

(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2014-197015  
(P2014-197015A)

(43) 公開日 平成26年10月16日(2014. 10. 16)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 T 1/17 (2006. 01)	GO 1 T 1/17 F	2 G 1 8 8
GO 1 T 1/172 (2006. 01)	GO 1 T 1/172	4 C 1 8 8
GO 1 T 1/161 (2006. 01)	GO 1 T 1/161 A	

審査請求 有 請求項の数 7 O L (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願2014-120042 (P2014-120042)  
 (22) 出願日 平成26年6月10日 (2014. 6. 10)  
 (62) 分割の表示 特願2009-200703 (P2009-200703) の分割  
 原出願日 平成21年8月31日 (2009. 8. 31)  
 (31) 優先権主張番号 特願2008-306087 (P2008-306087)  
 (32) 優先日 平成20年12月1日 (2008. 12. 1)  
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 301032942  
 独立行政法人放射線医学総合研究所  
 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号  
 (71) 出願人 301021533  
 独立行政法人産業技術総合研究所  
 東京都千代田区霞が関1-3-1  
 (71) 出願人 598041566  
 学校法人北里研究所  
 東京都港区白金5丁目9番1号  
 (71) 出願人 509111744  
 地方独立行政法人東京都健康長寿医療センター  
 東京都板橋区栄町35番2号  
 (74) 代理人 100080458  
 弁理士 高矢 諭

最終頁に続く

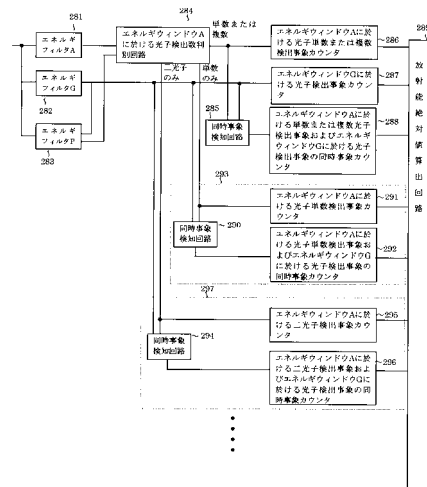
(54) 【発明の名称】  $\gamma$ 線を放出する陽電子崩壊核種の放射能絶対測定方法、放射線検出器集合体の検出効率決定方法、及び、放射線測定装置の校正方法

(57) 【要約】

【課題】放射線の多重散乱およびパイルアップの影響を考慮した放射能測定を実現することにより、放射能絶対値の不確かさを縮減する。

【解決手段】電子陽電子対消滅光子と他光子のパイルアップ事象エネルギーウィンドウでパイルアップを検出した場合に、電子陽電子対消滅光子エネルギーウィンドウに於ける光子検出数を加算補正し、他光子エネルギーウィンドウに於ける光子検出事象及び電子陽電子対消滅光子と他光子の同時検出事象があったと見なす。

【選択図】図14



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

電子陽電子対消滅光子と他光子のパイルアップ事象エネルギーウィンドウでパイルアップを検出した場合に、電子陽電子対消滅光子エネルギーウィンドウに於ける光子検出数を加算補正し、他光子エネルギーウィンドウに於ける光子検出事象及び電子陽電子対消滅光子と他光子の同時検出事象があったと見なすことを特徴とする放射能絶対測定方法。

**【請求項 2】**

放射線スペクトルに対して、電子陽電子対消滅光子エネルギーウィンドウ、他光子エネルギーウィンドウ、電子陽電子対消滅光子と他光子のパイルアップ事象エネルギーウィンドウを、光子によるピークの高エネルギー側の一部にかけて、低エネルギー散乱放射線の影響を低減することを特徴とする放射能絶対測定方法。

10

**【請求項 3】**

請求項 1 又は 2 に記載の方法で決定された放射能絶対値を用いて、放射線検出器集合体の光子の計数率から、放射線検出器集合体の検出効率を求めることを特徴とする放射線検出器集合体の検出効率決定方法。

**【請求項 4】**

請求項 1 又は 2 に記載の方法で決定された放射能絶対値を用いて、放射線検出器集合体を備えた放射線測定装置を校正することを特徴とする放射線測定装置の校正方法。

**【請求項 5】**

前記放射線測定装置が PET 装置であることを特徴とする請求項 4 に記載の放射線測定装置の校正方法。

20

**【請求項 6】**

前記放射線検出器集合体を校正用仲介標準器として作業現場に搬入し、作業現場にある放射線源に放射能絶対値を与え、この放射線源を、作業現場で使用している放射線測定装置で測定して、該放射線測定装置の出力と放射能絶対値を関連付けることを特徴とする請求項 4 に記載の放射線測定装置の校正方法。

**【請求項 7】**

放射線源を分注して、放射線検出器集合体用放射線源と放射線測定装置用放射線源に分け、各放射線源の重さを測定し、放射線検出器集合体用放射線源を放射線検出器集合体で測定して、その放射能絶対値を付与し、この放射能絶対値と放射線源の重さから、放射線測定装置用放射線源に放射能絶対値を付与し、該放射線測定装置用放射線源を作業現場の放射線測定装置で測定して、該放射線測定装置の出力値と前記放射線測定装置用放射線源の放射能絶対値を関係付けることを特徴とする請求項 4 に記載の放射線測定装置の校正方法。

30

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本発明は、放射能絶対測定方法、放射線検出器集合体の検出効率決定方法、及び、放射線（放射能）測定装置（放射線測定装置と総称する）の校正方法に係り、特に、陽電子放射断層撮像（ポジトロン・エミッション・トモグラフィ：PET）装置の校正に用いるのに好適な、一崩壊で、陽電子及びエネルギーの異なる複数の光子を放出する核種の放射能を絶対測定するための放射能絶対測定方法、該放射能絶対測定方法を利用した放射線検出器集合体の検出効率決定方法、及び、医療診断機器や非破壊検査装置等に用いられる放射線測定装置の校正方法に関する。

40

**【背景技術】****【0002】**

PET 装置は、陽電子放出核種を利用した核医学イメージング装置であり、癌の診断や分子イメージング等に広く応用されている。また、放射線治療装置と併用した開放型 PET 装置により、患部の放射線量分布が可視化され、あるいは、薬効を本格投与前に推定できる PET 装置によるマイクロドージング試験が進展するなど、今後 PET 装置の更なる

50

普及が見込まれている。

【0003】

陽電子放出核種とは、 $^{18}\text{F}$ のように原子核中の陽子数が中性子数に比べて過多であることによる不安定な同位元素であり、 $\beta^+$ 崩壊に伴って陽電子とニュートリノを放出する性質がある。放出された陽電子は電子の反物質であるため、電子と出会うと対消滅して、両者の質量が全てエネルギーに転換される。このエネルギーは、消滅放射線という高エネルギー電磁波の形で放射される。対消滅の前後で運動量保存則が維持されるため、消滅放射線は主に2本が同時刻にほぼ正反対の方向に放出される。厳密には1本だけの放出や、3本以上が放出される場合も存在するが、その割合は合わせて全体の1%未満であるため、イメージングでは無視できる。2本を放出する場合、それぞれのエネルギーは(陽)電子1個の質量分に相当し、約511keVである。

10

【0004】

イメージングの原理は、以下のものである。消滅放射線の同時計数がおこった場合、即ち、511keVの放射線が対向する2つの放射線検出器でほぼ同時刻に測定された場合、この2つの放射線検出器を結ぶ直線上で陽電子が対消滅した可能性が最も高い。この情報を、図1に示す如く、被検体10の周囲にリング状に配置した多くの放射線検出器16を用いて収集し、X線CTと同様な数学的手法によって再構成することにより、被検体10中の陽電子放出核種12の分布を近似する断層画像映像が得られる。図において、14は消滅放射線、18はベッドである。

20

【0005】

従って、放射線検出器16に求められる性能は、消滅放射線14の入射位置、エネルギー、入射時刻を、なるべく正確に測定できることである。ここで、ほぼ同時刻とは概ね15ナノ秒(ナノは $10^{-9}$ )以内の時間であり、放射線検出器の時刻決定の精度が高い場合には10ナノ秒以下、あるいは5ナノ秒以下とすることができる。

【0006】

このPET装置用検出器として、特許文献1に、図2に示すような多数の放射線検出器要素から構成される、深さ方向相互作用位置(DOI)情報を得ることが可能な放射線検出器集合体(DOI検出器とも称する)20が提案されている。図において、21~24は各層のシンチレータアレイ、26は受光素子である。

30

【0007】

PET装置等の内部に装荷されている放射線検出器集合体は測定対象物の放射能を相対測定する装置であり、その検出効率(感度)は、予め放射能値が付与された標準線源で求めるか、あるいは、凡その放射能値が付与された放射線源により、放射線検出器集合体の相対的な検出効率(感度)の経時的変化が求められていた。放射線源には半減期があり、定期的に交換しなければならないが、線源を交換すると、線源の放射能値の精度が悪いことから、PET装置等の内部に装荷されている放射線検出器集合体の検出効率(感度)の測定値も、図3に例示するように変わってしまっていた。従って、PET装置等の内部に装荷されている放射線検出器集合体の検出効率(感度)について精度の向上が求められてきた。

