

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7744679号
(P7744679)

(45)発行日 令和7年9月26日(2025.9.26)

(24)登録日 令和7年9月17日(2025.9.17)

(51)Int. Cl.		F I			
G 0 1 T	3/06	(2006.01)	G 0 1 T	3/06	
G 0 1 T	1/20	(2006.01)	G 0 1 T	1/20	B

請求項の数 9 (全 20 頁)

(21)出願番号	特願2021-214537(P2021-214537)	(73)特許権者	505374783
(22)出願日	令和3年12月28日(2021.12.28)		国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
(65)公開番号	特開2023-98048(P2023-98048A)		茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地
(43)公開日	令和5年7月10日(2023.7.10)		1
審査請求日	令和6年10月10日(2024.10.10)	(74)代理人	100097113
			弁理士 堀 城之
		(74)代理人	100162363
			弁理士 前島 幸彦
		(74)代理人	100194283
			弁理士 村上 大勇
		(72)発明者	伊藤 史哲
			茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 国
			立研究開発法人日本原子力研究開発機構
			原子力科学研究所内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】中性子検出器

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

中性子を吸収して二次荷電粒子を放出する中性子吸収同位体を含有する蛍光体が中性子を吸収した際に発する蛍光によって前記中性子を検出する中性子検出器であって、

前記蛍光体で構成された薄膜状の蛍光体層と、当該蛍光体層と膜厚方向で隣接し前記蛍光を透過させる光透過材料で構成された薄膜状の光透過層とが、前記中性子の入射方向に沿って複数組設けられた積層構造を有するシンチレータと、

前記蛍光を検出した出力として出力パルスを発する光検出器と、
を具備し、

前記蛍光体層の密度と厚さの積である密度長は $0.0625 \text{ g/cm}^2 \sim 0.5 \text{ g/cm}^2$ の範囲、前記光透過層の密度長は $0.2 \text{ g/cm}^2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^2$ の範囲とされたことを特徴とする中性子検出器。

10

【請求項2】

前記光検出器は、前記入射方向に沿って前記シンチレータから発せられる前記蛍光を検出することを特徴とする請求項1に記載の中性子検出器。

【請求項3】

前記光検出器は、前記蛍光体層及び前記光透過層の面内方向に沿って前記シンチレータから発せられる前記蛍光を検出することを特徴とする請求項1に記載の中性子検出器。

【請求項4】

前記光検出器として、前記シンチレータを挟んで前記面内方向に沿って対向する第1の

20

光検出器、第2の光検出器が設けられ、

前記第1の光検出器による前記出力パルスである第1の出力パルス、前記第2の光検出器による前記出力パルスである第2の出力パルス間に同時性が認められた場合に、前記第1の出力パルス及び前記第2の出力パルスに基づいた出力を前記出力パルスとして新たに出力する同時計数部を具備することを特徴とする請求項3に記載の中性子検出器。

【請求項5】

前記シンチレータにおいて、

前記蛍光体層と当該蛍光体層に隣接する前記光透過層とが組み合わされて前記蛍光体層が発した前記蛍光を伝搬させるセグメントが前記入射方向に沿って複数形成され、当該セグメント内において当該セグメント内の前記蛍光が前記面内方向に伝搬し、かつ隣接する前記セグメント間では前記蛍光は伝搬しないように、前記積層構造において、前記蛍光を遮断する遮光層が、前記入射方向で隣接する前記セグメント間に設けられ、

前記光検出器は、前記セグメント毎に設けられたことを特徴とする請求項3又は4に記載の中性子検出器。

【請求項6】

前記セグメント毎の前記出力パルスにおいて、他の前記出力パルスと同時性が認められなかった前記出力パルスを出力させる非同時計数部を具備することを特徴とする請求項5に記載の中性子検出器。

【請求項7】

前記光透過層の前記蛍光に対する屈折率の、前記蛍光体層の前記蛍光に対する屈折率に対する比が0.90～1.10の範囲であることを特徴とする請求項1から請求項6までのいずれか1項に記載の中性子検出器。

【請求項8】

前記蛍光体層及び前記光透過層の主成分は酸化ケイ素(SiO_2)であり、前記蛍光体層には前記中性子吸収同位体が添加されたことを特徴とする請求項1から請求項7までのいずれか1項に記載の中性子検出器。

【請求項9】

前記中性子吸収同位体は ^6Li 又は ^{10}B であることを特徴とする請求項8に記載の中性子検出器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、中性子によって発せられるシンチレーション光を検出することによって中性子を検出する中性子検出器に関する。

【背景技術】

【0002】

高い中性子線量下で、中性子検出器を用いて中性子の線量を測定する場合において、中性子の数え落としを減らすためには早い応答かつ高い検出効率を持つ検出器が有利となる。ただし、このような環境下では、一般的には、中性子だけではなく、線の線量も高い場合も多い。例えば、高速中性子の線量が高い環境下で水素が多く含まれる減速材が用いられている場合には、減速された中性子が水素と捕獲反応することによって2.2 MeVの線が発生するため、線の線量は必然的に高くなる。このため、線及び中性子の線量が高い場合でも中性子を線と区別して検出できる(弁別できる)、早い応答の高い検出効率を持った中性子検出器が望まれている。

【0003】

中性子は電荷を持たないため、荷電粒子と比較して透過力が非常に高いことから、低速中性子を検出するためには、高エネルギー二次荷電粒子等の放出を伴う中性子吸収反応の反応断面積が大きい同位体(中性子吸収同位体)を用い、中性子吸収確率を高めた検出器が必要とされる。前記中性子吸収同位体を用いた場合においても、とりわけ熱外中性子以上のエネルギーの中性子を十分な感度で検出するためには、密度と厚さの積である密度長

10

20

30

40

50

(g/cm^2)換算で、数～数十 g/cm^2 オーダーの検出器が必要となる場合もある。

【0004】

一般的な中性子検出器としては、放射線との相互作用によるガスの電離をその電離量に比例して電荷を増幅し検出する比例計数管や、シンチレータにおける放射線のエネルギー付与量等に応じた発光(蛍光)を光検出器で検出するシンチレーション検出器等が用いられている。これらの検出器は線にも検出感度を有するため、中性子の感度を高めた場合には、背景事象となる前記のような線の感度も高まる。このため、中性子を線から弁別して検出できる中性子検出器が望まれる。

【0005】

比例計数管においては、例えば特許文献1に記載されるように、中性子吸収反応断面積が大きく、低原子番号のために線と相互作用しにくい 3He ガスを用いた場合に、中性子と線の選択性(以下、 n/γ 選択性)を高めることができる。しかしながら、この場合、比例計数管に電荷がチャージされるまで出力となるパルスの波高値が低くなり、検出されにくくなる時間(分解時間)が長くなる。この分解時間が長いと、特に高線量下において時間的に連続した個々の出力パルスの認識が困難となり適正な計数が困難となる。また、熱中性子や高速中性子を高効率で測定するためには、このガスの層を十分に厚くする(大きな密度長とする)ことが必要となるため、装置が大型化する、あるいは 3He は高価であるために装置が高価になるという問題がある。

【0006】

シンチレーション検出器は、荷電粒子のエネルギーを吸収することによって蛍光を発する蛍光体を用いており、この蛍光体の選定により前記の分解時間を短くできるために、高線量下の測定に適している。例えば 6Li 等の中性子吸収同位体が添加された $^6Li-glass:Ce^{3+}$ 系の蛍光体は、比較的早い減衰時間(～60ナノ秒)と、電子当量エネルギー($MeVee$)単位において中程度の熱中性子の発光量(～1.6 $MeVee$)により、中性子検出に広く用いられている。ここで、上記において発光量を電子当量エネルギー($MeVee$)単位でと断っているのは、光量自体が大きくとも、線(電子線)の光量が同様に大きければ、結局線信号と中性子信号が混在してしまうからであり、電子等量エネルギーは、 n/γ 選択性を評価する際には重要なパラメータである。中性子が吸収された際の発光量が電子当量エネルギー($MeVee$)単位において非常に大きい蛍光体を用いることによって、 n/γ 選択性を高めることができる。こうした蛍光体としては、例えば 6Li 等の中性子吸収同位体が添加された $^6LiF/ZnS:Ag$ (熱中性子発光量～10 $MeVee$)が広く知られている。ただし、この蛍光体は比較的長い減衰時間(～200ナノ秒)であり、更に非常に長い減衰時定数成分も存在するため、早い応答に問題がある。

