

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年1月25日(25.01.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/016492 A1

(51) 国際特許分類:

G01T 1/17 (2006.01)

A61N 5/10 (2006.01)

G01T 1/20 (2006.01)

G01T 1/202 (2006.01)

G01T 3/06 (2006.01)

(21) 国際出願番号:

PCT/JP2017/025982

(22) 国際出願日:

2017年7月18日(18.07.2017)

(25) 国際出願の言語:

日本語

(26) 国際公開の言語:

日本語

(30) 優先権データ:

特願 2016-144371 2016年7月22日(22.07.2016) JP

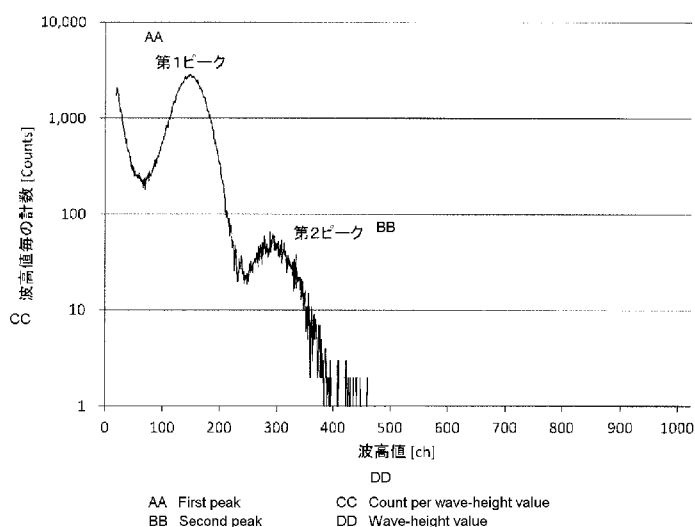
(71) 出願人: 株式会社 トクヤマ (TOKUYAMA CORPORATION) [JP/JP]; 〒7458648 山口県周南市御影町1番1号 Yamaguchi (JP).

(72) 発明者: 油谷 真人 (ABURATANI, Makoto); 〒7458648 山口県周南市御影町1番1号 株式会社 トクヤマ 内 Yamaguchi (JP). 福田 健太郎 (FUKUDA, Kentaro); 〒7458648 山口県周南市御影町1番1号 株式会社 トクヤマ 内 Yamaguchi (JP).

(74) 代理人: 前田・鈴木国際特許業務法人 (MAEDA & SUZUKI); 〒1010003 東京都千代田区一ツ橋2丁目5番5号 岩波書店一ツ橋ビル8階 Tokyo (JP).

(54) Title: COUNTING METHOD AND RADIATION DETECTION APPARATUS

(54) 発明の名称: 計数方法および放射線検出装置



(57) Abstract: [Problem] To provide a counting method for accurately counting radiative rays, etc., over a wide range from the state of a low counting rate to the state of a high counting rate. [Solution] Provided are: a method for setting a wave-height discriminating threshold value, and counting the frequency of signals exceeding the wave-height discriminating threshold value, wherein, when a counting objective component shows a peak in a wave-height distribution spectrum, an arbitrarily defined value selected from the range of $(\mu - 0.4\sigma)$ to $(\mu + 0.6\sigma)$ is set as the wave-height discriminating threshold value, where σ represents the standard deviation and μ represents the average wave-height value obtained by fitting a Gaussian function for the peak; and a radiation detection apparatus which processes signals by using the counting method. The counting method and the radiation detection apparatus according to the present invention enable reduction of an error given to a count value due to pile-up, and enable accurate counting of radiative rays, etc., over a wide range from the state of a low radiation dosage rate to the state of a high radiation dosage rate.



(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

(57) 要約: 【課題】 計数率が低い状況から高い状況まで広い範囲にわたって精度良く放射線等を計数する計数方法を提供する。【解決手段】 波高弁別閾値を設定し、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、計数の目的成分が波高分布スペクトルでピークを示す場合において、前記ピークについてガウス関数をフィッティングして求められ得る平均波高値を μ 、標準偏差を σ とした際に、 $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値を前記波高弁別閾値とする計数方法であり、また、当該計数方法により信号処理する放射線検出装置である。本発明の計数方法および放射線検出装置によれば、パイルアップが計数値に与える誤差を小さくすることが可能であり、放射線線量率が低い状況から高い状況まで広い範囲にわたって精度良く放射線等を計数することが可能である。

明 細 書

発明の名称： 計数方法および放射線検出装置

技術分野

[0001] 本発明は、放射線等の計数方法および放射線検出装置に関する。詳しくは、高計数率条件下でも精度良く放射線等を計数する方法および放射線検出装置に関する。

背景技術

[0002] シンチレータや半導体などの放射線検出素子と波高弁別回路を組み合わせた放射線検出装置では、放射線検出素子が検出した放射線のエネルギーに対応したパルス信号を得てその波高値を読み取り、当該波高値が波高弁別閾値を超えたパルス信号を計数することにより線量率を求める方法が広く一般に行われている。

[0003] 例えば、中性子線の線量率を求める中性子検出装置の場合には、バックグラウンドノイズとなる γ 線を計数しない波高値を波高弁別閾値とする必要がある。波高弁別閾値を最適化する方法としては、特許文献1に記載されたように、波高分布スペクトルで示されたピークについてガウス関数をフィッティングして求められる μ （波高値の平均値）および σ （波高値の標準偏差）を基準として設定する方法がある。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：国際公開2014／192321

特許文献2：特許第5611357号

特許文献3：特開2015－227854

特許文献4：特開2012－136667

特許文献5：特開2013－167467

特許文献6：国際公開2015／128905

特許文献7：特表2001－524217

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0005] 例えば、がんの放射線治療において放射線検出素子が曝される環境は、非常に高い放射線線量率となる場合がある。このような高線量率環境においては、特許文献2や特許文献3に記載されたように、或るパルスの測定直後に次のパルスが入射すること（所謂パイルアップ現象）により信号波形が重なってしまっていて計数ロスを起こし、計数精度が低下する問題がある。
- [0006] 特許文献2や特許文献3では、AD変換器によりパルスをデジタル化させ、パイルアップした複数のパルスを分離して計数すると共に、ベースライン変動による波高値の変化を補正する方法が開示されている。しかし、実施の形態によってはパイルアップした複数のパルスを分離できず、計数ロスする場合があった。2つのパルス（2回の放射線検出事象）が1つのパルス（1回の放射線検出事象）として処理された放射線検出事象がある場合の波高分布スペクトルは、例えば図1のようになり、第1ピークの約2倍の波高値に第2ピークが観測される。なお、パイルアップが無い状態の波高分布スペクトルは図2に示したように第2ピークが観測されない。
- [0007] そして、さらにパイルアップの頻度が増える場合（線量率がより高かったり、検出素子の感度がより高かったりする場合）には、3つのパルスを1つのパルスとして処理してしまう放射線検出事象の存在によって、図3の波高分布スペクトルのように、第1ピークの約3倍の波高値に第3ピークが観測されることもあった。
- [0008] このように複数のパルスが1つのパルスとして処理されると、計数ロスを生じて計数精度が低下してしまう。そのため、放射線検出素子の小型化などによって放射線検出感度を下げて、パイルアップの頻度を減らす必要がある。しかし、放射線検出感度を下げることによって他の問題を生じることもあるため、多方面からのアプローチが必要となる。
- [0009] 1つとしては、特許文献4に記載されたように、パルスの減衰時間（蛍光寿命）が短い放射線検出素子を用いることである。

[0010] 1つとしては、パルスの減衰時間が短くなるように回路構成を工夫することである（例えば、時定数が短い増幅器（アンプ）を用いたり、微分回路を用いたりする）。

[0011] 1つとしては、A/D変換器を高速化して、デジタルデータのサンプリング点を増やすことである。

[0012] しかしながら、このようなアプローチによっても、パイルアップによって計数精度が低下する問題を解決できない場合もあった。

課題を解決するための手段

[0013] 上記課題に鑑み、本発明者らは鋭意検討を行い、上述のアプローチとは全く異なる方法、すなわち波高弁別閾値の最適化によって、パイルアップによる計数精度の低下を抑制できることを見出し、本発明を完成するに至った。

[0014] 即ち本発明は、波高弁別閾値を設定し、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、計数の目的成分が波高分布スペクトルでピークを示す場合において、前記ピークについてガウス関数をフィッティングして求められ得る平均波高値を μ 、標準偏差を σ とした際に、 $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値を前記波高弁別閾値とすることを特徴とする計数方法および放射線検出装置である。

発明の効果

[0015] 本発明によれば、波高弁別閾値を最適化するという簡略な方法によって、パイルアップによる計数精度の低下を抑制でき、放射線計数率が低い状況から高い状況まで広い範囲にわたって精度良く放射線を計数することが可能である。また、回路の簡略化や解析時間の短縮等も可能になる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1] Eu : LiCaAlF₆結晶を用いた中性子検出装置によって加速器中性子を計数した際に得られた波高分布スペクトル（中計数率条件）。

[図2] Eu : LiCaAlF₆結晶を用いた中性子検出装置によって加速器中性子を計数した際に得られた波高分布スペクトル（低計数率条件）。

[図3] Eu : LiCaAlF₆結晶を用いた中性子検出装置によって加速器中

性を計数した際に得られた波高分布スペクトル（高計数率条件）。

[図4]本発明の放射線検出装置の概略図。

[図5]パイルアップが与える影響を説明するための信号波形図。

[図6]波高分布スペクトルの生成方法を説明する図（シミュレーション）。

[図7]パイルアップした場合に示される波高分布スペクトル（シミュレーション）。

[図8]パイルアップした場合に示される波高分布スペクトルについて解析した波高弁別閾値以上の計数値（シミュレーション）。

[図9]パイルアップが計数値に与える誤差のシミュレーション結果。

[図10]実施例1において最もパイルアップした状況における計数誤差の実測値とシミュレーション値の比較。

[図11]波高弁別閾値を μ 付近に設定することによりパイルアップが計数値に与える誤差を小さくできることを説明する図。

[図12]実施例で用いた中性子検出装置の概略図。

[図13]実施例1で得られた中性子計数率および加速器電流値の時系列グラフ。

[図14]実施例1における加速器電流値と中性子計数率の関係を示すグラフ。

[図15]比較例1で得られた中性子計数率および加速器電流値の時系列グラフ。

[図16]比較例1における加速器電流値と中性子計数率の関係を示すグラフ。

[図17]比較例2で得られた中性子計数率および加速器電流値の時系列グラフ。

[図18]比較例2における加速器電流値と中性子計数率の関係を示すグラフ。

発明を実施するための形態

[0017] 本発明を実施するための装置の一例である放射線検出装置の概略図を図4に示す。図4（a）に示すように、放射線検出装置は、放射線の入射によってパルス状の電気信号を出力する放射線検出素子1と波高弁別回路2とを備える。シンチレータのように、直接電気信号を出力せず放射線の入射によっ

て光を発する媒体を用いる場合は、図4（b）に示すように、当該シンチレータ3と、シンチレータ3の発する光を電気信号へ変換させる光検出器4とを組み合わせることによって、放射線検出素子1とすることができる。シンチレータの発する光を電気信号へ変換させる光検出器4として、光電子増倍管、フォトダイオード、アバランシェフォトダイオード、ガイガーモードアバランシェフォトダイオード等の光検出器が一般的に用いられる。