40

【0008】

一方、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 等、 $\gamma$ 線やX線、オージェ電子と $\beta$ 線を放出する放射線源の放射能は、4-同時測定装置などの放射線検出器により絶対測定されてきた。あるエネルギーの放射線(放射線1)と、あるエネルギーの放射線(放射線2)が、ある確率で、一回の崩壊において連続的に線源から放出される場合、放射線1を検出する計数率、放射線2を検出する計数率、及び、放射線1と放射線2を同時に検出する計数率を用いることにより、線源の放射能を絶対測定できることが一般に知られている(同時計数法と称する)(非特許文献1参照)。

【0009】

従って、放射能を絶対測定する場合、図4に例示する如く、放射線1を検出する放射線検出器(検出器1)と、放射線2を検出する放射線検出器(検出器2)が用いられてきた

50

。ここで、100は線源、110は放射線1としての線やX線、オージェ電子、112は放射線2としての線、120は検出器1としての例えば比例計数管、130と132は検出器2としての例えばNaI(Tl)シンチレータ、140は同時計数回路である。

【0010】

この方法では、比例計数管120で線110を計数し、シンチレータ130、132で線112を計数し、同時計数回路140で線と線が同時に検出した事象も計数するが、例えば、検出器1によって、放射線2を検出してしまう場合等があり、それらを補正するため、効率外挿法が用いられている（非特許文献1参照）。

【0011】

この方法は、放射線1を検出する計数率、放射線2を検出する計数率、及び、放射線1と放射線2を同時に検出する計数率から得られる、検出非効率値（ $= (1 - \text{検出効率}) / \text{検出効率}$ ）と見かけの放射能値を用い、図5に示す如く、この検出非効率値と見かけの放射能値の関係式を得て、検出非効率値が0即ち検出効率100%のときの放射能を絶対値とするものである。

10

【0012】

前者の4 - 同時測定装置で絶対測定を行うには、2種類の検出器が必要であった。また、計数率が高いと、検出器において、放射線が複数本同時に検出器に入射して、図6に示す如く、あたかも1本の別の放射線であるが如く検出されてしまう（パイルアップ）ことがある。このため、従来法では、数kBq程度の放射能値を持つ放射線源を測定しており、PET装置に使用されているような高い強度の放射能を絶対測定するのが難しかった。これを解決するため、放射線検出器集合体を用いて、1種類の検出器で高強度の放射線源の放射能を絶対測定する方法が提案されている（特許文献2）。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0013】

【特許文献1】特開2004-279057号公報（図1）

【特許文献2】特開2008-249337号公報

【非特許文献】

【0014】

【非特許文献1】ICRU report 52, Particle counting in radioactivity measurements, International Commission on radiation units and measurements, vol.1, 1994

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

しかしながら、前記方法は外挿が必要なため、測定点が多数必要である。従って、放射能を得るために、多数の同じ計算回路が必要で、部品の点数が多く必要であり、繰り返し計算が何度も必要で計算時間が必要になっていた。これに加え、外挿による放射能の不確かさが全体の不確かさの殆どを占めるといった性質があった。

【0016】

本発明は、前記従来の問題点を解決するべくなされたもので、放射線の多重散乱およびパイルアップの影響を考慮した放射能測定を実現することにより、放射能絶対値の不確かさを縮減することを第1の課題とする。

40

【0017】

本発明は、又、放射線検出器集合体の検出効率を決定可能とすることを第2の課題とする。

【0018】

本発明は、更に、放射線検出器集合体を用いて、放射線測定装置を校正可能とすることを第3の課題とする。

【課題を解決するための手段】

50

## 【 0 0 1 9 】

本発明は、電子陽電子対消滅光子と他光子が完全に弁別することは難しく、電子陽電子対消滅光子として他光子が計数されてしまう事象があることを前提にした放射能絶対測定方法である。

## 【 0 0 2 0 】

即ち、本発明は、電子陽電子対消滅光子と他光子のパイルアップ事象エネルギーウィンドウでパイルアップを検出した場合に、電子陽電子対消滅光子エネルギーウィンドウに於ける光子検出数を加算補正し、他光子エネルギーウィンドウに於ける光子検出事象及び電子陽電子対消滅光子と他光子の同時検出事象があったと見なすようにして前記第1の課題を解決したものである。

10

## 【 0 0 2 1 】

本発明は、又、放射線スペクトルに対して、電子陽電子対消滅光子エネルギーウィンドウ、他光子エネルギーウィンドウ、電子陽電子対消滅光子と他光子のパイルアップ事象エネルギーウィンドウを、光子によるピークの高エネルギー側の一部にかけて、低エネルギー散乱放射線の影響を低減するようにしたものである。

## 【 0 0 2 2 】

本発明は、又、前記の方法で決定された放射能絶対値を用いて、放射線検出器集合体の光子の計数率から、放射線検出器集合体の検出効率を求めるようにして、前記第2の課題を解決したものである。

20

## 【 0 0 2 3 】

又、前記の方法で決定された放射能絶対値を用いて、放射線検出器集合体を備えた放射線測定装置を校正するようにして、前記第3の課題を解決したものである。

## 【 0 0 2 4 】

ここで、前記放射線測定装置は、PET装置であることができる。

## 【 0 0 2 5 】

又、前記放射線検出器集合体を校正用仲介標準器として作業現場に搬入し、作業現場にある放射線源に放射能絶対値を与え、この放射線源を、作業現場で使用している放射線測定装置で測定して、該放射線測定装置の出力と放射能絶対値を関連付けるようにすることができる。

30

## 【 0 0 2 6 】

又、放射線源を分注して、放射線検出器集合体用放射線源と放射線測定装置用放射線源に分け、各放射線源の重さを測定し、放射線検出器集合体用放射線源を放射線検出器集合体で測定して、その放射能絶対値を付与し、この放射能絶対値と放射線源の重さから、放射線測定装置用放射線源に放射能絶対値を付与し、該放射線測定装置用放射線源を作業現場の放射線測定装置で測定して、該放射線測定装置の出力値と前記放射線測定装置用放射線源の放射能絶対値を関係付けるようにすることができる。

## 【 発明の効果 】

## 【 0 0 2 7 】

本発明により、放射線検出器集合体を備えたPET装置等でパイルアップの影響を低減して放射能絶対測定が精度良く行えるので、放射能値の付与されていない線源を用いてPET装置等の検出効率(感度)が決定できる。この際、直接放射能絶対値から検出効率(感度)を得られるので、安定的に精度良く検出効率(感度)が決定できる。

40

## 【 0 0 2 8 】

又、放射線検出器集合体を仲介標準器として放射線検出器の校正を行なうと、従来は寿命が短いため、輸送や測定が困難であった放射線源に対して、放射能絶対値を精度良く付与し、この放射能絶対値の付与された放射線源を用いて、放射線検出器の校正が、精度良く行なえる。また、輸送できる線源であっても、輸送中の紛失、盗難の恐れがあったが、本発明により、線源を輸送する必要がなくなり、安全に校正が行える。

## 【 0 0 2 9 】

これらの効果が、外挿を用いて放射線絶対値を計測する装置と比べ、安価に実現でき、

50

また放射能絶対値を得るための計算速度を向上させることができる。更に放射能絶対値の不確かさを小さくすることができる。

【0030】

又、これらの効果を、特に多数の放射線検出素子を持つPET装置を含む放射能測定装置について、従来法と比べ、小さい放射能不確かさで実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【0031】

【図1】従来のPET装置の概略構成を示す断面図

【図2】従来のDOI検出器の構成例を示す斜視図

【図3】従来のPET装置の校正における問題点を示す図

10

【図4】従来の4 - 同時測定装置の一例の構成を示すブロック図

【図5】効率外挿による絶対値測定の例を示す図

【図6】スペクトルのパイルアップの例を示す図

【図7】参考形態を示す図

【図8】参考形態の計数装置に内蔵される放射能絶対値算出回路の例を示すブロック図

【図9】同じく放射能絶対値算出回路の他の例を示すブロック図

【図10】同じく計算機に実装されるアルゴリズムの例の前半を示す流れ図

【図11】同じく後半を示す流れ図

【図12】同じく計算機に実装されるアルゴリズムの他の例を示す流れ図

【図13】本発明の第1実施形態の課題である多重散乱を示す図

20

【図14】本発明の第1実施形態の計数装置に内蔵される放射能絶対値算出回路の例を示すブロック図

【図15】光電吸収エネルギー範囲の例を示す図

【図16】第1実施形態で計算機に実装されるアルゴリズムの例の前半を示す流れ図

【図17】同じく後半を示す流れ図

【図18】本発明の第2実施形態を示す図

【図19】同じく第3実施形態を示す図

【図20】同じく第4実施形態を示す図

【発明を実施するための形態】

【0032】

30

以下図面を参照して、本発明の実施形態を詳細に説明する。

【0033】

図7は、外挿を用いない放射線検出器集合体を用いた放射能絶対測定方法及び放射線検出器集合体の検出効率（感度）測定方法を示す参考形態である。図中、200は放射線源、210、212は、例えばDOI検出器である放射線検出器集合体、220は計数装置、240は計算機、250は入力装置、260は表示装置である。

【0034】

放射線源200からは、複数の光子が放出される。放射線検出器集合体210、212に光子が入射し、計数装置220によって、光子の入射時刻と、光子のエネルギーと、光子を検出した検出素子の識別番号が組となって計数され、計算機240の記憶装置に記憶される。また、計数装置220で放射能値が計算される場合は、放射能値が計算機240に出力される。入力装置250によって計算機240を操作し、表示装置260により、入力内容や結果が表示される。

