

(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
2009年11月5日(05.11.2009)

(10) 国際公開番号

WO 2009/133639 A1

(51) 国際特許分類:
G01T 7/00 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2008/069160

(22) 国際出願日: 2008年10月22日(22.10.2008)

(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:
PCT/JP2008/058431 2008年5月2日(02.05.2008) JP

(71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人放射線医学総合研究所(National Institute of Radiological Sciences) [JP/JP]; 〒2638555 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 Chiba (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 中村秀仁 (NAKAMURA, Hidehito) [JP/JP]; 〒2638555 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 Chiba (JP).

(74) 代理人: 高矢 諭, 外(TAKAYA, Satoshi et al.); 〒1510053 東京都渋谷区代々木二丁目10番12号 南新宿ビル Tokyo (JP).

(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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, 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, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

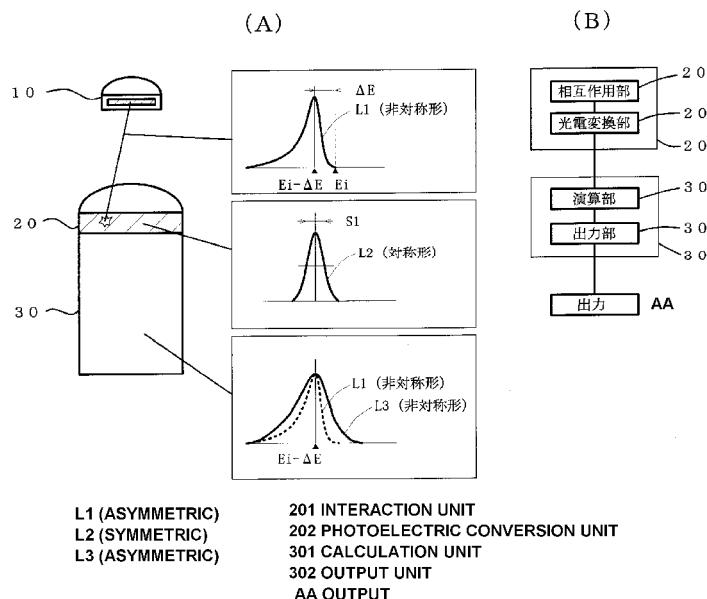
添付公開書類:

— 国際調査報告(条約第21条(3))

(54) Title: METHOD, DEVICE, AND PROGRAM FOR EVALUATING PARTICLE BEAM EMITTED FROM RADIATION SOURCE, RADIATION DETECTOR EVALUATION METHOD, CALIBRATION METHOD, DEVICE, AND RADIATION SOURCE

(54) 発明の名称: 放射線源から放出される粒子線の評価方法、装置、プログラム、放射線検出器の評価方法、校正方法、装置、及び、放射線源

[図7]



(57) Abstract: When detecting an energy of a particle beam emitted from a radiation source, an energy distribution (L1) of particles emitted out of the radiation source is obtained by handling as asymmetric a histogram obtained according to the relationship of the difference ΔE between energy of one particle when emitted out of the radiation source and an initial energy of the particle when the particle is generated, with respect to the measurement quantity. Thus, it is possible to accurately perform a radiation detector energy calibration, an absolute amount measurement, and resolution measurement.

(57) 要約: 放射線源から放出される粒子線のエネルギーを検出器で求める際に、放射線源外に放出された1粒子のエネルギーとその粒子が生成された際に持っていた初期エネルギーとのずれ ΔE とその計測数との関係から求められるヒストグラムを非対称と扱い、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布(L1)を求める。これにより、放射線検出器のエネル

ギーの校正、絶対量測定及び解像度測定を正確に行なうことが可能となる。

明細書

放射線源から放出される粒子線の評価方法、装置、プログラム、放射線検出器の評価方法、校正方法、装置、及び、放射線源

技術分野

[0001] 本発明は、放射線源から放出される粒子線の評価方法、装置、プログラム、放射線検出器の校正方法、装置、及び、放射線源に係り、特に、従来無視されていた、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギーを評価して、粒子線のエネルギーを正確に評価することが可能な粒子線の評価方法、装置、プログラム、これらを利用した放射線検出器の校正方法、装置、及び、放射線源に関する。

背景技術

[0002] 通常、図1に例示する如く、物質6中を通過する、アルファ線やベータ線を構成する荷電粒子(ヘリウム原子核又は電子)8は、物質6との相互作用により、物質6中でエネルギーを損失(ΔE)し、この損失 ΔE は物質の種類、物質の密度及び物質の厚さ(t)に比例する。

[0003] 一方、近年、理学、生物、化学、及び医学、その他の分野において、放射線検出器の校正や生物実験等のために、放射線源の使用が日々増加している。又、これらの研究及び実験での結果に基づき、他の放射線量やエネルギーの比較等が行われている。そのため、放射性同位元素(ラジオアイソotope:以下、単にアイソotopeと称する)から放出される粒子のエネルギー、粒子の線量等を精度よく評価する必要がある。

[0004] 単一エネルギーである内部転換電子やベータ線等の荷電粒子を放出する放射線源(例えば、 ^{137}Cs 、 ^{207}Bi 、 ^{109}Cd 、 ^{110}mAg 、及び ^{90}Sr …等)は、アイソotopeを外傷から保護するために膜で覆われている。又、荷電粒子の膜中でのエネルギー損失を減らすために薄膜が用いられてきた。そのため、薄膜中でのエネルギーの損失が無視できると仮定の基、様々な研究及び実験が行われてきた。

[0005] 図2に、薄膜線源10の一例として ^{137}Cs 薄膜線源を示す。図2において、12は、例えば ^{137}Cs でなるアイソotope、14は、例えばアルミニウムでなる薄膜である。

- [0006] 従来は、図3に示す如く、この線源10からそのまま100%のエネルギーEが出たものとして、例えば、シンチレーション検出器(シンチレータと光変換装置から構成される検出器)や半導体検出器やガス検出器等からなる放射線検出器20で測定していた。
- [0007] しかしながら、発明者の研究の結果、図4及び図5に示す如く、実際には線源10中で、荷電粒子8はその発生場所13と放出方向に応じて、線源10を出るまでにエネルギー ΔE を失うことが判明した。
- [0008] 従来、特開2004-221082に記載されているように、放射線源からの放射線の放射率を調節したり、特開2006-275664に記載されているように、線源変動の影響を緩和したり、特開2007-263804に記載されているように、測定対象物の放射線量を精度良く測定する試みは種々なされているが、放射線源内のエネルギー損失に着目していなかった。
- [0009] 一方、A. Martin Sanchez他”An experimental study of symmetric and asymmetric peak-fitting parameters for alpha-particle spectrometry” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 339(1994)127-130(以下、文献1)では、放射線源内のエネルギー損失に着目しているとあるが、図6に示す、放射線源から放出される粒子群のエネルギー強度と計測数の頻度との度数分布図(以下、エネルギー分布という。ここで、このエネルギー分布の横軸はエネルギー強度を表し、縦軸は計測数の頻度を表す。)において、放射線源10中での粒子のエネルギーの損失による分布(L1)と検出器20の統計誤差(L2)と共に、対称形で扱っていた。そのために、演算処理部30で実際の測定で得られる非対称なエネルギースペクトル(L3)を、対称形のL1とL2の合成だけで表すことが出来なかつた。そこで、L1とL2のエネルギースペクトルの合成に、指数関数を追加することでL3を非対称形なエネルギースペクトルとして再現したが、この指数関数には物理的な根拠は一切なく、単にスペクトルを再現した近似的評価を行ったにすぎず、正確な評価はできなかつた。この方法には、致命的な間違いが4点あり、(1)放射線源中の粒子のエネルギーの損失を対称形として扱つた事、(2)放射線源中で粒子のエネルギー損失があるにも関わらず、実際に放射線源外に放出される粒子のエネルギーが、その粒子が生成された際に持つ初期エネ

ルギーと同値で扱った事、(3)非対称形を無理やり表現するためだけに、物理的根拠のない指數関数を導入した事、(4)その指數関数を導入したことにより、放射線検出器の性能を正しく評価しなかった事が、挙げられる。

- [0010] 又、例えば、M.Miyajima, et al, "Numbers of scintillation photons produced in NaI(Tl) and plastic scintillator by gamma-rays.", Published in IEEE Trans.Nucl.Sci.40:417-423,1993(以下、文献2)にあるような従来の解析方法では、放射線源中でのエネルギー損失の影響を評価しなかったために、検出器のエネルギー校正を誤っている。また、同文献2中にFig. 5で示されている放射線検出器(プラスチックシンチレータ)で測定した²⁰⁷Bi放射線源から放出された976keVの内部転換電子のエネルギースペクトルからは、²⁰⁷Bi放射線源から放出された976keVの内部転換電子のエネルギー一分布を対称形で扱っていることが分かる。そのために、放射線検出器の性能をも悪く見積もっている。
- [0011] 更に、内部転換電子が、一つの原子核の励起準位について、何本か異なったエネルギーを持つ内部転換電子(K殻、L1殻、L2殻、L3殻、M殻等からの内部転換電子)を評価することなく、たった1本の内部転換電子として扱っているために、放射線検出器の性能を更に悪く評価していることが分かる。
- [0012] 又、C. John Bland et al, "An Observed Correlation between Alphaa-Particle Peak-fitting Parameters", vol. 43, No. 1/2, pp. 223-227, 1992 (以下、文献3)、G. Bortels et al, "ANALYTICAL FUNCTION FOR FITTING PEAKS IN ALPHA-PARTICLE SPECTRA FROM Si DETECTORS", Applied Radiation and Isotopes, vol.38, no.10, pp. 831-837, 1987(以下、文献4)、C. John BLAND et al, "Deconvolution of Alpha-Particle Spectra to Obtain Plutonium Isotopic Ratios", Applied Radiation and Isotopes, vol.43, no.1/2, pp. 201-209, 1992(以下、文献5)では、複数の異なるエネルギーの「アルファ線」を測定で得られた結果から分離を行っている。これらは、あくまでアルファ線の測定結果が指數関数を用いた近似式にて合うから出来ることである。例えば、ベータ線やガンマ線では、測定で得られる結果が指數関数では表わす事が出来ないために、異なる粒子間での分離は不可能である。1970年頃から現在までに、アルファ線を分離する上記のような論文や手法は世界各国で多数報告されているが

、粒子の種類をも評価した文献等の報告はない。それは、アルファ線以外の粒子には適用できないからである。また、エネルギーの異なるアルファ粒子を分離することは可能とあるが、複数のアルファ粒子に対し、物理的に根拠のない近似を繰り返すので、誤差が大きく測定精度が非常に低という欠点を持つ。

