

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-77235

(P2005-77235A)

(43) 公開日 平成17年3月24日(2005.3.24)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
GO 1 T 3/06	GO 1 T 3/06	2 G 0 8 8
GO 1 T 1/20	GO 1 T 1/20 C	
	GO 1 T 1/20 D	
	GO 1 T 1/20 G	

審査請求 未請求 請求項の数 13 O L (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2003-307586 (P2003-307586)	(71) 出願人	000004097 日本原子力研究所 千葉県柏市末広町14番1号
(22) 出願日	平成15年8月29日 (2003.8.29)	(74) 代理人	100089705 弁理士 社本 一夫
		(74) 代理人	100076691 弁理士 増井 忠次
		(74) 代理人	100075270 弁理士 小林 泰
		(74) 代理人	100080137 弁理士 千葉 昭男
		(74) 代理人	100096013 弁理士 富田 博行
		(74) 代理人	100092015 弁理士 桜井 周矩

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバを利用した放射線及び中性子検出器

(57) 【要約】

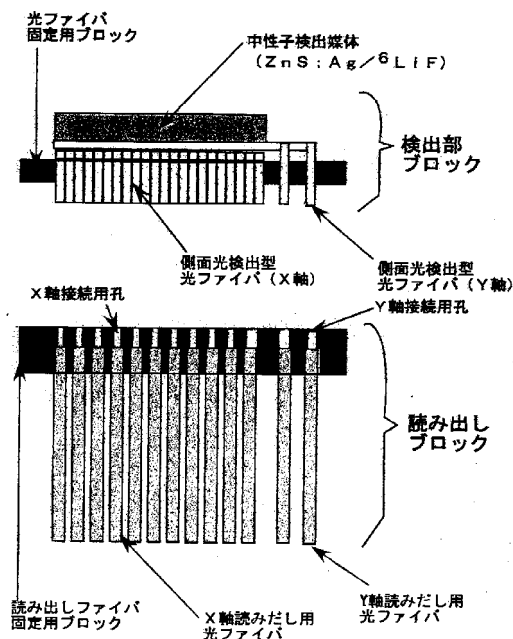
【課題】

コンパクトで、ガンマ線に対するバックグラウンドが少なく、製作及びメンテナンスが容易な光ファイバを用いた中性子イメージ検出器を提供する。

【解決手段】

透明な光ファイバの側面を削り取り、側面から蛍光を入射する側面光検出型光ファイバを用い、蛍光体あるいはシンチレータからの蛍光を検出することによりガンマ線に対するバックグラウンドが少ない中性子イメージ検出器を実現する。また、光ファイバを90度に曲げて光電子増倍管に導くことを可能とすることにより検出器のサイズを小さくすると共に、中性子検出媒体と側面光検出型光ファイバからなる検出部とクリアファイバを用いた読みだしブロックとを分離した構造の検出器とすることにより製作及びメンテナンスが容易な中性子イメージ検出器とする。

【選択図】 図16



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

シンチレータあるいは蛍光体を検出媒体とし、光ファイバを構成材料の1つとして放射線あるいは中性子を検出する検出器において、一辺の長さが0.25mmないし2mmの正方形の透明な光ファイバを用い、透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を1cmないし20cmの範囲の長さの部分を、20μmないし50μmの厚さ削り取り、削り取った側面の反対側の側面に光を乱反射する材料を設けた構造とした側面光検出型光ファイバを用いて、検出媒体からの蛍光を検出し、放射線あるいは中性子を検出することを特長とした放射線検出器あるいは中性子検出器。

【請求項 2】

上記請求項1において、削り取った側面の反対側の面に設ける光を乱反射する材料として、白色の紙あるいはテフロン（登録商標）あるいは白色の塗料あるいはアルミニウム箔あるいはポリスチレン板を用いることを特長とした放射線検出器あるいは中性子検出器。

【請求項 3】

上記請求項1において、削り取った側面の反対側の面に設ける光を乱反射する材料として、粉末の蛍光体を用いた放射線検出媒体あるいは中性子検出媒体を用い、削り取った側面とその裏面の両方の面から蛍光体からの光を検出し放射線あるいは中性子の検出効率を上げることが特長とした放射線検出器あるいは中性子検出器。

【請求項 4】

上記請求項1 - 3において、透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を持つ側面光検出型光ファイバの両端を、光検出器に接続し、検出媒体からの蛍光を検出し、放射線あるいは中性子を検出することを特長とした放射線検出器及び中性子検出器。

【請求項 5】

シンチレータあるいは蛍光体を検出媒体とし、光ファイバを構成材料の1つとして放射線あるいは中性子を検出する検出器において、検出媒体であるシンチレータあるいは蛍光体の下部の面に、請求項1 - 3の透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を持つ側面光検出型光ファイバを並列に配置し、その背後の面に、これらの波長シフトファイバと直角に請求項1 - 3の透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を持つ側面光検出型光ファイバを並列に配置した構造とし、これら2つの側面光検出型光ファイバから得られた横軸及び縦軸の位置パルス信号の同時計数測定を行うことにより、放射線あるいは中性子の2次元入射位置を決定することを特長とした2次元放射線イメージ検出器あるいは2次元中性子イメージ検出器。

【請求項 6】

シンチレータあるいは蛍光体を検出媒体とし、光ファイバを構成材料の1つとして放射線あるいは中性子を検出する検出器において、検出媒体であるシンチレータあるいは蛍光体の下部の面に、これら検出媒体から放出される蛍光の波長帯の短い波長側に感度を持つ波長シフトファイバを並列に配置し、その背後の面に、これらの波長シフトファイバと直角に請求項1 - 3の透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を持つ側面光検出型光ファイバを並列に配置した構造とし、波長帯の短い波長側に感度を持つ波長シフトファイバと側面光検出型光ファイバから得られた横軸及び縦軸の位置パルス信号の同時計数測定を行うことにより、放射線あるいは中性子の2次元入射位置を決定することを特長とした2次元放射線イメージ検出器あるいは2次元中性子イメージ検出器。

【請求項 7】

シンチレータあるいは蛍光体を検出媒体とし、波長シフトファイバを構成材料の1つとして放射線あるいは中性子を検出する検出器において、検出媒体であるシンチレータあるいは蛍光体の下部の面に、これら検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバを並列に配置し、その背後の面に直角に、これらの波長シフトファイバと直角に請求項1 - 3の透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を持つ側面光検出型光ファイバを配置した構造とし、これら2つの

10

20

30

40

50

波長シフト光ファイバから得られた横軸及び縦軸の位置パルス信号の同時計数測定を行うことにより、放射線あるいは中性子の２次元入射位置を決定することを特長とした放射線イメージ検出器あるいは中性子イメージ検出器。

【請求項 8】

上記請求項 5 - 7 において、直角に配置し 2 つの光検出用光ファイバの背後に、検出媒体で蛍光体を配置した構造とし、これら 2 つの光検出用光ファイバから得られた横軸及び縦軸の位置パルス信号の同時計数測定を行うことにより、放射線あるいは中性子の２次元入射位置を決定することを特長とした放射線イメージ検出器あるいは中性子イメージ検出器。

【請求項 9】

シンチレータあるいは蛍光体を検出媒体とし、波長シフトファイバを構成材料の 1 つとして放射線あるいは中性子を検出する検出器において、検出媒体であるシンチレータあるいは蛍光体の下部の面に、これら検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の 50 % 以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバを並列に配置し、その背後の面に直角に、同じ特性を持つ波長シフトファイバを並列に配置し、さらにその背後に、検出媒体であるシンチレータあるいは蛍光体を配置した構造とし、これら 2 つの波長シフト光ファイバから得られた横軸及び縦軸の位置パルス信号の同時計数測定を行うことにより、放射線あるいは中性子の２次元入射位置を決定することを特長とした放射線イメージ検出器あるいは中性子イメージ検出器。

【請求項 10】

シンチレータあるいは蛍光体を検出媒体とし、光ファイバを構成材料の 1 つとして放射線あるいは中性子を検出する検出器において、光ファイバのコア材料がポリスチレンあるいはポリメチルメタクリレート樹脂であることを特長とし、円形の光ファイバの場合にはその直径を 0.25 mm ないし 1 mm とし、正方形の光ファイバの場合にはその一辺の長さを、0.25 mm ないし 1 mm の光ファイバとし、曲げ径が直径あるいは一辺の長さの 1 倍ないし 1.5 倍の範囲で、45 度から 105 度の角度範囲に曲げた部分を持つことを特長とした放射線イメージ検出器あるいは中性子イメージ検出器。

【請求項 11】

請求項 10 の 45 度から 105 度の角度範囲に曲げた部分を持つ光ファイバを 2 本以上隙間なく並べて配置する場合に、固定する構造材に、円形の光ファイバの場合にはその直径と同じ長さに坑あけ精度に応じた長さを加えた長さ以上の間隔で離れた 2 つ以上の孔の列を設けて、あるいは正方形の光ファイバの場合にはその一辺の長さの 1.42 倍の長さに坑あけ精度に応じた長さを加えた長さ以上の間隔で離れた 2 つ以上の孔の列を設けて、45 度から 105 度の角度範囲に曲げた部分を持つ光ファイバを並べて、放射線あるいは中性子の入射位置を検出することを特長とした放射線イメージ検出器あるいは中性子イメージ検出器。

【請求項 12】

シンチレータあるいは蛍光体を検出媒体とし、検出媒体からの蛍光を波長シフトファイバあるいは側面光検出型光ファイバを用いて検出し放射線あるいは中性子を検出する際に、波長シフトファイバを透明な円形の光ファイバに接続し、透明な円形の光ファイバの他端を光検出器に導くことにより放射線あるいは中性子を検出する検出器において、円形の波長シフトファイバの場合にはその直径の 1 倍から 1.5 倍の直径の透明な光ファイバを、あるいは正方形の波長シフトファイバの場合にはその一辺の長さの 1.42 倍から 2 倍の長さを直径とする透明な円形の光ファイバを用いることを特長とした放射線イメージ検出器及び中性子イメージ検出器。

【請求項 13】

上記請求項 12 において、波長シフトファイバあるいは側面光検出型光ファイバと、透明な円形の光ファイバとの接続面にグリースを用いることを特長とした放射線検出器及び中性子検出器。

【発明の詳細な説明】

10

20

30

40

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ファイバを利用した放射線及び中性子検出器において、蛍光体あるいはシンチレータから放出される蛍光を、波長シフトファイバの代わりに、透明な光ファイバの側面を削り取り、側面から蛍光を入射し蛍光を波長シフトファイバの両端に導くことを可能とした光ファイバを用いることにより、放射線あるいは中性子を検出することに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、光ファイバを利用した放射線及び中性子検出器としては、蛍光体あるいはシンチレータと波長シフトファイバを用いた放射線イメージ検出器及び中性子イメージ検出器が使用されてきた [Nucl. Instr. and Meth., A430(1999)311-320、特願平10-366679、特願2000-259443]。これらの検出器はクロスファイバ読み取り方式により位置情報を得ることを特徴とし、図31に示すように蛍光体シートあるいはシンチレータ板の上面と下面に波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、同時計数法により放射線入射位置を決定し放射線イメージを検出する。あるいは、図32に示すように、短波長側蛍光検出用波長シフトファイバと長波長側蛍光波長シフトファイバの2種類の波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、その上に蛍光体シートあるいはシンチレータ板を配置し、同時計数法により放射線入射位置を決定し放射線イメージを検出する。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