40

【0035】

光子を計数しながら放射能値を計算できるシステムの場合には、計数装置220に、図8あるいは図9のような、アルゴリズムをもつ回路が実装される。図8の場合は以下のおりである。光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の識別番号の組が、着目しているエネルギーを含む組のみを通すエネルギーフィルタ221及び222に送られる。ここで、221は電子陽電子対消滅光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンドウA）を持つものを通し、222は他光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンド

50

ウ G ) を持つものを通す。

【 0 0 3 6 】

2 2 3 はエネルギーウィンドウ A に於ける光子の検出個数を判別する回路である。

【 0 0 3 7 】

2 2 4、2 2 5 はエネルギーウィンドウ A とエネルギーウィンドウ G に於いてある時間幅での光子の同時検出を判別する回路であり、2 2 4 はエネルギーウィンドウ A に於いて光子が単数または複数検出される場合に用いられ、2 2 5 はエネルギーウィンドウ A に於いて単数光子が検出される場合に用いられる。

【 0 0 3 8 】

2 2 6、2 2 7、2 2 8、2 2 9、2 3 0 はカウンタであり、測定時間中、2 2 6 はエネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数又は複数検出事象の計数、2 2 7 はエネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数検出事象の計数、2 2 8 はエネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象のある時間幅での同時計数、2 2 9 はエネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象のある時間幅での同時計数、2 3 0 はエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数を行う。

10

【 0 0 3 9 】

2 3 1 は放射能絶対値算出回路であり、2 2 6 から 2 3 0 までのカウンタの値、および測定時間から、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数または複数検出事象の計数率  $a_s$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数検出事象の計数率  $a_{as}$ 、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数率  $a_g$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数または複数光子検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率  $c_s$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率  $c_{cs}$  が求められ、これらより放射能絶対値 A が算出される。

20

【 0 0 4 0 】

放射能絶対値 A の算出式は、例えば  $^{22}\text{Na}$  の場合は、以下のとおりである。

【 0 0 4 1 】

【 数 1 】

$$\frac{\rho_a \rho_\gamma}{\rho_c} - \delta \frac{\rho_{as} \rho_\gamma}{\rho_{cs}} = (a_\beta + a_{ec}) A (1 - \delta) \cdots (1)$$

30

$$\delta = \frac{\rho_{cs}}{\rho_c} \cdot \frac{(\rho_\gamma - \rho_c)}{(\rho_\gamma - \rho_c - \rho_{cs})} \cdots (2)$$

【 0 0 4 2 】

ここで、 $a_{ec}$  は、 $^{22}\text{Na}$  が  $\beta^+$  崩壊により  $^{22}\text{Ne}$  の 1 2 4 5 keV のエネルギー準位に崩壊する分岐比と EC 崩壊により同エネルギー準位に崩壊する分岐比である。同様に、核種ごとに原子核崩壊様式に則した計算式を立式することにより、放射能が求められる。

【 0 0 4 3 】

この得られた放射能絶対値は、図 7 に示した計算機 2 4 0 に送出される。

40

【 0 0 4 4 】

また、図 9 の場合は以下のとおりである。光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の識別番号の組が、着目しているエネルギーを含む組のみを通すエネルギーフィルタ 2 7 1 及び 2 7 2 に送られ、更にスペクトルアナライザ 2 7 3 に送られる。ここで、エネルギーフィルタ 2 7 1 は電子陽電子対消滅光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンドウ A）を持つものを通し、エネルギーフィルタ 2 7 2 は他光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンドウ G）を持つものを通す。またスペクトルアナライザ 2 7 3 はすべてのデータの組を受け取り、光子スペクトルを作成する。

【 0 0 4 5 】

50

同時事象検知回路 274 は、エネルギーウィンドウ A に於ける光子とエネルギーウィンドウ G に於ける光子のある時間幅での同時検出を検知するものである。

【0046】

カウンタ 275、276、277 は、それぞれ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の検出事象の計数、エネルギーウィンドウ A に於ける光子検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象のある時間幅での同時計数、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数を行う。

【0047】

計数率比計算回路 278 はスペクトルアナライザ 273 により得られた光子スペクトルから、エネルギーウィンドウ A について、ピーク部分と連続部分を分離し、ピーク部分の計数と連続部分の計数を求め、これと測定時間により電子陽電子対消滅光子の光電吸収による計数率に対する他光子の非光電吸収による計数率の比を得る。ピーク部分のカウントと連続部分のカウントの分離は、文部科学省放射能測定シリーズ 7、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーに記載の方法等を用いることができる。ピーク部分の計数率  $\rho_{peak}$  と連続部分の計数率  $\rho_{cont}$  から、計数率比は  $\rho_{cont} / \rho_{peak}$  と求められる。

10

【0048】

放射能絶対値算出回路 279 では、測定時間とカウンタ 275、276、277 から得られる計数からエネルギーウィンドウ A に於ける光子の検出事象の計数率  $\rho_a$ 、エネルギーウィンドウ G に於ける光子の検出事象の計数率  $\rho_g$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子の検出事象の同時計数率  $\rho_c$  を得て、計数率比計算回路 278 より計数率比  $\rho_{cont} / \rho_{peak}$  を得て、放射能絶対値 A を算出する。

20

【0049】

放射能絶対値 A の算出方法は、例えば  $^{22}\text{Na}$  の場合は以下の式のとおりである。

【0050】

【数 2】

$$\frac{\rho_a \rho_\gamma}{\rho_c} = (a_\beta + a_{ec}) A \left( 1 + \frac{\rho_{cont}}{\rho_{peak}} \right) \quad \dots (3)$$

【0051】

30

ここで、 $a_{ec}$  は  $^{22}\text{Na}$  が  $\beta^+$  崩壊により  $^{22}\text{Ne}$  の 1245 keV のエネルギー準位に崩壊する分岐比と EC 崩壊により同エネルギー準位に崩壊する分岐比である。同様に、核種ごとに原子核崩壊様式に則した計算式を立式することにより、放射能が求められる。

【0052】

図 7 に示した計算機 240 が省略され、入力装置 250 及び表示装置 260 が、直接、計数装置 220 に接続されていても良い。

【0053】

一方、計数装置 220 ではなく計算機 240 で、放射能計算を行う場合は、計数装置 220 から、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータが組になって出力され、計算機 240 に図 8 または図 9 のアルゴリズムが実装されるか、又は、計数装置 220 から、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータが組になって出力され、計算機 240 内の記憶装置に一旦記憶した後、計算機 240 に実装された図 10 ~ 11、図 12 のようなアルゴリズムにより放射能を計算することもできる。

40

【0054】

具体的には、まず、図 10 のステップ 301 で、電子陽電子対消滅光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンドウ A）および他光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンドウ G）を決定する。

【0055】

次いで、ステップ 302 で、エネルギーウィンドウ A 内にある、光子の入射時刻と光子の

50



エネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組のみの光子の入射時刻順に並んだデータ列 1 と、エネルギーウィンドウ G 内にある、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組のみの光子の入射時刻順に並んだデータ列 2 を作る。

【 0 0 5 6 】

次いで、ステップ 3 0 3 で、まだ読み込んでいないデータの組の中で最も入射時刻の古いデータの組を、データ列 1 又はデータ列 2 から読み込む。

【 0 0 5 7 】

次いで、ステップ 3 0 4 で、データ列 1 から読み込んだのか判別する。ステップ 3 0 4 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 0 5 に進む。

10

【 0 0 5 8 】

ステップ 3 0 5 では、データ列 1 にある時間幅で同時刻入射のデータの組があるか判別する。ステップ 3 0 5 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 0 6 に進む。ステップ 3 0 6 では、同時刻入射のデータの組をデータ列 1 から読み込み、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させる。なお、同時刻入射のデータの組が 2 つ以上の複数存在しても計数値は 1 つ増加させる。

【 0 0 5 9 】

次いで、ステップ 3 0 7 で、データ列 2 にある時間幅での同時刻入射の組があるか判別する。ステップ 3 0 7 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 0 8 に進む。

20

【 0 0 6 0 】

ステップ 3 0 8 では、データ列 2 よりデータを読み込み、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数値を 1 つ増加させる。更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

【 0 0 6 1 】

一方、ステップ 3 0 5 の判定結果が「いいえ」の場合は、ステップ 3 0 9 に進む。

【 0 0 6 2 】

ステップ 3 0 9 では、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させる。

30

【 0 0 6 3 】

次いで、ステップ 3 1 0 で、データ列 2 にある時間幅で同時刻入射の組があるかどうか判定する。ステップ 3 1 0 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 1 1 に進む。

【 0 0 6 4 】

ステップ 3 1 1 では、データ列 2 よりデータを読み込み、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

40

【 0 0 6 5 】

一方、ステップ 3 0 4 の判定結果が「いいえ」の場合は、図 1 1 のステップ 3 1 2 に進み、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数値を 1 つ増加させる。

【 0 0 6 6 】

次いで、ステップ 3 1 3 で、ある時間幅で同時刻入射のデータの組がデータ列 1 にあるか判別する。ステップ 3 1 3 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 1 4 に進む。

