

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02013/105519

発行日 平成27年5月11日 (2015. 5. 11)

(43) 国際公開日 平成25年7月18日 (2013. 7. 18)

(5) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)		
<b>GO 1 T</b>	<b>1/167</b>	<b>(2006. 01)</b>	GO 1 T	1/167	C	2 G 1 8 8		
<b>GO 1 T</b>	<b>1/36</b>	<b>(2006. 01)</b>	GO 1 T	1/36	A			
<b>GO 1 T</b>	<b>1/17</b>	<b>(2006. 01)</b>	GO 1 T	1/17	C			
<b>GO 1 T</b>	<b>7/00</b>	<b>(2006. 01)</b>	GO 1 T	7/00	B			

審査請求 有 予備審査請求 未請求 (全 58 頁)

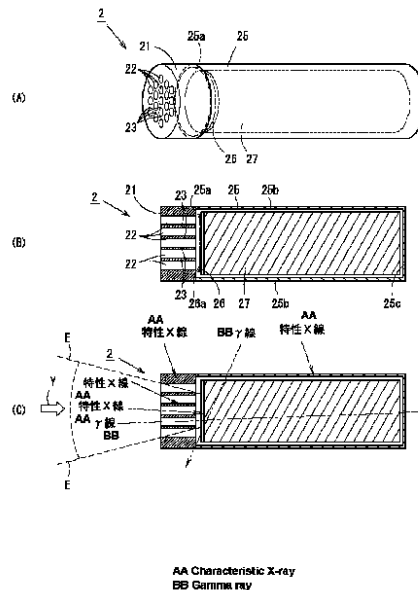
出願番号	特願2013-518605 (P2013-518605)	(71) 出願人	301032942 独立行政法人放射線医学総合研究所 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
(21) 国際出願番号	PCT/JP2013/000114	(74) 代理人	100135781 弁理士 西原 広徳
(22) 国際出願日	平成25年1月12日 (2013. 1. 12)	(74) 代理人	100135781 弁理士 西原 広徳
(11) 特許番号	特許第5400988号 (P5400988)	(72) 発明者	小林 進悟 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内
(45) 特許公報発行日	平成26年1月29日 (2014. 1. 29)	(72) 発明者	内堀 幸夫 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
(31) 優先権主張番号	特願2012-5699 (P2012-5699)		
(32) 優先日	平成24年1月13日 (2012. 1. 13)		
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法

(57) 【要約】

特定方向 Y に存在する 線と特性 X 線を放出する放射性物質を検出する放射性物質検出装置 2 に、入射する放射線を止めて検出する放射線検出用素子 26 と、放射線を遮蔽して前記放射線検出用素子 26 に到達させない遮蔽容器 25 とコリメータ 21 を備え、前記放射線検出用素子 26 は、前記特定方向 Y に存在する放射性物質から到来する特性 X 線を止めて検出し、かつ、前記放射性物質から到来する 線を透過させる厚さであり、前記遮蔽容器 25 及びコリメータ 21 の穴 22 と穴 22 の間部 23 の厚みは、前記特定方向 Y 以外の方向から到来する放射線のうち特性 X 線を遮蔽し、かつ、前記特定方向 Y 以外の方向から到来する放射線のうち 線を透過させる厚さである。これにより、重量が格別に軽く、かつ十分な性能が得られる放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法を提供することができる。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

特定方向に存在する放射性物質を検出する放射性物質検出装置であって、前記特定方向に存在して線と特性 X 線の両方を放出する放射性物質から到来する特性 X 線を止めて検出し、かつ、前記放射性物質から到来する線を透過させる厚さの放射線検出用素子と、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち特性 X 線を遮蔽し、かつ、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち線を透過させる厚さの遮蔽体とを備えた放射性物質検出装置。

## 【請求項 2】

前記放射線検出用素子により検出した特性 X 線のピークを出力するピーク出力部を備えた請求項 1 記載の放射性物質検出装置。

## 【請求項 3】

前記放射線検出用素子は、前記特性 X 線のピーク周辺のスペクトルを少なくとも 20 keV から 40 keV にわたり計測する構成である請求項 2 記載の放射性物質検出装置。

## 【請求項 4】

前記放射線検出用素子は、特性 X 線の入射方向に対する有感部分の厚みが、前記放射線検出用素子に使用する物質中での計測対象とする放射性物質の特性 X 線の平均自由行程 ( $\lambda_1$ ) を単位として  $1 \cdot \lambda_1$  以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の前記放射線検出用素子に使用する物質中での平均自由行程 ( $\lambda_2$ ) を単位として  $0 \cdot 14 \lambda_2$  以下の範囲に形成されている請求項 1、2、または 3 記載の放射性物質検出装置。

## 【請求項 5】

前記遮蔽体の厚みは、計測対象とする放射性物質の特性 X 線の遮蔽体物質中の平均自由行程 ( $\lambda_3$ ) を単位として  $1 \cdot 6 \lambda_3$  以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の遮蔽体物質中での平均自由行程 ( $\lambda_4$ ) を単位として  $0 \cdot 22 \lambda_4$  以下の範囲に形成された請求項 1 から 4 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置。

## 【請求項 6】

前記遮蔽体は、前記放射線検出用素子の周囲を遮蔽する遮蔽容器、前記放射線検出用素子の検出対象側に設けられるコリメータ、またはこれらの両方で構成され、前記遮蔽体の厚みは、前記遮蔽体が複数の穴から構成されているマルチコリメータの場合は穴と穴の間部の厚みを指し、前記遮蔽体が 1 つの穴のみを持つシングルコリメータの場合は穴の側壁の厚みを指し、前記遮蔽体が 1 つの穴を有して後方に複数の放射線検出用素子が設けられるピンホールコリメータであれば穴が設けられた前方板の厚みを指し、前記遮蔽体が複数の穴を有して後方に複数の放射線検出用素子が設けられるコーデットマスク型コリメータであれば穴が設けられた前方板の厚みを指し、前記遮蔽体が前記遮蔽容器の場合は前記放射線検出用素子の少なくとも側方に位置する側壁の厚みを指す、請求項 5 記載の放射性物質検出装置。

## 【請求項 7】

前記特性 X 線のピークの解析に用いるテンプレートを記憶する記憶部と、前記テンプレートと前記放射線検出用素子により計測したスペクトルを用いて前記特性 X 線のピークを解析する解析部とを備え、前記テンプレートは、前記特性 X 線領域のエネルギーよりも高エネルギー側の 60 - 250 keV に位置して前記特性 X 線のピークよりも強いピーク部分を有するデータである

10

20

30

40

50

請求項 1 から 6 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置。

【請求項 8】

前記放射線検出用素子により検出したスペクトルのうち 線領域のスペクトルを用いて放射性物質の種類を候補を特定する候補特定処理を実行し、

前記放射線検出用素子により検出したスペクトルのうち特性 X 線領域のスペクトルを用いて前記スペクトル内に前記候補特定処理で特定した放射性物質が存在するか識別することで特定方向の放射性物質の種類を識別する種類識別処理を実行する放射性物質識別部を備えた

請求項 1 から 7 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置。

【請求項 9】

請求項 1 から 8 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置を複数備え、

前記特定方向を撮像して撮像画像を取得するカメラと、

前記複数の放射性物質検出装置がそれぞれ検出した放射性物質による放射性物質の量を検出領域別に二次元画像にする二次元画像化部と、

前記撮像画像と前記二次元画像を位置対応させて合成し合成画像を作成する合成部と、

前記合成画像を表示する表示部とを備えた

放射線源位置可視化システム。

【請求項 10】

請求項 1 から 8 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置を用い、

特性 X 線のピーク周辺のスペクトルを計測し、

前記スペクトルに基づいて少なくとも前記放射性物質の存在を認識する

放射性物質検出方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、例えば 線と特性 X 線の両方を放出する放射性物質を検出するような放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から、原子力発電所、核燃料・使用済核燃料処理施設、原子力緊急時等、様々な方向から放射線が到来する環境において、放射性物質の存在位置を確認するガンマカメラが使用されている。このようなガンマカメラとして、放射線計測装置が提案されている（特許文献 1 参照）。

【0003】

この放射線計測装置は、放射性物質から放出される 線のうち所定方向成分を透過させる穴を複数有するマルチコリメータと、マルチコリメータを通過した 線を可視光に変換する蛍光板と、前記マルチコリメータおよび蛍光板を覆い放射線ノイズを低減する遮蔽容器を備えている。そして、この放射線計測装置は、 線画像と別のカメラにより撮影した画像を合成する。このようにして、放射線計測装置は、計測対象物に対して、内部の放射性物質の状態、サイズ、形状、位置を放射線イメージとしてとらえることができる。

【0004】

しかし、このような放射線計測装置は、放射性物質から放出される 線を検知するものであるため、非常に重いものになるという問題点があった。詳述すると、様々な方向から放射線が到来する環境において 線の到来方向を把握するために、遮蔽容器は、他の方向から到来する 線を遮蔽する必要がある。 線を遮蔽するために、遮蔽容器は、厚い鉛を用いる必要がある。また、蛍光板は、 線を検出するために、 線が透過しないように十分な厚みと高い密度が必要となる。

【0005】

例えば、 $^{137}\text{Cs}$  から放出されるエネルギーが 662 keV の 線を検出し、その到

10

20

30

40

50

来方向を把握するような場合であれば、光電子増倍管 27 の前段に設けられる蛍光板 126 と、これらを被覆する遮蔽容器 125 は、図 12 に示すようになる。すなわち、前記線を 98% の効率で遮蔽する場合、比重が 11.3 の鉛を使用すると、遮蔽容器 125 は 34 mm 程度の厚みになる。蛍光板 126 は、物質として比重が 3.7 の NaI (直径 50 mm) を使用した場合、前記線を 8% の効率で検出するだけでも 10 mm 程度の厚みになる。そうすると、放射線計測装置 102 は、仮に、所定方向成分を透過させる穴をひとつ有するシングルコリメータ 121 により視野を ±22 度とし、線による蛍光板の発光を長さ 65 mm の光電子増倍管により読み出す方式で製作した場合、遮蔽容器 125 及び蛍光板 126 のみの重量で 25 kg 程度となるため、持ち運ぶには重いものとなる。

【0006】

仮に、遮蔽容器を構成する鉛を薄くするか、蛍光板を薄くすれば、放射線計測装置は、軽量になる。しかし、このようにして軽量にした放射線計測装置は、顕著に精度が低下するという問題点を有する。すなわち、放射線計測装置は、遮蔽容器の鉛を薄くすると、所定方向以外から到来する線を検知してしまい、蛍光板を薄くすると、線の透過量が増えて感度が低くなってしまふ。従って、線を放出する放射性物質を検出しようとする場合、感度の関係から、遮蔽容器を薄くするには限界があり、蛍光板を薄くするのにも限界がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献 1】特開 2004 - 85250 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

この発明は、上述した問題に鑑み、様々な方向から放射線が到来する環境において使用可能で、重量が格別に軽く、かつ十分な性能が得られる放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

この発明は、様々な方向から放射線が到来する環境において、特定方向に存在する放射性物質を検出する放射性物質検出装置であって、前記特定方向に存在して線と特性 X 線の両方を放出する放射性物質から到来する特性 X 線を止めて検出し、かつ、前記放射性物質から到来する線を透過させる厚さの放射線検出用素子と、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち特性 X 線を遮蔽し、かつ、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち線を透過させる厚さの遮蔽体とを備えた放射性物質検出装置であることを特徴とする。

【発明の効果】

【0010】

この発明により、様々な方向から放射線が到来する環境において使用可能で、重量が格別に軽く、かつ十分な性能が得られる放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図 1】放射線検出用素子の厚みと性能とを表すグラフによる説明図。

【図 2】遮蔽容器の厚みの変化に対する遮蔽、透過、バックグラウンドの変化を説明する説明図。

【図 3】放射性物質の種類に用いる放射性物質のエネルギースペクトルの説明図。

【図 4】放射線源位置可視化システムのシステム構成を示すブロック図。

【図 5】放射性物質検出装置の構成を説明する説明図。

【図 6】コンピュータの機能を示す機能ブロック図。

10

20

30

40

50

【図 7】放射線源位置可視化システムによる検出結果を示すグラフによる説明図。

【図 8】放射線源位置可視化システムによるイメージング画像の画面構成図。

【図 9】実施例 2, 3 の放射性物質検出装置の縦断面を示す説明図。

【図 10】実施例 4 の放射線源位置可視化システムのブロック図。

【図 11】実施例 5 の放射線源位置可視化システムのブロック図。

【図 12】従来の放射線計測装置を示す縦断面図。

【発明を実施するための形態】

【0012】

放射性物質の検出では、一般に、これら放射性物質から放出される  $\gamma$  線を検出することが好ましい。これは、 $\gamma$  線が高いエネルギーを有しているため、放射線計測機器の信号処理回路における信号対雑音比の観点から計測が容易であることと、一般的に  $\gamma$  線が放出されている環境では高エネルギーの  $\gamma$  線領域ではバックグラウンドが低くなることと、放射性物質の 1 崩壊あたりに多くの個数の  $\gamma$  線を放出することからである。しかし、ガンマカメラを軽量化しようとして遮蔽容器を薄くすると、 $\gamma$  線が透過してしまい方向性の感度が悪くなり、放射線検出用素子を薄くすると、 $\gamma$  線の検出感度が低下するという問題が生じる。

10

【0013】

本発明者らは、放射性物質を検出するガンマカメラを軽量化するために、鋭意研究を行った。まず、軽量で小型であっても  $\gamma$  線の検出感度の高い材質を  $\gamma$  線検出素子として用いることで  $\gamma$  線検出素子をコンパクトにし、遮蔽体となる遮蔽容器及びコリメータの鉛の重量を減らすことで、ガンマカメラの軽量化を目指した。しかし、この方法では、例えば遮蔽

20

【0014】

そこで本発明者らは、放射性物質から放出される  $\gamma$  線に加えて、放射性物質の近傍に存在する通常物質により前記  $\gamma$  線が散乱して生じるエネルギー（主として 200 keV 前後のエネルギー領域）に着目した。そして、このエネルギー領域の散乱  $\gamma$  線をも含めて前記  $\gamma$  線を計測し、 $\gamma$  線の計数率を上げることで  $\gamma$  線検出素子をコンパクトにするということを検討した。これにより、ガンマカメラの感度はさらなる増加が見込め、遮蔽体となる遮蔽容器及びコリメータの鉛の重量を減らすことができる。しかし、実際には、近傍に存在する物質の配置に依存して散乱  $\gamma$  線の強度が変化し、この方法では放射性物質の量をうまく測定できないという問題があった。また、この方法でも遮蔽体を従来の 1/8 以下にする等の大幅な軽量化は不可能であった。

30

【0015】

本発明者らは、さらに鋭意研究を重ね、放射性物質が生じる特性 X 線に着目した。そして、本発明者らは、この特性 X 線を検出することで、放射性物質の存在を検出することを試みた。一般的に、特性 X 線は、 $\gamma$  線と比較して放出確率が低くエネルギーも低いため、計測が困難であり、これまで着目されてこなかった。本発明者らは、特性 X 線を検出するために、放射性物質検出装置の信号処理回路を低エネルギー領域の特性 X 線が測定できるようにし、さらに低雑音化に努めた。しかし、 $\gamma$  線が放射性物質検出装置との散乱によって生じる高いバックグラウンドによって特性 X 線をうまく検出できない問題があった。

40

【0016】

そこで、本発明者らは、さらに鋭意研究を重ねた結果、 $\gamma$  線を極力排除し、特性 X 線に焦点を絞り込んで検出する構成とすることで、軽量の装置で放射性物質の存在を検出することに成功した。具体的にいうと、本発明者らは、放射線検出用素子の厚みを、 $\gamma$  線が十分に透過しつつ特性 X 線を十分に検出できる厚みとし、遮蔽体となる遮蔽容器及びコリメータの厚みを、 $\gamma$  線が十分に透過しつつ特性 X 線は十分に遮蔽する厚みとした。これにより、バックグラウンドを防止しつつ特性 X 線を検出し、従来の 1/8 以下という軽量の遮蔽体で放射性物質の存在を検出することに成功した。なお、 $\gamma$  線が透過するとは、入射する  $\gamma$  線のうち相互作用するものよりも透過するものが多いことを指す。また、 $\gamma$  線が十分に透過するとは、 $\gamma$  線が 80% 以上透過すること、好ましくは 87% 以上透過すること、より好ましくは 92% 以上透過すること、さらに好ましくは 97% 以上透過することを

50

指す。なお、放射線検出用素子の厚みとは、放射線検出用素子に放射線が入射する面に対して垂直方向の厚みのことを指す（以下、入射方向に対する厚みと呼ぶ）。

【0017】

図1は、質量数が137のセシウム（以下 $^{137}\text{Cs}$ ）と質量数134のセシウム（以下 $^{134}\text{Cs}$ ）が放出するエネルギー32keVと36keVの特性X線で検出した場合における、放射線検出用素子の厚みと、放射線検出用素子の性能とのシミュレーション結果を表すグラフである。このシミュレーションは、コンクリートの上に置かれた $^{137}\text{Cs}$ と $^{134}\text{Cs}$ が崩壊比で1対0.9の比率で存在する場合において、上記二種類のセシウムが放出した線とその線がコンクリートで散乱された連続線のある環境下において、特性X線によりこれらを検出することを想定している。

10

図1(A)は、放射線検出用素子の厚みの下限値 $R_1$ を示し、図1(B)は、放射線検出用素子の厚みの上限値 $R_2$ を示している。いずれのグラフも、横軸は放射線検出用素子の厚み（平均自由行程により規定）を示し、縦軸は、特性X線の検出効率（以下 $S$ ）の二乗と、 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ からの線が特性X線のエネルギーの領域（20-40keV）に付与するノイズ量（ $N$ ）の比を放射線検出用素子の厚みが10mmの時で規格化した値（以下、 $S^2/N$ ）を示す。一般に $S^2/N$ が大きいほど短時間で高い精度で特性X線を検出でき、すなわち感度が高いことを表す。また、いずれのグラフについても、放射線検出用素子の素材として、ヨウ化セシウム（以下、 $\text{CsI}$ ）、カドミウムテルル（以下、 $\text{CdTe}$ ）、ビスマスジャーマナイト（以下、 $\text{BGO}$ ）、ヨウ化ナトリウム（以下、 $\text{NaI}$ ）、イットリウム-アルミニウム-ペロブスカイト（以下、 $\text{YAP}$ ）を用いた結果を示している。

20

【0018】

なお、シンチレータは、発光効率を高めるために活性化物質が微量加えられることがある。例えば、 $\text{CsI}$ は、活性化物質を含まない純粋な $\text{CsI}$ に限らず、活性化物質としてナトリウム（ $\text{Na}$ ）やタリウム（ $\text{Tl}$ ）が微量加えられたシンチレータである $\text{CsI}(\text{Na})$ 、 $\text{CsI}(\text{Tl})$ とすることができる。本発明は、シンチレータの活性化物質の有無とは無関係に成立することから、特に活性化物質について記述しない。前述の例であれば、 $\text{CsI}$ は、活性化物質を含まない $\text{CsI}$ と活性化物質を含む $\text{CsI}(\text{Na})$ 、 $\text{CsI}(\text{Tl})$ を意味する。

【0019】

図1(A)のグラフから、放射線検出用素子は、特定の厚みにすることが好ましいと言える。すなわち、放射線検出用素子の厚み（有感部分の厚み）の下限値は、図1(A)に下限値 $R_1$ として示すように、計測対象の放射性物質による特性X線の放射線検出用素子中（物質中）における平均自由行程（ $\lambda_1$ ）を単位として $1.1\lambda_1$ 以上であることが好ましい。この値は、 $\text{CsI}$ であれば $S^2/N$ が1.5倍の効率となる値である。

30

【0020】

放射線検出用素子の厚み（有感部分の厚み）の上限値は、図1(B)に上限値 $R_2$ として示すように、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の放射線検出用素子中（物質中）における平均自由行程（ $\lambda_2$ ）を単位として $0.14\lambda_2$ 以下であることが好ましい。この値は、 $\text{CsI}$ であれば $S^2/N$ が1.5倍の効率となる値である。

40

【0021】

なお、平均自由行程とは、特性X線または線が物質に入射後に相互作用（光電効果、コンプトン散乱、電子対生成）を起こすまでの平均の距離のことをいう（以下同じ）。

【0022】

この放射線検出用素子の厚みは、入射した特性X線が放射線検出用素子と相互作用する割合の観点からみると、計測対象とする放射性物質が放出する特性X線が検出用素子に入射した時に67%以上相互作用することが好ましく、同特性X線を78%以上相互作用することがさらに好ましい。

また、この放射線検出用素子の厚みは、線が放射線検出用素子と全く相互作用せずに透過する割合（以下透過率）の観点からみると、計測対象とする放射性物質が最も高い割

50

合で放出する線を87%以上透過することが好ましく、同線を95%以上透過することがより好ましい。

【0023】

例えば従来のガンマカメラは、計測対象となる放射性物質が最も高い割合で放出する線で放射性物質をイメージしようとする場合、放射線検出用素子の厚みが非常に厚くなる。すなわち、仮に放射線検出用素子としてNaI（直径50mm）を使用し $^{137}\text{Cs}$ からの662keVの線を検出する場合、30%の検出効率を得るためには、従来のガンマカメラは、0.81 $\mu\text{m}^2$ 程度の厚みが必要であり、さらに検出効率を上げるためにはより厚くする必要がある。

一方、本発明では、放射線検出用素子の厚みが0.14 $\mu\text{m}^2$ 以下で動作が可能であり、かつ特性X線に対して容易に80%以上の効率を得ることができる。このため、放射線検出用素子を大幅に軽量化することができる。

【0024】

コリメータによって定められる視野あたりの放射線検出用素子の有感部分の面積（以下有感面積）は、入射する特性X線の強度に応じて適宜の面積とすることができる。例えば原子力施設等において使用済核燃料物質を近傍で計測する場合であれば入射X線の量が多いために有感面積を比較的狭くすることが好ましく、原子炉事故等で生じた放射性降下物を計測する場合では入射X線の量が低いために広い面積にして感度を向上することが好ましい。

【0025】

この有感面積は、測定時間が1分間で30%の統計誤差を達成するためには、例えば、放射線検出用素子CsIの位置における線による空間線量率が $10\mu\text{Sv/h}$ を下まわる環境において計測する場合には、有感面積が少なくとも $2\text{cm}^2$ 以上であることが好ましく、有効面積を $5\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $12\text{cm}^2$ 以上とする、あるいは有効面積を $96\text{cm}^2$ 以上とすることができる。

また、例えば、放射線検出用素子CsIの位置における線による空間線量率が $100\mu\text{Sv/h}$ を下まわる環境で計測する場合には、有感面積が少なくとも $0.3\text{cm}^2$ 以上であることが好ましく、有効面積を $1\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $5\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $12\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $96\text{cm}^2$ 以上とすることができる。

同様にして、放射線検出用素子CsIの位置における空間線量率が $X\mu\text{Sv/h}$ を下まわる環境で計測する場合には、有感面積が少なくとも $(29 \times X^{-0.98})\text{cm}^2$ 以上（ただし $X > 100\mu\text{Sv/h}$ ）であることが好ましい。他の種類の放射線検出用素子に対してもCsIと同程度の有感面積が必要となる。

なお、測定時間を長くしてもよい場合や統計誤差が大きくても良い場合には、放射線検出用素子の有感面積を小さくすることができる。また例示した必要な有感面積は、有効面積 $16.6\text{cm}^2$ 、厚み1mm、エネルギー分解能が32keVにおいて10.5keVの放射線検出用素子CsIを、前記CsIの位置における線による空間線量率が $5\mu\text{Sv/h}$ と $16\mu\text{Sv/h}$ の環境で計測した結果に基づいて近似的に推定されるものである。

【0026】

図2は、遮蔽容器の厚みの変化による各種変化を説明する説明図であり、図2(A)は、遮蔽容器の厚みと、特性X線の遮蔽率と、線の透過率の関係を表すグラフである。遮蔽容器の厚みとは、一方に開口を有して他方を閉鎖する容器の壁の厚みのことを指す。このグラフは、遮蔽容器の素材としてステンレス（以下SUS）を用いて計算したものである。ここで遮蔽の対象とする特性X線は、 $^{137}\text{Cs}$ のセシウムから放出される32keVの特性X線であり、透過の対象とするのは $^{137}\text{Cs}$ から放出される662keVの線である。

【0027】

グラフの横軸は、遮蔽容器の厚さを示している。グラフの縦軸は、特性X線の遮蔽率、および、線の透過率を示している。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 8 】

