

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6191957号  
(P6191957)

(45) 発行日 平成29年9月6日(2017.9.6)

(24) 登録日 平成29年8月18日(2017.8.18)

(51) Int. Cl. F I  
**GO 1 T 1/20 (2006.01)**  
 GO 1 T 1/20 L  
 GO 1 T 1/20 E  
 GO 1 T 1/20 G

請求項の数 2 (全 15 頁)

|  |   |
|--|---|
| <p>(21) 出願番号 特願2013-212844 (P2013-212844)</p> <p>(22) 出願日 平成25年10月10日 (2013.10.10)</p> <p>(65) 公開番号 特開2015-75424 (P2015-75424A)</p> <p>(43) 公開日 平成27年4月20日 (2015.4.20)</p> <p>審査請求日 平成28年9月28日 (2016.9.28)</p> <p>(出願人による申告) 独立行政法人科学技術振興機構、<br/>             先端計測分析技術・機器開発プログラム、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願</p> | <p>(73) 特許権者 899000068<br/>                 学校法人早稲田大学<br/>                 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地</p> <p>(73) 特許権者 000236436<br/>                 浜松ホトニクス株式会社<br/>                 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1</p> <p>(74) 代理人 100088155<br/>                 弁理士 長谷川 芳樹</p> <p>(74) 代理人 100113435<br/>                 弁理士 黒木 義樹</p> <p>(74) 代理人 100124291<br/>                 弁理士 石田 悟</p> <p>(74) 代理人 100110582<br/>                 弁理士 柴田 昌聰</p> |
|--|---|

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 コンプトンカメラ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

入射した放射線をコンプトン散乱させる散乱体を含み、その散乱体での放射線のコンプトン散乱を検出する散乱検出部と、

前記散乱体でコンプトン散乱して入射した放射線を吸収する吸収体を含み、その吸収体での放射線の吸収を検出する吸収検出部と、

前記散乱検出部における放射線のコンプトン散乱および前記吸収検出部における放射線の吸収の同時検出事象に基づいて放射線源の画像を求める信号処理部と、

前記散乱検出部と前記吸収検出部との間に設けられ、前記散乱体でコンプトン散乱した放射線（以下「前方散乱放射線」という。）、および、前記散乱体を散乱・吸収されることがなく通過した後に前記吸収体でコンプトン散乱した放射線（以下「後方散乱放射線」という。）のうち、前記前方散乱放射線を選択的に通過させ、前記後方散乱放射線を選択的に遮断する第1シールド部と、

を備えることを特徴とするコンプトンカメラ。

【請求項2】

前記散乱検出部と前記第1シールド部との間に設けられ、前記第1シールド部への放射線の入射によって発生したX線を遮断する第2シールド部を更に備えることを特徴とする請求項1に記載のコンプトンカメラ。

【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、コンプトンカメラに関するものである。

## 【背景技術】

## 【0002】

コンプトンカメラは、入射した放射線（主にガンマ線）のコンプトン散乱を検出する散乱検出部と、この散乱検出部でコンプトン散乱して入射した放射線の吸収を検出する吸収検出部とを備え、放射線のコンプトン散乱および吸収を同時検出する。そして、コンプトンカメラは、複数の同時検出事象について、散乱検出部において放射線がコンプトン散乱した位置、散乱検出部において放射線がコンプトン散乱した際に放射線が失ったエネルギー、吸収検出部において放射線が吸収された位置、および、吸収検出部において放射線が吸収された際に放射線が失ったエネルギーを求め、これらに基づいて放射線源の画像を取得することができる。

10

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0003】

【特許文献1】特開2005-208057号公報

【特許文献2】特開2011-85418号公報

【特許文献3】特許第4352122号公報

## 【発明の概要】

20

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0004】

従来コンプトンカメラにより取得される放射線源の画像は、ノイズの影響により、正しい位置での像が不明瞭となる、あるいは誤った位置に放射線源が存在することを示す場合がある。特に、放射線のエネルギーが大きい場合にノイズの影響が大きい。本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、ノイズを低減することができるコンプトンカメラ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】

## 【0005】

本発明のコンプトンカメラは、(1) 入射した放射線をコンプトン散乱させる散乱体を含み、その散乱体での放射線のコンプトン散乱を検出する散乱検出部と、(2) 散乱体でコンプトン散乱して入射した放射線を吸収する吸収体を含み、その吸収体での放射線の吸収を検出する吸収検出部と、(3) 散乱検出部における放射線のコンプトン散乱および吸収検出部における放射線の吸収の同時検出事象に基づいて放射線源の画像を求める信号処理部と、(4) 散乱検出部と吸収検出部との間に設けられ、散乱体でコンプトン散乱した放射線（以下「前方散乱放射線」という。）、および、散乱体を散乱・吸収されることなく通過した後に吸収体でコンプトン散乱した放射線（以下「後方散乱放射線」という。）のうち、前方散乱放射線を選択的に通過させ、後方散乱放射線を選択的に遮断する第1シールド部と、を備えることを特徴とする。また、本発明のコンプトンカメラは、散乱検出部と第1シールド部との間に設けられ、第1シールド部への放射線の入射によって発生したX線を遮断する第2シールド部を更に備えるのが好適である。

30

40

## 【発明の効果】

## 【0006】

本発明によれば、コンプトンカメラにより取得される放射線源の画像におけるノイズを低減することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0007】

【図1】前方散乱事象および後方散乱事象を説明する図である。

【図2】第1実施形態のコンプトンカメラ1の構成を示す図である。

【図3】信号処理部30における放射線源90の画像を求める処理を説明する斜視図であ

50

る。

【図4】第2実施形態のコンプトンカメラ2の構成を示す図である。

【図5】第2実施形態における散乱体13の第1構成例を説明する斜視図である。

【図6】第2実施形態における散乱体13の第2構成例を説明する斜視図である。

【図7】第3実施形態のコンプトンカメラ3の構成を示す図である。

【図8】第1シミュレーション結果を示す図である。

【図9】第2シミュレーション結果を示す図である。

【図10】第3シミュレーション結果を示す図である。

【図11】第4シミュレーション結果を示す図である。

【図12】第5シミュレーション結果を示す図である。

10

【発明を実施するための形態】

【0008】

以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一または同等の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面には説明の便宜の為にx y z直交座標系が示されている。

