

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6083637号
(P6083637)

(45) 発行日 平成29年2月22日(2017. 2. 22)

(24) 登録日 平成29年2月3日(2017. 2. 3)

(51) Int. Cl.		F I	
GO 1 T	3/06	(2006. 01)	GO 1 T 3/06
GO 1 T	1/20	(2006. 01)	GO 1 T 1/20 D

請求項の数 2 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2012-158333 (P2012-158333)	(73) 特許権者	505374783
(22) 出願日	平成24年7月17日(2012. 7. 17)		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2014-20860 (P2014-20860A)		茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地
(43) 公開日	平成26年2月3日(2014. 2. 3)		1
審査請求日	平成27年7月15日(2015. 7. 15)	(73) 特許権者	510055057
			株式会社豊伸電子
			神奈川県川崎市宮前区宮前平3-9-12
		(73) 特許権者	390021186
			株式会社秩父富士
			埼玉県秩父郡小鹿野町小鹿野755-1
		(74) 代理人	100074631
			弁理士 高田 幸彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 シンチレータを用いた中性子検出器及び中性子イメージ検出器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ZnS 蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される断面が長方形の細長い板状で、中性子入射面とその裏面の両面から蛍光が放出可能とした構造の1枚の半透明型中性子シンチレータを、断面が円形あるいは正方形の内側に90%以上の反射率を持つ鏡面の反射板を配置した筒状の検出器筐体の内部に、前記検出器筐体の長手方向中心軸を通るように、断面が正方形の検出器筐体にあつては対角位置に配置し、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、これら2つの光電子増倍管から出力される信号を信号処理し中性子信号として取り出す構成を有する中性子検出器であつて、中性子が前記シンチレータに入射した際放出される蛍光を光電子増倍管に導く際、検出器筐体の両側に検出器筐体の中心軸に45度の反射角度を有するミラーあるいはプリズムを配置し、反射された蛍光をガンマ線遮蔽に効果のある大きな原子番号の元素を有するガラスから構成されたライトガイドに導き、ライトガイド背後に設置された光電子増倍管で検出する構成とし、かつそれぞれの光電子増倍管の側面から入射するガンマ線を遮蔽するためライトガイド及び光電子増倍管の周囲をガンマ線遮蔽材で囲うことにより、強度の強いガンマ線が検出器前方から光電子増倍管に入射した場合の光電子増倍管の光電面に起因するガンマ線バックグラウンドの影響を軽減することを特徴とした中性子検出器。

【請求項2】

ZnS 蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される断面が長

10

20

方形の細長い板状で、中性子入射面とその裏面の両面から蛍光が放出可能とした構造の2枚の半透明型中性子シンチレータを、断面が円形あるいは正方形の内側に90%以上の反射率を持つ鏡面の反射板を配置した筒状の検出器筐体の内部に、十字状に構成し、1枚を前記検出器筐体の長手方向中心軸を通るように、断面が正方形の検出器筐体にあつては対角位置に配置し、他の1枚を前記中性子シンチレータと直角に交差するように配置し、中性子がこれらのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、これら2つの光電子増倍管から出力される信号を信号処理し中性子信号として取り出す構成を有する中性子検出器であつて、中性子が前記シンチレータに入射した際放出される蛍光を光電子増倍管に導く際、検出器筐体の両側に検出器筐体の中心軸に45度の反射角度を有するミラーあるいはプリズムを配置し、反射された蛍光をガンマ線遮蔽に効果のある大きな原子番号の元素を有するガラスから構成されたライトガイドに導き、ライトガイド背後に設置された光電子増倍管で検出する構成とし、かつそれぞれの光電子増倍管の側面から入射するガンマ線を遮蔽するためライトガイド及び光電子増倍管の周囲をガンマ線遮蔽材で囲うことにより、強度の強いガンマ線が検出器前方から光電子増倍管に入射した場合の光電子増倍管の光電面に起因するガンマ線バックグラウンドの影響を軽減することを特徴とした中性子検出器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、シンチレータを用いた特殊構造の中性子検出器と、それを利用した一次元又は二次元の中性子イメージ検出器に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、位置情報を必要としない中性子検出器としては ^3He ガス比例計数管が、構造が簡単で中性子検出効率が高くかつバックグラウンドとなるガンマ線感度が低いことを理由に、主に使用されてきた。また、シンチレータを用いた中性子検出器としては、 ^6Li ガラスシンチレータあるいは $\text{ZnS}/^6\text{LiF}$ 半透明中性子シンチレータの背後に直接光電子増倍管を配置した小型の中性子検出器が中性子モニタや実験用検出器として使用されてきた。

【0003】

さらに、原子炉／加速器を用いた中性子源などを利用した中性子散乱実験に使用される中性子イメージ検出器としては、位置敏感型 ^3He ガス比例計数管を多数並べて使用した検出システムや ^3He ガスマルチワイヤー二次元中性子検出器などが使用されてきた。また、シンチレータを用いた中性子イメージ検出器としては、 ^6Li ガラスシンチレータあるいは $\text{ZnS}/^6\text{LiF}$ 半透明中性子シンチレータから放出される蛍光を光ファイバや波長シフトファイバを用いて入射位置をコーディングし光電子増倍管で検出し一次元あるいは二次元の中性子イメージを検出する検出器が使用されてきた。

【0004】

さらに、高速中性子検出器として透明なプラスチックシンチレータあるいは透明な液体シンチレータを円筒上の検出器筐体に入れて、両側に配置した光電子増倍管からの信号出力を処理し、時間分解能良く測定し、かつ蛍光寿命が非常に速いことを利用して光電子増倍管への到達時間差を基に高速中性子の入射位置を測定できる検出器が開発された。また、プラスチックシンチレータあるいは液体シンチレータはガンマ線感度が高いことから高速中性子とガンマ線による立ち上がり時間が異なることを利用した高速中性子／ガンマ線弁別も行っている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】 Nucl. Inst. And Meth. 73(1969)225-227

【非特許文献2】 Nucl. Inst. And Meth.185(1981)165-174

10

20

30

40

50

【非特許文献 3】Nucl. Inst. And Meth.214(1983)401-413

【非特許文献 4】Nucl. Inst. And Meth.A372(1996)246-252

【非特許文献 5】Nucl. Inst. And Meth.A477(2002)373-377)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

以上様々な種類の中性子検出器あるいは中性子イメージ検出器が開発され使用されてきたが、 ^3He ガスを用いた中性子検出器については、信号が遅いため、高計数率測定や非常に良い時間分解能を要求されるタイミング測定等に使用するのは困難であった。また、バックグラウンドとなるガンマ線感度が低いものの、照射済核燃料から放出される中性子を大強度のガンマ線バックグラウンドの中で測定する必要がある場合には、検出器から出力される信号に定常信号としてガンマ線バックグラウンド信号が重畳されるため、正常に中性子信号として取り出すことが困難となる。

10

【0007】

さらに、最近では、 ^3He ガスを手に入れることが困難となり価格も数10倍高くなり購入し使用することが困難な情勢となっている。また、 ^3He ガスそのものの製造も特殊な方法でのみ生産されてきたため、今後さらに少なくなるとされている。このため、現在、世界的に ^3He 代替え中性子検出器が必要となり、開発が精力的に進められている。この情勢の中で ^3He 代替え検出器として、最も期待されているのはシンチレータを用いた検出器である。

20

【0008】

しかし、シンチレータの背後に直接光電子増倍管を配置した小型の中性子検出器ではタイミング等については早いもののバックグラウンドとなるガンマ線に対して感度があり、かつ少し大きな有感面積を確保しコストパフォーマンスの良い検出器を得ることは非常に困難であった。また、シンチレータから放出される蛍光を光ファイバや波長シフトファイバでコーディングした中性子イメージ検出器については信号処理方法としてフォトンカウンティング法が使用されるため、中性子に対する有感面積は大きくはできるものの、時間分解能は34 ns となり正確な時間タイミングを必要とする測定には使用できなかった。

【0009】

また、シンチレータから放出される蛍光を光ファイバや波長シフトファイバでコーディングした中性子イメージ検出器は構造上真空中で使用することが困難なことから、原子炉／加速器を用いた中性子源などを利用した中性子散乱研究施設における、大きな真空槽に検出器を内装し真空状態で使用する中性子散乱実験装置に用いる中性子イメージ検出器として使用することは非常に困難であった。

30

【0010】

さらに、透明なプラスチックシンチレータあるいは液体シンチレータを用いた高速中性子検出器については本特許の中性子検出器の測定対象の低エネルギー中性子から熱外中性子領域では検出感度が低く、この方式と同じ構成にするにはシンチレータとして透明な ^6Li ガラスシンチレータを使う必要があるが、ガンマ線感度が高く中性子との信号弁別能力もなくコストも高いという欠点があり開発例はない。また、透明なシンチレータを用いた場合は、蛍光量はいろいろな場所で多重散乱されて両端の光電子増倍管に入射するため、蛍光放出点と光電子増倍管との立体角を利用した中性子の位置入射の決定は非常に困難である。このため、放出された蛍光の到達時間であれば最初の立ち上がり時間は直接最短で到達した蛍光であるので、この後多重散乱した蛍光が光電子増倍管に入射しても、中性子の入射位置は確保できるため、位置決定には到達時間差が使用されているのが現状である。

40

【0011】

したがって、本発明の目的は、 ^3He ガスを用いることなく、多結晶の粉体である Zn S 蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から

50

蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータと鏡面反射体を組み合わせ、両端に配置された光電子増倍管からの信号を信号処理し、中性子検出効率が高くかつ耐ガンマ線性能の良い中性子検出器あるいは中性子イメージ検出器を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明においては、中性子を検出するシンチレータとして、多結晶の粉体であるZnS蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータを使用する。なお、ZnS蛍光体はガンマ線感度が低いことから60年以上前から ^6LiF と混合され中性子シンチレータとして使用されてきている。また、光学フィルタを用いて短波長成分を取り出すと蛍光寿命が短くなると共にガンマ線感度が低下することも知られている。また、板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータの場合、内部で反応し放出された蛍光がシンチレータの両面から放出され、この蛍光を検出することから蛍光の放出量も多く蛍光分布も裾切りが容易なポアソン分布に似た分布特性を持つことができる。

【0013】

本発明においては、半透明型中性子シンチレータから放出される蛍光は、両端に配置された2つの光電子増倍管により立体角に基づいて直接検出される分とシンチレータ反対面に設置された鏡面反射体で1回反射され両端に配置された2つの光電子増倍管で検出される分との2つの成分がほぼ主な蛍光であることを積極的に利用し、特に中性子イメージ測定に利用する。これには、検出器筐体の中心に半透明の中性子シンチレータが設置され、シンチレータを散乱された蛍光が通過できないことが貢献している。つまり、中性子の入射位置は立体角にほぼ比例することから一次元あるいは二次元の位置検出が可能になると共に、両端での光電子増倍管に必要とする蛍光量を確保することが可能となる。

【0014】

一方、光電子増倍管から出力された信号処理に関しては、2つの光電子増倍管による同時測定に100MHz以上のサンプリング周波数のアナログ／デジタル変換器(ADC)を用いてサンプリング測定しデジタル化し、時系列データとしてメモリに記録した後、記録された時系列データの信号処理を行うことを導入し下記に示す中性子／ガンマ線弁別信号処理やその他の処理を同時に行う機能を確保することにより各信号処理の高度化を図っている。

【0015】

また、本発明においては、多結晶の粉体であるZnS蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータにおいて、中性子及びガンマ線の蛍光寿命特性が異なることを利用して中性子／ガンマ線弁別信号処理を行うと共に、光電子増倍管にガンマ線が入射し光電面と反応し放出される信号の時系列放出特性の信号寿命が30ns以下であり、非常に短く判別も容易でありかつ偶然にガンマ線が同時に入射し2つの光電子増倍管が同時に信号出力することが少ないことを利用して、高強度のガンマ線が光電子増倍管に入射してもデッドタイムが少ない状態での中性子検出を可能とすることができる。

【0016】

具体的には、本発明の一つの観点にかかる中性子検出器は、ZnS蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される断面が長方形の細長い板状で、中性子入射面とその裏面の両面から蛍光が放出可能とした構造の1枚の半透明型中性子シンチレータを、断面が円形あるいは正方形の内側に90%以上の反射率を持つ鏡面の反射板を配置した筒状の検出器筐体の内部に、該検出器筐体の長手方向中心軸を通るように、断面が正方形の検出器筐体にあつては対角位置に配置し、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、これら2つの光電子増倍管から出力される信号を信号処理し中性子信号として取り出すように構成されている。