【 0 0 6 7 】

ステップ 3 1 4 では、データ列 1 から同時刻入射のデータの組を読み込む。

【 0 0 6 8 】

次いで、ステップ 3 1 5 で、データ列 1 にある時間幅で同時刻入射の組があるか判別する。ステップ 3 1 5 の判別結果が「はい」の場合はステップ 3 1 6 に進む。

50

## 【 0 0 6 9 】

ステップ 3 1 6 では、データ列 1 よりデータを読み込む。エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

## 【 0 0 7 0 】

一方、ステップ 3 1 5 の判定結果が「いいえ」の場合は、ステップ 3 1 7 に進み、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

10

## 【 0 0 7 1 】

図 1 0 のステップ 3 0 8、3 1 1、図 1 1 の 3 1 6、3 1 7 終了後、又は、図 1 0 のステップ 3 0 7、3 1 0、図 1 1 の 3 1 3 の判定結果が「いいえ」の場合は、図 1 1 のステップ 3 1 8 に進み、データの組を全て読み込んだか判別する。ステップ 3 1 8 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 1 9 に進み、測定時間と各計数値から得られる、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数の計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数及び複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数率と、例えば式 ( 1 ) ~ ( 2 ) を用いて、放射能絶対値を算出する。一方、ステップ 3 1 8 の判定結果が「いいえ」の場合、図 1 0 のステップ 3 0 3 に進む。

20

## 【 0 0 7 2 】

図 1 2 においては、ステップ 3 3 1 で、全データを用いて光子エネルギースペクトルを作成する。

## 【 0 0 7 3 】

次いで、ステップ 3 3 2 で、得られた光子エネルギースペクトルからエネルギーウィンドウ A 内について、ピーク部分と連続部分を分離し、ピーク部分の計数と連続部分の計数を求め、これと測定時間により電子陽電子対消滅光子の光電吸収による計数率  $\text{peak}$  で他光子の非光電吸収による電子陽電子対消滅光子エネルギーウィンドウに於ける計数率  $\text{cont}$  を除した計数率比  $\text{cont} / \text{peak}$  を得る。ピーク部分のカウントと連続部分のカウントの分離は、文部科学省放射能測定シリーズ 7、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーに記載の方法等を用いることができる。

30

## 【 0 0 7 4 】

次いで、ステップ 3 3 3 で、電子陽電子対消滅光子の光電吸収エネルギー範囲 ( エネルギーウィンドウ A ) および他光子の光電吸収エネルギー範囲 ( エネルギーウィンドウ G ) を決定する。

## 【 0 0 7 5 】

次いで、ステップ 3 3 4 で、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組のみの光子の入射時刻順に並んだデータ列 1 と、エネルギーウィンドウ G に於ける光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組のみの光子の入射時刻順に並んだデータ列 2 を作る。

40

## 【 0 0 7 6 】

次いで、ステップ 3 3 5 で、まだ読み込んでいないデータの組の中で最も入射時刻の古いデータの組を、データ列 1 又はデータ列 2 から読み込む。

## 【 0 0 7 7 】

次いで、ステップ 3 3 6 で、データ列 1 から読み込んだのか判別する。ステップ 3 3 6 の判別結果が「はい」の場合は、ステップ 3 3 7 に進む。

50

## 【0078】

ステップ337では、エネルギーウィンドウAに於ける光子検出事象の計数値を1つ増加させる。

## 【0079】

次いで、ステップ338で、データ列2に、ある時間幅で同時刻入射の組があるか判別する。ステップ338の判別結果が「はい」の場合は、ステップ339に進む。

## 【0080】

ステップ339では、データ列2よりデータを読み込み、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数値を1つ増加させ、更にエネルギーウィンドウAに於ける光子とエネルギーウィンドウGに於ける光子の同時検出事象の計数値を1つ増加させる。

10

## 【0081】

一方、ステップ336の判別結果が「いいえ」の場合は、ステップ340に進む。

## 【0082】

ステップ340では、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数値を1つ増加させる。

## 【0083】

次いで、ステップ341で、データ列1にある時間幅で同時刻入射の組があるか判別する。ステップ341の判別結果が「はい」の場合は、ステップ342に進む。

## 【0084】

ステップ342では、データ列1からデータを読み込み、エネルギーウィンドウAに於ける光子検出事象の計数値を1つ増加させ、更にエネルギーウィンドウAに於ける光子とエネルギーウィンドウGに於ける光子の同時検出事象の計数値を1つ増加させる。

20

## 【0085】

ステップ339、342終了後、または、ステップ338、341の判別結果が「いいえ」の場合、ステップ343へ進む。

## 【0086】

ステップ343では、データの組を全て読み込んだか判別する。ステップ343の判定結果が「はい」の場合は、ステップ344に進む。

## 【0087】

ステップ344では、エネルギーウィンドウAに於ける光子検出事象の計数率 $\rho_a$ 、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数率 $\rho_g$ 、エネルギーウィンドウAに於ける光子検出事象とエネルギーウィンドウAに於ける光子検出事象の同時計数率 $\rho_c$ 、エネルギーウィンドウAに於ける電子陽電子対消滅光子の光電吸収によるピーク部分の計数率 $\rho_{peak}$ で他光子による連続部分の計数率 $\rho_{cont}$ を除した計数率比 $\rho_{cont}/\rho_{peak}$ を用いて、例えば、前出(3)式により放射能絶対値Aを算出する。

30

## 【0088】

一方、ステップ343の判別結果が「いいえ」の場合、ステップ335に戻る。

## 【0089】

以上のように、放射線検出器集合体によって、放射線源の放射能絶対値が計算できるので、これを基に単位時間当たりの放射線検出器集合体に入射する光子の数が計算できる。放射線源から放出される放射線の原子核1崩壊当たりの放出率は、Table of Isotopes, eighth edition, volume I, II, R. B. Firestone and V. S. Shirley, Wiley Interscience、Table of radionuclides, Volume 1, 2, 3, Monographie Bl PM-5, Bureau International Des Poids et Mesures、Recommended data, the Laboratoire National Henri Becquerelなどの核データから参照でき、又、線源の位置と放射線検出器集合体の幾何学的関係による係数、及び、これらの数値と求められた線源の放射能から、放射線検出器集合体に入射する放射線の単位時間当たりの数を計算することができる。放射線検出器集合体の光子の計数率を単位時間当たりの放射線検出器集合体に入射する光子で除することで、放射線検出器集合体の検出効率(感度)が求められる。また、放射線検出器集合体の光子の計数率を単位時間当たりの線源からの光子の発生数あるいは線源

40

50

の放射能で除して検出効率（感度）とすることもあり、こちらも計算可能である。

【0090】

なお、参考形態では、例えば核種が $^{22}\text{Na}$ の場合、図13(A)に例示する如く、他光子が511keVのエネルギーウィンドウに入るのは1回だけと仮定していたが、検出素子が増えると、図13(B)に例示する如く、他光子が511keVのエネルギーウィンドウに2個同時に計数されたりする放射線の多重散乱の影響を受けてしまうことが、避けられなかった。さらに、多数の検出素子を用いることでパイルアップを起こりにくくしていたが、パイルアップが起こってしまう場合に対処していなかった。以下、このような問題を解決した本発明の第1実施形態について説明する。

【0091】

本実施形態の全体構成は、図7に示した参考形態と同じであるので説明は省略する。

【0092】

参考形態の図8に対して、本実施形態においては、計数装置220に、図14のような、アルゴリズムをもつ回路が実装される。光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の識別番号の組が、着目しているエネルギーを含む組のみを通すエネルギーフィルタ281、282及び283に送られる。ここで、281は電子陽電子対消滅光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンドウA）を持つものを通し、282は他光子の光電吸収エネルギー範囲（エネルギーウィンドウG）を持つものを通し、283は電子陽電子対消滅光子の光電吸収と他光子の光電吸収によるパイルアップのエネルギー範囲（エネルギーウィンドウP）を持つものを通す。

【0093】

ここで、光電吸収エネルギー範囲については、必ずしも光電吸収エネルギーピーク全範囲とする必要は無い。例えば、図15に示す如く、光電吸収エネルギーピークの高エネルギー側半分を光電吸収エネルギー範囲とするなどして、コンプトン効果による低エネルギー散乱光子の影響を低減させ、光電効果による部分のみを用いることによって放射能測定不確かさを抑制することも可能である。光電吸収エネルギー範囲は、高エネルギー側半分に限定されず、低エネルギー側でカットすれば良い。なお、光電吸収エネルギー範囲を狭く設定すると、低エネルギー散乱光子の影響をより低減することも可能であるが、計数率が低下し、放射能測定不確かさを小さくするために測定時間を長くする必要が出てくるため、光電吸収エネルギー範囲は測定時間との兼ね合いで、設定する。図15のエネルギーウィンドウPの部分が、参考形態で無視していたパイルアップの部分である。

【0094】

エネルギーフィルタ283を通ったデータは、以降の回路において、エネルギーフィルタ281（即ちエネルギーウィンドウA）とエネルギーフィルタ282（即ちエネルギーウィンドウG）を同時に各々1つずつデータが通ったことになるように扱う。即ちエネルギーウィンドウAで1つ光子が検出され、エネルギーウィンドウGで1つ光子が検出されたと見なす。また、これは、同時に他のデータがエネルギーウィンドウAやGを通ることを妨げず、同時に他のデータがエネルギーウィンドウAやGを通った場合、同時検出光子数はそれぞれ加算される。