【0007】

一方、特許文献2には、構造を工夫することによって n/γ 選択性を高めたシンチレータが記載されている。このシンチレータは、前記のような蛍光体で構成された無機蛍光体粒子が樹脂材料中で分散した構成を具備する。この場合、中性子が吸収された際に蛍光体が発する蛍光によって中性子を検出できることは前記の場合と同様であるが、シンチレータが一様に蛍光体で構成された従来の場合と比べて線によるエネルギーが吸収された際の蛍光の発光強度を低下させることができる。これによって、中性子と線の弁別が容易となる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開2008-14947号公報

【特許文献2】国際公開2015/064588号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

10

20

30

40

50

蛍光体として⁶LiF/ZnS:Agを用いた場合、蛍光の減衰時定数が長いため、高線量下の測定が困難となった。また、蛍光のこの材料中における透過率は高くないため、大きな結晶を用いると蛍光の取り出し効率が低くなることも問題となった。一方、⁶Li-glass:Ce³⁺系は、前記のように高線量下の測定は可能であるが、MeV単位での発光量が十分ではなく、n/選択性が低かった。このため、高線量下で高いn/選択性をもって中性子を検出可能な中性子検出器を、蛍光体の材料の設定のみで実現することは困難であった。

【0010】

このため、蛍光体の材料の設定に加え、特許文献2に記載の技術のようにシンチレータの構造を工夫することは有効である。しかしながら、無機蛍光体粒子と樹脂材料の比重は異なるために、無機蛍光体粒子を樹脂材料中に均一に分散させることは容易ではなく、このシンチレータを製造することは容易ではなかった。また、樹脂材料には中性子と同程度の質量をもつ水素が多く含まれるため、中性子が弾性散乱されて熱化され、中性子が無機蛍光体粒子以外で吸収される確率が高まるために、検出効率が低下した。更に、このような熱化(散乱)によって、中性子のシンチレータ内における走行時間が長くなり、中性子の検出タイミングを測定するような場合において、検出の時間分解能が劣化するため、例えば高い時間分解能が要求される中性子のTOF測定においては使用が困難となった。

【0011】

このため、高いn/選択性で、高線量の中性子を高効率で測定できる中性子検出器が望まれた。

【0012】

本発明は、かかる問題点を鑑みてなされたものであり、上記問題点を解決する発明を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明は、上記課題を解決すべく、以下に掲げる構成とした。

本発明の中性子検出器は、中性子を吸収して二次荷電粒子を放出する中性子吸収同位体を含む蛍光体が中性子を吸収した際に発する蛍光によって前記中性子を検出する中性子検出器であって、前記蛍光体で構成された薄膜状の蛍光体層と、当該蛍光体層と膜厚方向で隣接し前記蛍光を透過させる光透過材料で構成された薄膜状の光透過層とが、前記中性子の入射方向に沿って複数組設けられた積層構造を有するシンチレータと、前記蛍光を検出した出力として出力パルスを発する光検出器と、を具備し、前記蛍光体層の密度と厚さの積である密度長は $0.0625\text{ g/cm}^2 \sim 0.5\text{ g/cm}^2$ の範囲、前記光透過層の密度長は $0.2\text{ g/cm}^2 \sim 1.3\text{ g/cm}^2$ の範囲とされたことを特徴とする。

本発明の中性子検出器において、前記光検出器は、前記入射方向に沿って前記シンチレータから発せられる前記蛍光を検出することを特徴とする。

本発明の中性子検出器において、前記光検出器は、前記蛍光体層及び前記光透過層の面内方向に沿って前記シンチレータから発せられる前記蛍光を検出することを特徴とする。

本発明の中性子検出器において、前記光検出器として、前記シンチレータを挟んで前記面内方向に沿って対向する第1の光検出器、第2の光検出器が設けられ、前記第1の光検出器による前記出力パルスである第1の出力パルス、前記第2の光検出器による前記出力パルスである第2の出力パルスの間に同時性が認められた場合に、前記第1の出力パルス及び前記第2の出力パルスに基づいた出力を前記出力パルスとして新たに出力する同時計数部を具備することを特徴とする。

本発明の中性子検出器は、前記シンチレータにおいて、前記蛍光体層と当該蛍光体層に隣接する前記光透過層とが組み合わせられて前記蛍光体層が発した前記蛍光を伝搬させるセグメントが前記入射方向に沿って複数形成され、当該セグメント内において当該セグメント内の前記蛍光が前記面内方向に伝搬し、かつ隣接する前記セグメント間では前記蛍光は伝搬しないように、前記積層構造において、前記蛍光を遮断する遮光層が、前記入射方向で隣接する前記セグメント間に設けられ、前記光検出器は、前記セグメント毎に設けられ

たことを特徴とする。

本発明の中性子検出器は、前記セグメント毎の前記出力パルスにおいて、他の前記出力パルスと同時性が認められなかった前記出力パルスを出力させる非同時計数部を具備することを特徴とする。

本発明の中性子検出器は、前記光透過層の前記蛍光に対する屈折率の、前記蛍光体層の前記蛍光に対する屈折率に対する比が $0.90 \sim 1.10$ の範囲であることを特徴とする。

本発明の中性子検出器において、前記蛍光体層及び前記光透過層の主成分は酸化ケイ素 (SiO_2) であり、前記蛍光体層には前記中性子吸収同位体が添加されたことを特徴とする。

本発明の中性子検出器において、前記中性子吸収同位体は ^6Li 又は ^{10}B であることを特徴とする。

【発明の効果】

【0014】

本発明は以上のように構成されているので、高い n/γ 選択性で、高線量の中性子を高効率で測定できる中性子検出器を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】本発明の第1の実施の形態に係る中性子検出器に用いられるシンチレータの構造を示す断面図である。

【図2】従来の中性子検出器、本発明におけるシンチレータを用いた場合における、中子と γ 線が共に検出される際のパルス波高分布を模式的に示す図である。

【図3】蛍光体中における γ 線光子 (A)、中子 (B) (C) の相互作用による発光の状況を示す図である。

【図4】蛍光体層における中子吸収により放出された荷電粒子のエネルギーの吸収率と膜厚の関係である。

【図5】蛍光体層における 2.2MeV の γ 線の感度と膜厚の関係である。

【図6】第1の実施の形態に係る中性子検出器の2種類の構成を示す図である。

【図7】蛍光が通過する光透過層の層数に応じたパルス波高分布を実測した結果である。

【図8】第1の実施の形態に係る中性子検出器に用いられるシンチレータにおいて、 2.2MeV の γ 線の感度と光透過層の膜厚の関係を蛍光体層の膜厚毎に比較した結果である。

【図9】第1の実施の形態に係る中性子検出器に用いられるシンチレータにおいて、 5.0MeV の γ 線の感度と光透過層の膜厚の関係を蛍光体層の膜厚毎に比較した結果である。

【図10】本発明の第2の実施の形態に係る中性子検出器に用いられるシンチレータの構造を示す断面図である。

【図11】第2の実施の形態に係る中性子検出器の構成を示す図である。

【図12】第2の実施の形態に係る中性子検出器で用いられるシンチレータにおいて、 2.2MeV の γ 線の感度と蛍光体層の膜厚の関係をセグメント化の有無で比較した結果である。

【図13】第2の実施の形態に係る中性子検出器の変形例の構成を示す図である。

【図14】第2の実施の形態に係る中性子検出器で用いられるシンチレータにおいて、 5.0MeV の γ 線の感度と蛍光体層の膜厚の関係をセグメント化の有無で比較した結果である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

本発明の実施の形態に係る中性子検出器は、中子を検出するシンチレーション検出器である。このため、例えば特許文献2に記載の中性子検出器等と同様に、中子を吸収して蛍光を発するシンチレータと、この蛍光を検出する光検出器とが組み合わせて用いられ

10

20

30

40

50

る。ここでは、このシンチレータの構造、あるいは光検出器との組み合わせの形態に特徴を有する。以下では、シンチレータの基本的構造に基づいて分類された2つの実施の形態について説明する。

【0017】

(第1の実施の形態)

図1は、第1の実施の形態に係る中性子検出器において用いられるシンチレータ10の構造を示す平面図(a)、断面図(b)である。ここで、検出すべき中性子は図におけるz方向負側からこのシンチレータ10に入射する。このシンチレータ10は、z方向において、蛍光体層11と光透過層12とが交互に積層された積層構造を具備する。蛍光体層11、光透過層12は、共に図中xy方向に広がる薄膜状の構成を具備する。図1においては蛍光体層11が5層、光透過層12が4層設けられているが、これらの数は適宜設定される。