【0017】

ZnS蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される断面が長

10

20

30

40

50

方形の細長い板状で、中性子入射面とその裏面の両面から蛍光が放出可能とした構造の2枚の半透明型中性子シンチレータを、断面が円形あるいは正方形の内側に90%以上の反射率を持つ鏡面の反射板を配置した筒状の検出器筐体の内部に、十字状に構成し、1枚を前記検出器筐体の長手方向中心軸を通るように、断面が正方形の検出器筐体にあつては対角位置に配置し、他の1枚を前記中性子シンチレータと直角に交差するように配置し、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、これら2つの光電子増倍管から出力される信号を信号処理し中性子信号として取り出すように構成されている。

【0018】

さらに、本発明の一つの観点に係る一次元中性子イメージ検出器は、上述の段落[0016] または段落[0017]の構成を用いて、中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、これら2つの光電子増倍管から出力される信号を設定された時間幅で同時計数測定を行う際に、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号を足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力し、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出し、このトリガ信号を起点として、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号の波高を100MHz以上のサンプリング周波数のアナログ／デジタル変換器(ADC)を用いてサンプリング測定しデジタル化し、時系列データとしてメモリに記録した後、記録された時系列データの最大デジタル波高値を求め、右側光電子増倍管の最大デジタル波高値をAそして左側光電子増倍管の最大デジタル波高値をBとし、シンチレータの右端を中性子入射位置の起点として中性子入射位置をXとし、シンチレータの長さをLとし、Cを位置補正項とし、Dを位置のオフセット項とした場合に、2つの最大デジタル波高値から中性子入射位置Xを導出する式、

$$X = (L + C) \times A^{1/2} / (A^{1/2} + B^{1/2}) - D$$
に基づいて、シンチレータの右端を中性子入射位置の起点として中性子入射位置Xを求めるように構成されている。

【0019】

また、さらに、本発明の別の観点に係る一次元中性子イメージ検出器は、上述の段落[0016]または段落[0017]の構成を用いて、中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、これら2つの光電子増倍管から出力される信号を設定された時間幅で同時計数測定を行う際に、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号を足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力し、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出し、このトリガ信号を起点として、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号の波高を100MHz以上のサンプリング周波数のアナログ／デジタル変換器(ADC)を用いてサンプリング測定し、時系列データとしてメモリに記録した後、記録された時系列データの最大デジタル波高値を求め、右側光電子増倍管の最大デジタル波高値をAそして左側光電子増倍管の最大デジタル波高値をBとし、あらかじめ不揮発性メモリに、右側光電子増倍管の最大デジタル波高値と左側光電子増倍管の最大デジタル波高値のメモリアレイとして入射位置を入力しておき、測定され求められたAとBをこのメモリアレイに入力しシンチレータの右端を中性子入射位置の起点として中性子入射位置Xを求めるように構成されている。

【0020】

さらに、本発明の一つの観点に係る二次元中性子イメージ検出器は、ZnS蛍光体と⁶Liあるいは¹⁰Bを含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータを、内面を鏡面とした検出器筐体の内部に、平行にそろって入射する中性子に対して直角に配置し、検出筐体の左右方向にX軸用として対峙する2個の光電子増倍管、そして検出筐体の上下方向にY軸用として対峙する2個の光電子増倍管を配置し、上述の段落[0018]または段落[0019]の構成を用いてX軸方向の中性子入射位置及びY方向の中性子入射位置を求めるように構成されている。

【発明の効果】

【0021】

10

20

30

40

50

本発明によれば、入手が困難な ^3He ガスを用いることなく、多結晶の粉体である ZnS 蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータと鏡面反射体を組み合わせ、両端に配置された光電子増倍管からの信号を信号処理し、中性子検出効率が高くかつ耐ガンマ線性能の良い中性子検出器あるいは中性子イメージ検出器を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータを、正形状内面鏡面型検出器筐体の内部に配置し、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出して中性子信号とする中性子検出器。 10

【図2】本発明の中性子検出器と検出効率の標準となる1インチ・ ^3He 4気圧の ^3He 比例計数管に対する相対的な検出効率のマルチスケイリング測定による比較測定結果。

【図3】中性子を入射した際のタイミング時間に関して、従来の信号処理で行った場合についてオシロスコープを用い測定した入射時間のタイムジッター測定結果。

【図4】両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータを2枚使用した十字状シンチレータを、正形状内面鏡面型検出器筐体の内部に配置し、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出して中性子信号とする中性子検出器。

【図5】検出器筐体の両側に検出器筐体の中心軸に45度の反射角度を有するミラーを配置し、反射された蛍光をガンマ線遮蔽能力のあるガラス製ライトガイドに導き、それぞれ背後に設置された光電子増倍管で検出し、光電子増倍管の光電面に起因するガンマ線バックグラウンドの影響を軽減することを特徴した中性子検出器。 20

【図6】検出器筐体の両側に検出器筐体の中心軸に45度の反射角度を有するプリズムを配置し、反射された蛍光をガンマ線遮蔽能力のあるガラス製ライトガイドに導き、それぞれ背後に設置された光電子増倍管で検出し、光電子増倍管の光電面に起因するガンマ線バックグラウンドの影響を軽減することを特徴した中性子検出器。

【図7】450nmから短い波長領域に透過率のある光学フィルタの透過特性。

【図8】中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、デジタル波高値を求め、位置計算式により中性子のシンチレータへの入射位置を求めた一次元中性子イメージ検出器。 30

【図9】中性子コリメートビームを用いて検出器の中性子有感部分の中央部分に入射した場合の2つの光電子増倍管から出力された信号波形。

【図10】中性子コリメートビームを用いて検出器の中性子有感部分の端の部分に入射した場合の2つの光電子増倍管から出力された信号波形。

【図11】中心部から両側に12cm幅で1cm毎に移動してその位置の検出特性を測定し、測定した2つの最大デジタル波高値を基に求めた各測定位置の頻度分布

【図12】中心部から両側に12cm幅で1cm毎に移動して得た頻度分布の中心位置を中性子ビーム入射位置毎にプロットした直線性を示す図。

【図13】X軸の中心位置である0cmの位置での、最大波高値を基に得た測定位置を示す頻度分布と積分時間を変えて求めた積分値を基に得た測定位置を示す頻度分布の比較結果。 40

【図14】中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、デジタル波高値を求め、2つの最大デジタル波高値－位置変換用メモリにより中性子のシンチレータへの入射位置を求めた一次元中性子イメージ検出器。

【図15】半透明型中性子シンチレータを検出器筐体の内部に配置し、検出筐体にX軸用として対峙する2個の光電子増倍管、そしてY軸用として対峙する2個の光電子増倍管を配置して、X軸方向の入射位置及びY方向の入射位置を求める二次元中性子イメージ検出器。

【図16】中性子シンチレータからの蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出して得た最大デジタル波高値がデジタル波高しきい値以上であり、そのサンプリング収集時 50

間の差が同時計測時間幅内である時中性子信号を取り出す中性子検出器。

【図 1 7】中性子シンチレータからの蛍光を両側に配置した 2 つの光電子増倍管で検出して得た時系列データを積算した積算値が積算しきい値以上であり、そのサンプリング収集時間の差が同時計測時間幅内である時中性子信号を取り出す中性子検出器。

【図 1 8】ZnS 蛍光体と ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される半透明型中性子シンチレータからの蛍光の時系列放出特性が中性子とガンマ線を検出した場合とでは異なることを利用して中性子／ガンマ線弁別を行う中性子検出器。

【図 1 9】半透明型中性子シンチレータに中性子が入射した場合放出される蛍光の時系列放出特性とガンマ線が入射した場合放出される蛍光の時系列放出特性の比較。

【図 2 0】前半部積算時間：後半部積算時間が 300 ns；700 ns の場合に得られた中性子及びガンマ線に対する中性子／ガンマ線弁別値の頻度分布の比較。 10

【図 2 1】前半部積算時間：後半部積算時間が 500 ns；500 ns の場合に得られた中性子及びガンマ線に対する中性子／ガンマ線弁別値の頻度分布の比較。

【図 2 2】前半部積算時間：後半部積算時間が 700 ns；300 ns の場合に得られた中性子及びガンマ線に対する中性子／ガンマ線弁別値の頻度分布の比較。

【図 2 3】ZnS/ ^6LiF 半透明型中性子シンチレータを用いた場合の前半部積算時間：後半部積算時間が 500 ns；500 ns の場合に得られた中性子及びガンマ線に対する中性子／ガンマ線弁別値の頻度分布の比較。

【図 2 4】トリガ信号が出た後一定の遅延時間後に中性子入射タイミング信号を出力する中性子検出器。 20

【図 2 5】トリガ信号を取り出す場合のタイムジッター特性。

【図 2 6】光電子増倍管にガンマ線が入射し光電面と反応し放出された信号波形の波形寿命が 30 ns 以下であることをもとにガンマ線入射によるデッドタイムの影響を軽減する中性子検出器。

【図 2 7】ガンマ線源として強度 1 MBq の ^{60}Co を密着させた光電子増倍管から出力された信号波形。

【図 2 8】ガンマ線源として強度 1 MBq の ^{60}Co を密着させた光電子増倍管から出力された信号の出力電圧の頻度分布。

【発明を実施するための形態】

【実施例】 30

【0023】

(実施例 1)

【0024】

実施例 1 として、ZnS 蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータを、断面が正方形の内側に鏡面の反射板を配置した筒状の検出器筐体の内部に配置し、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した 2 つの光電子増倍管で検出して中性子信号として取り出すことを特徴とした中性子検出器について図 1 を参照して説明する。

【0025】 40

半透明型中性子シンチレータとしては ZnS 蛍光体として ZnS : Ag, Cl を使い、中性子コンバータとしては中性子捕獲断面積が ^6Li より約 4 倍大きい $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ を用いることとし、両面から蛍光が放出可能とするため、混合してガラスに塗布し焼結して製作した ZnS/ $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 半透明型中性子シンチレータを用いた。検出体部分の厚さは 300 μm であり、ガラス板の厚さは 400 μm である。このシンチレータは、 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ が吸湿性を持つため厚さ 100 μm のラミネートフィルムでガラス板ごとラミネートして使用した。シンチレータ本体の大きさは 38 mm 幅で長さ 250 mm である。ラミネート後は 40 mm 幅で長さ 256 mm であった。

【0026】

検出器筐体としては、その断面の形を正方形とし、厚さ 0.8 mm のアルミニウム板で 50

製作し、内径 30 mm x 30 mm、長さは 300 mm のサイズとした。次に、外形寸法が 30 mm x 30 mm で長さが 250 mm のアルミニウム製反射板を検出器内面の中心位置に配置した。反射板の厚さは 0.3 mm である。アルミニウム製反射板の材料としては、(株)マテリアルハウス製高反射率アルミシート「M I R O」を用いた。本アルミシートの全反射率は 95 % 以上であり拡散反射率は 5 % 未満である。

【0027】

検出器筐体のアルミニウム製反射板の位置に、前述の半透明型中性子シンチレータを平行にそろって入射する中性子に対して 45 度に傾けて配置、すなわち、断面が正方形の前記検出器筐体の対角位置に配置した。従来から良く知られていることではあるが、45 度傾けることにより実質のシンチレータの厚さは 1.42 倍増加し検出効率を上げることができる。 10

【0028】

検出器筐体の両側には、中性子がこのシンチレータに入射した際に放出される蛍光を検出する 2 つの光電子増倍管を配置する。本実施例では外径寸法が 30 mm x 30 mm で長さが 30 mm の浜松ホトニクス製 R 1 1 2 6 5 - 1 0 0 を用いた。バイアス電圧としては -800 V を印加して使用した。

【0029】

2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号は、検出効率の評価のため、従来から使用されてきた信号処理法で信号処理することとし、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号は、まず、原子力研究開発機構製サムアンプに入力され、合成された後 C A N B E R R A 社製スペクトロスコピーアンプ M o d e l 2 0 2 1 に入力した。本アンプの波形整形時定数は 250 ns に設定した。増幅され波形整形された中性子信号は C A N B E R R A 社製タイミングシングルチャネルディスクリミネータ M o d e l 1 4 3 0 に入力し波形弁別しパルス信号として取り出し中性子信号としてカウンタ回路により計数した。 20