[0018] 波高弁別回路2は、放射線検出素子1から出力されるパルスの波高値を解析し、波高弁別閾値を超えたパルス进行数できるものであれば良く、パルスをアナログデータ処理によって読み取るものと、パルスをデジタルデータ処理によって読み取るものと、どちらにおいても本発明を適用できる。

[0019] 本発明の実施例で用いた波高弁別回路2は、増幅器（アナログアンプ）、A/D変換器、デジタルデータ処理装置、表示装置などで構成された、デジタルデータ処理によってパルスを読み取るものである。以下、デジタルデータ処理によってパルスを読み取る装置を例として記述する。

[0020] 前記の実施形態によれば、放射線検出素子1が放射線を検出した際に発するパルスはアナログアンプにより時間軸に沿って拡大して増幅され、増幅されたパルス信号はA/D変換器によって或る一定のサンプリング間隔でデジタルデータに変換され、当該デジタルデータをデジタルデータ処理装置によって読み取る。そして、コンピュータ、ソフトウェア、表示モニタなどで構成される表示装置に、波高分布スペクトルや波高弁別閾値を超えた計数值などが表示される。

[0021] 図5は、パイルアップの影響を概念的に説明するためのアナログアンプによって増幅されたパルスの信号波形図であり、図中の各点は、実線で示したアナログ信号上に一定時間間隔でデジタル化させた場合に得られる離散値を示している。

[0022] 図5（a）は、パイルアップしていない場合である。この場合、デジタルデータ処理装置は、「波高値（Pulse Height）Hに相当する事象が2回」として計数する。

[0023] 一方、図5 (b) は、パイルアップした場合である。本来は「波高値Hに相当する事象が3回」と計数されるべきところだが、第1パルスの直後に別の放射線が入射して第2パルスが立ち上がっており、デジタルデータの離散値で見ると信号値が上昇し続けているため、第1パルスと第2パルスは分離して認識されず、「H'」（ $\approx 2H$ ）に相当する事象が1回」と計数される。すなわち、2回と計数されるべき信号が、1回としか計数されていないことになる。この現象を計数ロスと呼ぶ。

[0024] また、第1パルスと第2パルスとがパイルアップしたパルスがベースラインに戻る前に第3パルスが立ち上がる。すなわち、第3パルスは、アナログ信号が極小値を取った後に立ち上がる。波高値を算出する際には、極小値の直前の離散値を基礎とするため、見掛け上ベースラインのシフトによって第3パルスは「H'」（ $< H$ ）に相当する事象が1回」と計数される。この現象を波高値の小値化と呼ぶ。本発明が解決しようとする問題は、第1パルスと第2パルスについて生じる計数ロスである。以降の説明では、便宜上、図5 (b) のように第1パルスと第2パルスとが重畳し、複数のパルスに分離して計数できなかった場合をパイルアップしたとして取り扱い、第3パルスのように直前のパルスから分離して計数できたものはパイルアップしていないものとして取り扱う。なお、第3パルスについて波高値が小値化する問題は、計数ロスを招くこともある。すなわち波高弁別閾値を超える波高値として処理されるべきパルスが、波高弁別閾値未満の波高値まで小値化してしまうと計数ロスとなる。この計数ロスについては、後述するガウスフィッティングを活用し、波高値の小値化に合わせて波高弁別閾値を調整することによっても計数ロスを軽減できる。

[0025] 上述のパイルアップが計数値に与える誤差をシミュレーションするため、まず、パイルアップしていない場合と、パイルアップしている場合との、それぞれで示される波高分布スペクトルを、下記式(1)のガウス関数を用いて近似した。式(1)のガウス関数における最大計数Nは、平均波高値 μ において示される計数である。 x は任意の波高値を示し、 σ は標準偏差である

。波高分布スペクトルの近似方法を説明する図を図6に示す。

[0026] [数1]

$$G(\chi) = N \exp \left\{ -\frac{(\chi - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1)$$

図2で示したパイルアップが無い状態の波高分布ピークの平均波高値 μ および標準偏差 σ を参考に、パイルアップしていない第1ピークの μ および σ をそれぞれ $\mu_1 = 200 \text{ ch}$ 、 $\sigma_1 = 26 \text{ ch}$ とした。2個のパルスがパイルアップして現れる第2ピークは $\mu_2 = 400 \text{ ch}$ 、 $\sigma_2 = 52 \text{ ch}$ 、3個のパルスがパイルアップして現れる第3ピークは $\mu_3 = 600 \text{ ch}$ 、 $\sigma_3 = 78 \text{ ch}$ とした。式(1)を用いた独立したデータとして第1～第3ピークを生成した後、波高値毎に計数を足し合わせて1つの波高分布スペクトルとしている。なお、図1～図3の波高分布スペクトルのように、実際に計測されるスペクトルでは、計数の目的成分とは異なる放射線種によって低波高値側にノイズ成分が観測され目的成分のピークと一部重なる場合もある。しかし、本シミュレーションでこのようなノイズ成分を考慮する必要はない。

[0027] パイルアップ率を0%、10%、20%、30%として、前述の方法で生成した波高分布スペクトルを図7に示す。パイルアップ率0%の波高分布スペクトルは、第1ピークしか持たないデータである。各波高分布スペクトルの0～1023 chまでの合計計数は、第2ピークの計数を2倍、第3ピークの計数を3倍として計算すれば一致するようにしている。なお、パイルアップ率とは、パルスが重畳して分離できない割合である。具体的には、100個のパルスの内、2個が重畳し1つの信号として処理される場合には、パイルアップ率は2%となる。100個のパルスの内、30個が重畳し、2パルスが重畳した信号や、3パルスが重畳した信号が生成する場合には、パイルアップ率は30%となる。つまり、パルスが重畳した信号に含まれるパルスの割合をパイルアップ率と呼ぶ。

[0028] 次に、波高弁別閾値 (Threshold) を $\mu + X\sigma$ とし、 X を $-3 \sim$

+3の範囲で変化させた場合の波高弁別閾値以上の計数を波高分布スペクトルから求めた。その結果を図8に示す。さらに、図8の結果から、パイルアップ0%の場合の波高弁別閾値以上の計数に対するパイルアップ率10%、20%、30%の計数誤差をそれぞれ求めた。ここで計数誤差は、パイルアップ率0%、波高弁別閾値 $\mu + X\sigma$ の場合の計数を C_0 、パイルアップ率Y%、波高弁別閾値 $\mu + X\sigma$ の場合の計数を C_Y とした際に、 $100 \times (C_Y - C_0) / C_0$ により求められる。その結果を図9に示す。これら図8および図9の結果から、Xが小さいほど計数ロスによるマイナスの誤差が大きくなり、Xが大きいほど過剰な計数によるプラスの誤差が大きくなるが、 μ に近い波高弁別閾値（すなわち $X = 0$ 付近）ではパイルアップによる計数誤差を生じ難いことが解る。

[0029] また、最適な波高弁別閾値を実測値に基づいて設定するため、後述の実施例1について、最もパイルアップしていない状況（加速器電流は $5.7 \mu A$ 、波高分布スペクトルは図2）に対する、最もパイルアップしている状況（加速器電流は $379.6 \mu A$ 、波高分布スペクトルは図3）の計数誤差を解析した。図2及び図3のそれぞれの第1ピークについて、ガウス関数をフィッティングして μ 及び σ を求め、得られた μ 及び σ を基に波高弁別閾値 $\mu + X\sigma$ を設定し、前記シミュレーションと同様の方法で計数誤差を求めた結果を図10に示す。ただし、図2および図3の波高分布スペクトルを得た際の線量率差を考慮する必要があるため、線量率差は加速器電流差と同じ傾向を示すものと見做し、図2および図3の計数を各加速器電流値によって規格化した。また、図3の波高分布スペクトルの解析により、該波高分布スペクトルのパイルアップ率は25%程度であることが判った。図10には、パイルアップ率を25%とした場合の計数誤差のシミュレーション値を併せて示す。

[0030] 図10に示したパイルアップによる計数誤差は、シミュレーションと実測で多少のずれが生じている。これは、シミュレーションではパイルアップによる波高値の小値化を考慮していないのに対し、実測ではパイルアップによ

る波高値の小値化が生じているためと考えられる。このように、シミュレーションと実測では多少のずれを生じるものの、実測においても、 μ に近い波高弁別閾値（すなわち $X=0$ 付近）はパイルアップによる計数ロスの影響を受け難いことが解る。また、実測において波高値の小値化が生じる場合には、波高弁別閾値を μ よりもやや高めに設定することが最適であることが分かる。

[0031] ここで、図11を用いて、波高弁別閾値を μ 付近に設定することによってパイルアップによる計数誤差を小さくできる原理を説明する。

[0032] まず、図11(a)を用いて、パルス2個のパイルアップのみを考慮して説明する。パイルアップしていない第1ピークの合計計数を N_s 、パルス2個がパイルアップした第2ピークの合計計数を N_d とした場合、放射線検出素子が検出した放射線の数 $N_s + 2N_d$ であることが理論的に言える。

[0033] ここで、一般には、全ての事象を計数できるように例えば T_1 の辺りに閾値を設定する。 T_1 を波高弁別閾値とした場合に得られる閾値以上の計数は $N_s + N_d$ となり、理論値 $N_s + 2N_d$ と比較すると N_d のマイナス誤差を生じ、特にパイルアップが顕著に生じて N_d が増大すると、計数誤差も甚大となる。これに対して、本発明の計数方法は、第1ピークの μ の近傍に波高弁別閾値を設定することによって、計数誤差を低減することを特徴とする。例えば、第1ピークの μ を波高弁別閾値(T_2)とした場合に得られる閾値以上の計数は $1/2 N_s + N_d$ となり、理論値 $N_s + 2N_d$ と比較するとちょうど半分を計数することになる。換言すれば、第1ピークの μ を波高弁別閾値として得られた計数を2倍すれば、理論値通りの計数を得ることができる。このとき、上記第1ピークの μ を波高弁別閾値として得られる計数は、パイルアップの程度にかかわらず、常に理論値の半分であるため、本発明の計数方法によれば、パイルアップによる計数誤差を生じない。

[0034] 次に、図11(b)を用いて、パルス2個のパイルアップとパルス3個のパイルアップを考慮して説明する。パイルアップしていない第1ピークの合計計数を N_s 、パルス2個がパイルアップした第2ピークの合計計数を N_d 、

パルス 3 個がパイルアップした第 3 ピークの合計計数を N_t とした場合、放射線検出素子が検出した放射線の数 $N_s + 2 N_d + 3 N_t$ であることが理論的に言える。全ての事象を計数できる T_1 を波高弁別閾値とした場合に得られる閾値以上の計数は $N_s + N_d + N_t$ となり、理論値 $N_s + 2 N_d + 3 N_t$ と比較すると $N_d + 2 N_t$ のマイナス誤差を生じてしまう。一方、第 1 ピークの μ を波高弁別閾値 (T_2) とした場合に得られる閾値以上の計数は $1/2 N_s + N_d + N_t$ となる。理論値の半分の値である $1/2 N_s + N_d + 3/2 N_t$ と比較すると $1/2 N_t$ のマイナス誤差が生じてしまうが、閾値を T_1 とした場合よりも誤差を格段に小さくできる。

[0035] μ に近い波高弁別閾値を設定することによって、パイルアップによる計数誤差を低減する本発明の計数方法は、上記説明した理論に基づいてなされたものであって、図 9 に示したシミュレーション結果も本発明の妥当性を示すものである。

