



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104040374 B

(45)授权公告日 2016.11.16

(21)申请号 201380005310.6

(22)申请日 2013.01.12

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104040374 A

(43)申请公布日 2014.09.10

(30)优先权数据

2012-005699 2012.01.13 JP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2014.07.11

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2013/000114 2013.01.12

(87)PCT国际申请的公布数据

W02013/105519 JA 2013.07.18

(73)专利权人 国立研究开发法人量子科学技术  
研究开发机构

地址 日本千叶县

(72)发明人 小林进悟 内堀幸夫 白川芳幸

(74)专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

代理人 李辉 黄纶伟

(51)Int.Cl.

G01T 1/29(2006.01)

G01T 1/167(2006.01)

G01T 7/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 201569748 U, 2010.09.01,

CN 101329283 A, 2008.12.24,

US 4345153 A, 1982.08.17,

US 2009114825 A1, 2009.05.07,

JP 2006058174 A, 2006.03.02,

US 2005012044 A1, 2005.01.20,

JP 2003014854 A, 2003.01.15, (续)

审查员 张煜欣

### (54)发明名称

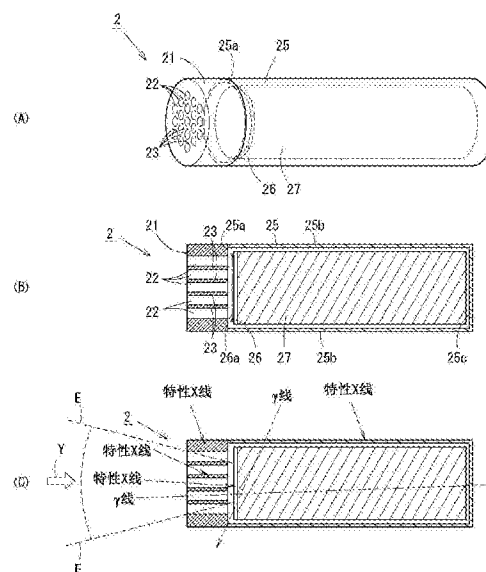
放射性物质检测装置、放射线源位置可视化  
系统和放射性物质检测方法

### (57)摘要

一种对放出存在于特定方向(Y)的 $\gamma$ 线和特性X线的放射性物质进行检测的放射性物质检测装置(2),其具有:放射线检测用元件(26),其阻挡并检测入射的放射线;屏蔽容器(25),其屏蔽放射线,使放射线不会到达所述放射线检测用元件(26);以及准直器(21),所述放射线检测用元件(26)的厚度为如下厚度:阻挡并检测从存在于所述特定方向(Y)上的放射性物质到来的特性X线,并使从所述放射性物质到来的 $\gamma$ 线透过的厚度,所述屏蔽容器(25)和准直器(21)的孔(22)与孔(22)之间的部分(23)的厚度为如下厚度:屏蔽从所述特定方向(Y)以外的方向到来的放射线中的特性X线,并使从所述特定方向(Y)以外的方向到来的放射线中的 $\gamma$ 线透过的厚度。由此,能够

权利要求书2页 说明书21页 附图12页

提供重量特别轻、且获得足够的性能的放射性物质检测装置、放射线源位置可视化系统和放射性物质检测方法。



[转续页]

[接上页]

**(56)对比文件**

D S Joshi et al. Estimation of radiation source term and concrete shield thickness for low energy particle accelerators.《Indian Journal of Pure & Applied Physics》.2010,第48卷

A.N. Sudarkin et al. Portable gamma-ray imager and its application for the inspection of the near-reactor premises

contaminated by radioactive substances.

《Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A》.1998,第414卷

李金保等.四种类型医用X 线诊断摄影屏蔽室防护效果的调查.《中国自然医学杂志》.2007,第9卷(第6期),

刘显坤等.高能射线及其屏蔽材料.《核电子学与探测技术》.2006,第26卷(第6期),

1. 一种放射性物质检测装置,其检测存在于特定方向上的放射性物质,该放射性物质检测装置具有:

放射线检测用元件,其具有如下厚度:阻挡并检测从存在于所述特定方向上且放出 $\gamma$ 线和特性X线这双方的放射性物质到来的特性X线,且使从所述放射性物质到来的 $\gamma$ 线透过;以及

屏蔽体,其具有如下厚度:屏蔽从所述特定方向以外的方向到来的放射线中的特性X线,且使从所述特定方向以外的方向到来的放射线中的 $\gamma$ 线透过。

2. 根据权利要求1所述的放射性物质检测装置,其中,

所述放射性物质检测装置具有峰值输出部,该峰值输出部输出由所述放射线检测用元件检测出的特性X线的峰值。

3. 根据权利要求2所述的放射性物质检测装置,其中,

所述放射线检测用元件针对所述特性X线的峰值周边的能谱,测量20keV~40keV的范围内的至少一部分。

4. 根据权利要求1、2或3所述的放射性物质检测装置,其中,

所述放射线检测用元件的对于特性X线的入射方向的有感部分的厚度形成为:以作为检测对象的放射性物质的特性X线在所述放射线检测用元件所使用的物质中的平均自由行程 $\lambda_1$ 为单位时,处于 $1.1\lambda_1$ 以上的范围内,而且,以作为检测对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在所述放射线检测用元件所使用的物质中的平均自由行程 $\lambda_2$ 为单位时,处于 $0.14\lambda_2$ 以下的范围内。

5. 根据权利要求1、2或3所述的放射性物质检测装置,其中,

所述屏蔽体的厚度形成为:以作为检测对象的放射性物质的特性X线在屏蔽体物质中的平均自由行程 $\lambda_3$ 为单位时,处于 $1.6\lambda_3$ 以上的范围内,而且,以作为检测对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在屏蔽体物质中的平均自由行程 $\lambda_4$ 为单位时,处于 $0.22\lambda_4$ 以下的范围内。

6. 根据权利要求5所述的放射性物质检测装置,其中,

所述屏蔽体由屏蔽所述放射线检测用元件的周围的屏蔽容器、或者设置在所述放射线检测用元件的检测对象侧的准直器构成、或者由它们双方构成,

在所述屏蔽体是由多个孔构成的多孔准直器的情况下,所述屏蔽体的厚度是指孔与孔之间的部分的厚度,

在所述屏蔽体为仅具有1个孔的单孔准直器的情况下,所述屏蔽体的厚度是指孔的侧壁的厚度,

如果所述屏蔽体是具有1个孔、且在后方设置有多数放射线检测用元件的针孔准直器,则所述屏蔽体的厚度是指设置有孔的所述针孔准直器的厚度,

如果所述屏蔽体是具有多个孔且在后方设置有多数放射线检测用元件的编码掩模型准直器,则所述屏蔽体的厚度是指设置有孔的所述编码掩模型准直器的厚度,

在所述屏蔽体是所述屏蔽容器的情况下,所述屏蔽体的厚度是指至少位于所述放射线检测用元件的侧面的侧壁的厚度。

7. 根据权利要求1、2或3所述的放射性物质检测装置,其中,

所述放射性物质检测装置具有:

存储部,其存储有所述特性X线的峰值的分析中使用的样板;

分析部,其使用所述样板和由所述放射线检测用元件测量的能谱,对所述特性X线的峰值进行分析,

所述样板是如下数据:处于与所述特性X线区域的能量相比高能量侧的60keV-250keV内,且具有比所述特性X线的峰值强的峰值部分。

8.根据权利要求1、2或3所述的放射性物质检测装置,其中,

所述放射性物质检测装置执行如下候选确定处理:使用由所述放射线检测用元件检测出的能谱中的 $\gamma$ 线区域的能谱,确定放射性物质的种类的候选,

使 $\gamma$ 线透过是指,在入射的 $\gamma$ 线中,透过的 $\gamma$ 线多于相互作用的 $\gamma$ 线,

所述放射性物质检测装置具有执行如下的种类识别处理的放射性物质识别部,该种类识别处理是如下的处理:使用由所述放射线检测用元件检测出的能谱中的特性X线区域的能谱,识别出在所述能谱内是否存在由所述候选确定处理确定的放射性物质,从而识别出特定方向的放射性物质的种类。

9.一种放射线源位置可视化系统,其中,

所述放射线源位置可视化系统具有多个权利要求1、2或3所述的放射性物质检测装置,

所述放射线源位置可视化系统具有:

照相机,其对所述特定方向进行拍摄,取得拍摄图像;

二维图像化部,其针对每一检测区域,将基于多个所述放射性物质检测装置分别检测出的放射性物质而得到的放射性物质的量转换为二维图像;

合成部,其对所述拍摄图像与所述二维图像进行位置对应之后进行合成,生成合成图像;以及

显示部,其显示所述合成图像。

10.一种放射性物质检测方法,其中,

所述放射性物质检测方法使用权利要求1、2或3所述的放射性物质检测装置,

测量特性X线的峰值周边的能谱,

根据所述能谱,至少识别出所述放射性物质的存在。

## 放射性物质检测装置、放射线源位置可视化系统和放射性物质检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及例如对放出 $\gamma$ 线和特性X线这双方的放射性物质进行检测的放射性物质检测装置、放射线源位置可视化系统和放射性物质检测方法。

### 背景技术

[0002] 以往,在原子能发电站、核燃料/使用完的核燃料处理设施、原子能紧急状况时等、放射线会从各个方向到来的环境中,会使用对放射性物质所在位置进行确认的伽玛相机。作为这样的伽玛相机,提出了放射线测量装置(参照专利文献1)。

[0003] 该放射线测量装置具有:多孔准直器,其具有多个使从放射性物质放出的 $\gamma$ 线中的规定方向成分透过的孔;荧光板,其将通过了多孔准直器的 $\gamma$ 线转换为可视光;以及屏蔽容器,其覆盖所述多孔准直器和荧光板,来降低放射线噪声。并且,该放射线测量装置将 $\gamma$ 线图像与由其它照相机拍摄到的图像进行合成。这样,针对测量对象物,放射线测量装置能够捕捉到内部的放射性物质的状态、尺寸、形状、位置来作为放射线图像。

[0004] 但是,这样的放射线测量装置要检测从放射性物质放出的 $\gamma$ 线,因此存在变得非常重的问题。具体而言,在放射线会从各个方向到来的环境中,为了掌握 $\gamma$ 线的到来方向,屏蔽容器需要屏蔽从其它方向到来的 $\gamma$ 线。为了屏蔽 $\gamma$ 线,屏蔽容器需要使用很厚的铅。此外,荧光板为了检测 $\gamma$ 线,需要足够的厚度和高密度,以使 $\gamma$ 线不会透过。

[0005] 例如,图12示出了在检测从 $^{137}\text{Cs}$ 放出的能量为662keV的 $\gamma$ 线来掌握其到来方向的情况下,设置在光电倍增管27的前部的荧光板126和覆盖它们的屏蔽容器125。即,在以98%的效率来屏蔽所述 $\gamma$ 线的情况下,如果使用比重为11.3的铅,则屏蔽容器125为34mm左右的厚度。在荧光板126使用比重为3.7的NaI(直径50mm)作为材料的情况下,即使仅以8%的效率来检测所述 $\gamma$ 线,也会达到10mm左右的厚度。这样,在假设放射线测量装置102是利用具有一个使规定方向成分透过的孔的单孔准直器121将视野设为 $\pm 22^\circ$ 、并以利用长度为65mm的光电倍增管来读出 $\gamma$ 线的荧光板的发光的方式来制作的情况下,仅屏蔽容器125和荧光板126的重量就达到25kg左右,因此,对运输而言变得很重。

[0006] 如果使构成屏蔽容器的铅变薄或者使荧光板变薄,则放射线测量装置变得轻量化。但是,这样变轻的放射线测量装置具有精度明显降低这样的问题。即,放射线测量装置在使屏蔽容器的铅变薄时,会检测到从规定方向以外到来的 $\gamma$ 线,在使荧光板变薄时, $\gamma$ 线的透过量会增大而使灵敏度降低。因此,在想对放出 $\gamma$ 线的放射性物质进行检测时,由于灵敏度的关系,在使屏蔽容器变薄上存在极限,在使荧光板变薄上也存在极限。

[0007] 现有技术文献

[0008] 专利文献

[0009] 专利文献1:日本特开2004-85250号公报

### 发明内容

[0010] 发明要解决的问题

[0011] 本发明是鉴于上述问题而完成的,目的在于提供一种能够在放射线会从各个方向到来的环境中使用、且重量特别轻、而且可得到足够的性能的放射性物质检测装置、放射线源位置可视化系统和放射性物质检测方法。

[0012] 用于解决问题的手段

[0013] 本发明是一种放射性物质检测装置,其在放射线会从各个方向到来的环境中,检测存在于特定方向的放射性物质,其特征在于,该放射性物质检测装置具有:放射线检测用元件,其具有如下厚度:阻挡并检测从存在于所述特定方向且放出 $\gamma$ 线和特性X线这双方的放射性物质到来的特性X线,并使从所述放射性物质到来的 $\gamma$ 线透过;以及屏蔽体,其具有如下厚度:屏蔽从所述特定方向以外的方向到来的放射线中的特性X线,并使从所述特定方向以外的方向到来的放射线中的 $\gamma$ 线透过。

[0014] 发明效果

[0015] 根据本发明,能够提供一种能够在放射线会从各个方向到来的环境中使用、且重量特别轻、而且可得到足够的性能的放射性物质检测装置、放射线源位置可视化系统和放射性物质检测方法。