しかし、これらの検出器に用いている波長シフトファイバは、蛍光体あるいはシンチレータから放出される蛍光を一度吸収し、吸収した波長より長い波長に変換して、蛍光を検出するため、変換された蛍光の波長が長くなり通常光検出器として使用される光電子増倍管の検出感度領域からはずれて用いられてきた。また、特に波長シフトファイバを中性子検出器に用いた場合、波長シフトファイバがガンマ線に感度があるため、ガンマ線バックグラウンドの原因となっていた。

【0004】

また、上記方法で検出感度を高めるためには、蛍光体あるいはシンチレータと波長シフトファイバからなるセンサを積層して用いるため、波長シフトファイバの数が多くなり検出構造が複雑に成っていた。

【0005】

一方、波長シフトファイバあるいは光ファイバを用いた検出器の場合、光ファイバを直角あるいは直角に近い角度まで曲げて用いる場合、光ファイバの曲げ角度の制限から数センチ以上の曲げ半径で曲げていた。このため、検出器のコンパクト化に問題が合った。

【0006】

さらに、蛍光体あるいはシンチレータと波長シフトファイバを用いた放射線イメージ検出器あるいは中性子イメージ検出器の場合、波長シフトファイバを長くする波長シフトされた蛍光が伝送される過程で吸収され検出器まで到達する蛍光が減ってしまうため、あまり長くして使用することができなかった。また、前に述べたように、波長シフトファイバ自身がガンマ線感度を持つため、中性子検出器に用いた場合には、ガンマ線バックグラウンドが問題になり、またガンマ線検出器に用いた場合には、ガンマ線イメージに対してバックグラウンドとなっていた。これらの問題のため、波長シフトファイバはできるだけ短くして用いる必要があった。

【課題を解決するための手段】

【0007】

蛍光体あるいはシンチレータから放出される蛍光を、波長シフトファイバの代わりに、透明な光ファイバの側面を削り取り、側面から蛍光を入射し蛍光を波長シフトファイバの両端に導くことを可能とした光ファイバを用いることにより、放射線あるいは中性子を検

10

20

30

40

50

出する。また、放射線イメージあるいは中性子イメージを検出する場合、直角に配置した2つの波長シフトファイバ束の内、少なくとも1つを、上記の透明な光ファイバの側面を削り取った光ファイバを用いることによりガンマ線バックグラウンドを低減する。

【0008】

放射線イメージ検出器あるいは中性子イメージ検出器の検出感度を上げるためには、単純にセンサを積層するのではなく、直角に配置した2つの波長シフトファイバ束の感度を揃えておき上面及び下面から蛍光を検出することを可能とし、両面に蛍光体あるいはシンチレータを配置することにより実現する。

【0009】

検出器のコンパクト化に不可欠な光ファイバを曲げて使うことについては、円形ファイバでは直径が1mm以下の場合、あるいは正方形ファイバでは一辺の長さが1mm以下の場合、光ファイバの材質を選ぶことにより直角あるいは直角に近い角度まで曲げても、20から50%程度蛍光が透過することがわかったことから、光ファイバを曲げて使う。

【0010】

波長シフトファイバを長くするとガンマ線バックグラウンドが増加する、途中から透明な光ファイバに変換して用いる。この場合、透明な光ファイバの直径は接続する波長シフトファイバより大きなものを使用し、接続にはグリースを用いる。

【実施例】

【0011】

(実施例1)

実施例1として、一辺の長さが0.5mmの正方形の透明な光ファイバを用い、透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を5cmの範囲の長さの部分、20 μ mの厚さ削り取り、削り取った側面の反対側の側面に光の反射材として白色の紙を用いた構造の側面光検出型光ファイバの構造図を図1に示す。光ファイバとしては、米国バイクロン社製の一辺が0.5mmの正方形の透明な光ファイバBCF-98を用いる。本側面光検出型光ファイバの蛍光に対する位置分布特性について、蛍光光度計を改良して測定した。測定の結果、図2に示すように、5cmの範囲でほぼ一様な分布が得られた。検出効率は、678nmのレーザー光源を用いて校正した結果、約0.5%であった。

【0012】

本実施例では、中性子を検出することとし、この側面光検出型光ファイバを8本用い、蛍光体と中性子コンバータを混合した中性子検出シートから放出される蛍光を検出し中性子を検出する中性子検出器の実施例を図3に示す。検出シートとしては、蛍光体としてZnS:Agを用い、中性子コンバータとしては⁶LiFを用い混合し、1mm厚のアルミニウム板に塗布した米国バイクロン社製BC-702を用いる。この結果、幅4mmで長さ4cmの検出部分を持つ中性子検出器を構成することができた。光ファイバは長さ1mmとし、その他端には光電子増倍管を接続する。光電子増倍管としては浜松ホトニクス製R647Pを用いる。光電子増倍管からの出力信号は、ZnS:Agの蛍光寿命が200nsなので、波形整形時定数0.5 μ sにセットしたスペクトロスコピーアンプで増幅し波形整形する。その後、一定信号レベル以上のパルス信号を取り出す波形弁別器を用いることにより中性子信号を得ることができる。

【0013】

(実施例2)

実施例2として、透明な光ファイバの削り取った側面の反対側の側面に設ける反射材として、白色の紙、テフロン(登録商標)板あるいは白色の塗料あるいはアルミニウム箔あるいはポリスチレン板について、実施例2のファイバの2cmの部分の場所で比較測定した結果を表1に示す。併せて、黒色板及びアルミニウム板の結果についても比較のため示す。削り取り面からの入射で0.4%から0.5%の光検出効率を得られるのに対して、黒色板及びアルミニウム板など乱反射しない材料を用いた場合には、それぞれ0.04%、0.2%とほぼ半分以下の検出効率となり、本実施例が有効であることがわかる。

【0014】

10

20

30

40

50

【表 1】

材料	削り取り面入射 (%)	裏面入射 (%)
黒色板	0.04	0.04
アルミニウム板	0.20	0.09
アルミニウムフォイル(光沢)	0.26	0.10
アルミニウムフォイル(つや消し)	0.42	0.19
白色水性ペイント	0.42	0.21
白紙	0.52	0.31
ポリスチレン板	0.52	0.29
テフロン板	0.53	0.27
粉末白色蛍光体	0.55	0.33

10

【0015】

(実施例 3)

実施例 3 として、上記実施例 1 において、削り取った側面の反対側の面に設ける光を乱反射する材料として、白色の紙などの代わりに粉末の蛍光体を用いた場合について図 4 をもとに説明する。図 4 をみるとわかるように、削り取った側面とその裏面の両方の面に蛍光体を配置する。表 1 に示すように、蛍光体についての削り取り面からの入射とその裏面から入射の場合の光検出効率は、それぞれ 0.55% と 0.33% である。蛍光体としては $ZnS:Ag$ と中性子コンバータである 6LiF を混合した中性子検出媒体(厚さ: 0.4 mm)を用いた場合、中性子が入射すると 1500 個以上の光が放出される。0.33% の検出効率でも光検出器には 5 個の光子が伝達される。光検出器として光電子増倍管を用いた場合、その量子効率は約 20% なので、光子の電気信号としては 1 個が得られ、フォトンカウンティング法を用いれば十分中性子を検出する事ができる。この検出媒体は不透明なため厚さを 0.5 mm 以上にする事ができないことから、本実施例とすることにより、厚さが 2 倍となり、実質 0.8 mm の厚さの中性子検出器とすることができ、検出効率をほぼ 2 倍に増加した中性子検出器を構成することができる。

20

30

(実施例 4)

実施例 4 として、一辺の長さが 0.5 mm の正方形の透明な光ファイバを用い、透明な光ファイバの 4 つの側面の 1 つの側面を 12 cm の範囲の長さの部分、30 μm の厚さ削り取り、削り取った側面の反対側の側面に光の反射材として白色の塗料を塗布した構造の側面光検出型を用いる。光ファイバとしては、米国バイクロン社製の一辺が 0.5 mm の正方形の透明な光ファイバ BCF-98 を用いる。本側面入射光ファイバの蛍光に対する位置分布特性について、蛍光光度計を改良して測定した。測定の結果、図 5 に示すように、ほぼ指数関数にのる分布が得られた。これは、実施例 1 に比較し 15 cm と長い部分について光ファイバを削り取る場合、削り始めの部分の検出効率が高く、先の方にゆくに従い検出効率が下がってしまうためである。このため、光ファイバの両端から光検出を行う。図 5 の分布を用いて光ファイバの両端から光を検出した場合、図 5 に示すような入射位置分布特性が得られる。この結果、幅広い領域にわたって、光に対する検出効率が入射位置にほとんど依存しない側面検出型光ファイバとして用いることができることが確認できた。

40

(実施例 5)

実施例 5 として、本発明による 2 次元放射線イメージ検出器の構造を図 6 に示す。本実施例では放射線としてアルファ線を検出することとし、アルファ線検出媒体用蛍光体として常用されている $ZnS:Ag$ を用いる。 $ZnS:Ag$ を厚さ 0.2 mm のシート状にした蛍光体シートの下面に、図 6 に示すように 2 つの透明な光ファイバの 4 つの側面の 1 つ

50

の側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバ束をそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。

【0016】

ZnS : Agの蛍光波長の中心は450nmであり、360nmから540nmまで幅広い波長の蛍光を発生し、蛍光寿命は200nsである。

透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバの素材としては、米国Bicron社製BCF-98のクリアファイバを用いる。クリアファイバの太さについては、蛍光体シートの厚さが0.2mmであることから、一片の長さが0.5mmの正方形ファイバを用いる。配置された2つの光ファイバ束のクリアファイバはそれぞれ1本ごとに光検出器に接続する。

10

【0017】

BCF-98を素材とした側面光検出型光ファイバから放出されてきた蛍光を検出する光検出器としては、16チャンネル光電子増倍管である浜松ホトニクス製H6568を用いることができる。光電子増倍管から出力された各光電気信号は増幅器で増幅した後、それぞれ波高弁別器によりデジタルパルス信号に変換され、X軸パルス信号及びY軸パルス信号となる。これらのX軸パルス信号とY軸パルス信号との同時計数測定を行うことにより、放射線の2次元入射位置を決定する。同時計数時間(コインシデンス時間)としては、ZnS : Agの蛍光寿命の3倍である600nsとすれば十分同時計数することができる。

(実施例6)

実施例6として、本発明による2次元放射線イメージ検出器の構造を図7に示す。本実施例では放射線としてアルファ線を検出することとし、アルファ線検出媒体用蛍光体として常用されているZnS : Agを用いる。ZnS : Agを厚さ0.2mmのシート状にした蛍光体シートの下面に、図7に示すようにこれら検出媒体から放出される蛍光の短波長側に感度を持つ短波長用波長シフトファイバ及び透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバをそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。