【0009】

初めに、コンプトンカメラにより取得される放射線源の画像におけるノイズの要因について説明する。放射線がコンプトンカメラに入射した場合、前方散乱事象だけでなく、後方散乱事象も生じる場合がある。図1は、前方散乱事象および後方散乱事象を説明する図である。

20

【0010】

前方散乱事象は、同図(a)に示されるように、或る放射線源91で発生した放射線が散乱検出部の散乱体13の位置P1においてコンプトン散乱し、そのコンプトン散乱した放射線が吸収検出部の吸収体23の位置P2において吸収される事象である。これに対して、後方散乱事象は、同図(b)に示されるように、或る放射線源92で発生した放射線が散乱体13を散乱・吸収されることなく通過した後、その放射線が吸収体23の位置P2においてコンプトン散乱し、そのコンプトン散乱した放射線が散乱体13の位置P1において吸収される事象である。どちらも散乱体13および吸収体23において失われたエネルギー損失は同等であり、吸収体23におけるエネルギー損失の方が大きい。つまり、エネルギー損失の値のみからは二つの事象を区別することが出来ない。

30

【0011】

そこで、通常のコンプトンカメラは、収集した複数の同時検出事象の全てが前方散乱事象であるとの仮定の下に所定の演算処理を行って放射線源の画像を取得する。収集した複数の同時検出事象に後方散乱事象が含まれている場合、コンプトンカメラは、その後方散乱事象も前方散乱事象として扱って所定の解析を行って放射線源の画像を取得する。すなわち、コンプトンカメラは、同図(c)に示されるように、実際には放射線源92で発生した放射線の後方散乱事象であるにも拘らず、実際とは異なる位置の放射線源91で発生した放射線の前方散乱事象として扱って、所定の解析を行って放射線源の画像を取得する。その結果、取得された放射線源の画像は、誤った位置に放射線源が存在することを示すことになる。

40

【0012】

放射線のエネルギーが小さい場合には、同時検出事象の中で前方散乱事象が支配的である。しかし、放射線のエネルギーが大きい場合には、後方散乱事象の頻度が大きくなって、ノイズの寄与が相対的に大きくなる。例えば、137Csから発生するエネルギー662keVの放射線や、134Csから発生するエネルギー605keVまたは796keVの放射線は、散乱体13を散乱・吸収されることなく通過し易いので、後方散乱事象を生じ易い。

【0013】

同時検出事象が前方散乱事象および後方散乱事象の何れであるかを識別して後方散乱事象の影響を低減するために、散乱体13および吸収体23それぞれにおける反応(散乱ま

50

たは吸収)の時刻の前後関係を検出することが考えられる。しかし、散乱体13と吸収体23との間の距離が数cmであるような小型のコンプトンカメラの場合、散乱体13および吸収体23それぞれにおける反応の時刻の差は $1 \times 10^{-10}$ 秒程度である。散乱体13および吸収体23それぞれにおける反応の時刻の前後関係を検出することは、極めて困難であり、現実的でない。

【0014】

以下に説明する本実施形態のコンプトンカメラは、簡易な構成で後方散乱事象を選択的に低減することができて、画質が改善された放射線源画像を取得することができる。

【0015】

図2は、第1実施形態のコンプトンカメラ1の構成を示す図である。コンプトンカメラ1は、散乱検出部10、吸収検出部20、信号処理部30、第1シールド部41および第2シールド部42を備え、放射線源90の画像を求めることができる。散乱検出部10は、放射線源90から放出された放射線(例えばガンマ線)が入射すると、その入射した放射線のコンプトン散乱を検出する。吸収検出部20は、散乱検出部10でコンプトン散乱した放射線が入射すると、その入射した放射線の吸収を検出する。信号処理部30は、散乱検出部10における放射線のコンプトン散乱および吸収検出部20における放射線の吸収の同時検出事象に基づいて放射線源90の画像を求める。第1シールド部41および第2シールド部42は、散乱検出部10と吸収検出部20との間に設けられている。

【0016】

散乱検出部10は、受光部12および散乱体13を含む。散乱体13は、直方体形状を有するシンチレータからなり、各辺がx方向、y方向およびz方向の何れに平行である。散乱体13は、放射線のコンプトン散乱に応じてシンチレーション光を発生させる。受光部12は、xy平面に平行な受光面を有し、散乱体13から出力されたシンチレーション光を受光する。受光部12は、受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部30へ出力する。受光部12の受光面上における受光位置(受光の重心位置)は、散乱体13において放射線がコンプトン散乱した位置P1に相当する。受光部12の受光強度は、散乱体13において放射線がコンプトン散乱した際に放射線が失ったエネルギーE1に相当する。

【0017】

吸収検出部20は、受光部22および吸収体23を含む。吸収体23は、直方体形状を有するシンチレータからなり、各辺がx方向、y方向およびz方向の何れに平行である。吸収体23は、放射線の吸収に応じてシンチレーション光を発生させる。受光部22は、xy平面に平行な受光面を有し、吸収体23から出力されたシンチレーション光を受光する。受光部22は、受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部30へ出力する。受光部22の受光面上における受光位置(受光の重心位置)は、吸収体23において放射線が吸収された位置P2に相当する。受光部22の受光強度は、吸収体23において放射線が吸収された際に放射線が失ったエネルギーE2に相当する。

【0018】

散乱体13および吸収体23を構成するシンチレータとして、例えば、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)、Ceがドープされた $\text{Lu}_2\text{SiO}_5$ (Ce:LSO)、 $\text{Lu}_{2(1-x)}\text{Y}_{2x}\text{SiO}_5$ (LYSO)、 $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ (GSO)、Prがドープされた $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Pr:LuAG)、Ceがドープされた $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (Ce:GAGG)等が用いられる。