【0095】

284はエネルギーウィンドウAに於ける光子検出数を判別する回路である。

【0096】

285、290、294はエネルギーウィンドウAに於ける光子とエネルギーウィンドウGに於ける光子のある時間幅での同時検出を判別する回路であり、285はエネルギーウィンドウAに於いて光子が単数または複数検出した場合に用いられ、290はエネルギーウィンドウAに於いて光子が単数検出した場合に用いられ、294はエネルギーウィンドウAに於いて二光子検出した場合に用いられる。

【0097】

286、287、288、291、292、295、296はカウンタであり、測定時間中、286はエネルギーウィンドウAに於ける光子の単数または複数検出事象の計数、2

10

20

30

40

50

87はエネルギーウィンドウGに於ける光子の検出事象の計数、288はエネルギーウィンドウAに於ける光子の単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子の検出事象のある時間幅での同時計数、291はエネルギーウィンドウAに於ける光子の単数検出事象の計数、292はエネルギーウィンドウAに於ける光子の単数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子の検出事象のある時間幅での同時計数、295はエネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象の計数、296はエネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子の検出事象のある時間幅での同時計数を行う。

【0098】

293と297は、エネルギーウィンドウAに於ける光子検出と、エネルギーウィンドウAとエネルギーウィンドウGに於ける光子同時検出を行う回路ユニットであり、必要に応じて、エネルギーウィンドウAでの三光子検出、エネルギーウィンドウAでの四光子検出、というように、回路ユニットを増やすこともできる。

【0099】

289は放射能絶対値算出回路であり、296、297等のカウンタの値、および測定時間から、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数または複数検出事象の計数率 $a_a$ 、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数率 $a_g$ 、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率 $a_{ag}$ 、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数検出事象の計数率 $a_{as}$ 、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率 $a_{asg}$ 、エネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象の計数率 $a_{ad}$ 、エネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率 $a_{adg}$ 等が求められ、これらより放射能絶対値Aが算出される。

【0100】

放射能絶対値Aの算出式は、例えば核種が $^{22}\text{Na}$ であり、エネルギーウィンドウAの光子検出数の場合分けが、光子単数または複数、光子単数、二光子の場合は、以下のとおりである。

【0101】

【数3】

$$(a_{\beta} + a_{ec})A = \frac{[\rho_a \rho_{\gamma} \{ \rho_{as\gamma} (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma} - \rho_{as\gamma}) - (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma}) (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma} - \rho_{ad\gamma}) \} + \rho_{as} \rho_{\gamma} (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma}) (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma} - \rho_{as\gamma}) + \rho_{ad} \rho_{\gamma} (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma})^2]}{[\rho_{a\gamma} \{ \rho_{as\gamma} (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma} - \rho_{as\gamma}) - (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma}) (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma} - \rho_{ad\gamma}) \} + \rho_{as\gamma} (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma}) (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma} - \rho_{as\gamma}) + \rho_{ad\gamma} (\rho_{\gamma} - \rho_{a\gamma})^2]} \quad \dots (4)$$

【0102】

ここで、 $a_{ec}$ は、 $^{22}\text{Na}$ が $\beta^+$ 崩壊により $^{22}\text{Ne}$ の1245keVのエネルギー準位に崩壊する分岐比とEC崩壊により同エネルギー準位に崩壊する分岐比である。同様に、核種ごとに原子核崩壊様式に則した計算式を立式し、必要に応じた数の計数率のデータを用いることにより、放射能が求められる。

【0103】

この得られた放射能絶対値は、図7に示した計算機240に送出される。

【0104】

一方、計数装置220ではなく計算機240で、放射能計算を行う場合は、計数装置220から、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータが組になって出力され、計算機240に図14のアルゴリズムが実装されるか、又は、計数装置220から、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータが組になって出力され、計算機240内の記憶装置に一旦記憶した後、計算機240に実装された図16~17のようなアルゴリズムにより放射能を計算することもできる。

【0105】

具体的には、まず、図16のステップ351で、電子陽電子対消滅光子の光電吸収エネルギー範囲(エネルギーウィンドウA)、他光子の光電吸収エネルギー範囲(エネルギーウィンド

10

20

30

40

50

ウ G ) および電子陽電子対消滅光子の光電吸収と他光子の光電吸収のパイルアップのエネルギー範囲 ( エネルギーウィンドウ P ) を決定する。ここで、光電吸収エネルギー範囲については、必ずしも光電吸収エネルギーピーク全範囲とする必要は無い。例えば、図 15 に示したごとく、光電吸収エネルギーピークの高エネルギー側半分を光電吸収エネルギー範囲とするなどして、低エネルギー散乱光子の影響を低減させ、放射能測定不確かさを抑制することも可能である。光電吸収エネルギー範囲を狭く設定すると、低エネルギー散乱光子の影響をより低減することも可能であるが、計数率が低下し、放射能測定不確かさを小さくするために測定時間を長くする必要が出てくるため、光電吸収エネルギー範囲は測定時間との兼ね合いで、設定する。

**【 0 1 0 6 】**

次いで、ステップ 3 5 2 で、エネルギーウィンドウ A 内のエネルギーである、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組のみの光子の入射時刻順に並んだデータ列 1 と、エネルギーウィンドウ G 内のエネルギーである、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組のみの光子の入射時刻順に並んだデータ列 2 を作る。このとき、エネルギーウィンドウ P 内のエネルギーである、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組については、エネルギーウィンドウ A 内のエネルギーである、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組及び、エネルギーウィンドウ G 内のエネルギーである、光子の入射時刻と光子のエネルギーと光子を検出した検出素子の番号のデータの組が各々一つずつあるとして扱う。

**【 0 1 0 7 】**

次いで、ステップ 3 5 3 で、まだ読み込んでいないデータの組の中で最も入射時刻の古いデータの組を、データ列 1 又はデータ列 2 から読み込む。

**【 0 1 0 8 】**

次いで、ステップ 3 5 4 で、データ列 1 から読み込んだのか判別する。ステップ 3 5 4 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 5 5 に進む。

**【 0 1 0 9 】**

ステップ 3 5 5 では、データ列 1 にある時間幅で同時刻入射のデータの組がいくつあるか判別する。ステップ 3 5 5 の判定結果が「他の分岐に該当しない」場合は、ステップ 3 5 6 に進む。

**【 0 1 1 0 】**

ステップ 3 5 6 では、ある時間幅で同時刻入射のデータの組をデータ列 1 から読み込み、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させる。なお、同時刻入射のデータの組が 2 つ以上 ( 複数 ) 存在しても計数値は 1 つのみ増加させる。

**【 0 1 1 1 】**

次いで、ステップ 3 5 7 で、データ列 2 にある時間幅での同時刻入射の組があるか判別する。ステップ 3 5 7 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 5 8 に進む。

**【 0 1 1 2 】**

ステップ 3 5 8 では、データ列 2 よりデータを読み込み、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数値を 1 つ増加させる。更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

**【 0 1 1 3 】**

一方、ステップ 3 5 5 の判定結果が「1」の場合は、コンポーネント 3 6 2 のステップ 3 5 9 に進む。

**【 0 1 1 4 】**

ステップ 3 5 9 では、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させる。

10

20

30

40

50

## 【 0 1 1 5 】

次いで、ステップ 3 6 0 で、データ列 2 にある時間幅で同時刻入射の組があるかどうか判定する。ステップ 3 6 0 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 6 1 に進む。

## 【 0 1 1 6 】

ステップ 3 6 1 では、データ列 2 よりデータを読み込み、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

## 【 0 1 1 7 】

一方、ステップ 3 5 5 の判定結果が「2」の場合は、コンポーネント 3 6 6 のステップ 3 6 3 に進み、ある時間幅で同時入射のデータの組をデータ列 1 から読み込み、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させる。

## 【 0 1 1 8 】

次いで、ステップ 3 6 4 で、データ列 2 にある時間幅で同時刻入射の組があるかどうか判定する。ステップ 3 6 4 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 6 5 に進む。

## 【 0 1 1 9 】

ステップ 3 6 5 では、データ列 2 よりデータを読み込み、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させ、更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

## 【 0 1 2 0 】

コンポーネント 3 6 2 とコンポーネント 3 6 6 はエネルギーウィンドウ A に於ける検出光子数に基づく計数を行う部分であり、コンポーネント 3 6 2 は光子数が 1 の場合、コンポーネント 3 6 6 は光子数が 2 の場合である。必要に応じて、同様のアルゴリズムを光子数が 3 の場合、光子数が 4 の場合、というように増やしていくことができる。

## 【 0 1 2 1 】

一方、ステップ 3 5 4 の判定結果が「いいえ」の場合は、図 1 7 のステップ 3 6 7 に進み、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数値を 1 つ増加させる。

## 【 0 1 2 2 】

次いで、ステップ 3 6 8 で、ある時間幅で同時刻入射のデータの組がデータ列 1 にあるか判別する。ステップ 3 6 8 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 3 6 9 に進む。

## 【 0 1 2 3 】

ステップ 3 6 9 では、データ列 1 からある時間幅の同時刻入射のデータの組を読み込む。

## 【 0 1 2 4 】

次いで、ステップ 3 7 0 で、データ列 1 にある時間幅で同時刻入射の組がいくつあるか判別する。ステップ 3 7 0 の判別結果が「他の分岐に該当しない」の場合はステップ 3 7 1 に進む。

