

12

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 31 octobre 1984.

30 Priorité : US, 1<sup>er</sup> novembre 1983, n° 547.681; 22 février 1984, n° 582.510.

43 Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 18 du 3 mai 1985.

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. — US.

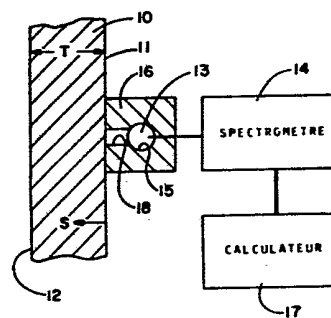
72 Inventeur(s) : Raymond Gold et William N. McElroy.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : Brevatome.

54 Procédé non destructif pour déterminer l'exposition d'un objet aux neutrons, et déterminer des concentrations de constituants dans cet objet.

57 Ce procédé non destructif, pour déterminer l'exposition d'un objet aux neutrons et déterminer des concentrations de constituants dans cet objet constitué par exemple par un récipient de pression 10 d'un réacteur nucléaire, est basé sur l'observation de rayons caractéristiques émis par des produits d'activation dans l'objet 10, l'observation étant faite au moyen d'un spectromètre à rayons gamma continu 13, 14. Le spectromètre 13, 14 voit l'objet 10 au travers d'un collimateur approprié 18, afin de déterminer le taux d'émission absolu de ces rayons gamma caractéristiques, et de connaître ainsi l'activité absolue de produits d'activation donnés, situés dans l'objet 10. Ces données peuvent alors être utilisées pour en déduire la dépendance spatiale et angulaire de l'exposition aux neutrons, ou les concentrations spatiales de constituants dans des régions de l'objet auxquelles on s'intéresse.



PROCEDE NON-DESTRUCTIF POUR DETERMINER L'EXPOSITION D'UN  
OBJET AUX NEUTRONS, ET DETERMINER DES CONCENTRATIONS DE  
CONSTITUANTS DANS CET OBJET

5           La présente invention, qui fait suite à la  
demande de brevet américain No 547,681 déposée le  
1.11.1983, concerne de manière générale la détermination  
de l'exposition d'un objet aux neutrons et de  
concentrations de constituants dans cet objet, lequel  
10 peut être constitué, par exemple, par une cuve ou récipient de  
pression d'un réacteur nucléaire. Il s'agit d'une  
technique radiométrique basée sur le fait qu'une telle  
exposition aux neutrons induit de la radioactivité sous  
la forme de rayons gamma caractéristiques.

15           L'invention se rapporte en particulier à un  
système initialement mis au point pour déterminer, par  
une technique non-destructive, l'exposition aux neutrons  
d'un récipient de pression de réacteur. De telles  
déterminations sont importantes pour la vérification de  
20 la longévité utile prévue pour un réacteur nucléaire  
actif. Cette technique non-destructive constitue une  
alternative à des techniques classiques dans lesquelles  
on compte directement l'activité dans une zone  
d'échantillon physiquement prélevé sur le récipient de  
25 pression.

Le présent procédé de dosimétrie neutronique  
utilise des techniques de spectrométrie gamma continue  
disponibles, dans une application physique spécialisée,  
pour parvenir à une méthode de contrôle non-destructif  
efficace utilisable dans l'industrie nucléaire. Une  
30 sonde mobile, ayant un détecteur blindé de manière  
spéciale est partiellement exposée à une ou plusieurs  
surfaces par l'intermédiaire d'une ouverture de  
collimateur dirigée vers la surface contrôlée. En  
35 mesurant le spectre continu de rayons gamma détectés à

différents niveaux d'énergie, et en enregistrant une ou plusieurs valeurs de pics de densité de flux des rayons gamma à des niveaux d'énergie caractéristiques de l'exposition aux neutrons, on peut élaborer

5 mathématiquement une relation entre les valeurs des pics de densité de flux et la densité d'activité spatiale. Toutefois, comme cette relation va aussi comporter une deuxième inconnue, à savoir le coefficient d'atténuation neutronique de l'objet contrôlé, il faut soit effectuer

10 des contrôles séparés pour mesurer ce coefficient d'atténuation, soit réaliser un autre ensemble de mesures avec un agencement de collimation différent, selon un deuxième angle solide, puis résoudre mathématiquement les relations résultantes, afin de déterminer les deux

15 quantités inconnues qu'elles contiennent. Une fois que la valeur de densité d'activité spatiale des rayons gamma aux niveaux d'énergie caractéristiques est identifiée, on peut élaborer, par voie déductive, de l'information concernant la distribution spatiale de

20 l'exposition aux neutrons, en utilisant des relations connues entre valeurs de densité d'activité spatiale et exposition aux neutrons.

Une discussion générale de l'effet Compton dans les détecteurs au germanium "dopés" au lithium (lithium-drifted)

25 utilisés en spectroscopie gamma peut être trouvée dans les brevets américains No 3,612,869 et 3,527, 944. Le brevet américain No 4,203,037 dévoile un agencement de radiation sous collimation, pour exposer séquentiellement des portions d'un objet à un

30 rayonnement X. D'autres brevets américains ayant un caractère de généralité par rapport à la présente invention sont les brevets No 3,483,376; 4,345,153; 2,998,550; 3,786,253; 3,043,955; 3,225,196; et 3,311,770.

35 Il convient en outre de remarquer que la

fragilisation des aciers des récipients de pression des réacteurs constitue un facteur significatif dans la détermination de la longévité prévisible des récipients de pression. Comme les soudures sont généralement les régions les plus faibles de tels récipients, c'est habituellement leur longévité prévue qui régit la longévité utile du récipient. Comme le cuivre est une variable cruciale contribuant à la fragilisation de corps en acier induite par radioactivité, il est hautement souhaitable d'être en mesure de déterminer ou de mesurer de manière non-destructive la concentration du cuivre dans les métaux de base des récipients de pression, et plus particulièrement dans les soudures de ces derniers. La présente invention, outre qu'elle offre un procédé pour déterminer de manière non-destructive l'exposition aux neutrons de corps irradiés, peut aussi être utilisée pour mesurer la concentration du cuivre, tout aussi bien que les concentrations d'autres constituants des métaux de base et des soudures de récipients de pression.

Un objet de la présente invention est de parvenir à un procédé efficace, non-destructif, pour mesurer l'exposition aux neutrons autour d'un objet en utilisant un détecteur mobile éliminant la nécessité de prélever des échantillons de la structure de l'objet.

Un autre objet de l'invention est de parvenir à un procédé d'utilisation efficace d'interrelations connues entre les composantes neutroniques et gamma du champ de radiation mixte typiquement rencontré dans les environnements de réacteur, afin de permettre aux techniques de mesure de rayonnement gamma d'être utilisées indirectement en tant que techniques de mesure d'exposition aux neutrons.

L'invention a en outre pour objet d'utiliser le procédé non-destructif de détermination de l'exposition

aux neutrons sus-mentionné pour mesurer en plus les concentrations de divers constituants au sein d'un objet irradié auquel on s'intéresse.