## 附图说明

[0016] 图1是示出放射线检测用元件的厚度和性能的曲线图的说明图。

[0017] 图2是说明与屏蔽容器的厚度的变化对应的屏蔽、透过、背景噪声的变化的说明图。

[0018] 图3是在识别放射性物质的种类时使用的放射性物质的能量谱的说明图。

[0019] 图4是示出放射线源位置可视化系统的系统结构的框图。

[0020] 图5是说明放射性物质检测装置的结构说明图。

[0021] 图6是示出计算机的功能的功能框图。

[0022] 图7是示出放射线源位置可视化系统的检测结果的曲线图的说明图。

[0023] 图8是放射线源位置可视化系统的成像图像的画面结构图。

[0024] 图9是示出实施例2、3的放射性物质检测装置的纵截面的说明图。

[0025] 图10是实施例4的放射线源位置可视化系统的框图。

[0026] 图11是实施例5的放射线源位置可视化系统的框图。

[0027] 图12是示出现有的放射线测量装置的纵剖视图。

## 具体实施方式

[0028] 在放射性物质的检测中,通常,优选检测从这些放射性物质放出的 $\gamma$ 线。这是因为,由于 $\gamma$ 线具有高能量,从放射线测量设备的信号处理电路中的信噪比的观点来看,容易进行测量,而且,通常,在放出 $\gamma$ 线的环境中,在高能量的 $\gamma$ 线区域中,背景噪声低且放射性物质的每1次裂变会放出大量 $\gamma$ 线。但是,在使伽玛相机轻量化时,如果使屏蔽容器变薄时,则会使 $\gamma$ 线透过而使方向性的灵敏度变差,如果使放射线检测用元件变薄,则会产生 $\gamma$ 线的检测灵敏度下降的问题。

[0029] 本发明人为了使检测放射性物质的伽玛相机轻量化,进行了深入研究。首先,通过

使用轻量化且小型化但 $\gamma$ 线的检测灵敏度高的材质作为 $\gamma$ 线检测元件,由此, $\gamma$ 线检测元件变得紧凑,减轻了作为屏蔽体的屏蔽容器和准直器的铅的重量,从而实现了伽玛相机的轻量化。但是,在该方法中,不能将屏蔽体大幅轻量化为例如现有的18分之1以下等。

[0030] 因此,本发明人除了着眼于从放射性物质放出的 $\gamma$ 线以外,还着眼于由存在于放射性物质周边的通常的物质使所述 $\gamma$ 线发生散射而产生的能量(主要为200keV前后的能量区域)。而且,研究了如下情况:通过将该能量区域的散射 $\gamma$ 线也包含在内而测量所述 $\gamma$ 线,提高 $\gamma$ 线的计数率,由此使 $\gamma$ 线检测元件变得紧凑。由此,可以进一步增加伽玛相机的灵敏度,从而能够减轻作为屏蔽体的屏蔽容器和准直器的铅的重量。但是,实际上,散射 $\gamma$ 线的强度随着周边存在的物质的配置而发生变化,在该方法中,存在不能很好地测定出放射性物质的量这样的问题。此外,即使使用该方法,也不能实现变为现有的18分之1以下等、屏蔽体的大幅度的轻量化。

[0031] 本发明人进一步反复进行深入研究,从而着眼于放射性物质产生的特性X线。进而,本发明人尝试通过检测其特性X线,来检测放射性物质的存在。通常,与 $\gamma$ 线相比,特性X线的放出概率低且能量低,因而难以测量,此前未被注意。本发明人为了检测特性X线,将放射性物质检测装置的信号处理电路设为能够测定低能量区域的特性X线,而且努力实现低噪声化。但是,存在如下问题:由于 $\gamma$ 线与放射性物质检测装置的散射而产生的高背景噪声,使得不能很好地检测特性X线。

[0032] 因此,本发明人进一步反复进行深入研究,其结果是,通过极力排除 $\gamma$ 线、并使特性X线收敛于焦点来进行检测的结构,成功地利用轻量的装置检测出放射性物质的存在。具体而言,本发明人将放射线检测用元件的厚度设为使 $\gamma$ 线充分透过而能够充分检测出特性X线的厚度,将作为屏蔽体的屏蔽容器和准直器的厚度设为使 $\gamma$ 线充分透过且对特性X线充分屏蔽的厚度。由此,既防止了背景噪声又检测出特性X线,从而成功地利用现有重量的18分之1以下这样的轻量的屏蔽体来检测出放射性物质的存在。此外,使 $\gamma$ 线透过是指,在入射的 $\gamma$ 线中,透过的 $\gamma$ 线多于相互作用的 $\gamma$ 线。此外, $\gamma$ 线充分透过是指 $\gamma$ 线透过80%以上,优选透过87%以上,更优选的是透过92%以上,进一步优选的是透过97%以上。此外,放射线检测用元件的厚度是指与放射线入射到放射线检测用元件的面垂直的方向上的厚度(以下,称作相对于入射方向的厚度)。

[0033] 图1是示出在根据质量数为137的铯(以下 $^{137}\text{Cs}$ )和质量数134的铯(以下 $^{134}\text{Cs}$ )放出的能量为32keV和36keV的特性X线进行检测的情况下,放射线检测用元件的厚度与放射线检测用元件的性能的仿真结果的曲线图。在该仿真中,设想为:当设置在混凝土上的 $^{137}\text{Cs}$ 与 $^{134}\text{Cs}$ 以衰变比为1比0.9的比率而存在的情况下,在存在上述两种铯放出的 $\gamma$ 线和该 $\gamma$ 线被混凝土散射而得到的连续 $\gamma$ 线的环境下,通过特性X线来检测它们。

[0034] 图1(A)示出了放射线检测用元件的厚度的下限值 $R_1$ ,图1(B)示出了放射线检测用元件的厚度的上限值 $R_2$ 。在任意一个曲线图中,横轴表示放射线检测用元件的厚度(由平均自由行程 $\lambda$ 规定),纵轴表示在放射线检测用元件的厚度为10mm时,对特性X线的检测效率(以下,记作 $S$ )的平方与从 $^{134}\text{Cs}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 到来的 $\gamma$ 线给特性X线的能量区域(20-40keV)带来的噪声量( $N$ )之比进行标准化而得到的值(以下,记作 $S^2/N$ )。通常, $S^2/N$ 越大,则表示在越短时间内能够以越高的精度检测出特性X线,即灵敏度越高。此外,在任意一个曲线图中,示出了使用碘化铯(以下,记作 $\text{CsI}$ )、碲化镉(以下,记作 $\text{CdTe}$ )、锗酸铋(以下,记作 $\text{BGO}$ )、碘化钠(以

下,记作NaI)、铋-铝-钙钛矿(以下,记作YAP)作为放射线检测用元件的材料的结果。

[0035] 此外,为了提高发光效率,闪烁体(scintillator)有时会加入微量的活性化物质。例如,CsI不限于不含活性化物质的纯粹的CsI,而可以是添加微量钠(Na)或铊(Tl)作为活性化物质的闪烁体的CsI(Na)、CsI(Tl)。本发明与闪烁体有无活性化物质无关联地成立,因此不特别对活性化物质进行记述。在前述例子中、CsI表示不含活性化物质的CsI和含有活性化物质的CsI(Na)、CsI(Tl)。

[0036] 根据图1(A)的曲线图,可以说放射线检测用元件优选设为特定厚度。即,如图1(A)中作为下限值R1所示那样,以测量对象的放射性物质的特性X线在放射线检测用元件中(物质中)的平均自由行程( $\lambda_1$ )为单位时,放射线检测用元件的厚度(有感部分的厚度)的下限值优选为 $1.1\lambda_1$ 以上。在CsI的情况下,该值成为 $S^2/N$ 的1.5倍的效率的值。

[0037] 如在图1(B)中作为上限值R2所示那样,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在放射线检测用元件中(物质中)的平均自由行程( $\lambda_2$ )为单位时,放射线检测用元件的厚度(有感部分的厚度)的上限值优选为 $0.14\lambda_2$ 以下。在CsI的情况下,该值为 $S^2/N$ 的1.5倍的效率的值。

[0038] 此外,平均自由行程是指,特性X线或 $\gamma$ 线入射到物质中后、到发生相互作用(光电效果、康普顿散射、电子对生成)为止的平均距离(以下相同)。

[0039] 从入射的特性X线与放射线检测用元件相互作用的比例的观点来看,该放射线检测用元件的厚度优选设为作为测量对象的放射性物质所放出的特性X线在入射到检测用元件中时67%以上的特性X线相互作用,更优选为使78%以上的该特性X线相互作用。

[0040] 此外,从 $\gamma$ 线与放射线检测用元件完全不相互作用而透过的比例(以下称为透过率)的观点来看,该放射线检测用元件的厚度优选设为使作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线透过87%以上,更优选使该 $\gamma$ 线透过95%以上。

[0041] 例如,现有的伽玛相机在利用作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线来对放射性物质进行成像的情况下,放射线检测用元件的厚度变得非常厚。即,在假设使用NaI(直径50mm)作为放射线检测用元件来检测从 $^{137}\text{Cs}$ 到来的662keV的 $\gamma$ 线的情况下,为了得到30%的检测效率,现有的伽玛相机需要 $0.81\lambda_2$ 左右的厚度,为了进一步提高检测效率,需要变得更厚。

[0042] 另一方面,在本发明中,能够在放射线检测用元件的厚度为 $0.14\lambda_2$ 以下的情况下进行动作,且能够容易地对特性X线取得80%以上的效率。因此,能够使放射线检测用元件大幅度地轻量化。

[0043] 由准直器确定的每一视野的放射线检测用元件的有感部分的面积(以下,记作有感面积)能够根据入射的特性X线的强度而设为适当的面积。在例如原子能设施等中,在周边对使用完的核燃料物质来进行测量的情况下,由于入射X线的量较多,优选将有感面积设为较小,在在对因原子反应堆事故等产生的放射性沉降物进行测量的情况下,由于入射X线的量较低,优选设为较大的面积来提高灵敏度。

[0044] 为了达成在1分钟的测定时间内30%的统计误差,该有感面积例如可以设为:当在放射线检测用元件CsI的位置处的 $\gamma$ 线的空间线量率低于 $10\mu\text{Sv/h}$ 的环境中进行测量的情况下,优选的是,将有感面积设为至少 $2\text{cm}^2$ 以上,将有效面积设为 $5\text{cm}^2$ 以上,将有效面积设为 $12\text{cm}^2$ 以上、或者将有效面积设为 $96\text{cm}^2$ 以上。



[0045] 此外,例如,当在放射线检测用元件CsI的位置处的 $\gamma$ 线的空间线量率低于 $100\mu\text{Sv/h}$ 环境中进行测量的情况下,优选的是,将有感面积设为至少 $0.3\text{cm}^2$ 以上、将有效面积设为 $1\text{cm}^2$ 以上、将有效面积设为 $5\text{cm}^2$ 以上、将有效面积设为 $12\text{cm}^2$ 以上、将有效面积设为 $96\text{cm}^2$ 以上。

[0046] 同样,当在放射线检测用元件CsI的位置处的空间线量率低于 $X\mu\text{Sv/h}$ 的环境中进行测量的情况下,有感面积优选为至少 $(29 \times X^{-0.98})\text{cm}^2$ 以上(其中, $X > 100\mu\text{Sv/h}$ )。针对其它种类的放射线检测用元件,也需要与CsI相同程度的有感面积。

[0047] 此外,在可以加长测定时间的情况下、或者可以增大统计误差的情况下,可以减小放射线检测用元件的有感面积。此外例示的必要的有感面积是在有效面积为 $16.6\text{cm}^2$ 、厚度为 $1\text{mm}$ 、能量分辨率为 $32\text{keV}$ 的情况下,在所述CsI的位置处的 $\gamma$ 线的空间线量率为 $5\mu\text{Sv/h}$ 和 $16\mu\text{Sv/h}$ 的环境中测量 $10.5\text{keV}$ 的放射线检测用元件CsI的结果而近似地估计出的。

[0048] 图2是说明屏蔽容器的厚度变化导致的各种变化的说明图,图2(A)是示出屏蔽容器的厚度、特性X线的屏蔽率以及 $\gamma$ 线的透过率之间的关系的曲线图。屏蔽容器的厚度是指在一方具有开口而将另一方封闭的容器的壁的厚度。该曲线图是使用不锈钢(以下,记作SUS)作为屏蔽容器的材料而计算出的。此处,屏蔽的对象特性X线是从 $^{137}\text{Cs}$ 的铯放出的 $32\text{keV}$ 的特性X线,透过的对象是从 $^{137}\text{Cs}$ 放出的 $662\text{keV}$ 的 $\gamma$ 线。

[0049] 曲线图的横轴示出了屏蔽容器的厚度。曲线图的纵轴示出了特性X线的屏蔽率和 $\gamma$ 线的透过率。

[0050] 如图所示,屏蔽容器对特性X线的屏蔽级别在屏蔽容器的厚度为 $0.1\text{mm}$ 时是约40%,并随着屏蔽容器厚度的增加而提高,在厚度为 $1\text{mm}$ 处能够屏蔽大致100%(在计算例中,为98%)。