図示するように、遮蔽容器による特性 X 線の遮蔽レベルは、遮蔽容器の厚みが 0 . 1 m m のときに約 4 0 % であり、遮蔽容器の厚みを増すにつれて高くなり、厚さ 1 m m でほぼ 1 0 0 % ( 計算例では 9 8 % ) 遮蔽できる。

## 【 0 0 2 9 】

一方、線の透過率は、遮蔽容器の厚みが 1 0 m m のときに約 6 0 % であり、遮蔽容器の厚みを減らすにつれて高くなり、厚さ 2 m m で約 9 0 % となる。

## 【 0 0 3 0 】

この結果から、材質を S U S とする場合には、遮蔽容器の厚みは 1 m m 程度が最も好ましいといえる。すなわち、この厚みは、3 2 k e V の特性 X 線を 1 0 0 % 近く ( 9 8 % ) 遮蔽でき、かつ、線を透過させ、遮蔽容器の重量を軽減できる厚みである。線を透過させ重量を軽減し、かつ、特性 X 線を十分に遮蔽できる厚みとすることで、遮蔽容器を極めて軽量にしつつ十分な検出精度を得ることができる。

10

## 【 0 0 3 1 】

さらに言えば、遮蔽容器の厚みは、計測対象とする放射性物質の特性 X 線の遮蔽容器中の平均自由行程 (  $\mu_3$  ) を単位として 1 . 6  $\mu_3$  以上であり、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の遮蔽容器中での平均自由行程 (  $\mu_4$  ) を単位として 0 . 2 2  $\mu_4$  以下であることが好ましい。

## 【 0 0 3 2 】

遮蔽容器の厚みは、特性 X 線の遮蔽の観点から見ると、2 0 k e V から 4 0 k e V のエネルギーを持つ特性 X 線を 8 0 % 以上遮蔽することが好ましく、同特性 X 線を 9 0 % 以上遮蔽することがより好ましい。

20

## 【 0 0 3 3 】

また、遮蔽容器の厚みは、線の透過率の観点からみると、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線を 8 0 % 以上透過することが遮蔽容器の重量を軽減する上でよく、同線を 8 7 % 以上透過することが好ましく、同線を 9 2 % 以上透過することがより好ましく、同線を 9 7 % 以上透過することがさらに好ましい。

## 【 0 0 3 4 】

例えば従来 of ガンマカメラは、計測対象となる放射性物質が最も高い割合で放出する線で放射性物質をイメージしようとする場合、周囲からの線を 9 8 % 遮蔽するためには遮蔽容器の厚みを 4  $\mu_4$  程度にする必要がある。これに対し、本発明は、遮蔽容器の厚みが 0 . 2 2  $\mu_4$  以下で動作可能なため、遮蔽容器を 1 8 分の 1 以下に大幅に軽量化することができる。このような遮蔽容器の厚みにより、遮蔽容器の重量を低減し、かつ特性 X 線を精度よく検出して、軽量で感度の高い放射性物質検出装置を提供することができる。

30

## 【 0 0 3 5 】

このように遮蔽容器の厚みを 0 . 2 2  $\mu_4$  以下とすることで、遮蔽容器の軽量化と感度向上を両立することについて、図 2 ( B ) を用いて遮蔽容器に S U S を用いた例で説明する。図 2 ( B ) は、厚さ 1 m m の放射線検出用素子 C s I の両面を同じ厚みの S U S で遮蔽し、放射線源  $^{137}\text{Cs}$  からの 6 6 2 k e V の線を片面の S U S に照射した場合において、S U S の厚み ( 6 6 2 k e V の S U S の中での平均自由行程  $\mu_4$  を単位 ) と C s I で検出される 2 0 - 4 0 k e V のバックグランド量の関係を計算したグラフである。このグラフは、放射線源のまわりに何も無い状態における遮蔽容器の厚みとバックグランド量との関係の指標となるものである。

40

## 【 0 0 3 6 】

このグラフに示すように、バックグランドは、S U S の厚みが約 0 . 5  $\mu_4$  のときに極大となる。従って、遮蔽容器の厚みをそれよりもバックグラウンドを低減できる程度に薄い 0 . 2 2  $\mu_4$  以下にすると、軽量でかつバックグラウンドを低減できる効果がある。詳述すると、バックグランドは、遮蔽容器の厚みが 0 . 2 2  $\mu_4$  ( 図示 d 1 ) のときと、遮蔽容器の厚みが 1 . 0 3  $\mu_4$  ( 図示 d 2 ) のときに、最大値の 8 7 % に低減できる。つまり

50



、バックグラウンド量が極大値となる遮蔽容器の厚みに対して、それより薄い側と厚い側に、同じ量のバックグラウンドの低減を行えるポイント（例えば  $d_1$  と  $d_2$  ）が現れる。しかし、薄い側に位置する  $d_1$  の条件のほうが、厚い側に位置する  $d_2$  の条件に比べて、同じバックグラウンド量のまま約 4 . 7 倍軽量化ができる。

【 0 0 3 7 】

このような遮蔽容器の厚みの考え方は、コリメータの設計にも適用され、コリメータの厚みを特定の厚みとすることが好ましい。

一般に、コリメータは、平板状の部材に穴がけられており、遮蔽容器にとりつけることで、特定方向から入射した大部分の放射線等を穴によって通過させ、特定方向以外から入射した大部分の放射線等を穴の周囲の部材によって排除する働きがある。いいかえれば、コリメータにより視野が制限される。X 線や  $\gamma$  線の場合には、コリメータの厚み（有効厚）は、コリメータの視野を決めるひとつのパラメータである。ここで、特定方向とは、測定しようとする方向であって、コリメータと遮蔽容器で定められる方向、または遮蔽容器によって定められる方向である。

【 0 0 3 8 】

また、コリメータは、コリメータの背後に一つの放射線検出用素子が設けられたものと、複数の放射線検出用素子が設けられたものがある。

前者には、ひとつの穴を有するシングルコリメータ（図 1 2 のシングルコリメータ 1 2 1 参照）や複数の穴を有するマルチコリメータ（図 5 のコリメータ 2 1 参照）等がある。ここで有効厚とは、シングルコリメータやマルチコリメータでは、穴の側壁の厚みのことをいう。別の言い方をすれば、任意の方向からの放射線がコリメータ部材へ入射した際に、その入射点（ただし、コリメータの特定方向側前面、または、後面に入射した場合は除く）におけるコリメータ部材の厚み（特定方向に対して垂直方向の肉厚）の平均のことをいう。

後者には、後述するピンホールコリメータやコーデットマスク型コリメータ等がある。また、ピンホールコリメータやコーデットマスク型コリメータでは、有効厚とは、コリメータの板厚のことをいう。別の言い方をすれば、任意の方向からの放射線がコリメータ部材へ入射した際に、その入射点（ただし、穴の側壁、または、コリメータの外周側面に入射した場合は除く）におけるコリメータ部材の厚み（特定方向に対して平行方向の肉厚）の平均のことをいう。

【 0 0 3 9 】

コリメータの有効厚は、計測対象とする放射性物質の特性 X 線のコリメータ物質中の平均自由行程（ $\mu_5$ ）を単位として 1 . 6  $\mu_5$  以上であり、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する X 線のコリメータ物質中での平均自由行程（ $\mu_6$ ）を単位として 0 . 2 2  $\mu_6$  以下であることが好ましい。

【 0 0 4 0 】

このコリメータの有効厚は、特性 X 線の遮蔽の観点から見ると、2 0 k e V から 4 0 k e V のエネルギーを持つ特性 X 線を 8 0 % 以上遮蔽することが好ましく、同特性 X 線を 9 0 % 以上遮蔽することがさらに好ましい。

【 0 0 4 1 】

また、コリメータの有効厚は、 $\gamma$  線の透過率の観点からみると、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する X 線を 8 0 % 以上透過することが遮蔽容器の重量を軽減する上でよく、同 X 線を 8 7 % 以上透過することが好ましく、同 X 線を 9 2 % 以上透過することがより好ましく、同 X 線を 9 7 % 以上透過することがさらに好ましい。

【 0 0 4 2 】

例えば従来のガンマカメラは、計測対象となる放射性物質が最も高い割合で放出する X 線で放射性物質をイメージしようとする場合、必要なコリメータの有効厚が非常に厚くなる。すなわち、従来のガンマカメラは、前記 X 線の到来方向を 9 8 % の確度で決定するためにはコリメータの有効厚を 4  $\mu_6$  程度とすることが必要になる。

これに対し、本発明は、コリメータの有効厚が 0 . 2 2  $\mu_6$  以下で動作可能なため、コ

10

20

30

40

50

リメータを大幅に軽量化することができる。

【0043】

放射線検出用素子の後段に設けられる信号処理回路は、放射性物質から放出される特性X線のピーク周辺のスペクトルを、20keVから40keVの範囲のうち少なくとも一部について計測する構成にすることが好ましく、少なくとも20keVから40keVの範囲全体について計測する構成がより好ましく、さらには、特性X線のピークをより精度よく評価するために10keVから40keVの範囲全体について計測する構成が好ましく、10keVから50keVの範囲全体を計測する構成がより好ましい。特に、下方が10keVまで測定できる信号処理回路により、バックグラウンドの推定精度が上がり、ピークの分析精度が改善する。また、上方が50keVまで測定できる信号処理回路により、精度をさらに向上することができる。

10

【0044】

例えば $^{137}\text{Cs}$ を検出対象とする場合、 $^{137}\text{Cs}$ が $^{137m}\text{Ba}$ へ $\beta^-$ 崩壊した後 $^{137}\text{Ba}$ へ核異性体転移により壊変する一連の過程で放出される特性X線のピークである32.2keV(Ba-K $\gamma$ )および36.4keV(Ba-K $\gamma$ )周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0045】

例えば $^{131}\text{I}$ を検出対象とする場合、 $^{131}\text{I}$ が $^{131m}\text{Xe}$ へ $\beta^-$ 崩壊した後 $^{131}\text{Xe}$ へ核異性体転移により壊変する一連の過程で放出される特性X線のピークである29.8keV(Xe-K $\gamma$ )および33.6keV(Xe-K $\gamma$ )周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

20

【0046】

例えば $^{129m}\text{Te}$ を検出対象とする場合、 $^{129m}\text{Te}$ が $^{129}\text{Te}$ へ核異性体転移により壊変する過程で放出される特性X線のピークである27.5keV(Te-K $\gamma$ )および31.0keV(Te-K $\gamma$ )周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0047】

例えば $^{132}\text{Te}$ を検出対象とする場合、 $^{132}\text{Te}$ が $^{132}\text{I}$ へ $\beta^-$ 崩壊により壊変する過程で放出される特性X線のピークである28.6keV(I-K $\gamma$ )および32.3keV(I-K $\gamma$ )周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

30

【0048】

例えば $^{133}\text{Ba}$ を検出対象とする場合、 $^{133}\text{Ba}$ が $^{133}\text{Cs}$ へ電子捕獲により壊変する過程で放出される特性X線のピークである31.0keV(Cs-K $\gamma$ )および35.0keV(Cs-K $\gamma$ )周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0049】

例えば $^{124}\text{I}$ を検出対象とする場合、 $^{124}\text{I}$ が $^{124}\text{Te}$ へ $\beta^+$ 崩壊または電子捕獲により壊変する過程で放出される特性X線のピークである27.5keV(Te-K $\gamma$ )および31.0keV(Te-K $\gamma$ )周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0050】

従って、少なくとも20keVから40keVの範囲の一部について計測する構成にすれば、これらの放射性物質が放出する特性X線のピークを検出し分析することができる。

40

【0051】

次に、放射性物質の種類の見分け方について説明する。本発明は、放射性物質(親核種)が壊変し、娘核種になる一連の過程で、 $\gamma$ 線と特性X線を放出するものを対象とし、低エネルギー領域(例えば10keVから50keVのX線領域)で検出される特性X線を用いて、特定方向に存在する放射性物質を検出し、かつ、その方向における放射性物質の種類(娘核種の原子番号)を特定することができるものである。そして、これに、高エネルギー領域(例えば60keVから1,000keVの $\gamma$ 線領域)の放射線の検出を併用することで、より詳細に特定方向に存在する放射性物質の種類を特定することができる。

50

このことについて以下で詳述する。

【0052】

図3(A)は、放射線検出用素子として $^{133}\text{Ba}$ でカドミウムテルルを用いて計測した $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ の0~700keVにわたるエネルギースペクトルであり、図3(B)は、図3(A)のそれぞれの特性X線ピークの高さをそろえて0~60keVにわたり表示したものである。図3(A)(B)は、いずれも縦軸がカウント、横軸がエネルギー(keV)を示す。

【0053】

ここで使用したカドミウムテルル素子のエネルギー分解能は、ピークの半値幅で定義すると32keVのエネルギーにおいて4keVである。

10

【0054】

まず、低エネルギー領域の放射線を用い、特定方向に存在する放射性物質の種類(娘核種の原子番号)を特定する低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法について説明する。ここで、低エネルギー領域放射性物質特定方法は、特定方向に存在する放射性物質の娘核種の原子番号を特定する娘核種特定処理として実行される。

図3(B)に示すように、低エネルギー領域では、 $^{133}\text{Ba}$ の崩壊(娘核種 $^{133}\text{Cs}$ )に伴い生じるCsの特性X線のピークP1(31keV)およびピークP2(35keV)、 $^{137}\text{Cs}$ の崩壊(娘核種 $^{137}\text{Ba}$ )に伴い生じるBaの特性X線のピークP3(32keV)およびピークP4(36keV)が生じている。

20

【0055】

$^{133}\text{Ba}$ の崩壊に伴い生じる特性X線のピークP1、P2の位置と、 $^{137}\text{Cs}$ の崩壊に伴い生じる特性X線のピークP3、P4の位置が少し異なっているのは、特性X線のエネルギーが異なるためである。このエネルギーピークの位置を知ることによって、放射性物質の娘核種の原子番号を特定することができる。すなわち、特性X線のエネルギーは放射性物質(親核種)が壊変し生成する娘核種の原子番号にのみ依存する。 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の壊変後の娘核種は、それぞれ $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Ba}$ であり、娘核種の原子番号(それぞれCs、Ba)に対応した特性X線(最も強度が高いものでいえば、それぞれ31keV、32keV)が発生することになる。そのため、反対に特性X線のエネルギーを測定すれば、娘核種の原子番号を知ることができる。一般的に娘核種の原子番号から親核種を知ることにはできないが、親核種の種類に制約を与えることができる。

30

【0056】

放射線検出用素子は、遮蔽体(遮蔽容器及びコリメータ、あるいは、コリメータを備えない場合であれば遮蔽容器)に囲まれているため、検出される特性X線は特定方向に存在する放射性物質から来たものである。したがって、低エネルギー領域の特性X線ピーク的位置から、特定方向に存在する放射性物質の種類(娘核種の原子番号)を特定することができる。

【0057】

放射線検出用素子のエネルギー分解能を向上させれば、放射性物質の種類(娘核種の原子番号)の特定能力をより向上させることができる。例えばカドミウムテルルの場合、カドミウムテルルをさらに低い温度に冷却する、カドミウムテルルの大きさを最適化する、より優れた雑音性能をもつ前置増幅器を使用する、等の方法により、エネルギー分解能を1keV以下に向上することができる。なお、このように冷却することはエネルギー分解能を上げるための方法であって必須の要件ではない。カドミウムテルルを室温(例えば20など)で用いても、ピーク位置の違いを判別して放射性物質の娘核種の原子番号を特定することができる。

40

【0058】

次に、高エネルギー領域の放射線を用い、放射性物質検出装置の周囲の放射性物質の存在を認識し、その種類(親核種の種類)を特定する高エネルギー領域放射性物質特定方法(高エネルギー領域での放射性物質の種類(親核種の種類)の特定方法)について説明す

50

る。

本発明は、放射線検出用素子の厚みを、 $\gamma$ 線が十分に透過しつつ特性X線を十分に検出できる厚みとしている。また、遮蔽体の厚みを、 $\gamma$ 線が十分に透過しつつ特性X線は十分に遮蔽する厚みとしている。このため、高エネルギー領域の $\gamma$ 線は、殆どが遮蔽体を透過し、全方向から到来して放射線検出用素子に入射する。高エネルギー領域の $\gamma$ 線は、殆どが放射線検出用素子を透過するものの、一部が放射線検出用素子と相互作用し、検出される。この一部の $\gamma$ 線を検出したデータを、放射性物質の種類（親核種の種類）の特定に利用する。

#### 【0059】

なお、高エネルギー領域の $\gamma$ 線を用いた放射性物質の種類（親核種の種類）の特定では、全方向から到来する $\gamma$ 線が検出対象であるため、 $\gamma$ 線の入射方向を特定できないことに留意する。すなわち、エネルギースペクトルの高エネルギー領域によって特定できる放射性物質には、特性X線により放射性物質を検出できる特定方向の領域に存在するものと、それ以外の領域（遮蔽体により特性X線が遮られて特性X線では検出しない領域）に存在するものの両方が混在していることに留意する。

#### 【0060】

高エネルギー領域では、図3(A)に示すように、わずかにカドミウムテルルと相互作用した $\gamma$ 線がエネルギースペクトルS1, S2を形成している。 $^{133}\text{Ba}$ のエネルギースペクトルS1と $^{137}\text{Cs}$ のエネルギースペクトルS2とは、形状が異なっている。このエネルギースペクトルS1, S2は、放射性物質固有のものであり、各放射性物質が放出する $\gamma$ 線のエネルギーに依存している。

#### 【0061】

従って、エネルギースペクトルの高エネルギー領域の形状をみることで、放射性物質検出装置の周囲の放射性物質の存在を認識し、その種類（親核種の種類）を特定することができる。すなわち、高エネルギー領域では、放射性物質が存在する方向を特定することはできないが、周囲に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）を特定することができる。具体的には、データベースに登録されている親各種別のテンプレート（ピークに関するデータ）と前記エネルギースペクトルの高エネルギー領域の形状を比較して、一致度が所定値以上のテンプレートがあればそのテンプレートの親各種であると特定する。

#### 【0062】

さらに、高エネルギー領域放射性物質特定方法により放射性物質の種類（親核種の種類）を特定した結果を用い、特性X線ピーク推定方法により特性X線のエネルギーと強度を推定し、この推定結果を用いる低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法により特定方向に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）を特定する第2の特定方向放射性物質特定方法について説明する。ここで、高エネルギー領域放射性物質特定方法は、特定方向に存在する放射性物質の候補を特定する候補特定処理として実行され、特性X線ピーク推定方法及び低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法は、高エネルギー領域放射性物質特定方法による特定結果と低エネルギー領域の測定結果を用いて特定方向に存在する放射性物質の種類を識別する種類識別処理として実行される。

特性X線や $\gamma$ 線のそれぞれのエネルギーおよび $\gamma$ 線と特性X線の放出比は、放射性物質に固有な量をもつ。また、 $\gamma$ 線と特性X線の検出効率は、放射性物質検出装置に固有である。特性X線ピーク推定方法は、この法則を利用して特性X線のエネルギーと強度を推定する。

#### 【0063】

特性X線ピーク推定方法では、まず、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法を用いて、高エネルギー領域の $\gamma$ 線スペクトルから放射性物質検出装置の周囲の個々の放射性物質の存在を認識する。この認識された放射性物質に対して、各特性X線のエネルギーを求め、 $\gamma$ 線と特性X線の放出比、 $\gamma$ 線と特性X線の検出効率、および放射性物質の分布状況の仮定に基づいて、各放射性物質による各特性X線強度を推定する。

例えば、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の2種類の放射性物質が混在している場で計測する場

10

20

30

40

50

合を考える。高エネルギー領域の線スペクトルから放射性物質 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が放射性物質検出装置の周囲に存在することを認識し、その2種類の放射性物質が放出する特性X線のエネルギーと強度を推定する。すなわち、存在を認識した放射性物質 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ について、例えば、放射性物質が地面上に一様に分布しているとの仮定をし、それぞれが放出する特性X線のエネルギーを公知のデータベースから抽出し、さらに線と特性X線の放出比および線と特性X線の検出効率を用いた演算を行うことで、個々の特性X線強度を推定する。

【0064】

次に、この推定をもとに、低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法を用いて低エネルギー領域の特性X線スペクトルを解析する。低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法では、上述の $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の2種類の放射性物質が混在している場の例で説明すると、推定したエネルギーと強度をもつ特性X線のピーク( $^{133}\text{Ba}$ の娘核種の $\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の娘核種の $\text{Ba}$ の特性X線ピーク)を、低エネルギー領域から積極的に探し出す(推定したエネルギーと強度をもつ特性X線のピークとの差が一定値以内にあるピークがあればその特性X線のピークがあると判定する)ことで、それぞれの特性X線ピークの有無やそれぞれの強度を精度よく決定でき、高エネルギー領域放射性物質特定方法で特定した種類の放射性物質が低エネルギー領域にも存在するか否か判定できる。存在すると判定した場合、その種類の放射性物質が、特定方向に存在すると特定する。

10

【0065】

このように高エネルギー領域放射性物質特定方法と特性X線ピーク推定方法と低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法を組み合わせて低エネルギー領域を解析する第2の特定方向放射性物質特定方法は、特に、放射性検出用素子のエネルギー分解能が、複数の放射性物質の特性X線エネルギーの差と比して同程度の場合に役に立つ。詳述すると、上述の $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の2種類の放射性物質が混在している場の例では、特性X線のエネルギー差は、1keVである。そして、特性X線ピークは、図3(B)のように近接し、実際には1つのピークとして観測される。低エネルギー領域のスペクトルの情報だけでは親核種の数と種類は不明である。このため、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ 由来である $\text{Cs}$ と $\text{Ba}$ の2種類の特性X線ピークを認識し、それぞれを分離することは難しい。ここで、高エネルギー領域から放射性物質の種類( $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ )を特定することで、特性X線のエネルギーと強度の推定することができ、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の特性X線をそれぞれ分離して検出し、特性X線強度の高精度測定ができる。この場合、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ を独立に定量することができ、加えて、特定方向に存在する放射性物質(親核種)が $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ であると特定できる。

20

30

【0066】

また、第2の特定方向放射性物質特定方法は、エネルギー分解能が悪い場合にも、高エネルギー領域の線スペクトルを用いることで、特定方向に存在する放射性物質の種類を、低エネルギー領域放射性物質特定方法だけを用いた第1の特定方向放射性物質特定方法と比べてより特定できる。すなわち、前述の例の $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が混在している場では、第1の特定方向放射性物質特定方法に用いる低エネルギー領域の情報からは、その娘核種の原子番号を特定できるが、エネルギー分解能の大きさに応じて誤差が生まれるため、一定の幅に制約(例えば、娘核種が $\text{Xe}$ 、 $\text{Cs}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{La}$ に制約)できるに過ぎない。しかし、第2の特定方向放射性物質特定方法では、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法により高エネルギー領域の線スペクトルを測定することで、特定方向に存在する放射性物質の候補としては、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ のどちらか、あるいは、両方であることが特定できる。

40

【0067】

エネルギー分解能が良い場合には、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法と特性X線ピーク推定方法により推定される特性X線のエネルギーと強度の結果と、低エネルギー領域の特性X線のエネルギースペクトルの測定結果とを組み合わせる低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法によって、特定方向の領域に存在する放射性物質の種類(親核

50

種)を特定する第2の特定方向放射性物質特定方法を実現できる。すなわち、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が混在している場では、低エネルギー領域からは、放射性物質の娘核種の原子番号がCsとBaであると特定でき、高エネルギー領域の線スペクトルから $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が放射性物質検出装置の周囲に存在すると特定できるため、低エネルギーの2つの特性X線ピークは $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ 由来であると認識できる。したがって、特定方向に存在する放射性物質の種類(親核種の種類)は、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ であると特定できる。

#### 【0068】

前述の例では、2種類の放射性物質( $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ )が存在し、かつ、それらの娘核種(それぞれ $^{133}\text{Cs}$ や $^{137}\text{Ba}$ )の原子番号が異なるものであった。この場合には、特性X線のエネルギー差が放射線検出用素子のエネルギー分解能に比べて同等以上に優れれば、特定領域に存在する放射性物質の種類を特定し(この例では $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ )、それぞれの量を分離して検出し、独立に測定することができる。