[0036] なお、前述のシミュレーションはパルス 2 個のパイルアップとパルス 3 個のパイルアップを考慮したものであり、閾値 $\mu + 0 \sigma$ において若干のマイナス誤差が生じていることもこの理論と一致している。なお、このマイナス誤差が生じる原因である第 3 ピークの計数 N_t は、第 1 ピークの計数 N_s より十分に小さいため、パイルアップによって生じる計数誤差への寄与度が小さい結果となっている。さらに、パルス 4 個以上がパイルアップした第 4、第 5、第 6 … ピークが観測される可能性もあるが、パイルアップによって生じる計数誤差への寄与度は第 3 ピークよりさらに小さくなるため、ほとんどの用途において問題にはならない。

[0037] 本発明によれば、波高弁別閾値を設定し、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、計数の目的成分が波高分布スペクトルでピークを示す場合において、前記ピークについてガウス関数をフィッティングして求められ得る平均波高値を μ 、標準偏差を σ とした際に、 $(\mu - 0.4 \sigma) \sim (\mu + 0.6 \sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値を前記波高弁別閾値とする計数方法を採用することにより、パイルアップによる計数精度の低下を抑

えることができる。なお、波高弁別閾値の設定法は、ガウス関数のフィッティングに限定されない。弁別回路における信号処理時の波高弁別閾値が結果として上記範囲であれば良いのであって、他の方法によって設定された閾値であっても、上記範囲にあれば、本発明の範囲に含まれる。

[0038] 計数の目的成分とは、計数の対象とする事象のことであり、特に限定されるものではない。例えば、中性子の線量率や積算線量などを提供できる中性子検出装置であれば、中性子の入射事象が計数の目的成分となる。放射線の種類はX線、 α 線、 γ 線、中性子など多種多様であるが、2種類以上の放射線を検出する放射線検出装置でも良く、その際に本発明の波高弁別閾値を適用するのは、検出する放射線のうち何れか1種類についてでも良く、2種類以上の放射線についてでも良い。

[0039] さらに、計数の目的成分とは、放射線の入射事象に限定されるものではなく、紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波などの電磁波を検出する場合にも適用でき、様々な分野への応用が可能である。

[0040] 本発明の計数方法は、計数の目的成分が波高分布スペクトルでピークを示す場合に適用できる。例えば、中性子検出装置について、横軸に波高値をとり、縦軸に各波高値を示した事象の頻度を示した波高分布スペクトルにおいて、中性子を検出した事象が波高分布スペクトルでピークを示せば、当該ピークについてガウス関数をフィッティングして求められる($\mu - 0.4\sigma$) ~ ($\mu + 0.6\sigma$) の範囲から選ばれる任意の値を前記閾値とし、閾値を越えた事象を計数することにより適用できる。中性子を検出した事象が波高分布スペクトルでピークを示さない場合には、本発明の計数方法は適用できない。

[0041] 中性子の検出によってピークを形成できる形態の一例として、特許文献5に記載されたEu:LiCaAlF₆結晶(中性子シンチレータ)と光検出器と波高弁別回路を組み合わせる方法がある。

[0042] 波高分布ピークの形状については特に限定されず、およそガウス分布に従った形状であれば問題なく本発明の効果が得られる。後述の方法によりガウ

ス関数をフィッティングして得られる μ と、波高分布スペクトルで計数の目的成分が示すピークにおいて、最大の計数を示す波高値（以下、該波高値を P で表す）が一致しているほど高い計数精度が期待できることは統計学的に当然のことであるが、 $0.9\mu \leq P \leq 1.1\mu$ の範囲で一致していれば、特に精度の良い計数が可能である。

[0043] なお、前記ピークについてガウス関数をフィッティングする前に、波高分布スペクトルに対してベースライン補正、ピーク分離、スムージング等の処理を予め施しても良い。

[0044] 本発明の波高弁別閾値を決定するための基準となる μ および σ は、計数の目的成分によって示される波高分布ピークのうち、パイルアップしていない第1ピークについて式（1）のガウス関数をフィッティングすることにより求められる値であり、2個のパルスがパイルアップした第2ピークや3個のパルスがパイルアップした第3ピークについて求められる値とは無関係である。以下に記載する μ 、 σ とは、前記第1ピークについて求められる μ 、 σ のことである。第1ピークとは、一般に最も計数の大きなピークでもある。なお、パイルアップが頻発する場合には、第2ピークが大きくなり、分離が困難になることもある。この場合には、検出感度を下げる、パルスの減衰時間を短くするなどの手段により、第1ピークの形状がガウス関数に近似するように条件設定することで、本発明の計数方法を適用できる。

[0045] ガウス関数をフィッティングする際に用いる波高分布スペクトルのデータ範囲は、波高分布スペクトルで計数の目的成分が示すピークにおいて、最大計数を示す波高値 P を基準として、 $0.75P \sim 1.25P$ が好適である。また、計数の目的成分とは異なる成分によるノイズの計数が μ 、 σ の解析値に影響する場合には、下限値及び／又は上限値を狭めても良い。逆に、 μ 、 σ の解析値に影響するノイズが無ければ、ガウス関数をフィッティングする際に用いるデータ範囲を広げて良い。例えば、ガウス関数をフィッティングする際に用いる波高分布スペクトルのデータ範囲を $0.75P \sim 3P$ としても良い。ここで、第2ピークが現われる場合には、当該第2ピークの計数

はフィッティングを行う上ではノイズとなるが、パイルアップによって現われる第2ピークの計数は第1ピークの計数よりも十分に小さいため、当該ノイズが μ 、 σ の解析値に与える影響は限定的である。なお、ガウス関数のフィッティングには最小二乗法を用いることが好ましく、 μ 、 σ と併せて最大計数Nに関してもフィッティングする方が好ましい。

[0046] 前記説明から理解される通り、本発明の計数方法の本質は、 μ の近傍に波高弁別閾値を設定することによって、パイルアップによる計数誤差を低減することである。そして、上述のガウス関数をフィッティングして求められる $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値を前記波高弁別閾値とする方法は、 μ の近傍に適切に波高弁別閾値を設定するための指標を与えるものである。

[0047] 本発明において、ガウス関数をフィッティングする方法による解析を行わなくとも、例えば、以下に記載した方法によっても波高弁別閾値を決定できる。

[0048] なお、以下に記載した方法によって決定されたいずれの波高弁別閾値も、ガウス関数をフィッティングすれば、該フィッティングから求められる $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲に包含される。

[0049] ガウス関数をフィッティングする方法による解析を必要としない波高弁別閾値の第1の決定方法は、波高値Pにおいて最大計数N'を示す波高分布ピークについて、下記式(2)によって求められる計数nに最も近い計数を示す波高値を波高弁別閾値とする方法である。

[0050] [数2]

$$n_{(X)} = N' \exp \left\{ -\frac{X^2}{2} \right\} \quad (2)$$

式(2)は、式(1)のガウス関数における任意の波高値 x に波高弁別閾値 $\mu + X\sigma$ を代入して、計数nをXの関数として表したものである。すなわち、波高弁別閾値をP以下とする場合には、 $-0.4 \sim 0.0$ の範囲から選

ばれる任意の値をXとし、式（2）によって求められる計数nに最も近い計数を示しているP以下の波高値を波高弁別閾値とすれば良く、波高弁別閾値をP以上とする場合には、0.0～0.6の範囲から選ばれる任意の値をXとし、式（2）によって求められる計数nに最も近い計数を示しているP以上の波高値を波高弁別閾値とすれば良い。

[0051] ガウス関数をフィッティングする方法による解析を必要としない波高弁別閾値の第2の決定方法は、標準偏差 σ に代わって、半値幅FWHMを基準として波高弁別閾値を決定する方法である。ガウス分布において、 μ と波高値Pは同じであり、標準偏差 σ と半値幅FWHMの間には下記式（3）の関係がある。

[0052] [数3]

$$\sigma = \frac{FWHM}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

したがって、 $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲は、 $(P - 0.28FWHM) \sim (P + 0.42FWHM)$ と同等の範囲であるため、当該波高値Pと半値幅FWHMを解析することによっても本発明に準ずる波高弁別閾値を決定できる。

[0053] ガウスフィッティングによる解析を必要としない波高弁別閾値の第3の決定方法は、波高分布ピークの最大計数を示す波高値Pを波高分布スペクトルの形状から判断して、該波高値P付近の波高値を波高弁別閾値とする方法である。

[0054] 以上、ガウスフィッティングによる解析を必要としない波高弁別閾値の第1～第3の決定方法を例示したが、これらとも異なる方法によって波高弁別閾値を決定しても良く、何らかの方法により決定した波高弁別閾値が、ガウスフィッティングにより解析した $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲に包含されていれば、本発明の効果が発揮される。

[0055] 上記のように、本発明では波高分布における第1ピークの最大計数近傍で波高弁別閾値が設定される。以下、本発明で設定する閾値を T_A と記載するこ

とがある。本発明の計数方法では、 T_A を超えるパルスの頻度を計数する。本発明の計数方法において、計数の目的成分よりも高波高値側のノイズを除去する目的で、 T_A と併せて、高波高値側に他の波高弁別閾値（ T_B ）を設けて、 T_A を超え T_B 未満または、 T_A 以上かつ T_B 以下のパルスを計数しても良い。その場合、第2ピークおよび第3ピークの計数をロスさせないための閾値 T_B は、好ましくは 3μ 以上であり、さらに好ましくは 5μ 以上である。また、第1目的成分を計数するための波高弁別閾値を設定すると共に、第2目的成分を計数するための波高弁別閾値を別に設定しても良い。

[0056] 本発明によれば、 $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値を波高弁別閾値として設定することにより、パイルアップによる計数精度の低下を抑えることができる。図10に示したパイルアップによる計数誤差の実測値によれば、当該波高弁別閾値を超えたパルス信号を計数する場合、パイルアップによって生じる計数誤差をおよそ $\pm 10\%$ 以下に抑えることができ、斯様な計数誤差であればほとんどの用途において、精度の高い計測を実現できる。

[0057] ただし、パイルアップの頻度や前記パイルアップによる波高値の小値化の程度によっては $\pm 10\%$ を超える誤差を生じる可能性もあるが、図9を用いて説明した理論によれば、本発明の範囲を逸脱した波高弁別閾値とする場合に較べて格段に優れた計数精度が実現できる。図10に示したパイルアップによる計数誤差の実測値によれば、波高弁別閾値を $(\mu + 0.3\sigma)$ より低い波高値とする場合、波高弁別閾値を低くするほどパイルアップによる計数ロスが影響してマイナス側に計数誤差が拡大しやすく、波高弁別閾値を $(\mu + 0.3\sigma)$ より高い波高値とする場合、波高弁別閾値を高くするほど第2ピークや第3ピークの計数増が影響してプラス側に計数誤差が拡大しやすい。

[0058] より好ましい波高弁別閾値は $(\mu + 0.0\sigma) \sim (\mu + 0.5\sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値であり、さらに好ましい波高弁別閾値は $(\mu + 0.2\sigma) \sim (\mu + 0.4\sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値であり、それぞれ約 $\pm$