[0051] 另一方面, $\gamma$ 线的透过率在屏蔽容器的厚度为 $10\text{mm}$ 时是约60%,并随着屏蔽容器厚度的减小而提高,在厚度 $2\text{mm}$ 处为约90%。

[0052] 根据该结果可以说,在设材质为SUS的情况下,屏蔽容器的厚度最优选为 $1\text{mm}$ 左右。即,该厚度是如下厚度:能够将 $32\text{keV}$ 的特性X线屏蔽到接近100%(98%),并能够使 $\gamma$ 线透过,从而减轻屏蔽容器的重量。通过设为使 $\gamma$ 线透过而减轻重量、且能够充分屏蔽特性X线的厚度,由此,既能够使屏蔽容器变得极其轻量又能够得到充分的检测精度。

[0053] 换言之,屏蔽容器的厚度优选设为:以作为测量对象的放射性物质的特性X线在屏蔽容器中的平均自由行程( $\lambda_3$ )为单位时,屏蔽容器的厚度为 $1.6\lambda_3$ 以上,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在屏蔽容器中的平均自由行程( $\lambda_4$ )为单位时,屏蔽容器的厚度为 $0.22\lambda_4$ 以下。

[0054] 出于屏蔽特性X线的观点,则屏蔽容器的厚度优选设为将具有 $20\text{keV} \sim 40\text{keV}$ 的能量的特性X线屏蔽80%以上,更优选将该特性X线屏蔽90%以上。

[0055] 此外,出于 $\gamma$ 线的透过率的观点,屏蔽容器的厚度优选设为:使作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线透过80%以上,这在减轻屏蔽容器的重量方面较好,优选使该 $\gamma$ 线透过87%以上,更优选使该 $\gamma$ 线透过92%以上,进一步优选使该 $\gamma$ 线透过97%以上。

[0056] 例如,现有的伽玛相机在利用作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线来对放射性物质进行成像的情况下,为了将从周围到来的 $\gamma$ 线屏蔽98%,需要将屏蔽容器

的厚度设为 $4\lambda_4$ 左右。与此相对,本发明在屏蔽容器的厚度为 $0.22\lambda_4$ 以下时也能够进行动作,因此能够将屏蔽容器大幅轻量化到18分之1以下。通过这样的屏蔽容器的厚度,能够降低屏蔽容器的重量,并能够精确地检测特性X线,从而提供轻量且灵敏度高的放射性物质检测装置。

[0057] 关于通过这样将屏蔽容器的厚度设为 $0.22\lambda_4$ 以下来兼顾屏蔽容器的轻量化和灵敏度提高的情况,使用图2(B),以在屏蔽容器中使用SUS的例子来进行说明。图2(B)是在利用厚度相同的SUS来屏蔽厚度为1mm的放射线检测用元件CsI的两个面、并向单面的SUS照射了从放射线源 $^{137}\text{Cs}$ 到来的662keV的 $\gamma$ 线的情况下,计算SUS的厚度(以662keV的SUS中的平均自由行程 $\lambda_4$ 为单位)与利用CsI检测出的20-40keV的背景噪声量之间的关系而得到的曲线图。该曲线图是在放射线源周围没有任何物体的状态下,屏蔽容器的厚度与背景噪声量之间的关系指标。

[0058] 如该曲线图所示,在SUS的厚度为约 $0.5\lambda_4$ 时,背景噪声极大。因此,与其相比,在将屏蔽容器的厚度设为能够降低背景噪声的程度的较薄的 $0.22\lambda_4$ 以下时,具有轻量化且能够降低背景噪声的效果。具体而言,在屏蔽容器的厚度为 $0.22\lambda_4$ (图示d1)时,在屏蔽容器的厚度为 $1.03\lambda_4$ (图示d2)时,背景噪声能够下降到最大值的87%。即,相对于背景噪声量为极大值的屏蔽容器的厚度,在比其薄的一侧和比其厚的一侧,出现了进行相同量的背景噪声的下降的点(例如d1和d2)。但是,与位于较厚侧的d2的条件相比,位较薄侧的d1的条件能够在相同的背景噪声量的状态下实现约4.7倍轻量化。

[0059] 优选的是,在准直器的设计中应用这样的屏蔽容器的厚度的考虑方法,将准直器的厚度设为特定厚度。

[0060] 通常,准直器在平板状的部件上开有孔,通过将准直器安装在屏蔽容器上而发挥如下作用:利用该孔使从特定方向入射的大部分的放射线等通过,利用孔的周围的部件来排除从特定方向以外入射的大部分的放射线等。换言之,通过准直器来限制视野。在X线或 $\gamma$ 线的情况下,准直器的厚度(有效厚度)是决定准直器的视野的一个参数。此处,特定方向是想要测定的方向,是由准直器和屏蔽容器决定的方向、或者由屏蔽容器决定的方向。

[0061] 此外,在准直器中,有的在准直器的背后设置有1个放射线检测用元件,有的则安装有多个放射线检测用元件。

[0062] 在前者的情况下,存在具有一个孔的单孔准直器(参照图12的单孔准直器121)或具有多个孔的多孔准直器(参照图5的准直器21)等。此处,在单孔准直器或多孔准直器中,有效厚度是指孔的侧壁的厚度。换言之,是指从任意方向到来的放射线入射到准直器部件时,准直器部件在该入射点(其中,不包括入射到准直器的特定方向侧前表面或后表面的情况)处的厚度(特定方向对垂直方向的肉厚)的平均。

[0063] 在后者的情况下,存在后述的针孔准直器或编码掩模型(coded mask type)准直器等。此外,在针孔准直器或编码掩模型准直器中,有效厚度是指准直器的板厚。换言之,是指从任意方向到来的放射线入射到准直器部件时,准直器部件在该入射点(其中,不包括入射到孔的侧壁、或者准直器的外周侧面的情况)处的厚度(与特定方向平行方向的厚度)的平均。

[0064] 以作为测量对象的放射性物质的特性X线在准直器物质中的平均自由行程( $\lambda_5$ )为单位时,准直器的有效厚度优选为 $1.6\lambda_5$ 以上,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放

出的 $\gamma$ 线在准直器物质中的平均自由行程( $\lambda_6$ )单位时,准直器的有效厚度优选为 $0.22\lambda_6$ 以下。

[0065] 从屏蔽特性X线的观点来看,该准直器的有效厚度优选将具有20keV~40keV的能量的特性X线屏蔽80%以上,更优选屏蔽该特性X线90%以上。

[0066] 此外,出于 $\gamma$ 线的透过率的观点,将准直器的有效厚度设为使作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线透过80%以上,这对减轻屏蔽容器的重量较好,优选使该 $\gamma$ 线透过87%以上,更优选使该 $\gamma$ 线透过92%以上,进一步优选使该 $\gamma$ 线透过97%以上。

[0067] 例如,现有的伽玛相机在利用作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线来对放射性物质进行成像的情况下,所需准直器的有效厚度变得非常厚。即,现有的伽玛相机为了以98%精确度确定出所述 $\gamma$ 线的到来方向,需要将准直器的有效厚度设为 $4\lambda_6$ 左右。

[0068] 与此相对,本发明能够在准直器的有效厚度为 $0.22\lambda_6$ 以下的情况下进行动作,因此能够大幅地使准直器轻量化。

[0069] 设置在放射线检测用元件的后部的信号处理电路优选构成为:针对从放射性物质放出的特性X线的峰值周边的能谱,测量20keV~40keV的范围内的至少一部分,更优选构成为至少测量20keV~40keV的整个范围,进而,为了以更精确地评价特性X线的峰值,更优选为测量10keV~40keV的整个范围,更加优选构成为测量10keV~50keV的整个范围。尤其是,通过能够测定下限为10keV的信号处理电路,提高了背景噪声的估计精度,改进了峰值的分析精度。此外,通过能够测定上限为50keV信号处理电路,能够进一步提高精度。

[0070] 例如,在以 $^{137}\text{Cs}$ 为检测对象的情况下,优选构成为测量作为在 $^{137}\text{Cs}$ 通过 $\beta$ -衰变而成为 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 后、通过同质异能跃迁而蜕变为 $^{137}\text{Ba}$ 的一系列过程中放出的特性X线的峰值的32.2keV(Ba-K $\alpha$ )和36.4keV(Ba-K $\beta$ )周边的能谱。

[0071] 例如,在以 $^{131}\text{I}$ 为检测对象的情况下,优选构成为测量作为在 $^{131}\text{I}$ 通过 $\beta$ -衰变而成为 $^{131\text{m}}\text{Xe}$ 后、通过同质异能跃迁而蜕变为 $^{131}\text{Xe}$ 的一系列过程中放出的特性X线的峰值的29.8keV(Xe-K $\alpha$ )和33.6keV(Xe-K $\beta$ )周边的能谱。

[0072] 例如,在以 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 为检测对象的情况下,优选构成为测量作为在 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 通过同质异能跃迁而蜕变为 $^{129}\text{Te}$ 的过程中放出的特性X线的峰值的27.5keV(Te-K $\alpha$ )和31.0keV(Te-K $\beta$ )周边的能谱。

[0073] 例如,在以 $^{132}\text{Te}$ 为检测对象的情况下,优选构成为测量作为在 $^{132}\text{Te}$ 通过 $\beta$ -衰变而蜕变为 $^{132}\text{I}$ 的过程中放出的特性X线的峰值的28.6keV(I-K $\alpha$ )和32.3keV(I-K $\beta$ )周边的能谱。

[0074] 例如,在以 $^{133}\text{Ba}$ 为检测对象的情况下,优选构成为测量作为在 $^{133}\text{Ba}$ 电子通过捕获而蜕变为 $^{133}\text{Cs}$ 的过程中放出的特性X线的峰值的31.0keV(Cs-K $\alpha$ )和35.0keV(Cs-K $\beta$ )周边的能谱。

[0075] 例如,在以 $^{124}\text{I}$ 为检测对象的情况下,优选构成为测量作为在 $^{124}\text{I}$ 通过 $\beta^+$ 衰变或电子捕获而蜕变为 $^{124}\text{Te}$ 的过程中放出的特性X线的峰值的27.5keV(Te-K $\alpha$ )和31.0keV(Te-K $\beta$ )周边的能谱。

[0076] 因此,如果构成为至少对20keV~40keV的范围的一部分进行测量,则能够检测并分析这些放射性物质放出的特性X线的峰值。

[0077] 接下来,对放射性物质的种类的识别方法进行说明。本发明能够以在放射性物质(母体核素)蜕变为子体核素一系列过程中放出的 $\gamma$ 线和特性X线为对象,使用在低能量区

域(例如,10keV~50keV的X线区域)中检测出的特性X线,来检测存在于特定方向的放射性物质,并确定该方向中的放射性物质的种类(子体核素的原子序号)。进而,通过在此基础上同时使用高能量区域(例如,60keV~1,000keV的 $\gamma$ 线区域)的放射线的检测,能够更详细地确定出存在于特定方向的放射性物质的种类。以下,对该情况进行详细描述。

[0078] 图3(A)是在-10℃条件下使用镅化碲作为放射线检测用元件而测量出的、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 在0keV~700keV内的能量谱,图3(B)是将图3(A)的各个特性X线峰值的高度统一地表示为0keV~60keV的图。在图3(A)、图3(B)中,纵轴均表示计数,横轴均表示能量(keV)。

[0079] 此处,如果所使用的镅化碲元件的能量分辨率是由峰值的半值宽度定义的,则在32keV的能量的情况下,所述能量分辨率为4keV。

[0080] 首先,对第1特定方向放射性物质确定方法进行说明,其中,该第1特定方向放射性物质确定方法是基于使用低能量区域的放射线来确定存在于特定方向的放射性物质的种类(子体核素的原子序号)的低能量区域放射性物质确定方法的方法。此处,作为确定存在于特定方向的放射性物质的子体核素的原子序号的子体核素确定处理而执行低能量区域放射性物质确定方法。

[0081] 如图3(B)所示,在低能量区域中,随着 $^{133}\text{Ba}$ 的衰变(子体核素 $^{133}\text{Cs}$ )而产生的Cs的特性X线产生了峰值P1(31keV)和峰值P2(35keV),随着 $^{137}\text{Cs}$ 的衰变(子体核素 $^{137}\text{Ba}$ )产生的Ba的特性X线产生了峰值P3(32keV)和峰值P4(36keV)。

[0082] 随着 $^{133}\text{Ba}$ 的衰变而产生的特性X线的峰值P1、P2的位置与随着 $^{137}\text{Cs}$ 的衰变而产生的特性X线的峰值P3、P4的位置略有不同,这是因为特性X线的能量是不同的。通过掌握该能量峰值的位置,能够确定出放射性物质的子体核素的原子序号。即,特性X线的能量仅取决于放射性物质(母体核素)蜕变生成的子体核素的原子序号。 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的蜕变后的子体核素分别为 $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Ba}$ ,会产生与子体核素的原子序号(分别为Cs、Ba)对应的特性X线(最高强度分别为31keV、32keV)。因此,相反,如果测定出特性X线的能量,则能够掌握子体核素的原子序号。通常,不能根据子体核素的原子序号来掌握母体核素,但是,这可以对母体核素的种类带来限定。

[0083] 由于放射线检测用元件被屏蔽体(屏蔽容器和准直器,或者,在不具有准直器的情况下为屏蔽容器)围着,因此所检测出的特性X线从存在于特定方向的放射性物质到来。因此,根据低能量区域的特性X线峰值的位置,能够确定出存在于特定方向的放射性物质的种类(子体核素的原子序号)。