一方で、例えば $^{137}\text{Cs}$ と $^{134}\text{Cs}$ (娘核種はそれぞれ $^{137}\text{Ba}$ と $^{134}\text{Ba}$ )が混在している例では、娘核種の原子番号が両者で等しく両者は同じエネルギーの特性X線を放出するために、特定領域に存在する放射性物質の種類(親核種の種類)を特定し、それぞれの量を分離して検出し、独立に定量することはできない。しかし、高エネルギー領域の線スペクトルを用い第2の特定方向放射性物質特定方法を行えば、低エネルギー領域の特性X線スペクトルだけを用いた場合(低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法)と比べてより特定することができる。すなわち、特定方向に存在する放射性物質は、低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法では娘核種がBaであることしか判別できないが、高エネルギー領域の情報を用いた第2の特定方向放射性物質特定方法では放射性物質の種類(親核種の種類)が $^{137}\text{Cs}$ あるいは $^{134}\text{Cs}$ の両方、あるいはいずれか一方であることを特定することができる。

#### 【0069】

放射性物質が放射性物質検出装置の周囲に種類しか存在しない場合には、第2の特定方向放射性物質特定方法を用いれば、高エネルギー領域の線スペクトルから放射性物質の種類(親核種の種類)を特定でき、低エネルギー領域で検出される特性X線は当該放射性物質から放射されたことは明らかなので、特定方向の領域に存在する放射性物質の種類(親核種の種類)を特定できる。

#### 【0070】

放射性物質が三種類以上の混在する場においては、高エネルギー領域放射性物質特定方法を用いると高エネルギー領域の線スペクトルから放射性物質検出装置の周囲に存在する放射性物質の種類(親核種の種類)は特定できる。仮にそれらの娘核種がそれぞれ異なる原子番号であり、かつ、それらの特性X線のエネルギー差が放射線検出用素子のエネルギー分解能に比べて同等以上に優れるものであれば、第2の特定方向放射性物質特定方法により特定方向の領域に存在する放射性物質の種類を特定できる。また、仮にそれらの娘核種のうち原子番号を同一とするものがあつた場合には、特定領域に存在するそれらの放射性物質の種類(親核種の種類)を特定し、それぞれの量を分離して検出し、独立に定量することはできない。しかし、第2の特定方向放射性物質特定方法では、高エネルギー領域の線スペクトルを用いることで、特定方向の領域に存在する放射性物質の種類(親核種の種類)を制約することができ、低エネルギー領域の特性X線スペクトルだけを用いた第1の特定方向放射性物質特定方法と比べてより特定することができる。

#### 【0071】

このように、低エネルギー領域からは特定方向に存在する放射性物質の娘核種の原子番号を特定することができる(低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法)。さらに、高エネルギー領域の検出結果を用いた推定をもとに低エネルギー領域の放射性物質のピークを解析することで、より精度よく放射性物質の特性X線強度を計測でき、特定方向に存在する放射性物質の種類(親核種の種類)の識別ができ

10

20

30

40

50

る（高エネルギー領域と低エネルギー領域を用いた第2の特定方向放射性物質特定方法）。

【0072】

低エネルギー領域のスペクトル（特性X線領域のスペクトル）と高エネルギー領域のスペクトル（高エネルギー領域の線スペクトル）の両方を用い、エネルギースペクトルから放射線検出用素子に吸収されたエネルギー量を計算することで、簡易的な空間線量計として動作させることもできる。

【0073】

このようにして、放射性物質を精度よく検出し、その放射性物質の種類を識別し、かつ、非常に軽量の放射性物質検出装置を提供することができる。

10

この発明の一実施形態を以下図面と共に説明する。

【実施例1】

【0074】

図4は、放射線源位置可視化システム1のシステム構成を示すブロック図である。

放射線源位置可視化システム1は、放射性物質検出装置2、前置増幅器3、波形整形アンプ4、ピーク敏感型ADC5（サンプルホールド回路またはピークホールド回路6、（マルチプレクサ7）、ADC8）、高圧電源9、コンピュータ10、方向制御駆動部11、カメラ12、入力装置13、およびモニタ14を備えている。図示する放射線源位置可視化システム1は、単素子モジュールの例を示している。

【0075】

20

放射性物質検出装置2は、特性X線を検出することで放射性物質を検出する装置であり、高圧電源9による電力供給を受けて動作する。放射性物質検出装置2で計測した信号は、後段の前置増幅器3に伝達される。

【0076】

前置増幅器3は、受け取った信号を増幅する。

【0077】

波形整形アンプ4は、ハイパスフィルタやローパスフィルタで構成され、前置増幅器3から受け取った信号の波形を整形し、後段のピーク敏感型ADC5に信号を伝達する。これにより、検出する信号の帯域を絞り、ノイズを除去することができる。

【0078】

30

ピーク敏感型ADC5は、ピークセンシングADCとも呼ばれるものであり、波形整形アンプ4から受け取った信号のピーク（アナログ波高の最大値）をサンプルホールド回路あるいはピークホールド回路6で検出し、ADC8によりデジタル信号（デジタルの数値）にし、このデジタル信号を後段のコンピュータ10に伝達する。サンプルホールド回路あるいはピークホールド回路6と、ADC8の間には、必要に応じてマルチプレクサ7が設けられる。このマルチプレクサ7には、必要に応じて他の入力接続される。

高圧電源9は、放射性物質検出装置2の動作に必要な高電圧の電力を放射性物質検出装置2に供給する。

【0079】

コンピュータ10は、外部機器を接続するUSBポートおよびシリアルポート等の外部接続インターフェース10a、ハードディスクまたはフラッシュメモリ等で構成される記憶部10b、CPUとROMとRAMを有する制御部10c、および、CD-ROM等の記憶媒体に対する読み書きを行う記憶媒体処理部10dを備えている。

40

【0080】

コンピュータ10には、ピーク敏感型ADC5、方向制御駆動部11、静止画像を取得するカメラ12、マウスおよびキーボード若しくはタッチパネル等で構成されて利用者の操作入力を受け付ける入力装置13、液晶ディスプレイやCRTディスプレイ等で構成されて画像を表示するモニタ14が接続されている。方向制御駆動部11は、放射性物質検出装置2とカメラ12の向いている方向を制御する駆動をする。この制御駆動の際、方向制御駆動部11は、放射性物質検出装置2とカメラ12を同じ方向を向かせるように制御

50

する。

【0081】

このコンピュータ10は、記憶部10bに記憶されているプログラムに従って、制御部10cが各種演算や各種機器の動作制御を実行し、また、ピーク敏感型ADC5から受け取ったデジタル信号のカウントや画像処理等を実行する。詳細については後述する。

【0082】

また、放射性物質検出装置2、前置増幅器3、波形整形アンプ4、およびピーク敏感型ADC5での信号処理は、20 - 40 keVの特性X線ピークおよびその周辺のエネルギー領域10 - 50 keV、加えて50 - 1000 keVを検出できるように構成されている。

10

【0083】

図5は、放射性物質検出装置2の構成を説明する説明図である。図5(A)は、放射性物質検出装置2の概略構成を示す斜視図であり、図5(B)は、放射性物質検出装置2の概略構成を示す縦断面図であり、図5(C)は、放射性物質検出装置2に対する特性X線および線の透過/遮蔽を説明する縦断面図による説明図である。

【0084】

図5(B)に示すように、放射性物質検出装置2は、円筒形の側壁25bを有して片面に開口25aを有し、他面に底25cを有する遮蔽容器25を有している。遮蔽容器25は、厚さ1mmのSUSによって形成されている。

【0085】

遮蔽容器25の開口25aには、略円柱形のコリメータ21(マルチコリメータ)が隙間なく取り付けられている。このコリメータ21は、SUSで形成され、複数(この例では19個)の穴22が規則正しく配置されている。コリメータ21は、厚みが1mmあれば良いが、この例では25mmの厚み(円柱形の長さ方向の厚み)としている。また、穴22は10mmであり、隣り合う穴22と穴22の間部23(有効厚)は1mmである。コリメータ21は、角度分解能(半値幅)が $\pm 7.75^\circ$ であり、最大視野が $\pm 21.8^\circ$ である。このコリメータ21の角度分解能や最大視野は、穴22の直径とコリメータ21の長さ方向(放射線の到来方向)の厚みを変化させることで任意の値に設定することができる。またコリメータ21の穴22の数は、任意の値を取ることができ、1つでも構わない(シングルコリメータ)。

20

30

【0086】

コリメータ21の厚み(有効厚)は、計測対象とする放射性物質の特性X線のコリメータ21中の平均自由行程( $\lambda_5$ )を単位として $1.6 \lambda_5$ 以上であるように構成されている。

コリメータ21の穴22と穴22の間部23の厚み、すなわちコリメータの有効厚は、計測対象とする放射性物質が放出する特性X線のコリメータ21中の平均自由行程( $\lambda_5$ )を単位として $1.6 \lambda_5$ 以上であるように構成され、かつ、計測対象とする放射性物質がもっとも高い割合で放出する線のコリメータ21中での平均自由行程( $\lambda_6$ )を単位として $0.22 \lambda_6$ 以下であるように構成されている。

40

このコリメータ21と遮蔽容器25が、遮蔽体として機能する。

【0087】

遮蔽容器25の内部には、コリメータ21の裏面に近接して円盤形の放射線検出用素子26が設けられ、さらに光電子増倍管27が設けられている。すなわち、放射線の到来方向から、コリメータ21、放射線検出用素子26、および光電子増倍管27がこの順に配置されている。

【0088】

放射線検出用素子26は、この実施例ではシンチレータが用いられており、具体的にはCsIにより50mm、厚さ1mmの形状に形成されている。放射線検出用素子26のエネルギー分解能は、32.2 keVにおいて10.5 keV(半値幅)である。

【0089】

50



放射線検出用素子 26 は、検出例として、バリウム、セシウム、キセノン、ヨウ素、テルルの線放出核種（以下放射性物質）のいずれか、あるいは複数が出す特性 X 線（Ba K : 32.2 keV, Cs K : 31.0 keV, Xe K : 29.8 keV, I K : 28.6 keV, Te K : 27.5 keV）を計測できるように、これらの特性 X 線ピーク周辺のスペクトルを少なくとも 20 keV から 40 keV の一部を計測する。また精度よく計測するために 10 keV から 50 keV にわたって計測することができる。さらにより詳細に放射性物質の種類を特定するために、50 - 1000 keV にわたって測定することができる。

【0090】

この放射線検出用素子 26 は、コリメータ 21 の穴 22 を通過した特性 X 線が入射する部分が有感部分 26a となる。

10

【0091】

光電子増倍管 27 は、入射する光を内部で増幅し電気信号として出力する装置である。この光電子増倍管 27 は、放射線検出用素子 26 である Cs I 等のシンチレータに放射線が入射してシンチレータが発光すると、その光を電子に変換し増幅して電気信号を生じさせる。

【0092】

このように構成された放射性物質検出装置 2 は、図 5 (C) に示すように、矢印に示す特定方向 Y から到来する特性 X 線を検出し、他の方向から来た特性 X 線や、全方向からの大部分の線を検出しない。すなわち、放射線検出素子 26 は、遮蔽容器とコリメータによって囲われているため、コリメータ 21 の穴 22 によって、特性 X 線が入射する角度が領域 E の範囲に限られる。この入射した特性 X 線により放射線検出用素子 26 が発光し、光電子増倍管 27 により電気信号として検出する。

20

【0093】

他の方向からの特性 X 線は、コリメータ 21 および遮蔽容器 25 によって遮蔽され、放射線検出用素子 26 を発光させず検出されない。

【0094】

全方向からの線の大部分は、コリメータ 21 と遮蔽容器 25 と相互作用せず、また、遮蔽容器 25 および放射線検出用素子 26 と相互作用しないため、検出されない。従って、特性 X 線の検出を線が妨害することを防止している。

30

【0095】

このように、放射線検出用素子 26 および光電子増倍管 27 と、図 4 に示した前置増幅器 3、波形整形アンプ 4、ピーク敏感型 ADC 5 による信号処理回路 (3, 4, 5) により、放射性物質が放出する特性 X 線のエネルギー情報と特性 X 線の入射強度を取得する。

【0096】

図 6 は、コンピュータ 10 (図 4 参照) において、記憶部 10b 内のプログラムに従って動作する制御部 10c が各機能手段として機能する際の機能ブロック図を示す。

コンピュータ 10 の機能ブロックとしては、方向制御部 40、カメラ画像取得部 41、スペクトル作成部 42、ピーク分析部 43、二次元画像作成部 44、画像合成部 45、切替入力処理部 46、および画像表示部 47 が設けられている。

40

【0097】

方向制御部 40 は、方向駆動制御部 11 の駆動制御を行い、カメラ 12 の方向と放射性物質検出装置 2 (図 4 参照) の方向を制御する。具体的には、まずカメラ 12 の方向を制御し、撮像範囲を定める。そして、カメラ 12 の撮像範囲内をマトリクス状 (格子状) に複数の領域に区分けし、そのうちの 1 つの領域に放射性物質検出装置 2 を向ける。その領域の検出が完了すると、次の領域に放射性物質検出装置 2 を向ける。この方向制御を繰り返すことで、方向制御部 40 は、マトリクス状に区分けされた全ての領域について、領域毎に放射性物質が放出する特性 X 線を検出できるようにしている。

【0098】

カメラ画像取得部 41 は、カメラ 12 (図 4 参照) から撮像されたカメラ画像を取得す

50

る。このカメラ画像取得部 4 1 は、カメラ 1 2 から静止画を取得する構成としているが、これに限らない。例えば、カメラ画像取得部 4 1 は、カメラ 1 2 の代わりにビデオカメラを備え、ビデオカメラで撮像された動画像（映像）を取得する構成にしてもよい。

【0099】

スペクトル作成部 4 2 は、ピーク敏感型 ADC 5 から受け取ったデータを処理し、エネルギースペクトルの作成を行う。

ピーク分析部 4 3 は、スペクトル作成部 4 2 から受け取ったスペクトルの中から特性 X 線の単独ピークを探し出し、その正味の計数を求める。あるいは、複数の放射性物質が存在している場においては、ピーク分析部 4 3 は、エネルギー分解能が優れる場合であれば複数の特性 X 線が作る複数のピークを探し出し、エネルギー分解能が優れない場合であれば複数の特性 X 線が複合して形成するピークを探し出し、その正味の計数を算出する。

10

【0100】

また、ピーク分析部 4 3 は、上述した第 1 の特定方向放射性物質特定方法を娘核種特定処理により実行し、上述した第 2 の特定方向放射性物質特定方法を候補特定処理と種類識別処理により実行する放射性物質識別部としても機能する。娘核種特定処理を実行するピーク分析部 4 3 は、低エネルギー領域放射性物質特定方法により娘核種の種類を特定する（第 1 の特定方向放射性物質特定処理）。候補特定処理を実行するピーク分析部 4 3 は、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法により親核種の種類を特定する。種類識別処理を実行するピーク分析部 4 3 は、上述した特性 X 線ピーク推定方法により特性 X 線のエネルギーと強度を推定し、上述した低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法により特定方向の放射性物質の種類を識別する（第 2 の特定方向放射性物質特定処理）。

20

【0101】

二次元画像作成部 4 4 は、ピーク分析部 4 3 で特性 X 線ピークの正味の計数に基づいて、放射性物質の存在方向を示す画像を作成する。この画像は、例えばマトリクス状の画像とすることができる。すなわち、方向制御部 4 0 による駆動制御によって各領域の放射性物質の存在を検出しているため、領域毎に検出レベルに応じた濃度の塗りつぶし表示をすることで、領域毎に放射性物質の量を示すマトリクス状の画像にできる。

スペクトル作成部 4 2 は、画像表示部 4 7 へマトリクス状に区分けされた各領域で得られた複数のスペクトル画像（この実施例では 16 個のスペクトル画像）を送信する。

【0102】

画像合成部 4 5 は、カメラ画像取得部 4 1 で取得した撮像画像と、二次元画像作成部 4 4 で作成したマトリクス状の二次元画像とを合成して合成画像を作成する。このようにして、放射性物質を検出したマトリクス上の位置と、撮像画像における放射性物質の存在位置とを対応させる。

30

【0103】

切替入力処理部 4 6 は、モニタ 1 4 に表示させる画像をスペクトル画像とイメージング画像に切り替える操作入力（入力装置 1 3 による操作入力）を受け付ける。

【0104】

画像表示部 4 7 は、図 7 に示すスペクトル画像、および、図 8 に示すイメージング画像をモニタ 1 4 に表示する。切替入力処理部 4 6 による操作入力を受けて、スペクトル画像が指定され、かつ、マトリクス状に区分けされた領域の 1 つが指定されれば図 7 に示すスペクトル画像を表示し、二次元画像が指定されれば図 8 に示す合成画像を表示する。

40

【0105】

このようにして、特性 X 線を検出し、放射性物質のスペクトル画像を図 7 に示すグラフに表示し、検出位置を図 8 に示すマトリクス状の合成画像に表示することができる。

【0106】

図 7 は、検出した放射線のスペクトルを示すグラフである。横軸はエネルギー（keV）を示し、縦軸はカウント数を示す。グラフ G 1 は、放射性物質が存在する方向（汚染方向）へ向けて測定した例を示し、グラフ G 2 は、放射性物質が存在しない方向（非汚染方向）へ向けて測定した例を示す。

50

## 【0107】

このグラフを計測した放射線源位置可視化システム1は、図4に示した光電子増倍管27に浜松ホトニクス製のR10131を使用し、前置増幅器3にクリアパルス製の595H型を使用し、波形整形アンプ4にクリアパルス製の4417型を使用し、ピーク敏感型ADC5にAMPTTEK製の8100Aを使用し、高圧電源9に浜松ホトニクス製のC9619-01を使用している。

## 【0108】

このグラフに示されるように、非汚染方向へ向けた検出では放射性物質が検出されなかったが、汚染方向へ向けた検出では、 $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ からの32keVおよび36keVを検出したピークPが見られた。これにより、 $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ からの32keVおよび36keVの特性X線を検出することができる。このように放射線のスペクトルを表示するモニタ14は、特性X線のピークを出力するピーク出力部として機能する。

10

## 【0109】

このピークPの検出は、コンピュータ10(図4参照)の制御部10cにより実行するとよい。詳述すると、コンピュータ10(図4参照)の記憶部10bには、テンプレートデータを予め記憶しておく。そして、制御部10cは、前記テンプレートデータに対する測定データ(検出した放射線のスペクトル)の突出量を算出し、この突出量の最も多い位置(エネルギー(keV))のデータをピークPとして検出する。前記テンプレートデータは、グラフG2のようにピークPのないグラフ形状を低エネルギー領域から高エネルギー領域まで所定関数(例えば4次関数)等で近似したデータとするとよい。このテンプレートデータは複数用いることもでき、特に、放射性物質のまわり(線源のまわり)に通常物質が多い等により、ピークPの高エネルギー側で、幅の広い山形のピーク(ピーク位置が60keVから250keVの間で、半値幅が60keVから200keV、かつ、ライン線ピークや特性X線ピークでないもの)がピークPより強く表れる環境であれば、テンプレートデータは、この幅の広い山形ピーク部分に沿う形状となる所定関数のデータとするとよい。なお、ライン線ピークとは、放射性物質(娘核種)の原子核の励起準位差に対応したエネルギーをもつピークのことをいう。

20

## 【0110】

これにより、制御部10cは、ピークPの高エネルギー側の幅の広い山形のピークがピークPより強くても、ピークPを適切に検出することができる。また、測定データのうちテンプレートデータから突出している部分(ピークP周辺部分)の面積(正味の計数)を求めることで、特性X線の検出方向である特定方向に存在する放射性物質の量を算出することができる。このように検出したピークPを出力する制御部10cはピーク出力部としても機能する。

30

## 【0111】

また、このピークPの検出において、制御部10cは、放射性物質の種類の特特定も実行する。この場合、制御部10cは、上述した候補特定処理により線領域での放射性物質の種類候補を特定し、種類識別処理により特性X線領域で前記候補のうち特定方向に存在する放射性物質の種類を識別する。この放射性物質の種類の特特定を実行する制御部10cは、放射性物質識別部として機能する。

40

## 【0112】

図8は、合成画像60を示す画面説明図である。合成画像60には、カメラ12で撮像された撮像画像61の上に、マトリクス状で特性X線強度に応じた塗りつぶしがされた二次元画像62が重ねて表示(半透明色の合成)されている。二次元画像62は、複数個(図示の例では16個)のマスキに区分され、1マス単位で特性X線強度が表示される。例えば、特性X線強度の高い第1強度表示部63と、特性X線強度がそれより薄い第2強度表示部64と、放射線がほとんど検出されない第3強度表示部65とが表示される。これにより、どの領域でどれくらいの放射性物質が存在しているかを確認できる。このように特性X線強度を表示するモニタ14は、合成画像を出力する合成画像出力部として機能す

50

る。

【0113】

また、領域毎の塗りつぶし表示の色は、識別した放射性物質の種類に応じて異なっている。各色が示す放射性物質の種類は、画面上に表示される、あるいは、別途のマニュアルに表示されるなど、適宜の方法によって示される。なお、特定した放射性物質の種類を画面上に明示してもよい。また、識別した放射性物質の種類毎に二次元画像62を作成しても良い。この場合、モニタ14には、各種類の二次元画像62を切り替えボタンで切り替え可能に表示する、あるいは各二次元画像62を一画面中に並べて複数表示するなど、適宜の表示をすることができる。

【0114】

以上の構成により、放射性物質検出装置2は、非常に軽量の構成で、線と特性X線を放出する放射性物質を十分な性能で計測し放射性物質の分布を画像化することができる。すなわち、分厚い鉛やシンチレータを使用していた従来例に比べ、放射性物質検出装置2は、薄い遮蔽容器25（例えば1mm厚のSUS）と薄いコリメータ21、及び薄い放射線検出用素子26（例えば1mm厚のCsI）により、遮蔽体の重量を少なくとも従来約18分の1以下に軽量化をすることができる。さらに、遮蔽体（遮蔽容器25及びコリメータ21）の最適化によって、遮蔽体の重量を従来約50分の1以下にすることもできる。<sup>137</sup>Csを検出する場合において従来約98%のガンマカメラは遮蔽体の遮蔽率98%を得ようとする34mmの鉛が必要であるが、この放射性物質検出装置2は遮蔽体の遮蔽率98%をSUS1mmで実現できるため、遮蔽体は従来と同等の指向性を持ちながらも約50分の1（ $[34\text{mm} \times \text{鉛の比重}11.3] / [1\text{mm} \times \text{SUSの比重}7.9]$ ）の軽量化が実現できている。この放射性物質検出装置2は、少なくとも放射性物質の存在を認識でき、放射性物質の分布を画像化でき、必要に応じて、放射性物質を定量すること、または放射性物質の種類を特定することもなし得る。

【0115】

さらに言えば、遮蔽容器25は、全方向から到来する線の遮蔽には役立たない薄さであって従来技術では使用不可能な薄さにすることができる。また、コリメータ21の穴22と穴22の間の厚み23、すなわちコリメータの有効厚は、全方向から到来する線を絞ることに役立たない薄さで、従来技術では使用不可能な薄さにすることができる。加えて、放射線検出用素子26は、線の検出には役立たない薄さであって従来技術では使用不可能な薄さにすることができる。このような薄さにした上で、線を放出する放射性物質を、特性X線を利用して検出することができる。

【0116】

信号処理回路(3, 4, 5)（図4参照）は、特性X線のピーク周辺（例えば<sup>137</sup>Csであれば32keVから36keV）のスペクトルを検出する。このように特性X線を計測対象とすることで、上述のように遮蔽容器25を薄く、かつ放射線検出用素子26を薄くでき、コリメータ21も軽量にすることができる。また、このような信号処理回路(3, 4, 5)により、感度のよい放射性物質検出装置2を提供できる。

【0117】

放射線検出用素子26は、特性X線の入射方向に対する有感部分の厚みが、前記放射線検出用素子26に使用する物質中での計測対象とする放射性物質の特性X線の平均自由行程( $\lambda_1$ )を単位として $1.1\lambda_1$ 以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線が前記放射線検出用素子26に使用する物質中での平均自由行程( $\lambda_2$ )を単位として $0.14\lambda_2$ 以下の範囲に形成されている。これにより、バックグラウンドを抑制し、特性X線に対する感度を向上させることができる。

【0118】

また、遮蔽容器25の厚みは、計測対象とする放射性物質の特性X線の遮蔽容器25中の平均自由行程( $\lambda_3$ )を単位として $1.6\lambda_3$ 以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の遮蔽容器25中での平均自由行程( $\lambda_4$ )を単位として $0.22\lambda_4$ 以下の範囲に形成されている。これにより、重量を軽減しつつも、特性X

