



(51) Classification internationale des brevets :
G01T 1/36 (2006.01) G21K 1/02 (2006.01)
G01T 7/00 (2006.01) G01T 1/164 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2016/074607

(22) Date de dépôt international :
13 octobre 2016 (13.10.2016)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1559721 13 octobre 2015 (13.10.2015) FR

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

(72) Inventeur : ALLINEI, Pierre-Guy; 20 L'Oliveraie du soleil, 04310 Peyruis (FR).

(74) Mandataire : BREVALEX; 95, rue d'Amsterdam, 75378 Paris Cedex 8 (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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, 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, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

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

(54) Title : ATTENUATION DEVICE FOR NUCLEAR INSTRUMENTATION BY GAMMA SPECTROMETRY COMPRISING A REVOLUTION-SHAPED CAVITY

(54) Titre : DISPOSITIF D'ATTÉNUATION POUR L'INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA COMPORTANT UNE CAVITÉ DE FORME DE RÉVOLUTION

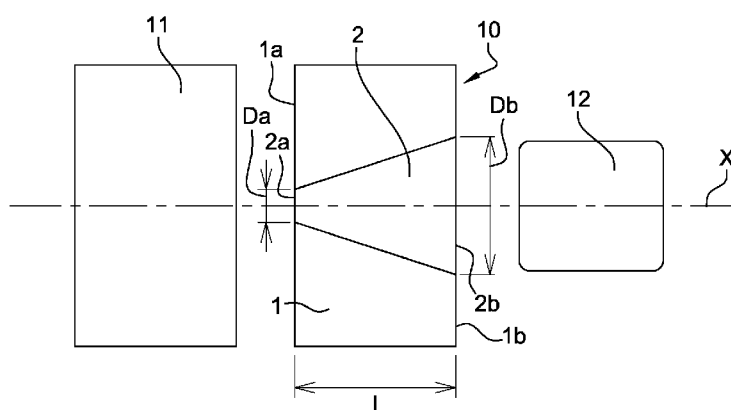


Fig. 1

(57) Abstract : The main subject matter of the invention is an attenuation device (10) for a nuclear instrumentation device (20) for measurement by gamma spectrometry, allowing the selective attenuation of the gamma radiation originating from at least one emitting source (11) emitting towards at least one gamma spectrometry detector (12), characterised in that it comprises a main body (1) comprising an inlet face (1a) and an outlet face (1b), and further comprising a revolution-shaped inner cavity (2) opening on the inlet face (1a) of the main body (1) via an inlet opening (2a), so as to receive the gamma radiation, and on the outlet face (1b) of the main body (1) via an outlet opening (2b), so as to transmit the gamma radiation.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



L'objet principal de l'invention est un dispositif d'atténuation (10) pour un dispositif d'instrumentation nucléaire (20) pour la mesure par spectrométrie gamma, permettant l'atténuation sélective des rayonnements gamma provenant d'au moins une source émettrice (11) en direction d'au moins un détecteur de spectrométrie gamma (12), caractérisé en ce qu'il comporte un corps principal (1) comprenant une face d'entrée (1a) et une face de sortie (1b), et comprenant en outre une cavité interne (2), présentant une forme de révolution et débouchant sur la face d'entrée (1a) du corps principal (1) par une ouverture d'entrée (2a), pour recevoir les rayonnements gamma et sur la face de sortie (1b) du corps principal (1) par une ouverture de sortie (2b), pour transmettre les rayonnements gamma.

DISPOSITIF D'ATTÉNUATION POUR L'INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA COMPORTANT UNE CAVITÉ DE FORME DE RÉVOLUTION

DESCRIPTION

5 DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention se rapporte au domaine technique de la mesure nucléaire, qui permet la mesure des rayonnements produits par des matériaux ou des réactions nucléaires. Plus particulièrement, elle concerne le domaine de la spectrométrie gamma, qui permet d'identifier des éléments radioactifs par la mesure de l'énergie des rayonnements gamma émis.

L'invention trouve des applications dans différents domaines de l'industrie, et notamment pour tout type de mesure par spectrométrie gamma pour laquelle le spectre des émissions gamma présente une intensité très élevée à basse énergie. En particulier, l'invention peut avantageusement s'appliquer à la mesure en ligne de spectres provenant de produits de fission « frais » ou « à vie courte », c'est-à-dire des produits issus d'un combustible en cours d'irradiation ou fraîchement irradié.

Ainsi, par exemple, l'invention peut être utilisée pour la détection de défauts de gainage sur un réacteur nucléaire en cours de fonctionnement, pour la caractérisation du relâchement de radionucléides lors d'expériences de fusion de combustible, ou encore pour le diagnostic de l'état du combustible après un accident grave par mesure des effluents gazeux issu d'un « dégonflage » de l'enceinte d'un réacteur nucléaire, entre autres.

L'invention propose ainsi un dispositif d'atténuation pour un dispositif d'instrumentation nucléaire pour la mesure par spectrométrie gamma, permettant une atténuation sélective des rayonnements gamma en fonction de leur énergie au moyen d'une cavité interne avec une forme de révolution, ainsi qu'un dispositif d'instrumentation nucléaire comportant un tel dispositif d'atténuation.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Dans le domaine de la spectrométrie gamma, l'instrumentation nucléaire, qui permet de produire des données spectrométriques, comprend différents types de détecteurs.

5 Ces détecteurs sont répartis entre les détecteurs à scintillation (ou scintillateur), comprenant les scintillateurs organiques et inorganiques, et les détecteurs à semi-conducteur, qui sont des détecteurs à particules utilisant la technologie des semi-conducteurs pour la détection des rayonnements.

10 De façon générale, un détecteur de spectrométrie gamma, par exemple un détecteur à semi-conducteur du type germanium ou tellure de cadmium ou un scintillateur du type iodure de sodium ou bromure de lanthane, présente naturellement une sensibilité plus élevée pour les photons de basse énergie, soit quelques dizaines de kiloélectronvolts (keV).

15 Ainsi, lors de la mesure de spectres complexes dont la gamme d'énergie s'étend de quelques dizaines de kiloélectronvolts (keV) à plusieurs mégaélectronvolts (MeV), il est classique de choisir un détecteur de spectrométrie gamma avec un grand volume de détection afin de maximiser la sensibilité à haute énergie.

20 Cependant, dans certaines configurations, notamment lorsque le flux de photons à basse énergie est important, choisir d'augmenter la taille du détecteur génère un risque de saturation de l'électronique de traitement provoquée par l'hyper sensibilité du détecteur pour les photons de basse énergie. De plus, le déséquilibre du spectre entre haute énergie et basse énergie implique une augmentation du temps de comptage afin que les pics d'énergie les plus élevés soient facilement détectables.