【0019】

受光部12、22として、高感度の半導体光検出素子が用いられるのが好適であり、中でも浜松ホトニクス株式会社製のMPPC(登録商標)またはMPPCアレイが用いられるのが好適である。MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)は、ガイガーモードで動作するアバランシェフォトダイオードにクエンチング抵抗が接続されたものを1つのピクセルとして、複数のピクセルが2次元配列されたものである。アバランシェフォトダイオードは、逆電圧が印加されると、光電流を増倍することができ、高速・高感度の光検出

10

20

30

40

50

をすることができる。アバランシェフォトダイオードの逆電圧が降伏電圧以上に設定されると、内部電界が非常に高くなり、増倍率が格段に大きくなる。このような状態でのアバランシェフォトダイオードの動作はガイガーモードと呼ばれる。MPPCは、フォトンカウンティングが可能である。MPPCは、2次元配列された複数のピクセルの受光量の総和を表す電気信号を出力することができる。このようなMPPCを受光部に用いる場合、例えば複数のMPPCを2次元配列し、4つの出力端子と各MPPCの出力とを抵抗器を介して接続し、各MPPCからの電気信号を最終的に出力端子から出力する。これら4つの出力端子から出力される電気信号の値の比は、光入射面への光の入射位置に応じたものとなり、また、これら4つの出力端子から出力される電気信号の値の和は、光強度に応じたものとなる。

10

**【0020】**

受光部12, 22として、位置検出型の光電子増倍管が用いられるのも好適であり、その中でもマルチアノード型の光電子増倍管が用いられるのが好適である。マルチアノード型の光電子増倍管は、例えば、2次元配列された複数のアノードと、各アノードに対応したアノード端子とを備え、各アノード端子と4つの出力端子とが抵抗を介して接続されていて、各アノードからの電気信号を最終的に4つの出力端子から出力する。これら4つの出力端子から出力される電気信号の値の比は、光入射面への光の入射位置に応じたものとなり、また、これら4つの出力端子から出力される電気信号の値の和は、光強度に応じたものとなる。

**【0021】**

20

本実施形態では、受光部12は、検出体13と吸収体23との間の狭い領域に配置されているので、光電子増倍管と比べて小型である半導体光検出素子が用いられるのが好ましい。

**【0022】**

第1シールド部41は、散乱検出部10と吸収検出部20との間に設けられている板状部材である。第1シールド部41には、散乱体13でコンプトン散乱した放射線(すなわち、前方散乱によって生じた前方散乱放射線)が入射するだけでなく、散乱体13を散乱・吸収されることなく通過した後に吸収体23でコンプトン散乱した放射線(すなわち、後方散乱によって生じた後方散乱放射線)も入射する。前方散乱の際の散乱角より後方散乱の際の散乱角が大きいため、前方散乱放射線のエネルギーより後方散乱放射線のエネルギーが小さい。第1シールド部41は、このような前方散乱放射線および後方散乱放射線それぞれのエネルギーの大小関係に基づいて、高エネルギーの前方散乱放射線を選択的に通過させ、低エネルギーの後方散乱放射線を選択的に遮断する。このように、後方散乱放射線を選択的に遮断する第1シールド部41を設けることで、コンプトンカメラ1により取得される放射線源の画像におけるノイズを低減することができる。

30

**【0023】**

第1シールド部41は、後方散乱放射線を選択的に遮断する際に、その材料に固有の特性X線を放出する場合がある。このX線がノイズとなることを回避するために第2シールド部42が設けられている。第2シールド部42は、散乱検出部10と第1シールド部41との間に設けられた板状部材であり、第1シールド部41への後方散乱放射線の入射によって発生したX線を遮断する。

40

**【0024】**

シンチレータからなる散乱体13および吸収体23それぞれから、K殻エネルギーに相当する特性X線(50keV程度)が発生する場合があります。このX線もノイズの要因となる。第1シールド部41および第2シールド部42を設けることで、このX線の影響をも排除することができる。

**【0025】**

第1シールド部41の材料および厚みは、放射線源90から放出される放射線のエネルギーの大きさに応じて適切に設定される。また、第2シールド部42の材料および厚みは、第1シールド部41で発生するX線のエネルギーの大きさに応じて適切に設定される。

50

例えば、第1シールド部41の材料として、錫(Sn)、鉛(Pb)およびタングステン(W)等が採用され得る。第2シールド部42の材料として銅(Cu)等が採用され得る。第1シールド部41および第2シールド部42それぞれの厚みは1mm以下から数mm程度の範囲である。

【0026】

例えば、放射線源90から放出される放射線のエネルギーEが662keVであり、散乱体13において放射線がコンプトン散乱した際に放射線が失うエネルギーE1が200keV程度であり、吸収体23において放射線が吸収された際に放射線が失うエネルギーE2が460keV程度である場合を想定する。このような場合、第1シールド部41として錫からなる3mm厚の板状部材が採用され、第2シールド部42として銅からなる1

10

【0027】

錫からなる3mm厚の第1シールド部41は、エネルギー460keV程度の前方散乱放射線の80%以上を通過させることができ、エネルギー200keV程度の後方散乱放射線の50%以上を遮断することができる。このように、第1シールド部41は、前方散乱放射線を選択的に通過させ、後方散乱放射線を選択的に遮断することができる。

【0028】

また、このような錫からなる第1シールド部41は、エネルギー200keV程度の後方散乱放射線を遮断する一方で、エネルギー30keV程度の特徴X線を放出する場合がある。銅からなる1mm厚の第2シールド部42は、このエネルギー30keV程度のX

20

【0029】

信号処理部30は、散乱検出部10の受光部12から出力された電気信号を入力するとともに、吸収検出部20の受光部22から出力された電気信号をも入力して、これらの電気信号に基づいて放射線源90の画像を求める。

【0030】

図3は、信号処理部30における放射線源90の画像を求める処理を説明する斜視図である。信号処理部30は、受光部12, 22それぞれから出力された電気信号に基づいて、散乱体13において放射線がコンプトン散乱した位置P1、散乱体13において放射線がコンプトン散乱した際に放射線が失ったエネルギーE1、吸収体23において放射線が