【0030】

中性子線源として A m - L i 線源 7.4 GBq を使い、パラフィンブロック 5 cm 厚で熱中性子化して本検出器の検出効率の測定を行った。相対的な検出効率を得るため、1 インチの外形で ^3He 圧力が 4 気圧の ^3He 比例計数管を標準検出器として定め、比較測定を行った。本比較試験では、信号の安定性等の情報を得るため、中性子計数を 1 秒おきにマルチスケイリング測定した。 30

【0031】

比較実験の測定結果を図 2 に示す。最初の 100 秒が本実施例の検出器の測定結果であり、残り 100 秒が標準検出器である 4 気圧の ^3He 比例計数管の測定結果である。 ^3He 比例計数管の結果を平均した計数率が 272.5 cps であるのに対して、本検出器の結果を平均した計数率として 252 cps が得られた。中性子に対する有感面積が ^3He 比例計数管の場合 25.4 mm x 250 mm であるのに対して本検出器は 30 mm x 250 mm であることから、有感面積の補正を行い、本検出器の相対検出効率を求めた結果、標準検出器である 4 気圧の ^3He 比例計数管に対して 73 % の効率であることが確認できた。参考として 4 気圧の ^3He 比例計数管の熱中性子に対する絶対検出効率は約 70 % であることから、本実施例の絶対検出効率は 50 % を少し越える数値となり ^3He 代替え検出器として使用できる領域に入っている。 40

【0032】

参考として、本発明の一つの解決すべき検出器性能である中性子入射した際のタイミング時間に関して、従来の信号処理で行った場合についてオシロスコープを用い入射時間のタイムジッターを測定した。図 3 に測定結果を示す。従来法を用いてスペクトロスコピーアンプの波形整形時定数を 250 ns に設定した場合には、半値幅で約 34 ns のタイムジッターがあり、従来法を用いた信号処理法では必要とする性能を確保することが困難であることを確認できた。

(実施例 2)

【0033】

実施例 2 として、ZnS 蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータ 2 枚を十字構造にし、断面が正方形の内側に鏡面の反射板を配置した筒状の検出器筐体の内部に配置し、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した 2 つの光電子増倍管で検出して中性子信号として取り出すことを特徴とした中性子検出器について図 4 をもとに説明する。

【0034】

半透明型中性子シンチレータとしては ZnS 蛍光体として ZnS : Ag, Cl を用い、中性子コンバータとしては中性子捕獲断面積が ^6Li より約 4 倍大きい $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ を用いることとし、両面から蛍光が放出可能とするため、混合してガラスに塗布し焼結して製作した ZnS/ $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 半透明型中性子シンチレータを用いた。検出体部分の厚さは 300 μm であり、ガラス板の厚さは 400 μm である。このシンチレータは、 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ が吸湿性を持つため厚さ 100 μm のラミネートフィルムでガラス板ごとラミネートして使用した。1 枚のシンチレータについては、シンチレータ本体の大きさは 38 mm 幅で長さ 250 mm である。ラミネート後は 40 mm 幅で長さ 256 mm であった。十字状構造とするため、本実施例では、シンチレータ本体の大きさが 18 mm 幅で長さ 250 mm であるシンチレータを製作し、ラミネート後のサイズが 19 mm 幅で長さ 256 mm のシンチレータを 2 枚製作し、図 4 の検出器筐体の断面図に示すようにメインとなる 1 枚のシンチレータに直角に配置し十字状シンチレータを構成した。

【0035】

検出器筐体としては、その断面の形を正方形とし、厚さ 0.8 mm のアルミニウム板で製作し、内径 30 mm x 30 mm、長さは 300 mm のサイズとした。次に、外形寸法が 30 mm x 30 mm で長さが 250 mm のアルミニウム製反射板を検出器内面の中心位置に配置した。反射板の厚さは 0.3 mm である。アルミニウム製反射板の材料としては、(株)マテリアルハウス製高反射率アルミシート「MIRRO」を用いた。本アルミシートの全反射率は 95 % 以上であり拡散反射率は 5 % 未満である。

【0036】

検出器筐体のアルミニウム製反射板の位置に、十字状に構成したシンチレータの内メインとなる 1 枚のシンチレータを平行にそろって入射する中性子に対して、45 度に傾けて配置し、残りの約半分の幅のシンチレータ 2 枚を図 4 の断面図に示すように 135 度傾けて配置した。この結果シンチレータの実効厚さは 2.82 倍増加し検出効率を上げることができる。

【0037】

検出器筐体の両側には、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を検出する 2 つの光電子増倍管を配置する。本実施例ではサイズが 30 mm x 30 mm で長さが 30 mm の浜松ホトニクス株式会社製 R11265-100 を用いた。バイアス電圧としては -800 V を印加して使用した。

【0038】

2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号は、従来から使用されてきた方法で信号処理することとし、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号は、まず、独立行政法人日本原子力研究開発機構製サムアンプに入力され、合成された後キャンベラ社（米国：CANBERRA）製スペクトロスコーピーアンプ Model 2021 に入力する。本アンプの波形整形時定数は 250 ns に設定した。増幅され波形整形された中性子信号はキャンベラ社製タイミングシングルチャネルディスクリミネータ Model 1430 に入力し波形弁別しパルス信号として取り出し中性子信号としてカウンタ回路により計数する。

【0039】

中性子線源として Am-Li 線源 7.4 GBq を用い、パラフィンブロック 5 cm 厚で熱中性子化して本検出器の検出効率の測定を行った。相対的な検出効率を得るため、1 インチの外形で ^3He 圧力が 4 気圧の ^3He 比例計数管との比較を行った。中性子計数を 1 秒おきにマルスケアリング測定して平均値を求めた結果、 ^3He 比例計数管の結果が 27

2. 5 c p sであるのに対して本検出器では3 5 5 c p sが得られた。中性子に対する有感面積が³He比例計数管の場合2 5. 4 m m x 2 5 0 m mであるのに対して本検出器は3 0 m m x 2 5 0 m mであることから、有感面積の補正を行い、本検出器の相対検出効率を求めた結果、1 0 3 %の効率であることが確認できた。また、この結果より、従来法での信号処理を行った場合、実施例での1枚の半透明型中性子シンチレータに比較し2枚を十字構造にしたシンチレータでは検出効率が約1. 4倍改善することが確認できた。

(実施例3)

【0040】

実施例3として、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を光電子増倍管に導く際、検出器筐体の両側に検出器筐体の中心軸に45度の反射角度を有するミラーあるいはプリズムを配置し、反射された蛍光をガンマ線遮蔽能力のあるガラス製ライトガイドに導き、それぞれ背後に設置された光電子増倍管で検出し、光電子増倍管の光電面に起因するガンマ線バックグラウンドの影響を軽減することを特徴した中性子検出器について図5と図6を基に説明する。検出器としては実施例1で断面が正方形構造の検出器を用いる。

【0041】

原子炉の使用済み燃料から放出される中性子を測定し燃料中のウランやプルトニウムの量を測定する核セキュリティ分野においては、使用済み燃料からの高強度のガンマ線場で中性子を測定する必要がある。本発明の検出器の場合、ガンマ線の影響は、中性子を検出するZnSを用いた半透明型中性子シンチレータがガンマ線に反応し蛍光出力する要因と直接ガンマ線が光電子増倍管に到達しその光電面で反応しパルス出力する要因との大きな2つの要因がある。前者のZnSを用いた半透明型中性子シンチレータの場合は既に文献に示す特許において光学フィルタを用いて軽減できることが公開されている（日本特許第4415095号、米国特許 第679064号）。このため、本実施例3を含めすべての実施例においては文章及び図面において、図7に示す450nmから短い波長領域に透過率のある光学フィルタを光電子増倍管に装着している。

【0042】

しかし、後者についてはガンマ線の強度が非常に強くなった場合光電子増倍管によるガンマ線パルス信号の出力を低減することは非常に困難なため、ガンマ線が光電子増倍管に到達するのを防ぐ必要がある。

【0043】

本発明の実施例3においては図5と図6に示すように光電面へのガンマ線の到達量を軽減するため、光電子増倍管の前の部分にガンマ線遮蔽能力の大きいガラス製のライトガイドを配置し、実施例1で示した構造の検出器筐体の2つの光電子増倍管の位置に図5の場合は45度に傾けた鏡面反射体を、また図6の場合にはプリズムを配置して90度の方向に蛍光を導く。その蛍光をガンマ線遮蔽能力の大きいガラス製ライトガイドで受けて、その他端に配置された光電子増倍管により検出する構造とした。図6の場合はプリズムとライトガイドを一体化して使用しても良く、蛍光のライトガイドの観点からは一体化した構造の方が良い。反射板の材料としては(株)マテリアルハウス製高反射率アルミシート「MIRO」を使用することができる。また、プリズム及びライトガイドのガラス材料としては、ガンマ線遮蔽に効果のある大きな原子番号の元素を有するガラスから構成されたガラスであり、かつ高強度のガンマ線により照射されても着色しない特性を有する必要がある。このため、光学特性としてZnS:Ag, Cl蛍光体の波長450nmより短波長側の透過特性が良いガラスを必要とする。本実施例では、住田ガラス製鉛ガラスSF6型を用いる。本ガラスの透過特性はZnS:Ag, Cl蛍光体の蛍光波長域390nmから600nmを透過させることができ、かつガンマ線の照射強度として10⁴グレイまでは10%程度の損失しか放射線損傷がないことが確認されている。ライトガイド部の長さがガンマ線に対する遮蔽能力を決定するため、本発明では5cmとした。なお、ライトガイドの断面の大きさは30mm x 30mmとする。核種としてCs137から放出される662keVガンマ線を10分の1以上遮蔽する能力を有している。使用する2つの光電子増倍

管としてはサイズが 30 mm x 30 mm で長さが 30 mm の浜松ホトニクス株式会社製 R11265-100 を用いる。

【0044】

また、検出器の両側に置かれたライトガイドと検出器の周囲には図 6 及び図 7 に示すように厚さ 3 cm の鉛ブロックで遮蔽する構造とし、検出器筐体の前の部分から斜めに入るガンマ線を遮蔽する。

(実施例 4)

【0045】

実施例 4 においては、中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した 2 つの光電子増倍管で検出し、デジタル波高値を求め、中性子のシンチレータへの入射位置を求めることを特徴とした一次元中性子イメージ検出器について図 8 をもとに説明する。検出器としては実施例 1 で断面が円形構造の検出器を用いる。

【0046】

断面の形を円形として外径が 30 mm ϕ 、内径 28 mm ϕ 、厚さ 2 mm のアルミニウム円筒管で、長さは 300 mm のサイズとし、外径 26 mm ϕ で長さ 240 mm のアルミニウム製反射板をその内面の中心位置に配置した構造の検出器筐体を用い、アルミニウム製反射板の位置と同じ位置に、幅 26 mm、長さ 240 mm の実施例 1 で述べた半透明型中性子シンチレータを平行に入射する中性子に対して 45 度に傾けて配置、すなわち、検出器筐体の長手方向中心軸を通してに配置した。この検出器筐体の両側に、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を検出する 2 つの光電子増倍管を配置する。本実施例では外径 24 mm で長さが 60 mm の浜松ホトニクス株式会社製 8135 を用いた。バイアス電圧としては 1100 V を印加して使用した。

【0047】

本実施例においては、2 つの光電子増倍管から出力される信号をサンプリング測定する際に、最初に、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号を高速増幅器で増幅した後足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力して、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出す。本実施例でこれから述べるデジタル信号処理には FPG A (Field-Programmable Gate Array) 回路を用いる。FPG A としてはアルテラ社 (米国: Altera Corporation) 製 HD64F30488VTE25V を用いた。高速増幅器としてはアナログ・デバイセズ社 (米国: Analog Devices, Inc.) 製オペアンプ AD8007 を使用しゲインは 2 倍に設定した。このトリガ信号を起点として、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号の波高を 200 MHz のサンプリング周波数でアナログ/デジタル変換器 (ADC) を動作させサンプリング測定を行う。アナログ/デジタル変換器 (ADC) としてはアナログ・デバイセズ社製 AD9626 を使用した。アナログ/デジタル変換された時系列データは FPG A 内のメモリに記録する。ADC の変換ビット数は 11 ビットであり、半透明型中性子シンチレータから放出された中性子波形信号が 11 ビット (2048) 内に収まるように光電子増倍管のバイアス電圧は 800 V に設定した。また、メモリへの記録時間は最大 1 μ s とした。

【0048】

2 つの光電子増倍管から出力された波形信号について、時系列データのサンプリングの終了後、記録された時系列データからデータを読み出し逐次比較することにより右側光電子増倍管の最大デジタル波高値 A として左側光電子増倍管の最大デジタル波高値 B を求めた。