25 Afin de remédier à ce phénomène de saturation, on connaît déjà deux solutions couramment employées. Premièrement, il peut être possible d'éloigner au maximum le détecteur de la source émettrice, ce qui est généralement impossible du fait de l'augmentation d'encombrement du système de mesure que cela implique. De plus, cette possibilité peut permettre de corriger le problème de saturation mais aucunement celui de déséquilibre entre les hautes et basses énergies. Deuxièmement, il peut être
30 possible d'interposer un écran entre la source émettrice et le détecteur, ce qui a toutefois

pour effet d'empêcher la mesure des faibles énergies puisqu'elles ne peuvent pas traverser un tel écran.

Par ailleurs, des solutions ont également été proposées dans la littérature brevet pour équiper des spectromètres gamma de systèmes destinés à favoriser la mesure par spectrométrie gamma. Ainsi, par exemple, la demande internationale WO 01/42814 A2 décrit un détecteur de rayonnement à collimation variable comprenant un système automatique pour l'ajustement du flux de rayonnement gamma reçu par un spectromètre gamma du type tellure de cadmium afin d'éviter d'atteindre la saturation de l'électronique de traitement. La demande de brevet français FR 2 879 304 A1 divulgue un dispositif d'imagerie gamma comprenant un système de collimateur destiné à réduire l'angle solide de mesure d'un spectromètre gamma afin de l'ajuster au champ de vision d'une gamma caméra et donc d'obtenir une information spectrale en complément de la répartition spatiale. Dans ces deux exemples de réalisation, les systèmes prévus ne permettent pas d'ajuster la réponse en énergie d'un spectromètre gamma.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

L'invention a ainsi pour but de remédier au moins partiellement aux besoins mentionnés précédemment et aux inconvénients relatifs aux réalisations de l'art antérieur.

L'invention a ainsi pour objet, selon l'un de ses aspects, un dispositif d'atténuation pour un dispositif d'instrumentation nucléaire pour la mesure par spectrométrie gamma, permettant l'atténuation sélective des rayonnements gamma provenant d'au moins une source émettrice en direction d'au moins un détecteur de spectrométrie gamma, caractérisé en ce qu'il comporte un corps principal comprenant une face d'entrée, destinée à faire face à ladite au moins une source émettrice, et une face de sortie, destinée à faire face audit au moins un détecteur de spectrométrie gamma, le corps principal comprenant en outre une cavité interne, présentant une forme de révolution et débouchant sur la face d'entrée du corps principal par une ouverture d'entrée, pour recevoir les rayonnements gamma de ladite au moins une source émettrice, et sur la face de sortie du corps principal par une ouverture de sortie, pour

transmettre les rayonnements gamma en direction dudit au moins un détecteur de spectrométrie gamma.

De façon avantageuse, la plus grande dimension transversale de l'ouverture d'entrée est inférieure à la plus grande dimension transversale de l'ouverture de sortie.

5 Par ailleurs, il est à noter que l'ouverture d'entrée de la cavité interne peut correspondre sensiblement à un point lorsque la plus grande dimension transversale de cette ouverture d'entrée est sensiblement nulle. Autrement dit, l'ouverture d'entrée peut être totalement obturée de sorte à correspondre ainsi à un diamètre d'entrée nul. Dans ce cas, aucune zone de la source émettrice n'est mesurée sans atténuation. Les
10 rayonnements gamma traversent alors une portion plus ou moins épaisse de l'écran formé par le dispositif d'atténuation.

Grâce à l'invention, il est ainsi possible de disposer d'un dispositif d'atténuation pour un dispositif d'instrumentation nucléaire spécifique formant un écran entre une source émettrice de rayonnements gamma et un détecteur de spectrométrie
15 gamma, adapté à l'atténuation des rayonnements gamma et permettant avantageusement d'ajuster la sensibilité en énergie de la mesure nucléaire tout en réduisant le flux de photons au niveau du détecteur de spectrométrie gamma afin d'éviter sa saturation.

Le dispositif d'atténuation selon l'invention peut en outre comporter l'une ou
20 plusieurs des caractéristiques suivantes prises isolément ou suivant toutes combinaisons techniques possibles.

La cavité interne peut préférentiellement être remplie par un gaz, par exemple de l'air.

De plus, le corps principal est en particulier un corps de forme cylindrique.

25 La forme de révolution de la cavité interne du corps principal peut être de tout type. De préférence, la forme de révolution de la cavité interne est une forme conique ou tronconique mais toute autre forme de révolution peut être employée. De cette façon, il peut être possible d'avoir une plus grande souplesse pour ajuster l'efficacité de mesure.

Le corps principal peut être constitué d'une seule et unique partie, étant notamment réalisé en un seul et unique matériau. En variante, le corps principal peut être constitué d'un assemblage de plusieurs parties, étant notamment réalisé par la juxtaposition de plusieurs matériaux.

5 En particulier, le corps principal peut être au moins partiellement réalisé en cuivre et/ou en aluminium.

Par ailleurs, la plus grande dimension transversale du corps principal peut correspondre au plus grand des diamètres parmi le diamètre du détecteur et le diamètre de la source émettrice.

10 En outre, la plus grande dimension transversale de l'ouverture de sortie, notamment le diamètre de sortie, ou la plus grande dimension transversale de l'ouverture d'entrée, notamment le diamètre d'entrée, peut être égale au diamètre du corps principal.

L'invention a également pour objet, selon un autre de ses aspects, un
15 dispositif d'instrumentation nucléaire pour la mesure par spectrométrie gamma, caractérisé en ce qu'il comporte :

- un détecteur de spectrométrie gamma,
- une source émettrice de rayonnements gamma,
- un dispositif d'atténuation tel que défini précédemment, disposé entre le
20 détecteur de spectrométrie gamma et la source émettrice.

Ce dispositif d'instrumentation nucléaire peut être d'un seul tenant. De plus, il peut être préférentiellement de forme cylindrique.