30

吸収された位置P2、および、吸収体23において放射線が吸収された際に放射線が失ったエネルギーE2を求めることができる。

【0031】

放射線源90から放出される放射線のエネルギーをEとする。コンプトン散乱の際の散乱角を $\theta$ とする。電子の静止質量をmとし、真空中での光速をcとする。これらのパラメータの間には以下の式で表される関係がある。この関係式からコンプトン散乱角 $\theta$ を求めることができる。そして、散乱位置P1と吸収位置P2とを互いに結ぶ直線を中心軸とし、散乱位置P1を頂点として、中心軸と母線とがなす角が $\theta$ である円錐を想定すると、その円錐面上に放射線源90が存在することがわかる。信号処理部30は、複数の同時検出事象それぞれについて上記のような円錐面を求めて、これらに基づいて放射線源90の画像を求める。

40

【0032】

$$E = E_1 + E_2$$

$$\cos \theta = 1 + m c^2 (1 / E - 1 / E_2)$$

【0033】

本実施形態のコンプトンカメラ1では、複数の同時検出事象に含まれる後方散乱事象の割合は第1シールド部41の作用により低減されているので、信号処理部30により取得された放射線源90の画像はノイズが低減されたものとなる。

【0034】

次に、第2実施形態のコンプトンカメラ2について説明する。図4は、第2実施形態の

50

コンプトンカメラ 2 の構成を示す図である。コンプトンカメラ 2 は、散乱検出部 10 , 吸収検出部 20 , 信号処理部 30 , 第 1 シールド部 41 および第 2 シールド部 42 を備える。図 2 に示された第 1 実施形態のコンプトンカメラ 1 の構成と比較すると、図 4 に示される第 2 実施形態のコンプトンカメラ 2 は、散乱検出部 10 および吸収検出部 20 それぞれの構成が相違しており、この相違に伴って信号処理部 30 の処理内容も相違している。以下では、第 1 実施形態との相違点について主に説明する。

【 0035】

散乱検出部 10 は、受光部 11、受光部 12 および散乱体 13 を含む。散乱体 13 は、シンチレータブロックであって、放射線のコンプトン散乱に応じてシンチレーション光を発生させ、 $-z$  方向および  $+z$  方向に選択的にシンチレーション光を伝搬させて外部へ出力する。散乱体 13 は、シンチレーション光発生位置によって  $-z$  方向および  $+z$  方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なる。散乱体 13 は、直方体形状を有し、各辺が  $x$  方向、 $y$  方向および  $z$  方向の何れに平行である。散乱体 13 におけるシンチレーション光発生位置は、放射線がコンプトン散乱した位置 P1 に相当する。散乱体 13 におけるシンチレーション光発生強度は、放射線がコンプトン散乱した際に放射線が失ったエネルギー E1 に相当する。

10

【 0036】

受光部 11、12 は、 $xy$  平面に平行な受光面を有する。受光部 11 は、散乱体 13 の  $-z$  方向の側に設けられ、散乱体 13 の  $-z$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 30 へ出力する。受光部 12 は、散乱体 13 の  $+z$  方向の側に設けられ、散乱体 13 の  $+z$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 30 へ出力する。

20

【 0037】

吸収検出部 20 は、受光部 21、受光部 22 および吸収体 23 を含む。吸収体 23 は、シンチレータブロックであって、放射線の吸収に応じてシンチレーション光を発生させ、 $-z$  方向および  $+z$  方向に選択的にシンチレーション光を伝搬させて外部へ出力する。吸収体 23 は、シンチレーション光発生位置によって  $-z$  方向および  $+z$  方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なる。吸収体 23 は、直方体形状を有し、各辺が  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の何れに平行である。吸収体 23 におけるシンチレーション光発生位置は、放射線が吸収された位置 P2 に相当する。吸収体 23 におけるシンチレーション光発生強度は、放射線が吸収された際に放射線が失ったエネルギー E2 に相当する。

30

【 0038】

受光部 21、22 は、 $xy$  平面に平行な受光面を有する。受光部 21 は、吸収体 23 の  $-z$  方向の側に設けられ、吸収体 23 の  $-z$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 30 へ出力する。受光部 22 は、吸収体 23 の  $+z$  方向の側に設けられ、吸収体 23 の  $+z$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 30 へ出力する。

【 0039】

受光部 11、12、21、22 として、高感度の半導体光検出素子が用いられるのが好適であり、その中でも浜松ホトニクス株式会社製の MPPC (登録商標) または MPPC アレイが用いられるのが好適である。また、受光部 11、12、21、22 として、位置検出型の光電子増倍管が用いられるのも好適であり、その中でもマルチアノード型の光電子増倍管が用いられるのが好適である。

40

【 0040】

本実施形態では、受光部 12、21 は、散乱体 13 と吸収体 23 との間の狭い領域に配置されているので、光電子増倍管と比べて小型である半導体光検出素子が用いられるのが好ましい。また、受光部 11 および受光部 12 は同じタイプのものが用いられるのが好ましく、受光部 21 および受光部 22 は同じタイプのものが用いられるのが好ましい。

50

## 【 0 0 4 1 】

第2実施形態における信号処理部30は、第1実施形態の場合と略同様である。ただし、散乱体13、吸収体23においてシンチレーション光発生位置によって-z方向および+z方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なるので、信号処理部30は、このことを利用して、x方向およびy方向だけでなくz方向についても位置P1、P2を求めることができる。

## 【 0 0 4 2 】

図5は、第2実施形態における散乱体13の第1構成例を説明する斜視図である。吸収体23についても同様であるが、ここでは散乱体13について説明する。散乱体13は、3次元的に集合された複数のシンチレータセル131を含むシンチレータブロックである。同図では、計180個の同一形状を有するシンチレータセル131が、x方向に6行、y方向に5列、z方向に6層に集合されている。散乱体13は、隣接する2つのシンチレータセル131の間に設定された光学条件によって、-z方向および+z方向に選択的にシンチレーション光を伝搬させることができ、シンチレーション光発生位置によって-z方向および+z方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なる。

