



(51) Classification internationale des brevets :
G01T 3/00 (2006.01) G21C 17/108 (2006.01)

LECONTE, Pierre [FR/FR]; 53, boulevard Carnot,
F-13100 Aix-en-Provence (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2010/064220

(74) Mandataire : ILGART, Jean-Christophe; Brevalex, 95,
rue d'Amsterdam, F-75378 Paris Cedex 8 (FR).

(22) Date de dépôt international :
27 septembre 2010 (27.09.2010)

(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.

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
09 56692 28 septembre 2009 (28.09.2009) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25, rue
Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : VAGLIO-
GAUDARD, Claire [FR/FR]; 8, chemin du Mûrier,
F-13770 Venelles (FR). GIRARD, Jean-Michel
[FR/FR]; Résidence Saint Victoire, Bâtiment F, 29,
avenue Saint Jérôme, F-13100 Aix-en-Provence (FR).

(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,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR DETERMINING THE ISOTOPE RATIO OF FISSILE MATERIAL CONTAINED IN A FISSION CHAMBER

(54) Titre : PROCEDE DE DETERMINATION DU RAPPORT ISOTOPIQUE DE MATIERE FISSILE CONTENUE DANS UNE CHAMBRE A FISSION

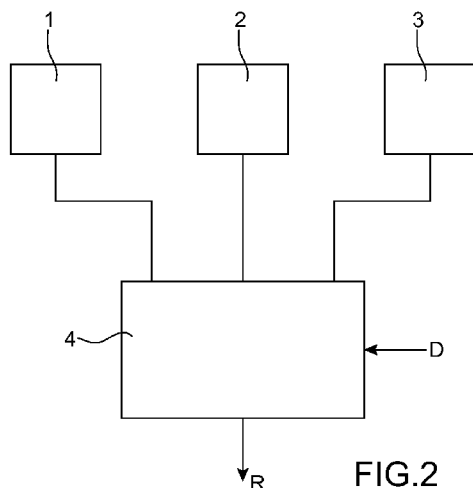


FIG.2

(57) Abstract : The invention relates to a method for determining the isotope ratio of fissile material having a main isotope and at least one impurity isotope, characterized in that it includes the following steps: measuring (1) the net surface areas $S(E_1)$ and $S(E_2)$, at the respective energies E_1 and E_2 , of gamma peaks of the fissile material (B); measuring (2) the total reference absorption efficiencies $R_o^p(E_1)$ and $R_o^p(E_2)$ at energies E_1 and E_2 ; calculating (3) the full transfer efficiency $T(E_1)$ and $T(E_2)$ of the fissile material; and calculating (4) the isotope ratio of fissile material R using the equation (A): where $K1$ is a known quantity which depends on the main isotope and the impurity isotope and $K2$ is a known quantity which depends on energies E_1 and E_2 .

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé de détermination de rapport isotopique de matière fissile ayant un isotope principal et au moins un isotope d'impureté, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes : mesure (1) des surfaces nettes $S(E_1)$ et $S(E_2)$, aux énergies respectives E_1 et E_2 , de pics gamma de la matière fissile (B), mesure (2) des rendements d'absorption totale de référence $R_o^p(E_1)$ et $R_o^p(E_2)$ aux énergies E_1 et E_2 , calcul (3) des transferts de rendement intégraux $T(E_1)$ et $T(E_2)$ de la matière fissile, et calcul (4) du rapport isotopique de matière fissile R à l'aide de l'équation (A): où $K1$ est une grandeur connue qui dépend de l'isotope principal et de l'isotope d'impureté et $K2$ une grandeur connue qui dépend des énergies E_1 et E_2 .

(A)

$$R = K1K2 \frac{S(E_2)}{S(E_1)} \times \frac{I_\gamma(E_1)}{I_\gamma(E_2)} \times \frac{R_o^p(E_1)}{R_o^p(E_2)} \times \frac{T(E_1)}{T(E_2)},$$

WO 2011/036282 A1



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))

**PROCEDE DE DETERMINATION DU RAPPORT ISOTOPIQUE DE MATIERE FISSIONNELLE CONTENUE
DANS UNE CHAMBRE A FISSION**

DESCRIPTION

Domaine technique et art antérieur

L'invention concerne un procédé de détermination de rapport isotopique de matière fissile.

La mesure par chambre à fission permet de remonter à la puissance d'un réacteur nucléaire ou d'obtenir des taux de fission caractéristiques d'un flux neutronique à certains emplacements du cœur sur une gamme énergétique donnée (cas d'une chambre à fission miniature utilisée dans un réacteur expérimental pour mesurer une atténuation de flux en réflecteur par exemple).

Une chambre à fission est constituée d'une enceinte étanche remplie d'un gaz inerte à fort pouvoir d'ionisation. De la matière fissile est déposée à l'intérieur de la chambre à fission sur un élément formant anode, l'enceinte étanche formant cathode. Lorsque les neutrons dont le flux est à mesurer entrent en contact avec la matière fissile, la fission se produit et il y a émission de deux fragments de fission qui partent à 180° l'un de l'autre. L'un des deux fragments est stoppé dans l'anode et l'autre ionise le gaz, avant d'être arrêté par la cathode. L'ionisation du gaz conduit à la création d'électrons dans la chambre à fission. Les électrons créés par ionisation sont alors collectés par la cathode et transmis à une chaîne de traitement électronique via un câble coaxial. Le nombre

d'électrons créés est directement proportionnel au flux de neutrons qui est à l'origine de la fission.

La connaissance des impuretés présentes dans une chambre à fission est cruciale pour une interprétation correcte des mesures. Dans le cas où la matière fissile est, par exemple, de l'Uranium ^{238}U , il est possible que plusieurs dizaines de pourcents du signal détecté provienne d'impuretés d'Uranium ^{235}U . Il est ainsi nécessaire de connaître le rapport isotopique $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ avec la plus grande précision afin de pouvoir extraire le signal utile du signal détecté. L'incertitude associée à la connaissance de ce rapport isotopique doit donc être la plus faible possible, idéalement de l'ordre de quelques pourcents.

A ce jour, plusieurs méthodes sont connues pour déterminer ce rapport isotopique. Une première méthode consiste à dissoudre le matériau concerné ou un échantillon de ce matériau et à effectuer une analyse chimique du matériau dissous. Par cette méthode, il est possible d'atteindre la connaissance de l'isotopie du matériau avec une précision inférieure au pourcent. Un inconvénient majeur de cette méthode est son caractère destructeur du matériau. En plus de son caractère destructeur, un autre inconvénient de cette méthode réside dans la génération d'effluents qu'il faut - in fine - traiter.