Le dispositif d'atténuation et le dispositif d'instrumentation nucléaire selon l'invention peuvent comporter l'une quelconque des caractéristiques énoncées dans la
25 présente description, prises isolément ou selon toutes combinaisons techniquement possibles avec d'autres caractéristiques.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

L'invention pourra être mieux comprise à la lecture de la description détaillée qui va suivre, d'exemples de mise en œuvre non limitatifs de celle-ci, ainsi qu'à l'examen des figures, schématiques et partielles, du dessin annexé, sur lequel :

- 5 - la figure 1 est un schéma illustratif d'un exemple de dispositif d'instrumentation nucléaire pour la mesure par spectrométrie gamma comportant un dispositif d'atténuation conforme à l'invention,
- les figures 2A et 2B sont des exemples de vues tridimensionnelles de dispositifs d'atténuation conformes à l'invention,
- 10 - la figure 3 représente, selon une vue en perspective et en semi-coupe, un autre exemple de dispositif d'instrumentation nucléaire compact comportant un dispositif d'atténuation conforme à l'invention,
- la figure 4A illustre, en coupe, un exemple de dispositif d'instrumentation nucléaire dépourvu d'un dispositif d'atténuation conforme à l'invention, et les figures 4B
15 à 4F illustrent, en coupe, différents exemples de dispositif d'instrumentation nucléaire comportant un dispositif d'atténuation conforme à l'invention,
- la figure 5 représente sous forme graphique la variation des efficacités des cinq configurations de calcul des figures 4B à 4F et la configuration de référence de la figure 4A en fonction de l'énergie d'une gamme considérée d'énergie,
- 20 - la figure 6 représente sous forme graphique l'évolution du nombre de coups en sortie de détecteur issu de résultats de calcul en fonction de l'énergie d'une gamme considérée d'énergie, et
- la figure 7 représente sous forme graphique les spectres de la figure 6 normalisés à l'énergie de 2,392 MeV en fonction de l'énergie de la gamme considérée
25 d'énergie.

Dans l'ensemble de ces figures, des références identiques peuvent désigner des éléments identiques ou analogues.

De plus, les différentes parties représentées sur les figures ne le sont pas nécessairement selon une échelle uniforme, pour rendre les figures plus lisibles.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Dans toute la description, il est noté que les termes « entrée » et « sortie » sont à considérer par rapport à la direction principale X (représentée sur la figure 1) d'émission des rayonnements gamma par la source émettrice 11 vers le détecteur de spectrométrie gamma 12.

En référence aux figures 1 à 3, on a représenté différents exemples de dispositifs d'instrumentation nucléaire 20 et de dispositifs d'atténuation 10 conformes à l'invention.

Comme on peut le voir sur les figures 1, 2A et 2B, chaque dispositif d'atténuation 10 comporte un corps principal 1 comprenant une face d'entrée 1a, dirigée vers la source émettrice 11, et une face de sortie 1b, dirigée vers le détecteur de spectrométrie gamma 12.

La source émettrice 11 est la source volumique contenant les radionucléides émettant les rayonnements gamma destinés à être mesurés. Le détecteur de spectrométrie gamma 12 peut être de tout type, et notamment un détecteur à semi-conducteur, par exemple du type germanium ou tellure de cadmium, ou un scintillateur, par exemple, du type iodure de sodium ou bromure de lanthane.

Le corps principal 1 s'apparente ainsi à une pièce massive intercalée entre le détecteur de spectrométrie gamma 12 et la source émettrice 11.

Ce corps principal 1 comporte avantageusement une cavité interne 2, présentant une forme de révolution et débouchant sur la face d'entrée 1a du corps principal 1 par une ouverture d'entrée 2a, pour recevoir les rayonnements gamma de la source émettrice 11, et sur la face de sortie 1b du corps principal 1 par une ouverture de sortie 2b, pour transmettre les rayonnements gamma en direction du détecteur de spectrométrie gamma 12.

La forme de révolution de la cavité interne 2 peut être de tout type. Avantageusement tout de même, la forme de révolution de la cavité interne 2 est choisie pour être une forme tronconique, comme représentée sur les figures 1, 2A, 2B, 3, 4B et 4C, ou pour être une forme conique, comme représentée sur les figures 4D, 4E et 4F.

De plus, comme on peut mieux le voir sur les figures 2A, 2B et 3, la forme du corps principal 1 est cylindrique.

Le dispositif d'atténuation 10 conforme à l'invention, dans lequel est ménagée la cavité interne 2 de forme de révolution, permet d'ajuster avantageusement la sensibilité en énergie du dispositif d'instrumentation nucléaire 20 tout en réduisant le flux de photons au niveau du détecteur de spectrométrie gamma 12, de sorte à éviter ainsi sa saturation.

Cet ajustement de sensibilité en énergie est obtenu en jouant sur quatre paramètres principaux liés au corps principal 1, à savoir : le ou les matériaux constitutifs du corps principal 1 ; la longueur axiale L (i.e. selon la direction principale X) du corps principal 1 ; la plus grande dimension transversale de l'ouverture d'entrée 2a de la cavité interne 2 ; et la plus grande dimension transversale de l'ouverture de sortie 2b de la cavité interne 2.

L'optimisation de ces paramètres énoncés ci-dessus permet d'ajuster efficacement la fonction de réponse en énergie globale du détecteur de spectrométrie gamma 12 et du dispositif d'atténuation 10, pour l'adapter aux besoins de caractérisation des différentes énergies présentes dans le spectre d'émission de rayonnements gamma de la source émettrice 11.

Ainsi, le corps principal 1 peut être constitué d'un seul et unique matériau, ou encore être réalisé par la juxtaposition d'une pluralité de matériaux. Ce ou ces matériaux peuvent notamment être choisis parmi le cuivre et l'aluminium.

Par ailleurs, la longueur axiale L du corps principal 1 peut être supérieure ou égale à 1 cm.

En outre, conformément à l'invention et comme représenté sur la figure 1, la plus grande dimension transversale D_a de l'ouverture d'entrée 2a, ici le diamètre d'entrée D_a , est inférieure à la plus grande dimension transversale D_b de l'ouverture de sortie 2b, ici le diamètre de sortie D_b .

De plus, la plus grande dimension transversale D_b possible (maximale) de l'ouverture de sortie 2b, ici le diamètre maximum de sortie D_b , est égale au diamètre du corps principal 1.

Par ailleurs, comme représenté sur la figure 3, le dispositif d'instrumentation nucléaire 20 est avantageusement compact et d'un seul tenant, présentant une forme générale cylindrique.

La source émettrice 11 contient les radionucléides à mesurer, répartis de manière homogène dans tout le volume. Elle est séparée du corps principal 1 du dispositif 10 par un ou plusieurs éléments de séparation, seule la paroi 13 formant un écran aux rayonnements étant représentée sur la figure 3. Cette paroi 13 est par exemple réalisée en acier.

De plus, le détecteur de spectrométrie gamma 12 comporte un capot de détecteur 14, par exemple réalisé en aluminium, et un cristal de détecteur 15, par exemple de type germanium coaxial.