5 %、 ± 3 %の計数誤差に抑えられる。

[0059] 本発明の計数方法は、シンチレータ 3 と光検出器 4 と波高弁別回路 2 を組み合わせた放射線検出装置において好適に採用できる。

[0060] 本発明は、シンチレータ 3 と光検出器 4 と波高弁別回路 2 を組み合わせて用いる放射線検出装置であって、前記波高弁別回路 2 は、前記光検出器 4 の信号を増幅する増幅器と、前記増幅器のアナログ信号出力をデジタル信号に変換する A/D 変換器と、前記 A/D 変換器のデジタル信号出力を信号処理するデジタルデータ処理装置と、を備える波高弁別回路であって、当該波高弁別回路において前記計数方法により信号処理する放射線検出装置を提供する。

[0061] 前記波高弁別回路 2 としては、特許文献 2 や特許文献 3 に記載されたように、前記光検出器の信号を増幅する増幅器と、前記増幅器のアナログ信号出力をデジタル信号に変換する A/D 変換器と、前記 A/D 変換器のデジタル信号出力を信号処理するデジタルデータ処理装置と、を備えるものが好ましい。デジタルデータ処理によってパルス信号を読み取る波高弁別回路であれば、アナログデータ処理によってパルス信号を読み取る波高弁別回路に較べて、前記パイルアップによる波高値の小値化を軽減するための回路構成を低コストで実現できると共に、波高値の補正処理などが容易に可能となる。パイルアップによる波高値の小値化を軽減することによって、本発明の効果をより高い確度で得ることができる。

[0062] 本発明において、前記デジタルデータ処理装置には、所定の時間間隔で波高分布スペクトルを作成し、作成した波高分布スペクトルにおいて計数の目的成分が示すピークについてガウス関数をフィッティングし、求められた μ および σ を基準とした波高弁別閾値を逐次設定する機能を実装することが好ましい。かかる機能を実装することによって、前記パイルアップによる波高値の小値化に追従して波高弁別閾値を自動更新することができ、該小値化に起因する計数誤差の増大を防ぐことができる。

[0063] なお、パイルアップによる波高値の小値化が小さい波高弁別回路を用いる場合であれば、ガウス関数をフィッティングする機能や波高弁別閾値を逐次

設定する機能を実装せず、本発明に準ずる波高弁別閾値を予め解析し、計数の開始から終了まで該波高弁別閾値に基づいて計数しても良い。

[0064] 増幅器は、前置増幅器（プリアンプ）や波形整形増幅器（シェイピングアンプ）などが適用でき、これらの組合せであっても良い。また、微分回路を組み合わせた回路構成であっても良い。特許文献2や特許文献3に記載された回路構成の他には、特許文献6や特許文献7に記載された回路構成なども好適である。

[0065] シンチレータ3は、Eu、Ce、Tl、Na等の賦活剤を含む LiCaAlF_6 結晶、 LiSrAlF_6 結晶、 LiF/CaF_2 共晶体、 LiF/SaF_2 共晶体、NaI結晶、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 結晶、 $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ 結晶、 CeF_3 結晶等の無機シンチレータ、また、アントラセン、スチルベン、ジフェニルオキサゾール等の有機蛍光体からなる有機シンチレータ、また、前記有機蛍光体を含有するポリスチレン、ポリビニルトルエン、ポリエチレンテレフタレート等のプラスチックシンチレータ、また、前記有機蛍光体を含有するトルエン、キシレン等の液体シンチレータ、また、ヘリウム、アルゴン、キセノン、クリプトン等の気体シンチレータ等を用途に応じて何ら制限なく用いることができる。

[0066] 本発明において、シンチレータ3が $\text{LiCa}_x\text{Sr}_{1-x}\text{AlF}_6$ 結晶（ x は0～1）であることが好ましい。具体的には、EuやCeなどの添加物を賦活剤として含む、 LiCaAlF_6 結晶や LiSrAlF_6 結晶を好適に用いることができる。これらのシンチレータ結晶は中性子シンチレータであり、当該シンチレータ結晶に含まれるLi-6は、中性子と反応して α 線及びトリチウムを生じ、当該 α 線及びトリチウムによってシンチレータ結晶に4.8 MeVのエネルギーを与える。そして、当該シンチレータ結晶に含まれる賦活剤によって、与えられたエネルギーに相当する光が発せられる。該 LiCaAlF_6 結晶や該 LiSrAlF_6 結晶は、中性子を検出した事象によって、 $0.95\mu \leq P \leq 1.05\mu$ の精度でガウス分布と一致するピークを示すことができるため、本発明の放射線検出装置に用いるシンチレータとして特

に好適である。

[0067] 本発明の実施例で用いた $\text{Eu} : \text{LiCaAlF}_6$ 結晶等の、 Eu を賦活剤として含む $\text{LiCa}_x\text{Sr}_{1-x}\text{AlF}_6$ 結晶は、特に発光量が高く、信号／雑音比の高い計測が可能のため本発明に好適に用いることができる。なお、該 Eu を賦活剤として含む $\text{LiCa}_x\text{Sr}_{1-x}\text{AlF}_6$ 結晶は、蛍光寿命が $1.6 \mu\text{s}$ であり、一般的なシンチレータ材料の中では蛍光寿命が長いため、パイルアップを生じやすいが、本発明の計数方法を適用することによって、パイルアップを生じても精度良く計数することが可能となる。

[0068] 一方、 Ce を賦活剤として含む $\text{LiCa}_x\text{Sr}_{1-x}\text{AlF}_6$ 結晶は、特に蛍光寿命が数十 ns と短いため本発明に好適に用いることができる。当該 $\text{Ce} : \text{LiCaAlF}_6$ 結晶や $\text{Ce} : \text{LiSrAlF}_6$ 結晶等の Ce を賦活剤として含む $\text{LiCa}_x\text{Sr}_{1-x}\text{AlF}_6$ 結晶は、本来蛍光寿命が短く、パイルアップを起こしにくいため、本発明の計数方法を適用すれば極めて高い計数率での計測を実現できる。

[0069] $\text{Li}-6$ を含む中性子シンチレータの中性子感度の調整は、シンチレータサイズの調整、及び $\text{Li}-6$ 同位体比の調整によって可能である。 Li の安定な同位体である $\text{Li}-6$ 、 $\text{Li}-7$ の比を調整したものとしては、 $\text{Li}-6$ を濃縮したもの、天然比のもの、 $\text{Li}-7$ を濃縮したものがあり、 $\text{Li}-6$ 同位体比が高いほど中性子感度が高くなる。また、これらの混合によって中性子感度を調整しても良い。上記のようにして中性子感度を調整することによって、計数の対象とする線量率に応じた放射線検出装置を提供できる。

[0070] 本発明において、シンチレータ 3 の光を光検出器 4 まで伝搬する手段は特に限定されず、シンチレータ 3 と光検出器 4 を図 4 (b) に示したように直接的に接続しても良く、図 12 に示したように光ファイバ 5 などのライトガイドを用いて間接的に接続しても良い。シンチレータ 3 と光検出器 4 を直接的に接続する場合には、光検出器 4 をシンチレータ 3 と共に放射線場へ曝すことになるため、光検出器 4 に放射線が入射することにより観測されるノイズの影響で計数精度が低下したり、光検出器 4 が故障したりする可能性がある。

る。そのため、高線量率環境下で放射線を計数する場合には、計数の対象とする高線量率環境下にシンチレータ 3 を設置し、光検出器 4 を十分に線量率が低い遠方に設置し、該シンチレータ 3 と光検出器 4 を光ファイバ 5 などのライトガイドを用いて間接的に接続することが好ましい。

[0071] 高線量率となる放射線場としてはがんの放射線治療装置が挙げられ、中でも、ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）用の放射線治療装置では、中性子線量率が $1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ 程度と非常に高くなることが知られている。従来は、原子炉中性子を利用した BNCT 治療が行われていたが、近年では、サイクロトロン加速器や静電加速器によっても高線量率の中性子が得られるようになっており、病院にも設置可能な加速器 BNCT 治療装置が開発されている。

[0072] 本発明の計数方法および放射線検出装置は、様々な放射線場で好適に利用可能であり、前記加速器中性子の検出に特に適している。特に、非常に高い中性子線量率となるホウ素中性子捕捉療法用の中性子の検出に適している。

[0073] ホウ素中性子捕捉療法用の中性子を検出する場合において、本発明を実施する最良の形態は、中性子シンチレータ 3 と光検出器 4 と波高弁別回路 2 を組み合わせた放射線検出装置であって、中性子シンチレータ 3 として $\text{Eu} : \text{LiCaAlF}_6$ 結晶、 $\text{Ce} : \text{LiCaAlF}_6$ 結晶、 $\text{Eu} : \text{LiSrAlF}_6$ 結晶、 $\text{Ce} : \text{LiSrAlF}_6$ 結晶の何れかを用い、当該中性子シンチレータ 3 と光検出器 4 の間を光ファイバ 5 によって接続して成るものである。

[0074] かかる態様において、中性子シンチレータ 3 から光ファイバ 5 への光の伝搬効率を高めるため、中性子シンチレータ 3 と光ファイバ 5 の先端を光学接着することが好ましい。光学接着する方法は特に制限されないが、シンチレータ 3 の発光波長における透過率が良く、且つ、耐放射線性が良い有機接着剤や無機接着剤を用いる方法、又は、光ファイバ 5 の先端部を一時的に融解させてシンチレータ 3 を融着する方法が好ましい。また、中性子シンチレータ 3 から光ファイバ 5 への集光効率を高めるため、中性子シンチレータ 3 の周囲を反射材で覆うことが好ましい。反射材は特に制限されないが、テトラ

フルオロエチレン、ポリエチレン、酸化チタン、硫酸バリウムなどの白色物質が好ましい。なお、光ファイバ5は石英ファイバ、プラスチックファイバなどを用いることができ、開口数（NA）が大きく、伝送損失が小さいものが好ましい。具体的には、 $NA \geq 0.45$ 以上、伝送損失 200 dB/km 以下が好ましい。NAが大きく、伝送損失が小さいものを用いることによって、光検出器4まで十分な光量を伝搬させることができれば、中性子を検出した事象によって、 $0.95 \mu \leq P \leq 1.05 \mu$ の精度でガウス分布と一致するピークが形成されるため、特に好ましい。

[0075] 前記の形態であれば、光検出器4を高線量率環境下に配置する必要がなく、波高分布スペクトルにおいて、シンチレータ3が中性子を検出した事象として認められるピークを形成することが可能である。また、当該ピークについて、ガウス関数をフィッティングして求められ得る平均波高値を μ 、標準偏差を σ とした際に、 $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲から選ばれる任意の値を波高弁別閾値とし、当該波高弁別閾値を超えた事象を計数すれば、パイルアップによる計数精度の低下が小さく、低線量率から高線量率まで広い範囲にわたって精度良く中性子を計数可能な放射線検出装置を提供できる。

[0076] 以上の説明から明らかなように、本発明の一態様に係る計数方法は、波高弁別閾値を設定し、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、

計数の目的成分が波高分布スペクトルでピークを示す場合において、前記ピークについてガウス関数をフィッティングして求められ得る $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ [ただし、 μ は平均波高値であり、 σ は標準偏差である]の範囲から選ばれる任意の値を前記波高弁別閾値とする。

[0077] 本発明の他の態様に係る計数方法は、

計数の目的成分が波高分布スペクトルで複数のピークを示す場合において、波高弁別閾値を設定し、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、