## 【 0 1 2 5 】

ステップ 3 7 1 では、データ列 1 よりデータを読み込む。エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

## 【 0 1 2 6 】

一方、ステップ 3 7 0 の判定結果が「1」の場合は、ステップ 3 7 2 に進み、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1

10

20

30

40

50

つ増加させる。更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

【0127】

ステップ 370 の判定結果が「2」の場合は、ステップ 373 に進み、ある時間幅で同時入射のデータの組をデータ列 1 から読み込み、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。更に、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数値を 1 つ増加させ、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出の同時事象の計数値を 1 つ増加させる。

10

【0128】

ステップ 372、ステップ 373 は、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の検出数が 1 の場合と 2 の場合の処理を表しており、必要に応じて、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の検出数が 3 の場合、4 の場合、というように、ステップを増やすことができる。

【0129】

図 16 のステップ 358、361、365、図 17 のステップ 371、372、373 終了後、又は、図 16 のステップ 357、360、364、図 17 のステップ 368 の判定結果が「いいえ」の場合は、図 17 のステップ 374 に進み、データの組を全て読み込んだか判別する。

20

【0130】

ステップ 374 の判定結果が「はい」の場合は、ステップ 375 に進み、測定時間と各計数値から得られる、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象の計数率  $a_a$ 、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数率  $a_g$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数または複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける検出事象の同時計数率  $a_{ag}$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数率  $a_{as}$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける単数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率  $a_{asg}$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出事象の計数率  $a_{ad}$ 、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率  $a_{adg}$  等を用いて、例えば  $^{22}\text{Na}$  の場合は、例えば式 (4) を用いて、放射能絶対値を算出する。

30

【0131】

一方、ステップ 374 の判定結果が「いいえ」の場合、図 16 のステップ 353 に戻る。

【0132】

以上のように、放射線検出器集合体によって、放射線源の放射能絶対値が計算できるので、これを基に単位時間当たりの放射線検出器集合体に入射する光子の数が計算できる。放射線源から放出される放射線の原子核 1 崩壊当たりの放出率は、Table of Isotopes, eighth edition, volume I, II, R. B. Firestone and V. S. Shirley, Wiley Interscience、Table of radionuclides, Volume 1, 2, 3, Monographie Bl PM-5, Bureau International Des Poids et Mesures、Recommended data, the Laboratoire National Henri Becquerel などの核データから参照でき、又、線源の位置と放射線検出器集合体の幾何学的関係による係数、及び、これらの数値と求められた線源の放射能から、放射線検出器集合体に入射する放射線の単位時間当たりの数を計算することができる。放射線検出器集合体の光子の計数率を単位時間当たりの放射線検出器集合体に入射する光子で除することで、放射線検出器集合体の検出効率（感度）が求められる。また、放射線検出器集合体の光子の計数率を単位時間当たりの線源からの光子の発生数あるいは線源の放射能で除して検出効率（感度）とすることもあり、こちらも計算可能である。

40

【0133】

次に、本発明に係る放射線検出器集合体による、放射線測定装置の校正方法を示す第 2

50



実施形態を図 18 に示す。図中、400 は放射線源、410 は、例えば、多数の DOI 検出器でなる放射線検出器集合体 412 を備えた PET 装置、220 は、参考形態と同様の計数装置、240 は、同じく計算機、250 は、同じく入力装置、260 は、同じく表示装置である。

【0134】

本実施形態においては、第 1 実施形態と同様な方法で放射線源 400 の放射能絶対値を測定した後、該放射能絶対値を用いて、PET 装置 410 の検出効率（感度）を決定し、校正する。

【0135】

具体的には、例えば図 8 又は図 9 のアルゴリズムを用いて、計数装置 220 及び計算機 240 によりエネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数または複数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数または複数光子検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子の単数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率から、放射能絶対値を決定する。

10

【0136】

又は、例えば、図 14 のアルゴリズムを用いて、計数装置 220 及び計算機 240 により、エネルギーウィンドウ P も考慮しながら、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数及び複数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数及び複数検出事象とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける光子単数検出事象の計数率とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウ A に於ける二光子検出事象の計数率とエネルギーウィンドウ G に於ける光子検出事象の同時計数率を用いて、放射能絶対値を決定する。

20

【0137】

そして、放射能から単位時間当たり PET 装置 410 に入射する放射線の数を、幾何学的条件、及び、例えば、核データ Recommended data, the Laboratoire National Henri Becquerel による放射線の放出率から算出する。

30

【0138】

そして、PET 装置 410 の計数率を、単位時間当たり PET 装置 410 に入射する放射線の数で除することにより、検出効率（感度）を決定する。また、PET 装置 410 の計数率を、単位時間当たり放射線源 400 から放出される光子数で除することにより、検出効率（感度）とすることも可能である。

【0139】

本実施形態によれば、PET 装置 410 に元々備えられている放射線検出器集合体 412 を利用して、放射線源 400 を校正することが可能になる。

【0140】

次に、本発明に係る放射線検出器集合体による、放射線測定装置の校正方法を示す第 3 実施形態を図 19 に示す。図において、500 は作業現場の放射線源、510 は、校正事業者から送られた、例えば DOI 検出器である放射線検出器集合体、520 は、作業現場で使用される放射線測定装置である。

40

【0141】

作業現場で製造された、あるいは、作業現場で使用されている放射線源 500 は、放射線検出器集合体 510 で測定され、放射能絶対値が放射線源 500 に付与される。この放射能絶対値が付与された放射線源 500 は、作業現場の放射線測定装置 520 で測定され、放射線測定装置 520 の出力値と放射線源 500 の放射能絶対値が関係付けられる。これにより、放射線測定装置 520 の校正が行なえる。

【0142】

50

次に、本発明に係る放射線検出器集合体による、放射線測定装置の校正方法を示す第4実施形態を図20に示す。図において、600は液状の線源、602、604は分注された線源、610は、例えばDOI検出器でなる放射線検出器集合体、620は、作業現場で使用される放射線測定装置である。

【0143】

作業現場で製造された、あるいは作業現場で使用されている液体状の放射線源600が分注され、放射線検出器集合体610用の放射線源602と、放射線測定装置620用の放射線源604となる。各放射線源602、604の重さが測定される。

【0144】

放射線源602は、放射線検出器集合体610で測定され、放射能絶対値が放射線源602に付与される。この放射能絶対値と放射線源の重さから、放射線源604に放射能絶対値が付与され、放射線源604は、作業現場の放射線測定装置620で測定され、放射線測定装置620の出力値と放射線源604の放射能絶対値が関係付けられ、放射線測定装置620が校正される。

10

【0145】

[参考例1]

図7の構成で、放射線源200として $^{22}\text{Na}$ 線源、放射線検出器集合体210、212としてDOI検出器を用いた。DOI検出器(210、212)に対して所定の位置に放射線源200を設置した。DOI検出器(210、212)から出力されるスペクトルのうち、511keVの電子陽電子対消滅光子の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウAと、1275keVの線(他光子)の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウGにより、エネルギーウィンドウAに於ける光子の単数または複数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子の単数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子の単数または複数光子検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子の単数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率を測定して、図8、図9に示した同時計数法により、 $^{22}\text{Na}$ 線源(200)の放射能絶対値を決定することができた。

20

【0146】

[参考例2]

放射線検出器集合体の検出効率(感度)の校正法の参考例として、図18の構成で、PET装置410により、 $^{22}\text{Na}$ 線源(400)から放出される光子を検出した。511keVの電子陽電子対消滅光子の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウAと、1275keVの線(他光子)の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウGにより、図8又は図9のアルゴリズムを用いて、計数装置220及び計算機240によりエネルギーウィンドウAに於ける光子の単数または複数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子の単数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子の単数または複数光子検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子の単数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率を測定して、放射能絶対値を決定した。放射線源から放出される電子陽電子対消滅光子の数を、放射能および核データRecommended data, the Laboratoire National Henri Becquerelによる放射線の放出率から算出した。PET装置410の計数率を、単位時間当たり放出される電子陽電子対消滅光子数で除することにより、検出効率(感度)を決定できた。

30

40

【実施例1】

【0147】

図7の構成で、放射線源200として $^{22}\text{Na}$ 線源、放射線検出器集合体210、212としてDOI検出器を用いた。DOI検出器(210、212)に対して所定の位置に放射線源200を設置した。DOI検出器(210、212)から出力されるスペクトルのうち、511keVの電子陽電子対消滅光子の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギー

50

ギウインドウAと、1275 keVの線（他光子）の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウG、511 keVの電子陽電子対消滅光子の光電吸収と1275 keVの線（他光子）の光電吸収のピルアップピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウPにより、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数及び複数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数及び複数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数検出事象の計数率とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象の計数率とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率を測定して、図14に示した同時計数法により、 $^{22}\text{Na}$ 線源（200）の放射能絶対値を決定することができた。