10

【0018】

蛍光体層11は、荷電粒子のエネルギーを吸収することによって蛍光を発する蛍光体で構成され、この蛍光の検出によってこの荷電粒子を検知することができる。ここでは、特に電荷をもたない中性子に対する感度をもたせるために、例えば中性子吸収同位体が添加された蛍光体を用いられる。こういった蛍光体は、例えば従来より知られる中性子検出用のシンチレーションガラス、 ${}^6\text{Li-glass:Ce}^{3+}$ である。具体的には、GS20、KG2(Scintacor社製)等が用いられる。十分なn/選択性を得るためには、中性子吸収時の発光量が電子当量エネルギー(MeVee)単位で、1.5MeVee以上とすることが好ましい。光透過層12は、この蛍光体が発した蛍光の透過率が高く中性子の吸収が小さい材料で構成される。また、後述するようにこの蛍光に対する屈折率が蛍光体層11と近いこと、蛍光に対して透明であること、が好ましく、光透過層12を構成する材料としては、合成石英や、酸化鉛を僅かに含有させた鉛ガラス等が好ましく用いられる。

20

【0019】

このような構成によって、このシンチレータ10が中性子を検出する際におけるn/選択性を高めた上で、中性子を高効率に検出することができる。以下にこの点について説明する。一般的には、シンチレータを構成する蛍光体は、荷電粒子のエネルギーを吸収して蛍光を発する。この蛍光を時間分解能の高い光検出器(光電子増倍管)等で検出した場合、この蛍光により光電面で光電子が生成され、それが増幅されることで発光時間分布に応じたパルス状の電気出力が得られる。この光電子の数が発光強度に対応し、これはこの出力パルス、いわゆるパルス波高あるいは電荷積分値に対応する。

30

【0020】

この際、中性子と線の蛍光体に対するエネルギー付与の形態の違いに起因する出力パルス波形の違いは僅かにあるものの、中性子が吸収された際の蛍光による出力パルスと、線によりエネルギーが付与された際の蛍光による出力パルスは、光量(全光子数)が同程度であれば、区別することは一般的には容易ではない。例えば、後述するように蛍光体における中性子吸収時の放出エネルギーが4.78MeVであっても、これに対応した光量に対する電子当量エネルギーは前記のGS20において、約1.6MeVeeとなる。一方、例えば2.2MeVの線は蛍光体中で主にコンプトン散乱をし、この際に蛍光体中の電子に約2.0MeV以下の連続的なエネルギーを付与する。このため、これらのパルス波高が重複する部分については、パルス波高からこれらを区別することは原理的にできない。こうした状況下でも中性子を線から区別して検出することが要求される。

40

【0021】

これに対し、このシンチレータ10では、中性子、線光子が入射した場合に、発光強度(パルス波高)が、中性子と線光子とで大きく異なるような構造とされる。これによって、パルス波高から両者の弁別を容易に行うことができる。

【0022】

まず、一般的なシンチレータを用いた場合において、中性子と線とが混在した場合の

50

出力（出力パルスのパルス波高値の分布）について説明する。図2は、この状況を模式的に説明する図である。ここで、横軸は出力パルスのパルス波高であり、蛍光体が単一の中性子、線光子によって吸収したエネルギーに対応する。縦軸は、多数の中性子、線光子が検出された場合におけるこの場合の頻度である。

【0023】

図2において、D1は、全体が蛍光体で厚く構成された従来のシンチレータを用いた場合における中性子の出力パルスのパルス波高分布である。ここで、この分布のピークエネルギーは、後述の ${}^6\text{Li}$ と中性子の核反応による一定の放出エネルギー（発光量の電子当量エネルギーはGS20で前記の通り1.6MeVee）に対応する。一方、D2は同様のシンチレータを用いた場合における線（2.2MeV）によるパルス波高の分布である。ここで、中性子によるD1は前記のような単一のピークをもつものに対して、線の場合にはコンプトン散乱等によって線の持つ最大エネルギー付近から低エネルギー側に向けての連続スペクトルを持つため、広がった分布となる。ここで示されるように、D1とD2の重複した範囲では、パルス波高値のみから中子と線の識別（弁別）を行うことは困難である。

10

【0024】

一般的に、シンチレータを構成する蛍光体は、この蛍光体中の電子を基底状態から励起状態にするだけのエネルギーよりも十分に高いエネルギーの荷電粒子のエネルギーを吸収することによって、発光する（蛍光を発する）。この発光波長は、励起状態と基底状態のエネルギーの差に対応し、蛍光体が吸収したエネルギーと、単位長さ当たりのエネルギー吸収量等に応じた数だけこの発光波長をもつ光子が発生する。

20

【0025】

ここで、線光子は、蛍光体中の電子と電磁相互作用することによって、電子にそのエネルギーを付与するため、前記の荷電粒子は電子となり、この電子がその運動エネルギーを蛍光体に付与することによって、蛍光が発せられる。このとき、線に弾き出された電子は運動量保存則から、その進行方向は前方となりやすく、とりわけ中子の波高値と近くなるような大きなエネルギーを受け取った電子ほど、その進行方向は元の線の入射方向と近くなる。

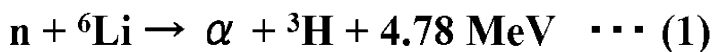
【0026】

これに対して、中子はほとんど電磁相互作用をせず、一般的な物質の中子吸収確率は低い。ただし、中子の吸収によって高エネルギーの二次荷電粒子の放出をする中子吸収同位体が蛍光体に含まれれば、これが中子を吸収することによって高エネルギーの二次荷電粒子が発生する。例えば、中子吸収同位体として知られる ${}^6\text{Li}$ を用いた場合には、この反応は(1)式の通りとなる。

30

【0027】

【数1】



【0028】

すなわち、この場合の二次荷電粒子は ${}^4\text{He}$ 原子核と三重水素（ ${}^3\text{H}$ 原子核）であり、その放出分布には前記の線の場合の電子とは異なり方向依存性はなく、運動量保存則より正反対の方向にそれぞれ2.05MeVと2.73MeVの計4.78MeV程度の運動エネルギーをもって発せられる。その後、これらの二次荷電粒子によってこの物質中の電子が励起され、同様に蛍光が発せられる。二次粒子の種類やエネルギーは異なるが、他の中子吸収同位体（例えば ${}^{10}\text{B}$ ）についても二次粒子によってエネルギーが付与されるのは同様である。

40

【0029】

ここで、二次荷電粒子（原子核）の質量 \gg 電子の質量（例えば電子の質量： m_e の質量=1:7300）であるため、同等のエネルギーをもつ場合には、二次荷電粒子の速

50

度 << 電子の速度となる。このため、線光子による電子が蛍光体中で発光を発生させる状況と、中性子による二次荷電粒子が蛍光体中で発光をさせる状況に、違いが生じる。図3は、これらの状況を模式的に示す図である。ここで、線光子、中性子は図中左側から入射するものとする。

【0030】

図3において、上段の(A)が、線光子によって発生した高エネルギーの電子が厚い蛍光体で構成されたシンチレータ100中でそのエネルギーを付与して発光を生じさせる状況を模式的に示す。一方、中段の(B)、下段の(C)は、中性子によって発生した二次荷電粒子についての同様の状況を比較して示す。ここで、この図は、発光する領域等を例示した図であり、発光の総量を図示したものではない。前記のように、電子の速度は二次荷電粒子と比べて高いことに加え、例えばその電荷量は粒子(二次荷電粒子)の半分である。荷電粒子(電子、二次荷電粒子)の単位走行距離当たりの付与エネルギー(dE/dx)は、通過時間(速度に反比例)と電荷量の自乗の積に比例するため、電子による $dE/dx \ll$ 二次荷電粒子による dE/dx となる。このため、シンチレータ100中において、電子の飛程 \gg 二次荷電粒子の飛程となり、例えば1.5 MeVの電子の前記GS20蛍光体中での最大飛程は2.5 mm程度となる。ただし、電子は軽い(あるいは蛍光体中の電子と同じ質量である)ために散乱されやすく、図2(A)に示されるように、その経路は複雑となり、実際の飛程はより短くなる。シンチレータ100が電子の飛程と比べて薄ければ、電子は全エネルギーをシンチレータ100に付与することができない確率が高くなるため、パルス波高は、シンチレータ100が十分に厚い場合と比べて減少する。