10

20

30

40

50

線に対する感度を向上させることができる。

【0119】

また、コリメータ21の穴22と穴22の間の厚み23、すなわちコリメータの有効厚は、計測対象とする放射性物質の特性X線のコリメータ21の物質中の平均自由行程(5)を単位として1.65以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線のコリメータ21の物質中での平均自由行程(6)を単位として0.226以下の範囲に形成されている。これにより、重量を軽減しつつも、特性X線に対する感度を向上させることができる。

【0120】

また、信号処理回路(3, 4, 5)は、10keVから50keVを計測できる。これにより、バリウム、セシウム、キセノン、ヨウ素、及びテルル等のうち線と特性X線を同時に放出する核種(放射性物質)を、特性X線を利用し、高精度に計測することができる。

10

【0121】

また、放射線源位置可視化システム1は、放射性物質の核種が存在している位置を合成画像60(図8参照)に表示することができる。これにより、放射線源の位置を画像上で確認することができ、汚染場所を容易に特定することができる。また、放射線源位置可視化システム1は、検出した放射線のスペクトルをグラフG1(図7参照)として表示することができる。

【0122】

また、放射線検出用素子26は、特性X線を止めて検出できればよいため、技術的に放射線検出用素子を大きな厚みを持たせつつ大きな面積を確保しながら高い性能で動作させることが困難なCdTe等の素材(例えばCdTeであれば5mm厚程度まで)であっても最適な厚み(例えば1mm厚)で利用することができる。

20

【0123】

また、この放射性物質検出装置2により、特性X線に対して、約80%以上の検出効率(CsI1mmであれば<sup>137</sup>Csの32keVに対して95%)をもたせることができ、従来より非常に軽量でありながら従来のガンマカメラと同程度の計数効率で<sup>137</sup>Csを検出することができる。

詳述すると、<sup>137</sup>Csの1崩壊あたりの線662keVと特性X線32keVの放出確率は、それぞれ、85.1%と5.6%である。実用化されている従来の多くのガンマカメラは、放出確率が85.1%と高い線662keVを検出対象としており、この<sup>137</sup>Csの662keVに対する検出効率が5%~10%程度である。この従来のガンマカメラは、仮に大きなサイズの蛍光板(例えば直径50mm×厚さ30mmのNaI)を使用すれば検出効率は30%程度となるが、蛍光板を囲む遮蔽体の重量がさらに増大するため使用に支障をきたす。

30

これに対し、本発明の放射性物質検出装置2は、<sup>137</sup>Csの1崩壊あたりの放出確率が5.6%と線よりも小さい特性X線を検出対象としながら、検出効率を約80%以上と高くすることができる。これにより、放射性物質検出装置2は、従来のガンマカメラより非常に軽量の構成でありながら、従来のガンマカメラと同程度の計数効率で<sup>137</sup>Csを検出することができる。さらに、放射性物質検出装置2は従来のガンマカメラと比べて格段に軽量であるために、重量を気にせず放射性物質検出素子の有感面積、あるいは放射性物質検出装置の台数を容易に2倍、5倍、10倍以上とすることもでき、感度を高めることができる。

40

【0124】

さらに、放射性物質検出装置2は、様々な方向から線が到来する環境にあっても、放射線検出用素子26を特定の厚みにすることでバックグラウンドを抑制し検出限界を下げることができ、従来計測が困難であった特性X線(特に20keVから40keVのエネルギー量のもの)に対して高感度で計測することができる。

【0125】

50

また、信号処理回路は、10 keVから計測可能とすることで、特性X線ピーク周辺のバックグラウンドの推定精度を上げることができ、特性X線の正味の計数を精度よく求めることができる。

【0126】

また、放射性物質検出装置2は、遮蔽容器25の厚みとコリメータ21の穴22と穴22の間の厚み23を特定の厚みにすることで、放射性物質の存在する方向に対する感度を十分なものにしつつ、従来のガンマカメラと比較して大幅な軽量化を実現している。

【0127】

また、放射線検出用素子26を1mm厚のCsIとしたことで、放射線に対して概ね次の性能を得ることができる。

< X線(32 keV) >

相互作用確率が高い(全体の95%が完全に止まる)。

< 線(662 keV) >

相互作用確率が低い(全体の97%が相互作用せずに透過する)。

【0128】

また、遮蔽容器25を1mm厚のSUSとしたことで、放射線に対して概ね次の性能を得ることができる。

< X線( $^{137}\text{Cs}$  - 32 keV) >

相互作用確率が高い(全体の98%が完全に止まる)。

< 線( $^{137}\text{Cs}$  - 662 keV) >

相互作用確率が低い(全体の94%が相互作用せずに透過する)。

【0129】

また、方向制御駆動部11と方向制御部40により、放射性物質検出装置2とカメラ12を常に同じ方向に向けることができる。制御駆動または手動によってカメラ12を放射性物質検出装置2と共に撮像範囲が隣り合うように順次方向変更し、各方向での撮像画像と二次元画像の合成画像を画像合成部45で並べて配置し結合すれば、撮像範囲や検出範囲よりも広いパノラマ状の合成画像を得ることもできる。

【0130】

なお、方向制御駆動部11と方向制御部40は、コンピュータ10の制御によって駆動する構成としたが、手動によって駆動する構成としてもよい。この場合、方向制御駆動部11と方向制御部40を備えずに、電気信号を利用しない機械的な方向固定器具を用い、計測している方向を入力装置13で入力する構成とすることができる。この場合でも、単素子モジュールで構成された放射線源位置可視化システム1を用いて合成画像を作成し表示することができる。

【実施例2】

【0131】

図9(A)は、実施例2の放射性物質検出装置2Aの縦断面図を示す。この放射性物質検出装置2Aは、コリメータ21の前面側(放射線検出用素子26に対して光電子増倍管27の反対側)に、フィルタ29が設けられている。フィルタ29は、特性X線に対する感度を向上させるべくノイズを抑制するフィルタであればよく、例えば線を遮断するアクリル板とすることができる。具体的には、例えば厚み6mmで、放射線検出用素子26と同じ面積である直径50mmの円盤状のアクリル板を用いることができる。

放射性物質検出装置2Aの他の構成要素は、実施例1と同一であるので、同一要素に同一符号を付して、その詳細な説明を省略する。

【0132】

このようにフィルタ29を用いることにより、ノイズを除去して特性X線の感度を向上させることができる。特にアクリル板を用いた場合には、ノイズになりやすい線を遮断でき、特性X線に対する感度をより向上させることができる。

【0133】

なお、フィルタ29は1枚に限らず、多種類のものを複数枚備えてもよい。

10

20

30

40

50

また、フィルタ 29 として、特性 X 線と  $\gamma$  線を遮断するものを用いてもよい。この場合、例えば 1 mm 厚で放射線検出用素子 26 と同じ面積である直径 50 mm の円盤状の SUS 板を用いることができる。このように特性 X 線をも遮蔽するフィルタ 29 を用いる場合は、フィルタ 29 を装着した状態での計測結果と、フィルタ 29 を取り外した状態での計測結果の差分を取ることで、ノイズを除去して特性 X 線のピークを強調することができる。すなわち、フィルタ 29 が装着された状態での計測結果は、 $\gamma$  線によるノイズを中心に計測できるため、フィルタ 29 が外された状態の計測結果と差分をとることで、特性 X 線のみを強調することができる。

【実施例 3】

【0134】

図 9 (B) は、放射線検出用素子 26 にシンチレータではなく半導体を用いた場合の放射性物質検出装置 2B を示す縦断面図である。図示するように、放射線検出用素子 26B を遮蔽容器 25B で被覆し、遮蔽容器 25B の前面 (開口部) にコリメータ 21 を装着する。

【0135】

放射線検出用素子 26B は、CdTe 等の半導体により構成されている。

放射線検出用素子 26B は、高圧電源 9 (図 4 参照) と前置増幅器 3 (図 4 参照) に接続され、また方向制御装置 11 により方向が制御される。

【0136】

その他の構成要素は、実施例 1 と同一であるので、同一要素に同一符号を付してその詳細な説明を省略する。

このように構成しても、実施例 1 と同様の作用効果を得ることができる。

また実施例 1 と異なり、実施例 3 では光電子増倍管等の蛍光板を読みだす装置が不要となるため、遮蔽体をさらにコンパクトにすることができる。

【実施例 4】

【0137】

図 10 は、実施例 4 の放射線源位置可視化システム 1C のシステム構成を示すブロック図である。この放射線源位置可視化システム 1C は、多素子モジュールの例を示している。

【0138】

放射性物質検出装置 2C は、1 つの遮蔽容器 25C の中に、1 対の放射線検出用素子 26 および光電子増倍管 27 が、放射線検出用素子 26 の検出面が一平面上に並ぶように複数配置されている。

コリメータ 21C (前方板) は、 $\gamma$  線を十分に透過しつつ特性 X 線は十分に遮蔽できる厚みをもった薄い材質に中央付近の一か所に穴 22C が設けられたピンホールコリメータである。

【0139】

コリメータ 21C の厚み (有効厚) は、計測対象とする放射性物質の特性 X 線のコリメータ 21C の物質中の平均自由行程 ( $\lambda_5$ ) を単位として  $1.6 \lambda_5$  以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する  $\gamma$  線のコリメータ 21C の物質中での平均自由行程 ( $\lambda_6$ ) を単位として  $0.22 \lambda_6$  以下の範囲に形成されている。これにより、重量を軽減しつつも、特性 X 線に対する感度を向上させることができる。

【0140】

複数の光電子増倍管 27 には、1 つずつに高圧電源 9、前置増幅器 3、および波形整形アンプ 4 が接続されている。波形整形アンプ 4 の後段には、ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6、マルチプレクサ 7 が設けられ、信号を切り替えて全ての波形整形アンプ 4 からの信号を処理する。また、マルチプレクサ 7 を用いずに、ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 のそれぞれに個別の ADC (ADC 8 に相当) を設け、それぞれの ADC からの出力をコンピュータ 10 へ送る方式としても良い。

【0141】

10

20

30

40

50

放射性物質検出装置 2 C は、実施例 1 と異なり、方向制御駆動部 1 1 ( 図 4 参照 ) および方向制御部 4 0 ( 図 6 参照 ) を備えていない。そして、カメラ 1 2 の撮像範囲と放射性物質検出装置 2 C による検出範囲が一致しており、放射性物質検出装置 2 C の検出範囲内がマトリクス状に分割され、1つのマス目に1つの放射線検出用素子 2 6 および光電子増倍管 2 7 の検出範囲が対応している。画像合成部 4 5 ( 図 6 参照 ) は、1つの撮像画像に、各マス目の二次元画像を合成することで、合成画像を作成する。

【 0 1 4 2 】

その他の構成要素は、実施例 1 と同一であるので、同一要素に同一符号を付してその詳細な説明を省略する。

【 0 1 4 3 】

このように構成しても、実施例 1 と同様の作用効果を得ることができる。

また、多素子モジュールとすることで、放射性物質からの特性 X 線がどの方向から到来しているかを 1 回の処理で検出することができる。すなわち、どの放射線検出用素子 2 6 から検出しているかにより、検出した放射線検出用素子 2 6 の前面から穴 2 2 C を繋ぐ直線の方向から、検出した放射線検出用素子 2 6 の大きさと穴 2 2 C の大きさで決まる範囲の放射線を検出したことを特定できる。

【 0 1 4 4 】

なお、実施例 1 と同様に方向制御駆動部 1 1 および方向制御部 4 0 を備えてもよい。この場合は、撮像範囲や検出範囲よりも広いパノラマ状の合成画像を得ることもできる。

また、放射性物質検出装置 2 C は、コリメータ 2 1 C を、所望の配列で複数の穴 2 2 C が形成されたコーデットマスク型コリメータ ( 前方板 ) としてもよい。この場合のコーデットマスク型コリメータの穴の配列等は、文献「New family of binary arrays for coded aperture imaging」( APPLIED OPTICS, Vol. 28, No. 20, 15 October 1989, 4344 - 4352, Stephen R. Gottesman and E. E. Fenimore ) に記載されるような配列等とするとよい。

【 実施例 5 】

【 0 1 4 5 】

図 1 1 は、実施例 5 の放射線源位置可視化システム 1 D のシステム構成を示すブロック図である。この放射線源位置可視化システム 1 D は、多素子モジュールの例を示している。

【 0 1 4 6 】

放射線源位置可視化システム 1 D は、複数の放射性物質検出装置 2 を備えており、それぞれが異なる方向を向くように固定されている。各放射性物質検出装置 2 の後段には、前置増幅器 3、波形整形アンプ 4、およびピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 が 1 つずつ設けられている。ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 の後段には、マルチプレクサ 7 が設けられ、信号を切り替えて全ての波形整形アンプ 4 からの信号を処理する。また、マルチプレクサ 7 を用いずに、ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 のそれぞれに個別の ADC ( ADC 8 に相当 ) を設け、それぞれの ADC からの出力をコンピュータ 1 0 へ送る方式としても良い。

【 0 1 4 7 】

その他の構成要素は、実施例 1 と同一であるので、同一要素に同一符号を付してその詳細な説明を省略する。

【 0 1 4 8 】

このように構成しても、実施例 1 と同様の作用効果を得ることができる。さらに、このように多素子モジュールとすることで、放射性物質からの特性 X 線がどの方向から到来しているかを 1 回の処理で検出することができる。すなわち、どの放射性物質検出装置 2 から検出しているかを知ることにより、検出した放射性物質検出装置 2 の前方から放射線を検出したことを特定できる。

【 0 1 4 9 】

10

20

30

40

50



なお、このように複数の放射性物質検出装置 2 を備えて、一部の放射性物質検出装置 2 に実施例 2 で説明した特性 X 線と 線を遮断するフィルタ 2 9 ( 図 9 ( A ) 参照 ) を備える構成としてもよい。

【 0 1 5 0 】

この場合、フィルタ 2 9 を装着した放射性物質検出装置 2 で 線によるノイズ成分を検出し、フィルタ 2 9 を装着していない放射性物質検出装置 2 で特性 X 線と 線によるノイズ成分とを検出して、差分をとって特性 X 線を精度よく検出することを短時間に実施できる。つまり、フィルタ 2 9 を装着して計測する作業と取り外して計測する作業を行わずとも、一度に両方の計測を行って検出を完了することができる。

【 0 1 5 1 】

この発明は、上述の実施形態の構成のみに限定されるものではなく、多くの実施の形態を得ることができる。

例えば、放射線検出用素子 2 6 は、シンチレータや半導体を用いたが、それ以外にも、冷却機器により冷却された半導体等を用いることもできる。

また、遮蔽容器の素材は、S U S に限らず、真鍮または鉛を含む物質等、特性 X 線を遮蔽する適宜の物質を用いることができる。

【 0 1 5 2 】

また、放射性物質検出装置 2 , 2 A , 2 B , 2 C や、放射線源位置可視化システム 1 , 1 C , 1 D は、放射性物質による汚染を検出する汚染検出装置として用いることもできる。

【 0 1 5 3 】

また、各放射性物質検出装置 2 , 2 A , 2 B , 2 C は、コリメータを用いずに遮蔽容器 2 5 , 2 5 B , 2 5 C によって測定しようとする特定方向を定める構成としてもよい。この場合でも、遮蔽容器 2 5 , 2 5 B , 2 5 C によって遮られない特定方向の放射性物質を検出し、放射性物質の種類を識別することができる。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 1 5 4 】

この発明は、 線と特性 X 線を放出する放射性物質が存在する方向とその放射性物質の量を測定する用途に利用でき、他にも放射性物質を検出する様々な用途で利用できる。

【 符号の説明 】

【 0 1 5 5 】

1 , 1 C , 1 D ... 放射線源位置可視化システム  
 2 , 2 A , 2 B , 2 C ... 放射性物質検出装置  
 1 2 ... カメラ  
 1 4 ... モニタ  
 2 2 ... 穴  
 2 3 ... 間部  
 2 5 , 2 5 C ... 遮蔽容器  
 2 5 b ... 側壁  
 2 6 ... 放射線検出用素子  
 2 6 a ... 有感部分  
 4 4 ... 二次元画像作成部  
 4 5 ... 画像合成部  
 Y ... 特定方向