[0084] 如果提高放射线检测用元件的能量分辨率,则能够进一步提高放射性物质的种类(子体核素的原子序号)的确定能力。例如,在镅化碲的情况下,通过将镅化碲冷却到更低的温度、优化镅化碲的大小以及使用具有更优异的噪声性能的前置放大器等方法,能够将能量分辨率提高到1keV以下。此外,这样进行冷却的方式只是用于提高能量分辨率的方法,而不是必要条件。即使在室温(例如,20℃等)下使用镅化碲,也能够判别峰值位置的不同,从而确定出放射性物质的子体核素的原子序号。

[0085] 接下来,对使用高能量区域的放射线来识别出放射性物质检测装置的周围的放射性物质的存在,从而确定出其种类(母体核素的种类)的高能量区域放射性物质确定方法(高能量区域中的放射性物质的种类(母体核素的种类)的确定方法)进行说明。

[0086] 本发明将放射线检测用元件的厚度设为能够使 $\gamma$ 线充分透过且能够充分检测特

性X线的厚度。此外,将屏蔽体的厚度设为能够使 $\gamma$ 线充分透过且能够充分屏蔽特性X线的厚度。因此,高能量区域的 $\gamma$ 线几乎都透过屏蔽体,并从各个方向抵达而入射放射线检测用元件。高能量区域的 $\gamma$ 线几乎都透过放射线检测用元件,但一部分与放射线检测用元件相互作用而被检测出。在放射性物质的种类(母体核素的种类)的确定中,利用了检测这一部分的 $\gamma$ 线而得到的数据。

[0087] 此外,需注意的,在使用了高能量区域的 $\gamma$ 线的放射性物质的种类(母体核素的种类)的确定中,从各个方向到来的 $\gamma$ 线都是检测对象,因此不能确定出 $\gamma$ 线的入射方向。即,需注意的,在能够根据能量谱的高能量区域而确定出的放射性物质中,同时存在以下两种情况:存在于能够通过特性X线来检测出放射性物质的特定方向的区域中的情况;以及,存在于此外的区域(特性X线被屏蔽体屏蔽,不能根据特性X线进行检测的区域)的情况。

[0088] 如图3(A)所示,在高能量区域中,与镅化铈略微地相互作用的 $\gamma$ 线形成了能量谱S1、S2。 $^{133}\text{Ba}$ 的能量谱S1与 $^{137}\text{Cs}$ 的能量谱S2,形状不同。该能量谱S1、S2是放射性物质所固有的,其取决于各放射性物质放出的 $\gamma$ 线的能量。

[0089] 因此,通过观察能量谱的高能量区域的形状,能够识别出放射性物质检测装置的周围的放射性物质的存在,并确定其种类(母体核素的种类)。即,在高能量区域中,不能确定放射性物质存在的方向,但是能够确定周围存在的放射性物质的种类(母体核素的种类)。具体而言,对数据库中登记的母体核素的样板(与峰值相关的数据)与所述能量谱的高能量区域的形状进行比较,如果存在一致度为规定值以上的样板,则确定为该样板的母体核素。

[0090] 接下来,对第2特定方向放射性物质确定方法进行说明,在第2特定方向放射性物质确定方法中,使用通过高能量区域放射性物质确定方法来确定放射性物质的种类(母体核素的种类)而得到的结果,通过特性X线峰值估计方法来估计特性X线的能量和强度,并通过使用了该估计结果的低能量区域放射性物质详细确定方法来确定存在于特定方向的放射性物质的种类(母体核素的种类)。此处,高能量区域放射性物质确定方法作为确定存在于特定方向的放射性物质的候选的候选确定处理而被执行,特性X线峰值估计方法和低能量区域放射性物质详细确定方法作为使用由高能量区域放射性物质确定方法得到的确定结果和低能量区域的测定结果来识别存在于特定方向的放射性物质的种类的种类识别处理而被执行。

[0091] 在放射性物质中,特性X线和 $\gamma$ 线的各自的能量以及 $\gamma$ 线与特性X线之间的放出比具有固有的量。此外, $\gamma$ 线和特性X线的检测效率对放射性物质检测装置是固有的。特性X线峰值估计方法利用该法则来估计特性X线的能量和强度。

[0092] 在特性X线峰值估计方法中,首先,使用上述高能量区域放射性物质确定方法,根据高能量区域的 $\gamma$ 线能谱,识别出放射性物质检测装置的周围的各放射性物质的存在。针对该认识出的放射性物质,求出各特性X线的能量,并根据 $\gamma$ 线与特性X线的放出比、 $\gamma$ 线与特性X线的检测效率以及放射性物质的分布状况的假设情况,来估计各放射性物质的各特性X线强度。

[0093] 例如,考虑在共存有 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 这两种放射性物质的情况下进行测量的情况。根据高能量区域的 $\gamma$ 线能谱,识别出在s放射性物质检测装置的周围存在放射性物质 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ ,并估计出这两种放射性物质放出的特性X线的能量和强度。即,针对识别出存在的放

放射性物质 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ ,例如假设放射性物质在地面上均匀分布,从公知的数据库中提取各自放出的特性X线的能量,进而通过进行使用了 $\gamma$ 线与特性X线的放出比以及 $\gamma$ 线和特性X线的检测效率的计算,来估计各特性X线强度。

[0094] 接下来,基于该估计,使用低能量区域放射性物质详细确定方法,对低能量区域的特性X线能谱进行分析。在低能量区域放射性物质详细确定方法中,如果以共存有上述 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 这两种放射性物质的情况下的例子进行说明的话,则根据低能量区域来积极地找出具有估计的能量和强度的特性X线的峰值( $^{133}\text{Ba}$ 的子体核素的Cs和 $^{137}\text{Cs}$ 的子体核素的Ba的特性X线峰值)(如果存在与具有估计出的能量的强度的特性X线的峰值之差为一定值以内的峰值,则判定为存在该特性X线的峰值),由此,能够精确地确定出各自的特性X线峰值的有无或各自的强度,能够判定在低能量区域中是否也存在由高能量区域放射性物质确定方法确定出的种类的放射性物质。在判定为存在的情况下,确定为在特定方向上存在该种类的放射性物质。

[0095] 这样,在放射线检测用元件的能量分辨率与多个放射性物质的特性X线能量之差相比为相同程度的情况下,组合高能量区域放射性物质确定方法、特性X线峰值估计方法和低能量区域放射性物质详细确定方法来对低能量区域进行分析的第2特定方向放射性物质确定方法特别有效。具体而言,在上述共存有 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 这两种放射性物质的情况下的例子中,特性X线的能量差为1keV。而且,特性X线峰值接近于如图3(B)所示那样,实际上被观测为1个峰值。如果只是根据低能量区域的能谱的信息,则不清楚母体核素的数量和种类。因此,难以识别出以 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 为来源的、Cs和Ba这两种特性X线峰值,难以将它们分离开。此处,通过根据高能量区域来确定放射性物质的种类( $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ ),能够估计特性X线的能量和强度,使 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的特性X线彼此分离来进行检测,从而精确地测定特性X线强度。在该情况下,能够独立地对 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 进行定量,并能够确定存在于特定方向上的放射性物质(母体核素)为 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 。

[0096] 此外,与仅使用低能量区域放射性物质确定方法的第1特定方向放射性物质确定方法相比,即使在能量分辨率差的情况下,第2特定方向放射性物质确定方法中使用高能量区域的 $\gamma$ 线能谱,能够更好地确定出存在于特定方向的放射性物质的种类。即,在共存有上述例子的 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的情况下,根据在第1特定方向放射性物质确定方法中使用的低能量区域的信息,能够确定出该子体核素的原子序号,但是因能量分辨率的大小而产生误差,因此在一定范围内存在限制(例如,子体核素限定为Xe、Cs、Ba、La)。但是,在第2特定方向放射性物质确定方法中,通过上述高能量区域放射性物质确定方法来测定高能量区域的 $\gamma$ 线能谱,由此,能够确定出作为存在于特定方向的放射性物质的候选是 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、或者是这双方。

[0097] 在能量分辨率高的情况下,通过由上述高能量区域放射性物质确定方法和低能量区域放射性物质详细确定方法,能够实现确定出存在于特定方向的区域中的放射性物质的种类(母体核素)的第2特定方向放射性物质确定方法,其中,在低能量区域放射性物质详细确定方法中,组合了由特性X线峰值估计方法估计出的特性X线的能量和强度的结果以及低能量区域的特性X线的能量谱的测定结果。即,在共存有 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的情况下,能够根据低能量区域来确定放射性物质的子体核素的原子序号是Cs还是Ba,能够根据高能量区域的 $\gamma$ 线能谱确定出在放射性物质检测装置的周围存在 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ ,因此,能够识别出低能量的

两个特性X线峰值是从 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 到来的。因此,能够确定出存在于特定方向的放射性物质的种类(母体核素的种类)是 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 。

[0098] 在上述例子中,存在两种放射性物质( $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ ),这些子体核素(分别为 $^{133}\text{Cs}$ 或 $^{137}\text{Ba}$ )的原子序号不同。在该情况下,如果特性X线的能量差与放射线检测用元件的能量分辨率相比同等以上,则能够确定出存在于特定区域的放射性物质的种类(在该例中,为 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ ),将各自的量分离开来进行检测,从而独立地进行测定。

[0099] 另一方面,例如在共存有 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{134}\text{Cs}$ (子体核素分别为 $^{137}\text{Ba}$ 和 $^{134}\text{Ba}$ )的例子中,两者的子体核素的原子序号相等,两者放出相同能量的特性X线,因此,不能进行确定存在于特定区域的放射性物质的种类(母体核素的种类)、将各自的量分离开来进行检测、从而独立地进行定量的动作。但是,如果使用高能量区域的 $\gamma$ 线能谱来进行第2特定方向放射性物质确定方法,则能够比仅使用低能量区域的特性X线能谱的情况(基于低能量区域放射性物质确定方法的第1特定方向放射性物质确定方法)更好地进行确定。即,关于存在于特定方向的放射性物质,在基于低能量区域放射性物质确定方法的第1特定方向放射性物质确定方法中,只能判别出子体核素为Ba,但是在使用了高能量区域的信息的第2特定方向放射性物质确定方法中,则能够确定放射性物质的种类(母体核素的种类)是 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 这双方还是其中任意一方。

[0100] 当在放射性物质检测装置的周围只存在一种放射性物质的情况下,如果使用第2特定方向放射性物质确定方法,则能够根据高能量区域的 $\gamma$ 线能谱确定出放射性物质的种类(母体核素的种类),而且可以知道在低能量区域中可被检测出的特性X线是从该放射性物质放射出,因此,能够确定出存在于特定方向的区域中的放射性物质的种类(母体核素的种类)。

[0101] 在共存有三种以上的放射性物质的情况下,如果使用高能量区域放射性物质确定方法,则能够根据高能量区域的 $\gamma$ 线能谱确定出在放射性物质检测装置的周围存在的放射性物质的种类(母体核素的种类)。如果这些子体核素分别为不同的原子序号且这些特性X线的能量差与放射线检测用元件的能量分辨率相比同等以上,则能够根据第2特定方向放射性物质确定方法,确定出存在于特定方向的区域中的放射性物质的种类。此外,在假设在这些子体核素中存在相同的原子序号的情况下,则不能确定出存在于特定区域的这些放射性物质的种类(母体核素的种类),不能将各自的量分离开来进行检测,从而不能独立地进行定量。但是,在第2特定方向放射性物质确定方法中,通过使用高能量区域的 $\gamma$ 线能谱,能够对存在于特定方向的区域中的放射性物质的种类(母体核素的种类)进行限定,与仅使用低能量区域的特性X线能谱的第1特定方向放射性物质确定方法相比,能够更好地进行确定。

[0102] 这样,根据低能量区域,能够确定出存在于特定方向的放射性物质的子体核素的原子序号(基于低能量区域放射性物质确定方法的第1特定方向放射性物质确定方法)。此外,基于高能量区域的检测结果的估计,对低能量区域的放射性物质的峰值进行分析,由此,能够更精确地测量出放射性物质的特性X线强度,能够识别出存在于特定方向的放射性物质的种类(母体核素的种类)(使用了高能量区域和低能量区域的第2特定方向放射性物质确定方法)。

[0103] 通过使用低能量区域的能谱(特性X线区域的能谱)和高能量区域的能谱(高能量

区域的 $\gamma$ 线能谱)这双方,根据能量谱计算出被放射线检测用元件吸收的能量,由此,能够作为简易的空间线量计(air dosimeter)而进行动作。

[0104] 这样,能够提供可精确地检测出放射性物质、识别出该放射性物质的种类、且非常轻量的放射性物质检测装置。

[0105] 根据以下附图,说明本发明的一个实施方式。

[0106] 实施例1

[0107] 图4是示出放射线源位置可视化系统1的系统结构的框图。

[0108] 放射线源位置可视化系统1具有放射性物质检测装置2、前置放大器3、波形整形放大器4、峰值敏感型模数转换器(ADC)5(试样保持电路或峰值保持电路6、(复用器7)或者模数转换器8)、高压电源9、计算机10、方向控制驱动部11、照相机12、输入装置13以及监视器14。图示的放射线源位置可视化系统1示出了单元模块的例子。