20

【0018】

ZnS : Agの蛍光波長の中心は450nmであり、360nmから540nmまで幅広い波長の蛍光を発生し、蛍光寿命は200nsである。

短波長用波長シフトファイバとしては、350nmから440nmまでの蛍光に感度があり、490nmの蛍光に波長変換する米国Bicron社製BCF-92を用いる。また、透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバの素材としては、米国Bicron社製BCF-98のクリアファイバを用いる。波長シフトファイバとクリアファイバの太さについては、蛍光体シートの厚さが0.2mmであることから、一片の長さが0.5mmの正方形ファイバを用いる。配置された波長シフトファイバ及びクリアファイバを1本ごとに光検出器に接続する。

30

【0019】

光検出器から以後の構成及び動作については実施例5と同じである。

(実施例7)

実施例7として、本発明による2次元放射線イメージ検出器の構造を図8に示す。本実施例では放射線としてアルファ線を検出することとし、アルファ線検出媒体用蛍光体として常用されているZnS : Agを用いる。ZnS : Agを厚さ0.2mmのシート状にした蛍光体シートの下面に、図8に示すようにこれら検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバ及び透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバをそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。

40

【0020】

ZnS : Agの蛍光波長の中心は450nmであり、360nmから540nmまで幅広い波長の蛍光を発生し、蛍光寿命は200nsである。

50

検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバとしては、390nmから500nmまでの蛍光に感度があり、520nmの蛍光に波長変換するクラレ社製Y₂O₃（有機蛍光体濃度100ppm）を用いる。また、透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバの素材としては、米国Bicron社製BCF-98のクリアファイバを用いる。波長シフトファイバとクリアファイバの太さについては、蛍光体シートの厚さが0.2mmであることから、一片の長さが0.5mmの正方形ファイバを用いる。配置された波長シフトファイバ及びクリアファイバを1本ごとに光検出器に接続する。

【0021】

光検出器から以後の構成及び動作については実施例5と同じである。

10

（実施例8）

実施例8として実施例5をもとに構成した例について図9をもとに説明する。

【0022】

本実施例では中性子を検出することとする。中性子検出媒体用蛍光体としては、蛍光体としてZnS:Agを用い、中性子コンバータとしては⁶LiFを用いた厚さ0.4mmの米国バイクロン社製BC-702を用いる。この中性子検出媒体の下面に、図に示すように2つの透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバ束をそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。直角に配置し2つの光検出用光ファイバの背後に、中性子検出媒体用蛍光体としては米国バイクロン社製BC-702を配置した構造とする。本実施例とすることにより、中性子検出媒体の厚さが2倍となり、実質0.8mmの厚さの中性子イメージ検出器とすることができ、検出効率をほぼ2倍に増加した中性子イメージ検出器を構成することができる。

20

【0023】

一方、本実施例を実現するには、4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバが削り取った部分の裏面を検出部分とした場合に、十分な光検出効率を得られることが不可欠であるが、実施例3で述べように4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバの2cmの位置の部分で取った裏面からの入射の場合の光検出効率は0.3%あり十分である。また、2つの側面光検出型光ファイバを重ねた場合の下側に置かれた側面光検出型光ファイバの光検出効率を削り取り面入射及び裏面入射に対する光検出効率は表2に示すように、直接入射した場合かあるいは多少増加する特性を示すことがわかった。多少増加する理由は、上部に置かれた側面光検出型光ファイバによる散乱と考えられる。以上のことから2つの側面光検出型光ファイバを重ねた光ファイバによる両面の光検出が可能であることがわかった。

30

【0024】

【表 2】

材料	削り取り面入射 (%)	裏面入射 (%)
黒色板	0.08	0.07
アルミニウム板	0.21	0.10
アルミニウムフォイル(光沢)	0.27	0.11
アルミニウムフォイル(つや消し)	0.42	0.19
白色水性ペイント	0.43	0.22
白紙	0.55	0.33
ポリスチレン板	0.52	0.30
テフロン板	0.53	0.28
粉末白色蛍光体	0.57	0.35

10

【0025】

(実施例9)

実施例9として、本発明による中性子イメージ検出器の構造を図10に示す。

20

本実施例では中性子を検出することとし、中性子検出媒体用蛍光体としては、蛍光体としてZnS:Agを用い、中性子コンバータとしては⁶LiFを用いた厚さ0.4mmの米国バイクロン社製BC-702を用いる。この中性子検出媒体の下面に、図に示すように2つのこれら検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバをそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバとしては、390nmから500nmまでの蛍光に感度があり、520nmの蛍光に波長変換するクラレ社製Y?8(有機蛍光体濃度100ppm)を用いる。この波長シフトファイバの吸収特性を図11に示す。吸収特性が50%以下であることがわかる。直角に配置し2つの波長シフトファイバ束の背後に、中性子検出媒体用蛍光体として米国バイクロン社製BC-702を配置した構造とする。本構成とした場合、2つの波長シフトファイバ束を用いた光読み取りが両サイドから可能となるため、中性子検出媒体の厚さが2倍となり、実質0.8mmの厚さの中性子イメージ検出器とすることができ、検出効率をほぼ2倍に増加した中性子イメージ検出器を構成することができる。

30

(実施例10)

通常、波長シフトファイバを含めた光ファイバの最小曲げ半径は、0.5mmの径の光ファイバでも10mmを必要とする。しかし、蛍光体あるいはシンチレータと組み合わせる光ファイバを用いる場合、この曲げ径がデッドスペースとなるため、曲げ径を小さくする必要がある。光ファイバのコア材料がポリスチレンあるいはポリメチルメタクリレート樹脂とし、円形の光ファイバの場合にはその直径を0.25mmないし1mmとし、正方形の光ファイバの場合にはその一辺の長さを、0.25mmないし1mmの光ファイバとし、曲げ径が直径あるいは一辺の長さの1倍ないし1.5倍の範囲で、45度から105度の角度範囲で曲げた場合の光の透過特性を測定した。光ファイバとしては、一辺が0.5mmで正方形光ファイバである米国Bicron社製BCF-98のクリアファイバを用いた。この結果、図12に示すように光ファイバの素材を選択することにより、90度まで曲げても50%近くの透過率が得られることがわかった。

40

【0026】

この結果をふまえて実施例10について、図13に示す中性子検出器について述べる。本実施例では中性子を検出することとする。中性子検出媒体用蛍光体としては、蛍光体としてZnS:Agを用い、中性子コンバータとしては⁶LiFを用いた厚さ0.4mmの

50

米国バイクロン社製BC-702を用いる。面積は 1 cm^2 とする。この中性子検出媒体の下面に、図に示すように90度に曲げた波長シフトファイバを用いる。波長シフトファイバとしては、350nmから440nmまでの蛍光に感度があり、490nmの蛍光に波長変換する米国Bicron社製BCF-92を用いる。一辺が0.5mmの正方形波長シフトファイバを用い、図に示すように折り曲げ波長シフトファイバの他端を光電子増倍管に接続する。検出部分を10mm平方にするにはこの波長シフトファイバを20本用いる。また、光電子増倍管としては、直径が1.3cmの浜松ホトニクス製R647Pを用いることができる。このような構成にすることによりデッドスペースのない小型の中性子検出器を製作することができる。

【0027】

また、実施例の光ファイバのコア材料がポリスチレンの場合には、ポリスチレン分子が連続して結合された材料を用いることが折り曲げ強度が強いため不可欠であり、米国バイクロン社製の波長シフトファイバ及びクリアファイバにはこの材料が使われている。また、クラレ社製の場合にはS型がポリスチレン分子が連続して結合された材料である。

【0028】

なお、本実施例の場合、波長シフトファイバの代わりに実施例1で述べた透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を1cmの範囲の長さの部分、20 μm の厚さ削り取り、削り取った側面の反対側の側面に光の反射材として白色の紙を用いた構造の側面入射光ファイバを用いることができる。

(実施例11)

実施例11として、本発明による中性子イメージ検出器の構造を図14に示す。実施例10において示した、45度から105度の角度範囲に曲げた部分を持つ光ファイバを2本以上隙間なく並べかつ、立体交差することにより2種類の光ファイバ束を配置することを実現し中性子イメージの検出を可能とした実施例である。

【0029】

中性子検出媒体としては、蛍光体としてZnS:Agを用い、中性子コンバータとしては⁶LiFを用い混合し、パイレックス(登録商標)ガラスに0.2mmの厚さ塗布した検出体を用いる。検出面積としては、8mm \times 8mmの大きさとする。波長シフトファイバとしては、一辺が0.5mmの正方形の波長シフトファイバを16本ずつそれぞれX軸及びY軸に用いる。本実施例では、従来から用いられているY軸用波長シフトファイバとX軸用波長シフトファイバとの間に中性子検出媒体を挟んでイメージングを行うクロスファイバ法を用いる。なお、Y軸用波長シフトファイバ及びX軸用波長シフトファイバとしては、350nmから440nmまでの蛍光に感度があり、490nmの蛍光に波長変換する米国Bicron社製BCF-92を用いる。波長シフトファイバの太さについては、蛍光体シートの厚さが0.2mmであることから、一片の長さが0.5mmの正方形ファイバを用いる。折り曲げ角度は90度で使用する。

【0030】

固定するマウントとしてはアルミニウムを用いることとする。一辺の長さが0.5mmのため、1.42倍すると共に孔あけ精度を考慮して、直径0.8mmの孔を1mm間隔で、図のよう交互に4列あけることとする。このようにすることにより、一辺が0.5mmの正方形の波長シフトファイバを隙間無く並列に並べることができ、波長シフトファイバを90度に折り曲げて使うことにより、検出器を非常にコンパクトにすることができる。特に、ファイバの数が100本以上となる場合には効果的である。

【0031】

本中性子イメージ検出器について、原研の原子炉JRR-3Mの冷中性子ラジオグラフィ施設(CNRF)において、1.5mm冷中性子ビームの測定を行った。測定結果を図15に示す。位置分解能として0.6mmが得られることがわかり、本実施例の有効性を確認した。

(実施例12)

本実施例は、放射線あるいは中性子の検出媒体であるシンチレータあるいは蛍光体から

10

20

30

40

50

の蛍光を、波長シフトファイバを用いて検出する場合、波長シフトファイバ自身がガンマ線検出体となるため、あまり長くして使うとガンマ線によるバックグラウンドを受けてしまうことと、同時にあまり長くすると波長シフトファイバの波長シフトされた蛍光の透過率が悪くなってしまうことを改善するために使用される。また、波長シフトファイバあるいは側面光検出型光ファイバを用いて蛍光を検出する部分と、検出された蛍光を光検出器まで導く部分を分離して製作し、メンテナンスを容易にすることを実現することができる。

【0032】

実施例12について、図16をもとに構成を述べる。本実施例では、中性子を検出する中性子イメージ検出器について述べる。

中性子検出媒体用蛍光体としては、蛍光体としてZnS:Agを用い、中性子コンバータとしては⁶LiFを用いた厚さ0.4mmの米国バイクロン社製BC-702を用いる。この中性子検出媒体の下面に、図に示すように2つの透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバ束をそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。