Afin de vérifier les performances du dispositif d'atténuation 10 conforme à l'invention, et partant d'une configuration de dispositif d'instrumentation nucléaire 20 semblable à celle de la figure 3, déclinée avec plusieurs exemples de réalisation du corps principal 1, des calculs d'efficacité E de mesure ont été réalisés pour une gamme d'énergie allant de 80 keV à 4 MeV.

Cette efficacité E de mesure est plus précisément définie par la relation suivante :

$$E = N_{pd} / N_{pe},$$

dans laquelle :

N_{pd} représente le nombre de photons détectés, et

N_{pe} représente le nombre de photons émis.

Le nombre de photons correspond au nombre d'impulsions dans le pic d'absorption totale à l'énergie considérée.

La figure 4A illustre ainsi, en coupe, un exemple de dispositif d'instrumentation nucléaire dépourvu d'un dispositif d'atténuation conforme à l'invention, et les figures 4B à 4F illustrent, en coupe, différents exemples de dispositif d'instrumentation nucléaire 20 comportant un dispositif d'atténuation 10 conforme à l'invention.

L'exemple de la figure 4A constitue le cas de référence (sans dispositif 10) pour lequel le détecteur de spectrométrie gamma 12, du type germanium, est situé en face de la source émettrice 11 contenant un mélange homogène de radionucléides.

Les exemples des figures 4B et 4C illustrent des corps principaux 1 pourvus de cavités internes 2 de forme tronconique mais de longueurs axiales L différentes, tandis que les exemples des figures 4D, 4E et 4F illustrent des corps principaux 1 pourvus de cavités internes 2 de forme conique, la longueur axiale L du corps principal 1 de l'exemple de la figure 4D étant plus faible que les longueurs axiales des corps principaux 1 des exemples des figures 4E et 4F et les corps principaux 1 des exemples des figures 4E et 4F étant réalisés dans des matériaux différents.

Plus précisément, pour l'exemple de la figure 4B, le corps principal 1 est réalisé en cuivre. Il présente une longueur L égale à 8,5 cm. De plus, le diamètre Da de l'ouverture d'entrée 2a de la cavité interne 2 est de 2,1 cm, tandis que le diamètre Db de l'ouverture de sortie 2b de la cavité interne 2 est de 7,6 cm.

Pour l'exemple de la figure 4C, le corps principal 1 est réalisé en cuivre. Il présente une longueur L égale à 6,4 cm. De plus, le diamètre Da de l'ouverture d'entrée 2a de la cavité interne 2 est de 0,5 cm, tandis que le diamètre Db de l'ouverture de sortie 2b de la cavité interne 2 est de 7,6 cm.

Pour l'exemple de la figure 4D, le corps principal 1 est réalisé en cuivre. Il présente une longueur L égale à 7,8 cm. De plus, le diamètre Da de l'ouverture d'entrée 2a de la cavité interne 2 est sensiblement nul, tandis que le diamètre Db de l'ouverture de sortie 2b de la cavité interne 2 est de 7,6 cm.

Pour l'exemple de la figure 4E, le corps principal 1 est réalisé en cuivre. Il présente une longueur L égale à 9,25 cm. De plus, le diamètre Da de l'ouverture d'entrée 2a de la cavité interne 2 est sensiblement nul, tandis que le diamètre Db de l'ouverture de sortie 2b de la cavité interne 2 est de 3 cm.

Enfin, pour l'exemple de la figure 4F, le corps principal 1 est réalisé en aluminium. Il présente une longueur L égale à 9,25 cm. De plus, le diamètre Da de l'ouverture d'entrée 2a de la cavité interne 2 est sensiblement nul, tandis que le diamètre Db de l'ouverture de sortie 2b de la cavité interne 2 est de 3 cm.

Les cinq configurations des figures 4B à 4F ont été optimisées au moyen d'une approche semi-empirique considérant à la fois un transport monodirectionnel des photons et parallèle à l'axe du détecteur, et un rendement de détection surfacique du détecteur constant quelle que soit la position de la trajectoire du photon incident monodirectionnel par rapport à la surface d'entrée du cristal de détecteur 15.

En référence à la figure 5, on a représenté sous forme graphique la variation des efficacités E de mesure pour les cinq configurations de calcul (b), (c), (d), (e) et (f) respectivement des figures 4B à 4F et la configuration de référence (a) de la figure 4A en fonction de l'énergie E_{nr} , exprimée en keV, de la gamme considérée d'énergie allant de 80 keV à 4 MeV.

On constate alors que, pour les corps principaux 1 des configurations (a), (b) et (c) respectives des exemples des figures 4B, 4C et 4D, la fermeture progressive du diamètre d'entrée de l'ouverture d'entrée 2a de la cavité interne 2, à savoir de 2,1 cm à sensiblement 0 cm, permet de régler la sensibilité à basse énergie, soit inférieure à 100 keV, tout en aplatissant la forme de l'efficacité E au-delà de 150 keV.

Par ailleurs, les courbes correspondantes des configurations (e) et (f) respectives des exemples des figures 4E et 4F permettent de visualiser l'impact du changement de matériau du corps principal 1 sur la forme de l'efficacité. Ainsi, l'utilisation de l'aluminium plutôt que du cuivre, combinée à une optimisation de la forme du corps principal 1, permet de réduire l'écart entre les valeurs minimale et maximale de l'efficacité E. On obtient en particulier moins d'un facteur 4 entre la valeur minimale et la valeur maximale de l'efficacité E pour la courbe (f).

Ces cinq configurations (b) à (f) d'ensemble 20 de mesure nucléaire conformes à l'invention ont en outre été testées sur un spectre complexe composé de cinq types de radionucléides sous forme gazeuse, à savoir : I-131, I-133, KR-88, RU-103 et XE-133, émettant des raies gamma couvrant une zone allant de 80 keV à 3 MeV.

Le radionucléide prépondérant est le XE-133, présentant une émission la plus intense à 80 keV, qui présente une activité mille fois plus élevée que les autres radionucléides. Ainsi, le spectre d'émission est très déséquilibré avec une très forte

intensité en dessous de 100 keV, et la présence de nombreux pics nettement moins intenses au-dessus de 1 MeV.

Alors, la figure 6 représente sous forme graphique les résultats des calculs de spectres effectués avec le code de transport Monte-Carlo à N particules (ou encore code MCNPX). Plus précisément, le graphique de la figure 6 représente l'évolution du nombre de coups N_c en fonction de l'énergie E_{nr} , exprimée en MeV, de la gamme considérée d'énergie allant de 80 keV à 3 MeV.