[0109] 放射性物质检测装置2是通过检测特性X线来检测放射性物质的装置,其接受高压电源9的电力提供而进行动作。由放射性物质检测装置2测量出的信号被传递给后部的前置放大器3。

[0110] 前置放大器3对接收到的信号进行放大。

[0111] 波形整形放大器4由高通滤波器和/或低通滤波器构成,其对从前置放大器3接收到的信号的波形进行整形,并将信号传递给后部的峰值敏感型模数转换器5。由此,能够使所检测的信号频段收缩,去除噪声。

[0112] 峰值敏感型模数转换器5也被称作峰值检测模数转换器,其通过试样保持电路或峰值保持电路6检测从波形整形放大器4接收到的信号的峰值(仿真波高的最大值),利用模数转换器8转换为数字信号(数字化数值),并将该数字信号传递给后部的计算机10。在试样保持电路或峰值保持电路6与模数转换器8之间,根据需要而设置有复用器7。该复用器7根据需要而与其它输入连接。

[0113] 高压电源9向放射性物质检测装置2提供放射性物质检测装置2的动作所需的高电压的电力。

[0114] 计算机10具有:外部连接接口10a,其是与外部设备连接的USB端口和串行端口等;存储部10b,其由硬盘或者闪速存储器等构成;控制部10c,其具有CPU、ROM和RAM;以及,存储介质处理部10d,其进行对CD-ROM等的存储介质的读写。

[0115] 计算机10连接有:峰值敏感型模数转换器5;方向控制驱动部11;照相机12,其取得静态图像;输入装置13,其由鼠标和键盘或触摸板等构成,接受利用者的操作输入;以及监视器14,其由液晶显示器或CRT显示器等构成,并显示图像。方向控制驱动部11进行对放射性物质检测装置2和照相机12所朝向的方向进行控制的驱动。在进行该控制驱动时,方向控制驱动部11将放射性物质检测装置2和照相机12控制为朝向相同的方向。

[0116] 该计算机10根据在存储部10b中存储的程序,使控制部10c执行各种计算和各种设备的动作控制,还执行从峰值敏感型模数转换器5接收到的数字信号的计数或图像处理等。关于详细情况,后面将进行描述。

[0117] 此外,放射性物质检测装置2、前置放大器3、波形整形放大器4和峰值敏感型模数转换器5的信号处理被构成为:除了能够检测20keV~40keV的特性X线峰值及其周边的能量区域10keV~50keV、还能够检测50keV~1000keV。



[0118] 图5是说明放射性物质检测装置2的结构说明图。图5(A)是示出放射性物质检测装置2的概略结构的立体图,图5(B)是示出放射性物质检测装置2的概略结构的纵剖视图,图5(C)是对放射性物质检测装置2的特性X线和 $\gamma$ 线的透过/屏蔽进行说明的纵剖视图的说明图。

[0119] 如图5(B)所示,放射性物质检测装置2具有屏蔽容器25,该屏蔽容器25具有圆筒形的侧壁25b,且在一面具有开口25a,而在另一面具有底25c。屏蔽容器25由厚度为1mm的SUS形成。

[0120] 在屏蔽容器25的开口25a上,无间隙地安装有大致圆柱形的准直器21(多孔准直器)。该准直器21由SUS形成,很规则地配置有多个(在该例中为19个)孔22。准直器21的厚度为1mm较好,但在本例中,设为25mm的厚度(圆柱形的长度方向的厚度)。此外,孔22为 $\Phi$ 为10mm,相邻的孔22与孔22之间的部分23(有效厚度)为1mm。准直器21的角度分辨率(半值宽度)为 $\pm 7.75^\circ$ ,最大视野为 $\pm 21.8^\circ$ 。通过改变孔22的直径和准直器21的长度方向(放射线的到来方向)的厚度,能够将该准直器21的角度分辨率或最大视野设定为任意值。此外,准直器21的孔22的数量可以取任意值,即使1个也可以(单孔准直器)。

[0121] 以作为测量对象的放射性物质的特性X线在准直器21中的平均自由行程( $\lambda_5$ )为单位时,准直器21的厚度(有效厚度)为 $1.6\lambda_5$ 以上。

[0122] 以作为测量对象的放射性物质放出的特性X线在准直器21中的平均自由行程( $\lambda_5$ )为单位时,准直器21的孔22与孔22之间的部分23的厚度、即准直器的有效厚度构成为 $1.6\lambda_5$ 以上,而且,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在准直器21中的平均自由行程( $\lambda_6$ )为单位时,准直器的有效厚度构成为 $0.22\lambda_6$ 以下。

[0123] 该准直器21和屏蔽容器25作为屏蔽体而发挥作用。

[0124] 在屏蔽容器25的内部,靠近准直器21的背面而设置有圆盘形的放射线检测用元件26,另外还设置有光电倍增管27。即,沿放射线的到来方向依次配置有准直器21、放射线检测用元件26和光电倍增管27。

[0125] 在该实施例中,放射线检测用元件26使用了闪烁体,具体而言,利用CsI而形成成为 $\Phi$ 为50mm、厚度为1mm的形状。放射线检测用元件26的能量分辨率在32.2keV的情况下,为10.5keV(半值宽度)。

[0126] 作为检测例,为了能够测量钡、铯、氙、碘、碲这些 $\gamma$ 线放出核素(以下,记作放射性物质)中的任意一个或多个所放出的特性X线(Ba-K $\alpha$ :32.2keV,Cs-K $\alpha$ :31.0keV,Xe-K $\alpha$ :29.8keV,I-K $\alpha$ :28.6keV,Te-K $\alpha$ :27.5keV),放射线检测用元件26针对这些特性X线峰值周边的能谱,至少测量20keV~40keV中的一部分。此外,为了精确地进行测量,可以测量10keV~50keV。为了更加详细地确定出放射性物质的种类,可以测定50keV~1000keV。

[0127] 在该放射线检测用元件26中,通过了准直器21的孔22的特性X线所入射的部分为有感部分26a。

[0128] 光电倍增管27是在内部将入射的光放大并作为电信号进行输出的装置。在放射线入射到作为放射线检测用元件26的CsI等的闪烁体中而使闪烁体发光时,该光电倍增管27将该光转换为电子,并将其放大而产生电信号。

[0129] 如图5(C)所示,这样构成的放射性物质检测装置2会检测从箭头所示的特定方向Y到来的特性X线,而不会检测从其它方向到来的特性X线或从各个方向到来的大部分的 $\gamma$

线。即,由于放射线检测元件26被屏蔽容器和准直器包围着,因此,特性X线入射的角度因准直器21的孔22而被限定在区域E的范围内。放射线检测用元件26因该入射的特性X线而发光,并由光电倍增管27检测为电信号。

[0130] 从其它方向到来的特性X线被准直器21和屏蔽容器25屏蔽,不会使放射线检测用元件26发光,从而不会被检测出。

[0131] 从各个方向到来的 $\gamma$ 线大部分不与准直器21和屏蔽容器25发生相互作用,此外,也不与屏蔽容器25和放射线检测用元件26发生相互作用,因此,不会被检测出。因此,防止了 $\gamma$ 线妨碍特性X线的检测。

[0132] 这样,通过放射线检测用元件26、光电倍增管27以及由图4所示的前置放大器3、波形整形放大器4、峰值敏感型模数转换器5进行的信号处理电路(3、4、5),取得了放射性物质放出的特性X线的能量信息和特性X线的入射强度。

[0133] 图6示出了在计算机10(参照图4)中,根据存储部10b内的程序进行动作的控制部10c作为各功能手段而发挥作用时的功能框图。

[0134] 作为计算机10的功能模块,设置有方向控制部40、照相机图像取得部41、能谱生成部42、峰值分析部43、二维图像生成部44、图像合成部45、切换输入处理部46和图像显示部47。

[0135] 方向控制部40进行方向控制驱动部11的驱动控制,控制照相机12的方向和放射性物质检测装置2(参照图4)的方向。具体而言,首先,控制照相机12的方向,确定拍摄范围。进而,将照相机12的拍摄范围按矩阵状(格子状)划分成多个区域,使放射性物质检测装置2朝向其中一个区域。在该区域的检测完成时,使放射性物质检测装置2朝向下一区域。通过反复进行该方向控制,方向控制部40能够针对被划分为矩阵状的全部区域,在每一区域中检测出放射性物质放出的特性X线。

[0136] 照相机图像取得部41从照相机12(参照图4)取得所拍摄到的照相机图像。该照相机图像取得部41构成为从照相机12取得静态图像,但并非限于此。例如,照相机图像取得部41也可以构成为具有摄像机来替代照相机12,并取得由摄像机拍摄到的动态图像(影像)。

[0137] 能谱生成部42对从峰值敏感型模数转换器5接收到的数据进行处理,来进行能量谱的生成。

[0138] 峰值分析部43在从能谱生成部42接收到的能谱中,找出特性X线的单独峰值,并求出其实际数量的计数。或者,在共存有多个放射性物质的情况下,如果能量分辨率好,则峰值分析部43找出多个特性X线所形成的多个峰值,如果能量分辨率不好,则找出复合多个特性X线而形成的峰值,并计算其实际数量的计数。

[0139] 此外,峰值分析部43作为如下的放射性物质识别部而发挥作用:通过子体核素确定处理来执行上述第1特定方向放射性物质确定方法,通过候选确定处理和种类识别处理来执行上述第2特定方向放射性物质确定方法。执行子体核素确定处理的峰值分析部43通过低能量区域放射性物质确定方法来确定子体核素的种类(第1特定方向放射性物质确定处理)。执行候选确定处理的峰值分析部43通过上述高能量区域放射性物质确定方法来确定母体核素的种类。执行种类识别处理的峰值分析部43通过上述特性X线峰值估计方法来估计特性X线的能量和强度,通过上述低能量区域放射性物质详细确定方法来识别特定方

向的放射性物质的种类(第2特定方向放射性物质确定处理)。

[0140] 二维图像生成部44通过峰值分析部43,根据特性X线峰值的实际数量的计数,生成表示放射性物质的存在方向的图像。该图像例如可以设为矩阵状的图像。即,由于通过方向控制部40的驱动控制检测出了各区域的放射性物质的存在,因此,在每一区域中涂覆与检测电平对应的浓度来进行显示,由此,能够成为在每一区域中示出放射性物质的量的矩阵状的图像。

[0141] 能谱生成部42将在被划分成矩阵状的各区域中得到的多个能谱图像(在该实施例中,为16个能谱图像)发送给图像显示部47。

[0142] 图像合成部45对由照相机图像取得部41取得的拍摄图像与由二维图像生成部44生成的矩阵状的二维图像进行合成,生成合成图像。这样,将检测出的放射性物质在矩阵上的位置与放射性物质在拍摄图像中所在的位置相对应起来。

[0143] 切换输入处理部46接受使在监视器14中显示的图像在能谱图像和成像图像之间进行切换操作输入(基于输入装置13的操作输入)。

[0144] 图像显示部47在监视器14中显示图7所示的能谱图像和图8所示的成像图像。接受切换输入处理部46的操作输入,如果指定了能谱图像且指定了被划分成矩阵状的区域中的1个区域,则显示图7所示的能谱图像,如果指定了二维图像,则显示图8所示的合成图像。

[0145] 这样,能够检测出特性X线,并将放射性物质的能谱图像显示为图7所示的曲线图,将检测位置显示为图8所示的矩阵状的综合图像。

[0146] 图7是示出检测出的放射线的能谱的曲线图。横轴表示能量(keV),纵轴表示计数数量。曲线图G1示出了朝放射性物质存在的方向(污染方向)进行测定的例子,曲线图G2示出了朝不存在放射性物质的方向(非污染方向)进行测定的例子。

[0147] 在对该曲线图进行测量的放射线源位置可视化系统1中,使用浜松光电制造的R10131作为图4所示的光电倍增管27,使用CLEAR-PULSE制造的595H型作为前置放大器3,使用CLEAR-PULSE制造的4417型作为波形整形放大器4,使用AMPTEK制造的8100A作为峰值敏感型模数转换器5,使用浜松光电制造的C9619-01作为高压电源9。

[0148] 如该曲线图所示,在朝向非污染方向的检测中,没有检测出放射性物质,但在朝向污染方向的检测中,发现了检测出从 $^{134}\text{Cs}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 到来的32keV和36keV的峰值P。由此,能够检测出从 $^{134}\text{Cs}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 到来的32keV和36keV的特性X线。这样对放射线的能谱进行显示的监视器14作为对特性X线的峰值进行输出的峰值输出部而发挥作用。

[0149] 该峰值P的检测优选由计算机10(参照图4)的控制部10c来执行。具体而言,预先将样板数据存储在计算机10(参照图4)的存储部10b中。进而,控制部10c计算与所述样板数据对应的测定数据(检测出的放射线的能谱)的突出量,并检测出该突出量最多的位置(能量(keV))的数据作为峰值P。所述样板数据优选为如下数据:从低能量区域到高能量区域,利用规定函数(例如,4次函数)等来近似(approximate)出如曲线图G2所示没有峰值P的曲线图形状。可以使用多个该样板数据,尤其是,如果是由于在放射性物质的周围(射线源的周围)通常的物质较多等、使得宽度较大的山形的峰值(峰值位置为60keV~250keV之间,半值宽度为60keV~200keV,且不是线状 $\gamma$ 线(line gamma ray)峰值或特性X线峰值)表现为在峰值P的高能量侧比峰值P强的环境的话,则样板数据可以是成为沿着该宽度较大的山形峰值部分的形状的规定函数的数据。此外,线状 $\gamma$ 线峰值是指具有与放射性物质(子体核素)