【0033】

透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバの素材としては、米国Bicron社製BCF-98のクリアファイバを用いる。クリアファイバの太さについては、蛍光体シートの厚さが0.2mmであることから、一片の長さが0.5mmの正方形ファイバを用いる。配置された2つの光ファイバ束のクリアファイバは図に示すように一定の長さにし、端面を研磨する。このブロックを検出部ブロックとする。

【0034】

一方、側面光検出型光ファイバを透明な円形の光ファイバに接続し、透明な円形の光ファイバの他端を光検出器に導くブロックを読み出しブロックとする。読み出しブロックは、図に示すように読み出しファイバ固定用ブロックにX軸接続用孔とY軸接続用孔をあけた構成とする。孔の位置は、検出部ブロックのX軸用側面光検出型光ファイバとY軸側面光検出型光ファイバの位置に合わせ、光ファイバの大きさよりも少し大きい直径とする。その下に、読み出し用光ファイバの孔を、検出部の光ファイバが、円形の光ファイバの場合にはその直径の1倍から1.5倍の直径の透明な光ファイバを、あるいは正方形の波長シフトファイバの場合にはその一辺の長さの1.42倍から2倍の長さを直径とする透明な円形の光ファイバを用いることにより放射線あるいは中性子を検出する検出器において正方形の波長シフトファイバの場合にはその一辺の長さの1.42倍から2倍の長さを直径とする透明な円形の光ファイバが固定できる大きさに孔をあける。この孔にX軸読み出し用光ファイバとY軸読み出し用光ファイバを固定する。本実施例の場合には、一片の長さが0.5mmの正方形ファイバを検出に用いるため、直径1mmの三菱レイヨン製光ファイバ・エスカを用いることができる。

【0035】

このように検出部ブロックと読み出しブロックを分離できる構成にすることにより、多数の光ファイバを用いるイメージ検出器の製作を容易にすることができる。また、メンテナンスも容易となる。

(実施例13)

実施例12で述べた波長シフトファイバあるいは側面光検出型光ファイバと、透明な円形の光ファイバとの接続面にグリースを用いた実施例について述べる。

【0036】

波長シフトファイバあるいは側面光検出型光ファイバと、透明な円形の光ファイバとの接続面を直接接続した場合とグリースを用いた場合について透過率を測定した。使用した波長シフトファイバはバイクロン社製BCF-99の一辺が0.5mmの正方形ファイバであり、円形のクリアファイバとしては1mmの三菱レイヨン製プラスチックファイバ・エスカを用いた。測定の結果、直接接続した場合の透過率が35%で合ったのに対して

10

20

30

40

50

、グリースとして応用光研製OKEN6262A光学用グリースを用いた場合、透過率が85%まで改善しほとんど損失がなくなることが確認された。

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図1】光ファイバの削り取った側面の反対側の側面に光の反射材として白色の紙を用いた構造の側面入射光ファイバの構造図を示す図である。

【図2】検出部分が5cmの側面光検出型光ファイバの光検出効率に対する位置分布特性を示す図である。

【図3】側面光検出型光ファイバを用いて中性子検出シートから放出される蛍光を検出し中性子を検出する中性子検出器の構造を示す図である。

10

【図4】光ファイバの削り取った側面とその裏面の両方の面に蛍光体を配置した中性子検出器の構造を示す図である。

【図5】検出器部分が12cmの側面光検出型光ファイバの光検出効率に対する位置分布特性を示す図である。

【図6】側面光検出型光ファイバ束をそれぞれ並列に並べかつ直角に配置した2次元放射線イメージ検出器の構造を示す図である。

【図7】短波長用波長シフトファイバと側面光検出型光ファイバを用いた2次元放射線イメージ検出器の構造を示す図である。

【図8】50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバと側面光検出型光ファイバを用いた2次元放射線イメージ検出器の構造を示す図である。

20

【図9】側面光検出型光ファイバ束をそれぞれ並列に並べかつ直角に配置しその両面に中性子検出媒体を配置した2次元中性子イメージ検出器の構造を示す図である。

【図10】蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバをそれぞれ並列に並べかつ直角に配置しその両面に中性子検出媒体を配置した2次元中性子イメージ検出器の構造を示す図である。

【図11】クラレ社製Y-8(有機蛍光体濃度100ppm)の吸収特性を示す図である。

【図12】光ファイバを0度から110度の角度で曲げた場合の光の透過特性を示す図である。

【図13】90度に曲げた波長シフトファイバを用いた中性子検出器の構造を示す図である。

30

【図14】90度に曲げた部分を持つ光ファイバを間隙なく並べかつ、立体交差させた中性子イメージ検出器の構造を示す図である。

【図15】90度に曲げた部分を持つ光ファイバを間隙なく並べかつ、立体交差させた中性子イメージ検出器による1.5mm冷中性子ビームの測定例である。

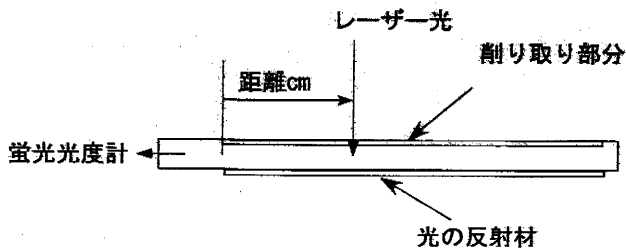
【図16】検出部ブロックと読み出しブロックに分離した中性子イメージ検出器の構造を示す図である。

【図31】従来法の蛍光体シートあるいはシンチレータ板の上面と仮面に波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、同時に計数法により放射線入射位置を決定し放射線イメージを検出するクロスファイバ法の原理を示す図である。

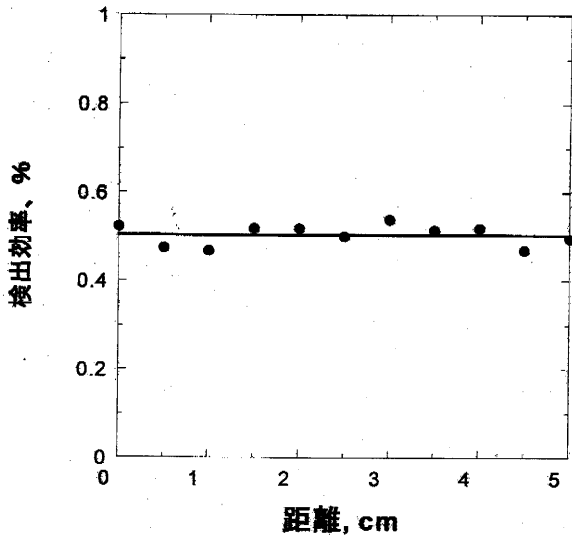
【図32】従来法の短波長側蛍光検出用波長シフトファイバと長波長側蛍光波長シフトファイバの2種類の波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、その上に蛍光体シートあるいはシンチレータ板を配置し背面読み取り法の原理を示す図である。