【0031】

一方、中性子吸収によって発生した高エネルギーの二次荷電粒子の単位飛行距離当たりの付与エネルギーは大きいいため、全エネルギーの付与に要する距離は短く、例えば粒子の場合には前記GS20蛍光体内で数 μm 、 ^3H の場合には数十 μm となる。

【0032】

以上より、中性子吸収同位体が蛍光体内に内包された場合に、その厚さを、中性子吸収においては二次荷電粒子のほぼ全ての運動エネルギーが付与される程度とし、線光子との相互作用においては、この場合に生じた高エネルギー電子が速やかに蛍光体外へと逸脱する程度の厚さとすることができる。この場合、図2において、理想的には中性子による波高分布D1はそのまま維持されるのに対して、線による波高分布はD2から低エネルギー側のD3に変化する。この場合、分布D1と分布D3の間に閾値Tを設定すれば、検出されたパルス波高値がT以上の場合には中性子が、T未満である場合には線が検出されたと判定することができる。

【0033】

また、前記の通り、高エネルギー電子の進行方向は線の入射(進行)方向とほぼ等しいため、この効果を大きくするためには、蛍光体が薄膜状である場合において線の入射方向が蛍光体の膜厚方向が等しいことが好ましい。中性子と線が混在する多くの場合には、中性子源と線源は重なるため、この条件を満たすこととなる。

【0034】

また、中性子の吸収確率は高くないため、図3において、(B)で示されたように表面近くで中性子が吸収されて二次荷電粒子が発生する場合もあるが、(C)で示されたように、蛍光体の深い場所で中性子が吸収されて二次荷電粒子が発生する場合もある。蛍光体が薄く1層のみ設けられた場合には(B)の場合に中性子を検出することができるが、中性子がこの蛍光体を相互作用なしに透過する場合に対応する(C)の場合には中性子を検出することができないため、中性子の検出効率が低下するおそれがある。これに対して、図1(b)のように蛍光体層11と光透過層12を多層構造とすることで、蛍光体層11の合計の厚さを確保すれば、(C)の場合も中性子を検出することが可能となり、中性子の高い検出効率を保つことができる。

【0035】

10

20

30

40

50

以下に、上記の点を明確にするために具体的に検討を行った結果について説明する。図4は、中性子によって発生した二次荷電粒子（ α 粒子、 ^3H 原子核）のエネルギーが、蛍光体中で大部分吸収される確率を計算した結果である。ここでは、中性子吸収同位体は前記のように ^6Li であるものとし、すなわち、二次荷電粒子は前記の α 粒子、 ^3H 原子核であり、蛍光体は前記GS20であるとしている。この吸収確率を十分に大きくする（1に近くする）ためには、蛍光体が厚いことが好ましいが、この結果より、蛍光体の厚さが1.0mmである場合に吸収率は0.98となり、この厚さが0.25mmであっても吸収率は0.94程度となるが、これより薄くなると急激に減少していく。

【0036】

一方、前述のようにGS20が用いられた場合における中性子（前記の二次荷電粒子）の発光量に相当する電子換算エネルギーは1.6MeV/eである。すなわち、このエネルギーの電子と二次荷電粒子の出力におけるパルス波高は略同一であるため、図2のD1とD2に示されたように、パルス波高によって α 線と中性子（あるいは高エネルギー電子と二次荷電粒子）を弁別することはできない。

【0037】

出力パルスのパルス波高値で、中性子と、この程度のエネルギーの電子を発生させる α 線光子とを弁別するために、 α 線（これによって発生した電子）によって蛍光体に付与されるエネルギーを1.6MeVよりも十分小さくすることによって、図2におけるD3の分布を実現することができる。例えば、エネルギー分解能（波高分布のピーク値を波高分布の半値全幅で割った値）が前記の二次荷電粒子の場合に16%程度であり、1.2MeV電子の場合には24%程度である、前記GS20蛍光体（シンチレータ）と光電子増倍管からなる、一般的な検出器を用いた場合を考える。この場合、図2の波高分布において、中性子による分布D1がT以上に99%含まれるようにTを設定し、かつ α 線で生じる蛍光体層内のエネルギー付与が1.2MeV以下とすれば、 α 線の波高値は閾値T以上にほとんど入らないため、波高値でのn/選択性が高まる。このため、電子による蛍光体への付与エネルギーが1.2MeV以下となるように、蛍光体層11を薄くすればよい。

【0038】

前記のように熱外中性子以上のエネルギーを持つ中性子の吸収確率は大きくないため、高効率で中性子を検出するためには、一定以上の蛍光体層11の合計厚さが必要であり、このために、前記のように図1(b)に示されたような多層構造が有効である。ただし、多層構造とすることによって、 α 線との相互作用確率も高くなり前記のように波高分布が低エネルギー側にシフトしたとしても、頻度自体が大きくなることで α 線の感度が高くなってしまふおそれがある。このため、蛍光体層11の合計厚さを一定とした上で、蛍光体層11の層数（及び単体の厚さ）を変えた場合における、 α 線の感度（1.2MeVを超えたエネルギーが蛍光体に付与される確率）について調べた。ここで、蛍光体層11の合計の厚さを5mmに固定し、これを単層（厚さ5mm）、3層に分散（蛍光体層11単体の厚さ1.67mm）、5層に分散（同じく単体の厚さ1mm）、10層に分散（同じく単体の厚さ0.5mm）、20層に分散（同じく単体の厚さ0.25mm）、とし、多層とした場合に蛍光体層11間には厚さ2mmの合成石英で構成された光透過層12を挟んで図1の多層構造を構成した場合における、 α 線の感度の相対値を計算した結果を図5に示す。ここで、 α 線のエネルギーは、前記のような、減速された中性子と減速材中の水素との反応によって発せられる2.2MeVとした。この2.2MeVの α 線は、様々な測定条件において主要な背景事象となり得るため、実用上最も注意すべき α 線の一つである。

【0039】

図5において、厚さ5mm（単層）の場合は、従来の、シンチレータ全体が蛍光体で一樣に構成され光透過層12がない場合に対応する。このため、光透過層12を挟んで多層化することによって、 α 線光子による発光強度を、従来よりも大幅に低下させることができることが図5より明らかである。

【0040】

10

20

30

40

50

電子のエネルギーの吸収量は、蛍光体の密度と通過した厚さ（深さ）の積（密度長）によるところが大きい。そのため、より一般的には、この図5の横軸にGS20の密度（ 2.5 g/cm^3 ）を掛け合わせた密度長を指標として用いることが好ましく、GS20以外の蛍光体を用いた場合でも、同等の密度長の蛍光体を用いることで、GS20と同様の結果を得ることができる。例えば、密度長が 1.25 g/cm^2 （GS20換算で5mm厚）の1層の蛍光体層11を用いた場合と比較し、 0.25 g/cm^2 （GS20換算で1mm厚）の5層の蛍光体層11を前記のように積層構造とすることで、エネルギー吸収が小さくなり、1.2MeV以上のエネルギーが吸収される割合は1/10程度となる。このような密度長を指標とした場合、上記のような効果を得るために好ましい蛍光体層11の密度長の範囲は、 $0.0625 \text{ g/cm}^2 \sim 0.5 \text{ g/cm}^2$ となる。

10

【0041】

このため、蛍光体11の厚さの合計が同一であっても、単体の蛍光体層11を薄くし、その積層総数を多くした場合には、中性子による出力パルスのパルス波高と線光子による出力パルスのパルス波高の差分が大きくなる。

【0042】

しかしながら、光透過層12で中性子が吸収されてしまうと、この反応によるエネルギーは発光に寄与しないため、この中性子は検出されない。そのため、図1の構造のシンチレータ10においては、中性子が光透過層12で吸収される分だけ中性子の検出効率が低下する。よって、光透過層12は、中性子吸収確率の低い材料を用いることが望ましい。

【0043】

このため、光透過層12は、前記の中性子吸収同位体を含まない、発光に対して透明な材料で構成することが好ましい。ただし、後述する中性子検出器においては、シンチレータ10から取り出された発光が外部で検出されるが、この際に蛍光体層11と光透過層12の界面における反射は、この発光をシンチレータ10の外部に取り出す際の障害となる。このような界面の反射を抑制するためには、蛍光体層11と光透過層12の発光に対する屈折率が近いことが好ましい。具体的には、光透過層12の蛍光体層11に対するこの発光の波長での屈折率は $0.90 \sim 1.10$ の範囲であることが好ましい。以上の要件を満足する材料として、例えば蛍光体層11として前記のGS20を用いた場合には、合成石英を用いることができる。すなわち、酸化ケイ素（ SiO_2 ）を主成分とする材料を蛍光体層11と光透過層12を構成する材料として用いることによって、界面での反射を抑制することができる。