## 【 0 0 4 3 】

より具体的な例として、x方向に隣接する2つのシンチレータセル131の間に反射材132が挿入され、y方向に隣接する2つのシンチレータセル131の間にも反射材132が挿入され、z方向に隣接する2つのシンチレータセル131の間に空気層133が挿入される。また、散乱体13の6面のうち、受光部11、12に対向しない4面にも反射材が設けられている。反射材132は例えばBaSO<sub>4</sub>からなる。反射材132がシンチレーション光を完全に反射させるとすれば、或るシンチレータセル131において放射線のコンプトン散乱に応じて発生したシンチレーション光は、±x方向または±y方向に隣接するシンチレータセル131へ伝搬することなく、-z方向または+z方向に隣接するシンチレータセル131のみへ伝搬していき、-z方向または+z方向の外部へ出力される。また、シンチレーション光は、-z方向または+z方向に伝搬する際に途中にある空気層133によって一部が反射され残部が透過する。したがって、シンチレーション光発生位置によって-z方向および+z方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なる。これによりz方向でも十分高い位置分解能が得られる。

## 【 0 0 4 4 】

反射材132は、シンチレーション光を完全に反射させるものでなくてもよいが、反射率が高いのが好ましい。反射材132が一部のシンチレーション光を透過させる場合には、-z方向または+z方向の外部へ出力されるシンチレーション光は拡がることになるが、受光部11、12の受光面上における受光強度分布の重心位置を求めればよい。また、空気層133に替えて他の材料からなる層が挿入されていてもよい。

## 【 0 0 4 5 】

図6は、第2実施形態における散乱体13の第2構成例を説明する斜視図である。吸収体23についても同様であるが、ここでも散乱体13について説明する。散乱体13は、内部に多数の改質領域134が形成されているシンチレータブロックである。改質領域134は、レーザ光の集光点がアモルファス化することで形成され、周囲の屈折率と異なる屈折率を有する。改質領域134は、離散的に形成されてもよいし、一定範囲に亘って連続的に形成されてもよい。改質領域134を形成する際に用いられるレーザ光源としては、短パルスレーザ光を発生するNd:YAGレーザ、Yb:YAGレーザ、Nd:YVO<sub>4</sub>レーザ、Nd:YLFレーザ、Yb:KGWレーザおよびチタンサファイアレーザ等が用いられる。

## 【 0 0 4 6 】

また、改質領域134を起点として破断領域が形成されてもよい。破断領域の形成は、応力、曲げ応力、せん断応力、熱応力を加えることで可能である。改質領域の形成または破断領域の形成に先立って、散乱体13の外表面をシート状の保持部材で覆っておくのが好ましく、これにより、破断領域の形成後でも散乱体13の一体化が維持される。また、

10

20

30

40

50



散乱体 1 3 の 6 面のうち、受光部 1 1 , 1 2 に対向しない 4 面に反射材が設けられている。このようにして作製される散乱体 1 3 は、適切な位置に形成された改質領域 1 3 4 または破断領域によって、 $-z$  方向および  $+z$  方向に選択的にシンチレーション光を伝搬させることができ、シンチレーション光発生位置によって  $-z$  方向および  $+z$  方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なる。この構成例では、 $-z$  方向または  $+z$  方向の外部へ出力されるシンチレーション光は拡がることになるが、受光部 1 1 , 1 2 の受光面上における受光強度分布の重心位置を求めることにより、 $x$  方向、 $y$  方向において高い位置分解能が得られる。

#### 【 0 0 4 7 】

本実施形態のコンプトンカメラ 2 は、散乱体 1 3 , 吸収体 2 3 を用いて放射線のコンプトン散乱または吸収を検出するので、入射した放射線（例えばガンマ線）の入射位置を 3 次元的に捉えることが可能となり、高解像度でありながら、安価に製造することができ、小型化可能である。このコンプトンカメラ 2 はフィールドでも好適に使用され得る。

10

#### 【 0 0 4 8 】

次に、第 3 実施形態のコンプトンカメラ 3 について説明する。図 7 は、第 3 実施形態のコンプトンカメラ 3 の構成を示す図である。コンプトンカメラ 3 は、散乱検出部 1 0 , 吸収検出部 2 0 , 信号処理部 3 0 , 第 1 シールド部 4 1 および第 2 シールド部 4 2 を備える。図 4 に示された第 2 実施形態のコンプトンカメラ 2 の構成と比較すると、図 7 に示される第 3 実施形態のコンプトンカメラ 3 は、散乱検出部 1 0 および吸収検出部 2 0 それぞれの方位の点で相違している。以下では、第 2 実施形態との相違点について主に説明する。

20

#### 【 0 0 4 9 】

散乱検出部 1 0 の散乱体 1 3 は、放射線のコンプトン散乱に応じてシンチレーション光を発生させ、 $-x$  方向および  $+x$  方向に選択的にシンチレーション光を伝搬させて外部へ出力する。散乱体 1 3 は、シンチレーション光発生位置によって  $-x$  方向および  $+x$  方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なる。これにより  $x$  方向において十分高い位置分解能が得られる。

#### 【 0 0 5 0 】

受光部 1 1 , 1 2 は、 $yz$  平面に平行な受光面を有する。受光部 1 1 は、散乱体 1 3 の  $-x$  方向の側に設けられ、散乱体 1 3 の  $-x$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 3 0 へ出力する。受光部 1 2 は、散乱体 1 3 の  $+x$  方向の側に設けられ、散乱体 1 3 の  $+x$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 3 0 へ出力する。

30

#### 【 0 0 5 1 】

吸収検出部 2 0 はの吸収体 2 3 は、放射線の吸収に応じてシンチレーション光を発生させ、 $-x$  方向および  $+x$  方向に選択的にシンチレーション光を伝搬させて外部へ出力する。吸収体 2 3 は、シンチレーション光発生位置によって  $-x$  方向および  $+x$  方向それぞれのシンチレーション光外部出力強度の比が異なる。これにより  $x$  方向において十分高い位置分解能が得られる。

#### 【 0 0 5 2 】

40

受光部 2 1 , 2 2 は、 $yz$  平面に平行な受光面を有する。受光部 2 1 は、吸収体 2 3 の  $-x$  方向の側に設けられ、吸収体 2 3 の  $-x$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 3 0 へ出力する。受光部 2 2 は、吸収体 2 3 の  $+x$  方向の側に設けられ、吸収体 2 3 の  $+x$  方向の外部に出力されたシンチレーション光を受光面上に受光し、その受光面上における受光位置および受光強度を表す電気信号を信号処理部 3 0 へ出力する。