40

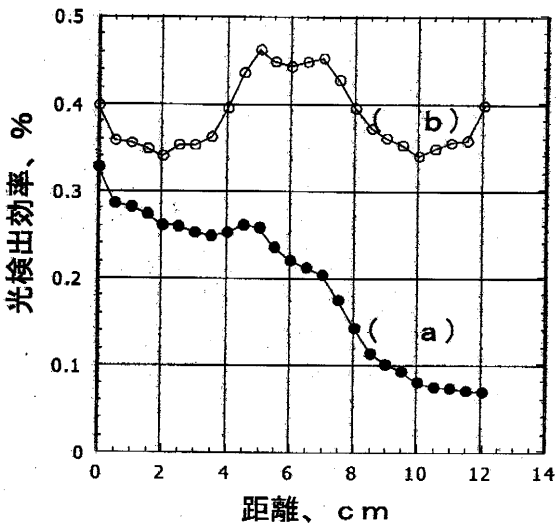
【 図 1 】



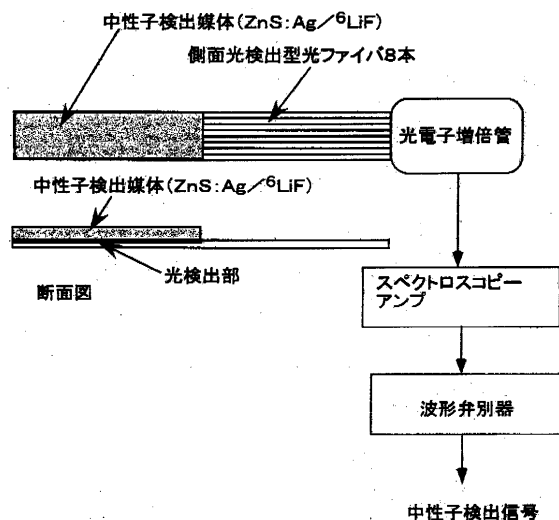
【 図 2 】



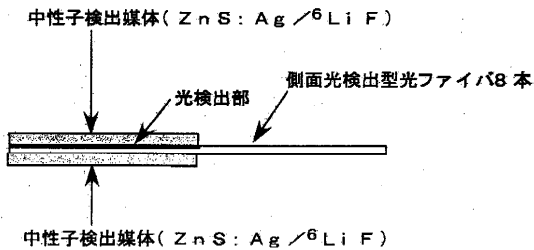
【 図 5 】



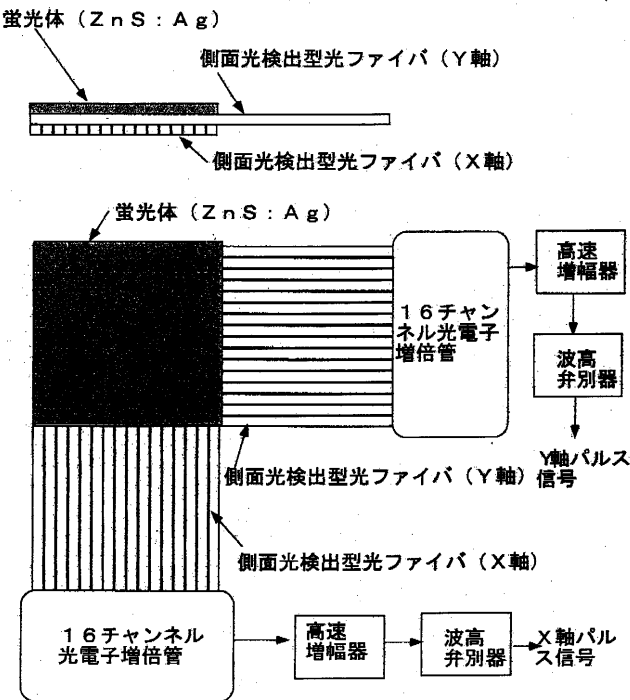
【 図 3 】



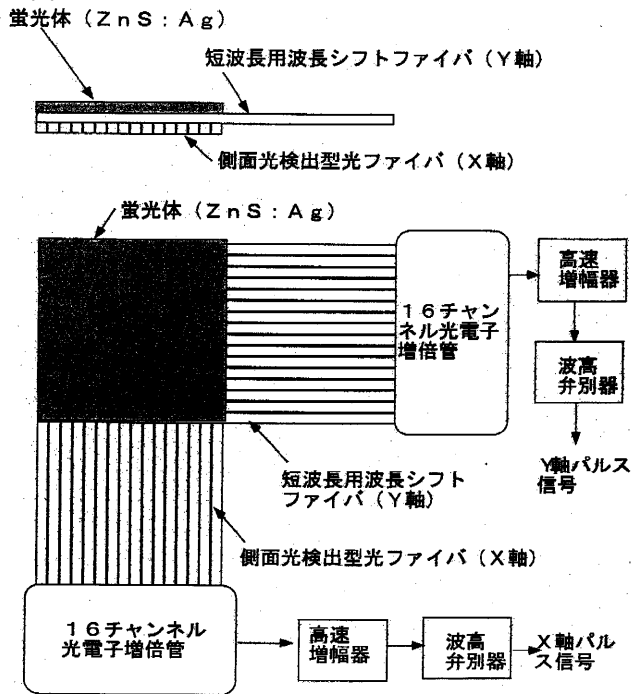
【 図 4 】



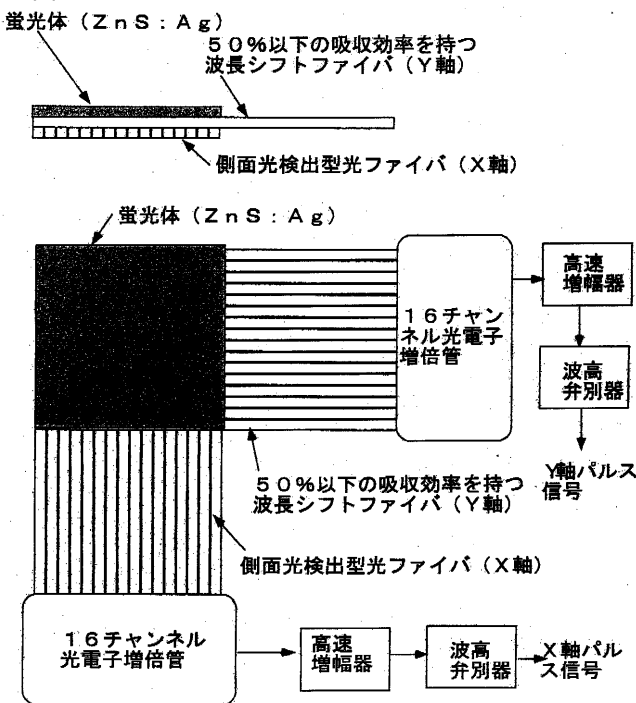
【 図 6 】



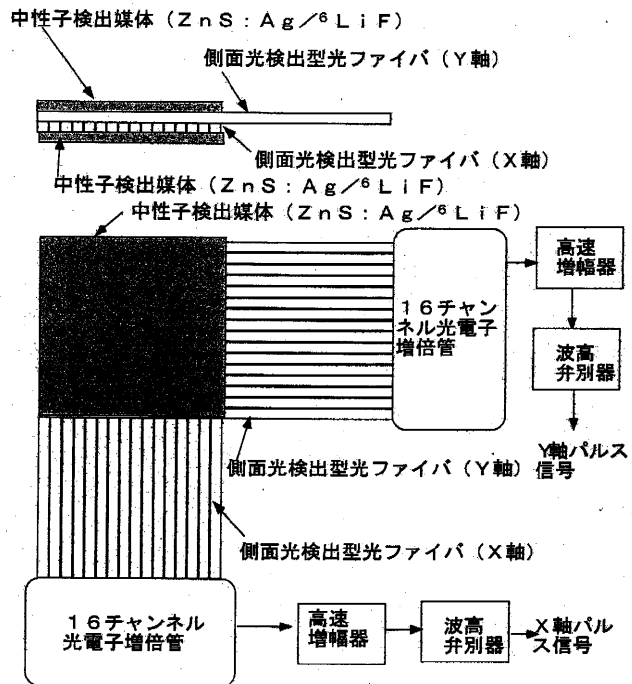
【図7】



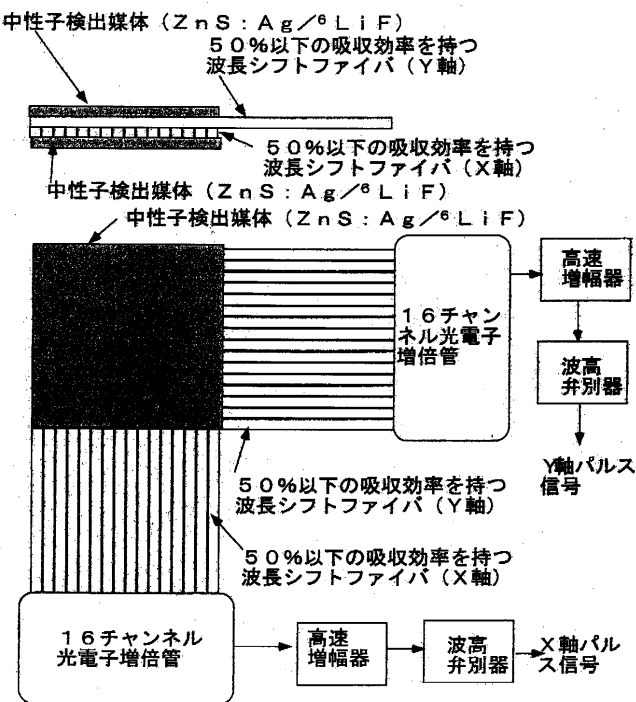
【図8】



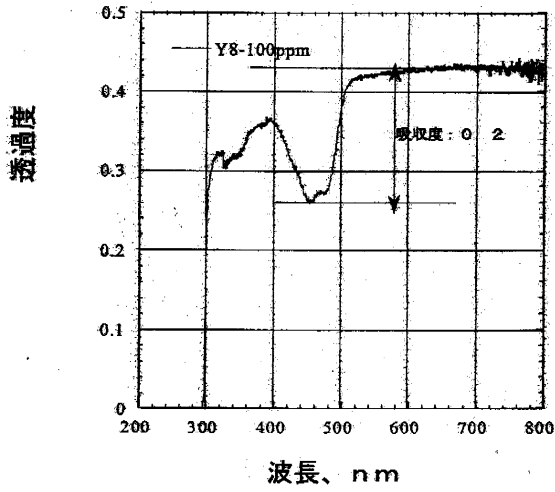
【図9】



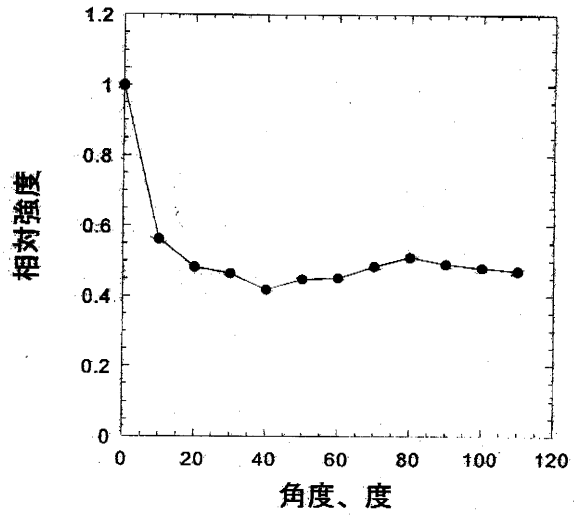
【図10】



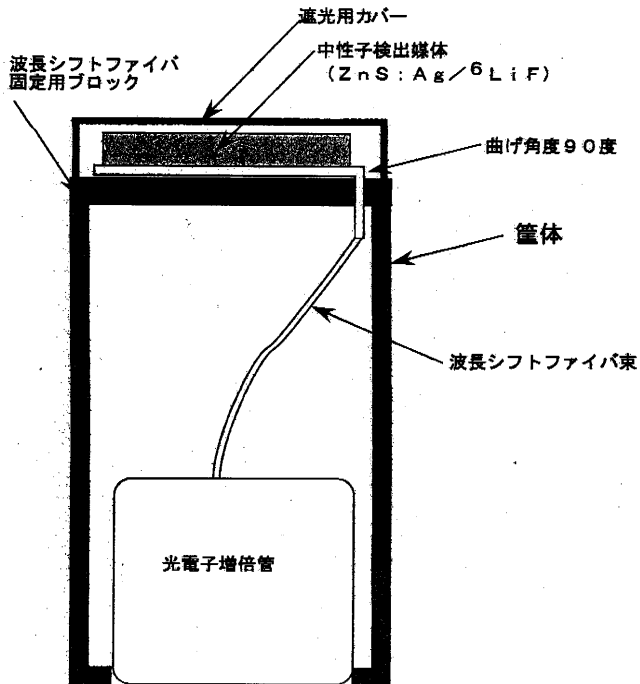
【図11】



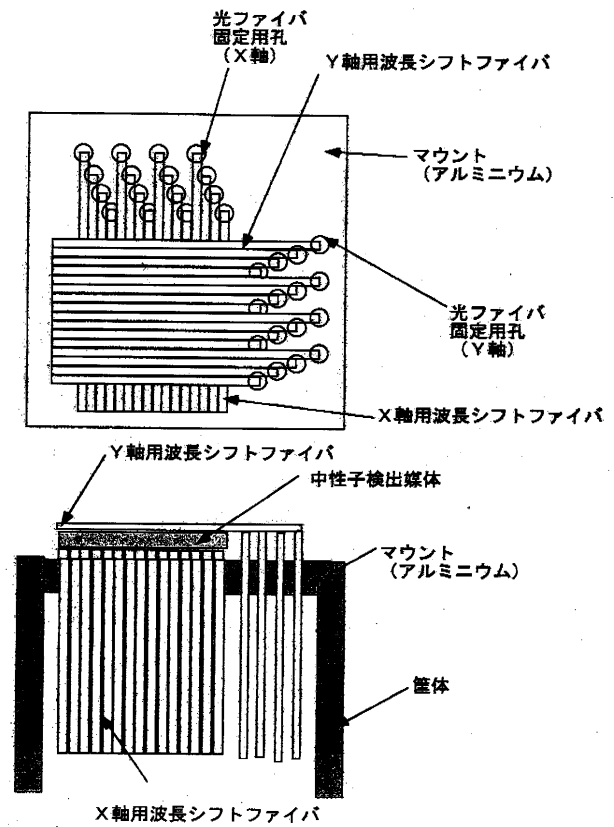
【図12】



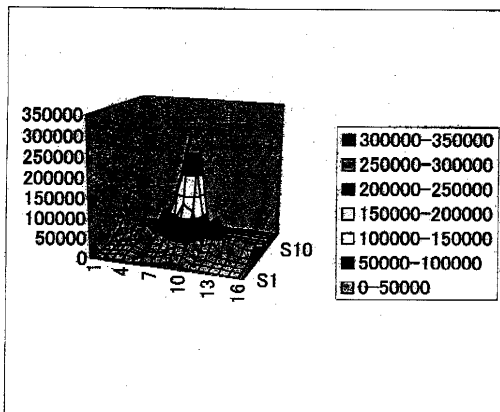
【図13】



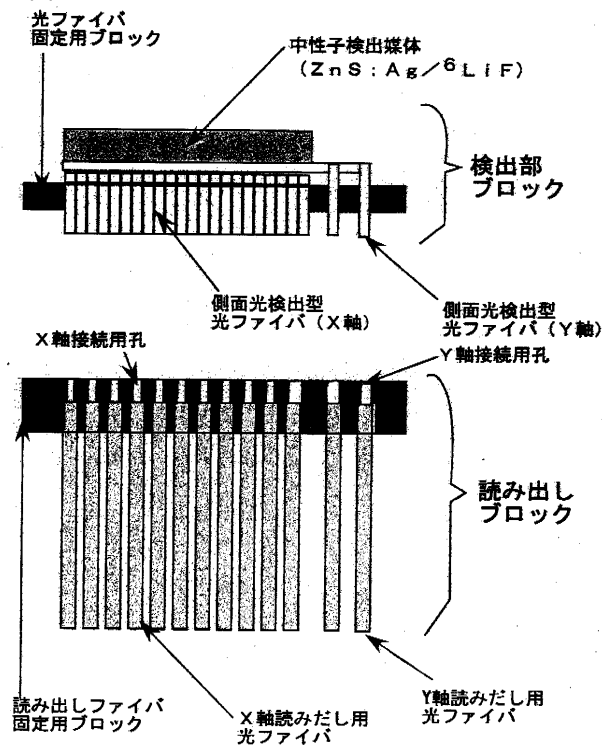
【図14】



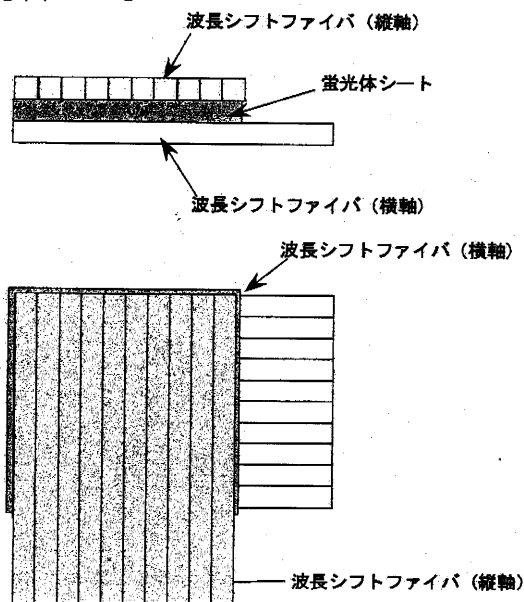
【 図 1 5 】



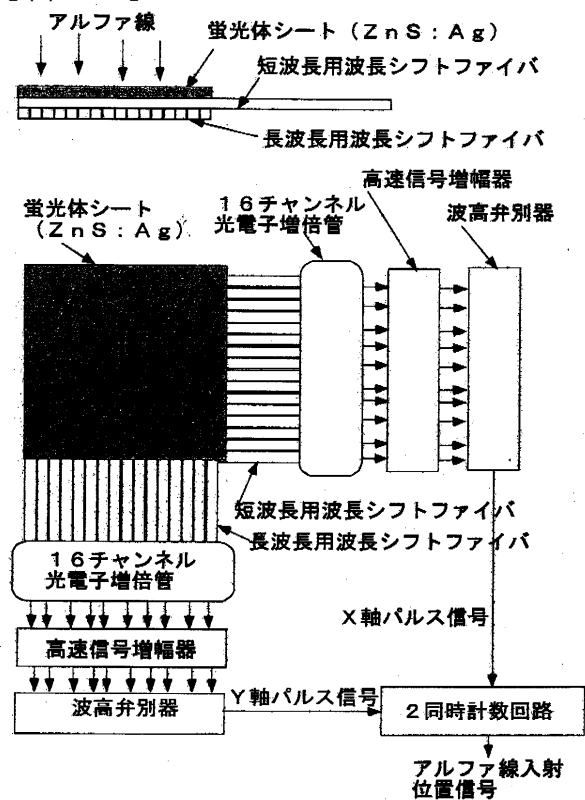
【 図 1 6 】



【 図 3 1 】



【 図 3 2 】



【手続補正書】

【提出日】平成15年9月17日(2003.9.17)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0002

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0002】

従来、光ファイバを利用した放射線及び中性子検出器としては、蛍光体あるいはシンチレータと波長シフトファイバを用いた放射線イメージ検出器及び中性子イメージ検出器が使用されてきた[Nucl. Instr. and Meth., A430(1999)311-320、特願平10-366679、特願2000-259443]。これらの検出器はクロスファイバ読み取り方式により位置情報を得ることを特徴とし、図17に示すように蛍光体シートあるいはシンチレータ板の上面と下面に波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、同時計数法により放射線入射位置を決定し放射線イメージを検出する。あるいは、図18に示すように、短波長側蛍光検出用波長シフトファイバと長波長側蛍光波長シフトファイバの2種類の波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、その上に蛍光体シートあるいはシンチレータ板を配置し、同時計数法により放射線入射位置を決定し放射線イメージを検出する。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0017

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0017】

BCF・98を素材とした側面光検出型光ファイバから放出されてきた蛍光を検出する光検出器としては、16チャンネル光電子増倍管である浜松ホトニクス製H6568を用いることができる。光電子増倍管から出力された各光電気信号は増幅器で増幅した後、それぞれ波高弁別器によりデジタルパルス信号に変換され、X軸パルス信号及びY軸パルス信号となる。これらのX軸パルス信号とY軸パルス信号との同時計数測定を行うことにより、放射線の2次元入射位置を決定する。同時計数時間(コインシデンス時間)としては、ZnS:Agの蛍光寿命の3倍である600nsとすれば十分同時計数することができる。放射線イメージを検出することができる。

(実施例6)

実施例6として、本発明による2次元放射線イメージ検出器の構造を図7に示す。本実施例では放射線としてアルファ線を検出することとし、アルファ線検出媒体用蛍光体として常用されているZnS:Agを用いる。ZnS:Agを厚さ0.2mmのシート状にした蛍光体シートの下面に、図7に示すようにこれら検出媒体から放出される蛍光の短波長側に感度を持つ短波長用波長シフトファイバ及び透明な光ファイバの4つの側面の1つの側面を削り取った部分を検出部分とする側面光検出型光ファイバをそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0025

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0025】

(実施例9)

実施例9として、本発明による中性子イメージ検出器の構造を図10に示す。