5 D'autres objets, avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront dans la description présentée ci-après, et seront facilement compris par l'homme de l'art prenant connaissance de ce qui suit, ou pourront être enseignés par la mise en oeuvre de l'invention. Les objets et avantages de l'invention peuvent être réalisés  
10 et obtenus par les moyens d'instrumentation et les combinaisons indiqués en particulier dans le présent mémoire.

Pour atteindre les objets mentionnés plus haut, et d'autres qui ressortent du présent mémoire, le  
15 procédé selon la présente invention comporte fondamentalement les étapes suivantes : on expose, au travers d'une ouverture de collimateur, un détecteur de rayonnement gamma à une portion limitée de la surface de l'objet; on mesure électroniquement le spectre continu  
20 de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie; on enregistre la valeur de pic de densité de flux à un niveau d'énergie choisi, caractéristique de l'exposition aux neutrons; on identifie la densité d'activité spatiale à partir de sa relation avec la valeur de pic  
25 de densité de flux mesurée, et l'on élabore de l'information concernant l'exposition aux neutrons, en utilisant sa relation connue avec la valeur de densité d'activité spatiale identifiée.

Selon un autre aspect de l'invention,  
30 correspondant à ses buts et objets, ce procédé non-destructif pour déterminer l'exposition aux neutrons peut aussi être utilisé pour mesurer des concentrations de constituants dans l'objet irradié, en quantifiant des pics qui, dans le spectre gamma, sont dûs à l'activation  
35 de tels constituants.

Pour récapituler, la première application mentionnée du procédé selon l'invention peut comporter les étapes suivantes :

- 5 - on expose le détecteur blindé d'un spectromètre à une portion limitée d'une surface de l'objet, au travers d'une ouverture de collimateur à petit diamètre dirigée vers la surface;
- 10 - on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie au cours d'une exploration de la zone de surface par le détecteur blindé;
- on enregistre une valeur de pic de densité de flux des rayons gamma à un niveau d'énergie choisi, caractéristique de l'exposition aux neutrons;
- 15 - on identifie une relation définissant une correspondance entre la valeur de pic de densité de flux et la densité d'activité spatiale, pour les rayons gamma mesurés; et
- on élabore de l'information spatiale et  
20 angulaire concernant l'exposition aux neutrons de la surface de l'objet, au moyen de relations connues de rattachement à la valeur de densité d'activité spatiale identifiée.

Pour déterminer in situ l'exposition aux neutrons  
25 à laquelle une surface choisie sur un objet a été soumise, le procédé comporte les étapes suivantes :

- on expose un détecteur au silicium "dopé"  
au lithium, ce détecteur appartenant à un  
spectromètre de rayonnement gamma de recul Compton, à  
30 une portion limitée de la surface de l'objet, cela au travers d'une ouverture de collimateur à petit diamètre dirigée vers la surface;
- on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie  
35 pendant une première exploration de la surface par le

détecteur blindé;

- on enregistre une première valeur de pic de densité de flux de rayons gamma à un niveau d'énergie choisi, caractéristique de l'exposition aux neutrons;

5 - on identifie une première relation définissant une correspondance entre la première valeur de pic de densité de flux et la valeur de densité d'activité spatiale pour les rayons gamma mesurés;

- on modifie l'exposition du détecteur par rapport à la surface;

10 - on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie, au cours d'une deuxième exploration de la zone de surface par le détecteur;

15 - on enregistre une deuxième valeur de pic de densité de flux de rayons gamma au niveau d'énergie précédemment choisi;

- on identifie une deuxième relation définissant une correspondance entre la deuxième valeur de pic de densité de flux et la valeur de densité d'activité spatiale;

- on résout la première et la deuxième relations, pour identifier la valeur de densité d'activité spatiale des rayons gamma au niveau d'énergie caractéristique; et

25 - on élabore de l'information concernant l'exposition spatiale et angulaire de l'objet aux neutrons, au moyen de relations connues de rattachement à la valeur de densité d'activité spatiale identifiée.

30 Enfin, pour déterminer les concentrations de constituants d'un objet irradié choisi, le procédé comporte les étapes suivantes :

- on expose le détecteur d'un spectromètre à une portion limitée de la surface de l'objet, au travers d'une ouverture de collimateur à petit diamètre dirigée vers la surface;

35

- on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie au cours d'une exploration de la surface par le détecteur blindé;

5 - on enregistre une valeur de pic de densité de flux des rayons gamma à un niveau d'énergie choisi caractéristique de l'exposition aux neutrons;

- on identifie une relation établissant une correspondance entre la valeur de pic de densité de flux et la densité d'activité spatiale pour les rayons gamma mesurés; et

10 - on élabore de l'information concernant les concentrations spatiales de constituant sur l'étendue de la surface de l'objet, au moyen de relations connues de rattachement à la valeur de densité d'activité spatiale identifiée.

Les caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus complètement à l'aide de la description d'exemples de mise en oeuvre et du dessin annexé, présentés à titre non limitatif. Sur le dessin :

20 - la figure 1 montre schématiquement l'appareillage utilisé pour la mise en oeuvre du procédé; et

- la figure 2 représente un organigramme simplifié des étapes du procédé.

25 Les publications et extraits mentionnés ci-après constituent des références permettant de mieux apprécier le contexte dans lequel l'invention se situe.

Une description générale des possibilités de pratiquer la dosimétrie neutronique par spectrométrie gamma continue a été présentée en langue anglaise dans un article de R. Gold, intitulé "Estimates of High Energy Gamma and Neutron Flux from Continuous Gamma-Ray Spectrometry", paru en 1979 aux Etats Unis d'Amérique, dans les pages HEDL37 à HEDL48 d'un compte-rendu intitulé LWR Pressure Vessel Irradiation Surveillance

35

Dosimetry Quarterly Progress Report, July-September 1978, référence NUREG/CR-0551, HEDL-TME 78-8, émis par le Hanford Engineering Development Laboratory, Richland, WA, Etats Unis d'Amérique.

5 La complémentarité des composants d'un champ de radiation mixte a été introduite dans un article en langue anglaise de R.Gold, intitulé "Compton Recoil Gamma-Ray Spectroscopy", paru en 1970 aux Etats Unis d'Amérique, dans les pages 173 à 194 du volume 84 de la  
10 publication Nucl. instr. Methods. En particulier, pour des champs de rayonnement mixtes dans l'environnement d'un réacteur, les composantes neutroniques et gamma possèdent une forte interrelation. Cette interrelation se manifeste par l'existence de "pics" de rayonnement  
15 gamma intenses qui sont en contraste avec le fond ("bruit") gamma continu et possèdent des énergies de rayonnement Gamma caractéristiques et identifiables.

La possibilité de mesurer les spectres continus de rayonnements gamma complexes dans les environnements  
20 de réacteurs, par spectrométrie de rayonnement gamma de recul Compton a été bien établie, comme démontré par les documents suivants, parus en langue anglaise :

- Exposé de R. Gold et B.J. Kaiser, intitulé "Reactor Gamma Spectrometry : Status", paru en 1980,  
25 dans les Proceedings of the Third ASTM-Euratom International Symposium on Reactor Dosimetry, Ispra (Varese), Italie, 1-5 octobre 1979, EUR 6813, Vol.II, 1160 (1980). (exposé d'invité).