該波高弁別閾値が、 $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲にある。

ただし μ および σ は、前記複数のピークの内、最大ピークをガウス関数に近似した際の平均波高値 μ および標準偏差 σ である。

[0078] 本発明のさらに他の態様に係る計数方法は、

放射線もしくは電磁波に由来のパルス信号を、その波高値および波高値毎の計数に基づいてプロットして得られる波高分布スペクトルにおいて、複数のピークが存在する場合に、波高弁別閾値を設定して、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、

前記複数のピークの内、最大ピークをガウス関数に近似して求められ得る平均波高値を μ 、標準偏差を σ とした際に、

前記波高弁別閾値が $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲にある計数方法。

実施例

[0079] 以下、具体的な実験例を挙げて本発明の実施態様をより詳しく説明するが、本発明はこれらに限定されるものではない。

[0080] 実施例 1

まず、中性子シンチレータ 3 と光検出器 4 と波高弁別回路 2 を組み合わせた中性子検出装置を下記の通り製作した。製作した中性子検出装置は図 1 2 に概略図を示すものである。

[0081] 中性子シンチレータ 3 は、 Li-6 同位体比を 95% に濃縮した Li 原料を用いて製造された Eu : LiCaAlF_6 結晶を用いた。0.6 mm × 0.6 mm × 0.6 mm に加工した Eu : LiCaAlF_6 結晶を、コア径 $\phi 1$ mm ・長さ 10 m の石英製の光ファイバ 5 の先端（逆端を後端とする）へエポキシ接着剤を用いて光学接着した。光ファイバ 5 は、NA が 0.48 であり、 Eu : LiCaAlF_6 結晶の発光波長（370 nm）における伝送損失が 100 dB/km のものを用いた。なお、 Eu : LiCaAlF_6 結晶からなるシンチレータ 3 と光ファイバ 5 との光学接着面は、それぞれ光学研磨を施した。さらに、 Eu : LiCaAlF_6 結晶からなるシンチレータ 3 を硫酸バ

リウムからなる反射材で覆うことにより光ファイバへの集光効率改善を図り、光ファイバ5を遮光材料で被覆することにより室内光が入射しないようにした。

[0082] Eu : LiCaAlF₆結晶からなるシンチレータ3を接着した光ファイバ5の後端を光検出器4へ光学的に接続した。光検出器4は波高弁別回路2へ電氣的に接続した。光検出器4としては、光電子増倍管を用いた。

[0083] 波高弁別回路2は、光検出器の信号を増幅する増幅器と、増幅器のアナログ信号出力をデジタル信号に変換するAD変換器と、AD変換器のデジタル信号出力を信号処理するデジタルデータ処理装置と、デジタルデータ処理の結果を表示する表示装置と、を備えるものを用いた。

[0084] 表示装置は、コンピュータとソフトウェア、モニタを備えるものを用いた。モニタには、波高分布スペクトルや波高弁別閾値を超えたパルスの計数値などを表示できるようにした。

[0085] なお、前記デジタルデータ処理装置には、10秒毎に波高分布スペクトルを作成し、作成した波高分布スペクトルにおいて計数の目的成分が示すピークについてガウス関数をフィッティングし、求められた μ および σ を基準とした波高弁別閾値を逐次設定する機能を実装した。本実施例では、パイルアップの頻度が高まるに連れ波高分布ピークが徐々に低波高値側へシフトし、パイルアップの頻度が最も多い状況では、パイルアップの頻度が最も少ない状況に対して μ が約14%低下したが、波高弁別閾値はその時点でのピーク位置に合わせて自動更新されるため、波高値の小値化による計数ロスは軽微であった。

[0086] 次に、製作した中性子検出装置を用いて、下記に記載した方法の通り、加速器中性子を計数し、パイルアップが計数値に与えた誤差を解析した。

[0087] 静電加速器を用いた中性子発生装置の中性子照射口付近に、中性子減速材としてポリエチレンブロックを配置し、当該ポリエチレンブロックに設けた挿入孔へシンチレータ3を接着した光ファイバ5の先端を挿入して固定した。光検出器4および波高弁別回路2は、光ファイバ5を伸ばすことにより、

中性子照射口から遠ざけて配置した。

[0088] 静電加速器によって中性子を発生させ、中性子検出装置によって当該中性子を検出した。検出した中性子のパルス解析し、波高弁別閾値を超えたパルスを1秒毎に計数して単位時間あたりの中性子計数率〔cps〕を得た。実施例1における波高弁別閾値は、 $(\mu + 0.3\sigma)$ とした。なお、得られた中性子計数率〔cps〕に中性子線量率へ換算するための係数を乗じることにより、中性子線量率〔n/cm²/sec〕を求めることができる。該加速器の最大出力における該検出素子を配置させた環境の中性子線量率は、約 $1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ であった。

[0089] 実施例1において得られた計数率〔cps〕の経時変化を図13に示す（左縦軸）。図13には、加速器の電流値〔μA〕も併せて示しており（右縦軸）、当該電流値は、実施例1における加速器出力の履歴を現わしている。図13の右縦軸スケールは、6kcps以下を示している部分の中性子計数率について、加速器電流値が中性子計数率とグラフ上で重なるように調整している。なお、加速器電流値が最も低い約5μAの際の波高分布スペクトルは、図2のようにパイルアップが少ないものであり、約45μA、約380μAの際の波高分布スペクトルはそれぞれ図1、図3のようなものであり、加速器電流値が高いほど、即ち中性子線量率が高いほどパイルアップの頻度が増えることがわかる。

[0090] 図13のデータについて、加速器電流値が安定している期間毎に、加速器電流値と中性子計数率の平均値を算出して比較したグラフを図14に示す。図14の回帰直線は、中性子計数率が低くパイルアップの影響が小さい部分（約1kcps～5kcpsの4点）から求めたものである。回帰直線から期待される中性子計数率に対する実際に得られた中性子計数率の誤差は、表1に示した通りであり、最大で-2.1%の誤差しかなく良好な結果だった。

[0091]

[表1]

実施例1 波高弁別閾値： $\mu + 0.3\sigma$			比較例1 波高弁別閾値： $\mu - 1.0\sigma$			比較例2 波高弁別閾値： $\mu + 0.7\sigma$		
加速器 電流 [μA]	計数率 [cps]	回帰直線 との誤差 [%]	加速器 電流 [μA]	計数率 [cps]	回帰直線 との誤差 [%]	加速器 電流 [μA]	計数率 [cps]	回帰直線 との誤差 [%]
379.6	59,818	-1.6	380.3	100,254	-15.5	382.7	46,972	14.9
248.9	39,064	-2.1	251.4	68,111	-13.2	250.0	29,087	8.9
161.8	25,509	-1.7	161.4	45,721	-9.3	162.2	18,106	4.5
104.9	16,682	-0.9	101.7	29,945	-5.7	102.1	10,730	-1.7
72.9	11,592	-1.1	72.1	21,596	-4.2	71.3	7,601	-0.2
46.1	7,360	-1.1	44.3	13,590	-1.9	45.1	4,792	-0.7
31.7	5,114	-0.2	31.0	9,729	0.0	28.9	3,098	0.1
21.0	3,438	0.6	20.1	6,302	-0.2	20.3	2,172	-0.2
10.2	1,684	-0.1	10.6	3,357	0.4	10.6	1,143	0.0
5.7	965	-0.7	5.4	1,714	-0.3	5.1	552	0.4

比較例 1

実施例 1 と同一の中性子検出装置を用いて、波高弁別閾値を ($\mu - 1.0\sigma$) とした以外は、実施例 1 と同様にして加速器中性子を計数した。

[0092] 比較例 1 において得られた中性子計数率および加速器電流値について、実施例 1 と同様の方法で解析した結果を図 15 および図 16 に示す。図 15 において、中性子計数率が 40 kcps を超えた部分では、中性子計数率が加速器電流値と較べて顕著に低くなっているが、これはパイルアップによって計数ロスが生じた結果を示すものである。各加速器電流値における中性子計数率の回帰直線との差は、表 1 に示した通りであり、 -10% を超える計数誤差を生じていた。

[0093] 比較例 2

実施例 1 と同一の中性子検出装置を用いて、波高弁別閾値を ($\mu + 0.7\sigma$) とした以外は、実施例 1 と同様にして加速器中性子を計数した。

[0094] 比較例 2 において得られた中性子計数率および加速器電流値について、実施例 1 と同様の方法で解析した結果を図 17 および図 18 に示す。図 17 において、中性子計数率が 15 kcps を超えた部分では、中性子計数率が加速器電流値と較べて顕著に高くなっているが、これはパイルアップによる第 2 ピークや第 3 ピークの計数増が影響した結果を示すものである。各加速器電流値における中性子計数率の回帰直線との差は、表 1 に示した通りであり

、+10%を超える計数誤差を生じていた。

[0095] 以上の実施例では、パイルアップの頻度が高くなる高計数率条件下においても、本発明の計数方法を採用することによって、パイルアップによる計数精度の低下を抑えることが可能である結果を示した。Li-6同位体比を天然比とし、サイズを0.3mm×0.3mm×0.2mmへ小型化したEu:LiCaAlF₆結晶を中性子シンチレータ3として用いれば、本実施例で製作した中性子検出装置の1/100以下の中性子感度とできるため、該Eu:LiCaAlF₆結晶を用いた中性子検出装置であれば、BNCT治療における中性子線量率 $1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ においても精度良く中性子の計数が可能である。当該中性子検出装置であれば、さらに線量率が高い $1 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ においても精度良く中性子を計数可能である。

符号の説明

- [0096] 1：放射線検出素子
2：波高弁別回路
3：シンチレータ
4：光検出器
5：光ファイバ

請求の範囲

- [請求項1] 波高弁別閾値を設定し、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、
計数の目的成分が波高分布スペクトルでピークを示す場合において、
前記ピークについてガウス関数をフィッティングして求められ得る $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ [ただし、 μ は平均波高値であり、 σ は標準偏差である] の範囲から選ばれる任意の値を前記波高弁別閾値とする計数方法。
- [請求項2] 計数の目的成分が波高分布スペクトルで複数のピークを示す場合において、波高弁別閾値を設定し、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、
該波高弁別閾値が、 $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲にある計数方法、
ただし μ および σ は、前記複数のピークの中の最大ピークをガウス関数に近似した際の平均波高値 μ および標準偏差 σ である。
- [請求項3] 放射線もしくは電磁波に由来のパルス信号を、その波高値および波高値毎の計数に基づいてプロットして得られる波高分布スペクトルにおいて、複数のピークが存在する場合に、波高弁別閾値を設定して、該波高弁別閾値を超える信号の頻度を計数する方法であって、
前記複数のピークの内、最大ピークをガウス関数に近似して求められ得る平均波高値を μ 、標準偏差を σ とした際に、
前記波高弁別閾値が $(\mu - 0.4\sigma) \sim (\mu + 0.6\sigma)$ の範囲にある計数方法。
- [請求項4] シンチレータと光検出器と波高弁別回路を組み合わせて用いる放射線検出装置であって、
前記波高弁別回路は、
前記光検出器の信号を増幅する増幅器と、