発明の開示

- [0013] 本発明は、このような知見に基づいてなされたもので、従来無視されてきた放射線源中での粒子のエネルギー損失を正確に評価することにより、放射線源外に放出された粒子のエネルギーが、その粒子の生成された際に持つ初期エネルギーより低くなる事と、放射源外に放出された粒子のエネルギー分布が非対称形である事を求め、放射線源から放出される粒子のエネルギーを正しく評価することを課題とするもので、これまで行われてきた放射線源から放出される粒子を用いた放射線測定及び放射線検出器の性能評価の歴史を塗り替える可能性がある発明である。
- [0014] 本発明は、図7(A)に示すエネルギー分布の如く、放射線源10中でのエネルギー損失により粒子のエネルギー分布L1が非対称形となることを見出し、そのエネルギースペクトルと検出器20の統計誤差L2(対称形)のエネルギースペクトルの合成を答えとしたところ、演算出力部30での非対称形な実測値L3のエネルギースペクトルと一致する結果を得た。
- [0015] いくら薄い放射線源でも、粒子が物質中を移動したら相互作用により、僅かにエネルギーを失う。粒子が放射線源内で生成された際、その粒子は初期エネルギー E_i を持つが、実際に放射線源外に放出された粒子の持つエネルギー E は、初期エネルギー E_i より僅かに小さいエネルギーとなる。これは、その粒子が放射線源中でエネルギーを失ったからである。この放射線源中で失うエネルギーの量は、粒子の発生位置と粒子が放出される方向から自ずと決まる放射線源中を通過する距離によって変わる。図7(A)中において、 ΔE は、放射線源から放出された粒子が放射線源中で失うエネルギーの最頻値を示す。この放射線源中の粒子のエネルギー損失のため、実際に放射線源外へ放出される粒子群のエネルギー分布は、初期エネルギー E_i から放射線源中で失ったエネルギー ΔE 分を引いた値($E_i - \Delta E$)に、エネルギーの最頻値がずれる。

- [0016] なお、図7(B)において、検出部20は相互作用部201と光電変換部202で、演算出力部30は演算部301と出力部302で構成されている。相互作用部201は代表的にはシンチレータであり、光電変換部202は代表的には光電子増倍管である。光電変換部202で光電変換された信号がCPU、メモリー及びプログラムなどで構成される演算部301で処理され、出力部302のインターフェースを介して出力される。又、図6及び図7のS1は半値幅を示す。
- [0017] ここで、放射線源中で生成された粒子の放出角と、放射線源外に放出された粒子のエネルギーの分布との関係を図8に模式的に示す。
- [0018] 図8は、各々放射線源のある位置から、異なる放出角(0度、15度、30度)で放出される粒子の軌跡(a' 、 b' 、 c')と各粒子に対応するエネルギー分布(a 、 b 、 c)を示している。粒子は図8の如く放射線源中を、多重散乱しながらエネルギーを損失しつつ移動する。図8(a、b、c)中にある ΔE_0 、 ΔE_{15} 、 ΔE_{30} 、 ΔE_{AVE} は、それぞれ放射線源から0度、15度、30度、0から30度の平均方向に放出された粒子が、それぞれ放射線源中で最も失いやすいエネルギーの値を示す。粒子が放射線源中を通過する距離が長くなると、放射線源中のエネルギーの損失も大きくなる事を示している。つまり、粒子のエネルギー損失の量は、 $\Delta E_0 < \Delta E_{15} < \Delta E_{30}$ となる。また、放射線源中の移動距離が長い粒子が存在するほど、放射線源外へ放出された粒子群の非対称なエネルギー分布が広がることが分かる。
- [0019] ここで示した0度、15度、30度方向に放出された粒子群のエネルギー分布を平均すると、図8(d)のようになる。
- [0020] 図9は、 ^{207}Bi 放射線源から放出される976keVのK殻内部転換電子をプラスチックシンチレータで測定したエネルギースペクトルの結果(図7のL3に相当)である。このエネルギースペクトルは、線源中の粒子のエネルギーの損失による非対称なエネルギー分布(ふらつき)(図7及び図8のL1)と対称形である検出器の統計誤差(図7のL2)の合成から成る。ここで、測定で得られた粒子のエネルギーのエネルギースペクトル(図7のL3)が非対称になるのは、線源中の粒子のエネルギー損失により、線源外に放出された粒子のエネルギー分布が非対称形になる事が原因であることを示した結果である。

- [0021] 本発明は、放射線源から放出される粒子のエネルギーを検出器で求める際に、放射線源外に放出された粒子のエネルギーとその粒子が生成された際に持っていた初期エネルギーとの差 ΔE とその計測数との関係から求められるヒストグラムを非対称と扱い、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布(L1)を求め、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価する事で、前記課題を解決したものである。
- [0022] 又、前記で評価したエネルギー損失分を補正することができる。
- [0023] 又、前記放射線源中でのエネルギー損失を、放射線源内における粒子線の発生位置と放出方向から、粒子の放射線源中の通過距離を求めて評価することができる。
- [0024] 又、前記通過距離に、放射線源と放射線検出器の相互作用部の通過距離を含むことができる。
- [0025] ここで、前記粒子線の放出方向を全方向(4π 方向)に設定することができる。
- [0026] 又、前記放射線源中でのエネルギー損失を評価し求めた、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布関数 $F(E_i)$ と、次式

$$R(E) = \int F(E_i) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-(E-E_i)^2}{2\sigma^2}} dE_i \quad \dots (1)$$

で示される評価関数 $R(E)$ 関数(ここで、 E は粒子のエネルギー、 E_i は生成された粒子が持つ初期エネルギー、 σ は標準偏差であり検出器の分解能を示す。)を用いて求めることができる。

- [0027] 又、前記放射線源中での粒子のエネルギー損失を、放射線群(各殻からの内部転換電子、ベータ線、ガンマ線等)に対して、個々に放射線源中でのエネルギー損失による分布関数 $F_k(E)$ (ここで k は、放射線群に含まれる各放射線を識別するための指標であり、放射線の数を示す。)を求め、各放射線の放出率 τ_k を評価して求めることができる。
- [0028] 又、前記粒子線は、荷電粒子線であることができる。
- [0029] 又、前記放射線源が、薄膜放射線源(内部転換電子を放出する放射線源等)、ベ

ータ線源又はアルファ線源であることができる。

- [0030] さらに、放射線検出器で測定したエネルギースペクトルを前記 ΔE だけ補正し、最頻値が一致するように対応付けした補正エネルギースペクトル(L_3, L_3')を求めることができる。
- [0031] 又、前記で求めた粒子のエネルギー分布(L_1)の計測数の頻度を表わす縦軸の尺度を、前記で求めた補正エネルギースペクトル(L_3, L_3')に合うように変えたエネルギースペクトル L_{1a} を求めることができる。
- [0032] 又、前記で求めた補正エネルギースペクトル(L_3, L_3')と、前記で求めたエネルギースペクトル L_{1a} を用い、放射線検出器の統計誤差 L_2 を求めることができる。
- [0033] 本発明は、又、放射線源から放出される粒子のエネルギーを検出器で求める際に、放射線源外に放出された粒子の持つエネルギーとその粒子が生成された際に持っていた初期エネルギーとのずれ ΔE と計測数との関係から求められるヒストグラムを非対称と扱い、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布(L_1)を求めるステップを含み、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価することを特徴とする、放射線源から放出される粒子線評価用のコンピュータプログラムを提供するものである。
- [0034] 又、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない方法に基づく放射線源から放出される粒子線を評価する評価プログラムが記憶部に書き換え不能に書き込まれ、且つ、そのプログラムの処理部を備えた、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない従来の評価装置における前記評価を、前記記憶部と異なる記憶部に書き込まれた放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価して修正するためのコンピュータプログラムを提供するものである。
- [0035] 又、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない方法に基づく放射線源から放出される粒子線の評価プログラムが記憶部に書き換え可能に書き込まれ、且つ、そのプログラムの処理部を備えた、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない評価装置の前記記憶部に、書き込むか前記評価プログラムを書き換えることにより放射線源内を粒子線が通過

する際に失われるエネルギー損失分を評価して修正するためのコンピュータプログラムを提供するものである。

- [0036] 本発明は、又、放射線源から放出される粒子のエネルギーを検出器で求める際に、放射線源外に放出された粒子の持つエネルギーとその粒子が生成された際に持っていた初期エネルギーとのずれ ΔE と計測数との関係から求められるヒストグラムを非対称と扱い、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布(L1)を求め、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価して補正することを特徴とする、放射線源から放出される粒子線の評価装置を提供するものである。
- [0037] ここで、放射線源の種類と形状に応じたエネルギー損失の換算表を含み、前記評価したエネルギー損失分を補正する補正手段を備えることができる。
- [0038] 本発明は、又、前記の評価方法で粒子線のエネルギーが評価された放射線源を用いることを特徴とする放射線検出器の校正方法を提供するものである。
- [0039] 本発明は、又、前記の評価装置を含むことを特徴とする放射線検出器の校正装置を提供するものである。
- [0040] 本発明は、又、前記のコンピュータプログラムがインストールされたことを特徴とする放射線検出器の校正装置を提供するものである。
- [0041] 本発明は、又、前記の評価方法で評価されたことを特徴とする放射線源を提供するものである。
- [0042] 本発明によれば、粒子線が放射線源から放出される際に、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギーを正確に評価することにより、放射線源外に放出された粒子線のエネルギーを正確に測定することが可能になる。従って、今後発売される放射線源だけでなく、既に市場に出回っている放射線源についても、エネルギーを正確に再評価することができる。また既に市場に出回っている放射線検出器のエネルギーの校正を正確に行なうことも可能となる。本発明は、これまで測定されてきた各種放射線のデータを覆す可能性がある重要な発明であり、放射線測定の新しい国際標準になり得る可能性がある。従って、過去に発明された放射線源から放出される粒子のエネルギー測定方法と放射線量評価方法、及び、放射線検出器の性能評価方法によって得られた結果の見直しが必要となる可能性がある。

図面の簡単な説明

- [0043] [図1]粒子が物質を透過している状態を示す模式図
- [図2]薄膜線源の構成例を示す断面図
- [図3]従来の放射線源の評価方法を示す模式図
- [図4]放射線源中のエネルギー損失を示す断面図
- [図5]従来の問題点を説明するための模式図
- [図6]従来の他の問題点を説明するためのエネルギー分布の概要図
- [図7]本発明の原理を説明するためのエネルギー分布の概要図
- [図8]同じく放射線源中での粒子の放出角と、放射線源外に放出された粒子のエネルギーの分布と計測数の関係を示すエネルギー分布の概要図
- [図9]同じく²⁰⁷Bi放射線源から放出される976keVのK殻内部転換電子をプラスチックシンチレータで測定したエネルギースペクトルを示す図
- [図10]同じく¹³⁷Cs放射線源から放出される625. 6keV K殻内部転換電子のエネルギースペクトルを示す図
- [図11]放射線源から放出された粒子の全エネルギーを放射線検出器で検出する場合を示すエネルギー分布の概要図
- [図12]放射線源から放出された粒子のエネルギーの一部を、放射線検出器で検出した場合を示すエネルギー分布の概要図
- [図13]¹³⁷Csアイソトープの崩壊図
- [図14]¹³⁷Csアイソトープからの放射線をプラスチックシンチレータで測定した結果を示す図
- [図15]²⁰⁷Biアイソトープからの放射線をプラスチックシンチレータで測定した結果を示す図
- [図16]本発明の実施形態の処理手順を示すブロック図
- [図17]本発明を実施するための評価装置の一例の構成を示すブロック図
- [図18]本発明を実施するための校正装置の一例の構成を示すブロック図
- [図19]本発明を実施するための校正装置の他の例の構成を示すブロック図
- 発明を実施するための最良の形態

[0044] 以下、社団法人日本アイソトープ協会などが販売している薄膜線源を用いて、放射線検出器(シンチレーション検出器、半導体検出器、ガス検出器など)を正確に校正する方法を説明する。

[0045] [薄膜線源]

校正に用いる薄膜放射線源は、図2に示したように、コアとなるアイソトープ12と、上下二枚で固定されたアイソトープ保護薄膜(アルミニウム蒸着ポリエチルフィルム、 $\sim 1\text{mg/cm}^2$)14で構成される。このフィルムを、厚さに換算すると $\sim 3\text{マイクロメートル}$ である。このアイソトープ保護膜中の荷電粒子のエネルギー損失を、どのように評価するかが正しく校正を行うために重要な鍵となる。