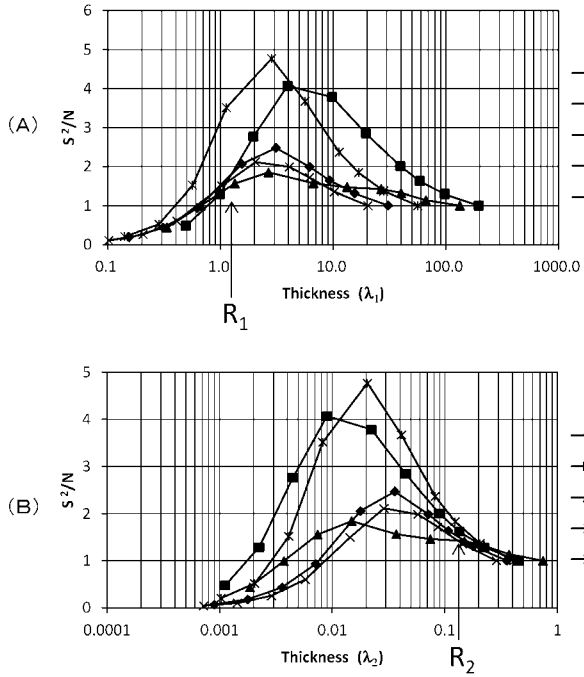
10

20

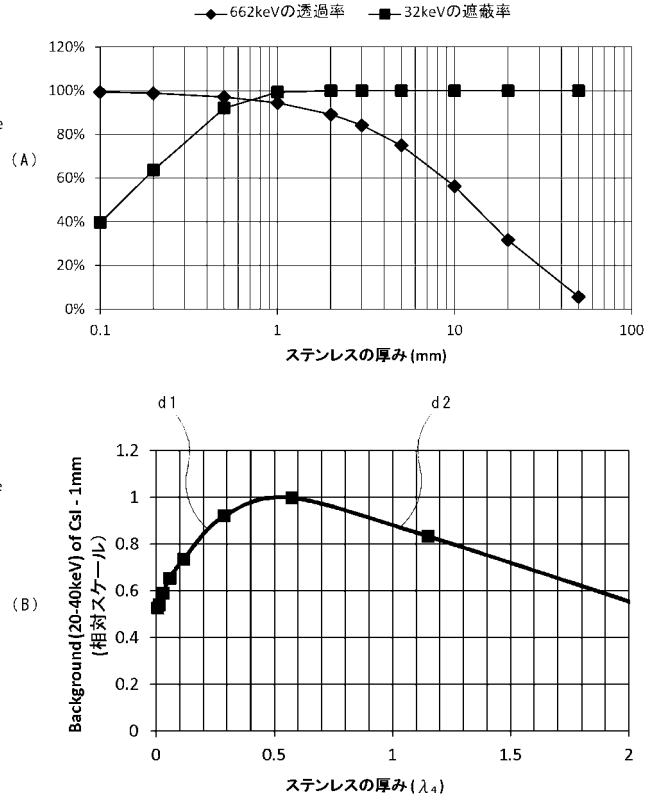
30

40

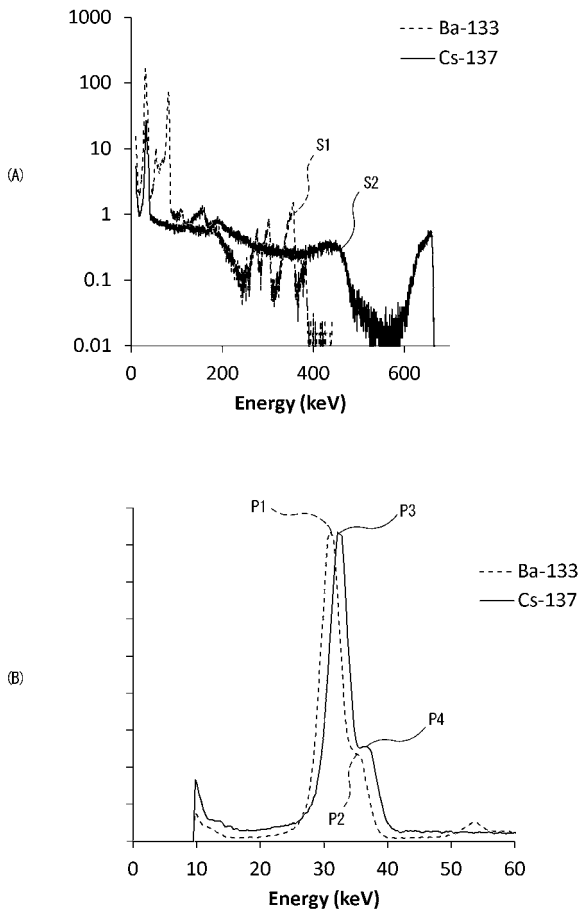
【 図 1 】



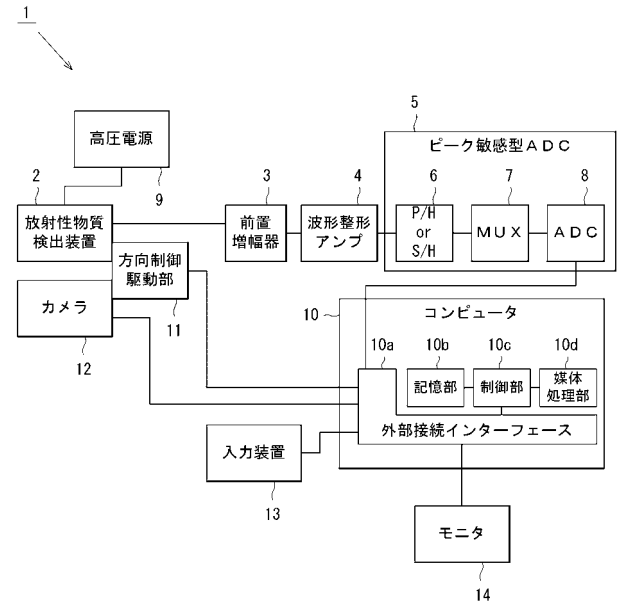
【 図 2 】



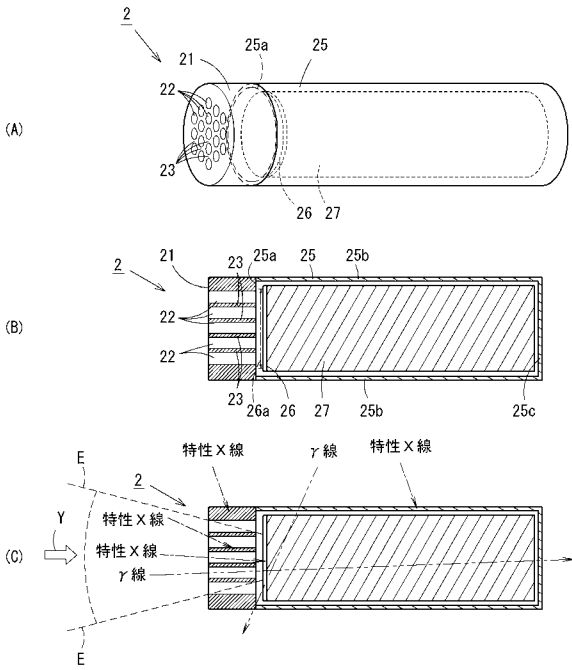
【 図 3 】



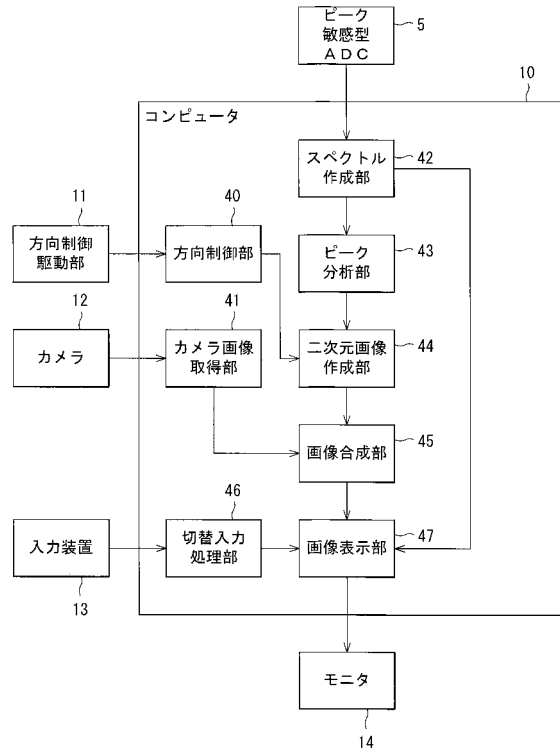
【 図 4 】



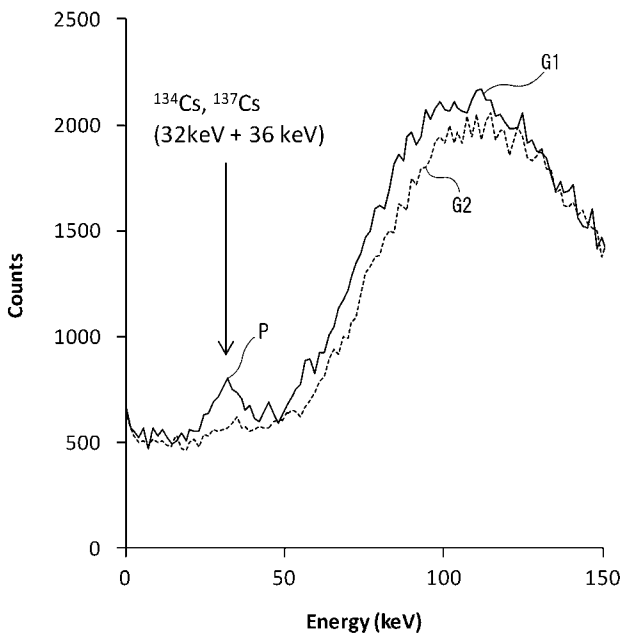
【 図 5 】



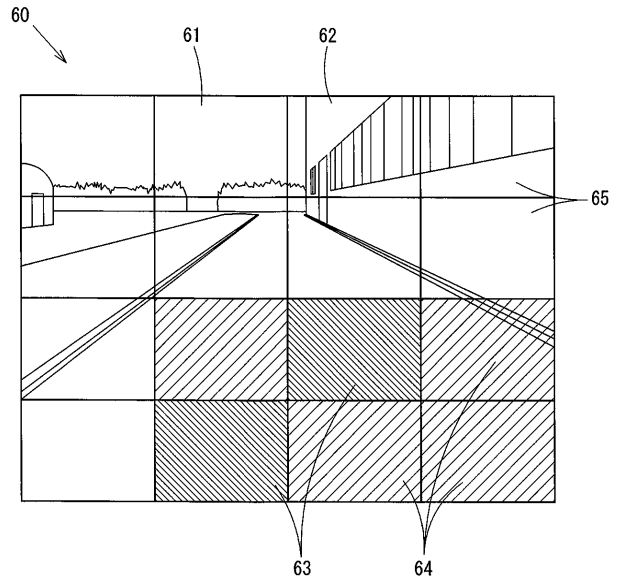
【 図 6 】



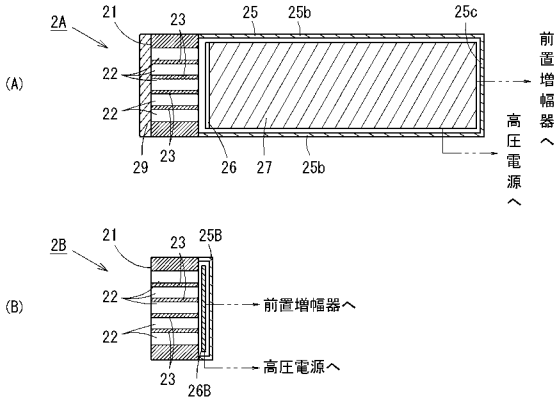
【 図 7 】



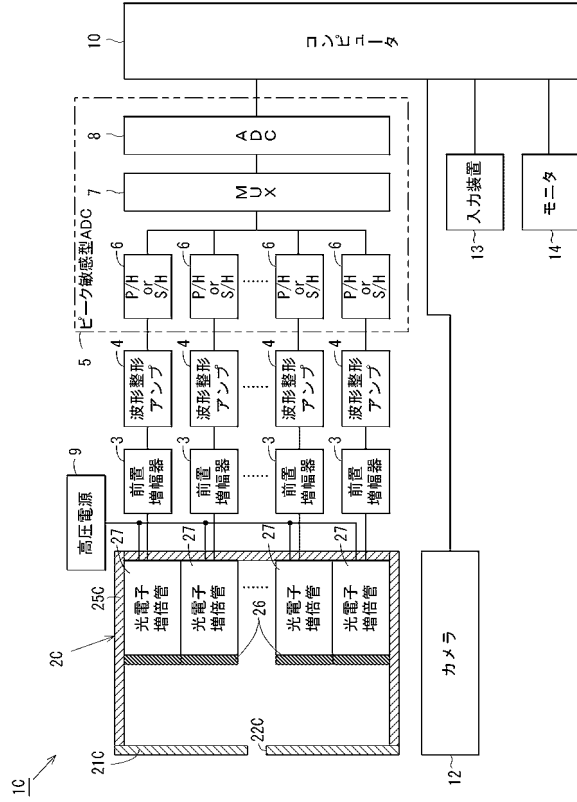
【 図 8 】



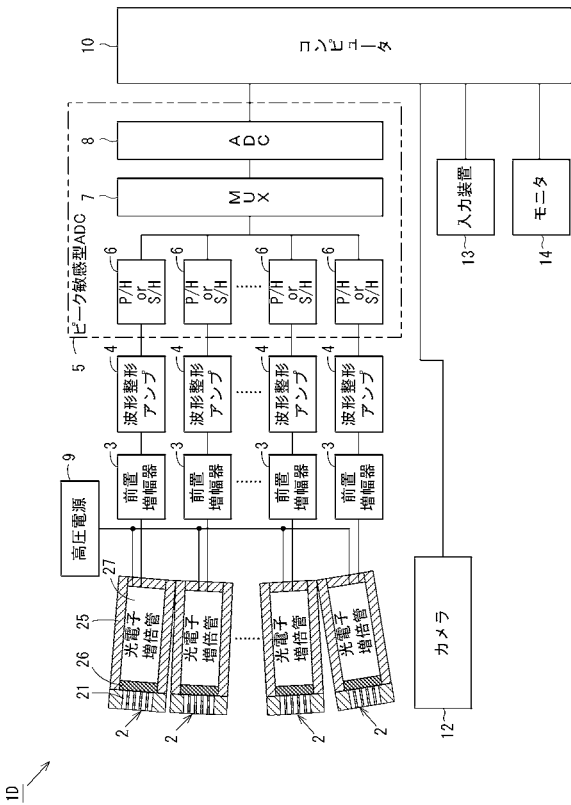
【図9】



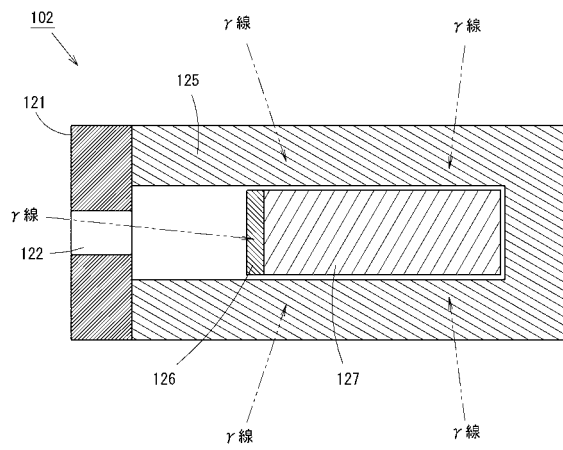
【図10】



【図11】



【図12】



## 【手続補正書】

【提出日】平成25年9月20日(2013.9.20)

## 【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

特定方向に存在する放射性物質を検出する放射性物質検出装置であって、前記特定方向に存在して線と特性X線の両方を放出する放射性物質から到来する特性X線を吸収して検出し、かつ、前記放射性物質から到来する線を透過させる厚さの放射線検出用素子と、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち特性X線を遮蔽し、かつ、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち線を透過させる厚さの遮蔽体とを備えた放射性物質検出装置。

【請求項2】

前記放射線検出用素子により検出した特性X線のピークを出力するピーク出力部を備えた請求項1記載の放射性物質検出装置。

【請求項3】

前記放射線検出用素子は、前記特性X線のピークが観測される少なくとも20keVから40keVの範囲を計測する構成である請求項2記載の放射性物質検出装置。

【請求項4】

前記放射線検出用素子は、特性X線の入射方向に対する有感部分の厚みが、前記放射線検出用素子に使用する物質中での計測対象とする放射性物質の特性X線の平均自由行程( $\lambda_1$ )を単位として $1.1\lambda_1$ 以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の前記放射線検出用素子に使用する物質中での平均自由行程( $\lambda_2$ )を単位として $0.14\lambda_2$ 以下の範囲に形成されている請求項1、2、または3記載の放射性物質検出装置。

【請求項5】

前記遮蔽体の厚みは、計測対象とする放射性物質の特性X線の遮蔽体物質中の平均自由行程( $\lambda_3$ )を単位として $1.6\lambda_3$ 以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の遮蔽体物質中での平均自由行程( $\lambda_4$ )を単位として $0.22\lambda_4$ 以下の範囲に形成された請求項1から4のいずれか1つに記載の放射性物質検出装置。

【請求項6】

前記遮蔽体は、前記放射線検出用素子の周囲を遮蔽する遮蔽容器、前記放射線検出用素子の検出対象側に設けられるコリメータ、またはこれらの両方で構成され、前記遮蔽体の厚みは、前記遮蔽体が複数の穴から構成されているマルチコリメータの場合は穴と穴の間部の厚みを指し、前記遮蔽体が1つの穴のみを持つシングルコリメータの場合は穴の側壁の厚みを指し、前記遮蔽体が1つの穴を有して後方に複数の放射線検出用素子が設けられるピンホールコリメータであれば穴が設けられた前方板の厚みを指し、前記遮蔽体が複数の穴を有して後方に複数の放射線検出用素子が設けられるコーデットマスク型コリメータであれば穴が設けられた前方板の厚みを指し、前記遮蔽体が前記遮蔽容器の場合は前記放射線検出用素子の少なくとも側方に位置する側壁の厚みを指す、

請求項 5 記載の放射性物質検出装置。

【請求項 7】

前記特性 X 線のピークの解析に用いるテンプレートを記憶する記憶部と、  
前記テンプレートと前記放射線検出用素子により計測したスペクトルを用いて 前記特性 X 線のピークを解析する解析部とを備え、  
前記テンプレートは、前記特性 X 線領域のエネルギーよりも高エネルギー側の 60 - 250 keV の範囲に位置して前記特性 X 線のピークよりも強いピーク部分を有するデータである

請求項 1 から 6 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置。

【請求項 8】

前記放射線検出用素子により検出したスペクトルのうち 線領域のスペクトルを用いて放射性物質の種類候補を特定する候補特定処理を実行し、  
前記放射線検出用素子により検出したスペクトルのうち特性 X 線領域のスペクトルを用いて前記スペクトル内に前記候補特定処理で特定した放射性物質が存在するか識別することで特定方向の放射性物質の種類を識別する種類識別処理を実行する放射性物質識別部を備えた

請求項 1 から 7 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置。

【請求項 9】

請求項 1 から 8 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置を複数備え、  
前記特定方向を撮像して撮像画像を取得するカメラと、  
前記複数の放射性物質検出装置がそれぞれ検出した放射性物質による放射性物質の量を検出領域別に二次元画像にする二次元画像化部と、  
前記撮像画像と前記二次元画像を位置対応させて合成し合成画像を作成する合成部と、  
前記合成画像を表示する表示部とを備えた  
放射線源位置可視化システム。

【請求項 10】

請求項 1 から 8 のいずれか 1 つに記載の放射性物質検出装置を用い、  
特性 X 線のピーク周辺のスペクトルを計測し、  
前記スペクトルに基づいて少なくとも前記放射性物質の存在を認識する  
放射性物質検出方法。

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、例えば 線と特性 X 線の両方を放出する放射性物質を検出するような放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から、原子力発電所、核燃料・使用済核燃料処理施設、原子力緊急時等、様々な方向から放射線が到来する環境において、放射性物質の存在位置を確認するガンマカメラが使用されている。このようなガンマカメラとして、放射線計測装置が提案されている（特許文献 1 参照）。

【0003】

この放射線計測装置は、放射性物質から放出される 線のうち所定方向成分を透過させる穴を複数有するマルチコリメータと、マルチコリメータを通過した 線を可視光に変換

する蛍光板と、前記マルチコリメータおよび蛍光板を覆い放射線ノイズを低減する遮蔽容器を備えている。そして、この放射線計測装置は、線画像と別のカメラにより撮影した画像を合成する。このようにして、放射線計測装置は、計測対象物に対して、内部の放射性物質の状態、サイズ、形状、位置を放射線イメージとしてとらえることができる。

【0004】

しかし、このような放射線計測装置は、放射性物質から放出される線を検知するものであるため、非常に重いものになるという問題点があった。詳述すると、様々な方向から放射線が到来する環境において線の到来方向を把握するために、遮蔽容器は、他の方向から到来する線を遮蔽する必要がある。線を遮蔽するために、遮蔽容器は、厚い鉛を用いる必要がある。また、蛍光板は、線を検出するために、線が透過しないように十分な厚みと高い密度が必要となる。

【0005】

例えば、 $^{137}\text{Cs}$  から放出されるエネルギーが  $662\text{keV}$  の線を検出し、その到来方向を把握するような場合であれば、光電子増倍管 27 の前段に設けられる蛍光板 126 と、これらを被覆する遮蔽容器 125 は、図 12 に示すようになる。すなわち、前記線を 98% の効率で遮蔽する場合、比重が 11.3 の鉛を使用すると、遮蔽容器 125 は 34mm 程度の厚みになる。蛍光板 126 は、物質として比重が 3.7 の NaI (直径 50mm) を使用した場合、前記線を 8% の効率で検出するだけでも 10mm 程度の厚みになる。そうすると、放射線計測装置 102 は、仮に、所定方向成分を透過させる穴をひとつ有するシングルコリメータ 121 により視野を  $\pm 22$  度とし、線による蛍光板の発光を長さ 65mm の光電子増倍管により読みだす方式で制作した場合、遮蔽容器 125 及び蛍光板 126 のみの重量で 25kg 程度となるため、持ち運ぶには重いものとなる。

【0006】

仮に、遮蔽容器を構成する鉛を薄くするか、蛍光板を薄くすれば、放射線計測装置は、軽量になる。しかし、このようにして軽量にした放射線計測装置は、顕著に精度が低下するという問題点を有する。すなわち、放射線計測装置は、遮蔽容器の鉛を薄くすると、所定方向以外から到来する線を検知してしまい、蛍光板を薄くすると、線の透過量が増えて感度が低くなってしまふ。従って、線を放出する放射性物質を検出しようとする場合、感度の関係から、遮蔽容器を薄くするには限界があり、蛍光板を薄くするのにも限界がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献 1】特開 2004 - 85250 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

この発明は、上述した問題に鑑み、様々な方向から放射線が到来する環境において使用可能で、重量が格別に軽く、かつ十分な性能が得られる放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

この発明は、様々な方向から放射線が到来する環境において、特定方向に存在する放射性物質を検出する放射性物質検出装置であって、前記特定方向に存在して線と特性 X 線の両方を放出する放射性物質から到来する特性 X 線を吸収して検出し、かつ、前記放射性物質から到来する線を透過させる厚さの放射線検出用素子と、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち特性 X 線を遮蔽し、かつ、前記特定方向以外の方向から到来する放射線のうち線を透過させる厚さの遮蔽体とを備えた放射性物質検出装置であることを特徴とする。

【発明の効果】

## 【 0 0 1 0 】

この発明により、様々な方向から放射線が到来する環境において使用可能で、重量が格別に軽く、かつ十分な性能が得られる放射性物質検出装置、放射線源位置可視化システム、および放射性物質検出方法を提供できる。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 1 1 】

【 図 1 】放射線検出用素子の厚みと性能とを表すグラフによる説明図。

【 図 2 】遮蔽容器の厚みの変化に対する遮蔽、透過、バックグラウンドの変化を説明する説明図。

【 図 3 】放射性物質の種類に用いる放射性物質のエネルギースペクトルの説明図。

【 図 4 】放射線源位置可視化システムのシステム構成を示すブロック図。

【 図 5 】放射性物質検出装置の構成を説明する説明図。

【 図 6 】コンピュータの機能を示す機能ブロック図。

【 図 7 】放射線源位置可視化システムによる検出結果を示すグラフによる説明図。

【 図 8 】放射線源位置可視化システムによるイメージング画像の画面構成図。

【 図 9 】実施例 2 , 3 の放射性物質検出装置の縦断面を示す説明図。

【 図 1 0 】実施例 4 の放射線源位置可視化システムのブロック図。

【 図 1 1 】実施例 5 の放射線源位置可視化システムのブロック図。

【 図 1 2 】従来の放射線計測装置を示す縦断面図。

## 【 発明を実施するための形態 】

## 【 0 0 1 2 】

放射性物質の検出では、一般に、これら放射性物質から放出される  $\gamma$  線を検出することが好ましい。これは、 $\gamma$  線が高いエネルギーを有しているため、放射線計測機器の信号処理回路における信号対雑音比の観点から計測が容易であることと、一般的に  $\gamma$  線が放出されている環境では高エネルギーの  $\gamma$  線領域ではバックグラウンドが低くなることと、放射性物質の 1 崩壊あたりに多くの個数の  $\gamma$  線を放出することからである。しかし、ガンマカメラを軽量化しようと遮蔽容器を薄くすると、 $\gamma$  線が透過してしまい方向性の感度が悪くなり、放射線検出用素子を薄くすると、 $\gamma$  線の検出感度が低下するという問題が生じる。

## 【 0 0 1 3 】

本発明者らは、放射性物質を検出するガンマカメラを軽量化するために、鋭意研究を行った。まず、軽量で小型であっても  $\gamma$  線の検出感度の高い材質を  $\gamma$  線検出素子として用いることで  $\gamma$  線検出素子をコンパクトにし、遮蔽体となる遮蔽容器及びコリメータの鉛の重量を減らすことで、ガンマカメラの軽量化を目指した。しかし、この方法では、例えば遮蔽体を従来の 1/8 分の 1 以下にする等、大幅な軽量化は不可能であった。

## 【 0 0 1 4 】

そこで本発明者らは、放射性物質から放出される  $\gamma$  線に加えて、放射性物質の近傍に存在する通常の物質により前記  $\gamma$  線が散乱して生じるエネルギー（主として 200 keV 前後のエネルギー領域）に着目した。そして、このエネルギー領域の散乱  $\gamma$  線をも含めて前記  $\gamma$  線を計測し、 $\gamma$  線の計数率を上げることで  $\gamma$  線検出素子をコンパクトにするということを検討した。これにより、ガンマカメラの感度はさらなる増加が見込め、遮蔽体となる遮蔽容器及びコリメータの鉛の重量を減らすことができる。しかし、実際には、近傍に存在する物質の配置に依存して散乱  $\gamma$  線の強度が変化し、この方法では放射性物質の量をうまく測定できないという問題があった。また、この方法でも遮蔽体を従来の 1/8 分の 1 以下にする等の大幅な軽量化は不可能であった。

## 【 0 0 1 5 】

本発明者らは、さらに鋭意研究を重ね、放射性物質が生じる特性 X 線に着目した。そして、本発明者らは、この特性 X 線を検出することで、放射性物質の存在を検出することを試みた。一般的に、特性 X 線は、 $\gamma$  線と比較して放出確率が低くエネルギーも低いため、計測が困難であり、これまで着目されてこなかった。本発明者らは、特性 X 線を検出するために、放射性物質検出装置の信号処理回路を低エネルギー領域の特性 X 線が測定できる



ようにし、さらに低雑音化に努めた。しかし、 $\gamma$ 線が放射性物質検出装置との散乱によって生じる高いバックグラウンドによって特性X線をうまく検出できない問題があった。

【0016】

そこで、本発明者らは、さらに鋭意研究を重ねた結果、 $\gamma$ 線を極力排除し、特性X線に焦点を絞り込んで検出する構成とすることで、軽量の装置で放射性物質の存在を検出することに成功した。具体的にいうと、本発明者らは、放射線検出用素子の厚みを、 $\gamma$ 線が十分に透過しつつ特性X線を十分に検出できる厚みとし、遮蔽体となる遮蔽容器及びコリメータの厚みを、 $\gamma$ 線が十分に透過しつつ特性X線は十分に遮蔽する厚みとした。これにより、バックグラウンドを防止しつつ特性X線を検出し、従来の18分の1以下という軽量の遮蔽体で放射性物質の存在を検出することに成功した。なお、 $\gamma$ 線が透過するとは、入射する $\gamma$ 線のうち相互作用するものよりも透過するものが多いことを指す。また、 $\gamma$ 線が十分に透過するとは、 $\gamma$ 線が80%以上透過すること、好ましくは87%以上透過すること、より好ましくは92%以上透過すること、さらに好ましくは97%以上透過することを指す。なお、放射線検出用素子の厚みとは、放射線検出用素子に放射線が入射する面に対して垂直方向の厚みのことを指す（以下、入射方向に対する厚みと呼ぶ）。

【0017】

図1は、質量数が137のセシウム（以下 $^{137}\text{Cs}$ ）と質量数134のセシウム（以下 $^{134}\text{Cs}$ ）が放出するエネルギー32keVと36keVの特性X線で検出した場合における、放射線検出用素子の厚みと、放射線検出用素子の性能とのシミュレーション結果を表すグラフである。このシミュレーションは、コンクリートの上に置かれた $^{137}\text{Cs}$ と $^{134}\text{Cs}$ が崩壊比で1対0.9の比率で存在する場合において、上記二種類のセシウムが放出した $\gamma$ 線とその $\gamma$ 線がコンクリートで散乱された連続 $\gamma$ 線のある環境下において、特性X線によりこれらを検出することを想定している。

図1(A)は、放射線検出用素子の厚みの下限値 $R_1$ を示し、図1(B)は、放射線検出用素子の厚みの上限値 $R_2$ を示している。いずれのグラフも、横軸は放射線検出用素子の厚み（平均自由行程により規定）を示し、縦軸は、特性X線の検出効率（以下 $S$ ）の二乗と、 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ からの $\gamma$ 線が特性X線のエネルギーの領域（20-40keV）に付与するノイズ量（ $N$ ）の比を放射線検出用素子の厚みが10mmの時で規格化した値（以下、 $S^2/N$ ）を示す。一般に $S^2/N$ が大きいほど短時間で高い精度で特性X線を検出でき、すなわち感度が高いことを表す。また、いずれのグラフについても、放射線検出用素子の素材として、ヨウ化セシウム（以下、 $\text{CsI}$ ）、カドミウムテルル（以下、 $\text{CdTe}$ ）、ビスマスジャーمانイト（以下、 $\text{BGO}$ ）、ヨウ化ナトリウム（以下、 $\text{NaI}$ ）、イットリウム-アルミニウム-ペロブスカイト（以下、 $\text{YAP}$ ）を用いた結果を示している。

【0018】

なお、シンチレータは、発光効率を高めるために活性化物質が微量加えられることがある。例えば、 $\text{CsI}$ は、活性化物質を含まない純粋な $\text{CsI}$ に限らず、活性化物質としてナトリウム（ $\text{Na}$ ）やタリウム（ $\text{Tl}$ ）が微量加えられたシンチレータである $\text{CsI}(\text{Na})$ 、 $\text{CsI}(\text{Tl})$ とすることができる。本発明は、シンチレータの活性化物質の有無とは無関係に成立することから、特に活性化物質について記述しない。前述の例であれば、 $\text{CsI}$ は、活性化物質を含まない $\text{CsI}$ と活性化物質を含む $\text{CsI}(\text{Na})$ 、 $\text{CsI}(\text{Tl})$ を意味する。

【0019】

図1(A)のグラフから、放射線検出用素子は、特定の厚みにすることが好ましいと言える。すなわち、放射線検出用素子の厚み（有感部分の厚み）の下限値は、図1(A)に下限値 $R_1$ として示すように、計測対象の放射性物質による特性X線の放射線検出用素子中（物質中）における平均自由行程（ $\lambda_1$ ）を単位として $1.1\lambda_1$ 以上であることが好ましい。この値は、 $\text{CsI}$ であれば $S^2/N$ が1.5倍の効率となる値である。

【0020】

放射線検出用素子の厚み（有感部分の厚み）の上限値は、図1(B)に上限値 $R_2$ とし

て示すように、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の放射線検出用素子中（物質中）における平均自由行程（ $\lambda$ ）を単位として $0.14\lambda$ 以下であることが好ましい。この値は、CsIであれば $S^2/N$ が1.5倍の効率となる値である。