Une autre méthode est l'interrogation neutronique. L'interrogation neutronique présente l'avantage de ne pas être destructive. Un inconvénient de l'interrogation neutronique est toutefois de ne pas pouvoir être réalisée sur une faible quantité de

matériau (quelques centaines de microgrammes dans le cas d'une chambre à fission miniature).

D'autres méthodes sont également connues, comme, par exemple, l'étalonnage par rapport à une chambre étalon ou l'utilisation de spectres différents et de matériaux ayant des caractéristiques neutroniques particulières. Ces autres méthodes présentent l'inconvénient d'être difficiles à mettre en œuvre et de fournir des résultats relativement imprécis.

L'invention ne présente pas les inconvénients mentionnés ci-dessus. L'invention propose en effet de mesurer le rapport isotopique en mettant en œuvre un procédé qui ne détruit pas la chambre à fission et dont l'incertitude est de l'ordre de quelques pourcents (typiquement inférieure à 10%).

Exposé de l'invention

L'invention concerne un procédé de détermination de rapport isotopique de matière fissile contenue dans une chambre à fission, la matière fissile ayant un isotope principal X et au moins un isotope d'impureté Y, les isotopes X et Y ayant une décroissance radioactive selon les deux équations suivantes :

$X \rightarrow X'$ caractérisée par λ_x , F_x , et

$Y \rightarrow Y'$ caractérisée par λ_y , F_y ,

où X' et Y' sont des isotopes « fils » respectifs des isotopes X et Y, la décroissance de l'isotope X (respectivement Y) étant caractérisée par l'émission d'une particule gamma par l'isotope fils X' (respectivement Y') à une énergie E_1 (respectivement E_2) suivant une probabilité d'émission $I_\gamma(E_1)$ (respectivement

$I_Y(E_2)$), les grandeurs λ_X et λ_Y étant, respectivement, la constante de décroissance radioactive de l'isotope principal X et la constante de décroissance radioactive de l'isotope d'impureté Y, et F_X et F_Y étant, respectivement, un facteur de branchement de décroissance d'isotope utilisé pour une mesure d'activité de l'isotope principal et un facteur de branchement de décroissance d'isotope utilisé pour une mesure d'activité de l'isotope d'impureté.

Le procédé est caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- mesure, à l'aide d'un banc de spectrométrie placé dans une configuration de mesure donnée, d'une surface nette $S(E_1)$ d'un premier pic gamma de la matière fissile à une première énergie E_1 et d'une surface nette $S(E_2)$ d'un deuxième pic gamma de la matière fissile à une deuxième énergie E_2 ,
- détermination, à l'aide de sources ponctuelles de référence, dans la configuration de mesure donnée, d'un rendement d'absorption totale de référence $R_0^P(E_1)$ à la première énergie E_1 et d'un rendement d'absorption totale de référence $R_0^P(E_2)$ à la deuxième énergie E_2 ,
- calcul, à l'aide d'un ordinateur, dans la configuration de mesure donnée, d'un transfert de rendement intégral $T(E_1)$ de la matière fissile à la première énergie E_1 et d'un transfert de rendement intégral $T(E_2)$ de la matière fissile à la deuxième énergie E_2 , et

- calcul, à l'aide d'un calculateur, du rapport isotopique de matière fissile R à l'aide de l'équation :

$$R = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} \times \frac{S(E_2)}{S(E_1)} \times \frac{I_\gamma(E_1)}{I_\gamma(E_2)} \times \frac{R_0^P(E_1)}{R_0^P(E_2)} \times \frac{T(E_1)}{T(E_2)} \times \frac{F_x}{F_y}$$

Par banc de spectrométrie placé dans une configuration de mesure donnée, il faut entendre que les différents éléments qui constituent le banc de spectrométrie sont placés, les uns par rapport aux autres, selon une géométrie qui n'est pas modifiée d'une mesure à l'autre.

Les mesures de surface nette sont effectuées soit avant que la matière fissile ne soit introduite dans la chambre à fission, soit après introduction de la matière fissile dans la chambre à fission. Dans le premier cas, les mesures sont effectuées soit sur un échantillon du bloc de matière fissile, soit sur le bloc de matière fissile dans son entier. Dans le deuxième cas, les mesures sont effectuées sur la chambre à fission dans son entier.

Le procédé de l'invention permet avantageusement une détermination facile et performante du rapport isotopique de matière fissile sur la base de mesures de rayonnements gamma et de données de bibliothèque.

De façon avantageuse également, la mesure des surfaces nettes est effectuée pendant une durée suffisamment longue qui permet d'obtenir une faible incertitude de comptage (la durée de mesures des surfaces nettes est en effet comprise entre une heure et

quelques semaines, par exemple entre une heure et dix semaines).

Brève description des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture d'un mode de réalisation préférentiel fait en référence aux figures jointes parmi lesquelles :

- La figure 1 représente un schéma de principe de dispositif utilisé pour la mise en œuvre du procédé de l'invention ;
- La figure 2 représente un schéma de principe du procédé de l'invention ;
- La figure 3 représente une vue de détail d'une première étape du procédé de l'invention ;
- La figure 4 représente une vue de détail d'une deuxième étape du procédé de l'invention; et
- La figure 5 représente une vue de détail d'une troisième étape du procédé de l'invention.

Exposé détaillé d'un mode de réalisation préférentiel de l'invention

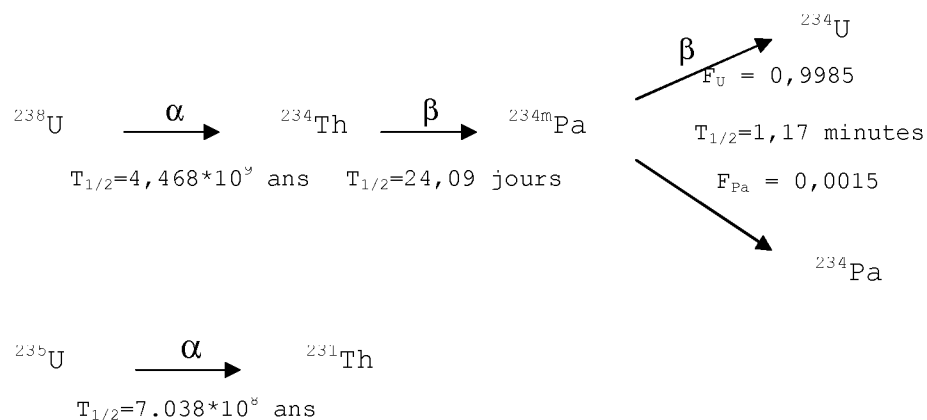
Selon le mode de réalisation préférentiel de l'invention décrit ci-dessous, le matériau fissile est l'Uranium ^{238}U et les impuretés sont constituées d'Uranium ^{235}U . L'invention concerne cependant tout autre matériau fissile ainsi que toute impureté associée à cet autre matériau fissile. Le matériau fissile peut être, par exemple ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{243}Am , ^{232}Th et l'impureté associée peut être, par exemple, ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{233}Th .