L'impact des diverses configurations (b) à (f) de corps principaux 1 des dispositifs 10 des figures 4B à 4F est difficile à apprécier sur cette figure 6.

Ainsi, la figure 7 présente sous forme graphique les spectres S de la figure 6 normalisés à l'énergie de 2,392 MeV, qui représente le pic le plus intense à haute énergie, en fonction de l'énergie E_{nr} , exprimée en MeV.

Alors, la figure 7 permet de constater que la présence du dispositif d'atténuation 10 conforme à l'invention permet d'ajuster plus finement l'amplitude du pic à 80 keV par rapport à celui à 2,392 MeV.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux exemples de réalisation qui viennent d'être décrits. Diverses modifications peuvent y être apportées par l'homme du métier.

REVENDICATIONS

1. Dispositif d'atténuation (10) pour un dispositif d'instrumentation nucléaire (20) pour la mesure par spectrométrie gamma, permettant l'atténuation sélective des rayonnements gamma provenant d'au moins une source émettrice (11) en direction d'au moins un détecteur de spectrométrie gamma (12), caractérisé en ce qu'il comporte un corps principal (1) comprenant une face d'entrée (1a), destinée à faire face à ladite au moins une source émettrice (11), et une face de sortie (1b), destinée à faire face audit au moins un détecteur de spectrométrie gamma (12), le corps principal (1) comprenant en outre une cavité interne (2), présentant une forme de révolution et débouchant sur la face d'entrée (1a) du corps principal (1) par une ouverture d'entrée (2a), pour recevoir les rayonnements gamma de ladite au moins une source émettrice (11), et sur la face de sortie (1b) du corps principal (1) par une ouverture de sortie (2b), pour transmettre les rayonnements gamma en direction dudit au moins un détecteur de spectrométrie gamma (12).

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que la plus grande dimension transversale (Da) de l'ouverture d'entrée (2a) est inférieure à la plus grande dimension transversale (Db) de l'ouverture de sortie (2b).

3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la cavité interne (2) est remplie par un gaz, par exemple de l'air.

4. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le corps principal (1) est un corps de forme cylindrique.

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la forme de révolution de la cavité interne (2) est une forme conique ou tronconique.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le corps principal (1) est constitué d'une seule et unique partie, étant notamment réalisé en un seul et unique matériau.

5 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le corps principal (1) est constitué d'un assemblage de plusieurs parties, étant notamment réalisé par la juxtaposition de plusieurs matériaux.

10 8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le corps principal (1) est au moins partiellement réalisé en cuivre et/ou en aluminium.

15 9. Dispositif d'instrumentation nucléaire (20) pour la mesure par spectrométrie gamma, caractérisé en ce qu'il comporte :
- un détecteur de spectrométrie gamma (12),
- une source émettrice (11) de rayonnements gamma,
- un dispositif d'atténuation (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes, disposé entre le détecteur de spectrométrie gamma (12) et la source émettrice (11).

20 10. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé en ce qu'il est d'un seul tenant.

25 11. Dispositif selon la revendication 9 ou 10, caractérisé en ce qu'il est de forme cylindrique.