#### 【 0 0 5 3 】

本実施形態では、受光部 1 1 , 1 2 , 2 1 , 2 2 は、散乱体 1 3 と吸収体 2 3 との間の狭い領域と異なる広い領域に配置されているので、高感度の光電子増倍管が好適に用いられ得る。散乱体 1 3 , 吸収体 2 3 の  $z$  方向のサイズより  $x$  方向のサイズが大きいとすると

50

、第2実施形態の場合と比較して本実施形態では、散乱体13, 吸収体23から $\pm x$ 方向の外部へ出力されるシンチレーション光の強度が小さくなる場合があるが、受光部11, 12, 21, 22として高感度の光電子増倍管を用いることができるので、散乱位置P1、吸収位置P2および放射線喪失エネルギーE1, E2を高感度に測定することができる。本実施形態のコンプトンカメラ3は、第2実施形態の場合と同様の効果を奏することができる。

【0054】

次に、図8～図12を用いて、第1シールド部41および第2シールド部42それぞれによる画質改善の効果を確認する為に行ったシミュレーションの結果について説明する。これらのシミュレーションでは、図2に示された第1実施形態のコンプトンカメラ1の構成が採用され、エネルギー662keVを放出する放射線源が想定された。

10

【0055】

図8は、第1シミュレーション結果を示す図である。第1シミュレーションでは、放射線源は、コンプトンカメラ1の光軸(z軸)となす角度が70°である方向(視野端部)であってコンプトンカメラ1からの距離が50cmである位置に存在するとされた。第1シールド部41として錫からなる3mm厚の板状部材が採用され、第2シールド部42として銅からなる1mm厚の板状部材が採用された。同図の画像の横軸および縦軸それぞれの範囲が-1～+1とされており、画像の中心位置(0,0)からの距離rと上記角度との間に $r = 2 \sin(\theta / 2)$ なる関係がある。

【0056】

20

同図(a)は、第1シールド部41および第2シールド部42の双方が設けられなかった場合の画像を示す。この画像では、後方散乱事象を前方散乱事象として扱って処理したこと(順序誤認)に因るゴーストが、放射線源90の本来の位置より中心側に現れている。これに対して、同図(b)は、第1シールド部41および第2シールド部42の双方が設けられた場合の画像を示す。この画像では、後方散乱事象の影響が低減されて、上記のようなゴーストが殆ど認められず、画質が改善されている。

【0057】

以下に示す第2～第5のシミュレーション結果の各画像(図9～図12)は、図8に示すような画像において中心位置(0,0)および放射線源存在位置を通る直線上における強度分布を、ピーク値を1として規格化して示すものである。

30

【0058】

第2および第3のシミュレーションは、第1シールド部41(錫)で発生するX線が画像に与える影響を調べる為に行われた。図9は、第2シミュレーション結果を示す図である。第2シミュレーションでは、放射線源は、コンプトンカメラ1の光軸上(視野中心)であってコンプトンカメラ1からの距離が50cmである位置に存在するとされた。また、図10は、第3シミュレーション結果を示す図である。第3シミュレーションでは、放射線源は、コンプトンカメラ1の光軸(z軸)となす角度が70°である方向(視野端部)であってコンプトンカメラ1からの距離が50cmである位置に存在するとされた。

【0059】

第2および第3のシミュレーションは、以下の第1～第3のケースそれぞれで行われた。第1ケースでは、第1シールド部41および第2シールド部42の双方が設けられなかった。第2ケースでは、第1シールド部41(錫、3mm厚)のみが設けられた。この第2ケースでは、200keVの後方散乱放射線を約52%遮断することができ、シンチレータで発生する50keVのX線をほぼ完全に遮断することができる。第3ケースでは、第1シールド部41(錫、2.4mm厚)および第2シールド部42(銅、1mm厚)が設けられた。この第3ケースでは、200keVの後方散乱放射線を約52%遮断することができ、第1シールド部41(錫)で発生する30keVのX線を第2シールド部42のみでほぼ完全に遮断することができる。

40

【0060】

第2および第3のシミュレーション結果によると、第1シールド部41が設けられなか

50

った第1ケースと比べて、第1シールド部41が設けられた第2および第3のケースでは、画質改善の効果が認められる。また、放射線源が視野中心に存在する場合と比べて、放射線源が視野端部に存在する場合の方が、画質改善の効果が大きい。

【0061】

第4および第5のシミュレーションは、特性X線が発生しないとして、後方散乱放射線が画像に与える影響を調べる為に行われた。図11は、第4シミュレーション結果を示す図である。第4シミュレーションでは、放射線源は、コンプトンカメラ1の光軸上(視野中心)であってコンプトンカメラ1からの距離が50cmである位置に存在するとされた。また、図12は、第5シミュレーション結果を示す図である。第5シミュレーションでは、放射線源は、コンプトンカメラ1の光軸(z軸)となす角度が70°である方向(視野端部)であってコンプトンカメラ1からの距離が50cmである位置に存在するとされた。

10

【0062】

第4および第5のシミュレーションは、以下の第1～第3のケースそれぞれで行われた。第1～第3のケースの何れでも第2シールド部42は設けられなかった。第1ケースでは、第1シールド部41も設けられなかった。この第1ケースでは、後方散乱放射線を全く遮断することができない。第2ケースでは、第1シールド部41(錫、1mm厚)が設けられた。この第2ケースでは、200keVの後方散乱放射線を約21%遮断することができる。第3ケースでは、第1シールド部41(錫、3mm厚)が設けられた。この第3ケースでは、200keVの後方散乱放射線を約52%遮断することができる。

20

【0063】

第4および第5のシミュレーション結果によると、第1シールド部41の厚みが大きいほど、画質改善の効果が大きいことが認められる。また、放射線源が視野中心に存在する場合と比べて、放射線源が視野端部に存在する場合の方が、画質改善の効果が大きい。

【0064】

本発明は、上記実施形態に限定されるものではなく、種々の変形が可能である。例えば、第1シールド部41および第2シールド部42それぞれの材料として様々なものが採用され得る。散乱検出部10および吸収検出部20それぞれとして、特許文献1～3に記載されたもの等の任意の態様のものが用いられ得る。散乱検出部10および吸収検出部20それぞれの方位は、上記実施形態の場合と異なってもよい。