前記増幅器のアナログ信号出力をデジタル信号に変換するA/D変換器と、

前記A/D変換器のデジタル信号出力を信号処理するデジタルデータ処理装置と、

を備える波高弁別回路であって、

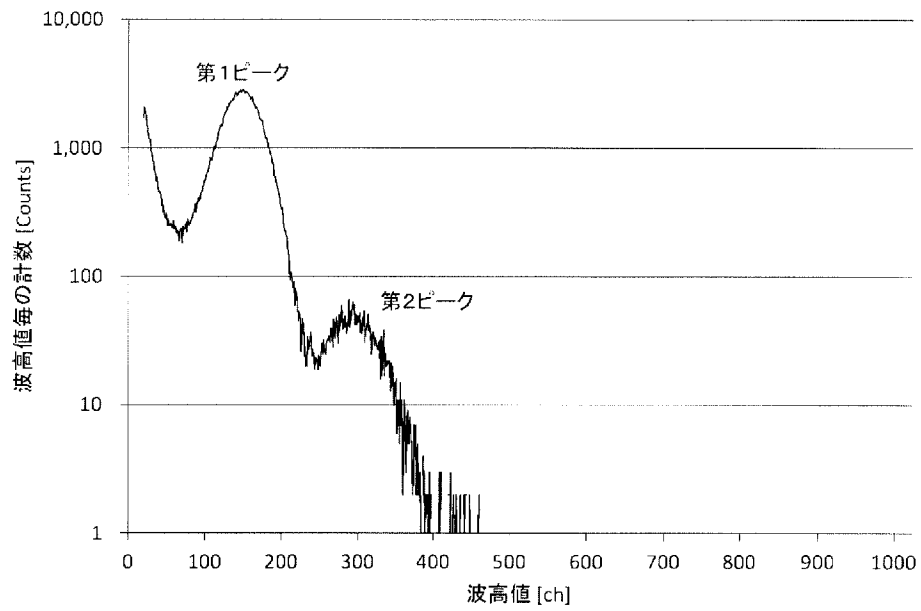
当該波高弁別回路において請求項1～3の何れか一項に記載の計数方法により信号処理する放射線検出装置。

[請求項5] シンチレータが、 $\text{LiCa}_x\text{Sr}_{1-x}\text{AlF}_6$ 結晶（ x は0～1）である請求項4に記載の放射線検出装置。

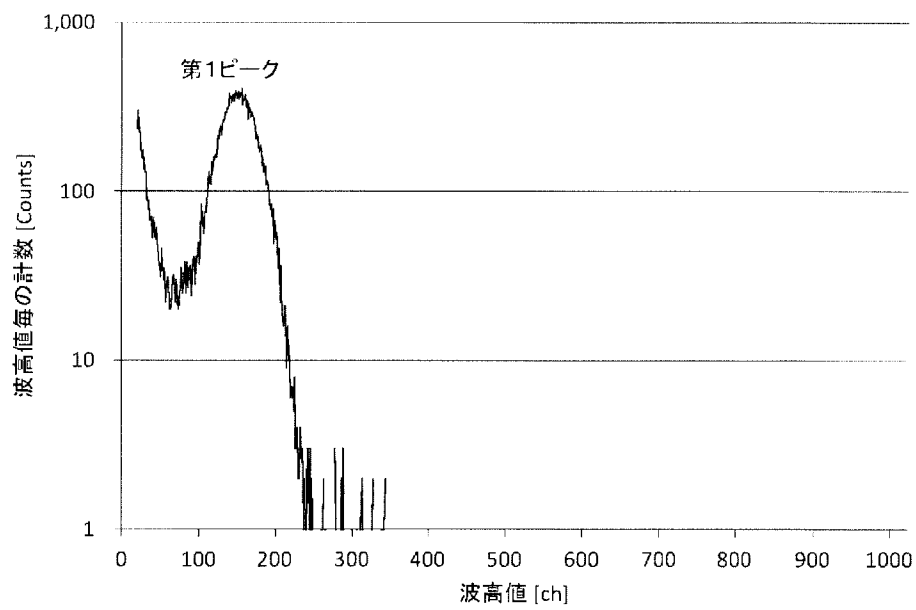
[請求項6] シンチレータが検出する放射線が加速器中性子である請求項4又は5の何れか一項に記載の放射線検出装置。

[請求項7] シンチレータが検出する放射線がホウ素中性子捕捉療法用の中性子である請求項4～6の何れか一項に記載の放射線検出装置。

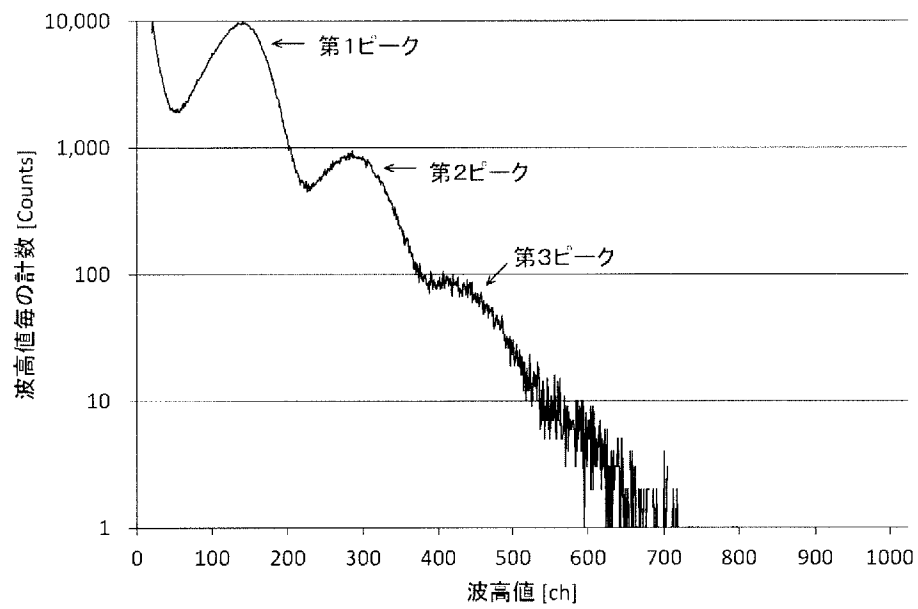
[図1]



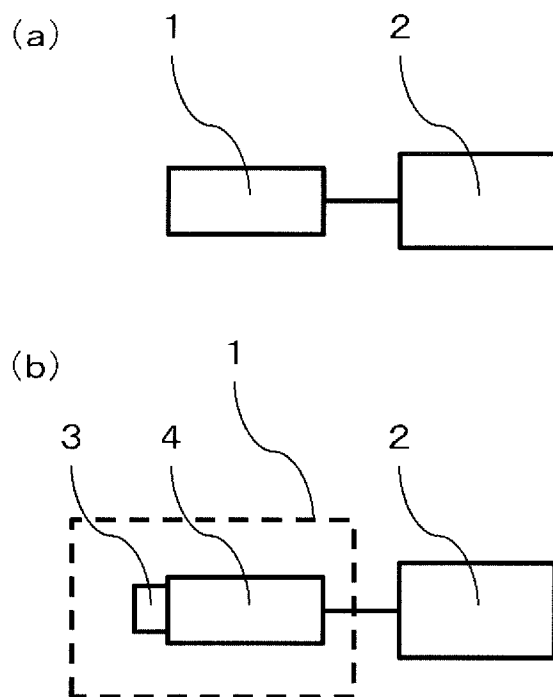
[図2]



[図3]



[図4]

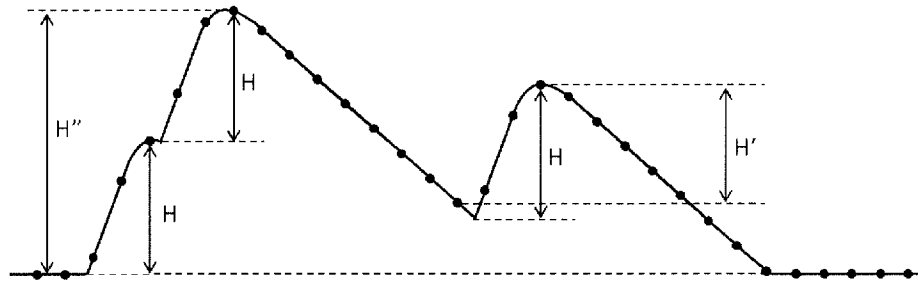


[図5]

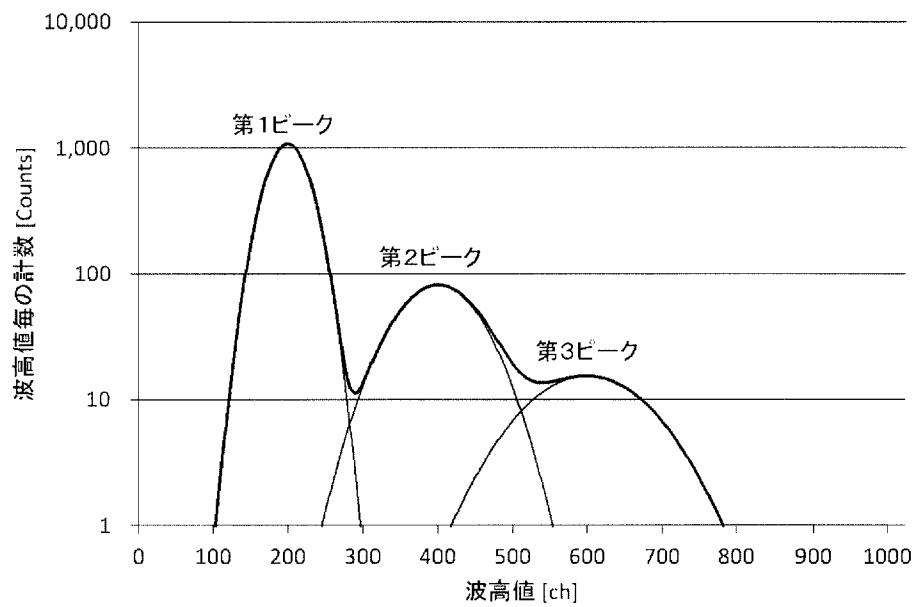
(a)



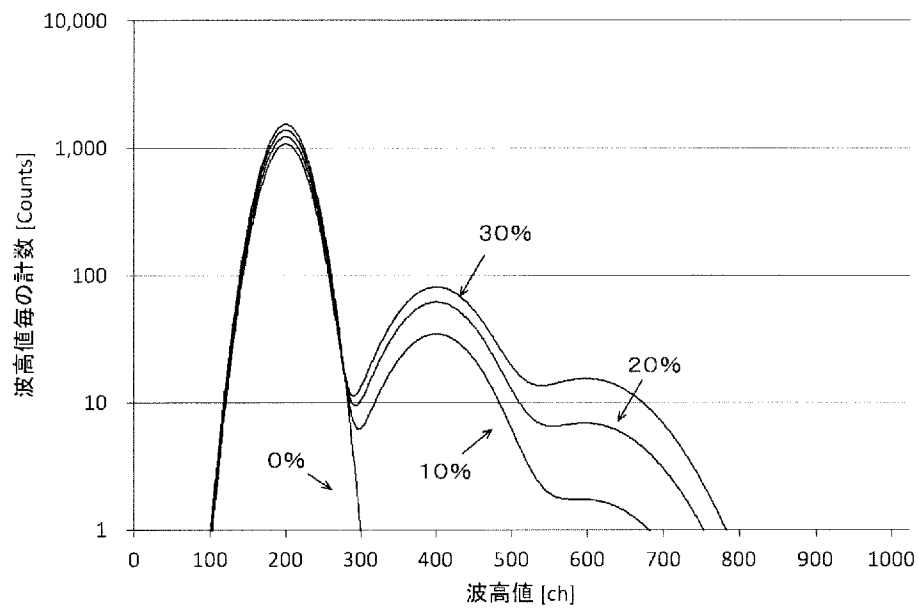
(b)