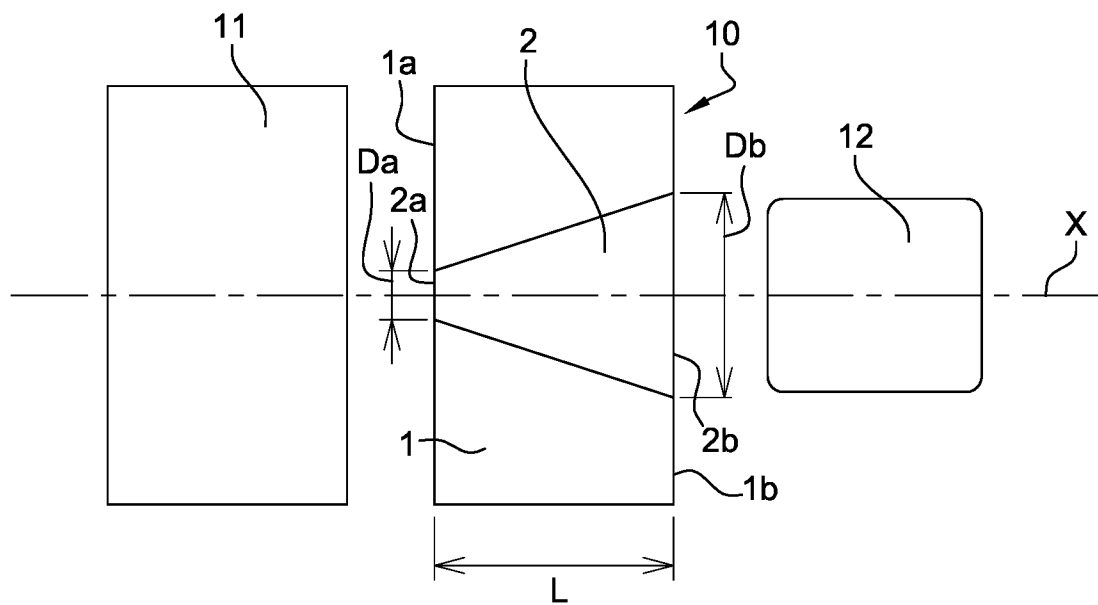


Fig. 1

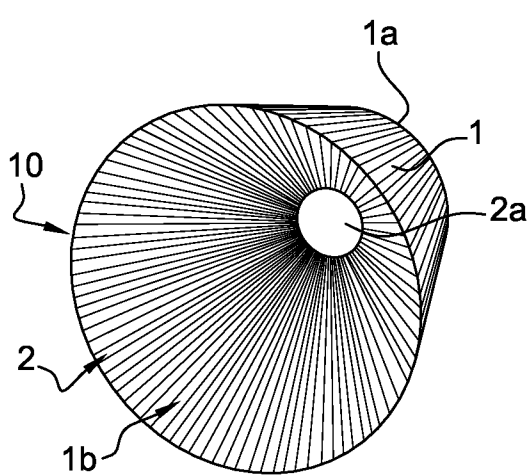


Fig. 2A

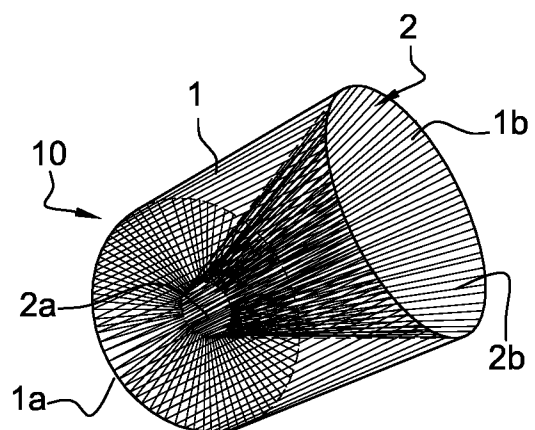


Fig. 2B

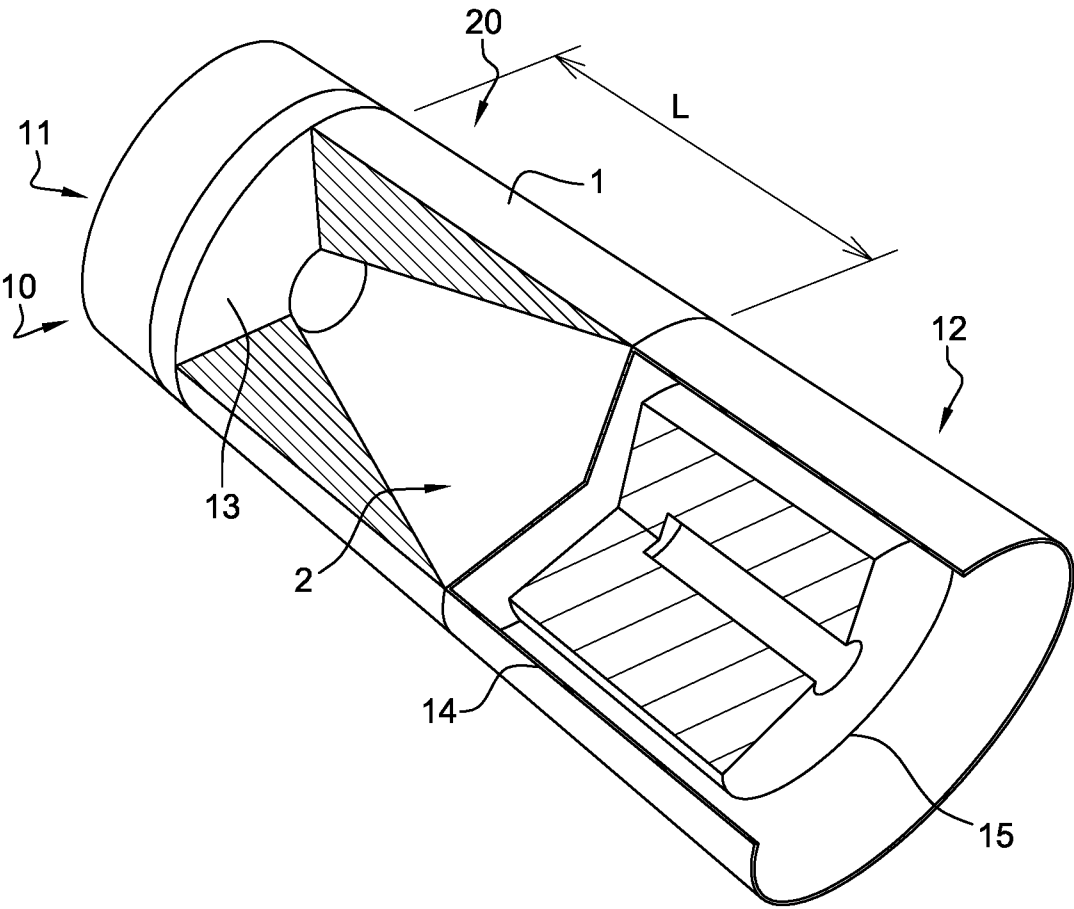
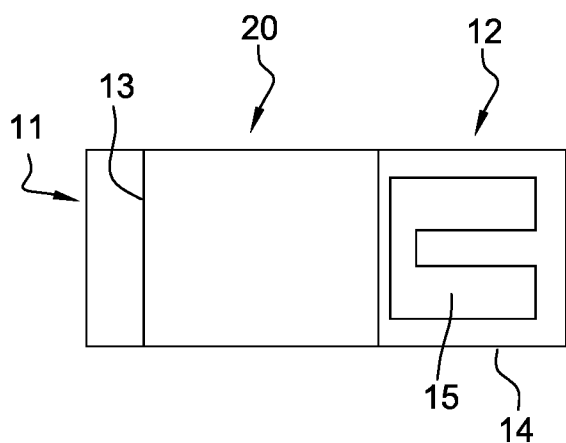
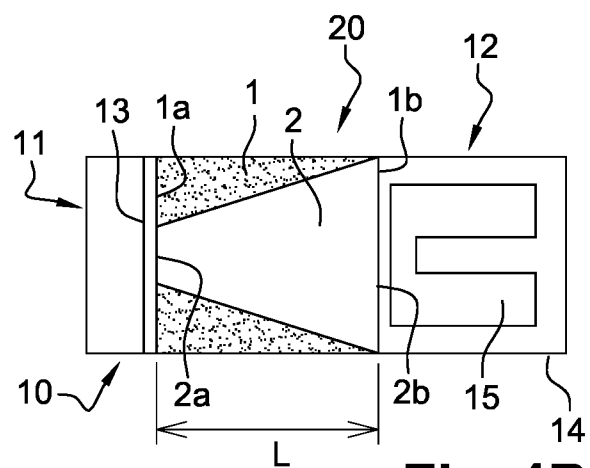