[0046] 又、荷電粒子を放出するアイソトープ12自体が体積を持つため、図4に示したように、自身によるエネルギーの損失についても考慮する必要がある。一般に使用される放射線源の場合、アイソトープは、厚さ $\sim 4\text{ナノメートル}$ 、面積 $\sim \phi 5\text{ mm}^2$ 以内に分布している。ここで、アイソトープ中の粒子のエネルギー損失を、アイソトープ保護膜中のエネルギー損失と共に評価する事で、検出器の性能評価の精度を更に高めることが出来る。

[0047] [荷電粒子と物質の相互作用]

荷電粒子と物質の相互作用については、ランダウ達によって計算されてきた。その結果、図1に示した如く、物質6に垂直入射したエネルギーEを持つ荷電粒子8の物質6中のエネルギー損失による最頻値 ΔE_p は、次の式で与えられる。つまり、この ΔE_p だけ、物質6中でエネルギーを落とすことになる。

[0048]

$$\Delta E_p = -W \left\{ In \frac{2m_0 V_0^2}{I(1-\beta^2)} W - \beta^2 + K \right\} \quad \dots(2)$$

[0049] 但し、

$$W \approx 0.075t \frac{z^2}{\beta^2} \quad \dots(3)$$

[0050] ここで、tは物質の面積質量、zは荷電粒子の電荷数、 β は荷電粒子の相対速度、 $m_0V_0^2 = 0.511\text{MeV}$ 、K=0.37である。

- [0051] 例えば、 ^{137}Cs アイソトープから放出する625. 6keVのK殻内部転換電子が、放射線源保護用のアルミニウム蒸着ポリエスチルフィルム(1mg/cm^2)に垂直入射した場合、 $\Delta E_p = 0.9\text{keV}$ のエネルギー損失がある。この時点で、放射線源から放出された荷電粒子のエネルギーに、約1keV程度のズレが生じている。
- [0052] しかし、実際には、アイソトープから放出される粒子は、全方向(4π 方向)に放射される。物質に垂直入射した理想的な状況のみで計算されている(2)式では、アイソトープ内で粒子が放出される位置、アイソトープ内のみならずアイソトープ保護薄膜内での粒子のエネルギー損失を無視しているので、放射線源から放出される粒子のエネルギーを正しく表現することはできない。(2)式が実際に測定で得られた結果と完全には合わないということは、業界では非常によく知られている。これは、上記理由のためでもある。
- [0053] そこで、アイソトープ中での粒子の放出角と放出位置とを考慮し、放射線源(アイソトープ及びアイソトープ薄膜)中でのエネルギー損失をシミュレーションして、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布関数 $F(E_i)$ を求める。
- [0054] [モンテカルロシミュレーション1]
- シミュレーションを行う上で重要なのは、シミュレーションの幾何学条件として実際に使用する放射線源をプログラム上で再現することにある。ここで、次の6つの項目をシミュレーションの幾何学条件とする。
- [0055]
- A) アイソトープ12の面積・厚さ・材質・密度・座標
 - B) アイソトープ保護薄膜14の面積・厚さ・材質・密度・座標
 - C) 粒子の種類
 - D) 粒子の初期エネルギー
 - E) 粒子の放出角
 - F) 粒子の放出位置
- [0056] ここでは、粒子がアイソトープ12内に一様分布し、且つ 4π 方向に放出される仮定してシミュレーションを行う。
- [0057] 例として、 ^{137}Cs 放射線源の幾何学条件(社団法人日本アイソトープ協会の321タイプ薄膜線源)を忠実に再現し、初期エネルギー(E_i)が625. 6keVであるK殻内部

転換電子が、実際に放射線源外へ放出される際、その粒子のエネルギーの最頻値が初期エネルギーより低くなる事と、その放出された粒子のエネルギー分布が非対称形である事を求めた。

- [0058] 図10は、シミュレーションの結果得られた、 ^{137}Cs 放射線源から放出される625. 6 keVのK殻内部転換電子のエネルギースペクトルである。
- [0059] 初期エネルギーが625. 6keVと单一であったK殻内部転換電子が、アイソトープ自身とアイソトープ保護薄膜でのエネルギー損失のために、エネルギーの最頻値が625. 6keVに対して1keV程度低くなっている事を容易に確認できる。又、この粒子のエネルギー分布関数が非対称形であることも分かる(図7のL1に相当する。又、この分布関数が(1)式のF(Ei)に対応する。)。
- [0060] このため、放射線源から放出される粒子を正しく扱う場合、(1)放出された粒子のエネルギーが、その粒子が生成された際に持つ初期エネルギーにより低くなっていること、(2)放出された粒子のエネルギーの分布が非対称形であることを評価しなければ、正しく放射線源から放出された粒子のエネルギー評価と放射線量の評価、及び、放射線検出器の性能を評価することができない。
- [0061] なお、放射線源から放出された粒子の全エネルギーを、放射線検出器で検出できるとは限らない。例えば、放射線源から放出された粒子が、放射線検出器で完全に止まらず放射線検出器を通過した場合などが挙げられる。本発明は、このような特殊な場合に対しても、放射線検出器(シンチレーション検出器、半導体検出器、ガス検出器など)のエネルギー校正、及び、性能評価を正確に行う事が出来る。
- [0062] そこで、放射線源から放出された粒子のエネルギーを全て放射線検出器で検出した場合と、放射線源から放出された粒子のエネルギーの一部を放射線検出器で検出した場合に分けて、本発明の詳細を説明する。
- [0063] 図11は、放射線源10から放出された粒子の全エネルギーを、図7と同じ放射線検出器20で検出した場合を示している。ここで、図11中におけるエネルギー分布を説明する。(a)は、前述のシミュレーションから求めた、放射線源10から放出された粒子のエネルギー分布(L1)、(b)は、放射線検出器20中にある相互作用部201で検出される粒子のエネルギースペクトル(L1)、(c)は、放射線検出器20中にある光電変

換部202の統計誤差(L2)、(d)は、放射線検出器20での測定により演算出力部30から出力される実際の測定結果(L3m)、(e)は、測定で得られた度数分布L3mの最頻値をL1の最頻値に一致するように対応付けた補正エネルギースペクトル(L3)を示している。つまり、L3は、L1の最頻値にL3mの最頻値が合うように、L3mの横軸の0点を固定し、L3mの横軸の尺度を変えた結果である。ここで、L3の横軸は、エネルギー強度を示す。

- [0064] 図11中にある ΔE_a は、放射線源10内で生成された粒子が放射線源10中で失うエネルギーの最頻値を示す。図11(c)中にあるS1は、放射線検出器20中にある光電変換部202による統計誤差の半値幅を示す。
- [0065] 図11では、放射線源10から放出された粒子の全エネルギーを、放射線検出器20中にある相互作用部201で検出するため、(a)放射線源10から放出される粒子のエネルギー分布と(b)放射線検出器20中にある相互作用部201で検出される粒子のエネルギー分布は等しくL1となる。なお、放射線源10中での粒子のエネルギー損失のため、実際に放射線源10外へ放出された粒子のエネルギー分布L1は、初期エネルギー E_i から放射線源10中で失ったエネルギー ΔE_a 分を引いた値($E_i - \Delta E_a$)に、エネルギーの最頻値がずれている。
- [0066] 補正エネルギースペクトルL3を、(1)式のエネルギー分布関数 $F(E_i)$ にL1を代入したR(E)にてフィッティングすることにより、L1の計測数の頻度を表す縦軸の尺度をL3に合うように変えた結果L1aと(1)式中の σ が求まる。このヒストグラムL1aの全度数(面積)が、放射線検出器で得られた放射線量である。この面積を測定時間で割った単位がベクレルである。なお、放射線検出器で得られた粒子の放射線量と放射線源を覆う放射線検出器の立体角から、放射線源から放出される放射線量も見積もる事が可能になる。
- [0067] また、この σ に2.35を掛けた値が、放射線検出器の解像度(分解能)を示す半値幅S1である。なお、この σ と粒子の初期エネルギー E_i を式(1)中にある次の部分にある

$$G(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-(E-E_i)^2}{2\sigma^2}} \quad \dots (4)$$

に代入することで図11(c)のL2を図示することも可能となる。

[0068] 図11(e)は、補正エネルギースペクトルL3と、L1aのエネルギースペクトルの幅の比較を示している。ここで、L3がL1aより幅の広い分布をするのは、補正エネルギースペクトルL3がL1aと放射線検出器20中にある光電変換部202の統計誤差L2で構成されているからである。

[0069] 放射線源10から放出された粒子のエネルギーの一部を、放射線検出器20で検出した場合は、放射線源中の粒子のエネルギー損失と同様に、放射線検出器中の粒子のエネルギー損失を評価する必要がある。そこで、ここでは、アイソトープ中の粒子の放出角、放出位置を評価し、放射線源(アイソトープ及びアイソトープ薄膜)中の粒子のエネルギー損失の他に、放射線検出器中の粒子のエネルギー損失も考慮して、シミュレーションし、放射線検出器にて検出された粒子のエネルギー分布関数としてF(Ei)を求める。

[0070] [モンテカルロシミュレーション2]

このシミュレーションを行う上で重要なのは、シミュレーションの幾何学条件として実際に使用する放射線源と放射線検出器をプログラム上で再現することにある。ここで、次の7つの項目をシミュレーションの幾何学条件とする。

- [0071] A)アイソトープ12の面積・厚さ・材質・密度・座標
- B)アイソトープ保護薄膜14の面積・厚さ・材質・密度・座標
- C)粒子の種類
- D)粒子の初期エネルギー
- E)粒子の放出角
- F)粒子の放出位置
- G)放射線検出器20中にある相互作用部201の面積・厚さ・材質・密度・座標

[0072] ここでも、粒子がアイソトープ12内に一様分布し、且つ 4π 方向に放出される仮定してシミュレーションを行う。

[0073] 図11に対して、図12は、放射線源10から放出された粒子のエネルギーの一部を、図7と同じ放射線検出器20で検出した場合を示している。図12中におけるエネルギー分布を説明する。(a)は、前述のモンテカルロシミュレーション2から求めた、放射

線源10から放出された粒子のエネルギー分布(L1)(このL1は、図11(a)中のL1と同じである。)、(b)は、前述のモンテカルロシミュレーション2から求めた、放射線検出器20中にある相互作用部201で検出される粒子のエネルギースペクトル(L1')、(c)は、放射線検出器20中にある光電変換部202の統計誤差(L2)、(d)は、放射線検出器20での測定により演算出力部30から出力される実際の測定結果(L3'm)、(e)は、測定で得られた度数分布L3'mの最頻値をL1'の最頻値に一致するように対応付けた補正エネルギースペクトル(L3')を示している。つまり、L3'は、L1'の最頻値にL3'mの最頻値が合うように、L3'mの横軸の0点を固定し、L3'mの横軸の尺度を変えた結果である。ここで、L3'の横軸は、エネルギー強度を示す。