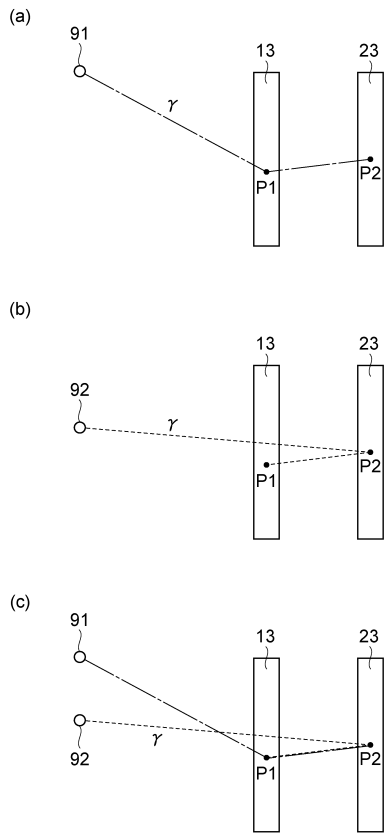
30

【符号の説明】

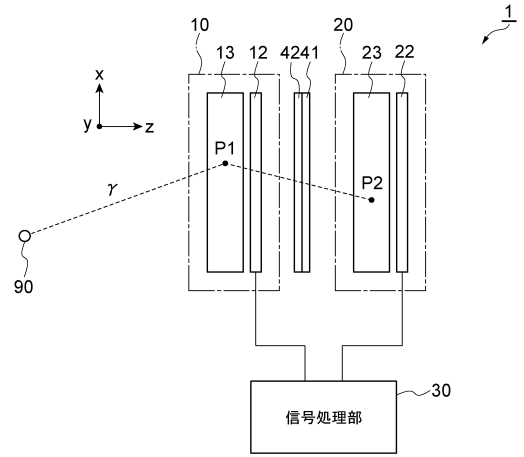
【0065】

1～3...コンプトンカメラ、10...散乱検出部、11...受光部、12...受光部、13...散乱体、20...吸収検出部、21...受光部、22...受光部、23...吸収体、30...信号処理部、41...第1シールド部、42...第2シールド部、90～92...放射線源。