20

30

【0044】

以上より、図1のシンチレータ10を用いた場合には、中性子の検出効率や中性子による出力パルスのパルス波高を低下させずに、線光子によるパルス出力のパルス波高のみを大きく低下させることができる。これにより、パルス波高のみによって中性子と線光子の弁別を行うことができる。なお、出力パルスの減衰時定数は蛍光体層11を構成する材料で定まり、少なくとも上記の構成によってこの減衰時定数が長くなることはないため、この減衰時定数が短い材料を蛍光体層11に用いれば、従来のシンチレータと同様に高線量下の測定が可能となる。

【0045】

次に、上記のシンチレータ10が実際に検出器に用いられる場合の態様について説明する。図6(a)(b)は、上記のシンチレータ10が用いられる中性子検出器1、2の2種類の形態を模式的に示す。図において、矢印Aは検出すべき中性子、あるいはこの中性子の検出の際の障害となる線の入射方向であり、矢印B、C、Dは、このシンチレータ10において中性子あるいは線によって発せられる発光のうち、光検出器が検出する対象となるものの進行方向を示す。

40

【0046】

ここで用いられる光検出器としては、時間分解能が高く、前記のような蛍光体層11が発した発光を受光して出力パルスを発することが可能なものが用いられ、具体的に、光電子増倍管等が用いられる。

50

【 0 0 4 7 】

図 6 (a) の中性子検出器 1 においては、中性子の入射方向 (矢印 A) と、光検出器 2 1 が検出すべき光の入射方向 (矢印 B) が、共に図 1 における積層方向 (z 軸方向) とされている。このため、例えばシンチレータ 1 0 が図 1 における x y 平面に広がる面状である場合には、この構成を特に容易に実現することができる。

【 0 0 4 8 】

また、図 6 (a) においては単一の光検出器 2 1 が用いられているが、実際には、図 1 における x y 面内で多端子型光検出器等を用いてもよい。この場合には、シンチレータ 1 0 の x y 面内における中性子吸収位置 (発光位置) を、この光検出器の端子間隔程度の分解能で認識できる。この際、光検出器だけでなくシンチレータ 1 0 も同様に分割し、配列させてもよい。

10

【 0 0 4 9 】

ここで、図 3 (B) (C) に示されたように、中性子の吸収確率は高くないことに起因して中性子が吸収される箇所の深さは様々となるため、前記のように、蛍光体層 1 1 と光透過層 1 2 とが多層構造とされた。図 6 (a) において、最も表面側 (図 6 (a) における最も左側) の蛍光体層 1 1 が発した蛍光は、経路 R 1 で示されるように、これよりも光検出器 2 1 側の層 (4 つの光透過層 1 2 、 4 つの蛍光体層 1 1) を全て通過してから光検出器 2 1 に達する。これに対し、最も光検出器 2 1 に近い側 (最も右側) の蛍光体層 1 1 が発した蛍光は、経路 R 2 で示されるように、短い距離で直接光検出器 2 1 に達する。このため、蛍光体層 1 1 や光透過層 1 2 において蛍光の吸収や減衰、層間の反射等が無視できない場合には、光検出器 2 1 においては、前者の蛍光は後者の蛍光よりも低強度 (低いパルス波高) として検出される。このため、同一のエネルギーが付与された場合でも、図 1 におけるどの蛍光体層 1 1 にこのエネルギーが付与されたかによって、検出される発光強度 (パルス波高) は異なる場合がある。これにより、図 2 における D 1 の横方向の広がりが大きくなる。

20

【 0 0 5 0 】

図 7 は、このような蛍光の検出における光透過層 1 2 による影響について実測をした結果である。ここでは、この影響を調べるために、蛍光体層 1 1 としては図 1 (b) における最も左側の蛍光体層 1 1 のみを設けこれ以外の蛍光体層 1 1 は設けず、その右側の光透過層 1 2 の層数を変えた場合における、図 6 (a) の構成によって、光検出器 2 1 の出力における図 2 の D 1 に対応するパルス波高分布を測定した結果である。ここでは、光透過層 1 2 の層数が異なることによって、蛍光が透過する光透過層の総膜厚や層間の反射の影響等が異なる。ここで、光透過層 1 2 は合成石英で構成され、その単体の厚さは 2 . 5 m m とした。図 7 において、「ガラス 0 層」は、蛍光体層 1 1 が発した蛍光が光透過層 1 2 を全く通過せずに光検出器 2 1 に到達した場合に対応し、「ガラス 4 層」は、4 層 (合計厚さ 1 0 m m) の光透過層 1 2 が設けられた場合、「ガラス 1 2 層」は、1 2 層 (合計厚さ 3 0 m m) の光透過層 1 2 が設けられた場合、に対応する。この結果より、合成石英のように光透過率が十分高い材料を用いた場合でも、その存在によって、検出されたパルス波高値の減少は無視できない。図 1 (b) の構造のシンチレータ 1 0 を図 6 (a) において用いた場合、光検出器 2 1 で検出された蛍光がどの蛍光体層 1 1 から発せられたかは様々であり、これに応じて蛍光が通過する光透過層 1 2 の層数 (総厚) が異なるため、実際には光検出器 2 1 で得られるパルス波高分布は、図 7 の波高分布の重ね合わせとなる。この場合、図 7 における蛍光体層単層毎のパルス波高分布の広がり (半値全幅) が小さくとも、重ね合わせられたパルス波高分布の広がりは大くなる。これは、図 2 における分布 D 1 と分布 D 3 を離間させるという観点からは好ましくない。

30

40

【 0 0 5 1 】

このため、図 6 (a) の構成の場合には、蛍光体層 1 1 、光透過層 1 2 の光透過率が高く、かつこれらの層の界面の反射率が低い (これらの層の屈折率の差が小さい) ことが特に好ましい。また、積層総数を増やしすぎないことが好ましい。

【 0 0 5 2 】

50

図7においては、光検出器21による蛍光の検出に対して光透過層12が与える影響として、蛍光が通過する光透過層12の層数に応じた中性子検出の際のパルス波高分布の変化が示された。次に、光透過層12の厚さを変えた場合における線の感度について説明する。

【0053】

図8、9は、図5と同様に、蛍光体層11の合計の厚さを5mmに固定し、これを単層（厚さ5mm）、3層に分散（単体の厚さ1.67mm）、5層に分散（単体の厚さ1mm）、10層に分散（単体の厚さ0.5mm）、20層に分散（単体の厚さ0.25mm）とした場合において、光透過層12の厚さを変えた場合の線の感度を計算した結果であり、図8は線のエネルギーが2.2MeV、図9は線のエネルギーが5MeVの場合である。光透過層12は合成石英で構成されたものとする。図5とは異なり、縦軸は対数スケールとされている。

10

【0054】

図8、9の結果より、多層化した場合には、発光に寄与しない光透過層12の合計厚さが大きくなるほど、線の感度（発光強度）が低下する。この観点からは、光透過層12による中性子の吸収が無視できる場合には、線光子による発光強度を低下させるためには、光透過層12は厚いことが好ましい。しかしながら、光透過層12による中性子の吸収は僅かではあるものの、その厚みが増すにつれ中性子の検出効率は少しずつ減少する。また、特に後述する図6(b)の態様においては、光透過層12が厚い場合には、光検出器の感光面積を大きくしなければならず、コストの面でもデメリットが生じる。このため、不必要に光透過層12を厚くすることは好ましくなく、具体的には光透過層12の厚さは6mm（密度長換算 1.3 g/cm^2 ）程度以下とすることが好ましい。図8に示されたように、蛍光体層11を0.25mm（密度長換算 0.0625 g/cm^2 ）とした場合には、光透過層12は1mm（密度長換算 0.2 g/cm ）厚でも2.2MeVの線感度の抑制効果が十分見込まれる。しかし、蛍光体層11を0.25mmとすると、中性子の検出効率を確保するためには総層数を大きくする必要があるため、前記の通り、図6(a)の構成においてはパルス波高分布の広がりが大きくなり、好ましくない。図6(b)の構成を用いる場合においても、光透過層12が薄すぎると、面内方向の光の伝搬効率が下がるため、やはりパルス波高分布の広がりが大きくなり、図2における分布D1と分布D3を離間させるといった観点からは好ましくない。よって前記の蛍光体層11の場合と同様に光透過層12としても好ましい範囲を密度長として表すと、 $0.2\text{ g/cm}^2 \sim 1.3\text{ g/cm}^2$ となる。