的原子核的激励能级差对应的能量的峰值。

[0150] 由此,即使宽度较大的山形的峰值在峰值P的高能量侧比峰值P强,控制部10c也能够适当地检测出峰值P。此外,通过求出测定数据中的从样板数据中突出的部分(峰值P周边部分)的面积(实际数量的计数),能够计算出存在于作为特性X线的检测方向的特定方向上的放射性物质的量。输出这样检测出的峰值P的控制部10c也可以作为峰值输出部而发挥作用。

[0151] 此外,在该峰值P的检测中,控制部10c还执行放射性物质的种类的确定。在该情况下,控制部10c通过上述候选确定处理,确定出 $\gamma$ 线区域中的放射性物质的种类的候选,并通过种类识别处理,识别出在特性X线区域中,所述候选中的存在于特定方向的放射性物质的种类。执行该放射性物质的种类的确定的控制部10c作为放射性物质识别部而发挥作用。

[0152] 图8是示出合成图像60的画面说明图。在合成图像60中,在由照相机12拍摄到的拍摄图像61上,重叠地显示(半透明色的合成)出以矩阵状与特性X线强度对应地进行涂覆的二维图像62。二维图像62被划分为在多个(在图示的例子中为16个)格子,并以1格为单位来显示特性X线强度。例如,显示有:特性X线强度高的第1强度显示部63;特性X线强度比第1强度显示部63小的第2强度显示部64;以及,几乎没有检测出放射线的第3强度显示部65。由此,能够确认在哪个区域存在什么程度的放射性物质。这样,对特性X线强度进行显示的监视器14作为输出合成图像的合成图像输出部而发挥作用。

[0153] 此外,按每一区域来涂覆并显示的颜色根据识别出的放射性物质的种类而不同。各颜色表示的放射性物质的种类通过在画面上进行显示、或者在另外的手册中进行显示等适当的方法而被示出。此外,可以不在画面上明示所确定出的放射性物质的种类。此外,也可以针对识别出的放射性物质的每一种类,生成二维图像62。在该情况下,在监视器14中,可以利用切换按钮来切换显示各种类的二维图像62,或者将各个二维图像62排列显示在一个画面中等,来进行适当的显示。

[0154] 通过以上结构,放射性物质检测装置2能够利用非常轻量的结构,以足够的性能对放出 $\gamma$ 线和特性X线的放射性物质进行测量,并将放射性物质的分布图像化。即,与使用了很厚的铅或闪烁体的现有示例相比,放射性物质检测装置2能够利用薄的屏蔽容器25(例如,1mm厚的SUS)、薄的准直器21和薄的放射线检测用元件26(例如,1mm厚的CsI),将屏蔽体的重量至少轻量化到现有重量的约18分之1以下。此外,通过优化屏蔽体(屏蔽容器25和准直器21),还能够使屏蔽体的重量变为现有的50分之1以下。在检测 $^{137}\text{Cs}$ 的情况下,现有的伽玛相机的屏蔽体如果要得到屏蔽率98%,则需要34mm的铅,但是该放射性物质检测装置2能够以1mm的SUS使屏蔽体实现屏蔽率98%,因此,屏蔽体在具有与现有同等的指向性的情况下,也能够实现约50分之1( $[34\text{mm} \times \text{铅的比重}11.3]/[1\text{mm} \times \text{SUS的比重}7.9]$ )的轻量化。该放射性物质检测装置2至少能够识别出放射性物质的存在,能够将放射性物质的分布图像化,还能够根据需要,对放射性物质进行定量,或者确定放射性物质的种类。

[0155] 此外,屏蔽容器25能够设为对从各个方向到来的 $\gamma$ 线的屏蔽不起作用的薄度,这个薄度是在现有技术中不能够使用的薄度。此外,准直器21的孔22与孔22之间的厚度23、即准直器的有效厚度能够设为对减少从各个方向到来的 $\gamma$ 线不起作用的薄度,这个薄度是在现有技术中不能够使用的薄度。而且,放射线检测用元件26能够设为对 $\gamma$ 线的检测不起作用的薄度,这个薄度是在现有技术中不能够使用的薄度。通过设为这样的薄度,能够利用特

性X线来检测放出 $\gamma$ 线的放射性物质。

[0156] 信号处理电路(3、4、5)(参照图4)对特性X线的峰值周边(例如,如果是 $^{137}\text{Cs}$ ,则为32keV~36keV)的能谱进行检测。这样,通过将特性X线作为测量对象,能够如上述那样使屏蔽容器25变薄,并使放射线检测用元件26变薄,能够使准直器21轻量化。此外,通过这样的信号处理电路(3、4、5),能够提供灵敏度好的放射性物质检测装置2。

[0157] 放射线检测用元件26的相对于特性X线的入射方向的有感部分的厚度形成为:以作为测量对象的放射性物质的特性X线在所述放射线检测用元件26所使用的物质中的平均自由行程( $\lambda_1$ )为单位时,有感部分的厚度为 $1.1\lambda_1$ 以上的范围,而且,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在所述放射线检测用元件26所使用的物质中的平均自由行程( $\lambda_2$ )为单位时,有感部分的厚度为 $0.14\lambda_2$ 以下的范围。由此,既能够抑制背景噪声,又能够提高对特性X线的灵敏度。

[0158] 此外,屏蔽容器25的厚度形成为:以作为测量对象的放射性物质的特性X线的屏蔽容器25中的平均自由行程( $\lambda_3$ )为单位时,屏蔽容器25的厚度为 $1.6\lambda_3$ 以上的范围,而且,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在屏蔽容器25中的平均自由行程( $\lambda_4$ )为单位时,屏蔽容器25的厚度为 $0.22\lambda_4$ 以下的范围。由此,既能够减轻重量,又能够提高对特性X线的灵敏度。

[0159] 此外,准直器21的孔22与孔22之间的厚度23、即准直器的有效厚度形成为:以作为测量对象的放射性物质的特性X线在准直器21的物质中的平均自由行程( $\lambda_5$ )为单位时,准直器的有效厚度为 $1.6\lambda_5$ 以上,而且,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在准直器21的物质中的平均自由行程( $\lambda_6$ )为单位时,准直器的有效厚度为 $0.22\lambda_6$ 以下的范围。由此,既能够减轻重量,又能够提高对特性X线的灵敏度。

[0160] 此外,信号处理电路(3、4、5)能够测量10keV~50keV。由此,能够利用特性X线,精确地测量钡、铯、氙、碘和碲等中的同时放出 $\gamma$ 线和特性X线的核素(放射性物质)。

[0161] 此外,放射线源位置可视化系统1能够在合成图像60(参照图8)中显示出放射性物质的核素所在的位置。由此,能够在图像上确认放射线源的位置,能够容易地确定污染位置。此外,放射线源位置可视化系统1能够将检测出的放射线的能谱显示为曲线图G1(参照图7)。

[0162] 此外,放射线检测用元件26只要能够阻挡并检测特性X线即可,因此,即使是在技术上很难在使放射线检测用元件具有较大的厚度来确保较大面积的情况下以高性能进行动作的CdTe等的材料(例如,如果是CdTe,则厚度到5mm左右),也能够以最优的厚度(例如,1mm厚度)来利用。

[0163] 此外,通过该放射性物质检测装置2,能够获得对特性X线,约80%以上的检测效率(如果CsI为1mm,则对 $^{137}\text{Cs}$ 的32keV的检测效率为95%),与现有相比,即使非常轻量,也能够以与现有的伽玛相机相同程度的计数效率来检测 $^{137}\text{Cs}$ 。

[0164] 具体而言, $^{137}\text{Cs}$ 的每1次衰变的 $\gamma$ 线662keV和特性X线32keV的放出概率分别为85.1%和5.6%。实用化的现有的多数伽玛相机以放出概率高达85.1%的 $\gamma$ 线662keV为检测对象,对该 $^{137}\text{Cs}$ 的662keV的检测效率为5%~10%左右。在该现有的伽玛相机中,假设使用大尺寸的荧光板(例如,直径50mm×厚度30mm的NaI),则检测效率为30%左右,但是,由于包围荧光板的屏蔽体的重量会变得更大,从而导致妨碍使用。

[0165] 与此相对,本发明的放射性物质检测装置2以 $^{137}\text{Cs}$ 的每1次衰变的放射概率与 $\gamma$ 线相比低至5.6%的特性X线为检测对象,却能够将检测效率提高到约80%以上。由此,与现有的伽玛相机相比,放射性物质检测装置2为非常轻量的结构,却能够以与现有的伽玛相机相同程度的计数效率来检测 $^{137}\text{Cs}$ 。此外,与现有的伽玛相机相比,放射性物质检测装置2变得非常轻量,因此,可以无需关注重量而容易地将放射性物质检测元件的有感面积或放射性物质检测装置的台数设为2倍、5倍、10倍以上,从而能够提高灵敏度。

[0166] 此外,即使在 $\gamma$ 线从各个方向到来的环境中,放射性物质检测装置2也能够通过将放射线检测用元件26设为确定的厚度,来抑制背景噪声,提高检测极限,从而能够高灵敏度地测量出以前难以测量的特性X线(尤其是20keV~40keV的能量)。

[0167] 此外,信号处理电路能够从10keV起进行测量,由此,能够提高特性X线峰值周边的背景噪声的估计精度,从而能够高精度地求出特性X线的实际数量的计数。

[0168] 此外,放射性物质检测装置2将屏蔽容器25的厚度和准直器21的孔22与孔22之间的厚度23设为确定的厚度,由此,使对放射性物质所在方向的灵敏度足够高,且与现有的伽玛相机相比,实现了大幅的轻量化。

[0169] 此外,通过将放射线检测用元件26设为1mm厚的CsI,大致能够对放射线得到如下性能。

[0170] <X线(32keV)>

[0171] 相互作用概率高(整体的95%完全阻挡)。

[0172] < $\gamma$ 线(662keV)>

[0173] 相互作用概率低(整体的97%不相互作用而透过)。

[0174] 此外,通过将屏蔽容器25设为1mm厚的SUS,大致能够对放射线得到如下性能。

[0175] <X线( $^{137}\text{Cs}$ -32keV)>

[0176] 相互作用概率高(整体的98%完全阻挡)。

[0177] < $\gamma$ 线( $^{137}\text{Cs}$ -662keV)>

[0178] 相互作用概率低(整体的94%不相互作用而透过)。

[0179] 此外,通过方向控制驱动部11和方向控制部40,能够使放射性物质检测装置2和照相机12始终朝向相同的方向。如果通过控制驱动或通过手动,使照相机12与放射性物质检测装置2依次变更方向,使其拍摄范围相邻,并通过图像合成部45对拍摄图像和二维图像的合成图像进行排列配置而使其结合,则能够得到拍摄范围或检测范围更大的全景状的合成图像。

[0180] 此外,方向控制驱动部11和方向控制部40构成为通过计算机10的控制进行驱动,但是也可以构成为通过手动进行驱动。在该情况下,可以构成为不具有方向控制驱动部11和方向控制部40,而使用不利用电信号的、机械的方向固定器具,并通过输入装置13来输入要测量的方向。在该情况下,也可以使用由单元模块构成的放射线源位置可视化系统1,来生成并显示合成图像。

[0181] 实施例2

[0182] 图9(A)是示出实施例2的放射性物质检测装置2A的纵剖视图。该放射性物质检测装置2A在准直器21的前表面侧(相对于放射线检测用元件26,在光电倍增管27的相反侧)设置有滤波器29。滤波器29只要是抑制噪声以提高对特性X线的灵敏度的滤波器即可,例如,

可以设为屏蔽 $\beta$ 线的丙烯酸树脂板。具体而言,例如,可以使用厚度为6mm且面积与放射线检测用元件26相同的、直径为50mm的圆盘状的丙烯酸树脂板。

[0183] 放射性物质检测装置2A的其它构成要素与实施例1相同,因此对相同要素标注相同的标号,并省略其详细说明。

[0184] 这样,通过使用滤波器29,能够去除噪声,提高特性X线的灵敏度。尤其是在使用了丙烯酸树脂板的情况下,能够屏蔽容易成为噪声的 $\beta$ 线,从而进一步提高对特性X线的灵敏度。

[0185] 此外,滤波器29不限于1个,可以具有多个多种滤波器。

[0186] 此外,作为滤波器29,可以使用对特性X线和 $\beta$ 线进行屏蔽的滤波器。在该情况下,例如,可以使用厚1mm且面积与放射线检测用元件26相同的、直径为50mm的圆盘状的SUS板。这样,在使用还会屏蔽特性X线的滤波器29的情况下,通过取得安装有滤波器29的状态下的测量结果和卸下滤波器29的状态下的测量结果之间的差分,能够去除噪声,强调特性X线的峰值。即,在安装有滤波器29的状态下的测量结果中,由于能够以 $\gamma$ 线导致的噪声为中心来进行测量,因此,通过取得与卸下滤波器29的状态的测量结果之间差分,能够仅强调特性X线。