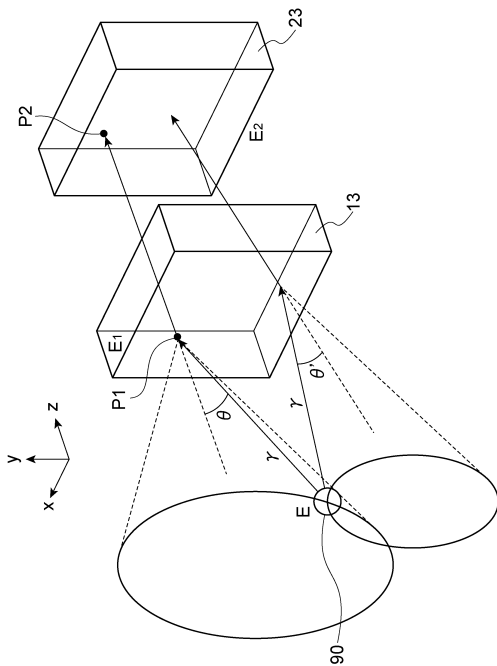
【図 1】



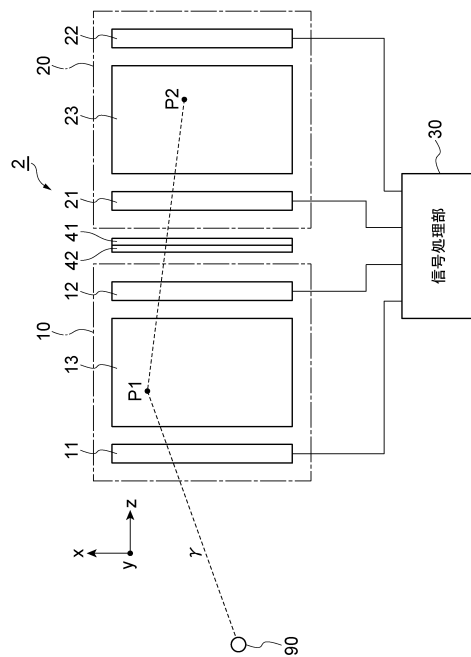
【図 2】



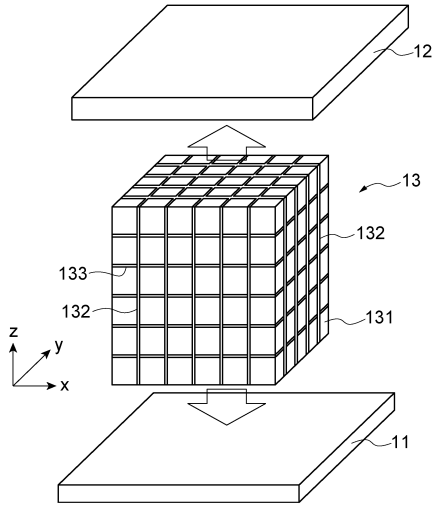
【図 3】



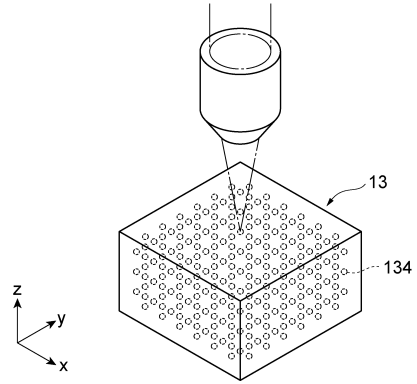
【図 4】



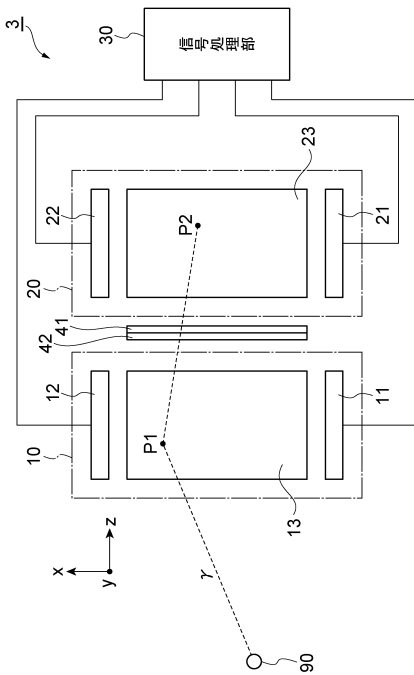
【 図 5 】



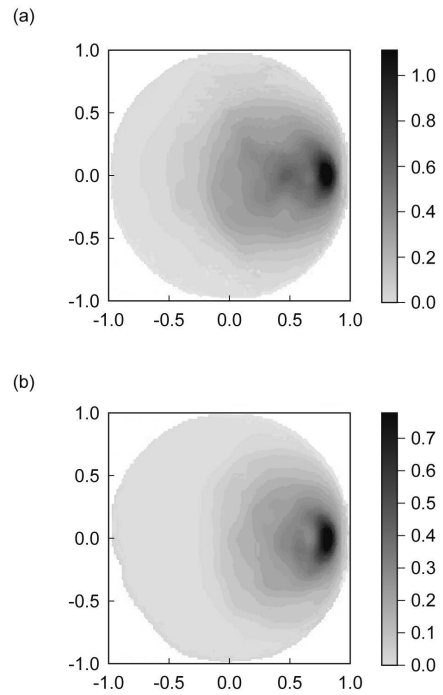
【 図 6 】



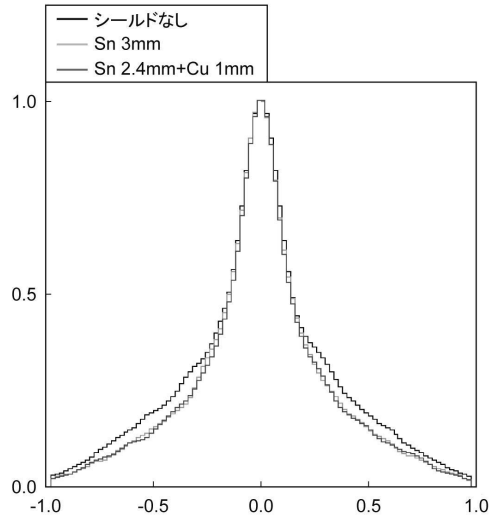
【 図 7 】



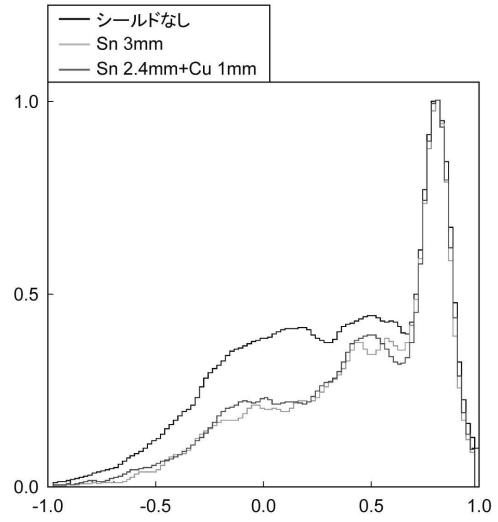
【 図 8 】



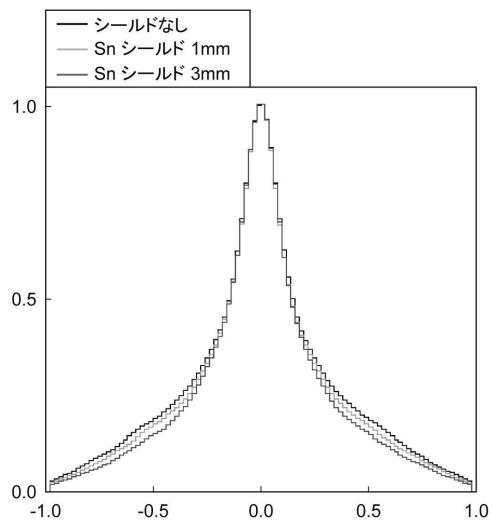
【 図 9 】



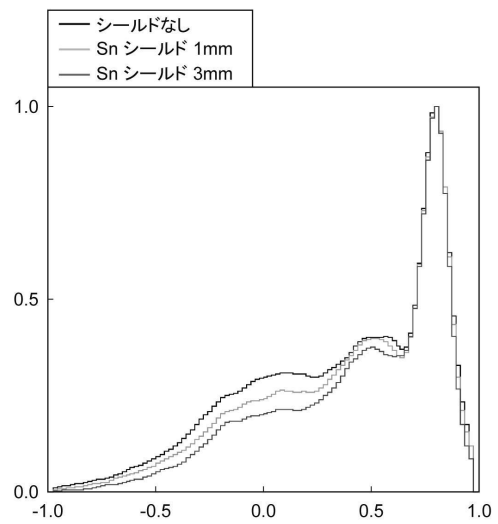
【 図 10 】



【 図 11 】



【 図 12 】



## フロントページの続き

- (72)発明者 片岡 淳  
東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学校法人早稲田大学内
- (72)発明者 西山 徹  
東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学校法人早稲田大学内
- (72)発明者 大須賀 慎二  
静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 平柳 通人  
静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 足立 俊介  
静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 内山 徹也  
静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内

審査官 藤本 加代子

- (56)参考文献 特開平9-101371(JP,A)  
特開2005-208057(JP,A)  
放射性物質の除染作業を効率化するガンマ線撮像用コンプトンカメラを製品化, 浜松ホトニクス株式会社 プレスリリース, 日本, 浜松ホトニクス株式会社, 2013年 9月10日, URL  
, [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/news/2013\\_09\\_10.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/news/2013_09_10.pdf)

## (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01T 1/00 - 1/16  
G01T 1/167 - 7/12  
A61B 6/00 - 6/14  
JSTPlus(JDreamIII)