20

30

【0055】

一方、図6(b)の中性子検出器2においては、光検出器が検出すべき蛍光の入射方向（矢印C、D）が図6(a)の場合とは 90° 異なり、かつシンチレータ10をy方向で挟んで対向する2つの光検出器（第1の光検出器）31A、光検出器（第2の光検出器）31Bが用いられている。蛍光体層11において中性子が吸収された際の発光には特定の方向性はなく、その光は全ての方向に対して発せられるため、この発光は、この光検出器31A、31Bによっても検出することができる。

【0056】

この場合には、前記のような、図6(b)における最も左側の蛍光体層11が発した光と、最も右側の蛍光体層11が発した光は、共にこの光を発した蛍光体層11やこれに隣接した光透過層12をy方向に沿って通過し、この光が発生してから光検出器31A、31Bに達するまでの経路長には差がない。このため、この場合には、図6(a)の場合のような、5つの蛍光体層11のうちどれが発したか（中性子を吸収したか）に応じてパルス波高が異なることはなく、多層構造としたことに起因するパルス波高分布の広がりは発生しない。

40

【0057】

一方、この場合においても、蛍光体層11や光透過層12中における前記のような光の吸収等が無視できない場合には、光検出器31A、31Bで得られた出力パルスのパルス

50

波高は、この影響を受ける。図6(b)において、蛍光体層11において光検出器31A側(図中上側)で中性子が吸収された場合には、光は、短い経路R3で光検出器31Aに、長い経路R4で光検出器31Bに達する。一方、蛍光体層11において光検出器31B側(図中下側)で中性子が吸収された場合には、光は、長い経路R5で光検出器31Aに、短い経路R6で光検出器31Bに達する。このため、蛍光体層11における光の吸収が無視できない場合において、光検出器31A側で中性子が吸収された場合には、光検出器31Aにおけるパルス波高が高く、光検出器31Bにおけるパルス波高が低くなり、光検出器31B側で中性子が吸収された場合には、この逆となる。すなわち、光検出器31A、31Bのそれぞれの出力パルスにおけるパルス波高にはy方向における中性子の入射位置に応じて分布が発生する。

10

【0058】

これに対して、この中性子検出器2においては、光検出器31Aの出力パルス(第1の出力パルス)P_Aと光検出器31Bの出力パルス(第2の出力パルス)P_Bは、同時計数回路(同時計数部)32に入力する。同時計数回路32は、出力パルスP_Aと出力パルスP_Bを同時に認識した場合には、その総和P_A+P_Bを出力する。P_A+P_Bのパルス波高は、y方向における中性子の入射位置にほとんど依存せず、中性子の吸収によって蛍光体層11が吸収したエネルギーに対応する。すなわち、このような同時計数回路32を用いることによって、蛍光体層11中において光の吸収が存在する場合でも、y方向における中性子の入射位置にほとんど依存しない出力パルスを得ることにより、中性子検出の際のパルス波高の分布の広がりを抑制することができる。これによって、中性子と線光子の弁別を容易に行うことができる。ただし、例えば光の吸収による減衰は入射位置から光検出器までの距離に対して非線形の関係となるため、P_AとP_Bの単純な和は、厳密には入射位置に依存しない量とはならない。より厳密には、この点を考慮してP_AとP_Bを用いて、入射位置に依存しないパルス波高を適宜算出して用いることが、より好ましい。なお、同時計数回路(同時計数部)32は、電気回路として構成してもよく、デジタル化された出力パルスに対する処理を行うコンピュータ等で構成してもよい。特にコンピュータを用いる場合には、この処理を検出時にリアルタイムで行う必要はなく、例えば一定期間内における出力パルスのデータを記憶させ、その後でこの一連のデータに対して一括してこのような処理を行わせてもよい。この場合、同時計数回路32を光検出器等から切り離し、測定環境から離間したオフラインの状態で行うこともできる。

20

30

【0059】

なお、図6(b)の構成においても、例えばx方向において光検出器31A、光検出器31B及びこれに対応して同時計数回路32を配列して設けることによって、x方向における中性子吸収位置(発光位置)を認識することができる。

【0060】

また、図6(b)の構成においては、中性子の吸収によって発生した蛍光は、原理的には常に光検出器31A、31Bで同時に検出されるため、光検出器31A、31Bの出力のうち、中性子等の放射線検出と無関係なノイズ成分は、上記の同時計数回路32の出力においては、偶発的に同時出力されない限り除去される。なお、同時計数回路32における光検出器31A、31Bの出力の同時性においては、適宜設定された短い時間幅の中にあるものが同時であると認識される。

40

【0061】

なお、図6(b)のようにy方向に沿った発光を光検出器で検出する場合において、蛍光体層11における光の吸収が無視できる場合には、図6(b)における同時検出回路32を用いず、かつ検出器31A、31Bのうち的一方のみを用いてもよい。また、前記のように蛍光体層11はz方向で薄く形成され、これよりも厚い光透過層12をこれに隣接させて設けることによって、蛍光体層11だけでなく光透過層12をy方向に伝わる光も受光できる図1の構造は、特に有効である。

【0062】

(第2の実施の形態)

50

次に、図1の構造のシンチレータ10とは異なる構造のシンチレータが用いられる第2の実施の形態について説明する。図10は、このシンチレータ50の構造を示す、図1(b)に対応する断面図である。このシンチレータ50においても、蛍光体層11、光透過層12がそれぞれ5層ずつ設けられており、蛍光体層11が中性子(あるいは線光子)と相互作用して蛍光を発生する点についても同様である。

【0063】

ただし、ここでは、図中の各光透過層12の右側には、蛍光を透過させずに反射する薄い遮光層13が形成されている。遮光層13は、蛍光を透過させないが中性子の吸収が無視できる材料(例えばアルミニウム等)で構成されることが好ましい。一般的に薄い金属で中性子を吸収することは困難であるのに対して、可視光や紫外光を遮光することは容易であるため、このような遮光層13を容易に形成することができる。また、線あるいはこれによって発生した高エネルギー電子のエネルギーは遮光層13で吸収されてもよい。一方、後述するように、このシンチレータ50においてはセグメント毎に光検出が行われ、遮光層13はセグメント間の境界となる。この際、セグメント毎の光検出が容易となるように、遮光層13の厚さを厚く設定してもよい。例えばアルミニウム等による中性子の吸収は小さいため、このような設定も容易である。

10

【0064】

図10において、ある一つの蛍光体層11が発した光は隣接する光透過層12には入射するが、遮光層13によって、その隣の蛍光体層11に入射することが抑制される。このため、このシンチレータ50は、z方向において、蛍光に対しては、遮光層13を境界とした5つのセグメントS1~S5に区分される。図10において、一つのセグメントには、一つずつの蛍光体層11、光透過層12が設けられ、一つの蛍光体層11が発した光はこれが属するセグメント内のみを特にy方向に沿って進行する。また、蛍光体層11が発した光は、遮光層13の存在によって、図6(a)における矢印Bの方向には光は発せられず、図6(b)における矢印C、Dの方向においてのみ発せられる。

20

【0065】

なお、図1の場合と同様に、実際には蛍光体層11等の積層数は適宜設定される。また、図10の例では一つのセグメントは一つの蛍光体層11、一つの光透過層12で構成されているが、一つのセグメント(遮光層13で仕切られた領域)内に複数の蛍光体層11や光透過層12があってもよい。

30

【0066】

前記のように、1個の中性子の吸収による発光は、単一の蛍光体層11のみで発生するのに対して、1個の線光子による発光は複数の蛍光体層11にまたがって発生する場合がある。この場合、図10の構造のようにセグメントS1~S5を設け、セグメント単位で発光を検出すれば、線光子による発光においては他のセグメントにおける発光の影響が除去されるため、更に線光子による発光強度を低下させることができる。