[0187] 实施例3

[0188] 图9(B)是示出在放射线检测用元件26中不使用闪烁体而使用半导体的情况下的放射性物质检测装置2B的纵剖视图。如图所示,用屏蔽容器25B覆盖放射线检测用元件26B,在屏蔽容器25B的前表面(开口部)安装准直器21。

[0189] 放射线检测用元件26B由CdTe等的半导体构成。

[0190] 放射线检测用元件26B与高压电源9(参照图4)和前置放大器3(参照图4)连接,并由方向控制驱动部11控制方向。

[0191] 其它构成要素与实施例1相同,因此对相同要素标注相同的标号,并省略其详细说明。

[0192] 通过这样构成,也能够得到与实施例1相同的作用效果。

[0193] 此外,与实施例1不同,在实施例3中,不需要读出光电倍增管等的荧光板的装置,能够使屏蔽体更加紧凑。

[0194] 实施例4

[0195] 图10是示出实施例4的放射线源位置可视化系统1C的系统结构的框图。该放射线源位置可视化系统1C示出了多元件模块的例子。

[0196] 放射性物质检测装置2C在1个屏蔽容器25C中配置多组成对的放射线检测用元件26和光电倍增管27,其中,放射线检测用元件26的检测面排列在同一平面上。

[0197] 准直器21C(前面板)是如下针孔准直器:在具有能够使 $\gamma$ 线充分透过而充分屏蔽特性X线的厚度的较薄的材质上,在中央周边的一个部位设置有孔22C。

[0198] 准直器21C的厚度(有效厚度)形成为:以作为测量对象的放射性物质的特性X线在准直器21C的物质中的平均自由行程( $\lambda_5$ )为单位时,准直器21C的厚度为 $1.6\lambda_5$ 以上,而且,以作为测量对象的放射性物质以最高比例放出的 $\gamma$ 线在准直器21C的物质中的平均自由行程( $\lambda_6$ )为单位时,准直器21C的厚度为 $0.22\lambda_6$ 以下的范围。由此,既能够减轻重量,又能够提高对特性X线的灵敏度。

[0199] 多个光电倍增管27分别与高压电源9、前置放大器3和波形整形放大器4连接。在波

形整形放大器4的后部,设置有峰值保持电路或试样保持电路6和复用器7,对信号进行切换,对来自全部波形整形放大器4的信号进行处理。此外,也可以设为如下方式:不使用复用器7,而分别对峰值保持电路或试样保持电路6设置单独的模数转换器(对应于模数转换器8),并将来自各模数转换器的输出发送到计算机10。

[0200] 与实施例1不同,放射性物质检测装置2C不具有方向控制驱动部11(参照图4)和方向控制部40(参照图6)。而且,照相机12的拍摄范围与放射性物质检测装置2C的检测范围一致,放射性物质检测装置2C的检测范围被划分为矩阵状,1个放射线检测用元件26和光电倍增管27的检测范围与1个格子对应。图像合成部45(参照图6)在1个拍摄图像上合成各格子的二维图像,由此生成合成图像。

[0201] 其它构成要素与实施例1相同,因此对相同要素标注相同的标号,并省略其详细说明。

[0202] 通过这样构成,也能够得到与实施例1相同的作用效果。

[0203] 此外,通过设为多元件模块,利用1次处理即可检测出从放射性物质到来的特性X线是从哪个方向到来的。即,根据从哪个放射线检测用元件26检测出的,并根据连接从检测出的放射线检测用元件26的前表面到孔22C的直线的方向,能够检测出由所检测出的放射线检测用元件26的大小和孔22C的大小所决定的范围的放射线。

[0204] 此外,也可以与实施例1同样地具有方向控制驱动部11和方向控制部40。在该情况下,能够得到比拍摄范围或检测范围大的全景状的合成图像。

[0205] 此外,放射性物质检测装置2C可以将准直器21C设为按期望的排列形成有多个孔22C的编码掩模型准直器(前面板)。该情况下的编码掩模型准直器的孔的排列等可以设为文献“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)所记载的那样的排列等。

[0206] 实施例5

[0207] 图11是示出实施例5的放射线源位置可视化系统1D的系统结构的框图。该放射线源位置可视化系统1D示出了多元件模块的例子。

[0208] 放射线源位置可视化系统1D具有多个放射性物质检测装置2,它们分别被固定为朝向不同的方向。在各放射性物质检测装置2的后部,分别设置有前置放大器3、波形整形放大器4和峰值保持电路或试样保持电路6。在峰值保持电路或试样保持电路6的后部,设置有复用器7,对信号进行切换,对来自全部波形整形放大器4的信号进行处理。此外,也可以设为如下方式:不使用复用器7,而分别对峰值保持电路或试样保持电路6设置单独的模数转换器(对应于模数转换器8),并将来自各模数转换器的输出发送到计算机10。

[0209] 其它构成要素与实施例1相同,因此对相同要素标注相同的标号,并省略其详细说明。

[0210] 通过这样构成,也能够得到与实施例1相同的作用效果。此外,通过这样设为多元件模块,利用1次处理即可检测出从放射性物质到来的特性X线是从哪个方向到来的。即,通过知晓是从哪个放射性物质检测装置2检测出的,由此,能够确定从检测出的放射性物质检测装置2的前方检测出了放射线。

[0211] 此外,也可以构成为这样:具有多个放射性物质检测装置2,并在一部分的放射性



物质检测装置2中具有在实施例2中说明的对特性X线和 $\beta$ 线进行屏蔽的滤波器29(参照图9(A))。

[0212] 在该情况下,利用安装有滤波器29的放射性物质检测装置2来检测由 $\gamma$ 线导致的噪声成分,利用未安装有滤波器29的放射性物质检测装置2来检测由特性X线和 $\gamma$ 线导致的噪声成分,根据差分,能够在短时间内精确地实施特性X线的检测。即,能够一次性进行双方的测量来完成检测,而无需安装滤波器29来进行测量作业,然后卸下滤波器29来进行测量作业。

[0213] 本发明不限于上述的实施方式的结构,可以得到很多实施方式。

[0214] 例如,放射线检测用元件26除了可以使用闪烁体或半导体以外,还可以使用由冷却设备进行冷却的半导体等。

[0215] 此外,屏蔽容器的材料不限于SUS,可以使用包含黄铜或铅的物质等、能够屏蔽特性X线的适当的物质。

[0216] 此外,放射性物质检测装置2、2A、2B、2C或放射线源位置可视化系统1、1C、1D可以作为对放射性物质的污染进行检测的污染检测装置来使用。

[0217] 此外,各放射性物质检测装置2、2A、2B、2C可以构成不使用准直器,而通过屏蔽容器25、25B、25C来确定要测定的特定方向。在该情况下,也能够检测未被屏蔽容器25、25B、25C屏蔽的特定方向的放射性物质,识别出放射性物质的种类。

[0218] 产业上的可利用性

[0219] 本发明能够用于对放出 $\gamma$ 线和特性X线的放射性物质所在的方向及该放射性物质的量进行测定的用途,此外,能够用于对放射性物质进行检测的各种用途。

