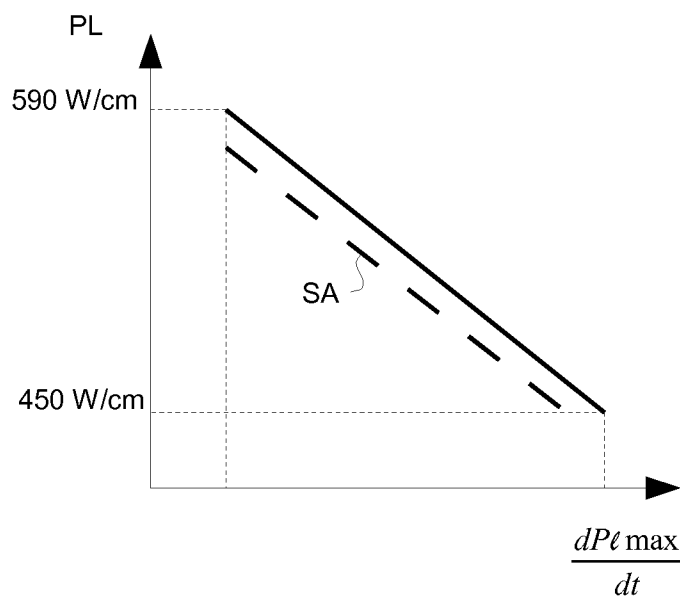


FIG. 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2010/058030

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G21C17/00 G21D3/04
ADD.

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 practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2009/116609 A9 (DELAFOY CHRISTINE [FR] ET AL) 7 May 2009 (2009-05-07) * abstract paragraphs [0001], [0005] - [0007] paragraph [0071] paragraphs [0127] - [0130] paragraphs [0146] - [0156] paragraphs [0170], [0171]	1-10
A	EP 1 057 189 B (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP [US]) 27 September 2006 (2006-09-27) * abstract paragraphs [0001], [0006] - [0008] paragraphs [0020], [0030], [0031] claims 1,2 ----- -/--	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ 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 document 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

3 September 2010

Date of mailing of the international search report

10/09/2010

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Manini, Adriano

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2010/058030

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 091 139 A (CHAO FRED C [US] ET AL) 25 February 1992 (1992-02-25) * abstract column 5, lines 38,48-53 column 6, lines 61,62 column 16, lines 14-31 claims 1,5,10 -----	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2010/058030

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2009116609	A9	07-05-2009	CN 1993771 A	04-07-2007
			EP 1751774 A1	14-02-2007
			WO 2006003266 A1	12-01-2006
			JP 2008501111 T	17-01-2008
			US 2008031399 A1	07-02-2008
EP 1057189	B	27-09-2006	AU 1060199 A	17-05-1999
			AU 2305299 A	10-05-1999
			EP 1057189 A2	06-12-2000
			WO 9922378 A1	06-05-1999
			WO 9921192 A2	29-04-1999
US 5091139	A	25-02-1992	DE 69022305 D1	19-10-1995
			DE 69022305 T2	04-04-1996
			EP 0405863 A2	02-01-1991
			ES 2078946 T3	01-01-1996
			JP 2038822 C	28-03-1996
			JP 3065693 A	20-03-1991
			JP 7069451 B	31-07-1995

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2010/058030

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
 INV. G21C17/00 G21D3/04
 ADD.

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, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2009/116609 A9 (DELAFOY CHRISTINE [FR] ET AL) 7 mai 2009 (2009-05-07) * abrégé alinéas [0001], [0005] - [0007] alinéa [0071] alinéas [0127] - [0130] alinéas [0146] - [0156] alinéas [0170], [0171]	1-10
A	EP 1 057 189 B (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP [US]) 27 septembre 2006 (2006-09-27) * abrégé alinéas [0001], [0006] - [0008] alinéas [0020], [0030], [0031] revendications 1,2 ----- -/-	1-10

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ 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

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"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)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"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

"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

"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

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

3 septembre 2010

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

10/09/2010

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

Manini, Adriano

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 5 091 139 A (CHAO FRED C [US] ET AL) 25 février 1992 (1992-02-25) * abrégé colonne 5, ligne 38,48-53 colonne 6, ligne 61,62 colonne 16, ligne 14-31 revendications 1,5,10 -----	1-10

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2010/058030

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2009116609 A9	07-05-2009	CN 1993771 A	04-07-2007
		EP 1751774 A1	14-02-2007
		WO 2006003266 A1	12-01-2006
		JP 2008501111 T	17-01-2008
		US 2008031399 A1	07-02-2008
EP 1057189 B	27-09-2006	AU 1060199 A	17-05-1999
		AU 2305299 A	10-05-1999
		EP 1057189 A2	06-12-2000
		WO 9922378 A1	06-05-1999
		WO 9921192 A2	29-04-1999
US 5091139 A	25-02-1992	DE 69022305 D1	19-10-1995
		DE 69022305 T2	04-04-1996
		EP 0405863 A2	02-01-1991
		ES 2078946 T3	01-01-1996
		JP 2038822 C	28-03-1996
		JP 3065693 A	20-03-1991
		JP 7069451 B	31-07-1995