Dans le cas où le matériau fissile est l'Uranium ^{238}U et où les impuretés sont constituées d'Uranium ^{235}U , le rapport isotopique R est donné par l'équation (1) ci-dessous:

$$R = \frac{\lambda_{\text{U}238}}{\lambda_{\text{U}235}} \times \frac{A_{\text{U}235}}{A_{\text{U}238}} \quad (1)$$

où $A_{\text{U}238}$ et $A_{\text{U}235}$ sont, respectivement, l'activité de l'Uranium ^{238}U et l'activité de l'Uranium ^{235}U et $\lambda_{\text{U}238}$ et $\lambda_{\text{U}235}$ sont, respectivement, la constante de décroissance radioactive de l'Uranium ^{238}U et la constante de décroissance radioactive de l'Uranium ^{235}U .

Le schéma de décroissance de l'Uranium ^{238}U et de l'uranium ^{235}U s'écrit :



où le symbole « α » représente la décroissance par émission de particules α , le symbole « β » la décroissance par émission de particules β , $T_{1/2}$ la demi-vie de l'isotope concerné, F_{U} le facteur de branchement de décroissance de l'isotope $^{234\text{m}}\text{Pa}$ vers ^{234}U , c'est-à-dire la probabilité pour le Protactinium $^{234\text{m}}\text{Pa}$ de se désintégrer en Uranium ^{234}U et F_{Pa} le facteur de branchement de décroissance de l'isotope $^{234\text{m}}\text{Pa}$ vers ^{234}Pa , c'est-à-dire la probabilité pour le Protactinium $^{234\text{m}}\text{Pa}$ de se désintégrer en Protactinium ^{234}Pa ($F_{\text{U}} + F_{\text{Pa}} = 1$).

A l'équilibre séculaire (également appelé équilibre nucléaire), le schéma de décroissance de l'Uranium ^{238}U conduit donc à exprimer l'activité $A_{\text{U}238}$ de l'Uranium ^{238}U par rapport à l'activité $A_{\text{Pa}234\text{m}}$ du Protactinium $^{234\text{m}}\text{Pa}$ comme suit :

$$A_{\text{U}238} = \frac{1}{F_U} \times A_{\text{Pa}234\text{m}} \quad (2)$$

$$\text{D'où : } R = \frac{\lambda_{\text{U}238}}{\lambda_{\text{U}235}} \times \frac{A_{\text{U}235}}{A_{\text{Pa}234\text{m}}} \times F_U \quad (3)$$

Les deux raies gamma traditionnellement mesurées pour quantifier les activités de l'Uranium ^{235}U et du Protactinium $^{234\text{m}}\text{Pa}$ sont les raies à 185,7keV (intensité de 57,0 %) et à 1001keV (intensité de 0,839%). Ce sont ces deux raies qui sont mesurées dans le cadre du mode de réalisation préférentiel de l'invention.

L'activité A d'un isotope quelconque calculée à partir de la mesure d'une de ses raies d'émission gamma d'énergie E_0 est donnée par la formule suivante :

$$A = \frac{S(E_0)C_{\text{coinc}}(E_0)}{I_\gamma(E_0)R_0^p(E_0)T(E_0)\Delta t_{\text{act}}} \quad (4)$$

où :

- $S(E_0)$ est la surface nette du pic gamma à l'énergie E_0 , dans la configuration de mesure donnée;
- $C_{\text{coinc}}(E_0)$ est la correction de coïncidences vraies (détection simultanée de rayonnements émis lors d'une même désintégration radioactive), dans la configuration de mesure donnée ;

- $I_\gamma(E_0)$ est la probabilité d'émission ou intensité de la raie gamma d'énergie E_0 pour l'isotope fils de l'isotope considéré;
- $R_0^P(E_0)$ est le rendement d'absorption totale de référence à l'énergie E_0 , qui est obtenu par étalonnage du détecteur gamma à l'aide d'une source étalon ponctuelle, dans la configuration de mesure donnée ;
- $T(E_0)$ est le transfert de rendement intégral qui permet de corriger les effets d'angle solide et de matrice dans la configuration de mesure donnée (hétérogénéité des sources et autoabsorption gamma dus à la mesure d'un objet dans une configuration différente de celle utilisée lors de l'étalonnage) ;
- Δt_{act} est la durée de mesure active, c'est-à-dire la durée de mesure corrigée du temps mort électronique.

De l'expression de A ci-dessus, il découle que le rapport isotopique R pour l'Uranium ^{238}U s'écrit :

$$R = \frac{\lambda_{U238}}{\lambda_{U235}} \times \frac{S(185,7\text{keV})}{S(1001\text{keV})} \times \frac{I_\gamma(1001\text{keV})}{I_\gamma(185,7\text{keV})} \times \frac{R_0^P(1001\text{keV})}{R_0^P(185,7\text{keV})} \times \frac{T(1001\text{keV})}{T(185,7\text{keV})} \times F_U \quad (5)$$

où :

- λ_{U235} est une donnée connue dans les bases de données internationales ($\lambda_{U235} = \ln(2) / (2,22102 \cdot 10^{16}) \text{ s}^{-1}$) ;
- λ_{U238} est une donnée connue dans les bases de données internationales ($\lambda_{U238} = \ln(2) / (1,40996 \cdot 10^{17}) \text{ s}^{-1}$) ;
- $S(185,7\text{keV})$ est une grandeur mesurée;
- $S(1001\text{keV})$ est une grandeur mesurée;
- $I_\gamma(1001\text{keV})$ est une donnée connue dans les bases de données internationales ($I_\gamma(1001\text{keV}) = 0,00839$) ;
- $I_\gamma(185,7\text{keV})$ est une donnée connue dans les bases de données internationales ($I_\gamma(185,7\text{keV}) = 0,570$) ;

- $R_0^P(1001\text{keV})$ est une grandeur mesurée par étalonnage;
- $R_0^P(185,7\text{keV})$ est une grandeur mesurée par étalonnage ;
- $T(1001\text{keV})$ est une grandeur calculée par modélisation ;
- $T(185,7\text{keV})$ est une grandeur calculée par modélisation ;
- F_U est une donnée connue dans les bases de données internationales.