- [0074] ここで、図12中にある ΔE_a は、放射線源10内で生成された粒子が放射線源10中で失うエネルギーの最も頻度が高い値を示す。又、 ΔE_b は、放射線源10から放出された粒子が放射線検出器20中にある相互作用部201で失うエネルギーの最頻値を示す。図12(c)中にあるS1は、放射線検出器20中にある光電変換部202による統計誤差の半値幅を示す。
- [0075] 図12では、放射線源10から放出された粒子のエネルギーの一部しか放射線検出器20中にある相互作用部201で検出しないため、(a)放射線源から放出される粒子のエネルギー分布(L1)と(b)放射線検出器20中にある相互作用部201で検出される粒子のエネルギー分布(L1')は異なる。図12(b)にあるように、L1'がL1より、初期エネルギー E_i からのズレが大きく($\Delta E_b > \Delta E_a$)、幅の広い分布をするのは、放射源から放出された粒子の全エネルギーを放射線検出器20中にある相互作用部201にて検出出来ていないからである。
- [0076] なお、放射線源中での粒子のエネルギー損失と放射線検出器20の相互作用部201での粒子のエネルギー損失のため、実際に放射線検出器20中にある相互作用部201で検出される粒子のエネルギー分布L1'は、初期エネルギー E_i から放射線源中で失ったエネルギー ΔE_b 分を引いた値($E_i - \Delta E_b$)に、エネルギーの最頻値がずれる。
- [0077] 補正エネルギースペクトルL3'を、(1)式のエネルギー分布関数F(Ei)にL1'を代入したR(E)にてフィッティングすることにより、L1'の計測数の頻度を表わす縦軸の

尺度をL3'に合うように変えた結果L1'aと(1)式中の σ が求まる。このヒストグラムL1'aの全度数(面積)が、放射線検出器で得られた粒子の放射線量である。この面積を測定時間で割った単位がベクレルである。なお、放射線検出器で得られた粒子の放射線量と放射線源を覆う放射線検出器の立体角から、放射線源から放出される放射線量も見積もる事が可能になる。

- [0078] また、この σ に2.35を掛けた値が、放射線検出器の解像度(分解能)を示す半値幅S1である。なお、この σ と粒子の初期エネルギーEiを式(1)中にある(4)式に代入することで図12(c)のL2を図示することも可能となる。
- [0079] 図12(e)は、補正エネルギースペクトルL3'、L1'aのエネルギースペクトルの幅の比較を示している。ここで、L3'がL1'aより幅の広い分布をするのは、L3'の補正エネルギースペクトルがL1'aと放射線検出器20中にある光電変換部202の統計誤差L2で構成されているからである。
- [0080] ここで、重要なのは、放射線検出器で、放射線源から放出された粒子の全エネルギーを検出した場合(図11)でも、検出しない場合(図12)でも、放射線検出器の統計誤差であるL2及び放射線検出器の解像度(分解能)を示すS1が同じになる事である。
- [0081] つまり、本発明では、放射線検出器中での粒子のエネルギー損失をも含めたエネルギー分布関数F(Ei)を用いる事によって、放射線検出器で、放射線源から放出された粒子の全エネルギーを検出した場合(図11)でも、検出しない場合(図12)でも、同じ精度で放射線検出器の性能評価を行えることを可能とする。

[0082] [検出器の分解能]

これまで、放射線検出器(例えば、シンチレーション検出器(シンチレータと光電変換装置)、半導体検出器、ガス検出器等)の性能を評価する際に、放射線源から放出される粒子が多々使用されてきた。しかし、図7に示した如く、放射線源外に放出された粒子が、放射線源中のエネルギー損失のため、その粒子のエネルギーが生成された際の初期エネルギーより低くなる事を評価しなければ、放射線検出器20のエネルギー校正に間違いが生ずる。また、放出された粒子のエネルギーが非対称な分布であることを考量しなければ、放射線検出器20の性能(分解能など)を正しく評

価することが出来ない。

[0083] [放射線源中でのエネルギー損失を評価]

そこで、実際に放射線検出器で得られた結果に対し、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布関数F(Ei)をシミュレーションで求め、(1)式のR(E)関数により、検出器の性能を評価する。

[0084] 放射線源中での粒子のエネルギー損失が無い場合、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布関数F(Ei)は、Ei=Ej(粒子の初期エネルギー)の時のみ有限値であるため、R(E)は、次のガウス関数になる。

[0085]

$$R(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-(E-E_j)^2}{2\sigma^2}} \quad \dots(5)$$

[0086] 放射線源中での粒子のエネルギー損失をシミュレーションし、得た粒子のエネルギー分布関数F(Ei)と(1)式を用いることにより、放射線検出器の性能評価を正確に行うことを可能にした。

[0087] [放射線源から放出される荷電粒子]

内部転換電子は、原子内のK殻、L殻、M殻などの電子殻からも放出されるために、一つの原子核の励起準位について、何本かの異なったエネルギーを持つ内部転換電子が放出される。そこで、原子核毎の内部転換率を計算することにより、殻と放出率を求める。

[0088] 例えば、¹³⁷Csアイソトープからは、主にK殻、L1殻、L2殻、L3殻から内部転換電子が主として放出される。それぞれ、625. 6keV、655. 9keV、656. 3keV、656. 6keVのエネルギーで放出される。そのため、狭いエネルギー領域で各内部転換電子が重畳する。又、図13の崩壊図が示すように、¹³⁷Csアイソトープからは、複数の放射線(ベータ線、ガンマ線)も内部転換電子と同様に放出される。

[0089] 放射線源を用いて検出器の校正を正確に行うためには、主である粒子のみならず、重畠している各殻からの内部転換電子やベータ線、ガンマ線を評価した解析を行わなければならない。

[0090] 本実施形態では、放射線群(内部転換電子及びベータ線、ガンマ線等)に対して

個々に線源中のエネルギー損失を評価し、放射線源外に放出された個々のエネルギー分布関数 $F_k(E)$ を求め、各放射線に対する放出率 τ_k (内部転換率、崩壊率) を評価して、放射線検出器のエネルギーの校正及び性能評価を行う。

[0091] ここで、放射線群を測定した際に得られた結果を次式で表すことができる。

[0092]

$$R_{total}(E) = \sum_k \tau_k \times R_k(E) = \sum_k \tau_k \times \left(\int F_k(E_i) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(E-E_i)^2}{2\sigma^2}} dE_i \right) \quad \dots (6)$$

[0093] ここで k は、放射線群に含まれる各放射線を識別するための指標であり、放射線の数を示す。

[0094] [実施例]

実施例として ^{137}Cs と ^{207}Bi 薄膜放射線源から放出される放射線群を、プラスチックシンチレータ ($6.2 \times 6.2 \times 1\text{cm}^3$) にて測定した際に得られるエネルギースペクトルと、式(6)を用いて評価した検出器の分解能の結果を図14と図15に示す。

[0095] ^{137}Cs からは、図14に示す如く、K殻 625.6keV 、L1殻 655.9keV 、L2殻 656.3keV 、L3殻 656.6keV の内部転換電子と、Q値 513.9keV ベータ線、 661.6keV ガンマ線の計6本の放射線が主として放出される。図14では、エネルギーの異なるベータ線とガンマ線と4本の内部転換電子を区別している。

[0096] ^{207}Bi アイソトープからは、図15に示す如く、K殻 975.6keV 、L1殻 1047.8keV 、L2殻 1048.4keV 、L3殻 1050.6keV の内部転換電子群と、K殻 481.6keV 、L1殻 553.8keV 、L2殻 554.5keV 、L3殻 556.6keV の内部転換電子群、更に、 569.7keV 、 1063.6keV 、 1770.2keV のガンマ線の計12本の放射線が主として放出される。図15では、エネルギーの異なる3本のガンマ線と8本の内部転換電子の計12本を分離している。

[0097] 図14、図15から明らかなように、粒子のエネルギーの違いのみならず、粒子の種類(電子、ベータ線、ガンマ線等)によらず、正しく評価を行える。

[0098] 狹い領域に重畠している各放射線と薄膜中でのエネルギー損失を評価することにより、プラスチックシンチレータのエネルギー分解能は、 ^{137}Cs の 625.6keV 内部転換電子に対して $\sigma = 4.73 \pm 0.04\%$ (半値幅は $\sigma \times 2.35$ で 11.1% FWHM である)。この半値幅が、図7中のS1に対応する。)、 ^{207}Bi の 975.6keV 内部転換電子に対

して $\sigma = 3.84 \pm 0.06\%$ (半値幅は $\sigma \times 2.35$ で 9.0% FWHM) である。この半値幅が、図 7 中の S1 に対応する。) であることが分かった。

[0099] 以下、具体的な実施形態を詳細に説明する。

[0100] 本実施形態の処理は、図 16 に示す如く、先に説明した線源シミュレーションを行なっておき(ステップ S1)、データとして放射線検出器からの出力結果を入力し(ステップ S2)、その入力したデータを線源シミュレーション(ステップ S1)により得られた、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布関数に対応するように補正する(ステップ S3)ことによって、放射線源外に放出された粒子のエネルギーの決定と放射線検出器の解像度を決定する(ステップ S4)手順で行なわれる。

[0101] 本発明を実施するための評価装置の一例は、図 17 に示す如く、データ入力装置 40 と、線源シミュレーションによって求められた、放射線源の種類と形状に応じたエネルギー損失分を補正するための損失エネルギー換算表(以下、単に換算表と称する)42 の記憶装置と、該換算表 42 を用いて、データ入力装置 40 から入力されたデータを補正するデータ補正装置 44 とから構成される。

[0102] 記憶部に従来の方法に基づく放射線源から放出される粒子のエネルギー評価用プログラムが書き換え不能に書き込まれた従来の評価装置 50 に用いるのに好適な、本発明を実施するための校正装置の一例 60 の構成を図 18 に示す。図において、52 はシンチレーション検出器、半導体検出器、ガス検出器などからなる検出部、54 は、検出部 52 から出力される電気信号などの検出信号を後段に適した形で送る検出信号インターフェース、56 は例えば CPU56A と ROM56B を含む処理部、58 は出力インターフェース、そして 59 は ROM56B に書き込まれた従来の技術に基づくコンピュータプログラムであり、いずれも従来の評価装置 50 に含まれている。62 は入力インターフェース、64 は例えば CPU64A と ROM64B を含む処理部、66 は出力インターフェース、68 は ROM64B に書き込まれた本発明の技術に基づくコンピュータプログラム、そして 42 は換算表であり、いずれも本発明の校正装置 60 に含まれている。コンピュータプログラム 68 は従来の評価装置 50 の出力インターフェース 58 から出力される評価値を本発明の技術に基づいて修正するプログラムである。

[0103] 記憶部に従来の方法に基づく放射線源から放出される粒子のエネルギー評価用

プログラムが書き換え可能に書き込まれた従来の評価装置70に用いるのに好適な、本発明を実施するための校正装置の一例80の構成を図19に示す。図において、72はシンチレーション検出器、半導体検出器、ガス検出器などからなる検出部、74は検出部72から出力される電気信号などの検出を後段に適した形で送る検出信号インターフェース、76は、例えばCPU76AとROM76Bを含む処理部、77は、従来の技術に基づくコンピュータプログラム、78は出力インターフェースで、いずれも従来の評価装置70に含まれている。80AはCPU、80BはROM、82は本発明の技術に基づくコンピュータプログラム、そして42は換算表であり、いずれも本発明の校正装置80に含まれている。

- [0104] 本発明の技術に基づくコンピュータプログラム82は、ROM76Bに書き込まれている従来の技術に基づくプログラム77の全部あるいは一部の書き換えプログラム、あるいは追加書き込みプログラムであり、ROM76Bに書き込まれているプログラムに応じて予め作成してROM80Bに書き込んでおくことができる。
- [0105] また、ROM76Bに書き込まれている従来のコンピュータプログラムを、本発明の技術に基づくコンピュータプログラム82が書き込まれているPCに一旦読み込み、そのコンピュータプログラム82に基づいてCPU80Aで処理して本発明の技術に書き換えた後、ROM76Bに戻すようにすることもできる。
- [0106] なお、ROM56B、64B、76B及び80aは、各々CPUとオンボード構成することもできるし、インターフェースを介して接続することもでき、また、ハードディスクその他の記憶手段で代替することもできる。
- [0107] 前記実施例においては、いずれも、換算表42を用いているので、放射線源の種類と形状に応じたエネルギー損失をあらかじめ作表しておくことができ、処理が容易且つ高速となる。なお、計算式を用いて計算する方法など換算表以外の方法で評価を修正することも可能である。
- [0108] 又、前記説明においては、モンテカルロシミュレーションを用いていたが、シミュレーションの方法は、これに限定されない。
- [0109] 又、評価対象の放射線源も薄膜線源に限定されず、例えば、改訂3版アイソトープ便覧(昭和59年12月20日発行、編者:社団法人アイソトープ協会、発行者:海老原