- Article de R.Gold et B.J.Kaiser, intitulé  
30 "Gamma-Ray Spectrometry", éditeur W.N.McElroy, paru en 1981, pages 5.2-1-34 de l'ouvrage LWR Pressure Vessel Dosimetry Improvement program: PCA Experiments and Blind Test, NUREG/CR-1861.

- Exposé de R.Gold, B.J. Kaiser et J.P. McNeece,  
35 intitulé "Gamma Ray Spectrometry in Light Water Reactor

Environnements", paru dans les comptes-rendus intitulés Fourth ASTM-Euratom International Symposium on Reactor Dosimetry, NBS, Washington, D.C.(Etats Unis d'Amérique), Mars 1982 (exposé d'invité).

5 Un travail récent effectué, pour remise en état, sur l'unité No 2 du réacteur de Three Mile Island a démontré que le spectromètre original à rayonnement gamma Compton décrit dans les documents sus-mentionnés peut être utilisé dans des champs gamma intenses. En  
10 fait, ce travail a démontré la compatibilité avec des champs pouvant atteindre environ 2000 R/h, si l'on utilise des collimateurs blindés adéquatement conçus. Ce travail est décrit dans le rapport de J.P. McNeece, B.J. Kaiser, R. Gold et W.W.Jenkins, intitulé "Fuel  
15 Assessment of the Three Mile Island Unit 2 makeup Demineralizers by Continuous Gamma-Ray Spectrometry", HEDL-7285 (1983), publié en langue anglaise aux Etats Unis d'Amérique.

La signification du cuivre dans les aciers de  
20 récipients de pression de réacteurs est examinée dans un article de W.N. McElroy et al, intitulé "LWR Pressure Vessel Surveillance Dosimetry Improvement Program", 1982 Annual Report, section 2.4.1., NUREG/CR-2805, Vol. 3, HEDL-TME 82-20 (1983), paru en langue anglaise aux Etats  
25 Unis d'Amérique.

La figure 1 montre schématiquement la configuration d'un appareillage pour mettre en oeuvre cette technique sur un objet exposé à un bombardement par neutrons, cet objet étant, par exemple, la paroi  
30 d'un récipient de pression de réacteur. Une structure de paroi choisie, 10, comportant des faces opposées 11 et 12, est représentée dotée d'une épaisseur de paroi T. En 13, on a représenté un détecteur au silicium "dopé" au Lithium, appartenant au spectromètre de rayonnement  
35 gamma de recul Compton, 14, et disposé dans une cavité

complémentaire 15 que comporte un blindage approprié 16  
utilisé pour ramener l'intensité gamma globale à  
quelques R/h. Le blindage 16 est typiquement en plomb.  
Le spectromètre 14 est fonctionnellement relié à un  
5 calculateur 14 programmé pour l'exécution des étapes de  
calcul et déduction décrites plus bas.

Le blindage 16 comporte une ouverture de  
collimation 18 qui traverse l'un de ses côtés et qui est  
en face d'une surface de l'objet à contrôler. Dans une  
10 structure typique, le blindage 16 peut avoir une forme  
externe cylindrique et être pourvu d'une ouverture de  
collimation cylindrique dotée d'un petit diamètre,  
l'ouverture intersectant le centre du détecteur 13.  
L'ouverture 18 peut être coaxiale à la surface  
15 cylindrique externe du blindage, ou peut être décalée  
par rapport à un tel axe, selon la nature des niveaux de  
fond de rayonnement (bruit de fond) désirée dans les  
étapes de mesure de rayonnement gamma.

La figure 2 illustre globalement le procédé sous  
20 la forme d'un organigramme. La case supérieure 20 se  
rapporte à l'étape de balayage ou exploration de la  
surface 11 ou 12 par le détecteur blindé 13, ce  
détecteur 13 étant partiellement exposé à une portion de  
la surface par l'intermédiaire de l'ouverture de  
25 collimation 18. La case suivante, 21, montre que les  
valeurs des pics dans les spectres de rayonnement gamma  
sont enregistrées. Les valeurs enregistrées à des  
niveaux d'énergie caractéristiques d'un rayonnement  
résultant de l'exposition aux neutrons peuvent alors  
30 être sélectionnées pour être traitées après cela. La  
case 22 indique l'étape consistant à recourir à des  
relations mathématiques connues pour rapporter  
l'information des valeurs de pics choisies à la densité  
d'activité spatiale. La case 23 indique l'étape dans  
35 laquelle, partant de l'information de densité d'activité

spatiale, on déduit ou dérive des valeurs d'exposition aux neutrons ou des valeurs de concentration de constituants.

Le présent procédé comporte une application nouvelle et non-évidente des concepts très généraux décrits dans les publications citées à titre de référence, et parvient à une procédure pratique pour évaluer de manière non-destructive l'exposition aux neutrons d'un objet tel qu'une paroi de récipient de pression de réacteur. Pour la dosimétrie neutronique sur récipient de pression de réacteur, le réacteur est normalement arrêté pendant le contrôle. Les mesures peuvent être effectuées des deux côtés de la paroi, selon l'accessibilité. Par exemple, du côté coeur du récipient de pression de réacteur, on pourrait placer le détecteur blindé du spectromètre Compton à l'endroit d'un coin d'assemblage combustible, de manière à mesurer l'exposition maximale subie par les parois du récipient de pression du réacteur. Des mesures de l'autre côté, par exemple dans la cavité du réacteur, auraient l'avantage d'un bruit de fond réduit.

Bien que non examinée particulièrement ici, l'application de ce procédé à des mesures faites pendant le démarrage à faible puissance, ou éventuellement pendant le fonctionnement à forte puissance, n'est pas exclue du cadre de l'invention. Dans un tel cas d'application, la différence principale serait l'observation de rayons gamma de capture induits par neutrons, provenant du fer et d'éléments constitutifs auxquels on s'intéresse.

Lors de l'exécution de tels contrôles en utilisant l'appareillage représenté de manière générale sur la figure 1, le détecteur 13 "voit" la structure de paroi 10 au travers de l'ouverture de collimation 18, laquelle possède une lumière de diamètre  $d_1$  et une

longueur  $x_1$ . L'intensité de flux absolue d'un rayonnement gamma caractéristique observé à l'énergie  $\epsilon_0$ , cette intensité étant exprimée par  $I_1(\epsilon_0)$  est donnée par l'équation suivante :

$$5 \quad I_1(\epsilon_0) = \int_0^T A(s) e^{-\mu(\epsilon_0)s} \Omega(s) ds \quad (1)$$

Dans cette équation,  $A(s)$  est l'activité absolue par unité de volume à une profondeur  $s$  dans la structure de paroi 10. La variable "profondeur"  $s$  est mesurée à partir de la surface extérieure 11 de la structure de paroi 10, comme représenté sur la figure 1. A une profondeur  $s$ ,  $\Omega(s)$  est l'angle solide projeté via l'ouverture de collimation 18, et  $\mu(\epsilon_0)$  est le coefficient d'atténuation de la structure de paroi 10 pour des rayons gamma d'énergie  $\epsilon_0$ . L'angle solide  $\Omega(s)$  est donné par l'équation :

$$\Omega(s) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{dA}{r^2} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\alpha_1} r d\theta \int_0^{2\pi} \frac{r \sin\theta d\phi}{r^2} \quad (1a)$$

dans laquelle  $\alpha_1 = \tan^{-1}(d/2x_1)$  est le demi-angle du collimateur, de sorte que

$$20 \quad \Omega(s) = \frac{1 - \cos \alpha_1}{2} \quad (2)$$

Comme  $\Omega(s)$  est indépendant de  $s$  et n'est fonction que de la propriété  $\alpha_1$  du collimateur, on peut l'identifier en tant que  $\Omega(\alpha_1)$ .