L'équation (5) ci-dessus concerne le cas où le matériau fissile est l'Uranium ^{238}U (isotope principal) et l'impureté l'Uranium ^{235}U (isotope d'impureté associé), les raies gamma utilisées pour quantifier les activités de l'isotope principal et de l'isotope d'impureté étant respectivement les raies à 1001keV et 185,7keV.

Dans le cas général d'un matériau fissile X (isotope principal) et d'une impureté associée Y (isotope d'impureté), les raies gamma utilisées pour quantifier les activités de l'isotope principal et de l'isotope d'impureté étant, respectivement, une raie d'énergie E_1 et une raie d'énergie E_2 , le rapport isotopique R s'écrit :

$$R = \frac{\lambda_X}{\lambda_Y} \times \frac{S(E_2)}{S(E_1)} \times \frac{I_Y(E_1)}{I_Y(E_2)} \times \frac{R_0^P(E_1)}{R_0^P(E_2)} \times \frac{T(E_1)}{T(E_2)} \times \frac{F_X}{F_Y} \quad (6)$$

où :

- λ_X est la constante de décroissance radioactive de l'isotope principal de la matière fissile destinée à équiper la chambre à fission,
- λ_Y est la constante de décroissance radioactive de l'isotope d'impureté associé à l'isotope principal,

- $S(E_1)$ est la surface nette d'un premier pic gamma de la matière fissile à l'énergie E_1 et $S(E_2)$ la surface nette d'un deuxième pic gamma de la matière fissile à l'énergie E_2 ,
- $R_0^P(E_1)$ est le rendement d'absorption totale de référence à l'énergie E_1 et $R_0^P(E_2)$ le rendement d'absorption totale de référence à l'énergie E_2 ,
- $T(E_1)$ est le rendement intégral de la matière fissile à l'énergie E_1 et $T(E_2)$ le rendement intégral de l'échantillon de la matière fissile à l'énergie E_2 ,
- $I_Y(E_1)$ et $I_Y(E_2)$ sont, respectivement, la probabilité d'émission de raie gamma du « fils » de l'isotope principal à l'énergie E_1 et la probabilité d'émission de raie gamma du « fils » de l'isotope d'impureté à l'énergie E_2 ,
- F_X est le facteur de branchement de décroissance d'un isotope utilisé pour mesurer l'activité de l'isotope principal, et
- F_Y est le facteur de branchement de décroissance d'un isotope utilisé pour mesurer l'activité de l'isotope d'impureté.

Comme cela a été mentionné précédemment avec l'exemple de l'Uranium ^{238}U et de l'Uranium ^{235}U , les facteurs de branchement de décroissance sont des probabilités connues liées au mode de désintégration des isotopes. Dans le cas où l'isotope utilisé pour mesurer l'activité se désintègre de manière univoque, le facteur de branchement de décroissance est égal à 1 et, dans le cas où la désintégration n'est pas univoque, le facteur de branchement est égal à la probabilité associée à la désintégration choisie.

La figure 1 représente un schéma de principe de dispositif utilisé pour la mise en œuvre du procédé de l'invention.

Le dispositif comprend un banc Sp de spectrométrie gamma et un ordinateur K.

Le banc Sp de spectrométrie gamma délivre des signaux de mesure Sm qui sont transmis au ordinateur K. Le banc de spectrométrie Sp est constitué d'une enceinte E dans laquelle est placé un détecteur D. Le détecteur D, préférentiellement une diode en germanium de grande pureté, est un détecteur de rayons gamma qui présente une bonne efficacité sur un large domaine d'énergie, par exemple des énergies allant de 50keV à 2MeV. De façon préférentielle, le détecteur D présente également une aptitude à limiter l'effet Compton. De la matière fissile est placée dans l'enceinte E. La référence B sur la figure 1 représente cette matière fissile : il s'agit soit d'un échantillon du bloc de matière fissile destiné à équiper la chambre à fission, soit du bloc de matière fissile lui-même, soit de la chambre à fission dans son entier équipée du bloc de matière fissile. L'interaction des rayons gamma issus de la matière fissile B avec le détecteur D conduit à une ionisation des atomes du milieu détecteur. Les charges ainsi créées sont collectées par une alimentation continue haute tension, par exemple une alimentation de quelques milliers de volts (non représentée sur la figure 1). L'enceinte E est préférentiellement une enceinte circulaire, constituée de matériaux permettant d'avoir un niveau très faible de bruit de fond, par exemple, un empilement de plomb basse

activité, de plomb ultra basse activité, d'étain et de cuivre. Le refroidissement du détecteur est assuré par un système cryo-cycle qui permet un refroidissement hybride électrique/azote liquide. Ce système permet des durées d'acquisition de plusieurs semaines sans perturbation liée à l'apport en azote liquide.

Les signaux de mesure S_m construits à partir du rayonnement gamma sont transmis au calculateur K pour traitement. Le calculateur K met en œuvre des procédés de traitement aptes à délivrer les grandeurs souhaitées.

Le procédé de l'invention va maintenant être décrit en référence aux figures 2-5.

Le procédé de l'invention comprend (cf. figure 2) une étape 1 de détermination des surfaces nettes $S(185,7\text{keV})$ et $S(1001\text{keV})$ de la matière fissile, une étape 2 de détermination des rendements d'absorption totale de référence aux énergies de 185,7keV et de 1001keV, $R_0^P(185,7\text{keV})$ et $R_0^P(1001\text{keV})$, une étape 3 de détermination des transferts de rendement intégral aux énergies de 185,7keV et de 1001keV, $T(185,7\text{keV})$ et $T(1001\text{keV})$, et une étape 4 de calcul du rapport isotopique R à partir des résultats des étapes 1, 2 et 3 et de données D connues issues de bibliothèques de données. Les données D sont les données λ_{U238} , λ_{U235} , $I_\gamma(185,7\text{keV})$, $I_\gamma(1001\text{keV})$ et F_U définies précédemment.