【0049】

実際に、中性子コリメートビームを用いて検出器の中性子有感部分の中央と端の部分に入射した場合の 2 つの光電子増倍管から出力された信号波形を参考に図 9 と図 10 に示す。中央に中性子ビームを照射した場合には 2 つの光電子増倍管から出力された最大デジタル波高値はほぼ同じ波高値を示し、端に照射した場合には照射した端の光電子増倍管からの最大波高値は非常に高く、反対にもう一方の端の光電子増倍管の最大デジタル波高値は非常に低い値を示している。本発明では、この最大デジタル波高値の変化を利用して中性

子の入射位置を導出している。

【0050】

また、中性子を端に照射した場合には照射した端の光電子増倍管からの最大波高値は非常に高く、反対にもう一方の端の光電子増倍管の最大デジタル波高値は非常に低い値を示すことから、後に述べる実施例6-12の中性子弁別しきい値は、もう一方の端の光電子増倍管の最大デジタル波高値の値に依存することがわかる。本実施例では検出器断面を円形としその外径が30mmφの場合検出器のシンチレータの長さは25cmが立体角の観点から限界に近いと考えている。また、実施例として検出器断面を正方形としそのサイズを30mm x 30mmとした場合、円形と同様に25cmが立体角の観点から限界に近いと考えている。

10

【0051】

そして、シンチレータの右端を中性子入射位置の起点として中性子入射位置をXとし、シンチレータの長さをLとし、Cを位置補正項、Dを位置のオフセット項とし、

$$X = (L + C) \times A^{1/2} / (A^{1/2} + B^{1/2}) - D$$
 の式に基づいて中性子のシンチレータへの入射位置Xを求めた。本最大デジタル波高値-中性子入射位置換算式は、中性子入射位置から放出された蛍光が中性子入射位置での2つの光電子増倍管をみこむ立体角に依存していることを利用していることがわかる。

【0052】

求めた8ビットの位置情報は、LVDS規格の信号に変換しパラレル信号として出力し信号収集回路によって位置情報として積算される。

20

【0053】

本実施例の一次元検出器を評価するため、原子力研究開発機構のJRR-3原子炉中性子研究施設の「武蔵」中性子実験装置の熱中性子ビームを用いて実験を行った。実験は3mmφのコリメータされた熱中性子ビームを使用し、中性子検出器への入射位置をX軸方向に移動するため、検出器を移動台に設置して実験を行った。本一次元イメージ検出器のY軸方向についてはコリメートビームをY軸の中心位置に照射する。X軸方向については中心部から両側に12cm幅で1cm毎に移動してその位置の検出特性を測定した。各位置で測定した2つの最大デジタル波高値を基に上記式で計算し求めた測定位置の頻度分布を各入射位置毎にプロットし図11に示す。なお、図11のプロットでは位置オフセット項を0にしてプロットしている。この結果を基に移動した中性子と測定結果の位置をプロットして図12に示す。この結果より、直線性が確保され一次元イメージ中性子検出器として動作することが確認された。

30

【0054】

また、参考のため、最大デジタル波高値ではなく、ADCによりサンプリング測定を開始して最大値を過ぎさらに一定時間測定すると蛍光量のデータが増加し位置分解能が良くなると考えられたため、積分した後、この積分値を基に上記式を用いて計算し位置情報を求めて、頻度分布をプロットし、それを基に位置分解能の評価を試みた。X軸の中心位置である0cmの位置での評価結果を図13に示す。積分時間が長くなるにつれて位置分解能が悪くなることが確認できた。最も良い分解能を得たのは、本発明での最大デジタル波高値を使用した場合であることが確認された。

40

（実施例5）

【0055】

実施例5においては、中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、デジタル波高値を求め、あらかじめ入力しておいた2つの最大デジタル波高値-位置変換用メモリを用い中性子のシンチレータへの入射位置を求めることを特徴とした一次元中性子イメージ検出器について図14を基に説明する。検出器としては実施例1で断面が円形構造の検出器を用いる。

【0056】

断面の形を円形として外径が30mmφ、内径28mmφ、厚さ2mmのアルミニウム円筒管で、長さは300mmのサイズとし、外径26mmφで長さ240mmのアルミニ

50

ウム製反射板をその内面の中心位置に配置した構造の検出器筐体を用い、アルミニウム製反射板の位置と同じ位置に、幅 2 6 m m、長さ 2 4 0 m m の実施例 1 で述べた半透明型中性子シンチレータを平行に入射する中性子に対して 4 5 度に傾けて配置、すなわち、検出器筐体の長手方向中心軸を通るように配置した。この検出器筐体の両側に、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を検出する 2 つの光電子増倍管を配置する。本実施例では外径 2 4 m m で長さが 6 0 m m の浜松ホトニクス株式会社製 8 1 3 5 を用いた。バイアス電圧としては 1 1 0 0 V を印加して使用した。

【 0 0 5 7 】

本実施例においては、2 つの光電子増倍管から出力される信号をサンプリング測定する際に、最初に、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号を高速増幅器で増幅した後足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力して、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出す。本実施例でこれから述べるデジタル信号処理には F P G A (Field-Programmable Gate Array) 回路を用いる。F P G A としてはアルテラ社製 H D 6 4 F 3 0 4 8 8 V T E 2 5 V を用いた。高速増幅器としてはアナログ・デバイセズ社製オペアンプ A D 8 0 0 7 を使用しゲインは 2 倍に設定した。このトリガ信号を起点として、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号の波高を 2 0 0 M H z のサンプリング周波数でアナログ／デジタル変換器 (A D C) を動作させサンプリング測定を行う。アナログ／デジタル変換器 (A D C) としてはアナログ・デバイセズ社製 A D 9 6 2 6 を使用した。アナログ／デジタル変換された時系列データは F P G A 内のメモリに記録する。A D C の変換ビット数は 1 1 ビットであり、半透明型中性子シンチレータから放出された中性子波形信号が 1 1 ビット (2 0 4 8) 内に収まるように光電子増倍管のバイアス電圧は 8 0 0 V に設定した。また、メモリへの記録時間は最大 1 μ s とした。

【 0 0 5 8 】

2 つの光電子増倍管から出力された波形信号について、時系列データのサンプリングの終了後、記録された時系列データからデータを読み出し逐次比較することにより右側光電子増倍管の最大デジタル波高値 A として左側光電子増倍管の最大デジタル波高値 B を求めた。2 つの光電子増倍管から出力された波形信号について、時系列データのサンプリングの終了後記録された時系列データからデータを読み出し逐次比較することにより右側光電子増倍管の最大デジタル波高値 A として左側光電子増倍管の最大デジタル波高値 B を求めた。

【 0 0 5 9 】

次に、あらかじめ変換用データを入力しておいた 2 つの最大デジタル波高値－位置変換用メモリを用いて中性子のシンチレータへの入射位置を求めた。変換データは、シンチレータの右端を中性子入射位置の起点として中性子入射位置を X とし、シンチレータの長さを L とし、C を位置補正項、D を位置のオフセット項とし、

$$X = (L + C) \times A^{1/2} / (A^{1/2} + B^{1/2}) - D$$

の式に基づいて中性子のシンチレータへの入射位置 X を求めることができる。最大デジタル波高値－位置変換用メモリを使用した中性子入射位置の導出は 1 0 0 n s 以下で行うことができるため、位置情報を実施例 5 に比較して短時間に得ることができる。また、実施例 5 の評価結果の図 1 1 に示す検出器の両端方向に入射位置が移動するに従い各位置の頻度分布が左右対称からはずれる現象も最大デジタル波高値－位置変換入力データに補正を加えることにより改善することができる。

(実施例 6)

【 0 0 6 0 】

実施例 6 においては、半透明型中性子シンチレータを、内面を鏡面とした検出器筐体の内部に、平行に入射する中性子に対して直角に配置し、検出筐体に X 軸用として対峙する 2 個の光電子増倍管、そして Y 軸用として対峙する 2 個の光電子増倍管を配置し、X 軸方向の入射位置及び Y 方向の入射位置を求めることを特徴とした二次元中性子イメージ検出器について図 1 5 を参照して説明する。本実施例においては、実施例 6 の最大デジタル波高値－位置変換用メモリを用い中性子のシンチレータへの入射位置を求める方法を使用す

る。

【0061】

本実施例においては、検出器筐体は図15に示すように中性子検出部分の外径が120mm x 120mmそして深さ方向が31mmとし厚さ0.3mmで内部部分が鏡面のアルミニウム板を用いて製作する。4つの側面には4枚のガイド板が両方向に用意され光電子増倍管の大きさに絞られてゆく構造とする。側面から光電子増倍管の光電面までの距離は4cmとする。また、内面の深さ方向の幅は30.4mmである。

【0062】

この検出器筐体の検出部分の中心部に実施例1で述べた半透明型中性子シンチレータでサイズが100mm x 100mmのシンチレータを中性子に対して90度、つまり検出部分のアルミニウム板と平行に、そして深さ方向に対して中心位置に配置した。そしてこの検出器筐体の4つの側面に用意された4枚のガイド板の先に、X軸用として対峙する2個の光電子増倍管つまり右側X軸光電子増倍管と左側X軸光電子増倍管、そしてY軸用として対峙する2個の光電子増倍管つまり上側Y軸光電子増倍管と下側Y軸光電子増倍管を配置する。本実施例では、これらに使用する光電子増倍管としては、サイズが30mm x 30mmで長さが30mmの浜松ホトニクス製R11265-100を用いる。バイアス電圧としては-800Vを印加する。

【0063】

本実施例においては、X軸及びY軸にそれぞれ対峙する2つの光電子増倍管から出力された波形信号の信号処理については、実施例6で使用した回路構成を採用する。

【0064】

X軸及びY軸毎に2つの光電子増倍管から出力された波形信号について、時系列データのサンプリングの終了後記録された時系列データからデータを読み出し逐次比較することにより、それぞれ、右側X軸光電子増倍管の最大デジタル波高値AXそして左側X軸光電子増倍管の最大デジタル波高値BX、そして上側Y軸光電子増倍管の最大デジタル波高値BYそして下側Y軸光電子増倍管の最大デジタル波高値AYを求めた。次に、あらかじめX軸及びY軸毎に用意した変換用データを入力しておいたX軸用およびY軸用の2つの最大デジタル波高値-位置変換用メモリを用いて、X軸およびY軸の中性子入射位置を二次元で求めた。

【0065】

X軸用変換データは、シンチレータの左端を中性子入射位置の起点として中性子入射位置をXとし、対峙する光電子増倍管の距離をLXとし、CXを位置補正項、DXを位置のオフセット項とし、

$$X = (LX + CX) \times AX^{1/2} / (AX^{1/2} + BX^{1/2}) - DX$$

の式に基づいて中性子のシンチレータへの入射位置Xを求めることができる。

【0066】

一方、Y軸用変換データは、シンチレータの下端を中性子入射位置の起点として中性子入射位置をYとし、対峙する光電子増倍管の距離をLYとし、CYを位置補正項、DYを位置のオフセット項とし、

$$Y = (LY + CY) \times AY^{1/2} / (AY^{1/2} + BY^{1/2}) - DY$$

の式に基づいて中性子のシンチレータへの入射位置Yを求めることができる。また、最大デジタル波高値-位置変換用メモリを用いて中性子のシンチレータへの入射位置を求める場合、最大デジタル波高値-位置変換入力データに補正を加えることによりX軸及びY軸の直線性及び位置分解能を改善することができる。

【0067】

求めた8ビットのX軸及びY軸の二次元位置情報は、LVDS規格の信号に変換し2つのパラレル信号として出力し信号収集回路によって二次元位置情報として積算される。

(実施例7)

【0068】

実施例7については、中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置

した2つの光電子増倍管で検出し、それぞれ最大デジタル波高値を求め、両者があらかじめ設定したデジタル波高しきい値以上であり、そのサンプリング収集時間の差が同時計測時間幅内であるという条件を基に中性子信号を取り出すことを特徴とした中性子検出器あるいは中性子イメージ検出器について図16を基に説明する。検出器としては実施例1で断面が正方形構造の検出器を用いる。

【0069】

検出器筐体としては、その断面の形を正方形とし、厚さ0.8mmのアルミニウム板で製作し、内径30mm x 30mm、長さは300mmのサイズとした。次に、外形寸法が30mm x 30mmで長さが250mmのアルミニウム製反射板を検出器内面の中心位置に配置した。反射板の厚さは0.3mmである。アルミニウム製反射板の材料としては、(株)マテリアルハウス製高反射率アルミシート「M I R O」を用いた。本アルミシートの全反射率は95%以上であり拡散反射率は5%未満である。