熊雄、発行所:丸善株式会社)の図17. 1、図17. 2、図17. 3、図17. 4、図17. 5、図17. 6、図17. 7、図17. 8等にて紹介されているような各種放射線源に対しても、各シミュレーションの条件で、放射線源の形状、サイズ、材質、密度、放出される粒子の種類及びエネルギー等を設定することにより、同様に適用できる。

[0110] 本発明の技術を用いると、粒子線のエネルギーが正しく評価された放射線源を製造することができる。また、放射線源の粒子線のエネルギーを正しく校正あるいは評価することができる。

[0111] 又、校正対象の放射線検出器もプラスチックシンチレータに限定されない。

産業上の利用の可能性

[0112] 放射線源から放出される粒子線の評価、及び、放射線検出器の校正に利用できる

◦

請求の範囲

- [1] 放射線源から放出される粒子のエネルギーを検出器で求める際に、放射線源外に放出された粒子のエネルギーとその粒子が生成された際に持っていた初期エネルギーとのずれ ΔE とその計測数との関係から求められるヒストグラムを非対称と扱い、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布(L1)を求め、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価することを特徴する、放射線源から放出される粒子線の評価方法。
- [2] 請求項1で評価したエネルギー損失分を補正することを特徴とする放射線源から放出される粒子線の評価方法。
- [3] 前記放射線源中のエネルギー損失を、放射線源内における粒子線の発生位置と放出方向から、粒子の放射線源中の通過距離を求めて評価することを特徴とする、請求項1又は2に記載の放射線源から放出される粒子線の評価方法。
- [4] 前記通過距離に、放射線源と放射線検出器の相互作用部の通過距離とを含むことを特徴する、請求項3に記載の放射線源から放出される粒子線の評価方法。
- [5] 前記粒子線の放出方向を全方向に設定することを特徴とする、請求項3に記載の放射線源から放出される粒子線の評価方法。
- [6] 前記放射線源中のエネルギー損失を評価し求めた、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布関数F(Ei)と、次式

$$R(E) = \int F(E_i) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-(E-E_i)^2}{2\sigma^2}} dE_i \quad \dots (1)$$

で示される評価関数R(E)関数(ここで、Eは粒子のエネルギー、Eiは生成された粒子が持つ初期エネルギー、σは標準偏差であり検出器の分解能を示す。)を用いて求めることを特徴とする、請求項3に記載の放射線源から放出される粒子線の評価方法。

- [7] 前記放射線源中の粒子のエネルギー損失を、放射線群(各殻からの内部転換電子、ベータ線、ガンマ線等)に対して、個々に放射線源中のエネルギー損失による

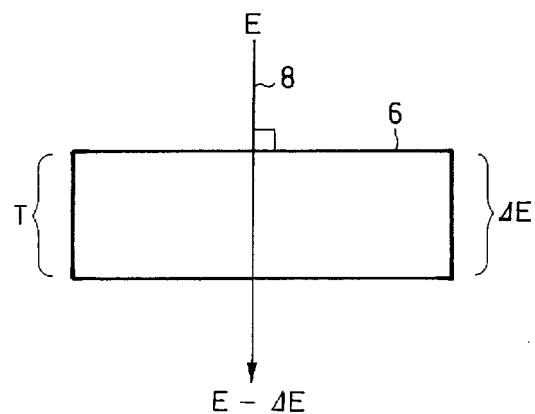
分布関数 $F_k(E)$ を求め、各放射線の放出率 τ_k (ここで k は、放射線群に含まれる各放射線を識別するための指標であり、放射線の数を示す。)を評価して求めることを特徴とする、請求項3に記載の放射線源から放出される粒子線の評価方法。

- [8] 前記粒子線が荷電粒子線であることを特徴とする請求項1乃至7のいずれかに記載の放射線源から放出される粒子線の評価方法。
- [9] 前記放射線源が、薄膜放射線源(内部転換電子を放出する放射線源等)、ベータ線源又はアルファ線源であることを特徴とする、請求項1乃至8のいずれかに記載の放射線源から放出される粒子線の評価方法。
- [10] さらに、放射線検出器で測定したエネルギースペクトルを前記 ΔE だけ補正し、最頻値が一致するように対応付けた補正エネルギースペクトル(L_3, L_3')を求めることが特徴する、請求項1に記載の放射線源から放出される粒子線のエネルギーを用いた放射線検出器の評価方法。
- [11] 請求項1で求めた粒子のエネルギー分布(L_1)の計測数の尺度を、請求項10で求めた補正エネルギースペクトル(L_3, L_3')に合うように変えたエネルギースペクトル L_{1a} を求めることが特徴とする、放射線検出器の評価方法。
- [12] 請求項10で求めた補正エネルギースペクトル(L_3, L_3')と、請求項11で求めたエネルギースペクトル L_{1a} を用い、放射線検出器の統計誤差 L_2 を求めることが特徴とする、放射線検出器の評価方法。
- [13] 放射線源から放出される粒子のエネルギーを検出器で求める際に、放射線源外に放出された粒子の持つエネルギーとその粒子が生成された際に持っていた初期エネルギーとのずれ ΔE と計測数との関係から求められるヒストグラムを非対称と扱い、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布(L_1)を求めるステップを含み、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価することを特徴とする、放射線源から放出される粒子線評価用のコンピュータプログラム。
- [14] 放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない方法に基づく放射線源から放出される粒子線を評価する評価プログラムが記憶部に書き換え不能に書き込まれ、且つ、そのプログラムの処理部を備えた、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない従来の評価装置にお

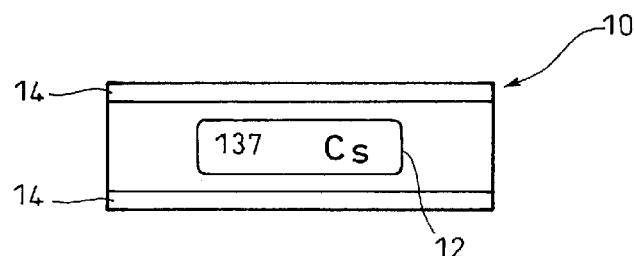
ける前記評価を、前記記憶部と異なる記憶部に書き込まれた放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価して修正するための、請求項13に記載のコンピュータプログラム。

- [15] 放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない方法に基づく放射線源から放出される粒子線の評価プログラムが記憶部に書き換え可能に書き込まれ、且つ、そのプログラムの処理部を備えた、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価しない評価装置の前記記憶部に、書き込むか前記評価プログラムを書き換えることにより放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価して修正するための、請求項13に記載のコンピュータプログラム。
- [16] 放射線源から放出される粒子のエネルギーを検出器で求める際に、放射線源外に放出された粒子の持つエネルギーとその粒子が生成された際に持っていた初期エネルギーとのずれ ΔE と計測数との関係から求められるヒストグラムを非対称と扱い、放射線源外に放出された粒子のエネルギー分布(L1)を求め、放射線源内を粒子線が通過する際に失われるエネルギー損失分を評価して補正することを特徴する、放射線源から放出される粒子線の評価装置。
- [17] 放射線源の種類と形状に応じたエネルギー損失の換算表を含み、前記評価したエネルギー損失分を補正する補正手段を備えることを特徴とする、請求項16に記載の放射線源から放出される粒子線の評価装置。
- [18] 請求項1乃至9のいずれかに記載の評価方法で粒子線のエネルギーが評価された放射線源を用いることを特徴とする放射線検出器の校正方法。
- [19] 請求項16又は17に記載の評価装置を含むことを特徴とする放射線検出器の校正装置。
- [20] 請求項13に記載のコンピュータプログラムがインストールされたことを特徴とする放射線検出器の校正装置。
- [21] 請求項1乃至9のいずれかに記載の評価方法で評価されたことを特徴とする放射線源。

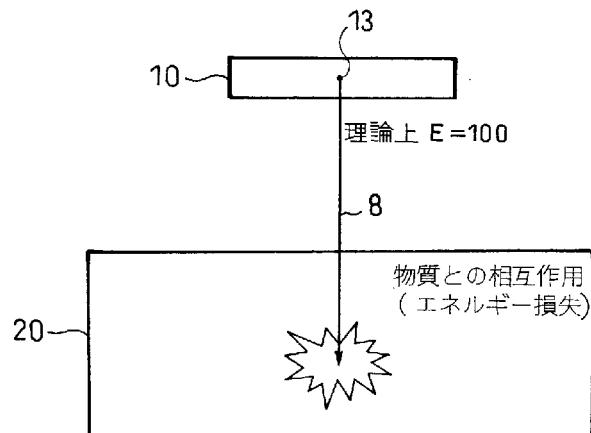
[図1]



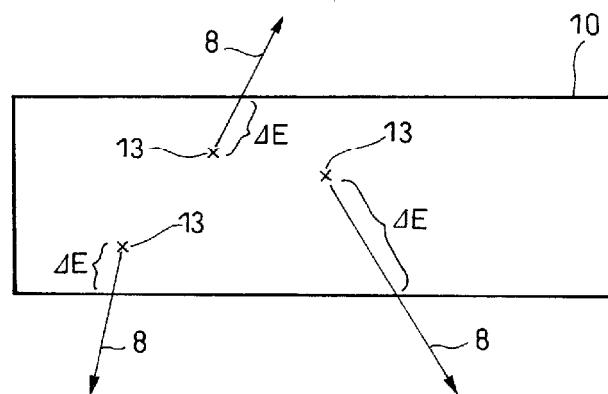
[図2]



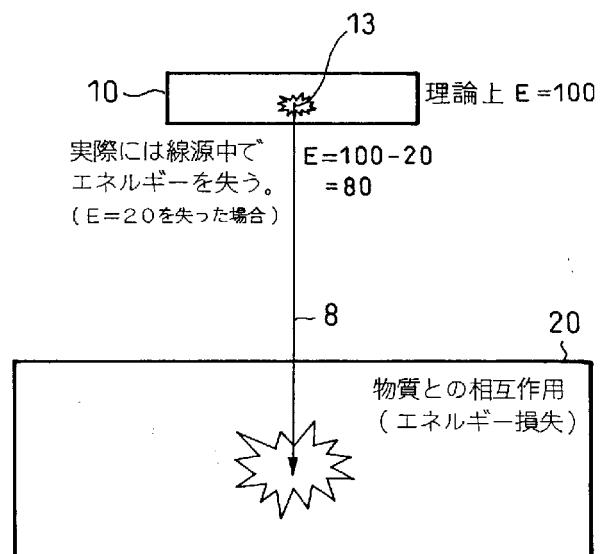
[図3]