L'étape 1 de détermination des surfaces nettes $S(185,7\text{keV})$ et $S(1001\text{keV})$ comprend une étape 1a de mesure de spectre gamma de la matière fissile B . La mesure du spectre gamma est effectuée, à l'aide du banc de mesure Sp , sur une bande d'énergie qui comprend les raies utiles à 185,7keV et 1001keV. L'étape 1a (Figure

3) est suivie d'une étape 1b d'extraction, à l'aide du calculateur K, des surfaces nettes des raies à 185,7keV et 1001keV. Une mesure de bruit de fond gamma est également effectuée, à l'aide du banc de mesure Sp, sur la même bande d'énergie lors de l'étape 1N, pour mesurer les éventuels pics gamma du bruit de fond aux énergies E_1 et E_2 se superposant aux pics déterminés dans la mesure de l'étape 1a. A partir des résultats obtenus à l'issue des étapes 1b et 1N, le calculateur K calcule, à l'étape 1c, les surfaces nettes $S(185,7\text{keV})$ et $S(1001\text{keV})$. Le logiciel de calcul utilisé pour le calcul des surfaces nettes est, par exemple, le logiciel GENIE2000 dont le manuel d'utilisation est disponible sur le réseau Internet à l'adresse électronique suivante :

<http://www.ipnas.ulg.ac.be/garnir/pdf/genie2000.pdf>,

Tout autre type de logiciel connu de l'homme du métier et susceptible de conduire au résultat souhaité peut également être utilisé.

La figure 4 illustre les différentes étapes élémentaires qui composent l'étape 2 de détermination des rendements d'absorption totale de référence aux énergies de 185,7keV et de 1001keV, $R_0^P(185,7\text{keV})$ et $R_0^P(1001\text{keV})$.

L'étape 2 de détermination des rendements d'absorption totale de référence $R_0^P(185,7\text{keV})$ et $R_0^P(1001\text{keV})$ est une étape connue en soi. L'étape 2 commence par une étape 2a de choix de sources ponctuelles dont les activités sont bien connues. Chaque source ponctuelle j est caractéristique d'une émission de particules gamma à une énergie E_j choisie dans une

gamme énergétique connue, par exemple la gamme 50keV-2MeV.

Chaque source ponctuelle j est placée dans l'enceinte pour la mesure de son activité (étape 2b). L'activité $A_m^P(E_j)$ de chaque source ponctuelle j à l'énergie E_j est alors mesurée à l'aide du banc de mesure Sp et du calculateur K. Le rendement d'absorption totale de référence $R'_{0^P}(E_j)$ de chaque source ponctuelle à l'énergie E_j est ensuite calculé, à l'étape 2c, à partir de l'activité mesurée $A_m^P(E_i)$ et de l'activité de la source ponctuelle qui est connue a priori $A_o^P(E_i)$. Il vient :

$$R'_{0^P}(E_j) = A_m^P(E_j) / A_o^P(E_j),$$

On obtient alors une courbe des rendements d'absorption totale de référence $R'_{0^P}(E_j)$ pour les différentes énergies E_j . La courbe des rendements $R'_{0^P}(E_j)$ est ensuite ajustée, à l'aide d'une fonction analytique Fa, par le calculateur K (étape 2d). La fonction analytique Fa consiste par exemple à exprimer le logarithme népérien de R'_{0^P} en fonction d'un polynôme de logarithme népérien de l'énergie. De la courbe ajustée délivrée à l'étape 2d sont déduites, à l'étape 2e, les valeurs des rendements d'absorption totale de référence aux énergies souhaitées de 185,7keV et 1001keV, $R_0^P(185,7\text{keV})$ et $R_0^P(1001\text{keV})$.

La figure 5 illustre les différentes étapes élémentaires qui composent l'étape 3 de détermination des transferts de rendement intégraux.

L'étape 3 de détermination des transferts de rendement intégraux comprend, tout d'abord, une étape 3a de modélisation du banc de mesure équipé du détecteur D,

une étape 3b de modélisation de l'élément mesuré lors de l'étape 1 de détermination des surfaces nettes (chambre à fission CH ou échantillon de bloc de matière fissile) et une étape 3c de modélisation des conditions d'utilisation de la source ponctuelle utilisée lors de la mesure des rendements d'absorption dans la même configuration de mesure du banc gamma que dans l'étape 3b. A partir des données de modélisation délivrées à l'issue des étapes 3a et 3b, une étape de calcul 3d calcule, par exemple par la méthode de Monte Carlo pour la résolution de l'équation de transport des photons, l'activité relative de l'élément modélisé déterminée par le détecteur D modélisé dans le calcul aux énergies respectives de 185,7keV et 1001keV, à savoir les grandeurs $A_C^{CH}(185,7\text{keV})$ et $A_C^{CH}(1001\text{keV})$. De même, à partir des données de modélisation délivrées à l'issue des étapes 3a et 3c, l'étape de calcul 3d calcule, par exemple par la méthode de Monte Carlo, l'activité relative de la source ponctuelle déterminée par le détecteur D modélisé dans le calcul aux énergies de 185,7keV et 1001keV, à savoir les grandeurs $A_C^P(185,7\text{keV})$ et $A_C^P(1001\text{keV})$.

A l'issue de l'étape 3d, une étape de calcul 3e calcule les grandeurs $T(185,7\text{keV})$ et $T(1001\text{keV})$ à partir des activités calculées, à savoir :

$$T(185,7\text{keV}) = A_C^{CH}(185,7\text{keV}) / A_C^P(185,7\text{keV})$$

$$T(1001\text{keV}) = A_C^{CH}(1001\text{keV}) / A_C^P(1001\text{keV})$$

A partir de l'ensemble des grandeurs déterminées comme décrit ci-dessus et des données de bibliothèque mentionnées précédemment, il est alors possible de déterminer le rapport isotopique R tel que :

$$R = \frac{\lambda_{U238}}{\lambda_{U235}} \times \frac{S(185.7keV)}{S(1001keV)} \times \frac{I_{\gamma}(1001keV)}{I_{\gamma}(185,7keV)} \times \frac{R_0^P(1001keV)}{R_0^P(185,7keV)} \times \frac{T(1001keV)}{T(185,7keV)} \times F_U$$

ou, dans le cas général :

$$R = \frac{\lambda_X}{\lambda_Y} \times \frac{S(E_2)}{S(E_1)} \times \frac{I_{\gamma}(E_1)}{I_{\gamma}(E)} \times \frac{R_0^P(E_1)}{R_0^P(E_2)} \times \frac{T(E_1)}{T(E_2)} \times \frac{F_X}{F_Y} .$$

REVENDICATIONS

1. Procédé de détermination de rapport isotopique de matière fissile contenue dans une chambre à fission, la matière fissile ayant un isotope principal X et au moins un isotope d'impureté Y, les isotopes X et Y ayant une décroissance radioactive selon les deux équations suivantes :