10

【0070】

検出器筐体のアルミウム製反射板の位置に、実施例1で述べた半透明型中性子シンチレータを平行にそろって入射する中性子に対して45度傾けて配置、すなわち、断面が正方形の検出器筐体の対角位置に配置した。

【0071】

この検出器筐体の両側に、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を検出する2つの光電子増倍管を配置する。本実施例ではサイズが30mm x 30mmで長さが30mmの浜松ホトニクス製R11265-100を用いた。

20

【0072】

本実施例においては、2つの光電子増倍管から出力される信号を設定された時間幅で同時計数測定を行う際に、最初に、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号を高速増幅器で増幅した後足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力して、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出す。本実施例でこれから述べるデジタル信号処理にはFPGA (Field-Programmable Gate Array) 回路を用いる。FPGAとしてはアルテラ社製HD64F30488VTE25Vを用いた。高速増幅器としてはアナログ・デバイセズ社製オペアンプAD8007を使用しゲインは2倍に設定した。このトリガ信号を起点として、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号の波高を200MHzのサンプリング周波数でアナログ／デジタル変換器(ADC)を動作させサンプリング測定を行う。アナログ／デジタル変換器(ADC)としてはアナログ・デバイセズ社製AD9626を使用した。アナログ／デジタル変換された時系列データはFPGA内のメモリに記録する。ADCの変換ビット数は11ビットであり、半透明型中性子シンチレータから放出された中性子波形信号が11ビット(2048)内に収まるように光電子増倍管のバイアス電圧は-800Vに設定した。また、メモリへの記録時間は最大1μsとした。

30

【0073】

2つの光電子増倍管から出力された波形信号について、時系列データのサンプリング測定の終了後、記録された時系列データからデータを読み出し逐次比較することにより最大デジタル波高値とそのトリガ開始時間からの記録時間を求めた。求めた2つの光電子増倍管のデジタル波高値があらかじめ設定したデジタルしきい値以上であることをアンド回路により求めた。設定したデジタルしきい値は64であり、この設定値とする事により回路ノイズ等による雑音の影響をほとんどなくすることができた。また、中性子信号であることを確認するため、2つの光電子増倍管から出力された最大デジタル波高値を示したサンプリング収集時間の差が設定した同時計測時間幅内であるという条件でさらに中性子信号であることを確認し、中性子確定信号としてデジタル演算を行ったFPGAから出力した。同時計測時間としてはZnS:Ag, Cl蛍光体の短寿命成分が300nsであることを考慮して300nsとした。

40

【0074】

中性子線源としてAm-Li線源7.4GBqを用い、パラフィンブロック5cm厚で

50

熱中性子化して本検出器の検出効率の測定を行った。相対的な検出効率を得るため、1インチの外形で ^3He 圧力が4気圧の ^3He 比例計数管との比較試験を行った。

【0075】

^3He 比例計数管の計数率測定結果が272.5cpsであるのに対して、本検出器の計数率測定結果は285cpsであった。中性子に対する有感面積を ^3He 比例計数管に合わせて本検出器の相対検出効率を求めた結果、82.4%の効率であることが確認できた。

【0076】

実施例1における本発明の同じ検出器の相対検出効率に比較し、約12%相対検出効率が改善されている。この理由は、本方法を用いた場合にはADCによって波高値を監視しながら同時計測法を用いて確実に中性子信号として取り出すことができるため、信号の弁別レベルつまり波高のデジタルしきい値を従来の信号処理法に比較して実質的に下げることができたためと考えられる。

(実施例8)

【0077】

実施例8については、中性子がシンチレータに入射した際放出される蛍光を両側に配置した2つの光電子増倍管で検出し、それぞれ設定された積算時間の間の時系列データを積算し積算値として求め、両者があらかじめ設定した積算しきい値以上であり、そのサンプリング収集時間の差が同時計測時間幅内であるという条件を基に中性子信号を取り出すことを特徴とした中性子検出器あるいは中性子イメージ検出器について図17を参照して説明する。検出器としては実施例1で断面が正方形構造の検出器を用いる。

【0078】

検出器筐体としては、その断面の形を正方形とし、厚さ0.8mmのアルミニウム板で製作し、内径30mm x 30mm、長さは300mmのサイズとした。次に、外形寸法が30mm x 30mmで長さが250mmのアルミニウム製反射板を検出器内面の中心位置に配置した。反射板の厚さは0.3mmである。アルミニウム製反射板の材料としては、(株)マテリアルハウス製高反射率アルミシート「MIRO」を用いた。本アルミシートの全反射率は95%以上であり拡散反射率は5%未満である。

【0079】

検出器筐体のアルミウム製反射板の位置に、実施例1で述べた半透明型中性子シンチレータを平行にそろって入射する中性子に対して45度傾けて配置、すなわち、断面が正方形の検出器筐体の対角位置に配置した。

【0080】

この検出器筐体の両側に、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を検出する2つの光電子増倍管を配置する。本実施例ではサイズが30mm x 30mmで長さが30mmの浜松ホトニクス株式会社製R11265-100を用いた。バイアス電圧としては800Vを印加して使用した。

【0081】

本実施例においては、2つの光電子増倍管から出力される信号を設定された時間幅で同時計数測定を行う際に、最初に、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号を高速増幅器で増幅した後足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力して、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出す。本実施例でこれから述べるデジタル信号処理にはFPGA(Field-Programmable Gate Array)回路を用いる。FPGAとしてはアルテラ社製HD64F30488VTE25Vを用いた。高速増幅器としてはアナログ・デバイセズ社製オペアンプAD8007を使用しゲインは2倍に設定した。このトリガ信号を起点として、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号の波高を200MHzのサンプリング周波数でアナログ/デジタル変換器(ADC)を動作させサンプリング測定を行う。アナログ/デジタル変換器(ADC)としてはアナログ・デバイセズ社製AD9626を使用した。アナログ/デジタル変換された時系列データはFPGA内のメモリに記録する。ADCの変換ビット数は11ビットであり、半透明型中性子シンチレー

タから放出された中性子波形信号が11ビット(2048)内に収まるように光電子増倍管のバイアス電圧は800Vに設定した。また、メモリへの記録時間は最大1 μ sとした。

【0082】

2つの光電子増倍管から出力された波形信号について、時系列データのサンプリング測定の終了後、記録された時系列データからデータを読み出し逐次比較することにより最大デジタル波高値とそのトリガ開始時間からの記録時間を求めた。

【0083】

次に、記録された時系列データを最初から500ns分つまり100データ分を積分し、積分値が大きくなるため5ビット(32)で割り算し、実際には5ビットずらしてデータを読み出し実効積分値を求めた。5ビットずらすことにより実施例8で求めた最大デジタル波高値とほぼ同じレベルの値を波形データの平均値として得ることができる。

【0084】

求めた2つの光電子増倍管の実効積分値があらかじめ設定した積分しきい値以上であることをアンド回路により求めた。設定した積分しきい値は64であり、この設定値とする事により回路ノイズ等による雑音の影響をほとんどなくすることができた。また、中性子信号であることを確認するため、2つの光電子増倍管から出力された最大デジタル波高値を示したサンプリング収集時間の差が設定した同時計測時間幅内であるという条件でさらに中性子信号であることを確認し、中性子確定信号としてデジタル演算を行ったFPGAから出力した。同時計測時間としてはZnS:Ag, Cl蛍光体の短寿命成分が300nsであることを考慮して300nsとした。

【0085】

中性子線源としてAm-Li線源7.4GBqを用い、パラフィンブロック5cm厚で熱中性子化して本検出器の検出効率の測定を行った。相対的な検出効率を得るため、1インチの外径で³He圧力が4気圧の³He比例計数管との比較を行った。

【0086】

³He比例計数管の計数率測定結果が272.5cpsであるのに対して、本検出器の計数率測定結果は285cpsであった。中性子に対する有感面積を³He比例計数管に合わせて本検出器の相対検出効率を求めた結果、81.1%の効率であることが確認できた。実施例8とほぼ同等の相対検出効率を得ることが確認できた。

(実施例9)

【0087】

実施例9においては、ZnS蛍光体と¹⁰Bを含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータからの蛍光の時系列放出特性が中性子を検出した場合とバックグラウンドとなるガンマ線を検出した場合には異なることを利用して中性子／ガンマ線弁別を行う機能を有する中性子検出器について図18を用いて説明する。検出器としては実施例1で断面が正方形構造の検出器を用いる。

【0088】

最初に、半透明型中性子シンチレータに中性子が入射した場合放出される蛍光の時系列放出特性と共にガンマ線が入射した場合放出される蛍光の時系列放出特性を図19に示す。

【0089】

検出器筐体としては、その断面の形を正方形とし、厚さ0.8mmのアルミニウム板で製作し、内径30mm x 30mm、長さは300mmのサイズとした。次に、外形寸法が30mm x 30mmで長さが250mmのアルミニウム製反射板を検出器内面の中心位置に配置した。反射板の厚さは0.3mmである。アルミニウム製反射板の材料としては、(株)マテリアルハウス製高反射率アルミシート「MIRO」を用いた。本アルミシートの全反射率は95%以上であり拡散反射率は5%未満である。

【0090】

10

20

30

40

50

検出器筐体のアルミウム製反射板の位置に、実施例 1 で述べた半透明型中性子シンチレータを平行にそろって入射する中性子に対して 45 度傾けて配置、すなわち、断面が正方形の検出器筐体の対角位置に配置した。

【0091】

この検出器筐体の両側に、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を検出する 2 つの光電子増倍管を配置する。本実施例ではサイズが 30 mm x 30 mm で長さが 30 mm の浜松ホトニクス製 R 1 1 2 6 5 - 1 0 0 を用いた。

【0092】

本実施例においては、2 つの光電子増倍管から出力される信号を設定された時間幅で同時計数測定を行う際に、最初に、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号を高速増幅器で増幅した後足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力して、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出す。本実施例でこれから述べるデジタル信号処理には F P G A (Field-Programmable Gate Array) 回路を用いる。F P G A としてはアルテラ社製 H D 6 4 F 3 0 4 8 8 V T E 2 5 V を用いた。高速増幅器としてはアナログ・デバイセズ社製オペアンプを使用しゲインは 2 倍に設定した。このトリガ信号を起点として、2 つの光電子増倍管から出力された中性子信号の波高を 200 MHz のサンプリング周波数でアナログ／デジタル変換器 (A D C) を動作させサンプリング測定を行う。アナログ／デジタル変換器 (A D C) としてはアナログ・デバイセズ社製 A D 9 6 2 6 を使用した。アナログ／デジタル変換された時系列データは F P G A 内のメモリに記録する。A D C の変換ビット数は 11 ビットであり、半透明型中性子シンチレータから放出された中性子波形信号が 11 ビット (2048) 内に収まるように光電子増倍管のバイアス電圧は -800 V に設定した。また、メモリへの記録時間は最大 1 μ s とした。

【0093】

本実施例では、2 つの光電子増倍管から出力された波形信号について、時系列データのサンプリング測定の終了後、記録された時系列データを最初から 500 ns 分つまり 100 データ分を積分し前半部積算値 A とし、時系列データの後半部つまり 500 ns から 1000 ns までの 100 データ分を積分し後半部積算値 B として求める。その後、前半部積算値 A を後半部積算値 B で割り算した結果を中性子／ガンマ線弁別値 C として求める。この中性子／ガンマ線弁別値 C があらかじめ設定したガンマ線弁別しきい値 D 以上であるという条件を実施例 8 あるいは実施例 9 に追加して中性子信号を取り出す。

【0094】

中性子線源として A m - L i 線源 7 . 4 G B q を用い、パラフィンブロック 5 c m 厚で熱中性子化して本実施例の中性子／ガンマ線弁別機能の評価試験を行った。

【0095】

評価するため、最初に 1 μ s の間の前半部積算値 A と後半部積算値 B の積分時間の割合を変化して測定した。測定を行ったのは、前半部積算時間：後半部積算時間とし、300 ns ; 700 ns、500 ns : 500 ns、700 ns : 300 ns の 3 種類である。各 10000 サンプルの中性子信号波形について中性子／ガンマ線弁別値 C の頻度分布を図 20 から図 22 に示す。また、ガンマ線の場合にも ^{60}Co 線源を用いて同様の測定を行って中性子／ガンマ線弁別値 C を求め同じ図 20 から図 22 にプロットした。この結果より、300 ns ; 700 ns から 700 ns : 300 ns まであまり差がないが、500 ns : 500 ns が中性子／ガンマ線弁別でもっとも良い結果が得られることが確認できた。また、本実施例では中性子／ガンマ線弁別値 C を 4 . 2 に設定する。