10

#### 【実施例2】

##### 【0148】

放射線検出器集合体の検出効率（感度）の校正法の実施例として、図18の構成で、PET装置410により、 $^{22}\text{Na}$ 線源（400）から放出される光子を検出した。511 keVの電子陽電子対消滅光子と、1275 keVの線（他光子）により、図14のアルゴリズムを用いて、計数装置220及び計算機240により、511 keVの電子陽電子対消滅光子の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウAと、1275 keVの線（他光子）の光電吸収ピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウG、511 keVの電子陽電子対消滅光子と1275 keVの線（他光子）の光電吸収のピルアップピークの一部にかけられたエネルギーウィンドウPを設定して、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数及び複数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数及び複数検出事象とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける光子単数検出事象の計数率とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率、エネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象の計数率、エネルギーウィンドウAに於ける二光子検出事象の計数率とエネルギーウィンドウGに於ける光子検出事象の同時計数率を測定して、放射能絶対値を決定した。放射線源から放出される電子陽電子対消滅光子の数を、放射能および核データRecommended data, the Laboratoire National Henri Becquerelによる放射線の放出率から算出した。PET装置410の計数率を、単位時間当たり放出される電子陽電子対消滅光子数で除することにより、検出効率（感度）を決定できた。

20

30

#### 【実施例3】

##### 【0149】

図19の構成で、放射線源500として $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 線源、放射線検出器集合体510としてDOI検出器、放射線測定装置520としてRIキャリアプレータを用いた。 $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 線源（500）をDOI検出器（510）によって測定し、放射能の絶対値を付与した。RIキャリアプレータ（520）でも、 $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 線源（500）を測定し、RIキャリアプレータ（520）の出力値と $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$ 線源（500）の放射能値の関係性を求めた。これにより、RIキャリアプレータ（520）を校正できた。

40

#### 【実施例4】

##### 【0150】

図20の構成で、放射線源600として $^{22}\text{Na}$ 線源、放射線検出器集合体610としてDOI検出器、放射線測定装置620としてRIキャリアプレータを用いた。 $^{22}\text{Na}$ 線源（600）を分注して、DOI検出器用放射線源（602）とRIキャリアプレータ用放射線源（604）を製作し、それぞれの放射線源の重さを測定した後、それぞれで測定を行った。

##### 【0151】

DOI検出器（610）によって放射線源（602）の放射能の絶対値が決定され、分

50

注時の重さから、 $^{22}\text{Na}$ 線源(600)の放射能濃度を決定した。又、この放射能濃度から、RIキャリブレーション用放射線源(604)の放射能値を求め、RIキャリブレーション(620)の出力値とRIキャリブレーション用放射線源(604)の放射能値の関係を求め、これをもって、RIキャリブレーション(620)を校正できた。

【0152】

なお、前記実施形態においては、2個又は多数の放射線検出器集合体がいわれているが、放射線検出器集合体の数は1個でも構わない。又、放射線検出器集合体も、DOI検出器に限定されず、その素子数も限定されない。放射線源や放射線の種類も、前記実施形態に限定されない。

【産業上の利用可能性】

10

【0153】

本発明は、放射能絶対測定に用いられる。又、放射線診療装置、非破壊検査装置等の放射線検出器の検出効率(感度)測定に用いられる。更に、医療用放射能測定装置等、放射線測定装置の校正に利用できる。

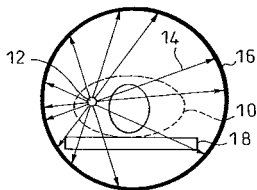
【符号の説明】

【0154】

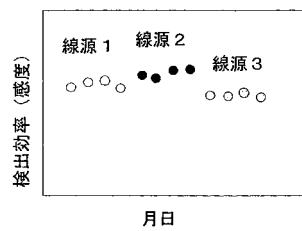
- 100、200、400、500、600、602、604...放射線源
- 210、212、412、510、610...放射線検出器集合体
- 220...計数装置
- 240...計算機
- 250...入力装置
- 260...表示装置
- 410...PET装置
- 520、620...放射線測定装置