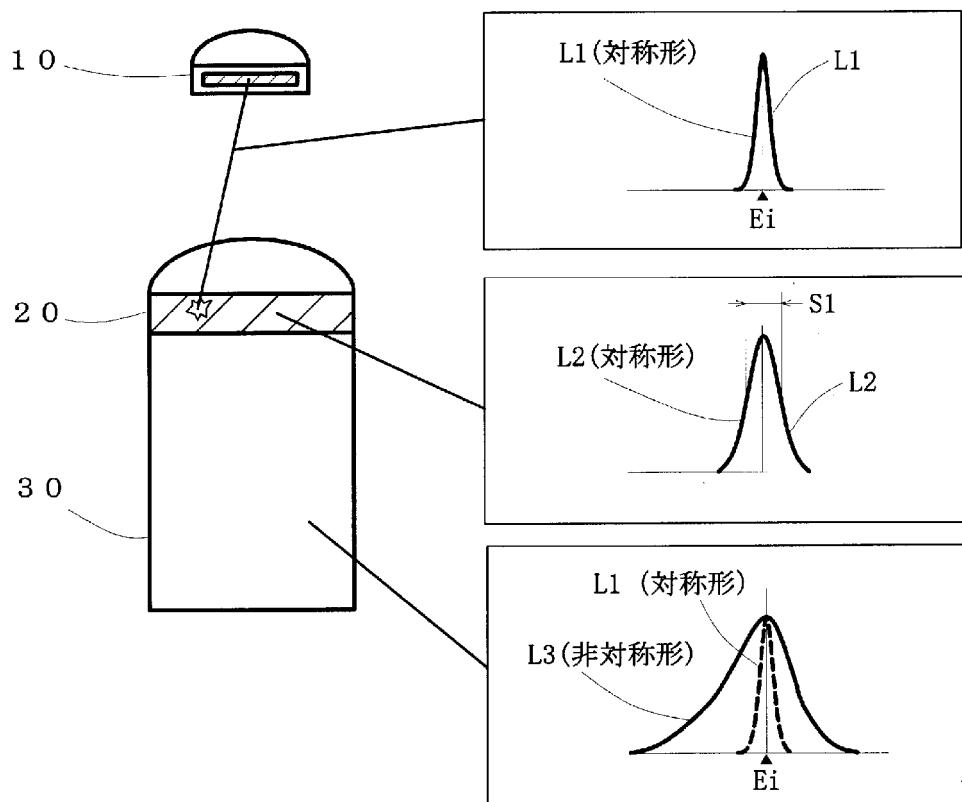
[図4]



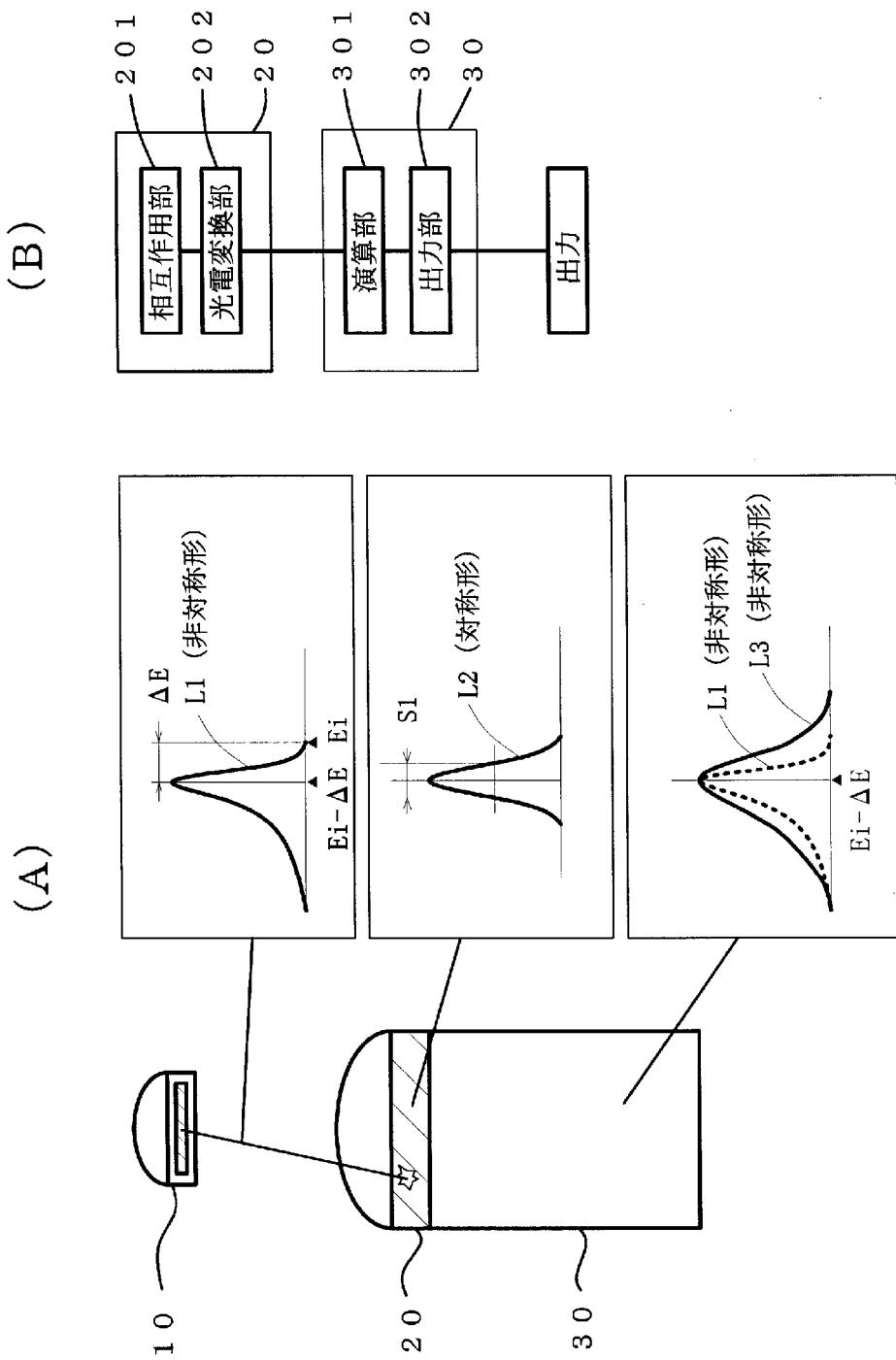
[図5]



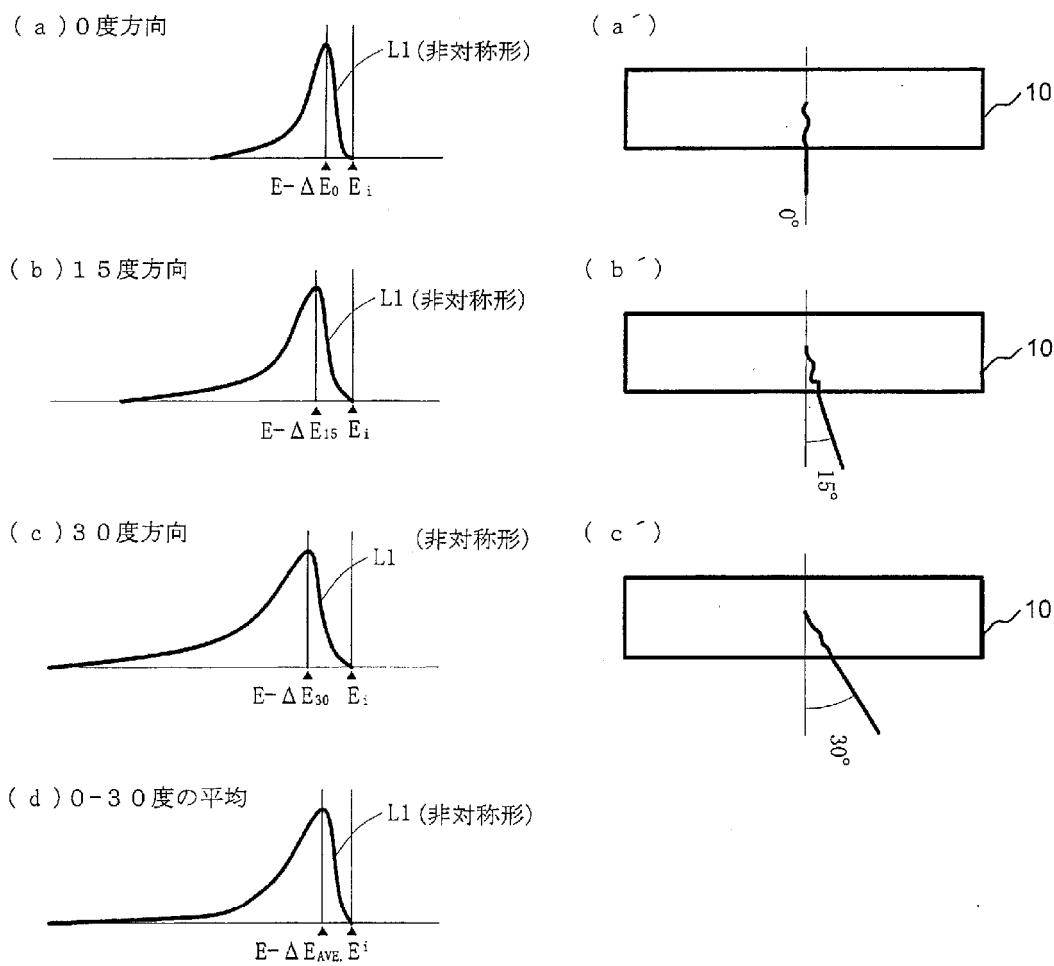
[図6]



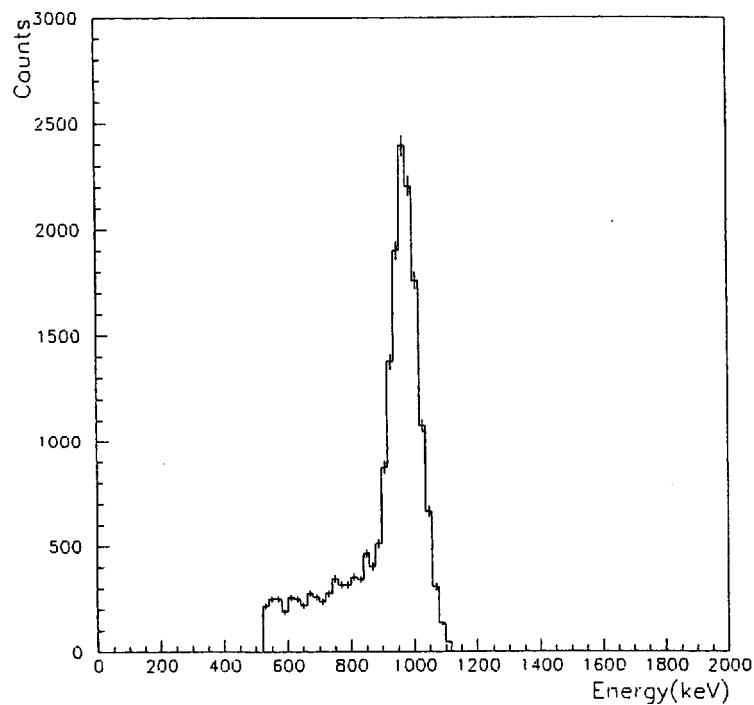
[図7]