【0096】

本実施例は Z n S 蛍光体と ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータを用いたが、Z n S / ^{6}LiF 半透明型中性子シンチレータを用いた場合には図 23 に示すように分離がかなり悪いことが確認された。このため、本発明を実施するには Z n S / $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 半透明型中性子シンチレータを用いた方が良いことが確認できた。

(実施例 10)

【0097】

本実施例10については、一定遅延時間を有する中性子入射タイミング信号を出力することを特徴した中性子検出器あるいは中性子イメージ検出器について図24を参照して説明する。検出器の例としては実施例8を参照する。

【0098】

検出器筐体としては、その断面の形を正方形とし、厚さ0.8mmのアルミニウム板で製作し、内径30mm x 30mm、長さは300mmのサイズとした。次に、外形寸法が30mm x 30mmで長さが250mmのアルミニウム製反射板を検出器内面の中心位置に配置した。反射板の厚さは0.3mmである。アルミニウム製反射板の材料としては、(株)マテリアルハウス製高反射率アルミシート「M I R O」を用いた。本アルミシートの全反射率は95%以上であり拡散反射率は5%未満である。

10

【0099】

検出器筐体のアルミウム製反射板の位置に、実施例1で述べた半透明型中性子シンチレータを平行にそろって入射する中性子に対して45度傾けて配置、すなわち、断面が正方形の検出器筐体の対角位置に配置した。

【0100】

この検出器筐体の両側に、中性子がこのシンチレータに入射した際放出される蛍光を検出する2つの光電子増倍管を配置する。本実施例ではサイズが30mm x 30mmで長さが30mmの浜松ホトニクス製R11265-100を用いた。バイアス電圧としては-800Vを印加して使用した。

20

【0101】

本実施例においては、2つの光電子増倍管から出力される信号を設定された時間幅で同時計数測定を行う際に、最初に、2つの光電子増倍管から出力された中性子信号を高速増幅器で増幅した後足し算回路で合成し、合成された信号を波高弁別回路に入力して、あらかじめ設定したレベル以上のトリガ信号を取り出す。

【0102】

得られたトリガ信号を起点として、サンプリング測定して記録し、その後記録されたメモリ内の時系列データを基に、同時計測処理、中性子／ガンマ線弁別処理、そして中性子入射位置の決定処理を行い、中性子確定信号あるいは中性子入射位置信号として取り出すまでにかかる最大の処理時間以上の一定の遅延時間をFPGAのクロックを基に作り出す。

30

【0103】

まず、サンプリング測定時間として1 μ sの時間がかかる。また、信号処理に最も時間がかかるのは中性子／ガンマ線の弁別処理であり、データの積算と最後の割り算により1 μ sの時間がかかる。このため、本実施例では遅延時間を2 μ sに設定する。

【0104】

本実施例では、200MHzのADCを使用し、AD変換されデータをFPGA内の内部メモリに記録するため、デジタル処理は処理に使用するFPGAの内部クロックは200MHzを使用する。

【0105】

このため、遅延時間の時間精度は5nsとなる。また、トリガーが信号を取り出す場合のタイムジッターとしては、本実施例と同じ光電子増倍管を用いた高速オシロスコープによる実験により図25に示すように5ns以下であることが確認されているため両者を合わせた中性子入射時間の時間精度は10nsが得られる。

40

【0106】

この遅延時間を用いて、トリガ信号が出た後この遅延時間2 μ sの間常にどの中性子信号も遅延し、本実施例の目的である中性子入射タイミング信号を出力する。これにより、信号処理時間の変動によるタイミング信号のジッターを回避することができる。

(実施例11)

【0107】

本実施例11においては、光電子増倍管にガンマ線が入射し光電面と反応し放出される

50

信号波形の波形寿命が 30 ns 以下であることをもとに、ガンマ線入射によるデッドタイムの影響を軽減する中性子検出器および中性子イメージ検出器について図 26 をもとに説明する。検出器としては実施例 11 を用いる。

【0108】

光電子増倍管としては浜松ホトニクス製 R11265-100 を用いる。本光電子増倍管のバイアス電圧 800 V を印加し、その前面にガンマ線源として強度 1 MBq の ^{60}Co を密着させた。放射線量としては放射線モニタで測定すると密着させた場合約 $25\text{ }\mu\text{Sv}$ を示した。出力された信号波形を図 27 に示す。信号の半値幅は 15 ns であり 10 分の 1 幅でも 30 ns と極めて短いことがわかる。また、出力電圧の頻度分布を図 28 に示す。出力電圧の中心は 0.1 V でほぼ一定の電圧を出力していることが分かった。計数率は 2 時間の測定で 70 カウントが得られたことから約 0.01 cps であった。

【0109】

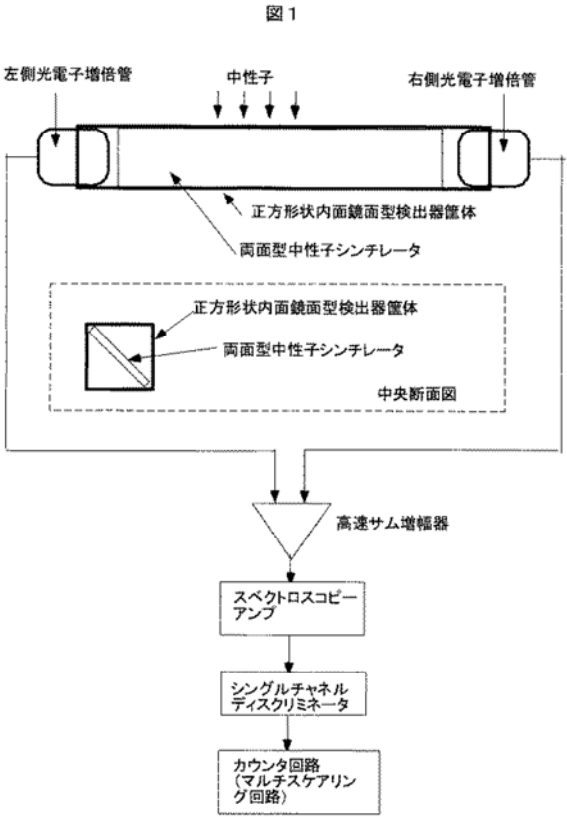
本実施例においては、 2 つの光電子増倍管を用いていることから偶然にガンマ線が同時に 2 つの光電子増倍管に入射し信号出力することが少ないことを利用し、かつ ZnS 蛍光体と ^6Li あるいは ^{10}B を含む中性子コンバータから構成される板状で両面から蛍光が放出可能とした構造の半透明型中性子シンチレータからの蛍光の時系列放出特性と異なることを利用する。記録されたメモリの時系列データ 100 ns を基に、記録を始めたところから 30 ns の間にあらかじめ設定した光電子増倍管入射ガンマ線しきい値以上の信号が入射しかつ記録をはじめてから 50 ns から 100 ns にあらかじめ定めた下限設定値以上の信号がない場合をガンマ線光電面信号と確定する。この信号を検知した場合、ガンマ線が入射し反応した光電子増倍管と反対側の光電子増倍管の時系列データ内にあらかじめ設定した信号下限値以上の信号がないことを確認した後、サンプリング測定をキャンセルして中性子入射を待つ機能を持つ回路を付加することによりガンマ線入射によるデッドタイムの影響を軽減できる。

