

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6095099号
(P6095099)

(45) 発行日 平成29年3月15日 (2017. 3. 15)

(24) 登録日 平成29年2月24日 (2017. 2. 24)

(51) Int. Cl. F 1
GO 1 T 1/28 (2006. 01) GO 1 T 1/28

請求項の数 1 (全 8 頁)

(21) 出願番号	特願2012-231499 (P2012-231499)	(73) 特許権者	505374783 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地 1
(22) 出願日	平成24年10月19日 (2012. 10. 19)	(73) 特許権者	000183945 助川電気工業株式会社 茨城県日立市滑川本町3丁目19番5号
(65) 公開番号	特開2014-85119 (P2014-85119A)	(74) 代理人	100074631 弁理士 高田 幸彦
(43) 公開日	平成26年5月12日 (2014. 5. 12)	(72) 発明者	武内 伴照 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番 独立行政法人日本原 子力研究開発機構 大洗研究開発センター 内
審査請求日	平成27年10月6日 (2015. 10. 6)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 自己出力型ガンマ線検出器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

円柱状のタングステン製エミッタ材と、前記エミッタ材との間に絶縁材を介して、前記エミッタ材の周囲に配置されたコレクタ材とを備え、前記エミッタ材及び前記エミッタ材に接続されたMIケーブルと前記コレクタ材との間に流れる電流値を検出して、 γ 線強度を測定する自己出力型ガンマ線検出器において、

$\phi_f: 10^{11}$ n/m²/s, $\phi_{th}: 10^{18}$ n/m²/sの高い中性子環境下においても、 10^6 Gy/h以上の γ 線強度を精度良く測定でき、かつ600℃以上の耐熱性を持つように、

前記タングステン製エミッタ材を次の成分を有する純タングステン (W) で構成し、
Fe:0.002 wt%, Mo:0.002 wt%, Al:<0.0005 wt%, Si:<0.0010 wt%, Ca:<0.0003 wt%,
Mg:<0.0003 wt%

前記絶縁材をルビーで構成し、

前記MIケーブルの芯線をニッケル(Ni)で構成すると共に、前記エミッタ及び前記芯線の接続部をともにNiまたはNi系合金でコーティングした、
ことを特徴とする自己出力型ガンマ線検出器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子炉内などの高い中性子環境下でも、中性子線の影響を最小限に抑え、ガンマ線（以下、 γ 線とも言う）の線量を正確に測定することができる自己出力型ガンマ線

検出器に関する。ここで、自己出力型とは、内部電源や外部電源を必要とせず、検出器へのガンマ線の入射によりその検出器自体が出力を与える型のものを言う。

【背景技術】

【0002】

高い中性子環境下にある原子炉内で使用される、自己出力型炉心内 γ 線検出器（以下、単にSPGD (Self-Powered Gamma Detector) と言う）として、これまで小さな真空断熱された空間に取り付けられた鉄等が γ 発熱によって温度が上昇し、その温度上昇分を熱電対で測定することで γ 線強度を測定する γ 熱電計 (γ サーモメータ) 等が開発されてきている。例えば特許文献1には、自己出力型検出器を用いた局所監視手段とそれを校正するガンマサーモメータを用いた原子炉出力の監視装置等が開示されている。ここに開示された装置等は、原子炉出力を総合的に監視するためのものであり、校正のために使用されるガンマサーモメータは γ 線によるステンレス鋼中の発熱現象を利用し、その発熱温度を差動式熱電対で測定し、 γ 線出力分布を測定するように構成されている。

10

【0003】

また、 γ 線ではなく中性子線の検出器ではあるが、本発明の構造に類似した構造を有する炉内検出器として、特許文献2には、熱中性子線がエミッタ材へ入射すると、核反応が起こり、その核反応により生じる電子が円柱状のエミッタ材から集電用コレクタへ移動することによって生じる電流をMI (Mineral Insulator: 無機絶縁) ケーブルを介して電流計で測定し、その電流値から熱中性子束を測定する中性子検出器が開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2007-285990号公報

【特許文献2】特開2006-0208160号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかし、特許文献1の原子炉出力監視装置に示された γ 線出力分布を測定するための γ 線検出器は応答性が良くないこと、中性子による照射効果の影響を受けることなどの課題があった。また、特許文献2の「自己出力型中性子検出器」は、本発明と同じく自己出力型であるが、あくまで中性子検出器であって、 γ 線を検出するために最適な構造にはなっていない。