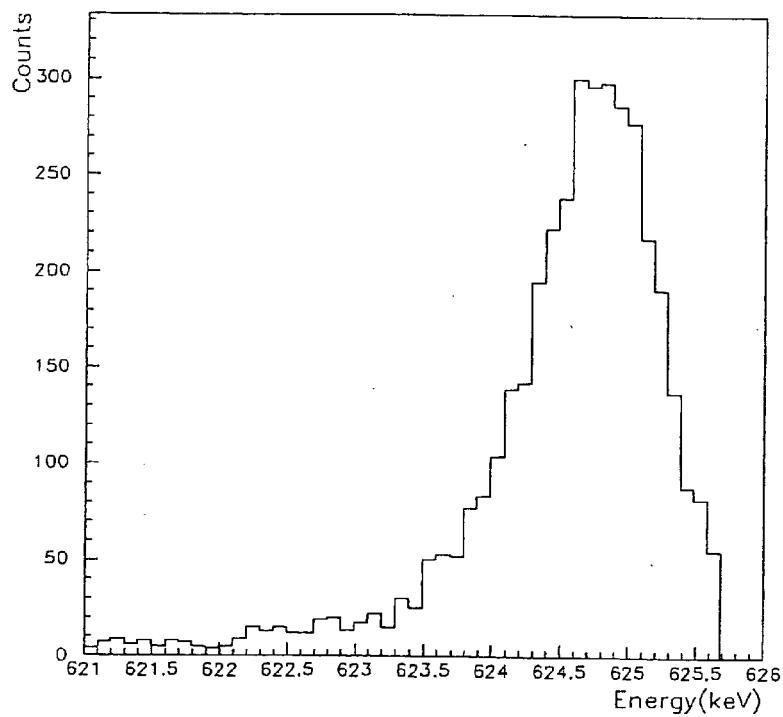
[図8]



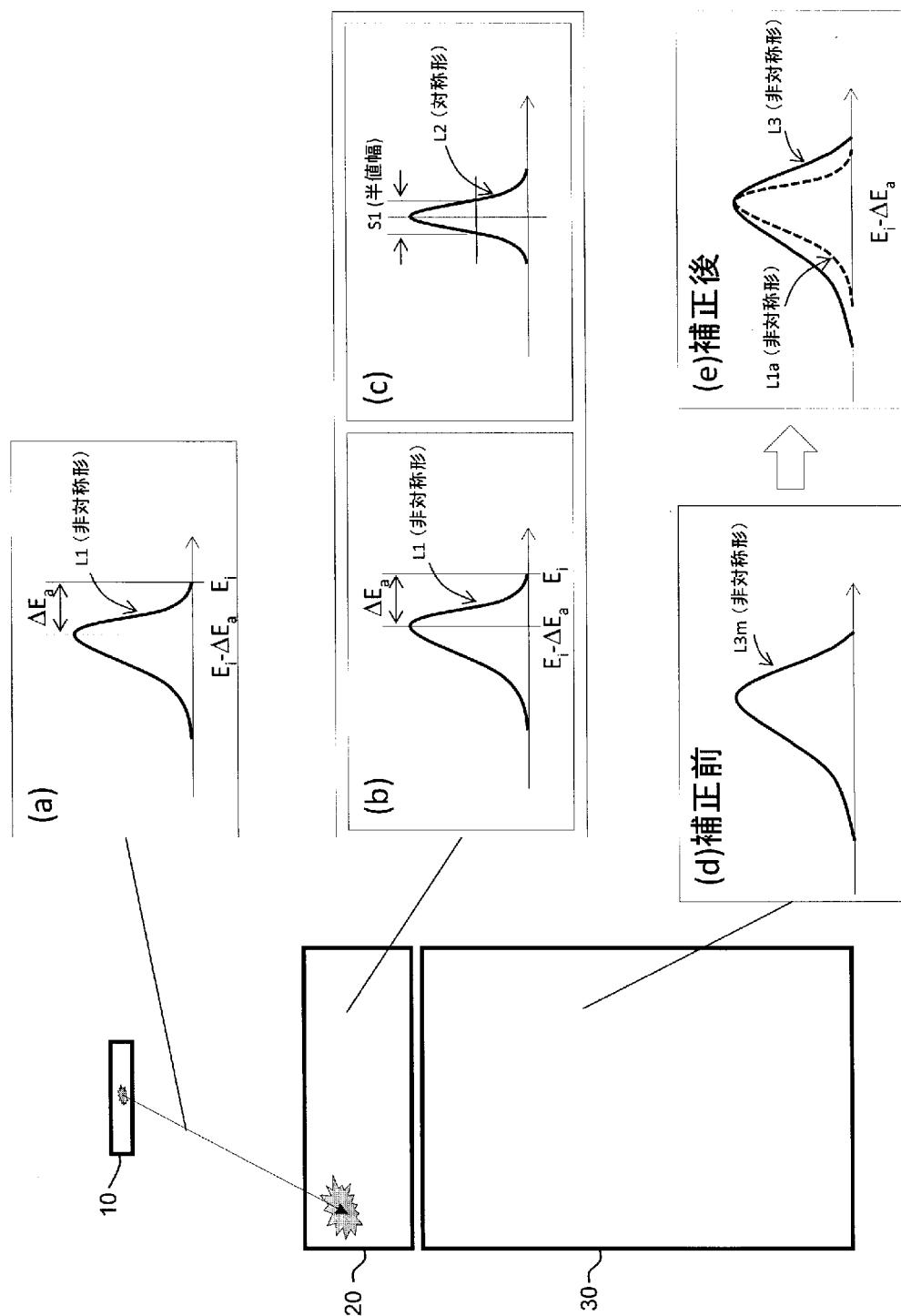
[図9]



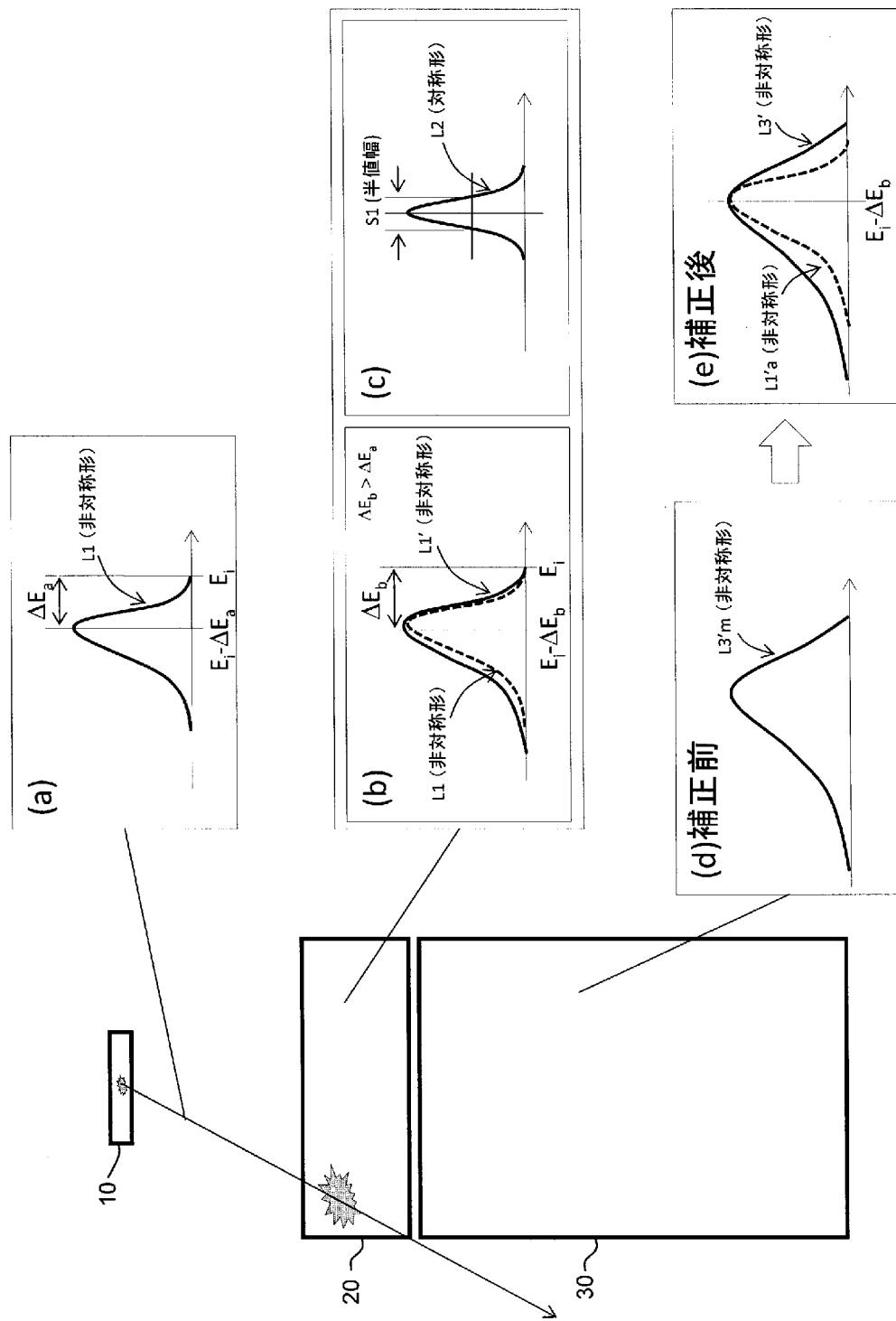
[図10]



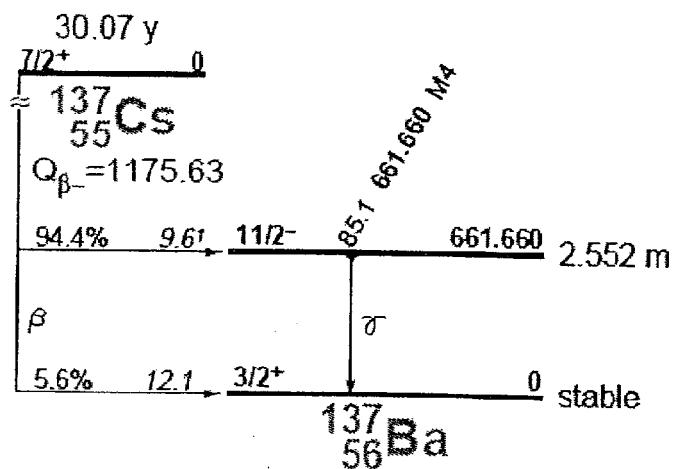
[図11]



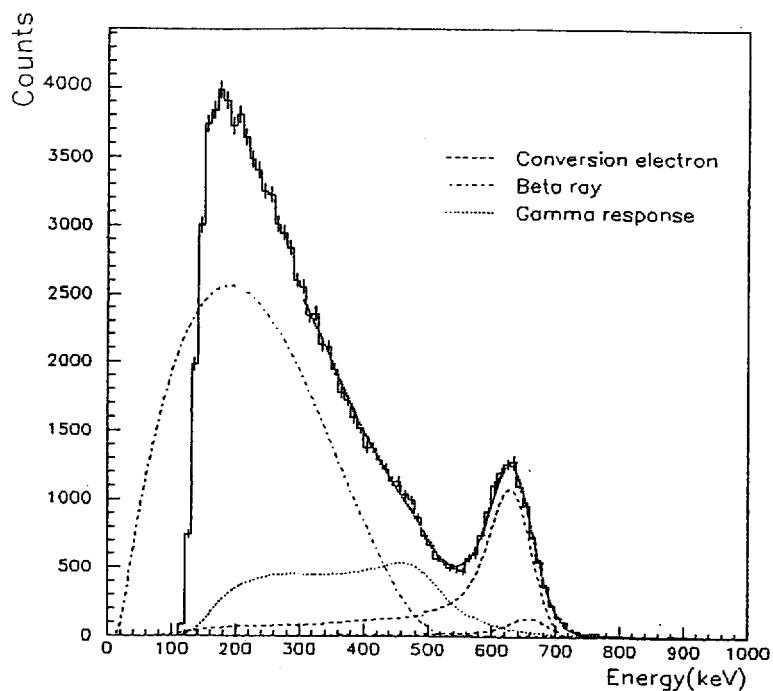
[図12]