25 La dépendance spatiale de la densité d'activité  $A(s)$  possède, comme montré antérieurement, un comportement exponentiel, ainsi que démontré dans le document intitulé LWR Pressure Vessel Dosimetry Improvement Program : PCA Experiments and Blind Test, déjà mentionné. Par suite, la densité d'activité spatiale peut être écrite sous la forme

$$30 \quad A(s) = C e^{-\lambda s} \quad (3)$$

Dans cette formule  $C$  est une constante, c'est-à-dire que  $C = A(0)$  représente la densité d'activité à la surface; et  $\lambda$  est le coefficient

35

d'atténuation neutronique du récipient de pression du réacteur. En utilisant les équations (2) et (3) dans l'équation (1), on trouve le résultat de quadrature :

$$I_1(\epsilon_0) = \frac{C\Omega(\alpha_1)}{(\mu-\lambda)} \left[ 1 - e^{-(\mu-\lambda)\tau} \right] \quad (4)$$

En utilisant des estimations numériques dans l'équation (4), on peut montrer que le terme exponentiel est négligeable pour de nombreuses applications, auquel cas l'équation (4) se réduit simplement à

$$I_1(\epsilon_0) = \frac{C\Omega(\alpha_1)}{\mu-\lambda} \quad (5)$$

Les constantes  $C$  et  $\lambda$  de la représentation paramétrique de la densité d'activité peuvent être déterminés de plusieurs manières à partir des équations (4) ou (5). A des fins de simplicité, c'est l'équation (5) qui sera utilisée dans ce traitement. Comme le traitement le plus général peut être facilement obtenu à partir de l'équation (4), d'une manière analogue, seuls les résultats de ce traitement général seront indiqués.

Le coefficient d'atténuation neutronique  $\lambda$  peut être mesuré au cours d'expériences d'étalonnage séparées en champ délimité, faites en rapport avec l'objet à contrôler, par exemple sur des modèles de récipient de pression de réacteur à eau légère étudiés dans l'assemblage de piscine critique décrit dans le document cité en référence "LWR Pressure Vessel Dosimetry Improvement Program : PCA Experiments and Blind Test". En utilisant cette valeur de  $\lambda$ , l'équation (4) ou (5) peut être résolue directement pour  $C$ .

D'autre part, les deux paramètres,  $C$  et  $\lambda$ , peuvent être considérés comme inconnus, auquel cas une mesure supplémentaire est nécessaire. On considère pour cela une deuxième mesure avec un collimateur différent, ayant un angle solide  $\Omega(\alpha_2)$ , faisant un angle  $\theta$  par rapport à la normale à la surface du récipient de

pression du réacteur. En utilisant les résultats ci-dessus, on peut montrer que dans ce cas

$$I_2(\varepsilon_0) = \frac{C\Omega(\alpha_2)}{(\mu - \lambda_2)} \left[ 1 - e^{-(\mu - \lambda_2)T_2} \right] \quad (6)$$

5 relation dans laquelle

$$\lambda_2 = \lambda \cos \theta \quad (7a)$$

et

$$T_2 = T / \cos \theta \quad (7b)$$

10 Comme  $\lambda_2 \leq \lambda$ , on trouve encore que le terme exponentiel peut être négligé pour de nombreuses applications, de sorte que

$$I_2(\varepsilon_0) = \frac{C\Omega(\alpha_2)}{\mu - \lambda_2} \quad (8)$$

15 Prenant le rapport des équations (5) et (8), on trouve

$$I_1(\varepsilon_0) / I_2(\varepsilon_0) = \left( \frac{\mu - \lambda_2}{\mu - \lambda} \right) \left( \frac{\Omega(\alpha_1)}{\Omega(\alpha_2)} \right) \quad (9)$$

ce qui peut être écrit sous la forme

$$\frac{\mu - \lambda_2}{\mu - \lambda} = \delta \quad (9a)$$

20

dans laquelle

$$\delta = \left( \frac{I_1(\varepsilon_0)}{I_2(\varepsilon_0)} \right) \left( \frac{\Omega(\alpha_2)}{\Omega(\alpha_1)} \right) \quad (9b)$$

25 La constante  $\delta$  peut être déterminée en termes de résultats du spectromètre gamma au Si(Li),  $I_1(\varepsilon_0)$  et  $I_2(\varepsilon_0)$ , obtenus avec les deux collimateurs différents. Par suite, l'utilisation de l'équation (7a) dans l'équation (9a) fournit une relation qui peut être résolue pour  $\lambda$ . On trouve

$$30 \quad \lambda = \mu \left( \frac{\delta - 1}{\delta - \cos \theta} \right) \quad (10)$$

Cette valeur de  $\lambda$  peut alors être utilisée dans l'équation (5) ou dans l'équation (8), pour déterminer C.

35 Le résultat plus général, qui découle des

équations (4) et (6) est

$$\left( \frac{\mu - \lambda_2}{\mu - \lambda} \right) \left( \frac{1 - e^{-(\mu - \lambda) T}}{1 - e^{-(\mu - \lambda_2) T}} \right) = \delta \quad , \quad (11)$$

relation dans laquelle  $\delta$  est encore la constante donnée  
 5 dans l'équation (9b). L'équation (11) est une relation  
 transcendante qui peut être résolue itérativement pour  
 $\lambda$ . En fait, on commence le processus d'itération avec  
 la solution approchée donnée par l'équation (10). Ayant  
 déterminé  $\lambda$  itérativement, on peut utiliser les  
 10 équations (4) ou (6) pour trouver C.

Un point supplémentaire qui doit être souligné  
 est l'avantage d'un fond réduit, survenant pour des  
 mesures effectuées avec un angle  $\theta$  par rapport à la  
 normale à la surface du récipient de pression du  
 15 réacteur. Ici, l'angle  $\theta$  peut être choisi de manière  
 que le spectromètre sous collimation ne "voie" plus  
 directement le rayonnement de fuite issu du coeur et  
 pénétrant au travers du récipient de pression du  
 réacteur.

20 Des mesures peuvent donc être faites avec deux  
 collimateurs différents formant respectivement des angles  
 $\theta_1$  et  $\theta_2$  avec la normale à la surface du récipient de  
 pression du réacteur.