【0067】

この場合、図6(a)における矢印Bの方向で光を取り出すことはできないため、このシンチレータ50を、図6(a)におけるシンチレータ10の代わりに用いることはできないが、図6(b)におけるシンチレータ10の代わりに用いることができる。更に、このシンチレータ50は、図6(b)とも異なる態様で用いることができる。図11は、この中性子検出器3の構成を図6(b)に対応させて示す。ここでは、シンチレータ50の記載は簡略化されて前記のセグメントS1~S5のみが記載されている。

40

【0068】

ここでは、図6(b)における光検出器31A、31Bに対応して、セグメントS1において光検出器61A、61Bが、セグメントS2において光検出器62A、62Bが、セグメントS3において光検出器63A、63Bが、セグメントS4において光検出器64A、64Bが、セグメントS5において光検出器65A、65Bが、それぞれ設けられている。また、図6(b)における同時計数回路32に対応して、光検出器61A、61Bの出力P_{1A}、P_{1B}は同時計数回路(同時計数部)71に、光検出器62A、62B

50

の出力 P_{2A} 、 P_{2B} は同時計数回路（同時計数部）72 に、光検出器 63A、63B の出力 P_{3A} 、 P_{3B} は同時計数回路（同時計数部）73 に、光検出器 64A、64B の出力 P_{4A} 、 P_{4B} は同時計数回路（同時計数部）74 に、光検出器 65A、65B の出力 P_{5A} 、 P_{5B} は同時計数回路（同時計数部）75 に、それぞれ入力する。

【0069】

このため、同時計数回路 71 からは、光検出器 61A、61B で同時と認識された出力パルス P_{1A} 、 P_{1B} の和である P_1 が出力され、同時計数回路 72 ~ 75 から、同様に、接続された 2 つの光検出器の出力パルスの和である $P_2 \sim P_5$ がそれぞれ出力される。すなわち、この中性子検出器 3 においては、セグメント毎に図 6 (b) の中性子検出器 2 の構成が実現され、出力としては $P_1 \sim P_5$ がそれぞれ異なるチャンネルから得られる。なお、前記のように P_1 (等) を P_{1A} 、 P_{1B} の和 (等) とする必要はなく、 P_{1A} 、 P_{1B} から、入射位置に依存しない非線形成分を補正した値 P_1 (等) を適宜算出して用いることもできる。

10

【0070】

このため、図 10 のシンチレータ 50 を用いた場合には、それぞれセグメント $S_1 \sim S_5$ に対応した出力パルス $P_1 \sim P_5$ が個別に異なるチャンネル $CH_1 \sim CH_5$ で取り出され、図 6 (b) において出力として取り出される $P_A + P_B$ は、この場合における $P_1 \sim P_5$ のそれぞれに対応する。

【0071】

図 11 の構成において、線光子による発光強度を特に小さくすることができる点について、計算した結果を図 5 に対応させて図 12 に示す。ここでは、蛍光体層 11 の合計膜厚を一定として蛍光体層 11 の層数（あるいは単体の厚さ）を変えた場合における線の感度が、セグメント化の有無に応じて示されている。

20

【0072】

図 12 においては、前記のシンチレータ 10 に対する図 5 の結果（2.2 MeV の線の感度）において、遮光層 13 を用いてこれをセグメント化したシンチレータ 50（セグメント化あり）について同様の計算を行った結果が、図 5 の結果（セグメント化なし）と共に示されている。ここで、厚さ 5 mm の場合は単層の蛍光体層 11 のみが用いられた場合に対応するため、セグメント化ありとセグメント化なしの場合は実際には同一となる。多層構造の場合においては、線光子による発光強度（吸収されるエネルギー）が最も大きい 1 層目の蛍光体層 11（セグメント S_1 ）についての計算結果が示されている。この結果より、セグメント化した場合には、蛍光体層 11 を薄く層数を多くした場合において、特に線光子による発光強度を、セグメント化しない場合と比べて大きく低下させることができる。一方、遮光層 13 による中性子のエネルギーの吸収が無視できる場合には、中性子の吸収による発光強度は、前記のシンチレータ 10 と変わらない。このため、図 11 の構成によれば、特に n/γ 選択性を高めることができる。

30

【0073】

図 11 の構成においては、出力が 5 つのチャンネル（ $CH_1 \sim CH_5$ ）から取り出されたため、各チャンネル毎に中性子の弁別、検出を行えばよく、この場合の弁別が、特に容易に行われる。また、例えば出力が 5 つのチャンネルに分かれれば、セグメント毎の計数率も下がるので、高線量下においても有効である。更に、TOF 測定のように、中性子速度を精度よく測定したい場合において、どの蛍光体層（セグメント）で中性子が反応したかが分かるため、距離の不定性が小さくなり、有効である。

40

【0074】

図 11 の中性子検出器 3 の変形例となる中性子検出器 4 の構成を図 13 に示す。図 11 の中性子検出器 3 においては、出力が 5 つのチャンネル毎に取り出されたが、この中性子検出器 4 においては、非同時計数回路（非同時計数部）81 が、単一の出力をするために用いられる。

【0075】

非同時計数回路 81 には、 $CH_1 (P_1) \sim CH_5 (P_5)$ が入力し、前記の同時計数

50

回路32とは逆に、CH1(P₁)~CH5(P₅)のうち同時性の認められなかったもののみを出力する。このため、非同時計数回路81からは、P₁~P₅のうちのいずれかが出力される。この出力に同時性が認められなかったことは、対象となった出力パルス(P₁~P₅)に対応したセグメント以外で、同時に発光した他のセグメントがなかったことを意味する。前記のように、中性子と線光子の弁別はパルス波高を用いて行われるが、線光子は同時に複数のセグメントを発光させる可能性があるため、非同時計数回路81を用いることによっても線の検出は抑制され、更にn/選択性を高めることができる。前記の同時計数回路32と同様に、非同時計数回路81もコンピュータを用いて構成することもでき、この場合にはこの処理をリアルタイムで行う必要はなく、オフラインの状態で行わせることができる点についても同様である。特に高線量下においては、偶発的に複数の信号が各セグメントで同時に計数される確率が大きくなるため、非同時計数回路81を用いる場合は注意が必要である。

10

【0076】

このようなセグメント化の効果は、線のエネルギーに応じて異なる。図14は、2.2MeVの線に対する図12の結果を、5.0MeVの線について同様に計算した結果である。入射する線が高エネルギーの場合においては、蛍光体層11で弾き出された高エネルギー電子が、この蛍光体層11を突き抜けた後、光透過層12も突き抜け、再び後段の蛍光体層11に入射し発光に寄与する確率が高くなる。また光透過層12で弾き出された高エネルギー電子が光透過層12で吸収されきらず、後段の蛍光体層11においても吸収される確率が非常に高くなる。そのため、図14におけるセグメント化なしの場合において、蛍光体層11の厚さが1mm(密度長換算0.25g/cm²)や1.67mm(密度長換算0.42g/cm²)の場合における線の感度は、5mm(密度長換算1.25g/cm²)の場合(従来例)よりも高くなっている。しかしながら、セグメント化によって複数の蛍光体層11にまたがる発光が、各セグメントによる出力へと分散されることにより、単一セグメントの出力が下がり、大きく感度が低下する。このため、セグメント化の効果は線のエネルギーが高いほど大きくなる。また、このような高エネルギー線に対しては、前述の非同時計数回路81が特に有効となる。

20

【0077】

第2の実施の形態においても、蛍光体層11の厚さ(密度長)の好ましい範囲は、第1の実施の形態の場合と同様である。一方、第2の実施の形態の場合には、蛍光はセグメント間を伝搬しないため、光透過層12の厚さ(密度長)に対する制限は緩い。ただし、第2の実施の形態においては、各セグメントが厚い場合には、光検出器の感光面積を大きくしなければならず、コストの面でもデメリットが生じる。このため、不必要に光透過層12を厚くすることは好ましくなく、光透過層12の厚さは6mm(密度長換算1.3g/cm²)程度以下とすることが好ましい。

30

【0078】

第2の実施の形態において、光透過層12は蛍光を光検出器まで伝搬させる機能をもつが、蛍光体層11も同様に蛍光を光検出器まで導くことができるため、特にセグメント化を行った場合には、光透過層12をセグメント内に設けなくともよい。ただし、前記のように蛍光体層11は薄く設定されるため、その面内方向においては光(蛍光)の光検出器までの伝搬効率は高くない。この観点からも、光透過層12もセグメント内に設けることが好ましい。