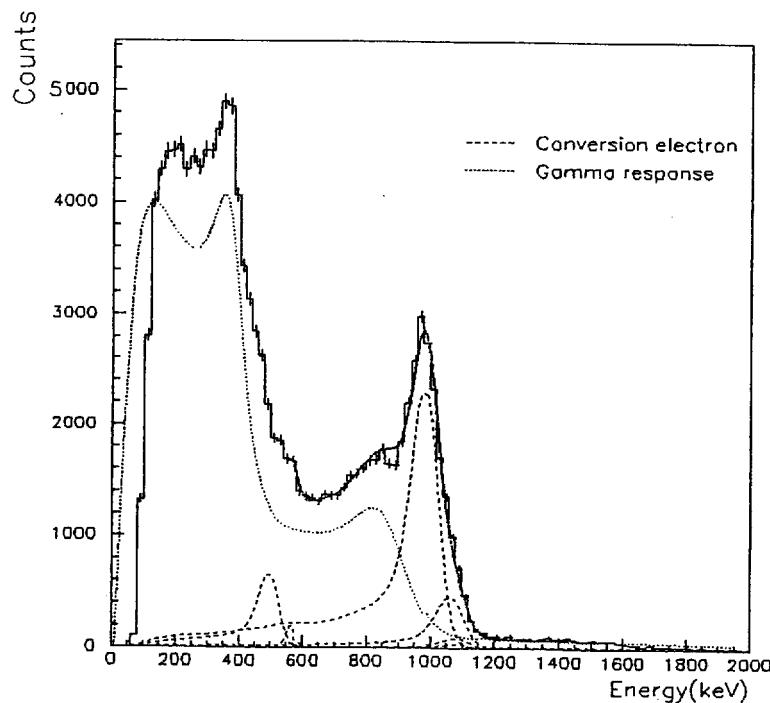
[図13]



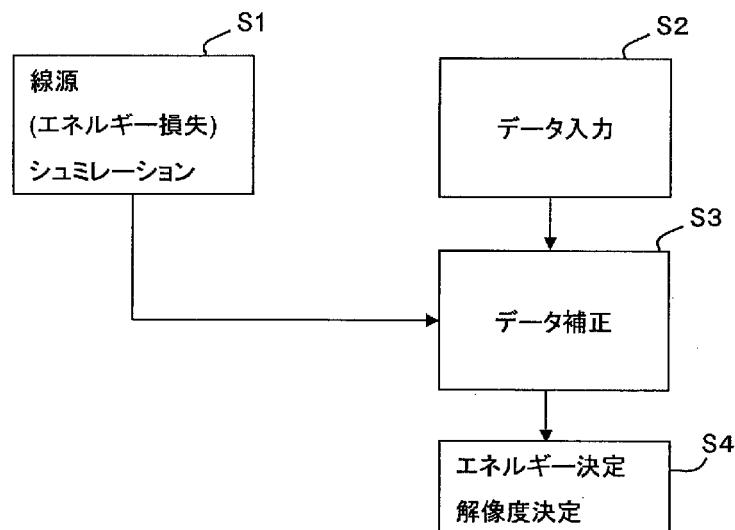
[図14]



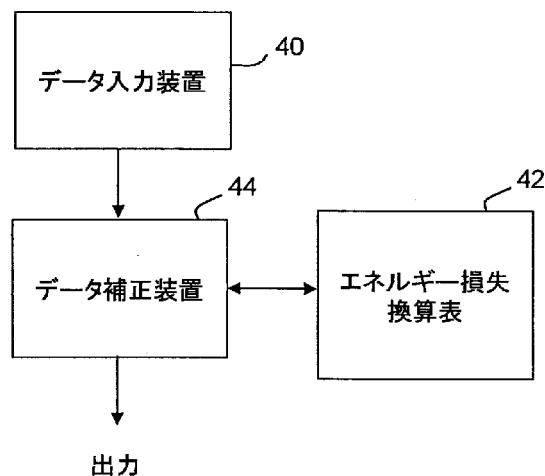
[図15]



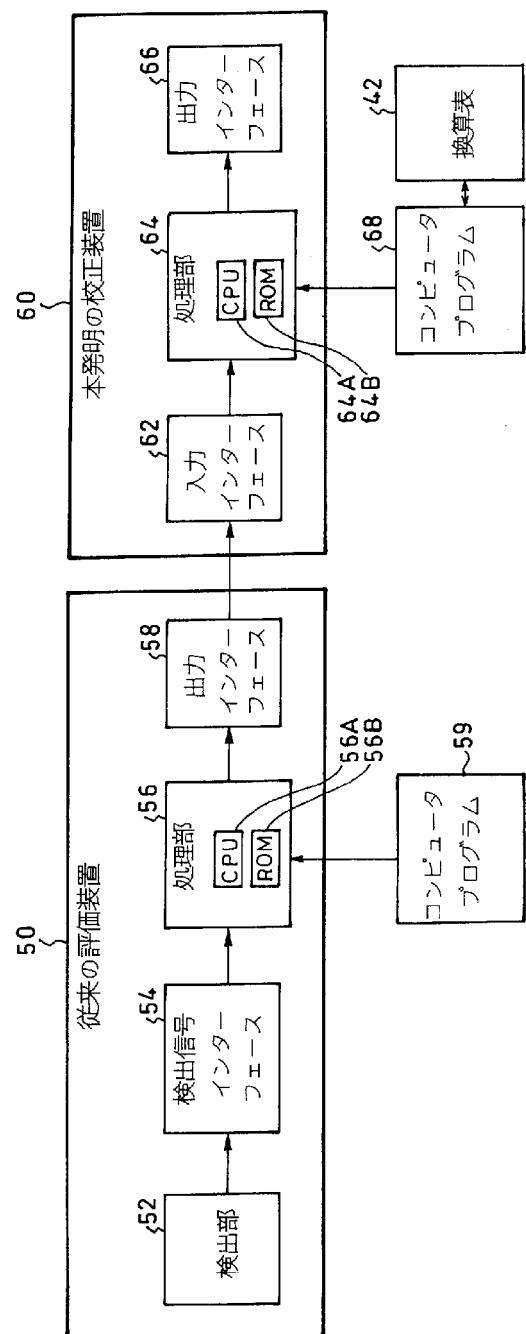
[図16]



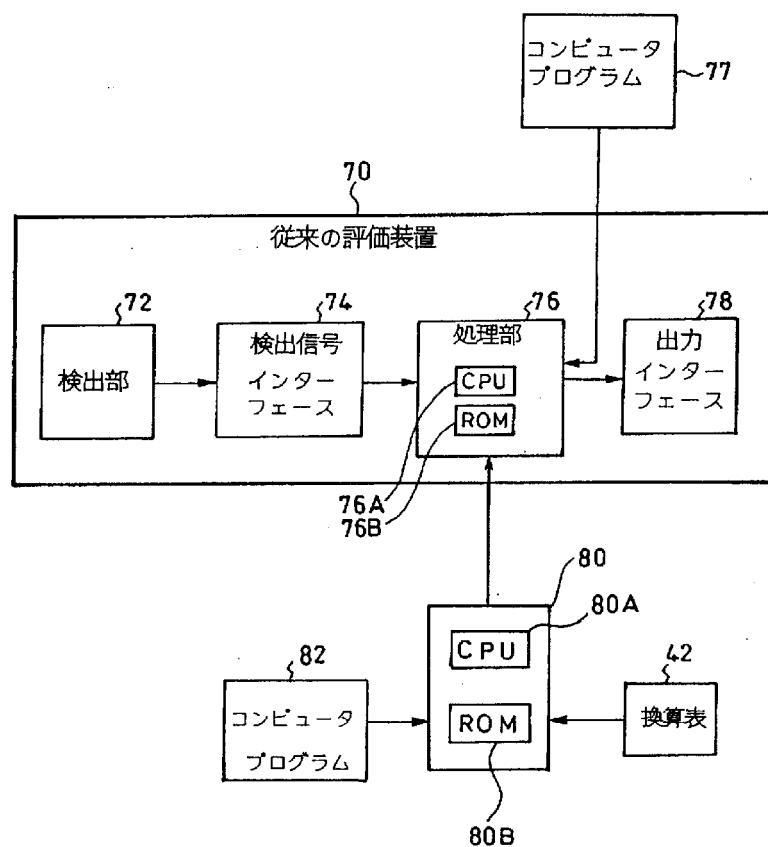
[図17]



[図18]



[図19]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2008/069160

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01T7/00 (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)
G01T7/00

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

<i>Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1922-1996</i>	<i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i>	<i>1996-2008</i>
<i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1971-2008</i>	<i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1994-2008</i>

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
*JSTPlus (JDreamII), JST7580 (JDreamII),
 Science Citation Index Expanded (Web of Science)*

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	C.Roldan et al, "Monte Carlo simulation of alpha spectra in low-geometry measurements", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1994, Vol.338, pages 506 to 510	1-2, 9
Y	J.L.FERRERO et al, "BACKSCATTERING AND SELF-ABSORPTION CORRECTIONS IN THE MEASUREMENT OF ALPHA-EMITTERS IN 2π GEOMETRY", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1990, Vol.286, pages 384 to 387	3-8, 10-21
A	H.KLEIN et al, "ENERGY AND ANGLE STRAGGLING EFFECTS IN A D(d,n) ³ He NEUTRON SOURCE USING A GAS TARGET", Nuclear Instruments and Methods, 1982, Vol.193, No.3, pages 635 to 644	1-21

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
03 December, 2008 (03.12.08)

Date of mailing of the international search report
16 December, 2008 (16.12.08)

Name and mailing address of the ISA/
 Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2008/069160

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	L.E.PORTER et al, "STOPPING POWER OF POLYSTYRENE FOR 2.2 TO 5.9 MeV PROTONS", NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS, 1978, Vol.155, No.1-2, pages 25 to 28	1-21

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01T7/00(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. G01T7/00

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	1971-2008年
日本国実用新案登録公報	1996-2008年
日本国登録実用新案公報	1994-2008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(JDreamII), JST7580(JDreamII), Science Citation Index Expanded(Web of Science)

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 請求の範囲の番号
X	C.Roldan et al, "Monte Carlo simulation of alpha spectra in low-geometry measurements", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1994, 第338巻, 第506-510頁	1-2, 9
Y	J.L.FERRERO et al, "BACKSCATTERING AND SELF-ABSORPTION CORRECTIONS IN THE MEASUREMENT OF ALPHA-EMITTERS IN 2π GEOMETRY", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1990, 第286巻, 第384-387頁	3-8, 10-21
		3-8, 10-21

 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」国際出願目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」国際出願目前で、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 03.12.2008	国際調査報告の発送日 16.12.2008
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ISA/JP） 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） 中塚 直樹 電話番号 03-3581-1101 内線 3273 21 3608

C (続き) . 関連すると認められる文献		関連する 請求の範囲の番号
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	
A	H. KLEIN et al, "ENERGY AND ANGLE STRAGGLING EFFECTS IN A D(d, n) ³ He NEUTRON SOURCE USING A GAS TARGET", Nuclear Instruments and Methods, 1982, 第 193 卷第 3 号, 第 635-644 頁	1-21
A	L. E. PORTER et al, "STOPPING POWER OF POLYSTYRENE FOR 2.2 TO 5.9 MeV PROTONS", NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS, 1978, 第 155 卷第 1-2 号, 第 25-28 頁	1-21