本実施例では中性子を検出することとし、中性子検出媒体用蛍光体としては、蛍光体としてZnS:Agを用い、中性子コンバータとしては⁶LiFを用いた厚さ0.4mm

の米国バイクロン社製BC-702を用いる。この中性子検出媒体の下面に、図に示すように2つのこれら検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバをそれぞれ並列に並べかつ直角に配置する。検出媒体から放出される蛍光に感度を持ち蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバとしては、390nmから500nmまでの蛍光に感度があり、520nmの蛍光に波長変換するクラレ社製Y・8(有機蛍光体濃度100ppm)を用いる。この波長シフトファイバの吸収特性を図11に示す。吸収特性が50%以下であることがわかる。直角に配置し2つの波長シフトファイバ束の背後に、中性子検出媒体用蛍光体として米国バイクロン社製BC-702を配置した構造とする。本構成とした場合、2つの波長シフトファイバ束を用いた光読み取りが両サイドから可能となるため、中性子検出媒体の厚さが2倍となり、実質0.8mmの厚さの中性子イメージ検出器とすることができ、検出効率をほぼ2倍に増加した中性子イメージ検出器を構成することができる。

(実施例10)

通常、波長シフトファイバを含めた光ファイバの最小曲げ半径は、0.5mmの径の光ファイバでも10mmを必要とする。しかし、蛍光体あるいはシンチレータと組み合わせる光ファイバを用いる場合、この曲げ径がデッドスペースとなるため、曲げ径を小さくする必要がある。光ファイバのコア材料がポリスチレンあるいはポリメチルメタクリレート樹脂とし、円形の光ファイバの場合にはその直径を0.25mmないし1mmとし、正方形の光ファイバの場合にはその一辺の長さを、0.25mmないし1mmの光ファイバとし、曲げ径が直径あるいは一辺の長さの1倍ないし1.5倍の範囲で、45度から105度の角度範囲で曲げた場合の光の透過特性を測定した。光ファイバとしては、一辺が0.5mmで正方形光ファイバである米国Bicron社製BCF-98のクリアファイバを用いた。この結果、図12に示すように光ファイバの素材を選択することにより、90度まで曲げても50%近くの透過率が得られることがわかった。

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0037

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0037】

【図1】光ファイバの削り取った側面の反対側の側面に光の反射材として白色の紙を用いた構造の側面入射光ファイバの構造図を示す図である。

【図2】検出部分が5cmの側面光検出型光ファイバの光検出効率に対する位置分布特性を示す図である。

【図3】側面光検出型光ファイバを用いて中性子検出シートから放出される蛍光を検出し中性子を検出する中性子検出器の構造を示す図である。

【図4】光ファイバの削り取った側面とその裏面の両方の面に蛍光体を配置した中性子検出器の構造を示す図である。

【図5】検出器部分が12cmの側面光検出型光ファイバの光検出効率に対する位置分布特性を示す図である。

【図6】側面光検出型光ファイバ束をそれぞれ並列に並べかつ直角に配置した2次元放射線イメージ検出器の構造を示す図である。

【図7】短波長用波長シフトファイバと側面光検出型光ファイバを用いた2次元放射線イメージ検出器の構造を示す図である。

【図8】50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバと側面光検出型光ファイバを用いた2次元放射線イメージ検出器の構造を示す図である。

【図9】側面光検出型光ファイバ束をそれぞれ並列に並べかつ直角に配置しその両面に中性子検出媒体を配置した2次元中性子イメージ検出器の構造を示す図である。

【図10】蛍光の50%以下の吸収効率を持つ波長シフトファイバをそれぞれ並列に並べかつ直角に配置しその両面に中性子検出媒体を配置した2次元中性子イメージ検出器の構

造を示す図である。

【図11】クラレ社製 Y-8(有機蛍光体濃度 100ppm)の吸収特性を示す図である。

【図12】光ファイバを0度から110度の角度で曲げた場合の光の透過特性を示す図である。

【図13】90度に曲げた波長シフトファイバを用いた中性子検出器の構造を示す図である。

【図14】90度に曲げた部分を持つ光ファイバを間隙なく並べかつ、立体交差させた中性子イメージ検出器の構造を示す図である。

【図15】90度に曲げた部分を持つ光ファイバを間隙なく並べかつ、立体交差させた中性子イメージ検出器による 1.5mm 冷中性子ビームの測定例である。

【図16】検出部ブロックと読み出しブロックに分離した中性子イメージ検出器の構造を示す図である。

【図17】従来法の蛍光体シートあるいはシンチレータ板の上面と仮面に波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、同時に計数法により放射線入射位置を決定し放射線イメージを検出するクロスファイバ法の原理を示す図である。