$X \rightarrow X'$ caractérisée par λ_x , F_x , et

$Y \rightarrow Y'$ caractérisée par λ_y , F_y ,

où X' et Y' sont des isotopes « fils » respectifs des isotopes X et Y, la décroissance de l'isotope X (respectivement Y) étant caractérisée par l'émission d'une particule gamma par l'isotope fils X' (respectivement Y') à une énergie E_1 (respectivement E_2) suivant une probabilité d'émission $I_\gamma(E_1)$ (respectivement $I_\gamma(E_2)$), les grandeurs λ_x et λ_y étant, respectivement, la constante de décroissance radioactive de l'isotope principal X et la constante de décroissance radioactive de l'isotope d'impureté Y, et F_x et F_y étant, respectivement, un facteur de branchement de décroissance d'isotope utilisé pour une mesure d'activité de l'isotope principal et un facteur de branchement de décroissance d'isotope utilisé pour une mesure d'activité de l'isotope d'impureté, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- mesure, à l'aide d'un banc de spectrométrie placé dans une configuration de mesure donnée, d'une surface nette $S(E_1)$ d'un premier pic gamma de la matière fissile à une première énergie E_1 et d'une

- surface nette $S(E_2)$ d'un deuxième pic gamma de la matière fissile à une deuxième énergie E_2 ,
- détermination, à l'aide de sources ponctuelles de référence, dans la configuration de mesure donnée, d'un rendement d'absorption totale de référence $R_0^P(E_1)$ à la première énergie E_1 et d'un rendement d'absorption totale de référence $R_0^P(E_2)$ à la deuxième énergie E_2 ,
 - calcul, à l'aide d'un calculateur, dans la configuration de mesure donnée, d'un transfert de rendement intégral $T(E_1)$ de la matière fissile à la première énergie E_1 et d'un transfert de rendement intégral $T(E_2)$ de la matière fissile à la deuxième énergie E_2 , et
 - calcul, à l'aide d'un calculateur, du rapport isotopique de matière fissile R à l'aide de l'équation :

$$R = \frac{\lambda_X}{\lambda_Y} \times \frac{S(E_2)}{S(E_1)} \times \frac{I_\gamma(E_1)}{I_\gamma(E_2)} \times \frac{R_0^P(E_1)}{R_0^P(E_2)} \times \frac{T(E_1)}{T(E_2)} \times \frac{F_X}{F_Y}$$

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les mesures de surface nette de la matière fissile sont effectuées, avant introduction de la matière fissile dans la chambre à fission, sur un échantillon du bloc de la matière fissile destiné à équiper la chambre à fission.

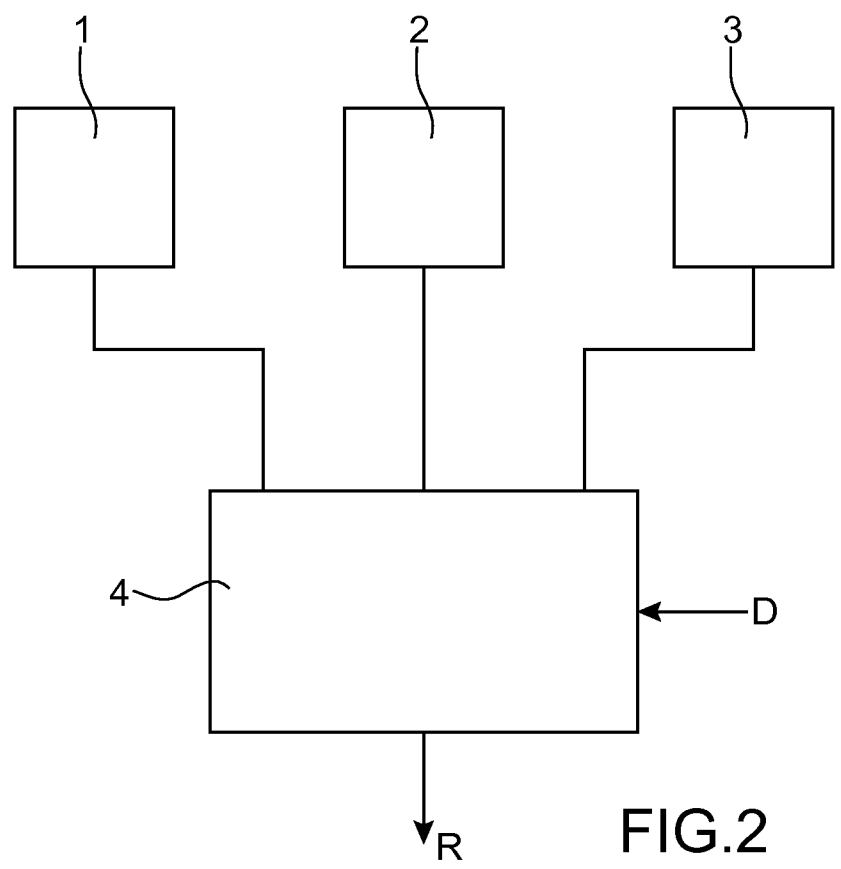
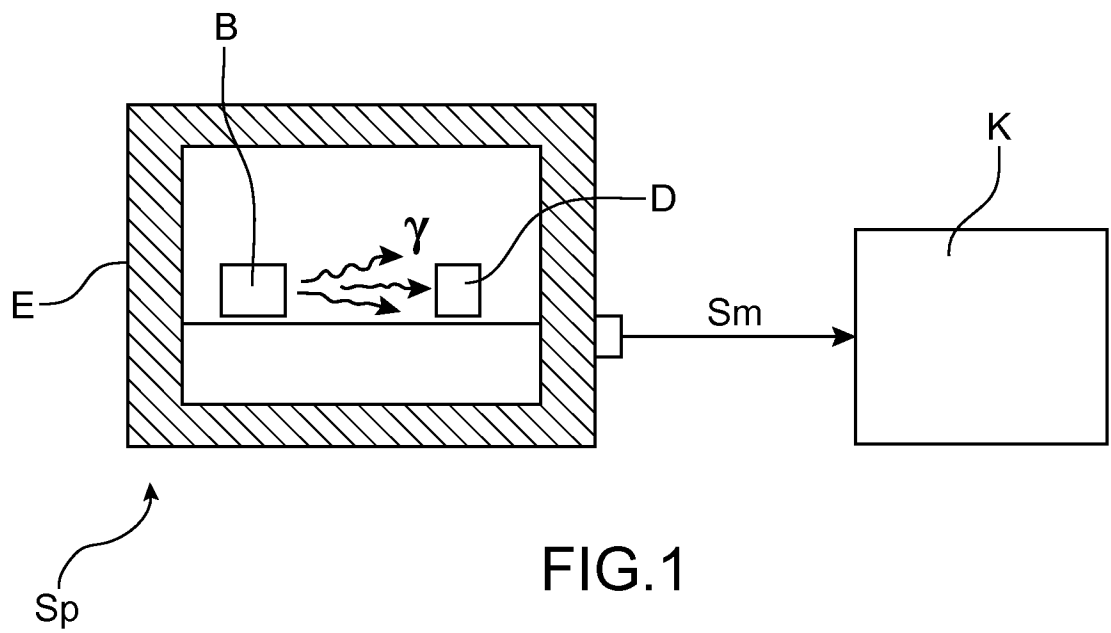
3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les mesures de surface nette de la matière fissile sont effectuées, avant introduction de la matière fissile dans la chambre à fission, sur le bloc