【符号の説明】

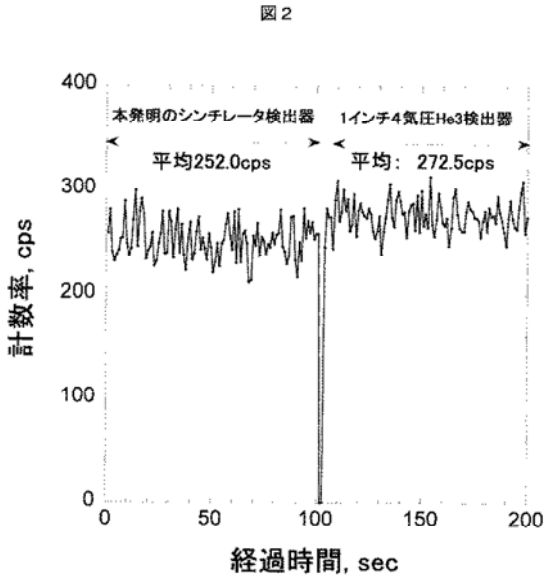
【0110】

なし。

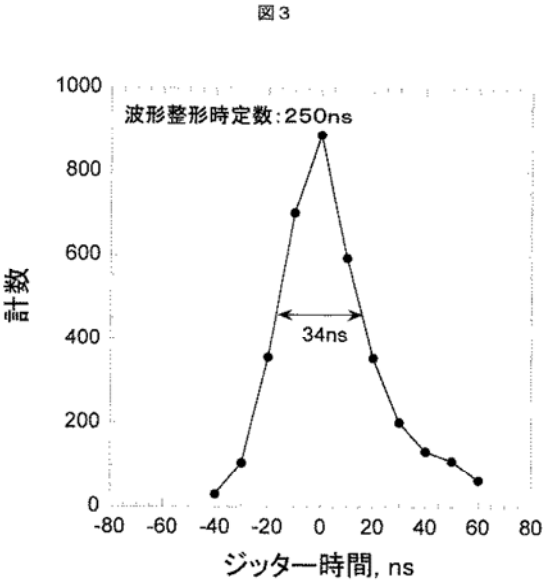
【図 1】



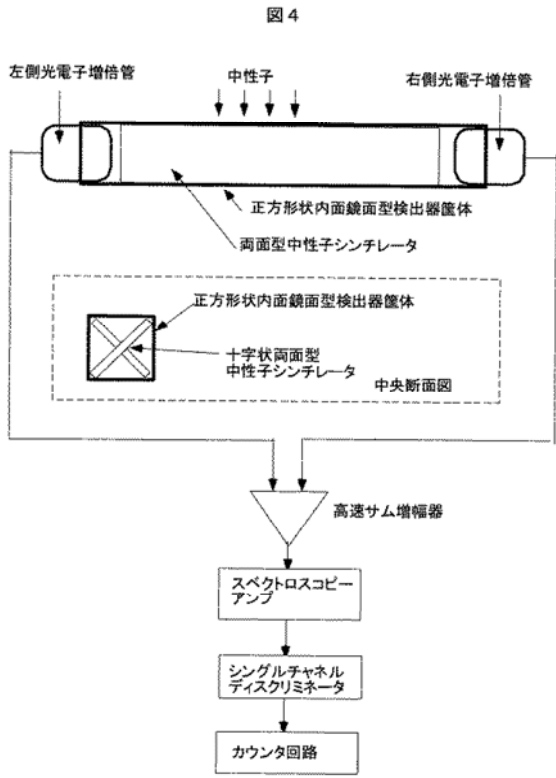
【図 2】



【図 3】

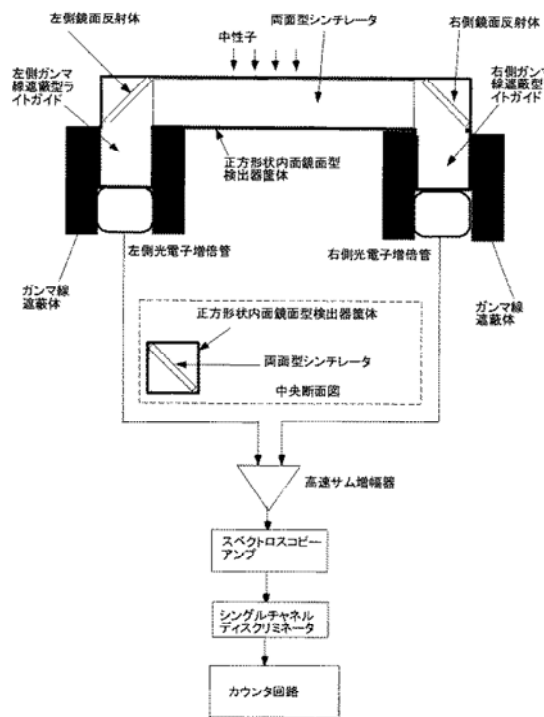


【図 4】



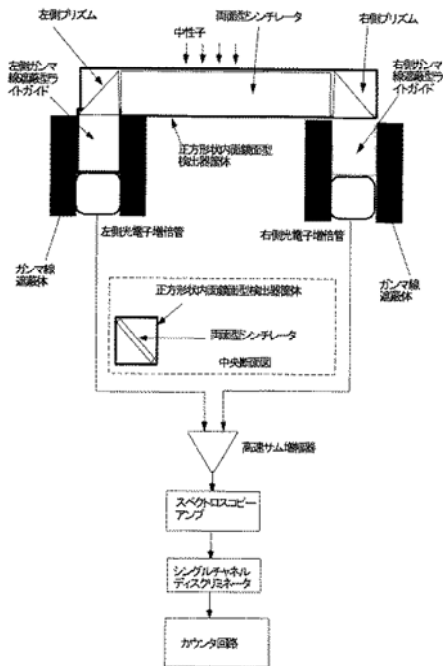
【図 5】

図 5



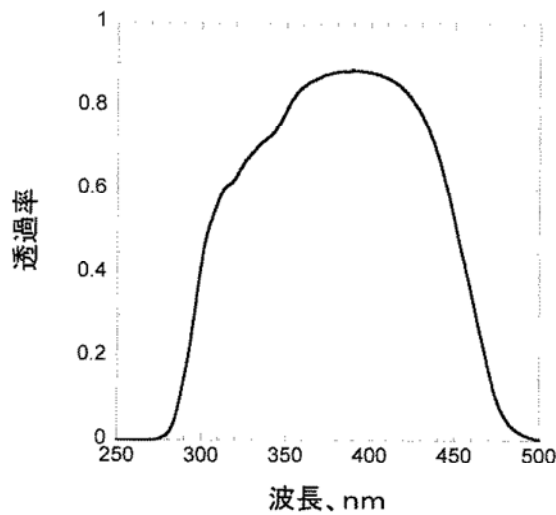
【図 6】

図 6



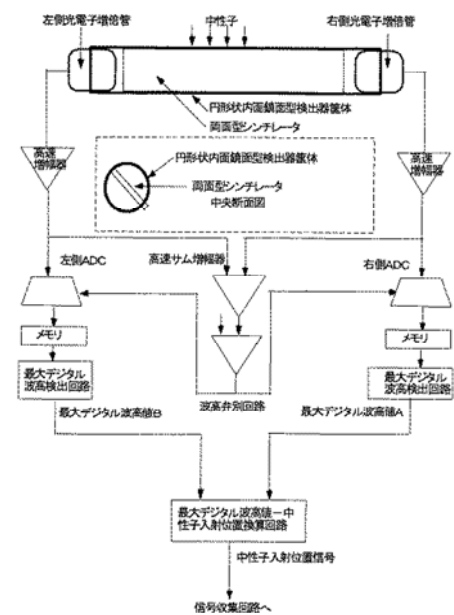
【図 7】

図 7



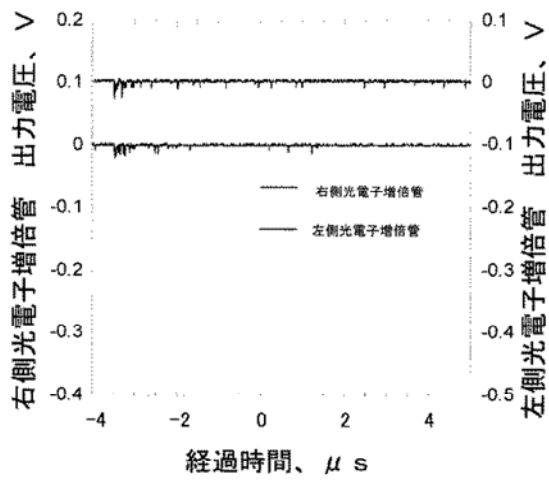
【図 8】

図 8



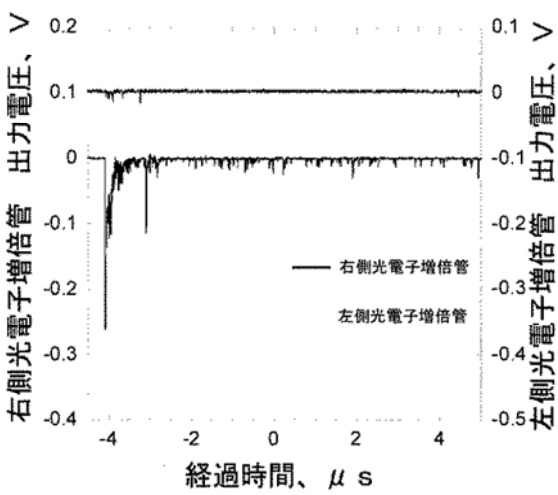
【図 9】

図 9



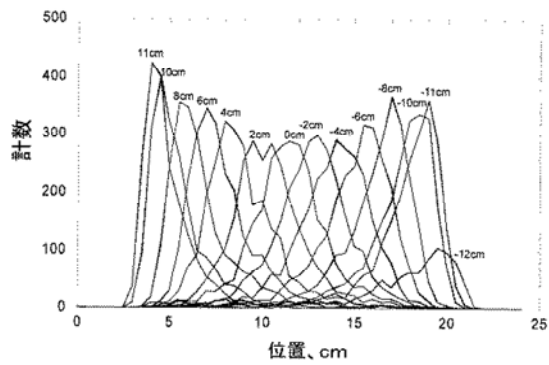
【図 10】

図 10



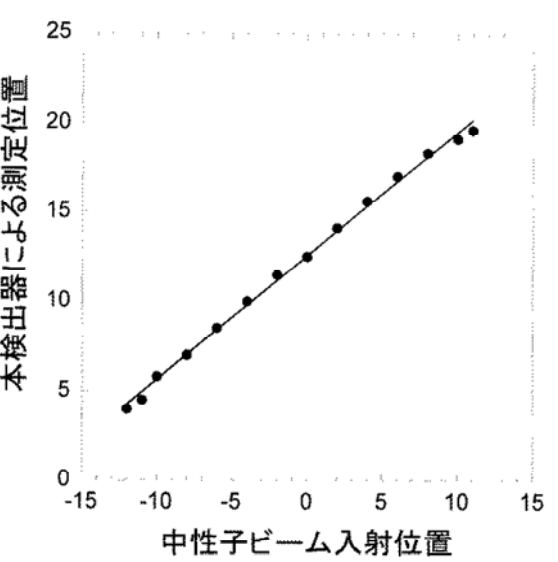
【図 11】

図 11



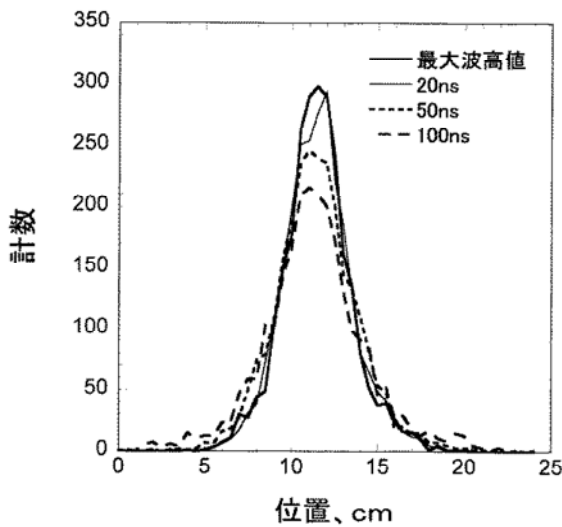
【図 12】

図 12



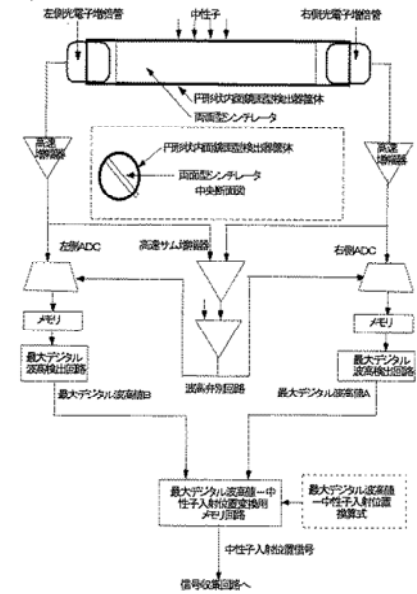
【図 1 3】

図 1 3



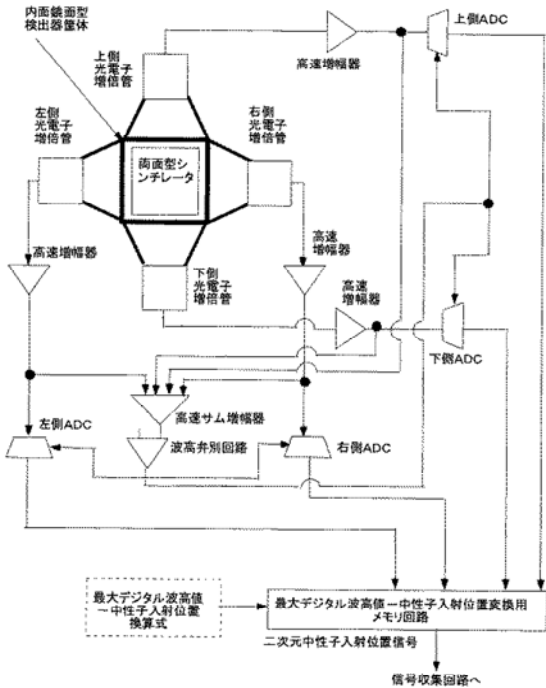
【図 1 4】

図 1 4



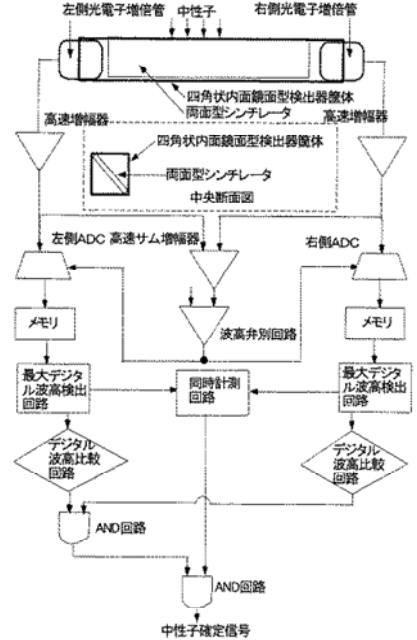
【図 1 5】

図 1 5



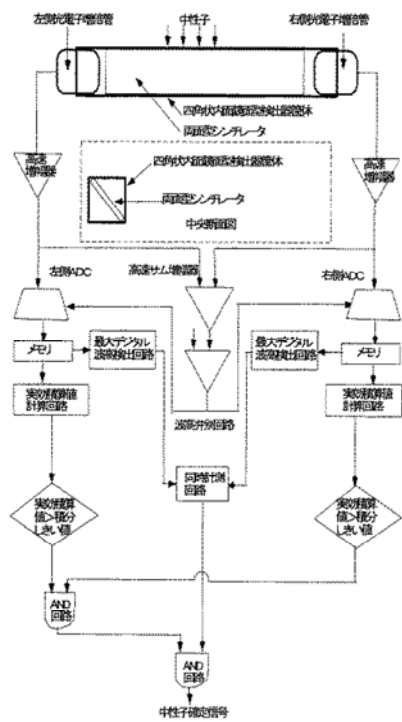
【図 1 6】

図 1 6



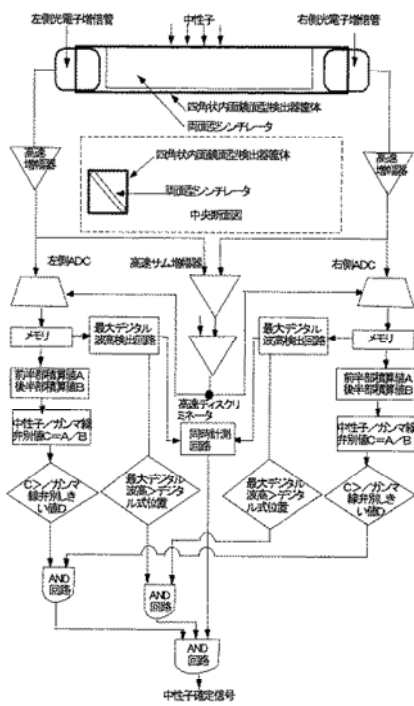
【図 17】

図 17



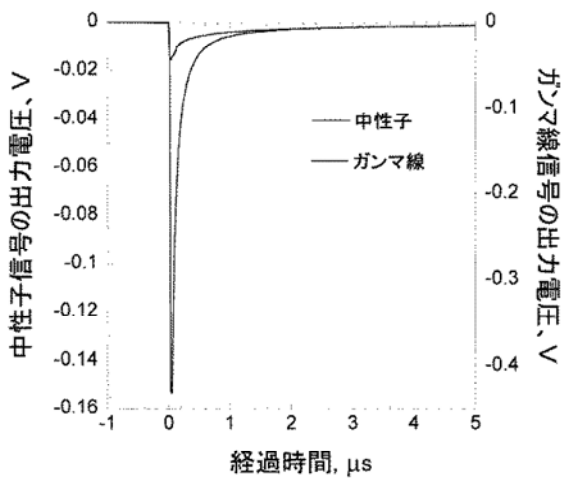
【図 18】

図 18



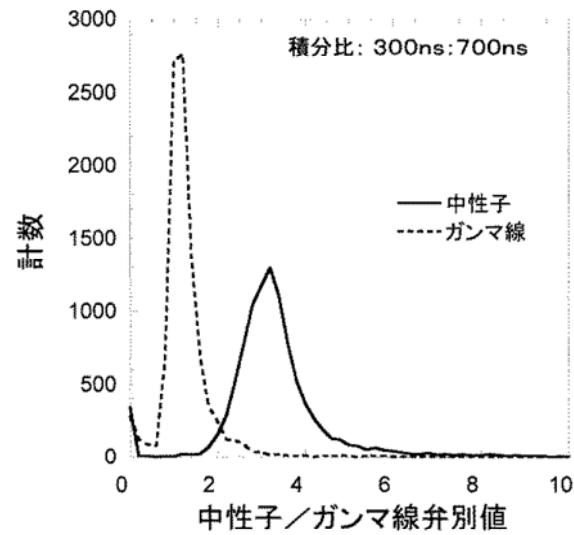
【図 19】

図 19

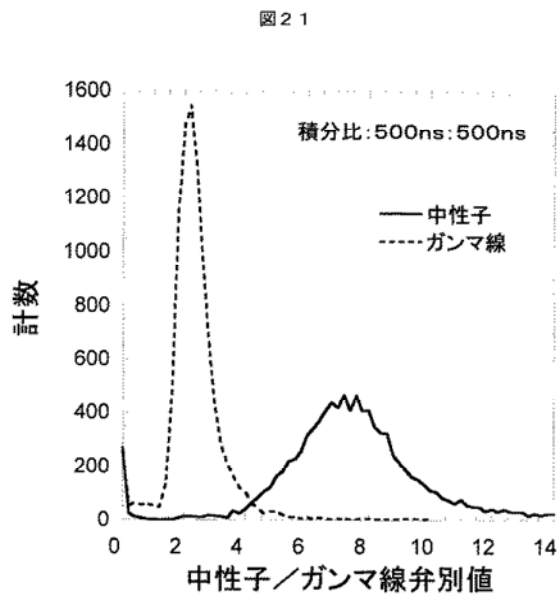


【図 20】

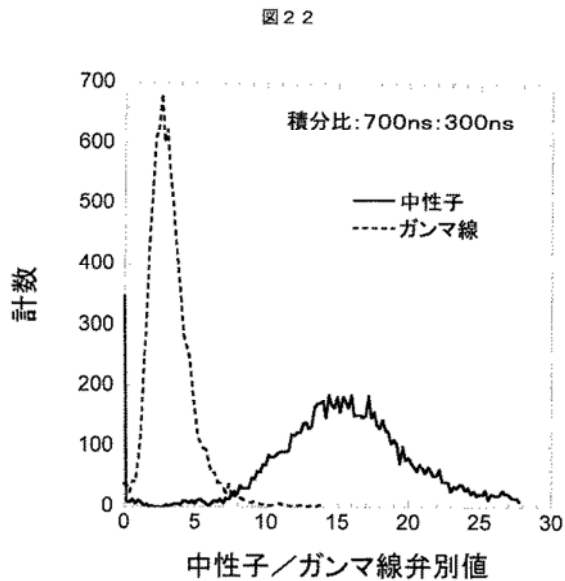
図 20



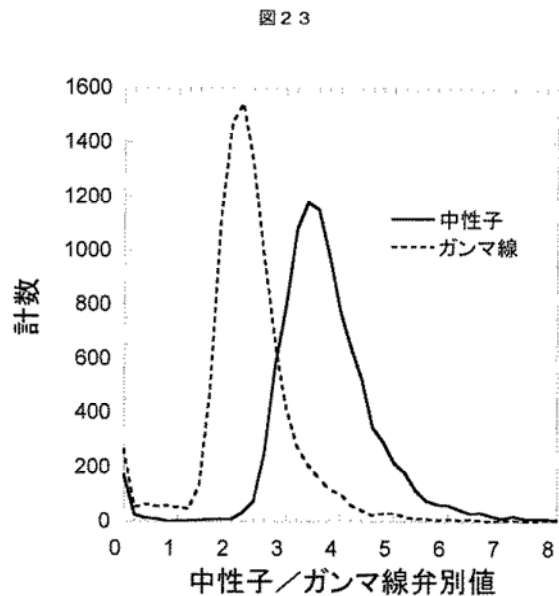