【図18】従来法の短波長側蛍光検出用波長シフトファイバと長波長側蛍光波長シフトファイバの2種類の波長シフトファイバ束を面状に直角方向に配置し、その上に蛍光体シートあるいはシンチレータ板を配置し背面読み取り法の原理を示す図である。

【手続補正5】

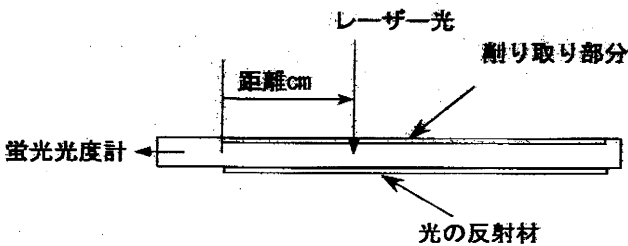
【補正対象書類名】図面

【補正対象項目名】全図

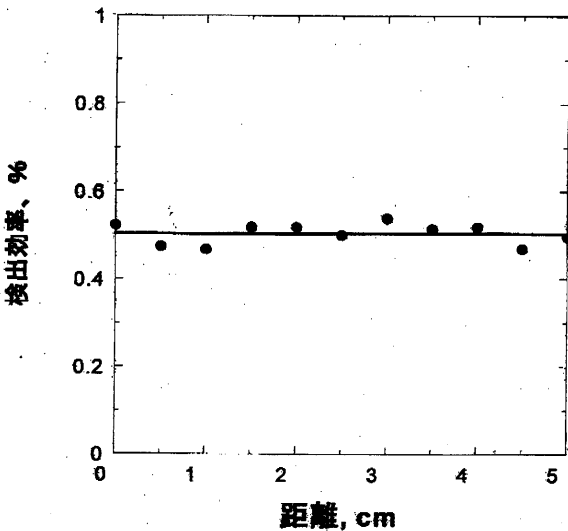
【補正方法】変更

【補正の内容】

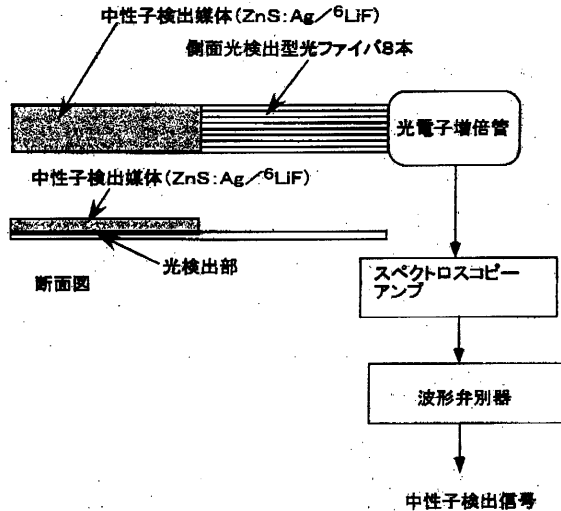
【図1】



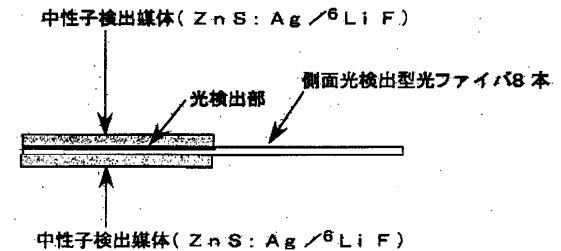
【図2】



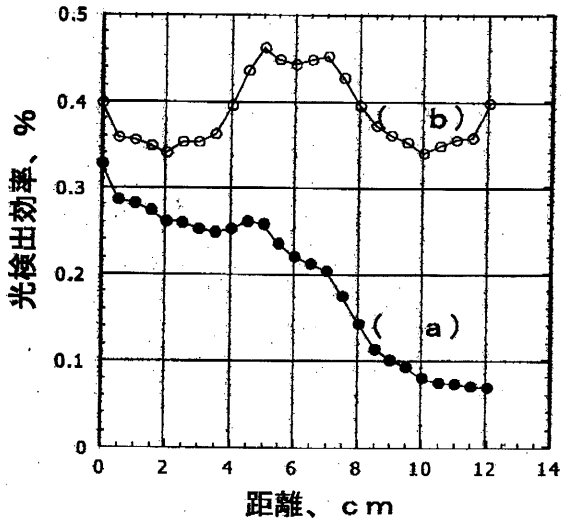
【図3】



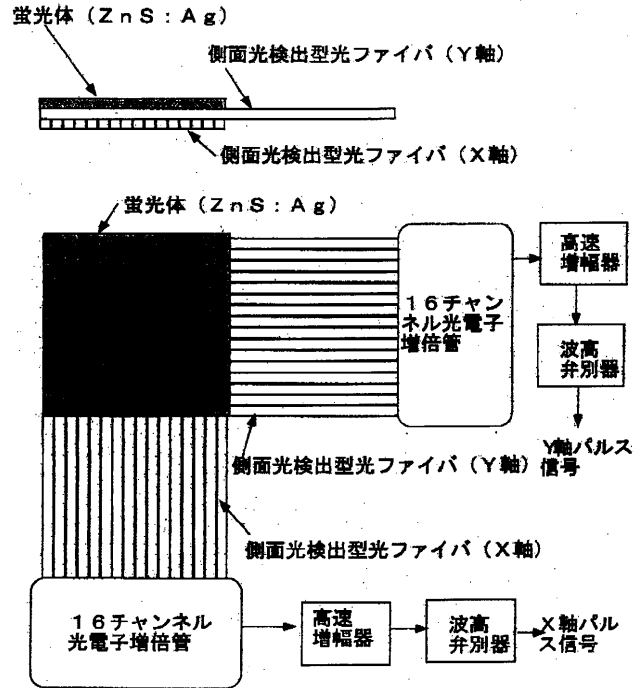
【図4】



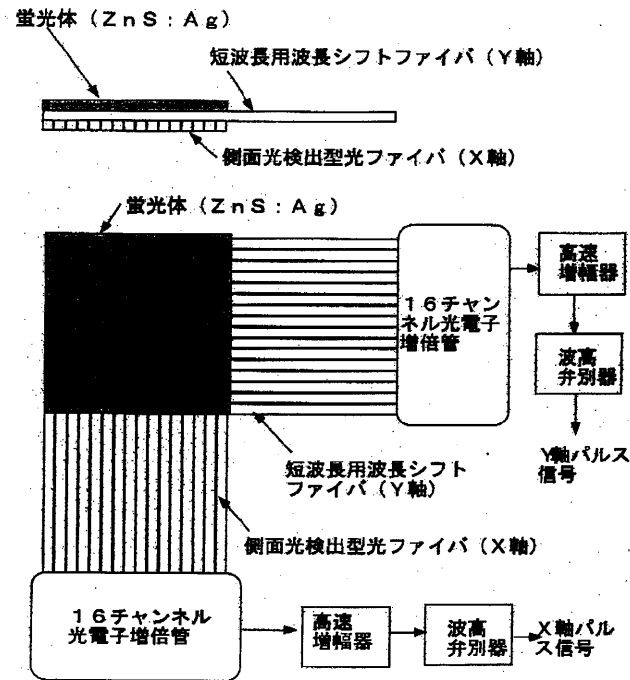
【 図 5 】



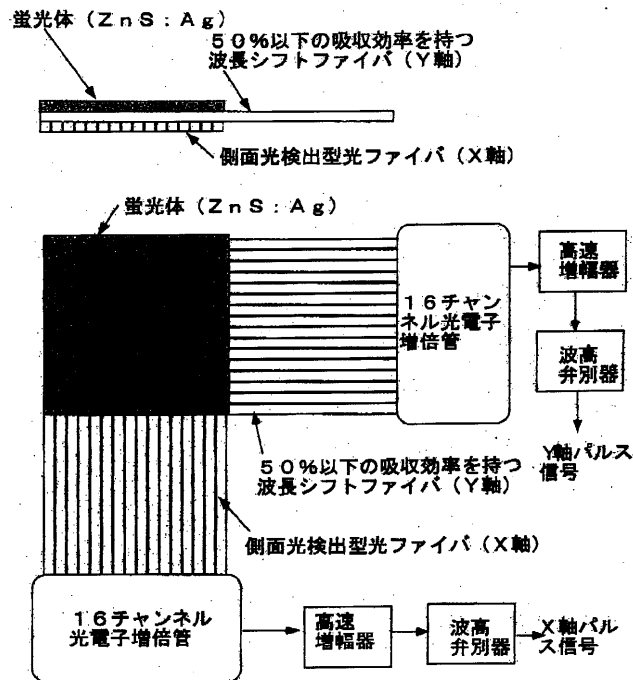
【 図 6 】



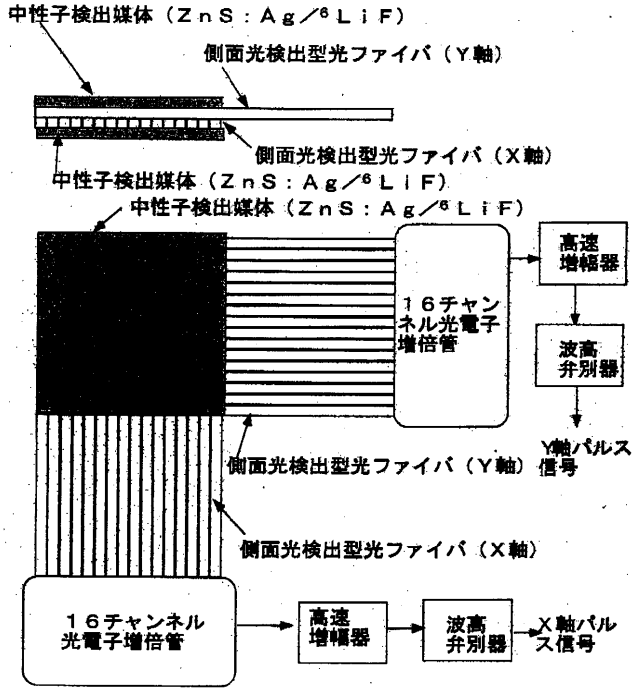
【 図 7 】



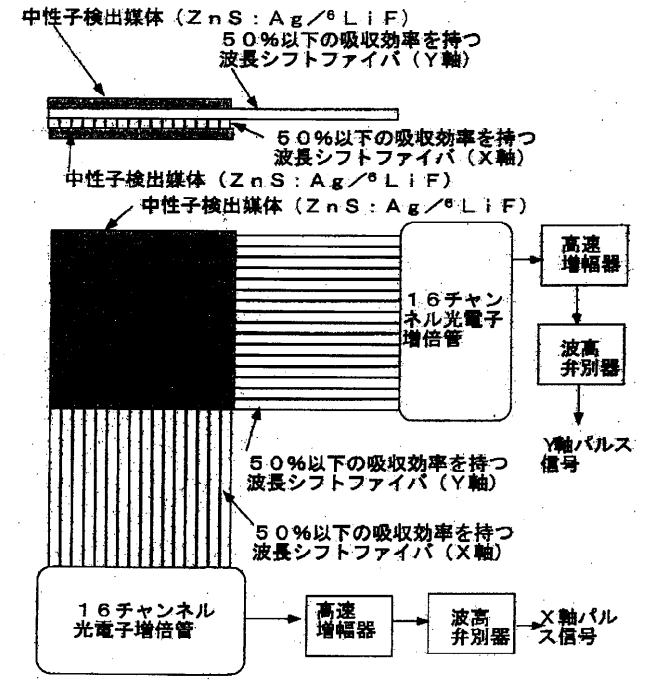