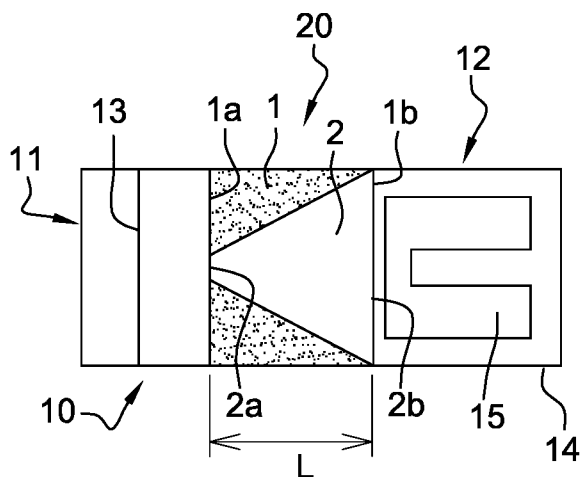
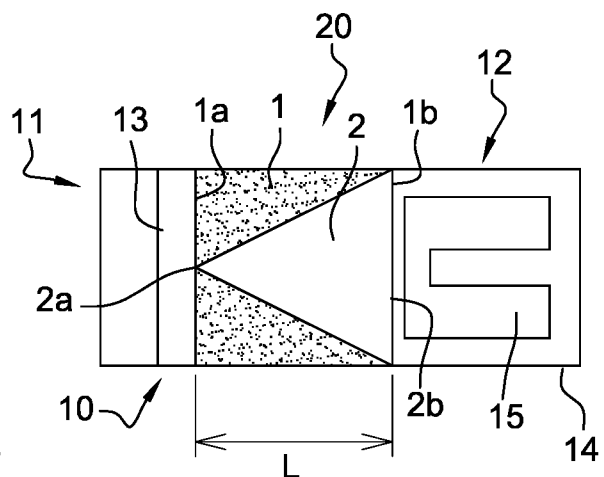
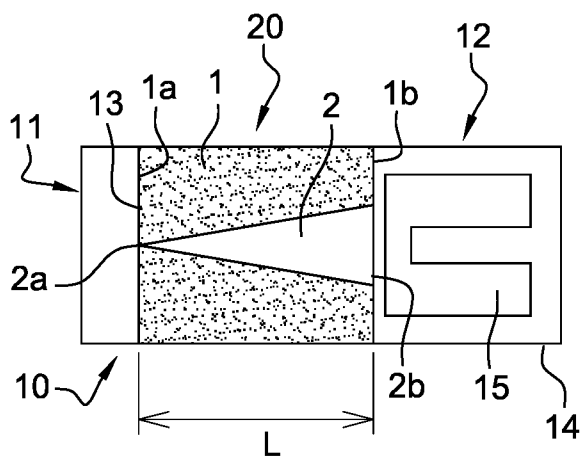
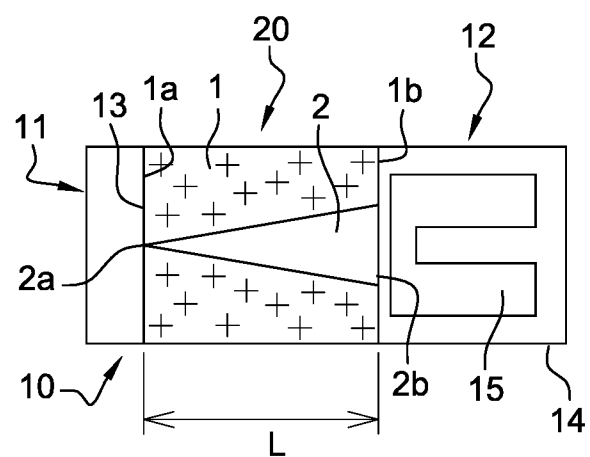
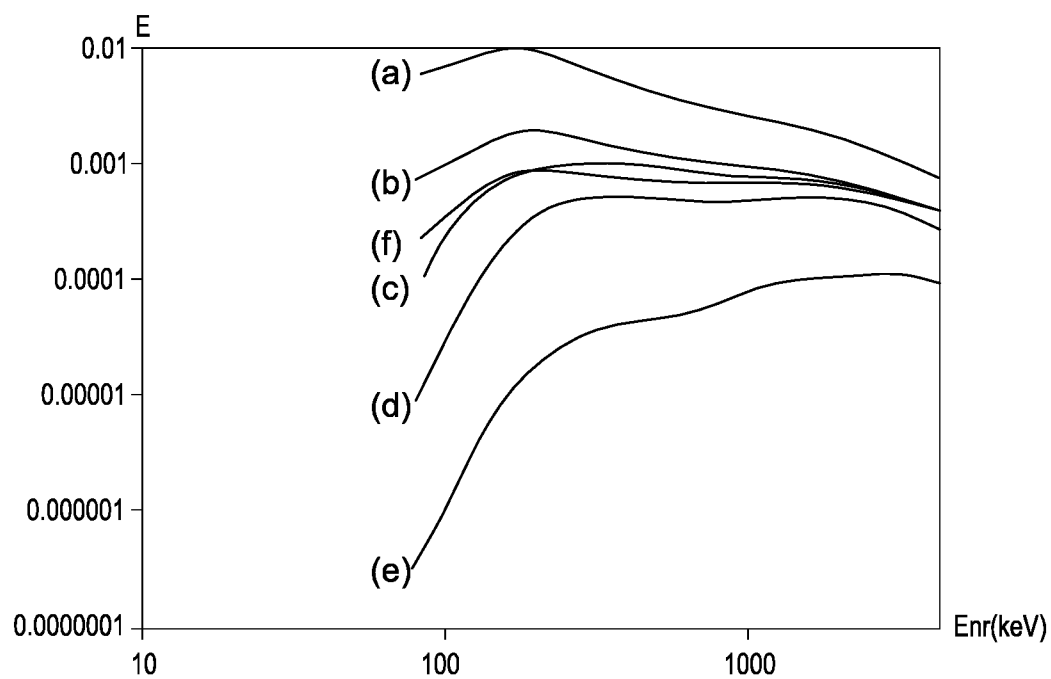
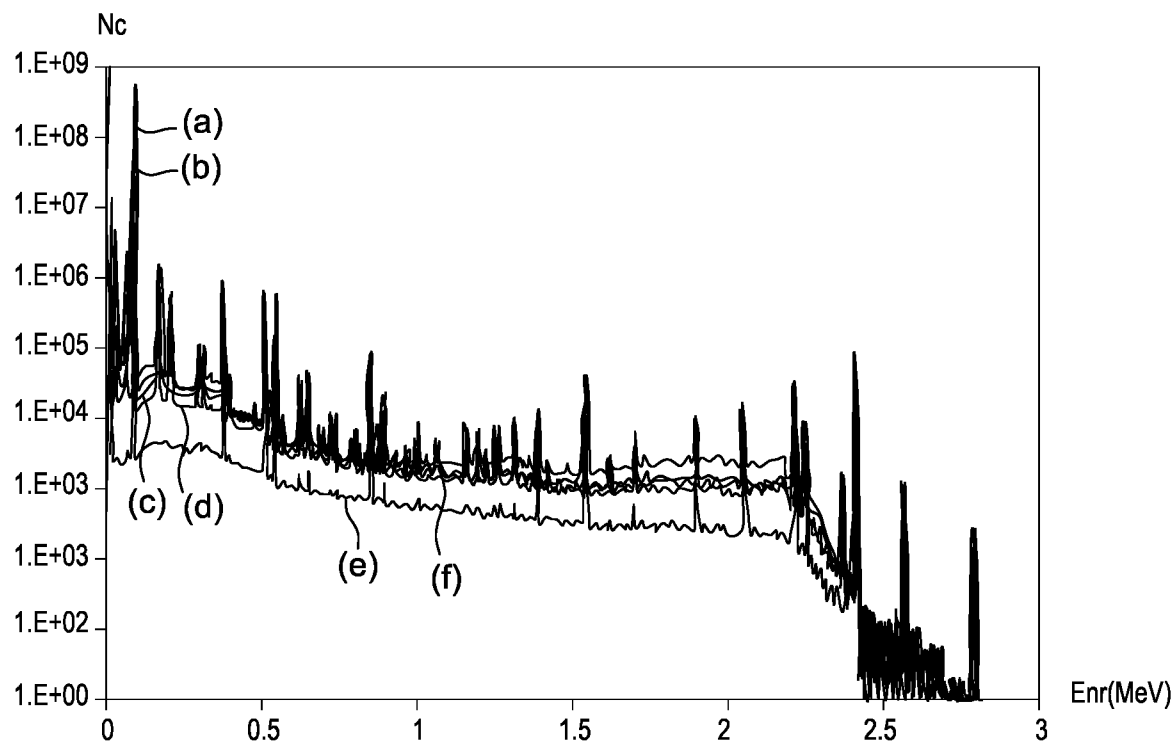