Dans ces conditions, on a

$$25 \quad I_1(\varepsilon_0) = \frac{C\Omega(\varepsilon_1)}{\mu - \lambda_1} \left[ 1 - e^{-(\mu - \lambda_1) T_1} \right] \quad , \quad (12)$$

et

$$I_2(\varepsilon_0) = \frac{C\Omega(\varepsilon_2)}{\mu - \lambda_2} \left[ 1 - e^{-(\mu - \lambda_2) T_2} \right] \quad . \quad (13)$$

30 En utilisant ces résultats, les équations (10) et  
 (11) se généralisent en

$$\lambda = \mu \left( \frac{\delta - 1}{\delta \cos \theta_1 - \cos \theta_2} \right) \quad , \quad (14)$$

et

$$35 \quad \left( \frac{\mu - \lambda_2}{\mu - \lambda_1} \right) \left( \frac{1 - e^{-(\mu - \lambda_1) T_1}}{1 - e^{-(\mu - \lambda_2) T_2}} \right) = \delta \quad , \quad (15)$$

respectivement. Ici,  $\delta$  est de nouveau donné par l'équation (9b) et

$$\begin{array}{l}
 \lambda_1 = \lambda \cos \theta_1 \\
 \lambda_2 = \lambda \cos \theta_2 \\
 T_1 = T / \cos \theta_1 \\
 T_2 = T / \cos \theta_2
 \end{array} \quad (16)$$

On peut facilement montrer que les équations (14) et (15) satisfont à la condition-limite correcte pour  $\theta_1$  tendant vers 0, se réduisant ainsi aux équations (10) et (11), respectivement. Comme auparavant, la solution de  $\lambda$  donnée par l'équation (14) peut être utilisée dans les approximations obtenues à partir des équations (12) ou (13), c'est-à-dire lorsque le terme exponentiel est négligé dans ces équations, pour fournir C. De manière analogue, le résultat plus général peut être obtenu en utilisant, soit dans l'équation (12), soit dans l'équation (13), la solution itérative de  $\lambda$  obtenue à partir de l'équation (15), pour fournir C.

En fait, les continuums de rayonnement gamma in situ dans les environnements de réacteur possèdent de nombreux pics qui sont observés au-dessus du niveau général du continuum. De plus, il n'y a aucune restriction au nombre de pics différents qui peuvent être analysés pour la densité d'activité absolue. Comme ces différents pics proviennent de réactions entre neutrons et isotopes des constituants du récipient de pression du réacteur, ou proviennent, dans le cas de mesures faites à partir de l'intérieur du récipient, de réactions entre neutrons et constituants de l'acier inoxydable et du fer de l'enveloppe du coeur, de l'écran thermique et/ou du revêtement de la surface (12) de la paroi du récipient de pression du réacteur, il est donc possible de déterminer non seulement la fluence d'exposition aux neutrons, mais tout aussi bien de l'information spectrale d'énergie. Toutes ces données

peuvent être utilisées en déployant des codes d'ajustement par moindres carrés, d'une manière identique à celle habituellement utilisée pour l'analyse de dosimétrie radiométrique.

5           Enfin, il convient de remarquer l'existence de limitations d'accessibilité pour le spectromètre au Si(Li) sous collimation. Pour certaines constructions de réacteur, la cavité du réacteur est trop petite pour permettre l'insertion du détecteur sous collimation du  
10 spectromètre. Du côté coeur, l'enveloppe, ou "tampon" ou écran thermique peut se trouver entre le détecteur, sous collimation, du spectromètre et le récipient de pression du réacteur. Dans ce cas, le procédé est en fait appliqué à la configuration particulière vue par le  
15 collimateur. Il est souvent possible d'insérer le détecteur au Si(Li) du spectromètre, sous collimation, dans les tubes d'instrumentation du réacteur, ce qui autorise une vue claire du récipient de pression du réacteur. L'avantage inhérent à la vision de la surface  
20 nue du récipient de pression du réacteur réside dans l'amélioration du rapport signal/bruit, en vue de la quantification de l'activité dans le récipient de pression. De plus, la dosimétrie neutronique pour le récipient de pression du réacteur peut être faite sans  
25 qu'il y ait besoin d'extrapolation.

          Outre la détermination de l'exposition aux neutrons, le même procédé non-destructif peut être utilisé pour déterminer les concentrations de divers  
30 constituants présents dans l'objet, en mesurant le flux absolu de rayonnements gamma caractéristiques, à partir de la radioactivité induite dans ces constituants sous l'effet de l'exposition aux neutrons. Par exemple, la concentration du cuivre, comme indiqué plus haut, est une variable cruciale régissant la fragilisation des  
35 aciers de récipients de pression de réacteurs, induite

par les rayonnements. Par conséquent, la concentration du cuivre est un facteur critique dans la détermination de la "fin de vie" des récipients de pression de réacteurs nucléaires. Ce n'est pas seulement dans les métaux de base du récipient de pression que la concentration du cuivre présente un aspect important. Elle est aussi particulièrement significative dans les soudures du récipient de pression.

L'équipement et les procédures pour déterminer l'exposition aux neutrons, tels que décrits ci-dessus, peuvent être utilisés pour déterminer la concentration du cuivre dans les métaux de base et les soudures du récipient de pression. Pour déterminer de telles concentrations du cuivre dans le récipient de pression, les mesures doivent commencer peu après l'arrêt du réacteur de puissance. Deux radionucléides, à savoir  $^{64}\text{Cu}$  et  $^{66}\text{Cu}$  sont produits par capture de neutrons dans le cuivre naturel. Alors que la courte période de  $^{66}\text{Cu}$ , qui est seulement d'environ 5,1 minutes, rend ce radionucléide malcommode à utiliser dans cette application,  $^{64}\text{Cu}$  possède par contre une période de 12,7 heures et peut donc être utilisé pour l'observation de récipients de pression. En quelques heures après un arrêt, le spectromètre Compton au Si(Li), sous collimation, peut être assemblé en vue de mesures de spectre gamma sur le récipient de pression.

La désintégration de  $^{64}\text{Cu}$  présente deux rayonnements gamma qui peuvent être utilisés, à savoir la transition de 1,346 MeV de la branche "capture d'électron", à faible intensité (0,6%), et le rayonnement d'annihilation à 0,511 MeV dû à la branche "désintégration de positon" (19%). L'analyse d'exposition aux neutrons envisagée dans ce qui précède pour les intensités de pics dépassant le niveau général du continuum gamma sera aussi applicable à ces deux

rayonnements gamma provenant de  $^{64}\text{Cu}$ .