【 図 8 】



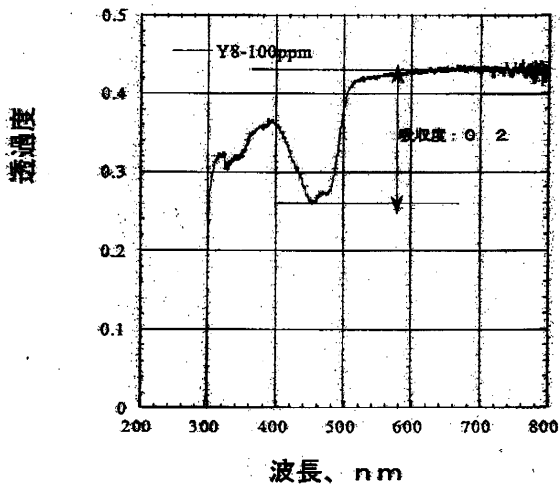
【図 9】



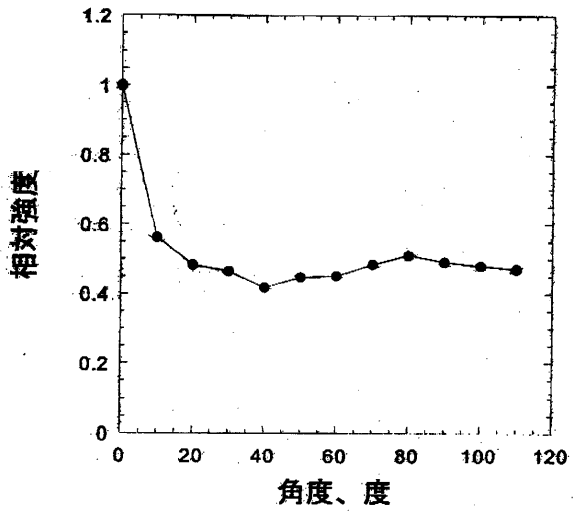
【図 10】



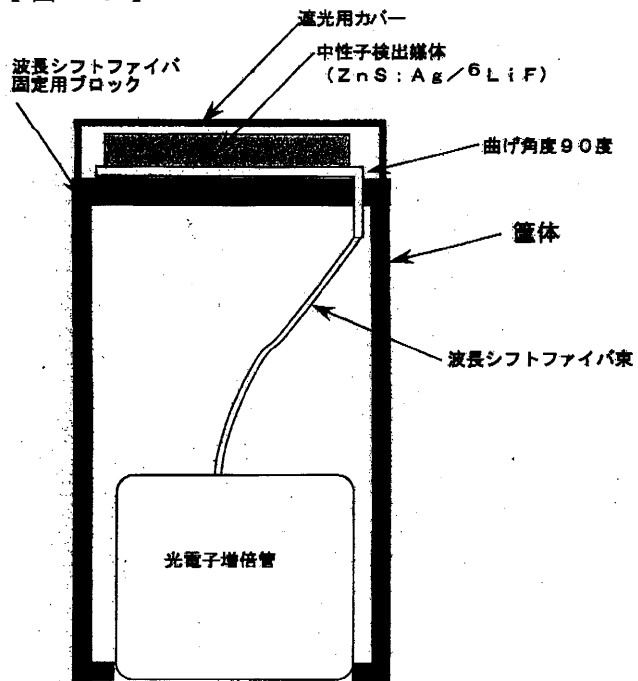
【図 11】



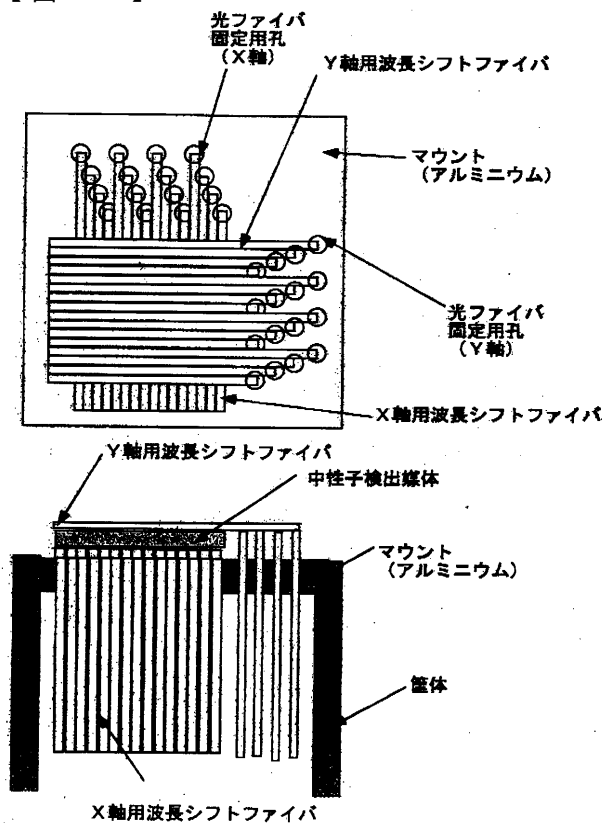
【図 12】



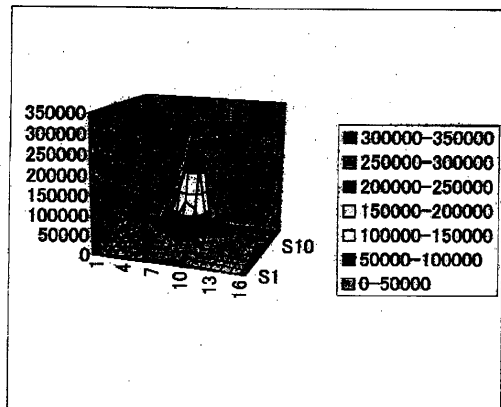
【 図 1 3 】



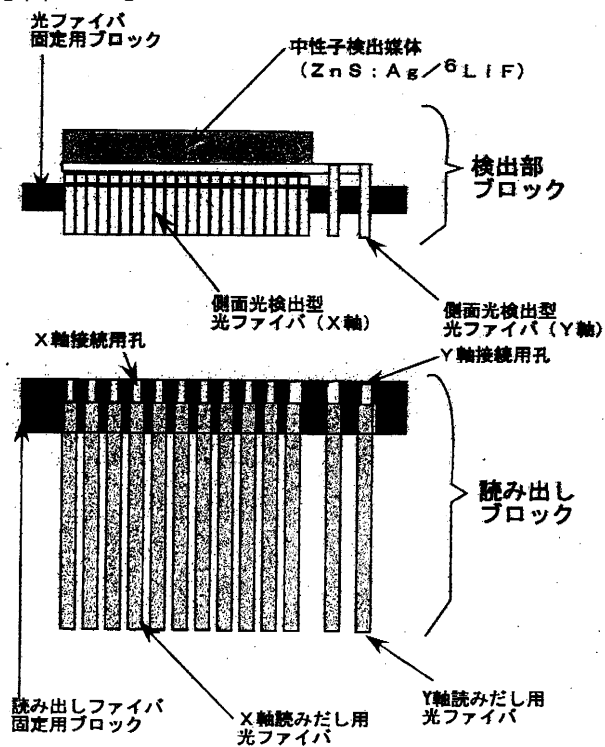
【 図 1 4 】



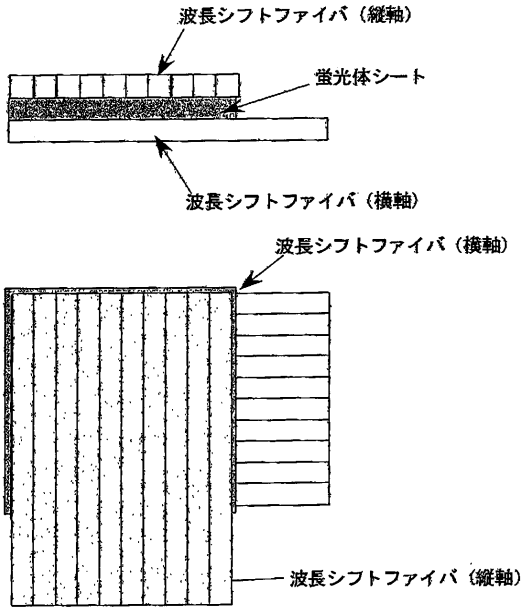
【 図 1 5 】



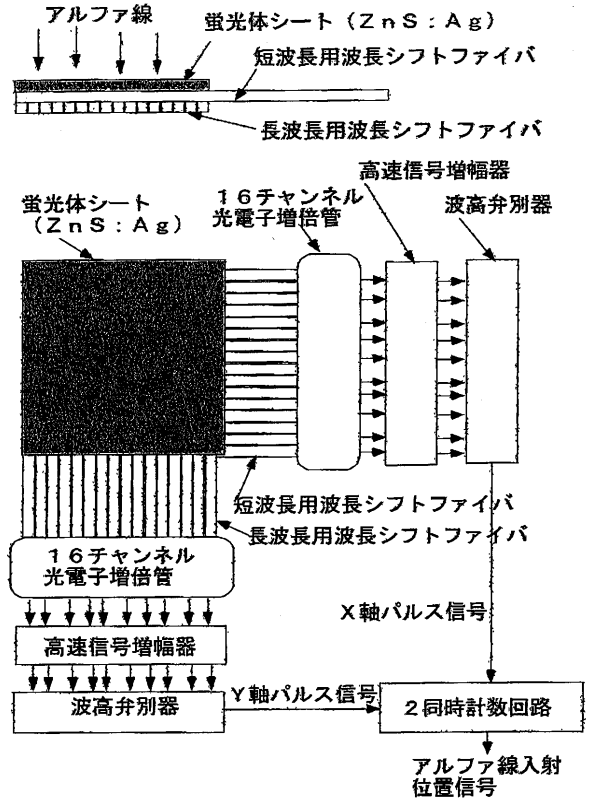
【 図 1 6 】



【 図 17 】



【 図 18 】



フロントページの続き

(72)発明者 片桐 政樹

茨城県那珂郡東海村白方字白根2番地の4 日本原子力研究所 東海研究所内

(72)発明者 松林 政仁

茨城県那珂郡東海村白方字白根2番地の4 日本原子力研究所 東海研究所内

Fターム(参考) 2G088 EE30 FF09 GG15 GG16 GG20 JJ01 JJ05 JJ09 JJ37 KK15
KK35 LL06