【0021】

なお、平均自由行程とは、特性X線または線が物質に入射後に相互作用（光電効果、コンプトン散乱、電子対生成）を起こすまでの平均の距離のことをいう（以下同じ）。

【0022】

この放射線検出用素子の厚みは、入射した特性X線が放射線検出用素子と相互作用する割合の観点からみると、計測対象とする放射性物質が放出する特性X線が検出用素子に入射した時に67%以上相互作用することが好ましく、同特性X線を78%以上相互作用することがさらに好ましい。

また、この放射線検出用素子の厚みは、線が放射線検出用素子と全く相互作用せずに透過する割合（以下透過率）の観点からみると、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線を87%以上透過することが好ましく、同線を95%以上透過することがより好ましい。

【0023】

例えば従来のガンマカメラは、計測対象となる放射性物質が最も高い割合で放出する線で放射性物質をイメージしようとする場合、放射線検出用素子の厚みが非常に厚くなる。すなわち、仮に放射線検出用素子としてNaI（直径50mm）を使用し $^{137}\text{Cs}$ からの662keVの線を検出する場合、30%の検出効率を得るためには、従来のガンマカメラは、 $0.81\lambda$ 程度の厚みが必要であり、さらに検出効率を上げるためにはより厚くする必要がある。

一方、本発明では、放射線検出用素子の厚みが $0.14\lambda$ 以下で動作が可能であり、かつ特性X線に対して容易に80%以上の効率を得ることができる。このため、放射線検出用素子を大幅に軽量化することができる。

【0024】

コリメータによって定められる視野あたりの放射線検出用素子の有感部分の面積（以下有感面積）は、入射する特性X線の強度に応じて適宜の面積とすることができる。例えば原子力施設等において使用済核燃料物質を近傍で計測する場合であれば入射X線の量が多いために有感面積を比較的狭くすることが好ましく、原子炉事故等で生じた放射性降下物を計測する場合には入射X線の量が低いために広い面積にして感度を向上することが好ましい。

【0025】

この有感面積は、測定時間が1分間で30%の統計誤差を達成するためには、例えば、放射線検出用素子CsIの位置における線による空間線量率が $10\mu\text{Sv/h}$ を下まわる環境において計測する場合には、有感面積が少なくとも $2\text{cm}^2$ 以上であることが好ましく、有効面積を $5\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $12\text{cm}^2$ 以上とする、あるいは有効面積を $96\text{cm}^2$ 以上とすることができる。

また、例えば、放射線検出用素子CsIの位置における線による空間線量率が $100\mu\text{Sv/h}$ を下まわる環境で計測する場合には、有感面積が少なくとも $0.3\text{cm}^2$ 以上であることが好ましく、有効面積を $1\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $5\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $12\text{cm}^2$ 以上とする、有効面積を $96\text{cm}^2$ 以上とすることができる。

同様にして、放射線検出用素子CsIの位置における空間線量率が $X\mu\text{Sv/h}$ を下まわる環境で計測する場合には、有感面積が少なくとも $(29 \times X^{-0.98})\text{cm}^2$ 以上（ただし $X > 100\mu\text{Sv/h}$ ）であることが好ましい。他の種類の放射線検出用素子に対してもCsIと同程度の有感面積が必要となる。

なお、測定時間を長くしてもよい場合や統計誤差が大きくても良い場合には、放射線検出用素子の有感面積を小さくすることができる。また例示した必要な有感面積は、有効面積 $16.6\text{cm}^2$ 、厚み1mm、エネルギー分解能が32keVにおいて $10.5\text{keV}$ の放射線検出用素子CsIを、前記CsIの位置における線による空間線量率が $5\mu\text{S}$

v/hと16  $\mu$ Sv/hの環境で計測した結果に基づいて近似的に推定されるものである。

【0026】

図2は、遮蔽容器の厚みの変化による各種変化を説明する説明図であり、図2(A)は、遮蔽容器の厚みと、特性X線の遮蔽率と、線の透過率の関係を表すグラフである。遮蔽容器の厚みとは、一方に開口を有して他方を閉鎖する容器の壁の厚みのことを指す。このグラフは、遮蔽容器の素材としてステンレス(以下SUS)を用いて計算したものである。ここで遮蔽の対象とする特性X線は、 $^{137}\text{Cs}$ のセシウムから放出される32 keVの特性X線であり、透過の対象とするのは $^{137}\text{Cs}$ から放出される662 keVの線である。

【0027】

グラフの横軸は、遮蔽容器の厚さを示している。グラフの縦軸は、特性X線の遮蔽率、および、線の透過率を示している。

【0028】

図示するように、遮蔽容器による特性X線の遮蔽レベルは、遮蔽容器の厚みが0.1 mmのときに約40%であり、遮蔽容器の厚みを増すにつれて高くなり、厚さ1 mmでほぼ100%(計算例では98%)遮蔽できる。

【0029】

一方、線の透過率は、遮蔽容器の厚みが10 mmのときに約60%であり、遮蔽容器の厚みを減らすにつれて高くなり、厚さ2 mmで約90%となる。

【0030】

この結果から、材質をSUSとする場合には、遮蔽容器の厚みは1 mm程度が最も好ましいといえる。すなわち、この厚みは、32 keVの特性X線を100%近く(98%)遮蔽でき、かつ、線を透過させ、遮蔽容器の重量を軽減できる厚みである。線を透過させ重量を軽減し、かつ、特性X線を十分に遮蔽できる厚みとすることで、遮蔽容器を極めて軽量化しつつ十分な検出精度を得ることができる。

【0031】

さらに言えば、遮蔽容器の厚みは、計測対象とする放射性物質の特性X線の遮蔽容器中の平均自由行程( $\lambda_3$ )を単位として1.6  $\lambda_3$ 以上であり、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の遮蔽容器中での平均自由行程( $\lambda_4$ )を単位として0.22  $\lambda_4$ 以下であることが好ましい。

【0032】

遮蔽容器の厚みは、特性X線の遮蔽の観点から見ると、20 keVから40 keVのエネルギーを持つ特性X線を80%以上遮蔽することが好ましく、同特性X線を90%以上遮蔽することがより好ましい。

【0033】

また、遮蔽容器の厚みは、線の透過率の観点からみると、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線を80%以上透過することが遮蔽容器の重量を軽減する上でよく、同線を87%以上透過することが好ましく、同線を92%以上透過することがより好ましく、同線を97%以上透過することがさらに好ましい。

【0034】

例えば従来のガンマカメラは、計測対象となる放射性物質が最も高い割合で放出する線で放射性物質をイメージしようとする場合、周囲からの線を98%遮蔽するためには遮蔽容器の厚みを4  $\lambda_4$ 程度にする必要がある。これに対し、本発明は、遮蔽容器の厚みが0.22  $\lambda_4$ 以下で動作可能なため、遮蔽容器を18分の1以下に大幅に軽量化することができる。このような遮蔽容器の厚みにより、遮蔽容器の重量を低減し、かつ特性X線を精度よく検出して、軽量化で感度の高い放射性物質検出装置を提供することができる。

【0035】

このように遮蔽容器の厚みを0.22  $\lambda_4$ 以下とすることで、遮蔽容器の軽量化と感度

向上を両立することについて、図2(B)を用いて遮蔽容器にSUSを用いた例で説明する。図2(B)は、厚さ1mmの放射線検出用素子CsIの両面を同じ厚みのSUSで遮蔽し、放射線源 $^{137}\text{Cs}$ からの662keVの線を片面のSUSに照射した場合において、SUSの厚み(662keVのSUSの中での平均自由行程 $\lambda_4$ を単位)とCsIで検出される20-40keVのバックグランド量の関係を計算したグラフである。このグラフは、放射線源のまわりに何も無い状態における遮蔽容器の厚みとバックグランド量との関係の指標となるものである。

#### 【0036】

このグラフに示すように、バックグランドは、SUSの厚みが約 $0.5\lambda_4$ のときに極大となる。従って、遮蔽容器の厚みをそれよりもバックグランドを低減できる程度に薄い $0.22\lambda_4$ 以下にすると、軽量でかつバックグランドを低減できる効果がある。詳述すると、バックグランドは、遮蔽容器の厚みが $0.22\lambda_4$ (図示d1)のときと、遮蔽容器の厚みが $1.03\lambda_4$ (図示d2)のときに、最大値の87%に低減できる。つまり、バックグランド量が極大値となる遮蔽容器の厚みに対して、それより薄い側と厚い側に、同じ量のバックグランドの低減を行えるポイント(例えばd1とd2)が現れる。しかし、薄い側に位置するd1の条件のほうが、厚い側に位置するd2の条件に比べて、同じバックグランド量のまま約4.7倍軽量化ができる。

#### 【0037】

このような遮蔽容器の厚みの考え方は、コリメータの設計にも適用され、コリメータの厚みを特定の厚みとすることが好ましい。

一般に、コリメータは、平板状の部材に穴がけられており、遮蔽容器にとりつけることで、特定方向から入射した大部分の放射線等を穴によって通過させ、特定方向以外から入射した大部分の放射線等を穴の周囲の部材によって排除する働きがある。いいかえれば、コリメータにより視野が制限される。X線や $\gamma$ 線の場合には、コリメータの厚み(有効厚)は、コリメータの視野を決めるひとつのパラメータである。ここで、特定方向とは、測定しようとする方向であって、コリメータと遮蔽容器で定められる方向、または遮蔽容器によって定められる方向である。

#### 【0038】

また、コリメータは、コリメータの背後に一つの放射線検出用素子が設けられたものと、複数の放射線検出用素子が設けられたものがある。

前者には、ひとつの穴を有するシングルコリメータ(図12のシングルコリメータ121参照)や複数の穴を有するマルチコリメータ(図5のコリメータ21参照)等がある。ここで有効厚とは、シングルコリメータやマルチコリメータでは、穴の側壁の厚みのことをいう。別の言い方をすれば、任意の方向からの放射線がコリメータ部材へ入射した際に、その入射点(ただし、コリメータの特定方向側前面、または、後面に入射した場合は除く)におけるコリメータ部材の厚み(特定方向に対して垂直方向の肉厚)の平均のことをいう。

後者には、後述するピンホールコリメータやコーデットマスク型コリメータ等がある。また、ピンホールコリメータやコーデットマスク型コリメータでは、有効厚とは、コリメータの板厚のことをいう。別の言い方をすれば、任意の方向からの放射線がコリメータ部材へ入射した際に、その入射点(ただし、穴の側壁、または、コリメータの外周側面に入射した場合は除く)におけるコリメータ部材の厚み(特定方向に対して平行方向の肉厚)の平均のことをいう。

#### 【0039】

コリメータの有効厚は、計測対象とする放射性物質の特性X線のコリメータ物質中の平均自由行程( $\lambda_5$ )を単位として $1.6\lambda_5$ 以上であり、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する $\gamma$ 線のコリメータ物質中での平均自由行程( $\lambda_6$ )を単位として $0.22\lambda_6$ 以下であることが好ましい。

#### 【0040】

このコリメータの有効厚は、特性X線の遮蔽の観点から見ると、20keVから40keV

e Vのエネルギーを持つ特性X線を80%以上遮蔽することが好ましく、同特性X線を90%以上遮蔽することがさらに好ましい。

【0041】

また、コリメータの有効厚は、線の透過率の観点からみると、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線を80%以上透過することが遮蔽容器の重量を軽減する上でよく、同線を87%以上透過することが好ましく、同線を92%以上透過することがより好ましく、同線を97%以上透過することがさらに好ましい。

【0042】

例えば従来のガンマカメラは、計測対象となる放射性物質が最も高い割合で放出する線で放射性物質をイメージしようとする場合、必要なコリメータの有効厚が非常に厚くなる。すなわち、従来のガンマカメラは、前記線の到来方向を98%の確度で決定するためにはコリメータの有効厚を4<sub>6</sub>程度とすることが必要になる。

これに対し、本発明は、コリメータの有効厚が0.22<sub>6</sub>以下で動作可能なため、コリメータを大幅に軽量化することができる。

【0043】

放射線検出用素子の後段に設けられる信号処理回路は、放射性物質から放出される特性X線のピーク周辺のスペクトルを、20keVから40keVの範囲のうち少なくとも一部について計測する構成にすることが好ましく、少なくとも20keVから40keVの範囲全体について計測する構成がより好ましく、さらには、特性X線のピークをより精度よく評価するために10keVから40keVの範囲全体について計測する構成が好ましく、10keVから50keVの範囲全体を計測する構成がより好ましい。特に、下方が10keVまで測定できる信号処理回路により、バックグラウンドの推定精度が上がり、ピークの分析精度が改善する。また、上方が50keVまで測定できる信号処理回路により、精度をさらに向上することができる。

【0044】

例えば<sup>137</sup>Csを検出対象とする場合、<sup>137</sup>Csが<sup>137m</sup>Baへ $\beta^-$ 崩壊した後<sup>137</sup>Baへ核異性体転移により壊変する一連の過程で放出される特性X線のピークである32.2keV(Ba-K<sub>1</sub>)および36.4keV(Ba-K<sub>2</sub>)周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0045】

例えば<sup>131</sup>Iを検出対象とする場合、<sup>131</sup>Iが<sup>131m</sup>Xeへ $\beta^-$ 崩壊した後<sup>131</sup>Xeへ核異性体転移により壊変する一連の過程で放出される特性X線のピークである29.8keV(Xe-K<sub>1</sub>)および33.6keV(Xe-K<sub>2</sub>)周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0046】

例えば<sup>129m</sup>Teを検出対象とする場合、<sup>129m</sup>Teが<sup>129</sup>Teへ核異性体転移により壊変する過程で放出される特性X線のピークである27.5keV(Te-K<sub>1</sub>)および31.0keV(Te-K<sub>2</sub>)周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0047】

例えば<sup>132</sup>Teを検出対象とする場合、<sup>132</sup>Teが<sup>132</sup>Iへ $\beta^-$ 崩壊により壊変する過程で放出される特性X線のピークである28.6keV(I-K<sub>1</sub>)および32.3keV(I-K<sub>2</sub>)周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0048】

例えば<sup>133</sup>Baを検出対象とする場合、<sup>133</sup>Baが<sup>133</sup>Csへ電子捕獲により壊変する過程で放出される特性X線のピークである31.0keV(Cs-K<sub>1</sub>)および35.0keV(Cs-K<sub>2</sub>)周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0049】

例えば<sup>124</sup>Iを検出対象とする場合、<sup>124</sup>Iが<sup>124</sup>Teへ $\beta^+$ 崩壊または電子捕獲により壊変する過程で放出される特性X線のピークである27.5keV(Te-K<sub>1</sub>)

)および $31.0\text{ keV}$  ( $\text{Te-K}$ ) 周辺のスペクトルを計測する構成にすることが好ましい。

【0050】

従って、少なくとも $20\text{ keV}$ から $40\text{ keV}$ の範囲の一部について計測する構成にすれば、これらの放射性物質が放出する特性X線のピークを検出し分析することができる。

【0051】

次に、放射性物質の種類の見分け方法について説明する。本発明は、放射性物質(親核種)が壊変し、娘核種になる一連の過程で、 $\gamma$ 線と特性X線を放出するものを対象とし、低エネルギー領域(例えば $10\text{ keV}$ から $50\text{ keV}$ のX線領域)で検出される特性X線を用いて、特定方向に存在する放射性物質を検出し、かつ、その方向における放射性物質の種類(娘核種の原子番号)を特定することができるものである。そして、これに、高エネルギー領域(例えば $60\text{ keV}$ から $1,000\text{ keV}$ の $\gamma$ 線領域)の放射線の検出を併用することで、より詳細に特定方向に存在する放射性物質の種類を特定することができる。このことについて以下で詳述する。

【0052】

図3(A)は、放射線検出用素子として $^{130}\text{Te}$ でカドミウムテルルを用いて計測した $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ の $0\sim 700\text{ keV}$ にわたるエネルギースペクトルであり、図3(B)は、図3(A)のそれぞれの特性X線ピークの高さをそろえて $0\sim 60\text{ keV}$ にわたり表示したものである。図3(A)(B)は、いずれも縦軸がカウント、横軸がエネルギー( $\text{keV}$ )を示す。

【0053】

ここで使用したカドミウムテルル素子のエネルギー分解能は、ピークの半値幅で定義すると $32\text{ keV}$ のエネルギーにおいて $4\text{ keV}$ である。

【0054】

まず、低エネルギー領域の放射線を用い、特定方向に存在する放射性物質の種類(娘核種の原子番号)を特定する低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法について説明する。ここで、低エネルギー領域放射性物質特定方法は、特定方向に存在する放射性物質の娘核種の原子番号を特定する娘核種特定処理として実行される。

図3(B)に示すように、低エネルギー領域では、 $^{133}\text{Ba}$ の崩壊(娘核種 $^{133}\text{Cs}$ )に伴い生じるCsの特性X線のピークP1( $31\text{ keV}$ )およびピークP2( $35\text{ keV}$ )、 $^{137}\text{Cs}$ の崩壊(娘核種 $^{137}\text{Ba}$ )に伴い生じるBaの特性X線のピークP3( $32\text{ keV}$ )およびピークP4( $36\text{ keV}$ )が生じている。

【0055】

$^{133}\text{Ba}$ の崩壊に伴い生じる特性X線のピークP1、P2の位置と、 $^{137}\text{Cs}$ の崩壊に伴い生じる特性X線のピークP3、P4の位置が少し異なっているのは、特性X線のエネルギーが異なるためである。このエネルギーピークの位置を知ることによって、放射性物質の娘核種の原子番号を特定することができる。すなわち、特性X線のエネルギーは放射性物質(親核種)が壊変し生成する娘核種の原子番号にのみ依存する。 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の壊変後の娘核種は、それぞれ $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Ba}$ であり、娘核種の原子番号(それぞれCs、Ba)に対応した特性X線(最も強度が高いものでいえば、それぞれ $31\text{ keV}$ 、 $32\text{ keV}$ )が発生することになる。そのため、反対に特性X線のエネルギーを測定すれば、娘核種の原子番号を知ることができる。一般的に娘核種の原子番号から親核種を知ることにはできないが、親核種の種類に制約を与えることができる。

【0056】

放射線検出用素子は、遮蔽体(遮蔽容器及びコリメータ、あるいは、コリメータを備えない場合であれば遮蔽容器)に囲まれているため、検出される特性X線は特定方向に存在する放射性物質から来たものである。したがって、低エネルギー領域の特性X線ピークの位置から、特定方向に存在する放射性物質の種類(娘核種の原子番号)を特定することができる。

## 【 0 0 5 7 】

放射線検出用素子のエネルギー分解能を向上させれば、放射性物質の種類（娘核種の原子番号）の特定能力をより向上させることができる。例えばカドミウムテルルの場合、カドミウムテルルをさらに低い温度に冷却する、カドミウムテルルの大きさを最適化する、より優れた雑音性能をもつ前置増幅器を使用する、等の方法により、エネルギー分解能を1 keV以下に向上することができる。なお、このように冷却することはエネルギー分解能を上げるための方法であって必須の要件ではない。カドミウムテルルを室温（例えば20 など）で用いても、ピーク位置の違いを判別して放射性物質の娘核種の原子番号を特定することができる。

## 【 0 0 5 8 】

次に、高エネルギー領域の放射線を用い、放射性物質検出装置の周囲の放射性物質の存在を認識し、その種類（親核種の種類）を特定する高エネルギー領域放射性物質特定方法（高エネルギー領域での放射性物質の種類（親核種の種類）の特定方法）について説明する。

本発明は、放射線検出用素子の厚みを、 $\gamma$ 線が十分に透過しつつ特性X線を十分に検出できる厚みとしている。また、遮蔽体の厚みを、 $\gamma$ 線が十分に透過しつつ特性X線は十分に遮蔽する厚みとしている。このため、高エネルギー領域の $\gamma$ 線は、殆どが遮蔽体を透過し、全方向から到来して放射線検出用素子に入射する。高エネルギー領域の $\gamma$ 線は、殆どが放射線検出用素子を透過するものの、一部が放射線検出用素子と相互作用し、検出される。この一部の $\gamma$ 線を検出したデータを、放射性物質の種類（親核種の種類）の特定に利用する。

## 【 0 0 5 9 】

なお、高エネルギー領域の $\gamma$ 線を用いた放射性物質の種類（親核種の種類）の特定では、全方向から到来する $\gamma$ 線が検出対象であるため、 $\gamma$ 線の入射方向を特定できないことに留意する。すなわち、エネルギースペクトルの高エネルギー領域によって特定できる放射性物質には、特性X線により放射性物質を検出できる特定方向の領域に存在するものと、それ以外の領域（遮蔽体により特性X線が遮られて特性X線では検出しない領域）に存在するものの両方が混在していることに留意する。

## 【 0 0 6 0 】

高エネルギー領域では、図3（A）に示すように、わずかにカドミウムテルルと相互作用した $\gamma$ 線がエネルギースペクトルS1, S2を形成している。 $^{133}\text{Ba}$ のエネルギースペクトルS1と $^{137}\text{Cs}$ のエネルギースペクトルS2とは、形状が異なっている。このエネルギースペクトルS1, S2は、放射性物質固有のものであり、各放射性物質が放出する $\gamma$ 線のエネルギーに依存している。

## 【 0 0 6 1 】

従って、エネルギースペクトルの高エネルギー領域の形状をみることで、放射性物質検出装置の周囲の放射性物質の存在を認識し、その種類（親核種の種類）を特定することができる。すなわち、高エネルギー領域では、放射性物質が存在する方向を特定することはできないが、周囲に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）を特定することができる。具体的には、データベースに登録されている親各種別のテンプレート（ピークに関するデータ）と前記エネルギースペクトルの高エネルギー領域の形状を比較して、一致度が所定値以上のテンプレートがあればそのテンプレートの親各種であると特定する。

## 【 0 0 6 2 】

さらに、高エネルギー領域放射性物質特定方法により放射性物質の種類（親核種の種類）を特定した結果を用い、特性X線ピーク推定方法により特性X線のエネルギーと強度を推定し、この推定結果を用いる低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法により特定方向に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）を特定する第2の特定方向放射性物質特定方法について説明する。ここで、高エネルギー領域放射性物質特定方法は、特定方向に存在する放射性物質の候補を特定する候補特定処理として実行され、特性X線ピーク推定方法及び低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法は、高エネルギー領域放射性物質特定方

法による特定結果と低エネルギー領域の測定結果を用いて特定方向に存在する放射性物質の種類を識別する種類識別処理として実行される。

特性X線や線のそれぞれのエネルギーおよび線と特性X線の放出比は、放射性物質に固有な量をもつ。また、線と特性X線の検出効率は、放射性物質検出装置に固有である。特性X線ピーク推定方法は、この法則を利用して特性X線のエネルギーと強度を推定する。

#### 【0063】

特性X線ピーク推定方法では、まず、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法を用いて、高エネルギー領域の線スペクトルから放射性物質検出装置の周囲の個々の放射性物質の存在を認識する。この認識された放射性物質に対して、各特性X線のエネルギーを求め、線と特性X線の放出比、線と特性X線の検出効率、および放射性物質の分布状況の仮定に基づいて、各放射性物質による各特性X線強度を推定する。

例えば、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の2種類の放射性物質が混在している場で計測する場合を考える。高エネルギー領域の線スペクトルから放射性物質 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が放射性物質検出装置の周囲に存在することを認識し、その2種類の放射性物質が放出する特性X線のエネルギーと強度を推定する。すなわち、存在を認識した放射性物質 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ について、例えば、放射性物質が地面上に一様に分布しているとの仮定をし、それぞれが放出する特性X線のエネルギーを公知のデータベースから抽出し、さらに線と特性X線の放出比および線と特性X線の検出効率を用いた演算を行うことで、個々の特性X線強度を推定する。

#### 【0064】

次に、この推定をもとに、低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法を用いて低エネルギー領域の特性X線スペクトルを解析する。低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法では、上述の $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の2種類の放射性物質が混在している場の例で説明すると、推定したエネルギーと強度をもつ特性X線のピーク( $^{133}\text{Ba}$ の娘核種のCsと $^{137}\text{Cs}$ の娘核種のBaの特性X線ピーク)を、低エネルギー領域から積極的に探し出す(推定したエネルギーと強度をもつ特性X線のピークとの差が一定値以内にあるピークがあればその特性X線のピークがあると判定する)ことで、それぞれの特性X線ピークの有無やそれぞれの強度を精度よく決定でき、高エネルギー領域放射性物質特定方法で特定した種類の放射性物質が低エネルギー領域にも存在するか否かが判定できる。存在すると判定した場合、その種類の放射性物質が、特定方向に存在すると特定する。