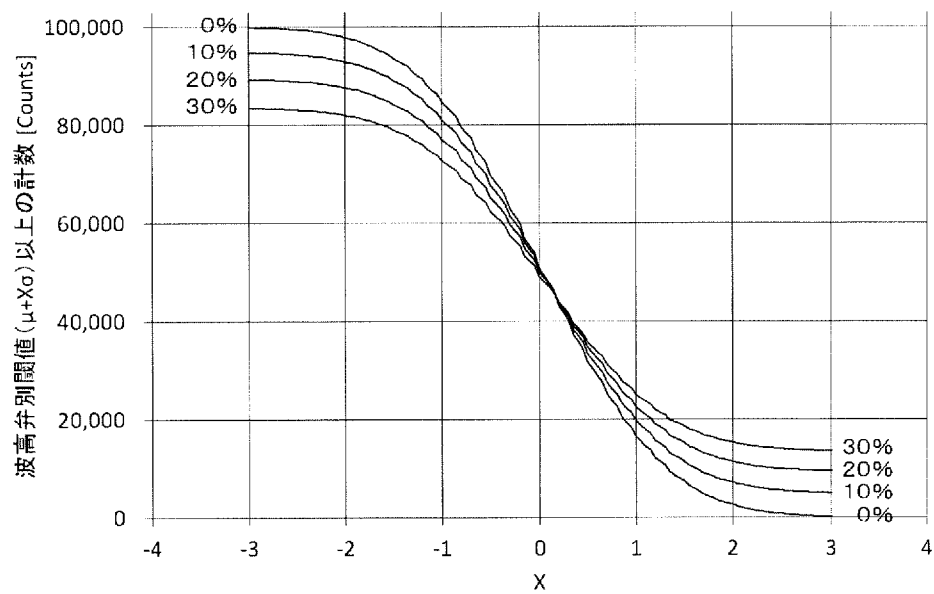
[図6]



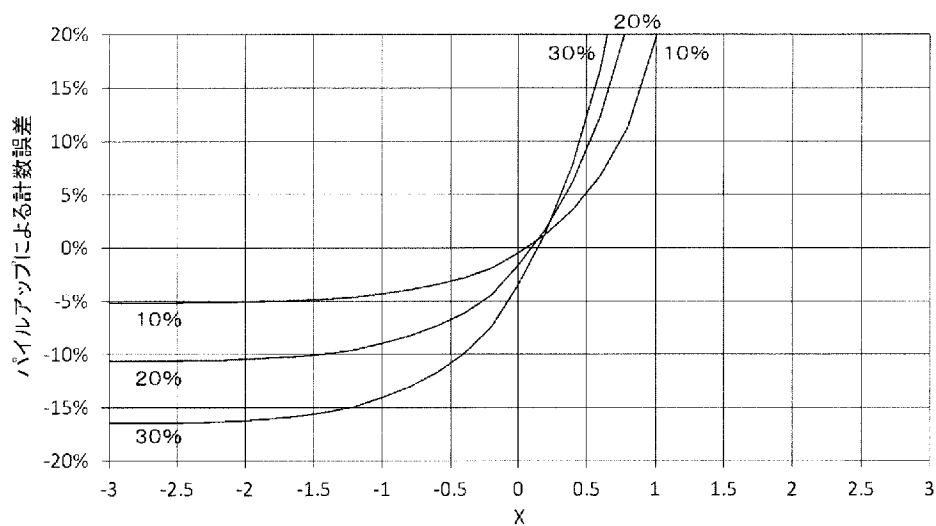
[図7]



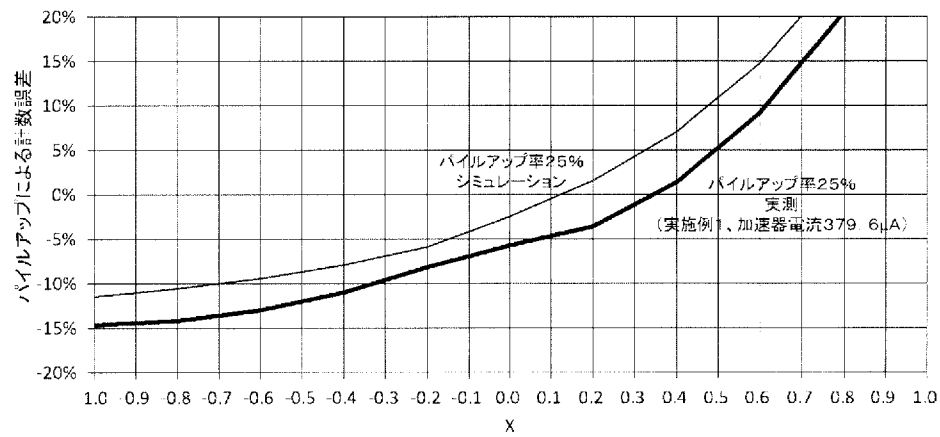
[図8]



[図9]

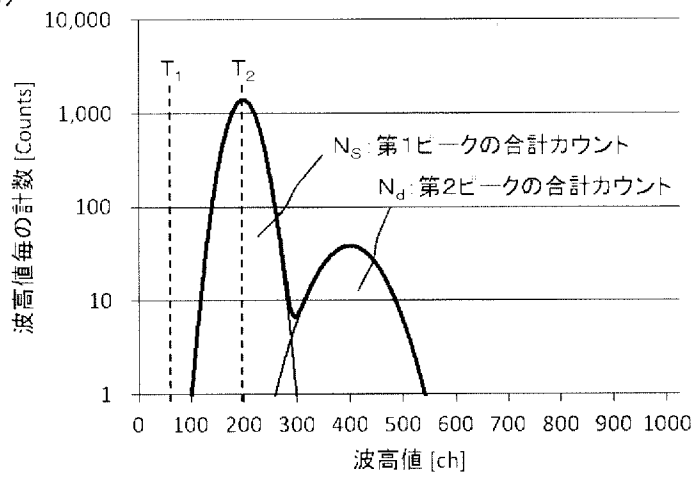


[図10]

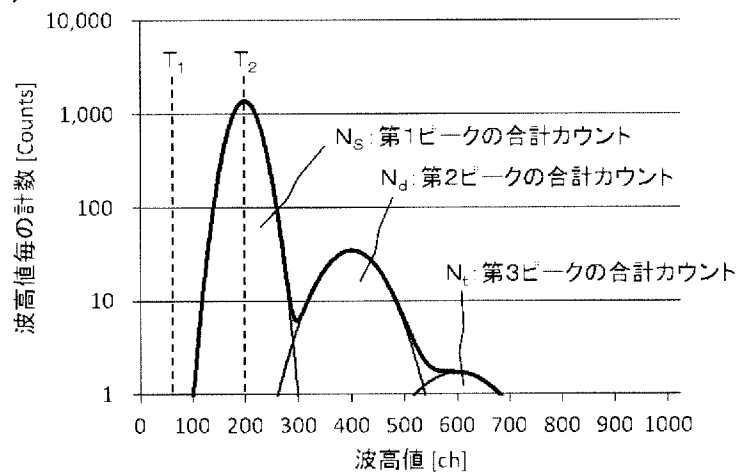


[図11]

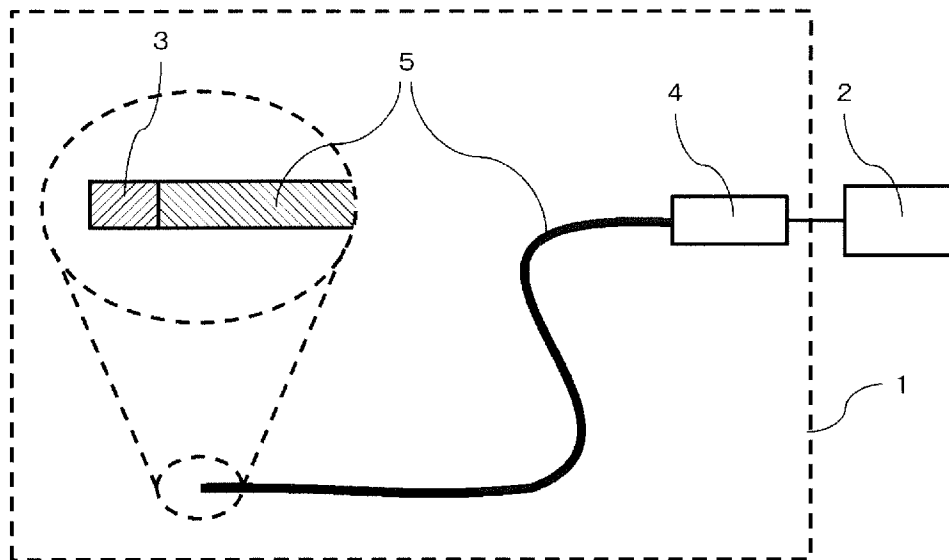
(a)



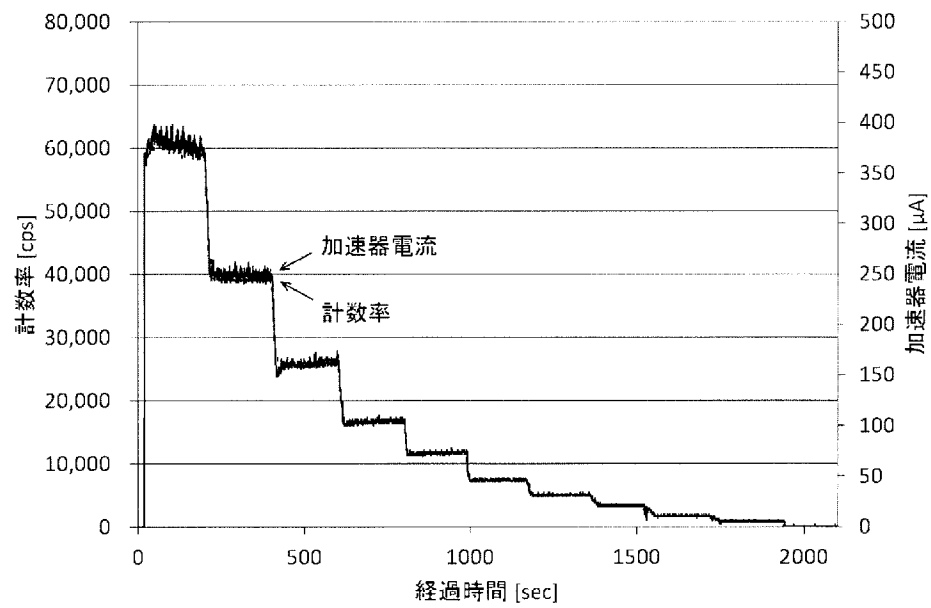
(b)