30

【0006】

そのため、 γ 線検出器としての応答性に優れ、中性子照射の影響を最小限に抑制でき、かつ精確な測定が可能な自己出力型ガンマ線検出器が求められている。例えば、 γ 線強度による構造材料の照射効果に対する影響を調べるためにも、 $\phi_f: 10^{11}$ n/m²/s, $\phi_{th}: 10^{18}$ n/m²/s 程度の高い中性子環境下において、 10^6 Gy/h以上の γ 線強度を高精度に測定できる自己出力型ガンマ線検出器が求められている。

【0007】

したがって、本発明の目的は、高い中性子環境下においても、中性子線の影響を最小限に抑えられ、また高温下においても安定的に動作する、 γ 線強度を高精度に測定できる自己出力型ガンマ線検出器を提供することにある。

40

【課題を解決するための手段】

【0008】

γ 線強度による炉内構造材料の照射効果に対する影響を調べるためには、 γ 線強度を精確に測定する必要がある。そして、従来技術の課題で説明したように、 γ 線強度を精確に測定するためには、(1) 低温から高温まで安定的に動作すること、(2) 炉内の中性子線の影響を最低限に抑えられること、(3) 入出力間特性のリニアリティを含めて、 γ 線に対する応答性に優れていることなどが求められる。

【0009】

50

そこで、本願発明者は、高温下でも安定的に動作するように、エミッタ材として、まず、比較的高い融点を持つ原子番号の大きな材質に着目すると共に、さらに高い中性子環境下でも中性子線の影響を最小限に抑えられるように、中性子放射化断面積が小さな材料を選択し、選択された材料について γ 線に対する出力感受性および応答性を実験により確認し、エミッタ材として採用した。そして、有望なエミッタ材として、低温用には鉛(Pb)を主成分とする材料、低温から高温までの測定用には、タングステン(W)を主成分とする材料を選定した。

【0010】

また、開発したSPGDをコバルト(Co)照射施設に持込んで行った γ 線照射試験によって、Pbエミッタ用SPGDの感度は 10^2 Gy/h以上、Wエミッタ用SPGDの感度は 10^3 Gy/h以上において、 γ 線強度に対する出力値のリニアリティを示すことを明らかにした。

10

【0011】

具体的には、本発明の一つの観点に係る自己出力型ガンマ線検出器 (SPGD) は、円柱状のエミッタ材と、前記エミッタ材との間に絶縁材を介して、前記エミッタ材の周囲に配置されたコレクタ材とを備え、前記エミッタ材及び前記エミッタ材に接続されたMIケーブルと前記コレクタ材との間に流れる電流値を検出して、 γ 線強度を測定する自己出力型ガンマ線検出器であって、前記エミッタ材が、不可避不純物が0.03重量%以下にある純タングステン(W)からなることを特徴とする。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、円柱状のエミッタ材の材質をさまざまな観点から γ 線検出に最適化しているため、 γ 線に対して高感度であって、かつ優れた応答性を持つ、高精度の測定が可能な自己出力型ガンマ線検出器が得られる。

20

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1A】本発明に係る自己出力型ガンマ線検出器の全体構成を示す概略図。

【図1B】Co-60線源を用いた照射試験結果を示す原理説明図。

【図2】低温用Pbエミッタ型自己出力型ガンマ線検出器の形状依存性の説明図。

【図3】エミッタ材の金属元素の選定基準の説明図。

【図4】低温用及び低高温用自己出力型ガンマ線検出器の出力校正曲線。

30

【発明を実施するための形態】

【0014】

本発明に係る自己出力型ガンマ線検出器（以下、単にSPGD (Self-Powered Gamma Detector) と言う。）の全体構成を図1Aに示す。図1Aにおいて、SPGDは円筒状をなしており、その中心部に円柱状のエミッタ1が設けられている。エミッタ1に γ 線が入射すると、エミッタ1がコンプトン散乱による電子が放出され、それらの電子がその周囲にある円筒状のコレクタ2に集電され、電流が流れる。この電流をMIケーブル3にて外部の電流計5Aに導き、 γ 線強度を求める。電流計5Aで測定された出力電流値から γ 線強度を求めるには、次のようにする。SPGDの原理から γ 線強度と出力電流値は比例関係となる。したがって、アラニン線量計等で予め γ 線強度を定量的に求められている位置にSPGDを配置して電流値を計測することで（図2を参照）、そのSPGDに関し出力値から γ 線強度への一般的な変換係数を得るようにする。