40

【0079】

特許文献2に記載の技術においては、無機蛍光体粒子と樹脂材料が用いられ、無機蛍光体粒子が上記の蛍光体層11に、樹脂材料で構成された層が上記の光透過層12に対応するとも考えられる。しかしながら、上記の光透過層12とは異なり、水素が含まれる樹脂材料において中性子が散乱されて熱化・吸収される確率は高いため、この場合における中性子の検出効率は本発明と比べて低くなる。また、無機蛍光体粒子と樹脂材料は一般的には全く異なる材料で構成されるが、無機蛍光体粒子と樹脂材料を均一に混合するためには、これらの密度が近いことが要求される。この条件下で更にこれらの屈折率を近くし、本

50

発明における蛍光体層 1 1 と光透過層 1 2 の間と同様にこれらの界面における蛍光の反射を抑制するためには、樹脂材料あるいは無機蛍光体粒子の材料に対する制限が厳しくなるため、実際にはこのような材料を選択して用いることは容易ではない。これに対して、本発明の場合においては、蛍光体層 1 1 と光透過層 1 2 の密度に対するこのような制限はないため、材料の選択の自由度も高まる。

【 0 0 8 0 】

更に、本発明の場合には、蛍光体層 1 1 が 線（中性子）の入射方向に沿って薄くされた薄膜状とされ、かつ積層構造とされたことによって、上記のように中性子の感度を低下させずに 線の感度を大きく低下させることができたのに対し、特許文献 2 に記載の技術では、無機蛍光体粒子のサイズは等方的であり入射方向とは無関係であるため、中性子の感度を低下させずに 線の感度を低下させるという効果は小さい。

10

【 0 0 8 1 】

なお、上記と同様の動作を行うことができる限りにおいて、中性子検出器の具体的構成は任意である。例えば、蛍光体層、光透過層として、上記と同様の作用が可能である限りにおいて、どのような組み合わせを用いてもよく、これらの主成分が異なってもよい。また、光検出器の構成も適宜設定することができる。

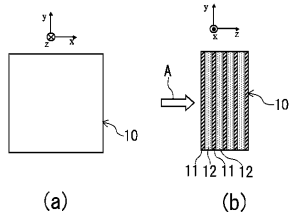
【符号の説明】

【 0 0 8 2 】

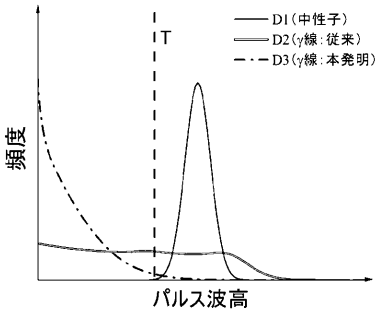
- 1 ~ 4 中性子検出器
- 1 0、5 0、1 0 0 シンチレータ
- 1 1 蛍光体層
- 1 2 光透過層
- 1 3 遮光層
- 2 1 光検出器
- 3 1 A、6 1 A、6 2 A、6 3 A、6 4 A、6 5 A 光検出器（第 1 の光検出器）
- 3 1 B、6 1 B、6 2 B、6 3 B、6 4 B、6 5 B 光検出器（第 2 の光検出器）
- 3 2、7 1 ~ 7 5 同時計数回路（同時計数部）
- 8 1 非同時計数回路（非同時計数部）
- S 1 ~ S 5 セグメント

20

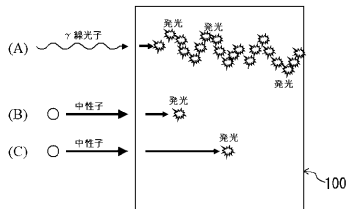
【図1】



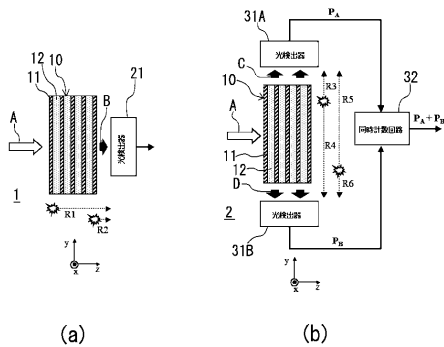
【図2】



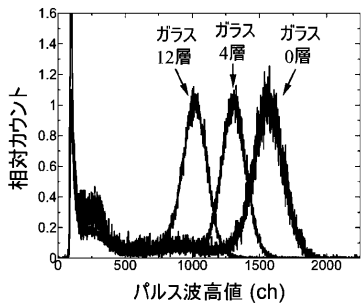
【図3】



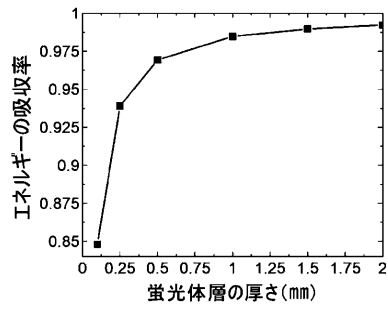
【図6】



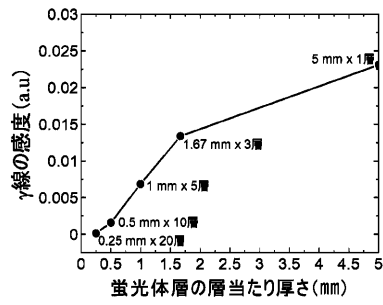
【図7】



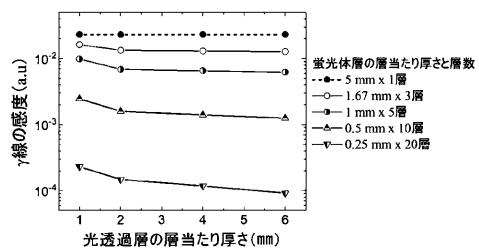
【図4】



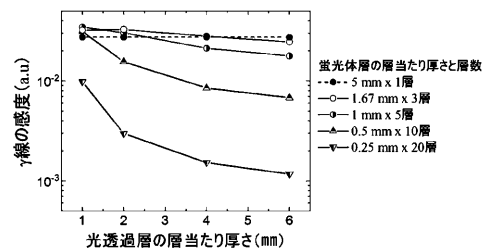
【図5】



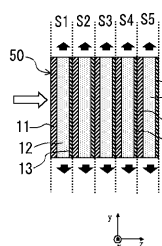
【図8】



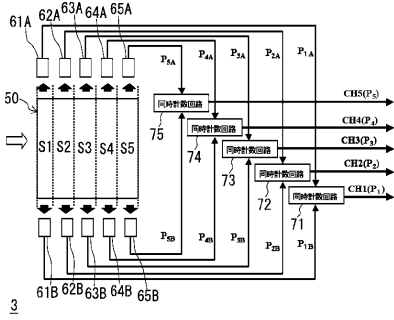
【図9】



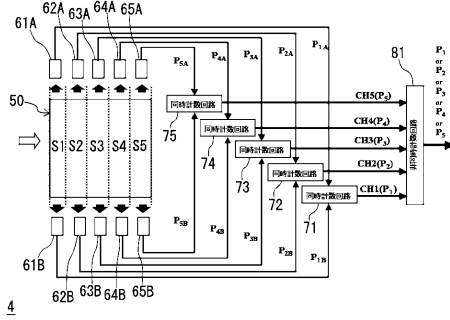
【図10】



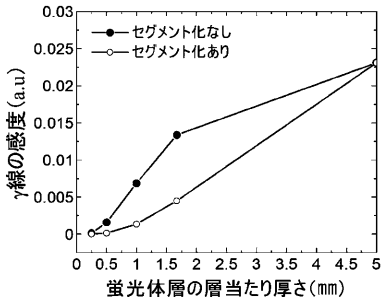
【図11】



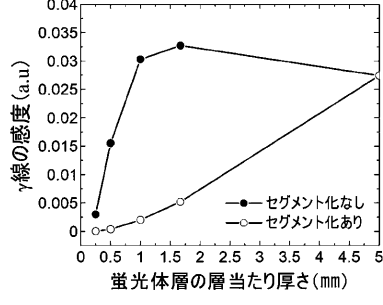
【図13】



【図12】



【図14】



フロントページの続き

(72)発明者 イ ゼホン

茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所内

(72)発明者 弘中 浩太

茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所内

(72)発明者 小泉 光生

茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所内

審査官 坂上 大貴

(56)参考文献 特表2009-538435(JP,A)

米国特許出願公開第2018/0172852(US,A1)

米国特許出願公開第2009/0045348(US,A1)

特開2021-084836(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01T 1/00 - 1/16

1/167 - 7/12