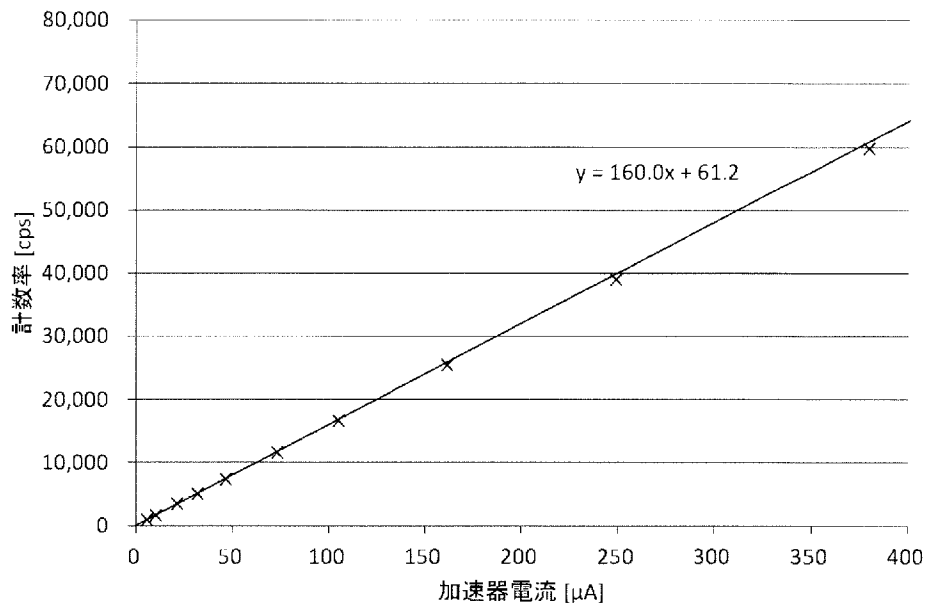
[図12]



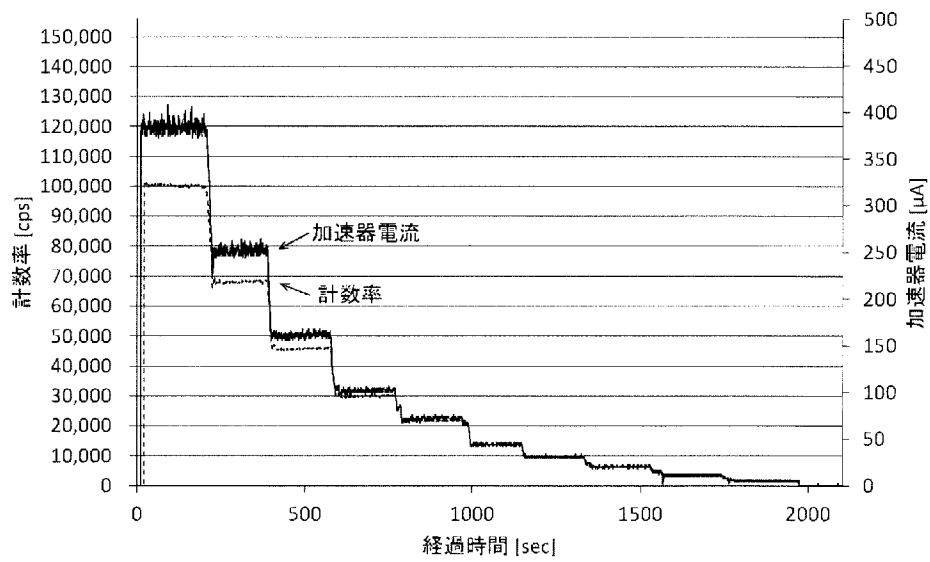
[図13]



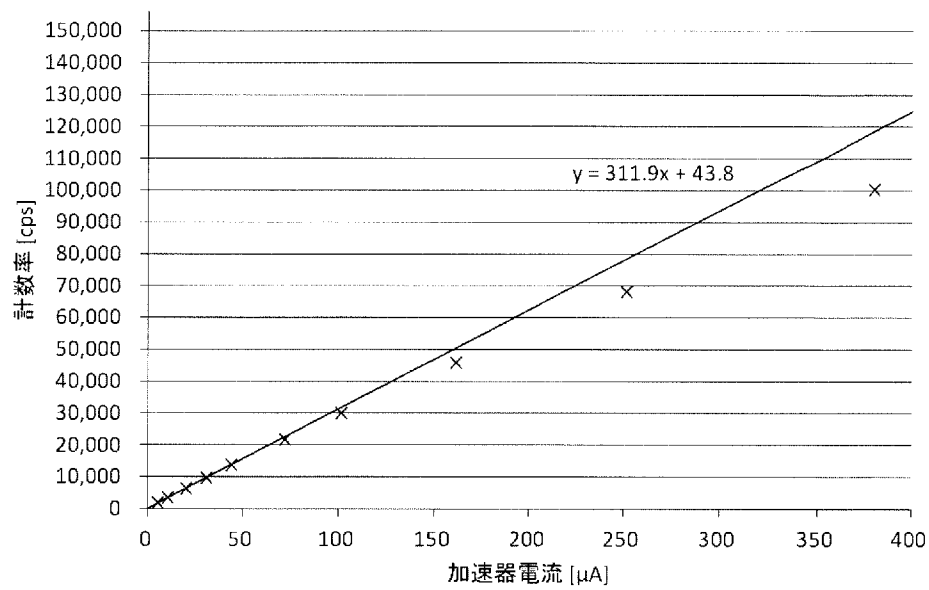
[図14]



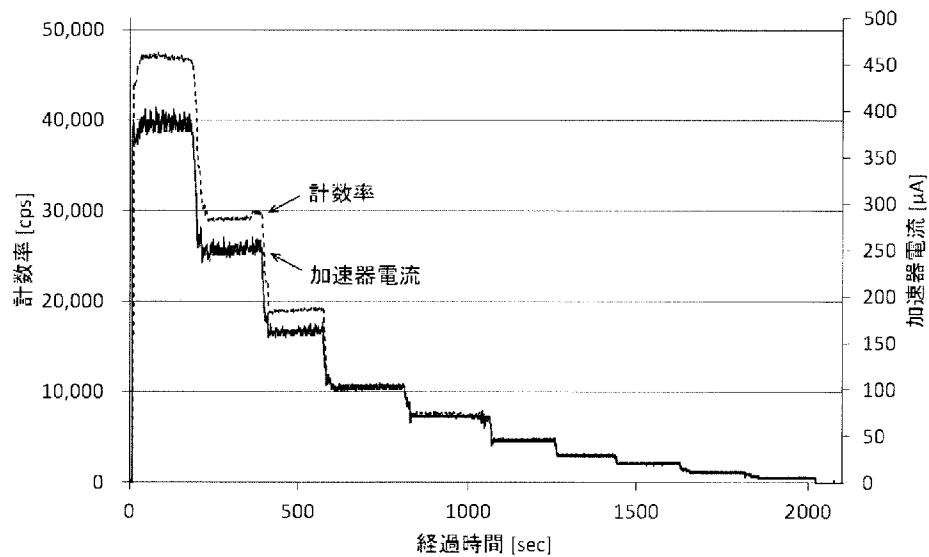
[図15]



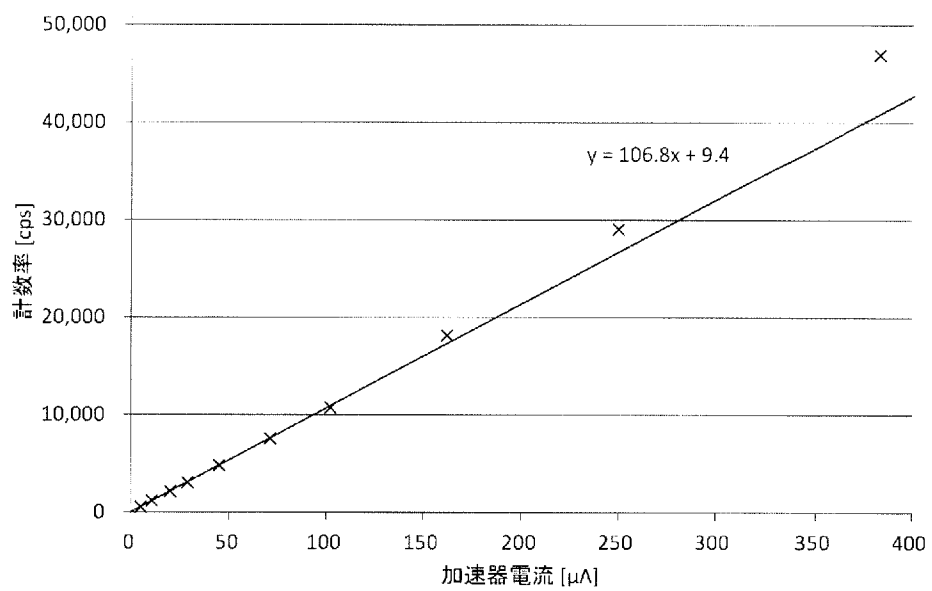
[図16]



[図17]



[図18]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/025982

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01T1/17(2006.01)i, A61N5/10(2006.01)i, G01T1/20(2006.01)i, G01T1/202(2006.01)i, G01T3/06(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01T1/00-1/16, G01T1/167-7/12, A61N5/10, G21C17/10-17/108, G01J1/02, G01J1/42, G01N23/00-23/227, A61N5/10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2014/192321 A1 (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.), 04 December 2014 (04.12.2014), paragraphs [0021] to [0058]; fig. 1 to 5 & EP 3006961 A1 paragraphs [0021] to [0058]; fig. 1 to 5 & CN 105190361 A & TW 1445173 A	1-7
A	WO 2014/092202 A1 (Tokuyama Corp.), 19 June 2014 (19.06.2014), page 7, line 12 to page 8, line 21; page 23, line 15 to page 24, line 4; page 25, line 5 to page 28, line 8 & US 2015/0307777 A1 paragraphs [0051] to [0055], [0120] to [0125], [0130] to [0147] & EP 2933660 A1	1-7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
06 October 2017 (06.10.17)

Date of mailing of the international search report
24 October 2017 (24.10.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/025982

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2012/060381 A1 (Tokuyama Corp.), 10 May 2012 (10.05.2012), claim 3; paragraphs [0015] to [0016] & US 2013/0161519 A1 claim 3; paragraphs [0029] to [0032] & EP 2636772 A1	1-7

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01T1/17(2006.01)i, A61N5/10(2006.01)i, G01T1/20(2006.01)i, G01T1/202(2006.01)i, G01T3/06(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01T1/00-1/16, G01T1/167-7/12, A61N5/10, G21C17/10-17/108, G01J1/02, G01J1/42, G01N23/00-23/227, A61N5/10

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2014/192321 A1 (住友重機械工業株式会社) 2014. 12. 04, 段落[0021]-[0058], 図 1-5 & EP 3006961 A1, 段落[0021]-[0058], 図 1-5 & CN 105190361 A & TW 1445173 A	1-7
A	WO 2014/092202 A1 (株式会社トクヤマ) 2014. 06. 19, 第 7 頁第 12 行-第 8 頁第 21 行, 第 23 頁第 15 行-第 24 頁第 4 行, 第 25 頁第 5 行-第 28 頁第 8 行 & US 2015/0307777 A1, 段落[0051]- [0055], 段落[0120]- [0125],	1-7

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

06. 10. 2017

国際調査報告の発送日

24. 10. 2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官 (権限のある職員)

藤原 伸二

2 G

9 0 1 3

電話番号 03-3581-1101 内線 3224

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	段落[0130]- [0147] & EP 2933660 A1 WO 2012/060381 A1 (株式会社トクヤマ) 2012. 05. 10, [請求項 3], 段落[0015]-[0016] & US 2013/0161519 A1, [請求項 3], 段落[0029]-[0032] & EP 2636772 A1	1-7