40

【0015】

なお、本発明の一つの例（図1Aを参照）では、 γ 線のMIケーブルへの影響も調べるため、MIケーブルの芯線とシースのコレクタ間に発生する γ 線のコンプトン電子による出力（電流）をエミッタ材と接続した芯線から発生する γ 線のコンプトン電子による全電流から差し引いてエミッタ材とシースのコレクタ間だけに発生する電流だけを求められる構成とした。ここでは、MIケーブル内の2つの同材質芯線の片側だけをエミッタに非接続状態とした構成を採用した。この場合には、（正味のSPGD出力電流）は、（エミッタ接続側からの出力電流（電流計Aの測定値））－（MIケーブル芯線のみからの出力電流（電流計Bの測

50

定値))として求められるので、必要に応じて、 γ 線のMIケーブル芯線への影響を調べることができる。

【0016】

以下に、低温用の自己出力型ガンマ線検出器と、低温から高温まで使用できる自己出力型ガンマ線検出器のそれぞれのエミッタ材の実施例を、図2乃至図4を参照して説明する。

【0017】

1. 低温用Pbエミッタ型SPGD

エミッタ材は中性子放射化断面積が小さく、原子番号の大きな材質である鉛(Pb)を選定することにより、先ずは高い中性子環境下での使用が可能であることを明らかにした。また、リードにエミッタの鉛側をカシメただけで接続する場合、熱膨張係数($29.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)が非常に大きい鉛は、高温(125°C 以上)でカシメ部が緩むという課題があり、これを改善するために柔らかで曲がりやすく凝着しやすいエミッタ材の特徴を生かしてMIケーブル芯線(Ni($13.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)又はCu($17.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$))との確実な接合が出来る製造方法を検討し、SPGDの製作を可能とした。なお、MIケーブルの芯線は錆びにくいNiがより良い。

10

【0018】

上述したように、低温用のSPGDのエミッタ材として使用される材質は、Pbを主成分として、その他不可避不純物からなるものである。

【0019】

開発したSPGDをCo照射施設に持ち込み、開発した測定システムを用いて照射試験を行った。その結果、開発したSPGDの感度は 10^2 Gy/h 以上の範囲で測定可能であること、 γ 線強度に対する出力値はリニアリティ(線形性)を示した。

20

【0020】

また、図2に示すようにPbエミッタ材の形状依存性(エミッタの形状別の γ 線強度とSPGD出力値の関係)を調べ、エミッタ材の形状により、SPGDの γ 線による感度を明らかにした。図2の(A)は、エミッタ材の長さを100mmの一定長として、その径 ϕ を変化させた場合、図2の(B)は、エミッタ材の径を一定の $\phi 3\text{mm}$ として、その長さを変化させた場合、SPGDの出力値がどのように変化するかを調べた結果を示している。長さが一定の場合の形状依存性は、図2の(A)からエミッタ材の径が $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ と大きくなるに従って、SPGDの出力値が大きくなることが理解される。また、径が一定の場合には、エミッタ材の長さが長くなるに従って、SPGDの出力値が大きくなることが理解される。したがって、許される範囲で、径を大きくし、長さを長くすることが望ましい。

30

【0021】

本発明により、低温用SPGDの製作にあたっての材質選定条件は以下のとおりである。

(1)エミッタ材

鉛(Pb)の中性子捕獲断面積は約 0.15b (barn : 10^{-28}m^2)である。一方、コバルト(Co)の(n, γ)反応は 37b の中性子捕獲断面積であり、低温用SPGDと同程度の形状のコバルトSPGDの電流出力が $2.5 \times 10^{-22}\text{A/cm/nv}$ と見積もられている。したがって、鉛の(n, γ)反応による電流出力は 10^6 Gy/h において、 $1 \times 10^{-10}\text{A/cm}$ 程度と評価できる(JMTR $\phi f: 10^{18}\text{n/m}^2/\text{s}$, $\phi_{\text{th}}: 10^{18}\text{n/m}^2/\text{s}$ における γ 線強度が最低 10^6 Gy/h)。さらに、 γ 線のコンプトン散乱により流れる低温用SPGDの出力電流は γ 線強度 10^4 Gy/h の時に 10^{-11}A/cm 程度である。よって、全電流出力に対する熱中性子との反応により生ずる電流出力の影響はたかだか10%程度と見積もられ、計測値に大きな影響はない。

40

【0022】

(2)コレクタ材 :

コレクタの材料として、SUS316LとNCF600があるが、低温用SPGDの製作にあたっては、使用温度が最大 200°C であり、製作性の観点から、SUS316Lを選定する。