Des pics de rayonnement gamma dûs à la désintégration de  $^{59}\text{Fe}$  se présenteront dans les mêmes mesures spectrales. Le radionucléide  $^{59}\text{Fe}$  (période 45,5 jours) est produit par capture d'un neutron sur du fer naturel dans lequel  $^{58}\text{Fe}$  existe à un niveau de 0,3 %. Deux pics dûs à  $^{59}\text{Fe}$  sont envisageables, à savoir la transition à 1,292 MeV (45 %) et la transition à 1,099 MeV (53 %). Là encore, en utilisant l'analyse d'exposition aux neutrons présentée plus haut, l'activité absolue  $A(s)$  de  $^{59}\text{Fe}$  par unité de volume peut être quantifiée. En conséquence, en utilisant l'équation (3), on peut écrire, pour l'activité de  $^{64}\text{Cu}$  par unité de volume

$$A_1(s) = C_1 e^{-\lambda_1 s} \quad (17)$$

et, pour l'activité de  $^{59}\text{Fe}$  par unité de volume

$$A_2(s) = C_2 e^{-\lambda_2 s} \quad (18)$$

Les activités de  $^{64}\text{Cu}$  et  $^{59}\text{Fe}$  par unité de volume, à une profondeur  $s$ , peuvent être simplement exprimées en termes du flux de neutrons thermiques (neutrons/( $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ )),  $\phi_{\text{th}}(s)$ , à la profondeur  $s$ . On a

$$A_1(s) = \phi_{\text{th}}(s) \cdot \sigma_1 \cdot \rho_1 \cdot e^{-\lambda_1 t_d} \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t_x}) \quad (19)$$

et

$$A_2(s) = \phi_{\text{th}}(s) \cdot \sigma_2 \cdot \rho_2 \cdot e^{-\lambda_2 t_d} \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t_x}) \quad (20)$$

Dans ces relations,

$\lambda_1$  est la constante de désintégration de  $^{64}\text{Cu}$

$\lambda_2$  est la constante de désintégration de  $^{59}\text{Fe}$

$\sigma_1$  est la section efficace de capture de neutrons thermiques de  $^{63}\text{Cu}$

$\sigma_2$  est la section efficace de capture de neutrons thermiques de  $^{58}\text{Fe}$

$\rho_1$  est la concentration (atomes/ $\text{cm}^3$ ) de  $^{63}\text{Cu}$

$\rho_2$  est la concentration (atomes/ $\text{cm}^3$ ) de  $^{58}\text{Fe}$

$t_x$  est la durée de l'irradiation

$t_d$  est le temps écoulé depuis l'arrêt du réacteur.

Tous ces paramètres sont connus, à l'exception de la concentration de  $^{63}\text{Cu}$ ,  $\rho_1$ . Par suite, prenant le rapport de l'équation (19) à l'équation (20), on peut

5 écrire

$$\rho_1 / \rho_2 = K \quad (21)$$

K étant exprimé en termes de paramètres connus, comme suit

10

$$K = \frac{A_1(s)e^{\lambda_1 t_d} (1 - e^{-\lambda_2 t_x}) \sigma_2}{A_2(s)e^{\lambda_2 t_d} (1 - e^{-\lambda_1 t_x}) \sigma_1} \quad (22)$$

15 Finalement, la concentration du cuivre peut être obtenue simplement, à partir du rapport  $\rho_1 / \rho_2$ , en utilisant les valeurs connues des pourcentages d'abondance de  $^{63}\text{Cu}$  et  $^{58}\text{Fe}$ , respectivement dans le cuivre naturel et le fer naturel.

20 La concentration du cuivre dans le métal de base peut souvent être déterminée à partir d'échantillons d'archive du métal du récipient de pression, de sorte que seule la détermination de la concentration de cuivre des soudures du récipient de pression est nécessaire pour certains réacteurs de puissance. Dans ce cas, on peut utiliser les équations (21) et (22) pour montrer que l'on a seulement besoin d'observations de spectre gamma relatives, entre métal de base du récipient de

25 pression et soudures de ce récipient. A cette fin, l'utilisation des équations (17) et (18) dans l'équation (22) conduit à :

$$K = \frac{C_1 e^{\lambda_1 t_d} (1 - e^{-\lambda_2 t_x}) \sigma_2}{C_2 e^{\lambda_2 t_d} (1 - e^{-\lambda_1 t_x}) \sigma_1} \quad (23)$$

30 Alors, à partir des équations (12) et (13), on peut écrire

$$C_1 = k_1 I_1 \quad (24)$$

et

$$C_2 = k_2 I_2 \quad (25).$$

35 Ici,  $k_1$  et  $k_2$  sont des constantes qui dépendent

du collimateur, de l'angle de vision, et de l'énergie du pic de rayonnement gamma particulier considéré. Les constantes  $k_1$  et  $k_2$  peuvent avoir différentes formes selon que l'on a utilisé la solution exacte des équations (12) et (13) ou les approximations des équations (5) et (8). Toutefois, la forme particulière choisie pour  $k_1$  et  $k_2$ , c'est-à-dire solution exacte ou approximation, n'affecte pas l'analyse résultante.

Par conséquent, en utilisant les équations (24) et (25) dans l'équation (23), on peut écrire

$$K = N \cdot (I_1/I_2), \quad (26)$$

$$N \text{ étant une constante donnée par } N = \frac{k_1 e^{\lambda_1 t_d} (1 - e^{-\lambda_2 t_x}) \sigma_2}{k_2 e^{\lambda_2 t_d} (1 - e^{-\lambda_1 t_x}) \sigma_1} \quad (27)$$

En conséquence, l'équation (21) devient

$$(R_1/R_2) = N \cdot (I_1/I_2), \quad (28)$$

Le spectromètre au Si(Li), sous collimation, peut être utilisé pour les observations de spectres gamma du métal de base et des soudures du récipient de pression.

Dans ce cas, l'équation (28) peut être utilisée pour les deux mesures, de sorte que l'on peut écrire

$$(R_1/R_2)_{\text{soudure}} = N \cdot (I_1/I_2)_{\text{soudure}} \quad (29)$$

et

$$(R_1/R_2)_{\text{métal base}} = N \cdot (I_1/I_2)_{\text{métal base}} \quad (30)$$

Le rapport de l'équation (29) à l'équation (30) conduit à

$$(R_1/R_2)_{\text{soudure}} = \frac{(I_1/I_2)_{\text{soudure}}}{(I_1/I_2)_{\text{mét.base}}} \cdot (R_1/R_2)_{\text{mét.base}} \quad (31)$$

Par suite, si la concentration du cuivre est connue pour le métal de base, seules des observations de spectres gamma relatives, par Si(Li), sont nécessaires entre le métal de base et la soudure, pour déterminer la concentration du cuivre dans la soudure.

Des interférences et bruits peuvent survenir dans

les spectres gamma du récipient de pression observés avec le spectromètre Compton au Si(Li), sous collimation. Des radionucléides supplémentaires sont produits, qui possèdent des transitions gamma proches des énergies des rayonnements gamma émis par  $^{64}\text{Cu}$  ou  $^{59}\text{Fe}$ . Par exemple,  $^{58}\text{Co}$  peut être produit par une réaction (n,p) sur  $^{58}\text{Ni}$ . Comme  $^{58}\text{Co}$  est un émetteur de positons, un rayonnement d'annihilation est produit à 0,511 MeV, par la désintégration de  $^{58}\text{Co}$ , exactement comme celui produit par la désintégration de  $^{64}\text{Cu}$ . Toutefois, la section efficace de réaction  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  est très petite par rapport à la section efficace pour  $^{63}\text{Cu}(n,p)$ , et la période de  $^{58}\text{Co}$  est de 70,8 jours, ce qui est considérablement supérieur à la période de 12,7 heures de  $^{64}\text{Cu}$ . Par conséquent, la composante de bruit d'annihilation due à  $^{58}\text{Co}$  sera petite par rapport au pic gamma d'annihilation de  $^{64}\text{Cu}$ .