20

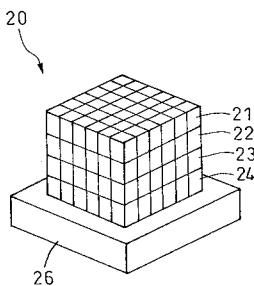
【図1】



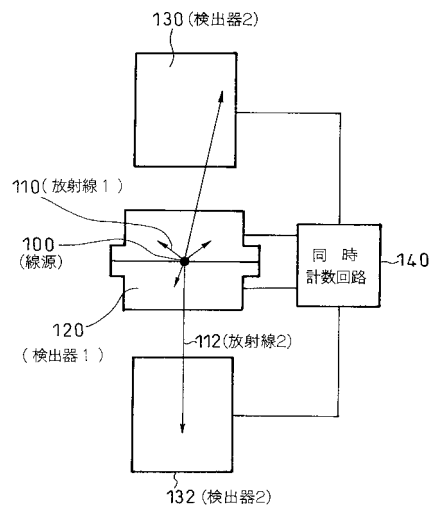
【図3】



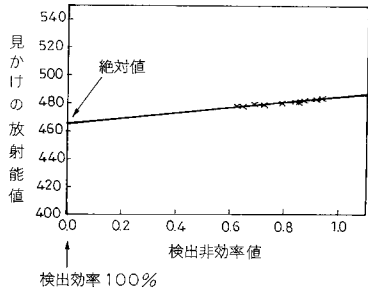
【図2】



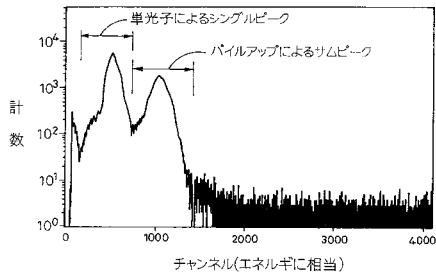
【図4】



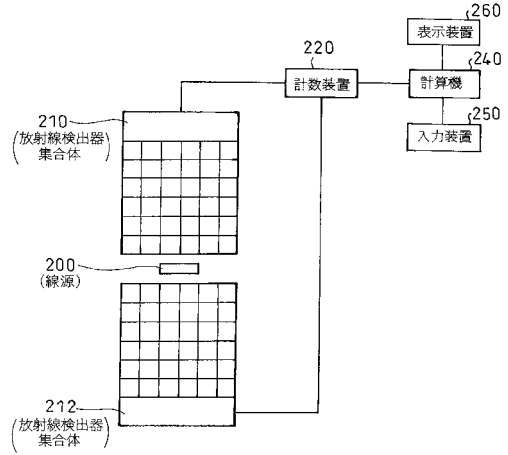
【 図 5 】



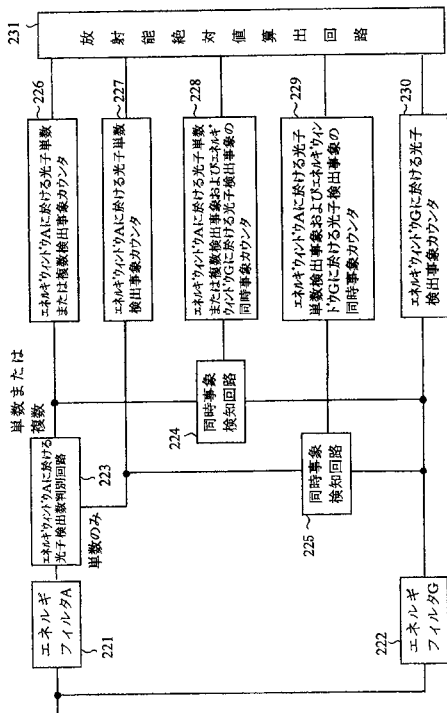
【 図 6 】



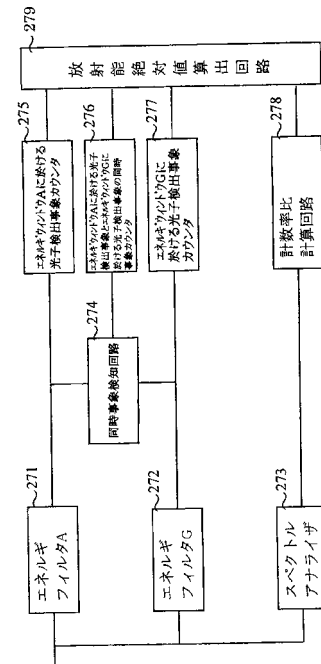
【 図 7 】



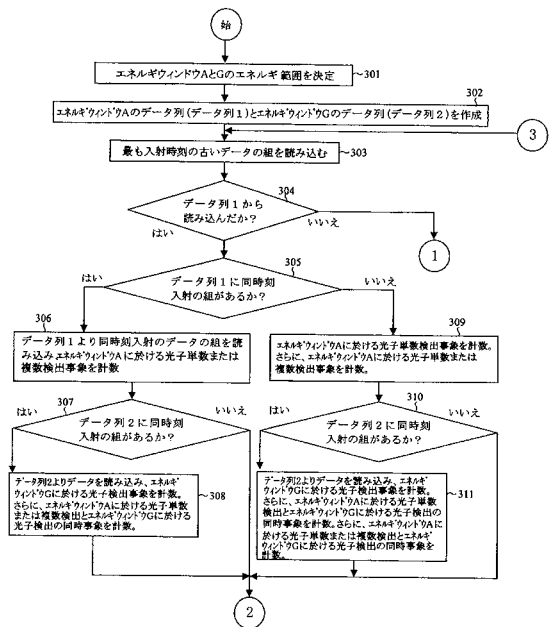
【 図 8 】



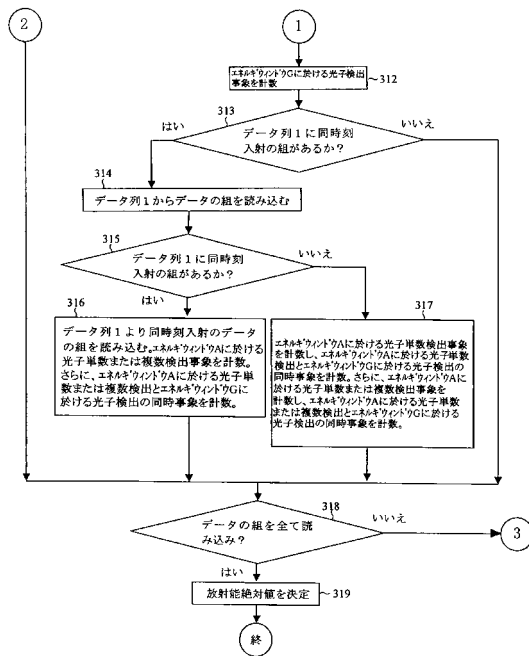
【 図 9 】



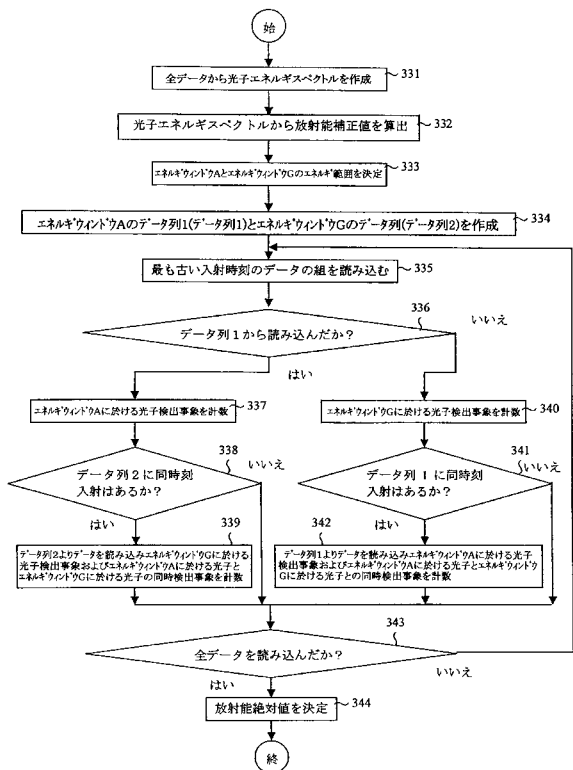
【図 10】



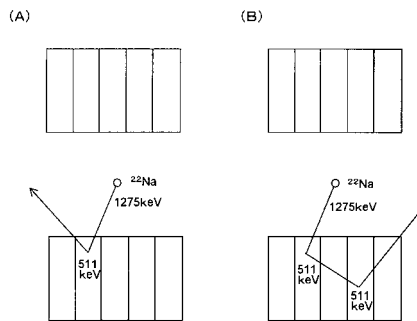
【図 11】



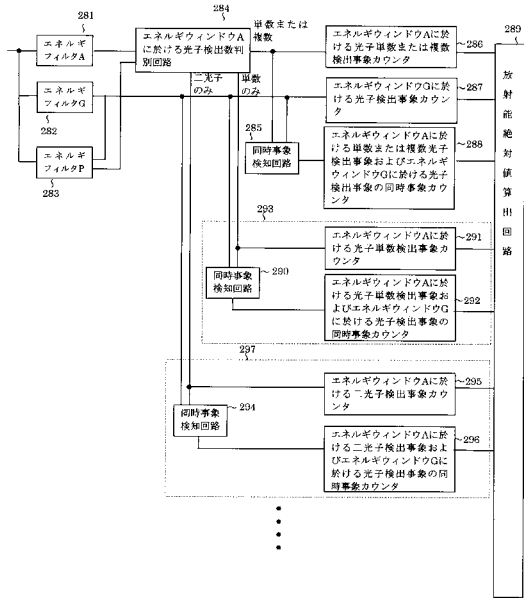
【図 12】



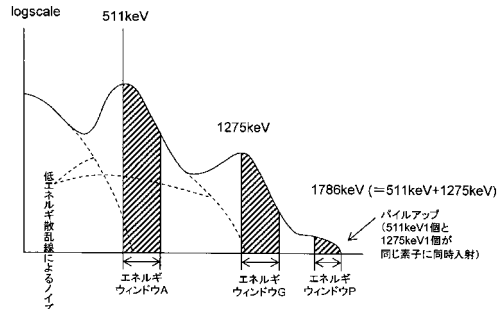
【図 13】



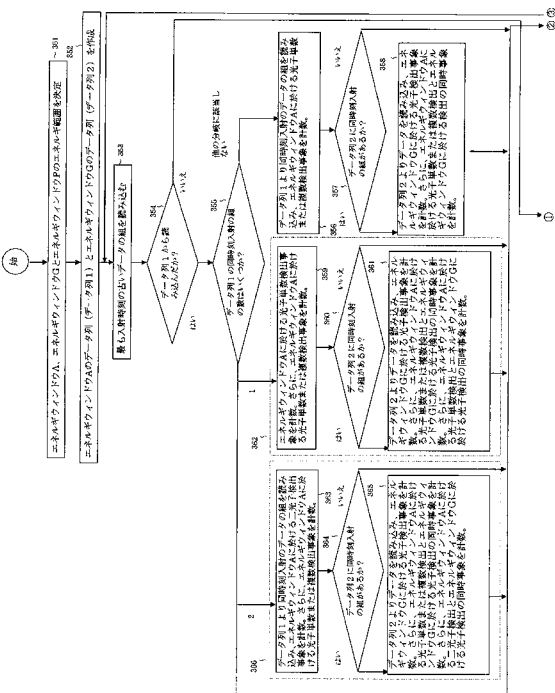
【図14】



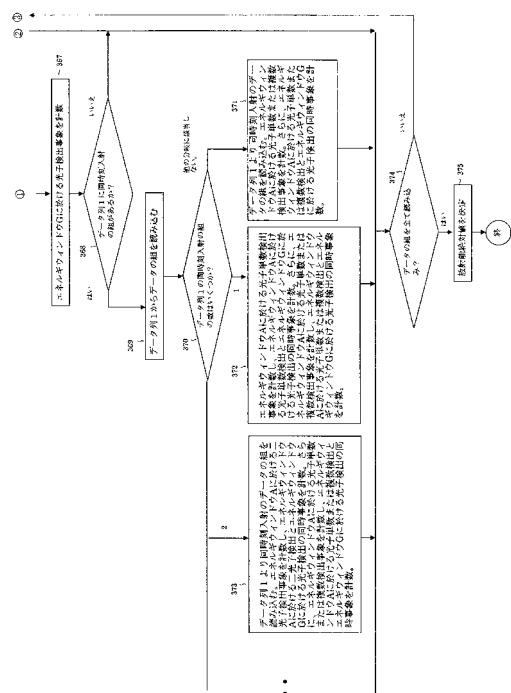
【図15】



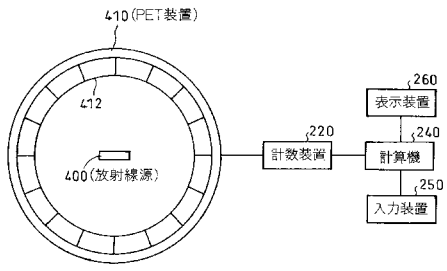
【図16】



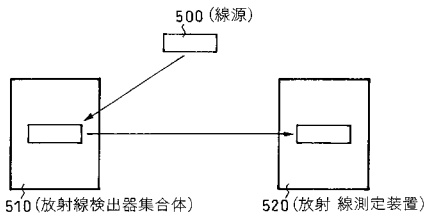
【図17】



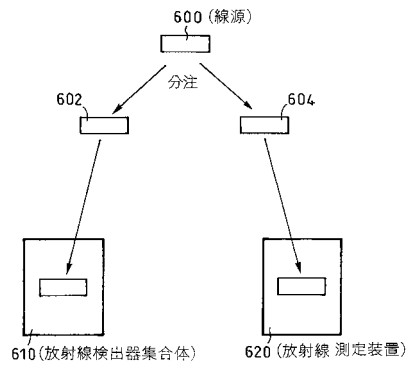
【 図 1 8 】



【 図 1 9 】



【 図 2 0 】





## フロントページの続き

(74)代理人 100076129

弁理士 松山 圭佑

(74)代理人 100089015

弁理士 牧野 剛博

(72)発明者 佐藤 泰

茨城県つくば市東 1 - 1 - 1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内

(72)発明者 村山 秀雄

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目 9 番 1 号 独立行政法人放射線医学総合研究所内

(72)発明者 山田 崇裕

茨城県つくば市東 1 - 1 - 1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内

(72)発明者 長谷川 智之

神奈川県相模原市南区北里 1 - 1 5 - 1 学校法人北里研究所内

(72)発明者 織田 圭一

東京都板橋区栄町 3 5 番 2 号 地方独立行政法人東京都健康長寿医療センター研究所内

F ターム(参考) 2G188 AA01 BB02 BB04 BB05 BB07 BB15 CC01 CC20 CC28 DD02

DD05 EE12 EE16 EE29 FF30

4C188 EE01 FF04 FF05 FF07 GG17 GG21 JJ05 KK11 KK15 KK16

KK29 LL28