#### 【0065】

このように高エネルギー領域放射性物質特定方法と特性X線ピーク推定方法と低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法を組み合わせて低エネルギー領域を解析する第2の特定方向放射性物質特定方法は、特に、放射性検出用素子のエネルギー分解能が、複数の放射性物質の特性X線エネルギーの差と比して同程度の場合に役に立つ。詳述すると、上述の $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の2種類の放射性物質が混在している場の例では、特性X線のエネルギー差は、1keVである。そして、特性X線ピークは、図3(B)のように近接し、実際には1つのピークとして観測される。低エネルギー領域のスペクトルの情報だけでは親核種の数と種類は不明である。このため、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ 由来であるCsとBaの2種類の特性X線ピークを認識し、それぞれを分離することは難しい。ここで、高エネルギー領域から放射性物質の種類( $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ )を特定することで、特性X線のエネルギーと強度の推定することができ、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ の特性X線をそれぞれ分離して検出し、特性X線強度の高精度測定ができる。この場合、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ を独立に定量することができ、加えて、特定方向に存在する放射性物質(親核種)が $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ であると特定できる。

#### 【0066】

また、第2の特定方向放射性物質特定方法は、エネルギー分解能が悪い場合にも、高エネルギー領域の線スペクトルを用いることで、特定方向に存在する放射性物質の種類を、低エネルギー領域放射性物質特定方法だけを用いた第1の特定方向放射性物質特定方法



と比べてより特定できる。すなわち、前述の例の $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が混在している場では、第1の特定方向放射性物質特定方法に用いる低エネルギー領域の情報からは、その娘核種の原子番号を特定できるが、エネルギー分解能の大きさに応じて誤差が生まれるため、一定の幅に制約（例えば、娘核種が $\text{Xe}$ 、 $\text{Cs}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{La}$ に制約）できるに過ぎない。しかし、第2の特定方向放射性物質特定方法では、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法により高エネルギー領域の線スペクトルを測定することで、特定方向に存在する放射性物質の候補としては、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ のどちらか、あるいは、両方であることが特定できる。

#### 【0067】

エネルギー分解能が良い場合には、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法と特性X線ピーク推定方法により推定される特性X線のエネルギーと強度の結果と、低エネルギー領域の特性X線のエネルギースペクトルの測定結果とを組み合わせる低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法によって、特定方向の領域に存在する放射性物質の種類（親核種）を特定する第2の特定方向放射性物質特定方法を実現できる。すなわち、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が混在している場では、低エネルギー領域からは、放射性物質の娘核種の原子番号が $\text{Cs}$ と $\text{Ba}$ であると特定でき、高エネルギー領域の線スペクトルから $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ が放射性物質検出装置の周囲に存在すると特定できるため、低エネルギーの2つの特性X線ピークは $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ 由来であると認識できる。したがって、特定方向に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）は、 $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ であると特定できる。

#### 【0068】

前述の例では、2種類の放射性物質（ $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ ）が存在し、かつ、それらの娘核種（それぞれ $^{133}\text{Cs}$ や $^{137}\text{Ba}$ ）の原子番号が異なるものであった。この場合には、特性X線のエネルギー差が放射線検出用素子のエネルギー分解能に比べて同等以上に優れば、特定領域に存在する放射性物質の種類を特定し（この例では $^{133}\text{Ba}$ と $^{137}\text{Cs}$ ）、それぞれの量を分離して検出し、独立に測定することができる。

一方で、例えば $^{137}\text{Cs}$ と $^{134}\text{Cs}$ （娘核種はそれぞれ $^{137}\text{Ba}$ と $^{134}\text{Ba}$ ）が混在している例では、娘核種の原子番号が両者で等しく両者は同じエネルギーの特性X線を放出するために、特定領域に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）を特定し、それぞれの量を分離して検出し、独立に定量することはできない。しかし、高エネルギー領域の線スペクトルを用い第2の特定方向放射性物質特定方法を行えば、低エネルギー領域の特性X線スペクトルだけを用いた場合（低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法）と比べてより特定することができる。すなわち、特定方向に存在する放射性物質は、低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法では娘核種が $\text{Ba}$ であることしか判別できないが、高エネルギー領域の情報を用いた第2の特定方向放射性物質特定方法では放射性物質の種類（親核種の種類）が $^{137}\text{Cs}$ あるいは $^{134}\text{Cs}$ の両方、あるいはいずれか一方であることを特定することができる。

#### 【0069】

放射性物質が放射性物質検出装置の周囲に種類しか存在しない場合には、第2の特定方向放射性物質特定方法を用いれば、高エネルギー領域の線スペクトルから放射性物質の種類（親核種の種類）を特定でき、低エネルギー領域で検出される特性X線は当該放射性物質から放射されたことは明らかなので、特定方向の領域に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）を特定できる。

#### 【0070】

放射性物質が三種類以上の混在する場においては、高エネルギー領域放射性物質特定方法を用いると高エネルギー領域の線スペクトルから放射性物質検出装置の周囲に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）は特定できる。仮にそれらの娘核種がそれぞれ異なる原子番号であり、かつ、それらの特性X線のエネルギー差が放射線検出用素子のエネルギー分解能に比べて同等以上に優れるものであれば、第2の特定方向放射性物質特定方法

により特定方向の領域に存在する放射性物質の種類を特定できる。また、仮にそれらの娘核種のうち原子番号を同一とするものがあった場合には、特定領域に存在するそれらの放射性物質の種類（親核種の種類）を特定し、それぞれの量を分離して検出し、独立に定量することはできない。しかし、第2の特定方向放射性物質特定方法では、高エネルギー領域の線スペクトルを用いることで、特定方向の領域に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）を制約することができ、低エネルギー領域の特性X線スペクトルだけを用いた第1の特定方向放射性物質特定方法と比べてより特定することができる。

【0071】

このように、低エネルギー領域からは特定方向に存在する放射性物質の娘核種の原子番号を特定することができる（低エネルギー領域放射性物質特定方法による第1の特定方向放射性物質特定方法）。さらに、高エネルギー領域の検出結果を用いた推定をもとに低エネルギー領域の放射性物質のピークを解析することで、より精度よく放射性物質の特性X線強度を計測でき、特定方向に存在する放射性物質の種類（親核種の種類）の識別ができる（高エネルギー領域と低エネルギー領域を用いた第2の特定方向放射性物質特定方法）。

【0072】

低エネルギー領域のスペクトル（特性X線領域のスペクトル）と高エネルギー領域のスペクトル（高エネルギー領域の線スペクトル）の両方を用い、エネルギースペクトルから放射線検出用素子に吸収されたエネルギー量を計算することで、簡易的な空間線量計として動作させることもできる。

【0073】

このようにして、放射性物質を精度よく検出し、その放射性物質の種類を識別し、かつ、非常に軽量の放射性物質検出装置を提供することができる。

この発明の一実施形態を以下図面と共に説明する。

【実施例1】

【0074】

図4は、放射線源位置可視化システム1のシステム構成を示すブロック図である。

放射線源位置可視化システム1は、放射性物質検出装置2、前置増幅器3、波形整形アンプ4、ピーク敏感型ADC5（サンプルホールド回路またはピークホールド回路6、（マルチプレクサ7）、ADC8）、高圧電源9、コンピュータ10、方向制御駆動部11、カメラ12、入力装置13、およびモニタ14を備えている。図示する放射線源位置可視化システム1は、単素子モジュールの例を示している。

【0075】

放射性物質検出装置2は、特性X線を検出することで放射性物質を検出する装置であり、高圧電源9による電力供給を受けて動作する。放射性物質検出装置2で計測した信号は、後段の前置増幅器3に伝達される。

【0076】

前置増幅器3は、受け取った信号を増幅する。

【0077】

波形整形アンプ4は、ハイパスフィルタやローパスフィルタで構成され、前置増幅器3から受け取った信号の波形を整形し、後段のピーク敏感型ADC5に信号を伝達する。これにより、検出する信号の帯域を絞り、ノイズを除去することができる。

【0078】

ピーク敏感型ADC5は、ピークセンシングADCとも呼ばれるものであり、波形整形アンプ4から受け取った信号のピーク（アナログ波高の最大値）をサンプルホールド回路あるいはピークホールド回路6で検出し、ADC8によりデジタル信号（デジタルの数値）にし、このデジタル信号を後段のコンピュータ10に伝達する。サンプルホールド回路あるいはピークホールド回路6と、ADC8の間には、必要に応じてマルチプレクサ7が設けられる。このマルチプレクサ7には、必要に応じて他の入力接続される。

高圧電源9は、放射性物質検出装置2の動作に必要な高電圧の電力を放射性物質検出装

置 2 に供給する。

【 0 0 7 9 】

コンピュータ 1 0 は、外部機器を接続する U S B ポートおよびシリアルポート等の外部接続インターフェース 1 0 a、ハードディスクまたはフラッシュメモリ等で構成される記憶部 1 0 b、C P U と R O M と R A M を有する制御部 1 0 c、および、C D - R O M 等の記憶媒体に対する読み書きを行う記憶媒体処理部 1 0 d を備えている。

【 0 0 8 0 】

コンピュータ 1 0 には、ピーク敏感型 A D C 5、方向制御駆動部 1 1、静止画像を取得するカメラ 1 2、マウスおよびキーボード若しくはタッチパネル等で構成されて利用者の操作入力を受け付ける入力装置 1 3、液晶ディスプレイや C R T ディスプレイ等で構成されて画像を表示するモニタ 1 4 が接続されている。方向制御駆動部 1 1 は、放射性物質検出装置 2 とカメラ 1 2 の向いている方向を制御する駆動をする。この制御駆動の際、方向制御駆動部 1 1 は、放射性物質検出装置 2 とカメラ 1 2 を同じ方向を向かせるように制御する。

【 0 0 8 1 】

このコンピュータ 1 0 は、記憶部 1 0 b に記憶されているプログラムに従って、制御部 1 0 c が各種演算や各種機器の動作制御を実行し、また、ピーク敏感型 A D C 5 から受け取ったデジタル信号のカウントや画像処理等を実行する。詳細については後述する。

【 0 0 8 2 】

また、放射性物質検出装置 2、前置増幅器 3、波形整形アンプ 4、およびピーク敏感型 A D C 5 での信号処理は、2 0 - 4 0 k e V の特性 X 線ピークおよびその周辺のエネルギー領域 1 0 - 5 0 k e V、加えて 5 0 - 1 0 0 0 k e V を検出できるように構成されている。

【 0 0 8 3 】

図 5 は、放射性物質検出装置 2 の構成を説明する説明図である。図 5 ( A ) は、放射性物質検出装置 2 の概略構成を示す斜視図であり、図 5 ( B ) は、放射性物質検出装置 2 の概略構成を示す縦断面図であり、図 5 ( C ) は、放射性物質検出装置 2 に対する特性 X 線および線の透過 / 遮蔽を説明する縦断面図による説明図である。

【 0 0 8 4 】

図 5 ( B ) に示すように、放射性物質検出装置 2 は、円筒形の側壁 2 5 b を有して片面に開口 2 5 a を有し、他面に底 2 5 c を有する遮蔽容器 2 5 を有している。遮蔽容器 2 5 は、厚さ 1 m m の S U S によって形成されている。

【 0 0 8 5 】

遮蔽容器 2 5 の開口 2 5 a には、略円柱形のコリメータ 2 1 ( マルチコリメータ ) が隙間なく取り付けられている。このコリメータ 2 1 は、S U S で形成され、複数 ( この例では 1 9 個 ) の穴 2 2 が規則正しく配置されている。コリメータ 2 1 は、厚みが 1 m m あれば良いが、この例では 2 5 m m の厚み ( 円柱形の長さ方向の厚み ) としている。また、穴 2 2 は 1 0 m m であり、隣り合う穴 2 2 と穴 2 2 の間部 2 3 ( 有効厚 ) は 1 m m である。コリメータ 2 1 は、角度分解能 ( 半値幅 ) が  $\pm 7.75^\circ$  であり、最大視野が  $\pm 21.8^\circ$  である。このコリメータ 2 1 の角度分解能や最大視野は、穴 2 2 の直径とコリメータ 2 1 の長さ方向 ( 放射線の到来方向 ) の厚みを変化させることで任意の値に設定することができる。またコリメータ 2 1 の穴 2 2 の数は、任意の値を取ることができ、1 つでも構わない ( シングルコリメータ ) 。

【 0 0 8 6 】

コリメータ 2 1 の厚み ( 有効厚 ) は、計測対象とする放射性物質の特性 X 線のコリメータ 2 1 中の平均自由行程 (  $\lambda_5$  ) を単位として  $1.6 \lambda_5$  以上であるように構成されている。

コリメータ 2 1 の穴 2 2 と穴 2 2 の間部 2 3 の厚み、すなわちコリメータの有効厚は、計測対象とする放射性物質が放出する特性 X 線のコリメータ 2 1 中の平均自由行程 (  $\lambda_5$  ) を単位として  $1.6 \lambda_5$  以上であるように構成され、かつ、計測対象とする放射性物質

がもっとも高い割合で放出する 線のコリメータ 2 1 中での平均自由行程 (  $\mu_0$  ) を単位として  $0.22 \mu_0$  以下であるように構成されている。

このコリメータ 2 1 と遮蔽容器 2 5 が、遮蔽体として機能する。

【 0 0 8 7 】

遮蔽容器 2 5 の内部には、コリメータ 2 1 の裏面に近接して円盤形の放射線検出用素子 2 6 が設けられ、さらに光電子増倍管 2 7 が設けられている。すなわち、放射線の到来方向から、コリメータ 2 1、放射線検出用素子 2 6、および光電子増倍管 2 7 がこの順に配置されている。

【 0 0 8 8 】

放射線検出用素子 2 6 は、この実施例ではシンチレータが用いられており、具体的には CsI により  $50 \text{ mm}$ 、厚さ  $1 \text{ mm}$  の形状に形成されている。放射線検出用素子 2 6 のエネルギー分解能は、 $32.2 \text{ keV}$  において  $10.5 \text{ keV}$  (半値幅) である。

【 0 0 8 9 】

放射線検出用素子 2 6 は、検出例として、バリウム、セシウム、キセノン、ヨウ素、テルルの 線放出核種 (以下放射性物質) のいずれか、あるいは複数放出する特性 X 線 (Ba K :  $32.2 \text{ keV}$ , Cs K :  $31.0 \text{ keV}$ , Xe K :  $29.8 \text{ keV}$ , I K :  $28.6 \text{ keV}$ , Te K :  $27.5 \text{ keV}$ ) を計測できるように、これらの特性 X 線ピーク周辺のスペクトルを少なくとも  $20 \text{ keV}$  から  $40 \text{ keV}$  の一部を計測する。また精度よく計測するために  $10 \text{ keV}$  から  $50 \text{ keV}$  にわたって計測することができる。さらにより詳細に放射性物質の種類を特定するために、 $50 - 1000 \text{ keV}$  にわたって測定することができる。

【 0 0 9 0 】

この放射線検出用素子 2 6 は、コリメータ 2 1 の穴 2 2 を通過した特性 X 線が入射する部分が有感部分 2 6 a となる。

【 0 0 9 1 】

光電子増倍管 2 7 は、入射する光を内部で増幅し電気信号として出力する装置である。この光電子増倍管 2 7 は、放射線検出用素子 2 6 である CsI 等のシンチレータに放射線が入射してシンチレータが発光すると、その光を電子に変換し増幅して電気信号を生じさせる。

【 0 0 9 2 】

このように構成された放射性物質検出装置 2 は、図 5 (C) に示すように、矢印に示す特定方向 Y から到来する特性 X 線を検出し、他の方向から来た特性 X 線や、全方向からの大部分の 線を検出しない。すなわち、放射線検出素子 2 6 は、遮蔽容器とコリメータによって囲われているため、コリメータ 2 1 の穴 2 2 によって、特性 X 線が入射する角度が領域 E の範囲に限られる。この入射した特性 X 線により放射線検出用素子 2 6 が発光し、光電子増倍管 2 7 により電気信号として検出する。

【 0 0 9 3 】

他の方向からの特性 X 線は、コリメータ 2 1 および遮蔽容器 2 5 によって遮蔽され、放射線検出用素子 2 6 を発光させず検出されない。

【 0 0 9 4 】

全方向からの 線の大部分は、コリメータ 2 1 と遮蔽容器 2 5 と相互作用せず、また、遮蔽容器 2 5 および放射線検出用素子 2 6 とも相互作用しないため、検出されない。従って、特性 X 線の検出を 線が妨害することを防止している。

【 0 0 9 5 】

このように、放射線検出用素子 2 6 および光電子増倍管 2 7 と、図 4 に示した前置増幅器 3、波形整形アンプ 4、ピーク敏感型 ADC 5 による信号処理回路 (3, 4, 5) により、放射性物質が放出する特性 X 線のエネルギー情報と特性 X 線の入射強度を取得する。

【 0 0 9 6 】

図 6 は、コンピュータ 1 0 (図 4 参照) において、記憶部 1 0 b 内のプログラムに従って動作する制御部 1 0 c が各機能手段として機能する際の機能ブロック図を示す。

コンピュータ10の機能ブロックとしては、方向制御部40、カメラ画像取得部41、スペクトル作成部42、ピーク分析部43、二次元画像作成部44、画像合成部45、切替入力処理部46、および画像表示部47が設けられている。

【0097】

方向制御部40は、方向駆動制御部11の駆動制御を行い、カメラ12の方向と放射性物質検出装置2(図4参照)の方向を制御する。具体的には、まずカメラ12の方向を制御し、撮像範囲を定める。そして、カメラ12の撮像範囲内をマトリクス状(格子状)に複数の領域に区分けし、そのうちの1つの領域に放射性物質検出装置2を向ける。その領域の検出が完了すると、次の領域に放射性物質検出装置2を向ける。この方向制御を繰り返すことで、方向制御部40は、マトリクス状に区分けされた全ての領域について、領域毎に放射性物質が放出する特性X線を検出できるようにしている。

【0098】

カメラ画像取得部41は、カメラ12(図4参照)から撮像されたカメラ画像を取得する。このカメラ画像取得部41は、カメラ12から静止画を取得する構成としているが、これに限らない。例えば、カメラ画像取得部41は、カメラ12の代わりにビデオカメラを備え、ビデオカメラで撮像された動画像(映像)を取得する構成にしてもよい。

【0099】

スペクトル作成部42は、ピーク敏感型ADC5から受け取ったデータを処理し、エネルギースペクトルの作成を行う。

ピーク分析部43は、スペクトル作成部42から受け取ったスペクトルの中から特性X線の単独ピークを探し出し、その正味の計数を求める。あるいは、複数の放射性物質が混在している場においては、ピーク分析部43は、エネルギー分解能が優れる場合であれば複数の特性X線が作る複数のピークを探し出し、エネルギー分解能が優れない場合であれば複数の特性X線が複合して形成するピークを探し出し、その正味の計数を算出する。

【0100】

また、ピーク分析部43は、上述した第1の特定方向放射性物質特定方法を娘核種特定処理により実行し、上述した第2の特定方向放射性物質特定方法を候補特定処理と種類識別処理により実行する放射性物質識別部としても機能する。娘核種特定処理を実行するピーク分析部43は、低エネルギー領域放射性物質特定方法により娘核種の種類を特定する(第1の特定方向放射性物質特定処理)。候補特定処理を実行するピーク分析部43は、上述した高エネルギー領域放射性物質特定方法により親核種の種類を特定する。種類識別処理を実行するピーク分析部43は、上述した特性X線ピーク推定方法により特性X線のエネルギーと強度を推定し、上述した低エネルギー領域放射性物質詳細特定方法により特定方向の放射性物質の種類を識別する(第2の特定方向放射性物質特定処理)。

【0101】

二次元画像作成部44は、ピーク分析部43で特性X線ピークの正味の計数に基づいて、放射性物質の存在方向を示す画像を作成する。この画像は、例えばマトリクス状の画像とすることができる。すなわち、方向制御部40による駆動制御によって各領域の放射性物質の存在を検出しているため、領域毎に検出レベルに応じた濃度の塗りつぶし表示をすることで、領域毎に放射性物質の量を示すマトリクス状の画像にできる。

スペクトル作成部42は、画像表示部47へマトリクス状に区分けされた各領域で得られた複数のスペクトル画像(この実施例では16個のスペクトル画像)を送信する。

【0102】

画像合成部45は、カメラ画像取得部41で取得した撮像画像と、二次元画像作成部44で作成したマトリクス状の二次元画像とを合成して合成画像を作成する。このようにして、放射性物質を検出したマトリクス上の位置と、撮像画像における放射性物質の存在位置とを対応させる。

【0103】

切替入力処理部46は、モニタ14に表示させる画像をスペクトル画像とイメージング画像に切り替える操作入力(入力装置13による操作入力)を受け付ける。

## 【0104】

画像表示部47は、図7に示すスペクトル画像、および、図8に示すイメージング画像をモニタ14に表示する。切替入力処理部46による操作入力を受けて、スペクトル画像が指定され、かつ、マトリクス状に区分けされた領域の1つが指定されれば図7に示すスペクトル画像を表示し、二次元画像が指定されれば図8に示す合成画像を表示する。

## 【0105】

このようにして、特性X線を検出し、放射性物質のスペクトル画像を図7に示すグラフに表示し、検出位置を図8に示すマトリクス状の合成画像に表示することができる。

## 【0106】

図7は、検出した放射線のスペクトルを示すグラフである。横軸はエネルギー（keV）を示し、縦軸はカウント数を示す。グラフG1は、放射性物質が存在する方向（汚染方向）へ向けて測定した例を示し、グラフG2は、放射性物質が存在しない方向（非汚染方向）へ向けて測定した例を示す。

## 【0107】

このグラフを計測した放射線源位置可視化システム1は、図4に示した光電子増倍管27に浜松ホトニクス製のR10131を使用し、前置増幅器3にクリアパルス製の595H型を使用し、波形整形アンプ4にクリアパルス製の4417型を使用し、ピーク敏感型ADC5にAMPT EK製の8100Aを使用し、高圧電源9に浜松ホトニクス製のC9619-01を使用している。

## 【0108】

このグラフに示されるように、非汚染方向へ向けた検出では放射性物質が検出されなかったが、汚染方向へ向けた検出では、 $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ からの32keVおよび36keVを検出したピークPが見られた。これにより、 $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ からの32keVおよび36keVの特性X線を検出することができる。このように放射線のスペクトルを表示するモニタ14は、特性X線のピークを出力するピーク出力部として機能する。

## 【0109】

このピークPの検出は、コンピュータ10（図4参照）の制御部10cにより実行するとよい。詳述すると、コンピュータ10（図4参照）の記憶部10bには、テンプレートデータを予め記憶しておく。そして、制御部10cは、前記テンプレートデータに対する測定データ（検出した放射線のスペクトル）の突出量を算出し、この突出量の最も多い位置（エネルギー（keV））のデータをピークPとして検出する。前記テンプレートデータは、グラフG2のようにピークPのないグラフ形状を低エネルギー領域から高エネルギー領域まで所定関数（例えば4次関数）等で近似したデータとするとよい。このテンプレートデータは複数用いることもでき、特に、放射性物質のまわり（線源のまわり）に通常物質が多い等により、ピークPの高エネルギー側で、幅の広い山形のピーク（ピーク位置が60keVから250keVの間で、半値幅が60keVから200keV、かつ、ライン線ピークや特性X線ピークでないもの）がピークPより強く表れる環境であれば、テンプレートデータは、この幅の広い山形ピーク部分に沿う形状となる所定関数のデータとするとよい。なお、ライン線ピークとは、放射性物質（娘核種）の原子核の励起準位差に対応したエネルギーをもつピークのことをいう。

## 【0110】

これにより、制御部10cは、ピークPの高エネルギー側の幅の広い山形のピークがピークPより強くても、ピークPを適切に検出することができる。また、測定データのうちテンプレートデータから突出している部分（ピークP周辺部分）の面積（正味の計数）を求めることで、特性X線の検出方向である特定方向に存在する放射性物質の量を算出することができる。このように検出したピークPを出力する制御部10cはピーク出力部としても機能する。

## 【0111】

また、このピークPの検出において、制御部10cは、放射性物質の種類の特特定も実行

する。この場合、制御部 10c は、上述した候補特定処理により 線領域での放射性物質の種類を候補を特定し、種類識別処理により特性 X 線領域で前記候補のうち特定方向に存在する放射性物質の種類を識別する。この放射性物質の種類を特定を実行する制御部 10c は、放射性物質識別部として機能する。