【0023】

(3)絶縁材

検出部の絶縁材として、 Al_2O_3 及び MgO がある。絶縁材の成型の観点から、 Al_2O_3 が望ま

50

しく、照射誘起起電力の影響を低減するために、高純度 Al_2O_3 を絶縁材として使用することが望ましい。

【0024】

2. 低温から高温用Wエミッタ型SPGD

低温から高温まで測定可能なSPGDの開発として、原子番号と、融点及び熱中性子吸収断面積との関係に基づいて、エミッタ材の選定を行った(図3参照)。この結果タングステン(W)、ハフニウム(Hf)、タンタル(Ta)、オスミウム(Os)及びその合金を選定した。低温用Pbエミッタ型SPGDの鉛と違って硬くて脆い為にカシメができず、更に融点が高く溶接が困難なために、ろう付時のろうの湯流れ性(濡れ性)を確保するためのNiコーティングとMIケーブルの芯線(Ni又はCu)との最適ろう付けによる接合技術の検討を行いながら開発した。なお、MIケーブルの芯線は錆びにくいNiがより良い。開発の結果、 γ 線出力はタングステン(W)において低温用Pbエミッタ型SPGDより出力は30%に低下するものの、 γ 線強度に対する出力値のリニアリティを示すことなどが明らかにされ、高い中性子環境下での使用が可能であることも明らかになった。更にろう材をNi系にすることによって、現状の600℃以上の耐熱を確保出来る見通しも得られた。

10

【0025】

後述の図4からも明らかなように、本発明の一実施例ではエミッタ材としてタングステン(W)を選択しているが、ここで採用したタングステン(W)の成分は次の通りである。Fe:0.002 wt%, Mo:0.002 wt%, Al:<0.0005 wt%, Si:<0.0010 wt%, Ca:<0.0003 wt%, Mg:<0.0003 wt%

20

【0026】

低温用SPGDと低高温用SPGDの特性比較を図4に示す。この結果、低高温用SPGDの γ 線強度による出力は、低温用SPGDと比較して低いものの現状ろう材の使用限界温度の600℃まで可能であり、高温時の照射試験で使用可能であることが明らかになった。これらの知見により、低高温用SPGDの製作にあたっての材質選定条件は以下のとおりである。

【0027】

(1)エミッタ材

タングステン(W)、ハフニウム(Hf)、タンタル(Ta)、オスミウム(Os)は、鉛には及ばないものの原子番号が大きいため、線による十分なエミッション電流が確保できる元素である。さらに、鉛と異なつて融点は約2,222~3,400℃と非常に高く、高温条件で使用可能なSPGDとして期待される。タングステン(W)、ハフニウム(Hf)、タンタル(Ta)、オスミウム(Os)の中性子捕獲断面積はそれぞれ18b、10b、21b、1.6bであり、(n, γ)反応によるノイズ電流を中性子量より算出して除去する対策を施す。

30

【0028】

(2)コレクタ材

コレクタ材に要求される特性は低温用SPGDとは異なり、高温時の材料特性が優れている必要がある。このため、コレクタ材料としてのSUS316LとNCF600の特性比較を表している、表1に挙げる候補材のうち、最高使用温度の高いNCF600を用いることが望ましい。

【0029】

【表1】

40

	SUS316L	NCF600
使用最高温度	500℃	800℃
耐食性	良	良
酸化特性	良	優
熱起電力	優	良
コスト	安い	高い
製作性	優	良

【0030】

(3)絶縁材

検出部の絶縁材として、 Al_2O_3 及びMgOがある。絶縁材の成型の観点から、 Al_2O_3 が望ま

50

しく、照射誘起電力の影響を低減するために、高純度 Al_2O_3 を絶縁材として使用することが望ましい。600℃より高く800℃までの高温用には、高純度 Al_2O_3 より絶縁性の高いルビーがよい。

【0031】

選定したエミッタ材とMIケーブル芯線との接合性の検討を行い、エミッタ材に対する最適な接合方法を選定することにより、SPGDの製作を可能とした。

【0032】

具体的に説明すると、低温用鉛(Pb)エミッタはリード線より大きな熱膨張係数を持っているため、高温でもカシメた部分が緩まない様に、PbやPbを含む合金をNi並びにNi合金リード部材表面に付着ないしはコーティングしてからカシメやPbろう付を行うことによって、200℃でも確実な接合が得られた。