D'une manière générale, la décroissance, en fonction du temps, de la désintégration des différents radionucléides contribuant à un pic gamma donné peut être utilisée pour séparer le signal du bruit de fond. Par exemple, celle des composantes de l'intensité de pic à l'énergie d'annihilation qui possède une période de 12,7 heures peut être déterminée par mesure de spectres gamma dépendant du temps. Des mesures de spectres gamma faites séquentiellement sur une durée de quelques jours permettent d'isoler la composante de désintégration à période de 12,7 heures qui ne peut être attribuée qu'à  $^{64}\text{Cu}$ .

Un autre exemple de bruit de fond est la production de  $^{60}\text{Co}$  dans le récipient de pression, par capture de neutrons sur des concentrations de traces de cobalt naturel, c'est-à-dire  $^{59}\text{Co}$ . La désintégration de  $^{60}\text{Co}$  possède des transitions émettrices de rayonnement gamma à 1,173 MeV (100%), et à 1,332 MeV (100%). Comme la

résolution énergétique du spectromètre au Si(Li) est de l'ordre de 30 keV (FWHM), le rayonnement gamma à 1,332 MeV dû à  $^{60}\text{Co}$  interférerait avec la transition à 1,346 MeV de  $^{59}\text{Fe}$ . Heureusement,  $^{60}\text{Co}$  possède une

5 période de 5,27 années, de sorte que l'on peut recourir à des mesures en fonction du temps pour séparer le signal du fond, si besoin est.

Pour isoler les contributions du fond, il existe une autre méthode générale qu'il convient d'examiner.

10 Elle est basée sur l'observation, dans le spectre gamma, de pics additionnels émis par le radionucléide même produisant le fond. Si un tel pic peut être identifié, alors l'activité absolue du radionucléide du fond peut être quantifiée. La connaissance du mode de

15 désintégration de ce radionucléide combinée à son activité absolue fournit le moyen de déterminer la contribution du fond à l'intensité du pic en question. Par exemple,  $^{58}\text{Co}$  possède une transition gamma à 0,8108 MeV (99%). En conséquence, si la désintégration de  $^{58}\text{Co}$

20 contribue au pic d'annihilation à 0,511 MeV, on doit alors observer dans le spectre gamma un pic à 0,8108 MeV. Par suite, l'observation de pic à 0,8108 MeV au moyen du spectromètre au Si(Li) sous collimation peut être utilisée pour quantifier l'activité absolue par

25 unité de volume de  $^{58}\text{Co}$ . Cette activité absolue de  $^{58}\text{Co}$ , en combinaison avec une connaissance du mode de désintégration de  $^{58}\text{Co}$  va permettre l'évaluation de la composante de fond à l'énergie du rayonnement gamma d'annihilation à 0,511 MeV.

30 Pour certaines applications, en particulier pour des mesures qui pourraient être faites sur la surface interne d'un récipient de pression, il convient de tenir compte de différences entre activations induites par neutrons thermiques et neutrons rapides, dans Cu et Fe.

35 D'une manière générale, cela ne doit entraîner qu'une

petite correction aux évènements induits par des neutrons thermiques.

Le présent procédé pour déterminer des concentrations de constituants est non-destructif et offre plusieurs avantages supplémentaires. Les concentrations du cuivre peuvent être déterminées localement, en fonction de la position spatiale sur la surface du récipient de pression, de sorte que les concentrations de cuivre dans le métal de base et les soudures peuvent être mesurées. L'emplacement exact d'une soudure à laquelle on s'intéresse n'a pas à être connu, puisque les changements dans les spectres gamma, entre métal de base et soudure, peuvent être utilisés pour positionner le spectromètre sous collimation à l'endroit de la soudure. Si la concentration du cuivre du métal de base est connue, il ne faut alors que des mesures de spectre gamma relatives entre métal et soudure pour déterminer la concentration du cuivre dans la soudure. Les concentrations du cuivre sont déterminées sans qu'il soit nécessaire de quantifier le flux d'exposition aux neutrons thermiques,  $\phi_{th}$ .

Bien que, du fait de la signification importante de la présence de cuivre dans les métaux de base et soudures des récipient de pressions, il ait été commode d'utiliser le cuivre comme exemple pour décrire le procédé non-destructif de détermination de concentrations de constituants, il doit néanmoins être entendu que cet aspect de l'invention ne constitue pas une limitation au cuivre, mais que ce procédé peut être utilisé pour mesurer la concentration de n'importe lequel des divers constituants trouvés dans des objets irradiés auxquels on s'intéresse.

Lors de l'exécution physique du procédé, que ce soit pour des déterminations d'exposition aux neutrons ou de concentration de constituants, le détecteur 13

"voit" la surface exposée 11 sur l'objet ou la structure de paroi 10 au travers de l'ouverture 18 du collimateur qui est maintenue à un certain angle, choisi à l'avance, par rapport à la surface située en face d'elle. Lorsque  
5 le détecteur blindé 13 explore la surface 11, des pics dans le spectre continu de rayonnement gamma détecté sont mesurés électroniquement, à divers niveaux d'énergie. Partant de ces valeurs, on peut réaliser un enregistrement des valeurs résultantes des pics de  
10 densité de flux des rayons gamma à divers niveaux d'énergie, et l'on peut choisir une ou plusieurs valeurs de pics de densité de flux à des niveaux d'énergie caractéristiques du rayonnement gamma découlant de l'exposition d'un objet aux neutrons. La densité  
15 d'activité spatiale d'un tel rayonnement peut être identifiée par les relations mathématiques décrites plus haut. Cela peut exiger une deuxième étape d'exploration effectuée en utilisant une configuration de blindage modifiée, ou peut exiger le repositionnement de la  
20 relation angulaire entre l'ouverture de collimation 18 et la surface explorée 11, ou bien une suite de mesures réparties sur une période de temps donnée. Après que la valeur de densité d'activité spatiale a été identifiée, des relations déductives connues peuvent être utilisées  
25 pour déterminer la dépendance spatiale et angulaire de l'exposition aux neutrons, ou les concentrations spatiales de constituants dans les régions de l'objet contrôlé auxquelles on s'intéresse.

Bien que l'invention ait été décrite en  
30 considérant des conditions et moyens particuliers, il doit être entendu qu'elle n'est pas limitée à ces conditions et moyens particuliers envisagés, qui ne concernent que des exemples non limitatifs.

REVENDEICATIONS

1. Procédé non-destructif pour déterminer in situ la distribution spatiale de l'exposition aux neutrons à laquelle un objet choisi a été soumis, ce procédé étant caractérisé par les étapes suivantes :

- on expose le détecteur blindé (13) d'un spectromètre (14) à une portion limitée d'une surface de l'objet (10), au travers d'une ouverture de collimateur (18) à petit diamètre dirigée vers la surface;

- on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie au cours d'une exploration de la zone de surface par le détecteur blindé;

- on enregistre une valeur de pic de densité de flux des rayons gamma à un niveau d'énergie choisi, caractéristique de l'exposition aux neutrons;

- on identifie une relation définissant une correspondance entre la valeur de pic de densité de flux et la densité d'activité spatiale, pour les rayons gamma mesurés; et

- on élabore de l'information spatiale et angulaire concernant l'exposition aux neutrons de la surface de l'objet (10), au moyen de relations connues de rattachement à la valeur de densité d'activité spatiale identifiée.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la valeur de densité d'activité spatiale est en rapport avec une valeur de coefficient d'atténuation de neutrons mesurée par une technique de mesure indépendante.