#### 【0112】

図 8 は、合成画像 60 を示す画面説明図である。合成画像 60 には、カメラ 12 で撮像された撮像画像 61 の上に、マトリクス状で特性 X 線強度に応じた塗りつぶしがされた二次元画像 62 が重ねて表示（半透明色の合成）されている。二次元画像 62 は、複数個（図示の例では 16 個）のマスキングに区分され、1 マスキング単位で特性 X 線強度が表示される。例えば、特性 X 線強度の高い第 1 強度表示部 63 と、特性 X 線強度がそれより薄い第 2 強度表示部 64 と、放射線がほとんど検出されない第 3 強度表示部 65 とが表示される。これにより、どの領域でどれくらいの放射性物質が存在しているかを確認できる。このように特性 X 線強度を表示するモニタ 14 は、合成画像を出力する合成画像出力部として機能する。

#### 【0113】

また、領域毎の塗りつぶし表示の色は、識別した放射性物質の種類に応じて異なっている。各色が示す放射性物質の種類は、画面上に表示される、あるいは、別途のマニュアルに表示されるなど、適宜の方法によって示される。なお、特定した放射性物質の種類を画面上に明示してもよい。また、識別した放射性物質の種類毎に二次元画像 62 を作成しても良い。この場合、モニタ 14 には、各種類の二次元画像 62 を切り替えボタンで切り替え可能に表示する、あるいは各二次元画像 62 を一画面中に並べて複数表示するなど、適宜の表示をすることができる。

#### 【0114】

以上の構成により、放射性物質検出装置 2 は、非常に軽量の構成で、線と特性 X 線を放出する放射性物質を十分な性能で計測し放射性物質の分布を画像化することができる。すなわち、分厚い鉛やシンチレータを使用していた従来例に比べ、放射性物質検出装置 2 は、薄い遮蔽容器 25（例えば 1 mm 厚の SUS）と薄いコリメータ 21、及び薄い放射線検出用素子 26（例えば 1 mm 厚の CsI）により、遮蔽体の重量を少なくとも従来の約 18 分の 1 以下に軽量化をすることができる。さらに、遮蔽体（遮蔽容器 25 及びコリメータ 21）の最適化によって、遮蔽体の重量を従来の 50 分の 1 以下にすることもできる。 $^{137}\text{Cs}$  を検出する場合において従来のガンマカメラは遮蔽体の遮蔽率 98% を得ようとする 34 mm の鉛が必要であるが、この放射性物質検出装置 2 は遮蔽体の遮蔽率 98% を SUS 1 mm で実現できるため、遮蔽体は従来と同等の指向性を持ちながらも約 50 分の 1（ $[34 \text{ mm} \times \text{鉛の比重 } 11.3] / [1 \text{ mm} \times \text{SUS の比重 } 7.9]$ ）の軽量化が実現できている。この放射性物質検出装置 2 は、少なくとも放射性物質の存在を認識でき、放射性物質の分布を画像化でき、必要に応じて、放射性物質を定量すること、または放射性物質の種類を特定することもなし得る。

#### 【0115】

さらに言えば、遮蔽容器 25 は、全方向から到来する線の遮蔽には役立たない薄さであって従来技術では使用不可能な薄さにすることができる。また、コリメータ 21 の穴 22 と穴 22 の間の厚み 23、すなわちコリメータの有効厚は、全方向から到来する線を絞ることに役立たない薄さで、従来技術では使用不可能な薄さにすることができる。加えて、放射線検出用素子 26 は、線の検出には役立たない薄さであって従来技術では使用不可能な薄さにすることができる。このような薄さにした上で、線を放出する放射性物質を、特性 X 線を利用して検出することができる。

#### 【0116】

信号処理回路（3, 4, 5）（図 4 参照）は、特性 X 線のピーク周辺（例えば  $^{137}\text{Cs}$  であれば 32 keV から 36 keV）のスペクトルを検出する。このように特性 X 線を計測対象とすることで、上述のように遮蔽容器 25 を薄く、かつ放射線検出用素子 26 を薄くでき、コリメータ 21 も軽量にすることができる。また、このような信号処理回路（

3, 4, 5)により、感度のよい放射性物質検出装置2を提供できる。

【0117】

放射線検出用素子26は、特性X線の入射方向に対する有感部分の厚みが、前記放射線検出用素子26に使用する物質中での計測対象とする放射性物質の特性X線の平均自由行程( $\lambda_1$ )を単位として $1.1\lambda_1$ 以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線が前記放射線検出用素子26に使用する物質中での平均自由行程( $\lambda_2$ )を単位として $0.14\lambda_2$ 以下の範囲に形成されている。これにより、バックグラウンドを抑制し、特性X線に対する感度を向上させることができる。

【0118】

また、遮蔽容器25の厚みは、計測対象とする放射性物質の特性X線の遮蔽容器25中の平均自由行程( $\lambda_3$ )を単位として $1.6\lambda_3$ 以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線の遮蔽容器25中での平均自由行程( $\lambda_4$ )を単位として $0.22\lambda_4$ 以下の範囲に形成されている。これにより、重量を軽減しつつも、特性X線に対する感度を向上させることができる。

【0119】

また、コリメータ21の穴22と穴22の間の厚み23、すなわちコリメータの有効厚は、計測対象とする放射性物質の特性X線のコリメータ21の物質中の平均自由行程( $\lambda_5$ )を単位として $1.6\lambda_5$ 以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する線のコリメータ21の物質中での平均自由行程( $\lambda_6$ )を単位として $0.22\lambda_6$ 以下の範囲に形成されている。これにより、重量を軽減しつつも、特性X線に対する感度を向上させることができる。

【0120】

また、信号処理回路(3, 4, 5)は、10keVから50keVを計測できる。これにより、バリウム、セシウム、キセノン、ヨウ素、及びテルル等のうち線と特性X線を同時に放出する核種(放射性物質)を、特性X線を利用し、高精度に計測することができる。

【0121】

また、放射線源位置可視化システム1は、放射性物質の核種が存在している位置を合成画像60(図8参照)に表示することができる。これにより、放射線源の位置を画像上で確認することができ、汚染場所を容易に特定することができる。また、放射線源位置可視化システム1は、検出した放射線のスペクトルをグラフG1(図7参照)として表示することができる。

【0122】

また、放射線検出用素子26は、特性X線を止めて検出できればよいため、技術的に放射線検出用素子を大きな厚みを持たせつつ大きな面積を確保しながら高い性能で動作させることが困難なCdTe等の素材(例えばCdTeであれば5mm厚程度まで)であっても最適な厚み(例えば1mm厚)で利用することができる。

【0123】

また、この放射性物質検出装置2により、特性X線に対して、約80%以上の検出効率(CsI1mmであれば $^{137}\text{Cs}$ の32keVに対して95%)をもたせることができ、従来より非常に軽量でありながら従来のガンマカメラと同程度の計数効率で $^{137}\text{Cs}$ を検出することができる。

詳述すると、 $^{137}\text{Cs}$ の1崩壊あたりの線662keVと特性X線32keVの放出確率は、それぞれ、85.1%と5.6%である。実用化されている従来の多くのガンマカメラは、放出確率が85.1%と高い線662keVを検出対象としており、この $^{137}\text{Cs}$ の662keVに対する検出効率が5%~10%程度である。この従来のガンマカメラは、仮に大きなサイズの蛍光板(例えば直径50mm×厚さ30mmのNaI)を使用すれば検出効率は30%程度となるが、蛍光板を囲む遮蔽体の重量がさらに増大するため使用に支障をきたす。

これに対し、本発明の放射性物質検出装置2は、 $^{137}\text{Cs}$ の1崩壊あたりの放出確率



が 5.6%と線よりも小さい特性 X 線を検出対象としながら、検出効率を約 80%以上と高くすることができる。これにより、放射性物質検出装置 2 は、従来のガンマカメラより非常に軽量の構成でありながら、従来のガンマカメラと同程度の計数効率で  $^{137}\text{Cs}$  を検出することができる。さらに、放射性物質検出装置 2 は従来のガンマカメラと比べて格段に軽量であるために、重量を気にせずに放射性物質検出素子の有感面積、あるいは放射性物質検出装置の台数を容易に 2 倍、5 倍、10 倍以上とすることもでき、感度を高めることができる。

【0124】

さらに、放射性物質検出装置 2 は、様々な方向から線が到来する環境にあっても、放射線検出用素子 26 を特定の厚みにすることでバックグラウンドを抑制し検出限界を下げることができ、従来計測が困難であった特性 X 線（特に 20 keV から 40 keV のエネルギー量のもの）に対して高感度で計測することができる。

【0125】

また、信号処理回路は、10 keV から計測可能とすることで、特性 X 線ピーク周辺のバックグラウンドの推定精度を上げることができ、特性 X 線の正味の計数を精度よく求めることができる。

【0126】

また、放射性物質検出装置 2 は、遮蔽容器 25 の厚みとコリメータ 21 の穴 22 と穴 22 の間の厚み 23 を特定の厚みにすることで、放射性物質の存在する方向に対する感度を十分なものにしつつ、従来のガンマカメラと比較して大幅な軽量化を実現している。

【0127】

また、放射線検出用素子 26 を 1 mm 厚の CsI としたことで、放射線に対して概ね次の性能を得ることができる。

< X 線 (32 keV) >

相互作用確率が高い（全体の 95% が完全に止まる）。

< 線 (662 keV) >

相互作用確率が低い（全体の 97% が相互作用せずに透過する）。

【0128】

また、遮蔽容器 25 を 1 mm 厚の SUS としたことで、放射線に対して概ね次の性能を得ることができる。

< X 線 ( $^{137}\text{Cs}$  - 32 keV) >

相互作用確率が高い（全体の 98% が完全に止まる）。

< 線 ( $^{137}\text{Cs}$  - 662 keV) >

相互作用確率が低い（全体の 94% が相互作用せずに透過する）。

【0129】

また、方向制御駆動部 11 と方向制御部 40 により、放射性物質検出装置 2 とカメラ 12 を常に同じ方向に向けることができる。制御駆動または手動によってカメラ 12 を放射性物質検出装置 2 と共に撮像範囲が隣り合うように順次方向変更し、各方向での撮像画像と二次元画像の合成画像を画像合成部 45 で並べて配置し結合すれば、撮像範囲や検出範囲よりも広いパノラマ状の合成画像を得ることもできる。

【0130】

なお、方向制御駆動部 11 と方向制御部 40 は、コンピュータ 10 の制御によって駆動する構成としたが、手動によって駆動する構成としてもよい。この場合、方向制御駆動部 11 と方向制御部 40 を備えずに、電気信号を利用しない機械的な方向固定器具を用い、計測している方向を入力装置 13 で入力する構成とすることができる。この場合でも、単素子モジュールで構成された放射線源位置可視化システム 1 を用いて合成画像を作成し表示することができる。

【実施例 2】

【0131】

図 9 (A) は、実施例 2 の放射性物質検出装置 2A の縦断面図を示す。この放射性物質

検出装置 2 A は、コリメータ 2 1 の前面側（放射線検出用素子 2 6 に対して光電子増倍管 2 7 の反対側）に、フィルタ 2 9 が設けられている。フィルタ 2 9 は、特性 X 線に対する感度を向上させるべくノイズを抑制するフィルタであればよく、例えば 線を遮断するアクリル板とすることができる。具体的には、例えば厚み 6 mm で、放射線検出用素子 2 6 と同じ面積である直径 5 0 mm の円盤状のアクリル板を用いることができる。

放射性物質検出装置 2 A の他の構成要素は、実施例 1 と同一であるので、同一要素に同一符号を付して、その詳細な説明を省略する。

【 0 1 3 2 】

このようにフィルタ 2 9 を用いることにより、ノイズを除去して特性 X 線の感度を向上させることができる。特にアクリル板を用いた場合には、ノイズになりやすい 線を遮断でき、特性 X 線に対する感度をより向上させることができる。

【 0 1 3 3 】

なお、フィルタ 2 9 は 1 枚に限らず、多種類のものを複数枚備えてもよい。

また、フィルタ 2 9 として、特性 X 線と 線を遮断するものを用いてもよい。この場合、例えば 1 mm 厚で放射線検出用素子 2 6 と同じ面積である直径 5 0 mm の円盤状の S U S 板を用いることができる。このように特性 X 線をも遮蔽するフィルタ 2 9 を用いる場合は、フィルタ 2 9 を装着した状態での計測結果と、フィルタ 2 9 を取り外した状態での計測結果の差分を取ることで、ノイズを除去して特性 X 線のピークを強調することができる。すなわち、フィルタ 2 9 が装着された状態での計測結果は、 線によるノイズを中心に計測できるため、フィルタ 2 9 が外された状態の計測結果と差分をとることで、特性 X 線のみを強調することができる。

【 実施例 3 】

【 0 1 3 4 】

図 9 ( B ) は、放射線検出用素子 2 6 にシンチレータではなく半導体を用いた場合の放射性物質検出装置 2 B を示す縦断面図である。図示するように、放射線検出用素子 2 6 B を遮蔽容器 2 5 B で被覆し、遮蔽容器 2 5 B の前面（開口部）にコリメータ 2 1 を装着する。

【 0 1 3 5 】

放射線検出用素子 2 6 B は、C d T e 等の半導体により構成されている。

放射線検出用素子 2 6 B は、高圧電源 9（図 4 参照）と前置増幅器 3（図 4 参照）に接続され、また方向制御装置 1 1 により方向が制御される。

【 0 1 3 6 】

その他の構成要素は、実施例 1 と同一であるので、同一要素に同一符号を付してその詳細な説明を省略する。

このように構成しても、実施例 1 と同様の作用効果を得ることができる。

また実施例 1 と異なり、実施例 3 では光電子増倍管等の蛍光板を読みだす装置が不要となるため、遮蔽体をさらにコンパクトにすることができる。

【 実施例 4 】

【 0 1 3 7 】

図 1 0 は、実施例 4 の放射線源位置可視化システム 1 C のシステム構成を示すブロック図である。この放射線源位置可視化システム 1 C は、多素子モジュールの例を示している。

【 0 1 3 8 】

放射性物質検出装置 2 C は、1 つの遮蔽容器 2 5 C の中に、1 対の放射線検出用素子 2 6 および光電子増倍管 2 7 が、放射線検出用素子 2 6 の検出面が一平面上に並ぶように複数配置されている。

コリメータ 2 1 C（前方板）は、 線を十分に透過しつつ特性 X 線は十分に遮蔽できる厚みをもった薄い材質に中央付近の一か所に穴 2 2 C が設けられたピンホールコリメータである。

【 0 1 3 9 】

コリメータ 21C の厚み (有効厚) は、計測対象とする放射性物質の特性 X 線のコリメータ 21C の物質中の平均自由行程 ( $\mu_5$ ) を単位として  $1.6 \mu_5$  以上で、かつ、計測対象とする放射性物質が最も高い割合で放出する X 線のコリメータ 21C の物質中での平均自由行程 ( $\mu_6$ ) を単位として  $0.22 \mu_6$  以下の範囲に形成されている。これにより、重量を軽減しつつも、特性 X 線に対する感度を向上させることができる。

【0140】

複数の光電子増倍管 27 には、1 つずつに高圧電源 9、前置増幅器 3、および波形整形アンプ 4 が接続されている。波形整形アンプ 4 の後段には、ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6、マルチプレクサ 7 が設けられ、信号を切り替えて全ての波形整形アンプ 4 からの信号を処理する。また、マルチプレクサ 7 を用いずに、ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 のそれぞれに個別の ADC (ADC 8 に相当) を設け、それぞれの ADC からの出力をコンピュータ 10 へ送る方式としても良い。

【0141】

放射性物質検出装置 2C は、実施例 1 と異なり、方向制御駆動部 11 (図 4 参照) および方向制御部 40 (図 6 参照) を備えていない。そして、カメラ 12 の撮像範囲と放射性物質検出装置 2C による検出範囲が一致しており、放射性物質検出装置 2C の検出範囲内がマトリクス状に分割され、1 つのマスキに 1 つの放射線検出用素子 26 および光電子増倍管 27 の検出範囲が対応している。画像合成部 45 (図 6 参照) は、1 つの撮像画像に、各マスキの二次元画像を合成することで、合成画像を作成する。

【0142】

その他の構成要素は、実施例 1 と同一であるので、同一要素に同一符号を付してその詳細な説明を省略する。

【0143】

このように構成しても、実施例 1 と同様の作用効果を得ることができる。

また、多素子モジュールとすることで、放射性物質からの特性 X 線がどの方向から到来しているかを 1 回の処理で検出することができる。すなわち、どの放射線検出用素子 26 から検出しているかにより、検出した放射線検出用素子 26 の前面から穴 22C を繋ぐ直線方向から、検出した放射線検出用素子 26 の大きさと穴 22C の大きさで決まる範囲の放射線を検出したことを特定できる。

【0144】

なお、実施例 1 と同様に方向制御駆動部 11 および方向制御部 40 を備えてもよい。この場合は、撮像範囲や検出範囲よりも広いパノラマ状の合成画像を得ることもできる。

また、放射性物質検出装置 2C は、コリメータ 21C を、所望の配列で複数の穴 22C が形成されたコーデットマスク型コリメータ (前方板) としてもよい。この場合のコーデットマスク型コリメータの穴の配列等は、文献「New family of binary arrays for coded aperture imaging」(APPLIED OPTICS, Vol. 28, No. 20, 15 October 1989, 4344 - 4352, Stephen R. Gottesman and E. E. Fenimore) に記載されるような配列等とするとよい。

【実施例 5】

【0145】

図 11 は、実施例 5 の放射線源位置可視化システム 1D のシステム構成を示すブロック図である。この放射線源位置可視化システム 1D は、多素子モジュールの例を示している。

【0146】

放射線源位置可視化システム 1D は、複数の放射性物質検出装置 2 を備えており、それぞれが異なる方向を向くように固定されている。各放射性物質検出装置 2 の後段には、前置増幅器 3、波形整形アンプ 4、およびピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 が 1 つずつ設けられている。ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 の後段には、マルチプレクサ 7 が設けられ、信号を切り替えて全ての波形整形アンプ 4 から

の信号を処理する。また、マルチプレクサ 7 を用いずに、ピークホールド回路あるいはサンプルホールド回路 6 のそれぞれに個別の A D C ( A D C 8 に相当) を設け、それぞれの A D C からの出力をコンピュータ 1 0 へ送る方式としても良い。

【 0 1 4 7 】

その他の構成要素は、実施例 1 と同一であるので、同一要素に同一符号を付してその詳細な説明を省略する。

【 0 1 4 8 】

このように構成しても、実施例 1 と同様の作用効果を得ることができる。さらに、このように多素子モジュールとすることで、放射性物質からの特性 X 線がどの方向から到来しているかを 1 回の処理で検出することができる。すなわち、どの放射性物質検出装置 2 から検出しているかを知ることにより、検出した放射性物質検出装置 2 の前方から放射線を検出したことを特定できる。

【 0 1 4 9 】

なお、このように複数の放射性物質検出装置 2 を備えて、一部の放射性物質検出装置 2 に実施例 2 で説明した特性 X 線と 線を遮断するフィルタ 2 9 ( 図 9 ( A ) 参照) を備える構成としてもよい。

【 0 1 5 0 】

この場合、フィルタ 2 9 を装着した放射性物質検出装置 2 で 線によるノイズ成分を検出し、フィルタ 2 9 を装着していない放射性物質検出装置 2 で特性 X 線と 線によるノイズ成分とを検出して、差分をとって特性 X 線を精度よく検出することを短時間に実施できる。つまり、フィルタ 2 9 を装着して計測する作業と取り外して計測する作業を行わずとも、一度に両方の計測を行って検出を完了することができる。

【 0 1 5 1 】

この発明は、上述の実施形態の構成のみに限定されるものではなく、多くの実施の形態を得ることができる。

例えば、放射線検出用素子 2 6 は、シンチレータや半導体を用いたが、それ以外にも、冷却機器により冷却された半導体等を用いることもできる。

また、遮蔽容器の素材は、S U S に限らず、真鍮または鉛を含む物質等、特性 X 線を遮蔽する適宜の物質を用いることができる。

【 0 1 5 2 】

また、放射性物質検出装置 2 , 2 A , 2 B , 2 C や、放射線源位置可視化システム 1 , 1 C , 1 D は、放射性物質による汚染を検出する汚染検出装置として用いることもできる。

【 0 1 5 3 】

また、各放射性物質検出装置 2 , 2 A , 2 B , 2 C は、コリメータを用いずに遮蔽容器 2 5 , 2 5 B , 2 5 C によって測定しようとする特定方向を定める構成としてもよい。この場合でも、遮蔽容器 2 5 , 2 5 B , 2 5 C によって遮られない特定方向の放射性物質を検出し、放射性物質の種類を識別することができる。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 1 5 4 】

この発明は、 線と特性 X 線を放出する放射性物質が存在する方向とその放射性物質の量を測定する用途に利用でき、他にも放射性物質を検出する様々な用途で利用できる。

【 符号の説明 】

【 0 1 5 5 】

1 , 1 C , 1 D ... 放射線源位置可視化システム

2 , 2 A , 2 B , 2 C ... 放射性物質検出装置

1 2 ... カメラ

1 4 ... モニタ

2 2 ... 穴

2 3 ... 間部

- 2 5 , 2 5 C ... 遮蔽容器
- 2 5 b ... 側壁
- 2 6 ... 放射線検出用素子
- 2 6 a ... 有感部分
- 4 4 ... 二次元画像作成部
- 4 5 ... 画像合成部
- Y ... 特定方向

## 【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2013/000114
<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> G01T1/29(2006.01) i, G01T1/167(2006.01) i, G01T7/00(2006.01) i  According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01T1/29, G01T1/167, G01T7/00  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 1996-2013 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2013 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2013  Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2008-96401 A (Toshiba Corp.), 24 April 2008 (24.04.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 2001-208856 A (Ion Kasokuki Kabushiki Kaisha), 03 August 2001 (03.08.2001), entire text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 2010-101663 A (Japan Atomic Energy Agency), 06 May 2010 (06.05.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-10
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> 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 27 March, 2013 (27.03.13)		Date of mailing of the international search report 09 April, 2013 (09.04.13)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/000114

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 7-209493 A (Toshiba Corp.), 11 August 1995 (11.08.1995), entire text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 11-64529 A (Aloka Co., Ltd.), 05 March 1999 (05.03.1999), entire text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 2011-524532 A (Commissariat Energie Atomique et Aux Eng Alt), 01 September 2011 (01.09.2011), entire text; all drawings & US 2011/0170778 A1 & EP 2288939 A & WO 2009/153229 A1 & FR 2932573 A & FR 2932573 A1 & CN 102057299 A & RU 2011101463 A	1-10
A	JP 2004-85250 A (Toshiba Corp.), 18 March 2004 (18.03.2004), entire text; all drawings (Family: none)	1-10

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 3 / 0 0 0 1 1 4									
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01T1/29(2006.01)i, G01T1/167(2006.01)i, 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. G01T1/29, G01T1/167, 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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2013年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2013年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2013年</td> </tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2013年	日本国実用新案登録公報	1996-2013年	日本国登録実用新案公報	1994-2013年
日本国実用新案公報	1922-1996年										
日本国公開実用新案公報	1971-2013年										
日本国実用新案登録公報	1996-2013年										
日本国登録実用新案公報	1994-2013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)											
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	JP 2008-96401 A (株式会社東芝) 2008.04.24, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-10									
A	JP 2001-208856 A (イオン加速器株式会社) 2001.08.03, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-10									
A	JP 2010-101663 A (独立行政法人 日本原子力研究開発機構) 2010.05.06, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-10									
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。		<input type="checkbox"/> 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 27.03.2013		国際調査報告の発送日 09.04.2013									
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) 小川 亮	21   3006								
		電話番号 03-3581-1101	内線 3273								



国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 3 / 0 0 0 1 1 4
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	JP 7-209493 A (株式会社東芝) 1995.08.11, 全文,全図 (ファミリーなし)	1-10
A	JP 11-64529 A (アロカ株式会社) 1999.03.05, 全文,全図 (ファミリーなし)	1-10
A	JP 2011-524532 A (コミッサリア ア レネルジー アトミック エ オ ゼネルジ ザルタナテイヴ) 2011.09.01, 全文,全図 & US 2011/0170778 A1 & EP 2288939 A & WO 2009/153229 A1 & FR 2932573 A & FR 2932573 A1 & CN 102057299 A & RU 2011101463 A	1-10
A	JP 2004-85250 A (株式会社東芝) 2004.03.18, 全文,全図 (ファミリーなし)	1-10

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(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), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), 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, 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, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC

(72)発明者 白川 芳幸

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

Fターム(参考) 2G188 AA10 AA23 BB03 BB15 BB17 BB18 CC21 CC29 DD06 DD10  
DD11 DD18 DD30 EE25 FF02 GG01 GG02 GG04 GG06

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。