【図 2 1】



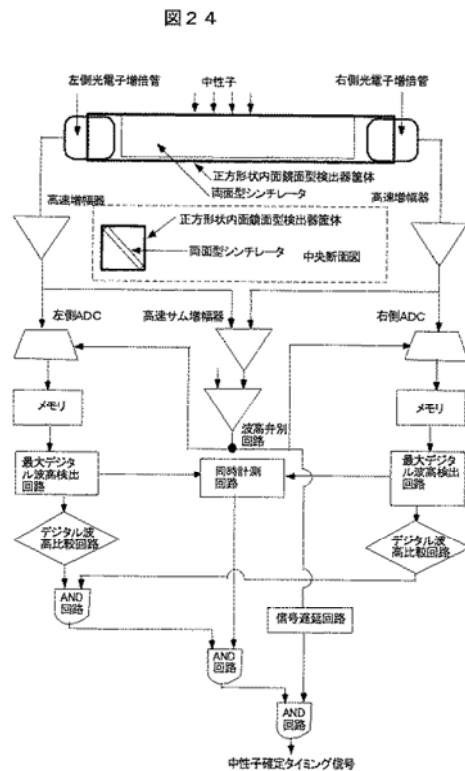
【図 2 2】



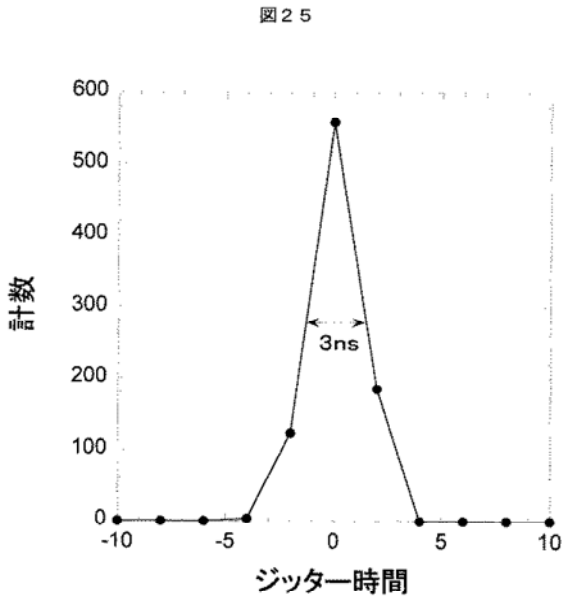
【図 2 3】



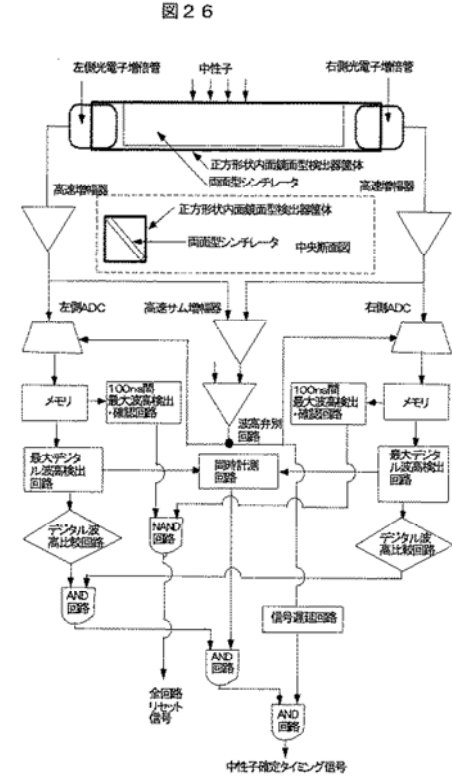
【図 2 4】



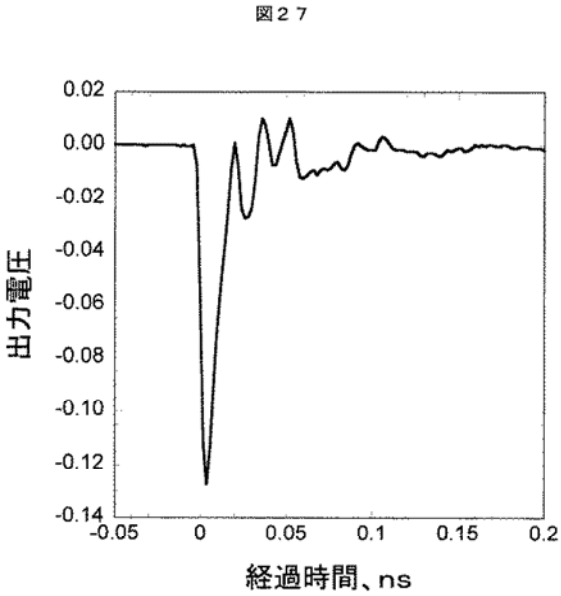
【図 2 5】



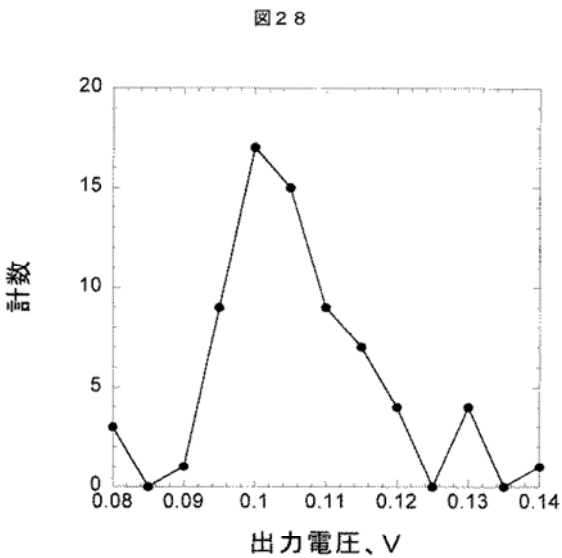
【図 2 6】



【図 2 7】



【図 2 8】



-

フロントページの続き

- (72)発明者 中村 龍也
茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 独立行政法人日本原子力研究開発
機構 東海研究開発センター原子力科学研究所内
- (72)発明者 片桐 政樹
茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 独立行政法人日本原子力研究開発
機構 東海研究開発センター原子力科学研究所内
- (72)発明者 海老根 守澄
茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 独立行政法人日本原子力研究開発
機構 東海研究開発センター原子力科学研究所内
- (72)発明者 美留町 厚
茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 独立行政法人日本原子力研究開発
機構 東海研究開発センター原子力科学研究所内
- (72)発明者 大図 章
茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 独立行政法人日本原子力研究開発
機構 東海研究開発センター原子力科学研究所内
- (72)発明者 寄林 豊
神奈川県川崎市宮前区宮前平3-9-12 株式会社豊伸電子内
- (72)発明者 筒井 紀彰
埼玉県秩父郡小鹿野町小鹿野755-1 株式会社秩父富士内

審査官 青木 洋平

- (56)参考文献 特開2003-248061 (JP, A)
特開2008-111677 (JP, A)
特開昭61-031984 (JP, A)
特開昭61-262675 (JP, A)
特開昭63-148189 (JP, A)
米国特許第05298756 (US, A)
特開2005-300479 (JP, A)
特開昭59-044678 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01T1/00-1/16、1/167-7/12