de matière fissile destiné à équiper la chambre à fission.

4. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les mesures de surface nette de la matière fissile sont effectuées, après introduction de la matière fissile dans la chambre à fission, sur la chambre à fission dans son entier.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'isotope principal est l'Uranium ^{238}U et l'isotope d'impureté est l'Uranium ^{235}U .

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la durée des étapes de mesure de surface nette est comprise entre une heure et dix semaines.



2/3

FIG.3

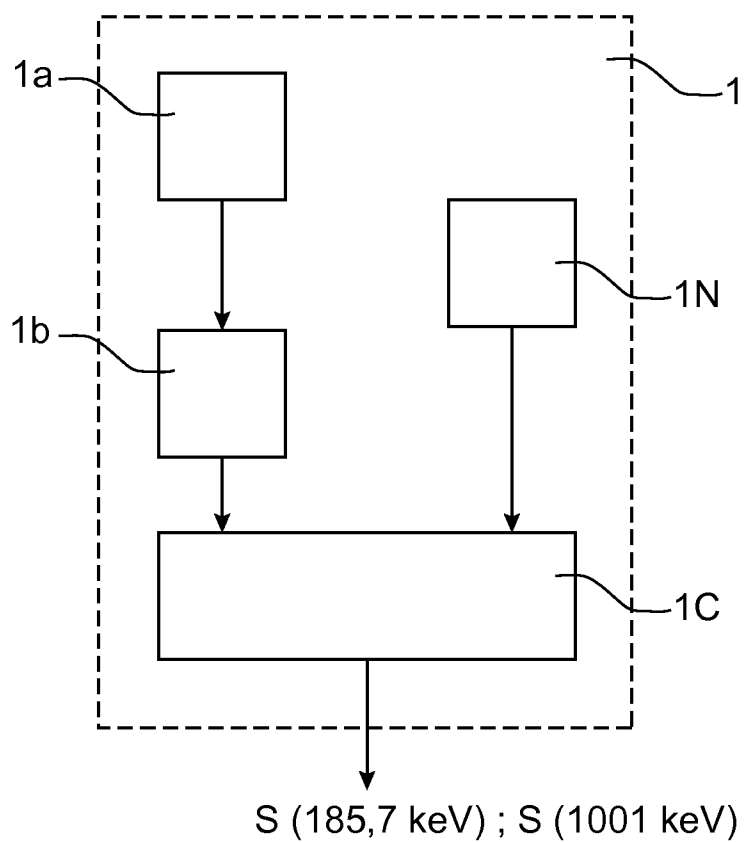
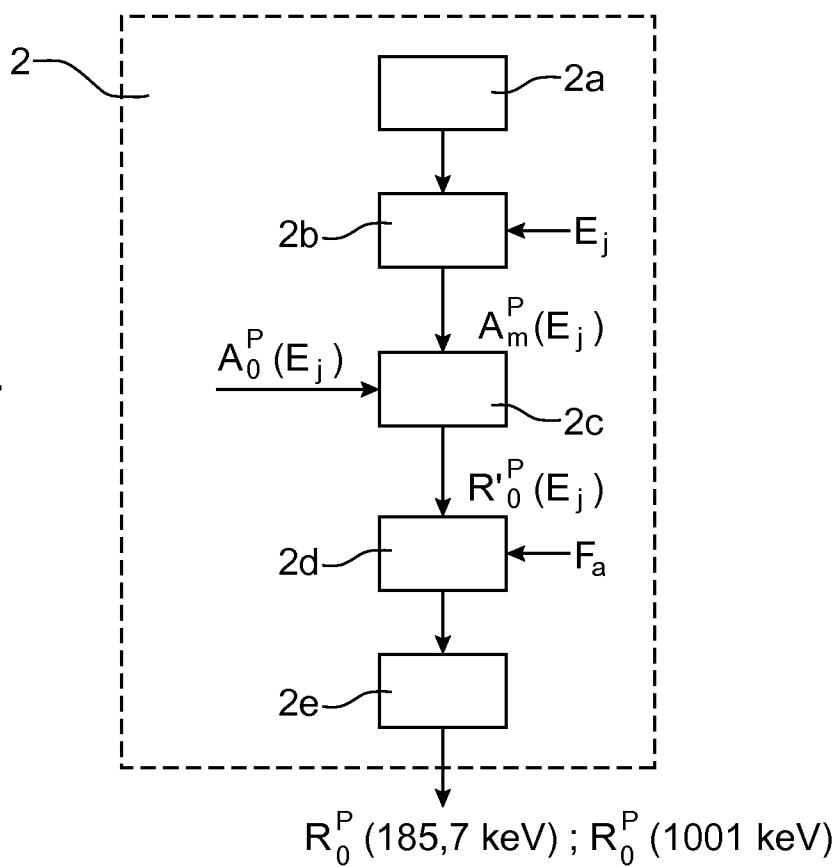
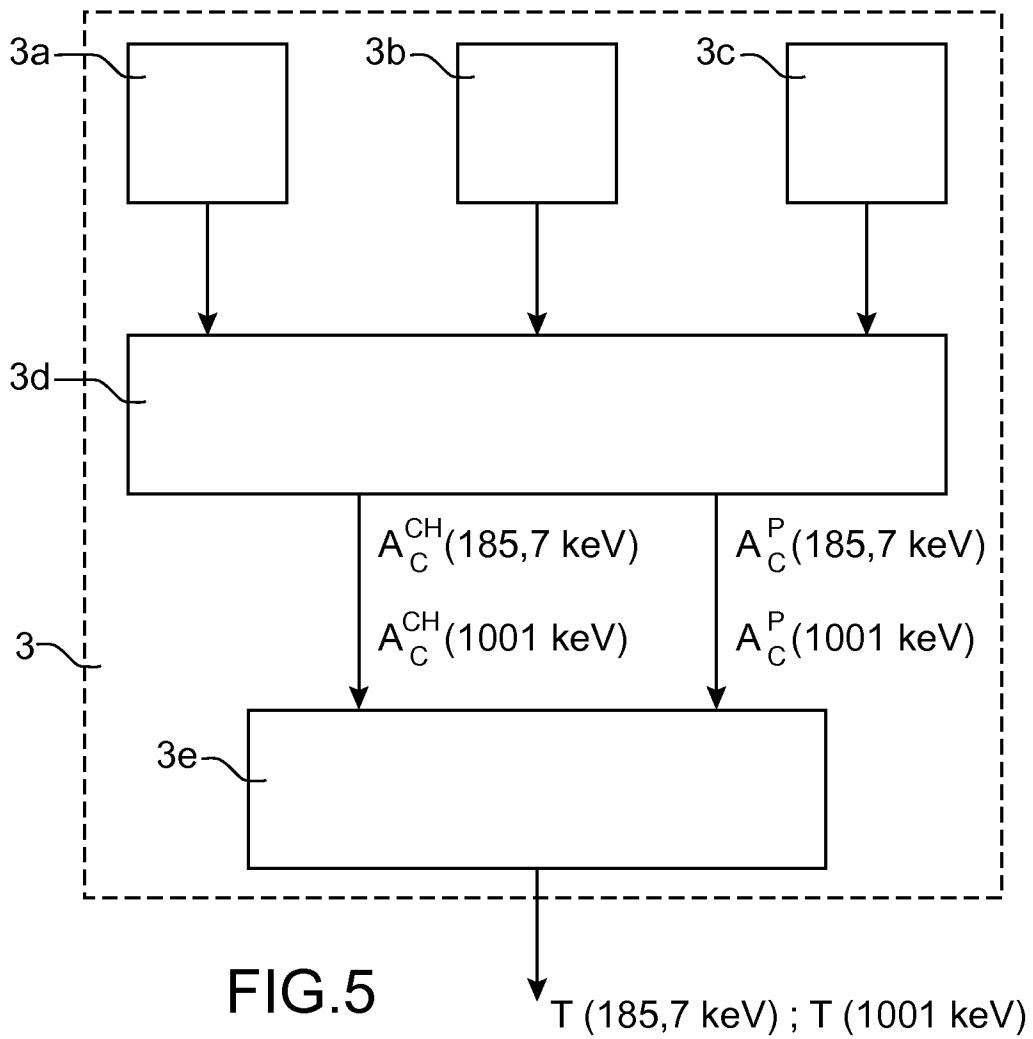