10

【0033】

低温から高温まで連続測定出来るタングステン(W)エミッタの場合は、硬くて脆い為カシメができず、融点が高い為溶接も困難なため、Wエミッタのリード取り付け側の表面に(穴を設けた場合は穴内面にも)、ニッケル(Ni)またはNiを含む合金を付着ないしはコーティングしてから使用温度に合ったろう付け接合することにより、確実な接合が得られた事により、耐熱が600℃を超える場合には、絶縁材をルビーとし、さらにNi系ろう付材にすることによって可能であるとの見通しが得られた。

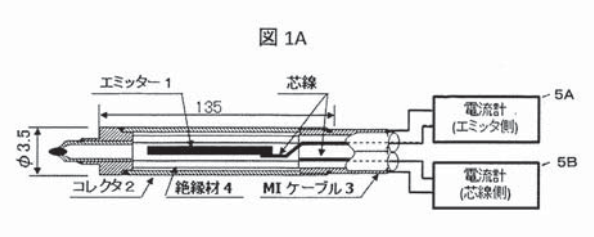
【符号の説明】

【0034】

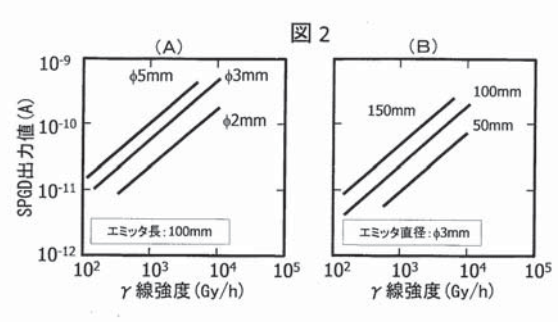
- 1 … エミッタ
- 2 … コレクタ
- 3 … MIケーブル
- 4 … 絶縁材
- 5 a…電流計A
- 5 b…電流計B

20

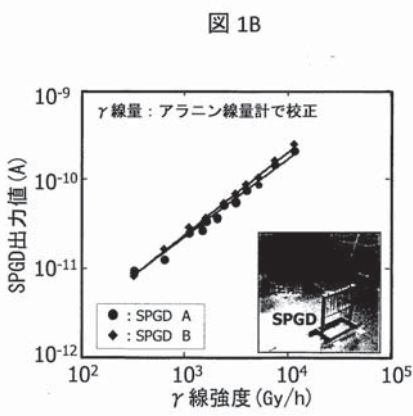
【図 1 A】



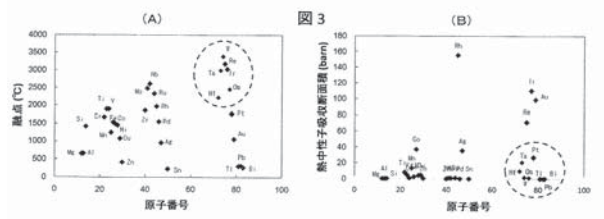
【図 2】



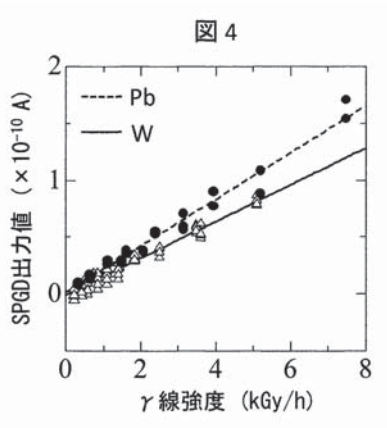
【図 1 B】



【図 3】



【図 4】



フロントページの続き

- (72)発明者 永田 寛
茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番
機構 大洗研究開発センター内 独立行政法人日本原子力研究開発
- (72)発明者 大塚 紀彰
茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番
機構 大洗研究開発センター内 独立行政法人日本原子力研究開発
- (72)発明者 柴田 晃
茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番
機構 大洗研究開発センター内 独立行政法人日本原子力研究開発
- (72)発明者 土谷 邦彦
茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番
機構 大洗研究開発センター内 独立行政法人日本原子力研究開発
- (72)発明者 三浦 邦明
茨城県日立市滑川本町3丁目19番5号 助川電気工業株式会社内
- (72)発明者 山本 宏
茨城県高萩市上手綱3333番地23号 助川電気工業株式会社内

審査官 青木 洋平

- (56)参考文献 特開昭55-000499 (JP, A)
特開昭47-015189 (JP, A)
特開昭56-046477 (JP, A)
特開平03-108651 (JP, A)
特開昭63-038195 (JP, A)
特開2003-004887 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01T1/00-1/16、1/167-7/12