3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'une deuxième mesure de rayons gamma détectés est utilisée pour identifier la relation de correspondance désirée entre la valeur de pic de densité

de flux et la valeur de densité d'activité spatiale pour les rayons gamma mesurés.

4. Procédé non-destructif pour déterminer in situ l'exposition aux neutrons à laquelle une surface choisie  
5 sur un objet (10) a été soumise, ce procédé étant caractérisé par les étapes suivantes :

- on expose un détecteur au silicium "dopé" au lithium, ce détecteur appartenant à un spectromètre (13, 14) de rayonnement gamma de recul Compton, à une  
10 portion limitée de la surface de l'objet (10), cela au travers d'une ouverture de collimateur (18) à petit diamètre dirigée vers la surface;

- on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie  
15 pendant une première exploration de la surface par le détecteur blindé;

- on enregistre une première valeur de pic de densité de flux de rayons gamma à un niveau d'énergie choisi, caractéristique de l'exposition aux neutrons;

20 - on identifie une première relation définissant une correspondance entre la première valeur de pic de densité de flux et la valeur de densité d'activité spatiale pour les rayons gamma mesurés;

- on modifie l'exposition du détecteur par  
25 rapport à la surface;

- on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie, au cours d'une deuxième exploration de la zone de surface par le détecteur (13);

30 - on enregistre une deuxième valeur de pic de densité de flux de rayons gamma au niveau d'énergie précédemment choisi;

- on identifie une deuxième relation définissant une correspondance entre la deuxième valeur de pic de  
35 densité de flux et la valeur de densité d'activité

spatiale;

- on résout la première et la deuxième relations, pour identifier la valeur de densité d'activité spatiale des rayons gamma au niveau d'énergie caractéristique; et

5 - on élabore de l'information concernant l'exposition spatiale et angulaire de l'objet (10) aux neutrons, au moyen de relations connues de rattachement à la valeur de densité d'activité spatiale identifiée.

10 5. Procédé non-destructif pour déterminer in situ des concentrations d'au moins un constituant d'un objet irradié choisi (10), caractérisé par les étapes suivantes :

- on expose le détecteur (13) d'un spectromètre à une portion limitée de la surface de l'objet (10), au travers d'une ouverture de collimateur (18) à petit diamètre dirigée vers la surface;

20 - on mesure électroniquement le spectre continu de rayons gamma détectés à différents niveaux d'énergie au cours d'une exploration de la surface par le détecteur blindé (13,16);

- on enregistre une valeur de pic de densité de flux des rayons gamma à un niveau d'énergie choisi caractéristique de l'exposition aux neutrons;

25 - on identifie une relation établissant une correspondance entre la valeur de pic de densité de flux et la densité d'activité spatiale pour les rayons gamma mesurés; et

30 - on élabore de l'information concernant les concentrations spatiales de constituant sur l'étendue de la surface de l'objet (10), au moyen de relations connues de rattachement à la valeur de densité d'activité spatiale identifiée.

35 6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que l'on effectue séquentiellement une série de mesures sur une période de temps donnée.

7. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que la valeur de pic de densité de flux des rayons gamma provenant d'un constituant spécifique est identifiée pour déterminer la concentration de ce constituant spécifique dans l'objet (10), au moyen de relations déductives connues.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que ledit constituant spécifique est le cuivre.

9. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que ladite série de mesures est faite avec un agencement à détecteur (13) et collimateur (18).

10. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que la série de mesures est faite avec une pluralité d'agencements à détecteur (13) et collimateur (18).

1,1

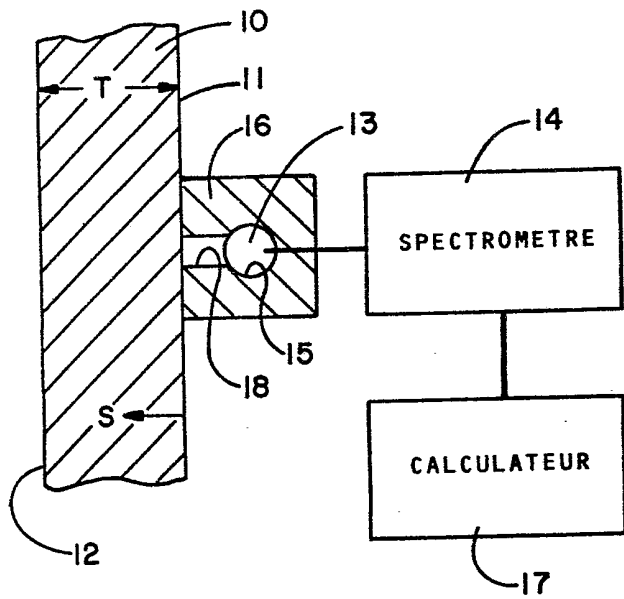


FIG. 1

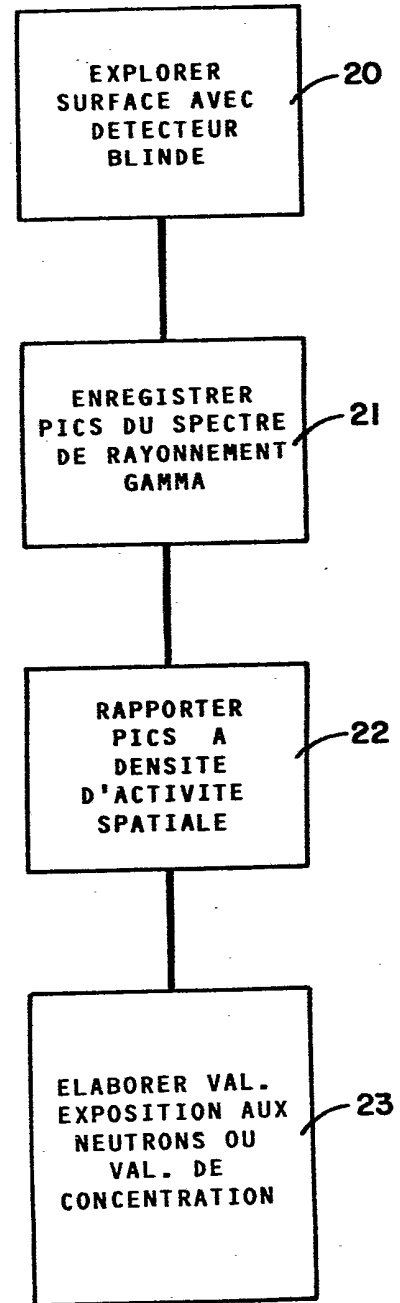


FIG. 2