FIG.4



3/3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/064220

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G01T3/00 G21C17/108
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)

G01T G21C

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	BOUCHARD J ET AL: "The burn-up and fuel cycle aspects of LMFBR physics assessment", PROGRESS IN NUCLEAR ENERGY, PERGAMON PRESS, OXFORD, GB LNKD- DOI:10.1016/0149-1970(85)90011-3, vol. 16, no. 3, 1 January 1985 (1985-01-01), pages 251-285, XP025414445, ISSN: 0149-1970 [retrieved on 1985-01-01] pages 251,252 page 274 - page 280 -----	1-6
A	EP 0 596 814 A1 (MERLIN GERIN [FR]) 11 May 1994 (1994-05-11) * abstract; figure 1 ----- -/--	1-6



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

5 January 2011

Date of mailing of the international search report

12/01/2011

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

Wulveryck, J

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/064220

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FILLIATRE P ET AL: "Reasons why Plutonium 242 is the best fission chamber deposit to monitor the fast component of a high neutron flux", NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION - A:ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL LNKD-DOI:10.1016/J.NIMA.2008.05.049, vol. 593, no. 3, 11 August 2008 (2008-08-11), pages 510-518, XP025472040, ISSN: 0168-9002 [retrieved on 2008-06-01] pages 510,511 -----	1-6
A	EP 0 715 186 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 5 June 1996 (1996-06-05) column 1, line 49 - column 2, line 34; figures 1,2 -----	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2010/064220

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)		Publication date
EP 0596814	A1	11-05-1994	CA	2109357 A1		15-04-1995
			FR	2697640 A1		06-05-1994
			US	5430777 A		04-07-1995
EP 0715186	A1	05-06-1996	DE	69519977 D1		01-03-2001
			DE	69519977 T2		09-08-2001
			ES	2155506 T3		16-05-2001
			FR	2727526 A1		31-05-1996
			JP	8222179 A		30-08-1996

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2010/064220

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. G01T3/00 G21C17/108
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)
G01T G21C

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

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	BOUCHARD J ET AL: "The burn-up and fuel cycle aspects of LMFBR physics assessment", PROGRESS IN NUCLEAR ENERGY, PERGAMON PRESS, OXFORD, GB LNKD- DOI:10.1016/0149-1970(85)90011-3, vol. 16, no. 3, 1 janvier 1985 (1985-01-01), pages 251-285, XP025414445, ISSN: 0149-1970 [extrait le 1985-01-01] pages 251,252 page 274 - page 280	1-6
A	EP 0 596 814 A1 (MERLIN GERIN [FR]) 11 mai 1994 (1994-05-11) * abrégé; figure 1 ----- -/--	1-6

☒ 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

5 janvier 2011

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

12/01/2011

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

Wulveryck, J

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	FILLIATRE P ET AL: "Reasons why Plutonium 242 is the best fission chamber deposit to monitor the fast component of a high neutron flux", NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION - A:ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL LNKD-DOI:10.1016/J.NIMA.2008.05.049, vol. 593, no. 3, 11 août 2008 (2008-08-11) , pages 510-518, XP025472040, ISSN: 0168-9002 [extrait le 2008-06-01] pages 510,511 -----	1-6
A	EP 0 715 186 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 5 juin 1996 (1996-06-05) colonne 1, ligne 49 - colonne 2, ligne 34; figures 1,2 -----	1-6

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2010/064220

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 0596814	A1	11-05-1994	CA 2109357 A1 15-04-1995
			FR 2697640 A1 06-05-1994
			US 5430777 A 04-07-1995
EP 0715186	A1	05-06-1996	DE 69519977 D1 01-03-2001
			DE 69519977 T2 09-08-2001
			ES 2155506 T3 16-05-2001
			FR 2727526 A1 31-05-1996
			JP 8222179 A 30-08-1996