Fig. 3

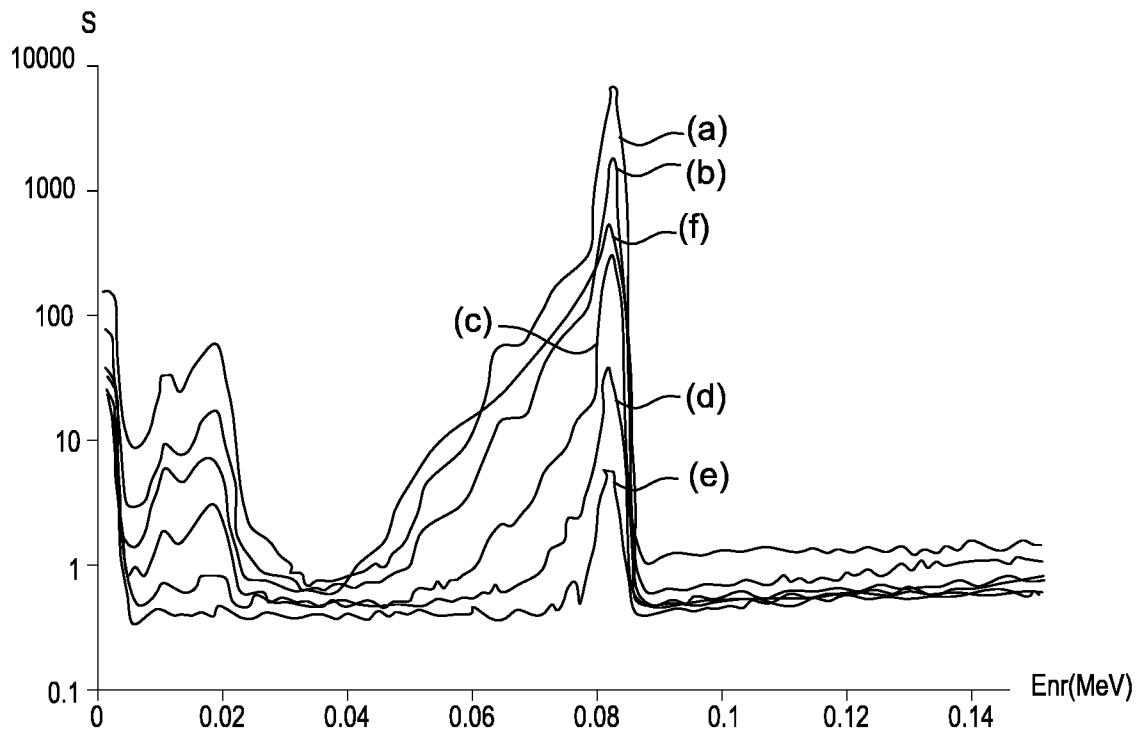
3 / 5

**Fig. 4A****Fig. 4B****Fig. 4C****Fig. 4D****Fig. 4E****Fig. 4F**

4 / 5

**Fig. 5****Fig. 6**

5 / 5

**Fig. 7**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/074607

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. G01T1/36 G01T7/00 G21K1/02 G01T1/164 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 G21K		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, BIOSIS, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2012/061581 A1 (HUGG JAMES W [US] ET AL) 15 March 2012 (2012-03-15) abstract paragraph [0026] paragraph [0053] - paragraph [0054] figures 1-3	1-3,5-7
X	----- FR 2 879 304 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 16 June 2006 (2006-06-16) cited in the application abstract page 7 - page 8 figures 1,2 -----	1,3,4,8-11
☐ 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 application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 16 January 2017	Date of mailing of the international search report 24/01/2017	
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 Ordavo, Ivan	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/074607

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2012061581	A1	15-03-2012	NONE

FR 2879304	A1	16-06-2006	AT 503198 T 15-04-2011
		CN 101080650 A	28-11-2007
		EP 1825298 A1	29-08-2007
		ES 2363606 T3	10-08-2011
		FR 2879304 A1	16-06-2006
		JP 4960255 B2	27-06-2012
		JP 2008523405 A	03-07-2008
		US 2008135767 A1	12-06-2008
		WO 2006090035 A1	31-08-2006

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2016/074607

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01T1/36 G01T7/00 G21K1/02 G01T1/164 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 G21K		
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, BIOSIS, COMPENDEX, INSPEC, 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
X	US 2012/061581 A1 (HUGG JAMES W [US] ET AL) 15 mars 2012 (2012-03-15) abrégé alinéa [0026] alinéa [0053] - alinéa [0054] figures 1-3	1-3,5-7
X	FR 2 879 304 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 16 juin 2006 (2006-06-16) cité dans la demande abrégé page 7 - page 8 figures 1,2	1,3,4,8-11
☐ 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 16 janvier 2017		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 24/01/2017
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 Ordavo, Ivan

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2016/074607

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2012061581	A1	15-03-2012	AUCUN	

FR 2879304	A1	16-06-2006	AT 503198 T	15-04-2011
			CN 101080650 A	28-11-2007
			EP 1825298 A1	29-08-2007
			ES 2363606 T3	10-08-2011
			FR 2879304 A1	16-06-2006
			JP 4960255 B2	27-06-2012
			JP 2008523405 A	03-07-2008
			US 2008135767 A1	12-06-2008
			WO 2006090035 A1	31-08-2006