[0220] 标号说明

[0221] 1、1C、1D…放射线源位置可视化系统

[0222] 2、2A、2B、2C…放射性物质检测装置

[0223] 12…照相机

[0224] 14…监视器

[0225] 22…孔

[0226] 23…之间的部分

[0227] 25、25C…屏蔽容器

[0228] 25b…侧壁

[0229] 26…放射线检测用元件

[0230] 26a…有感部分

[0231] 44…二维图像生成部

[0232] 45…图像合成部

[0233] Y…特定方向

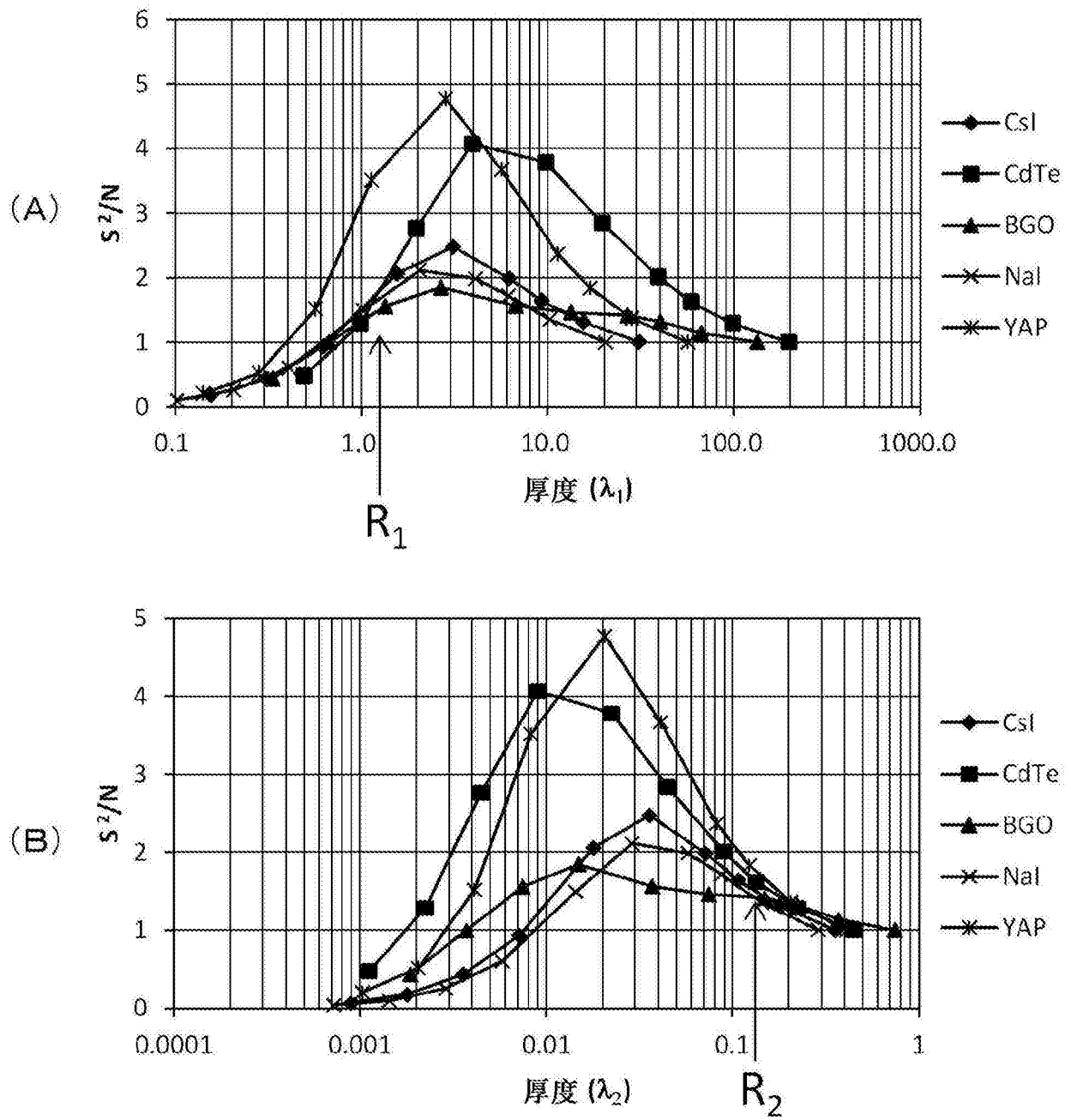


图1

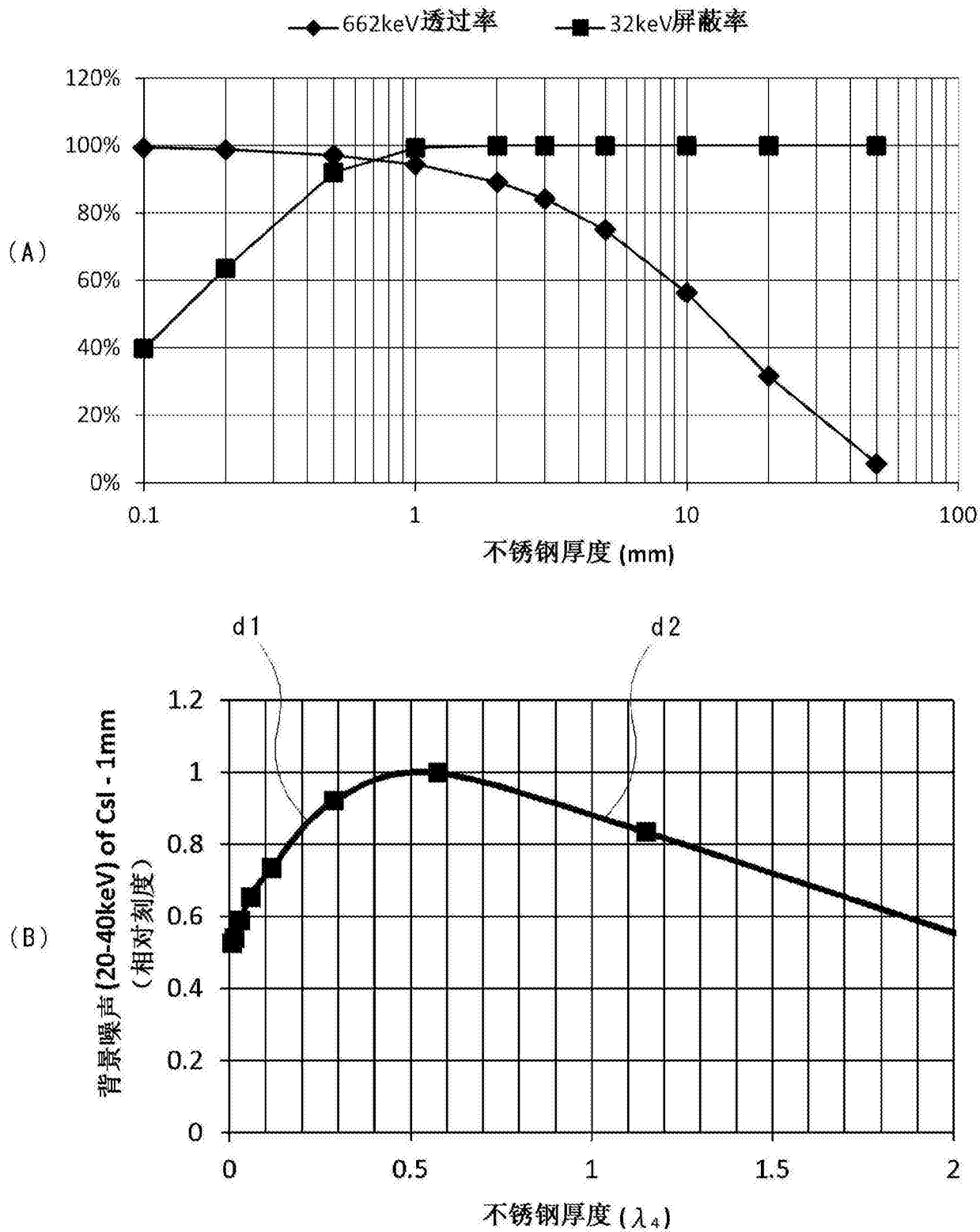


图2

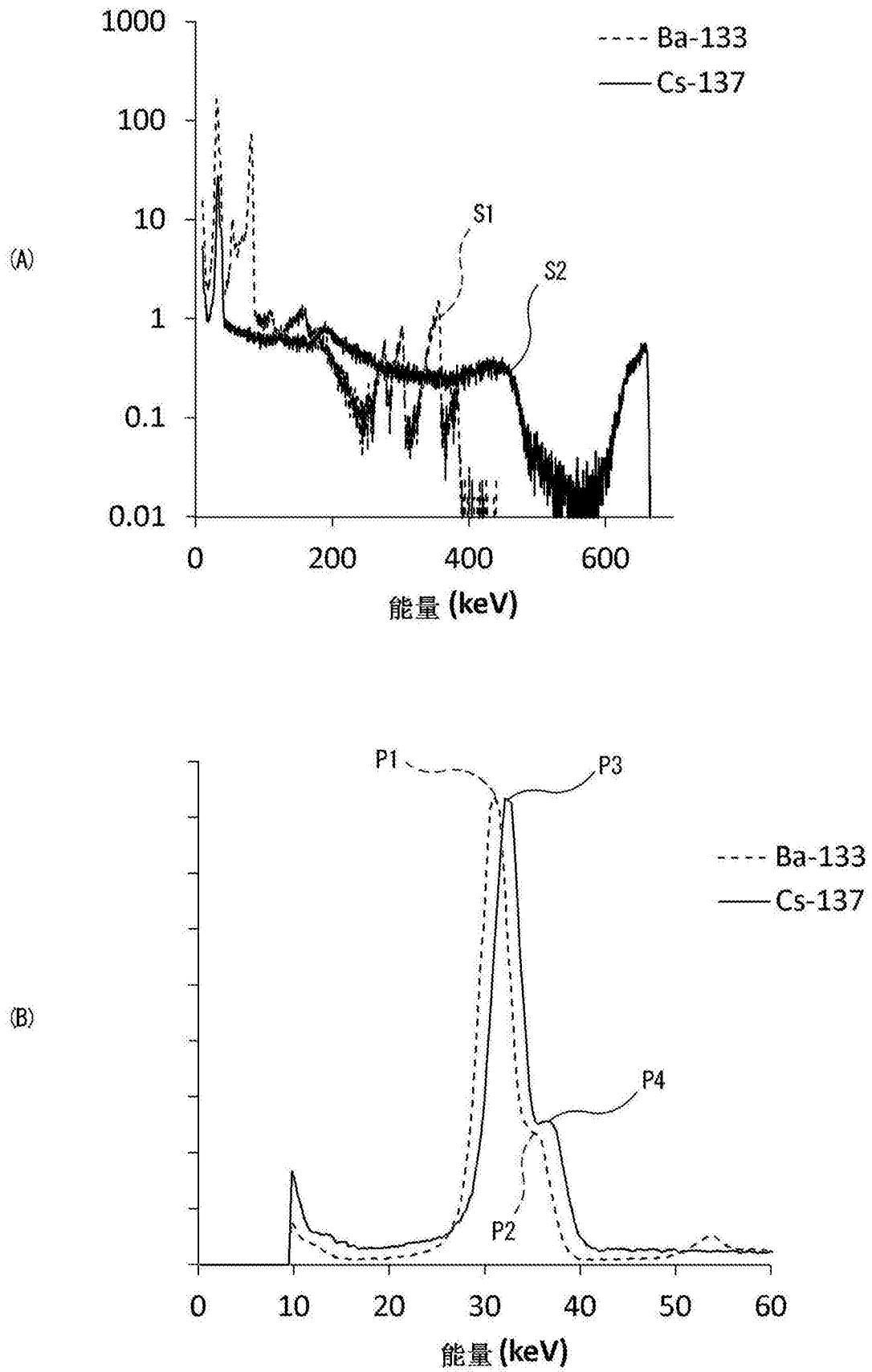
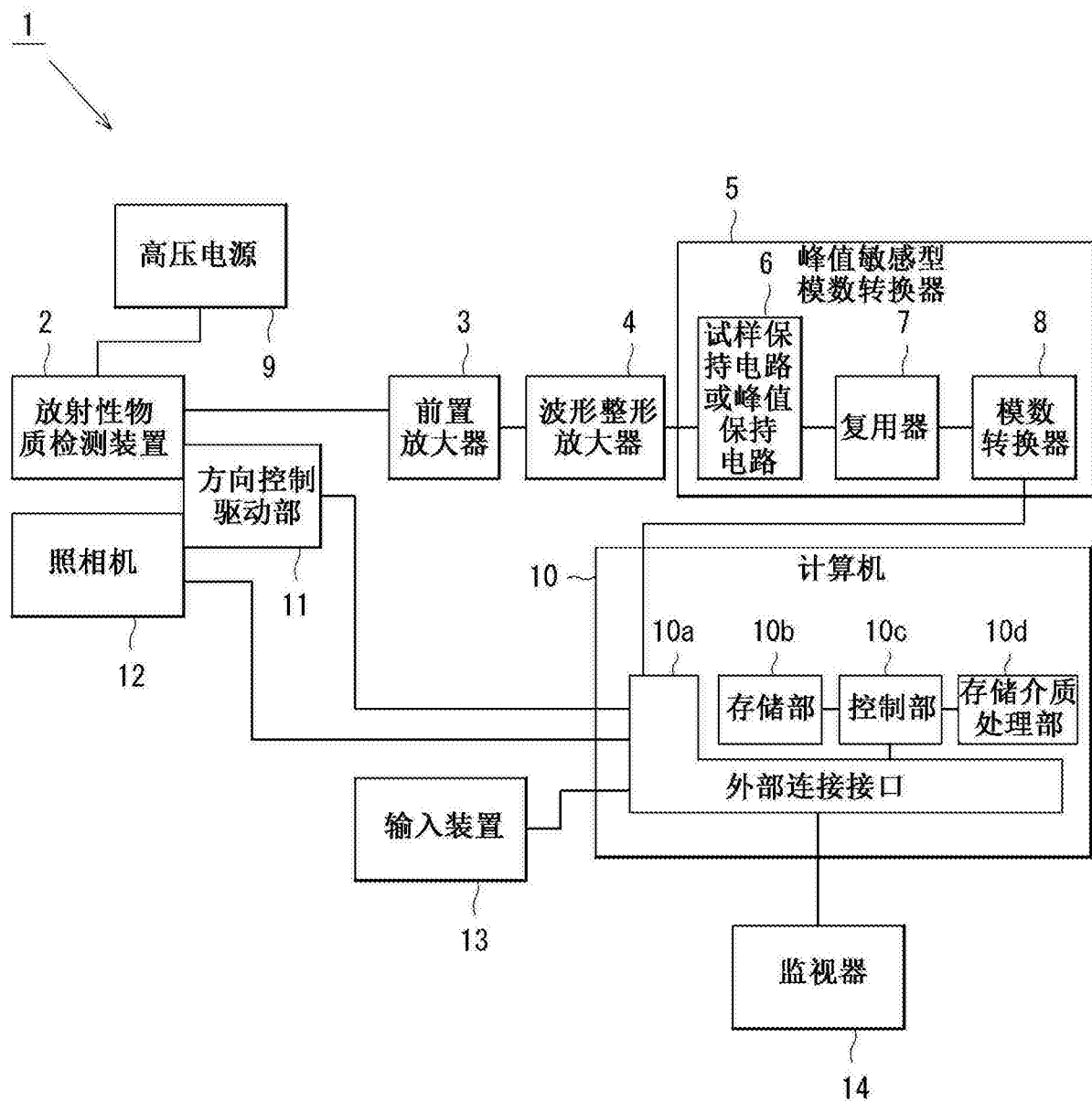


图3



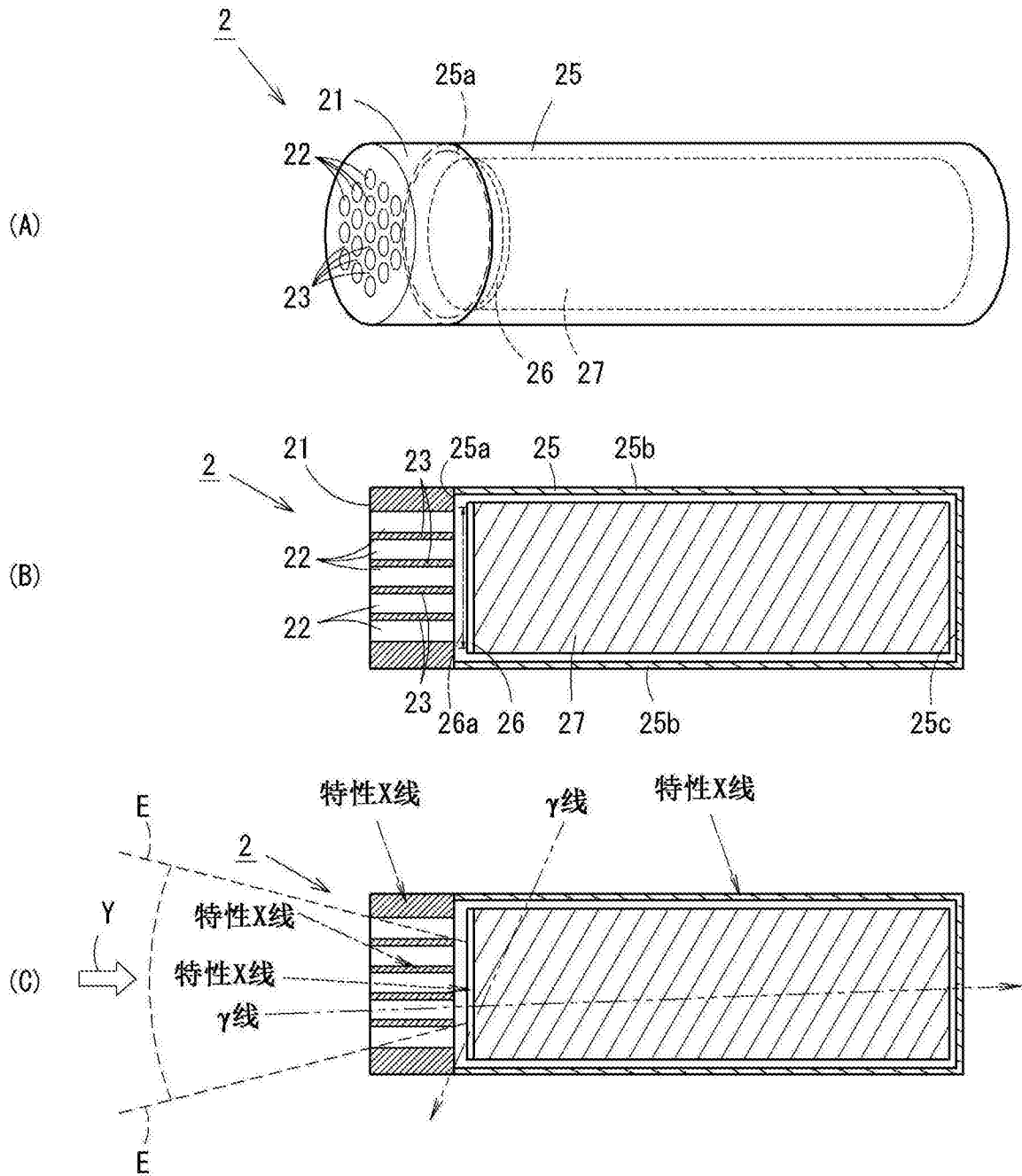


图5

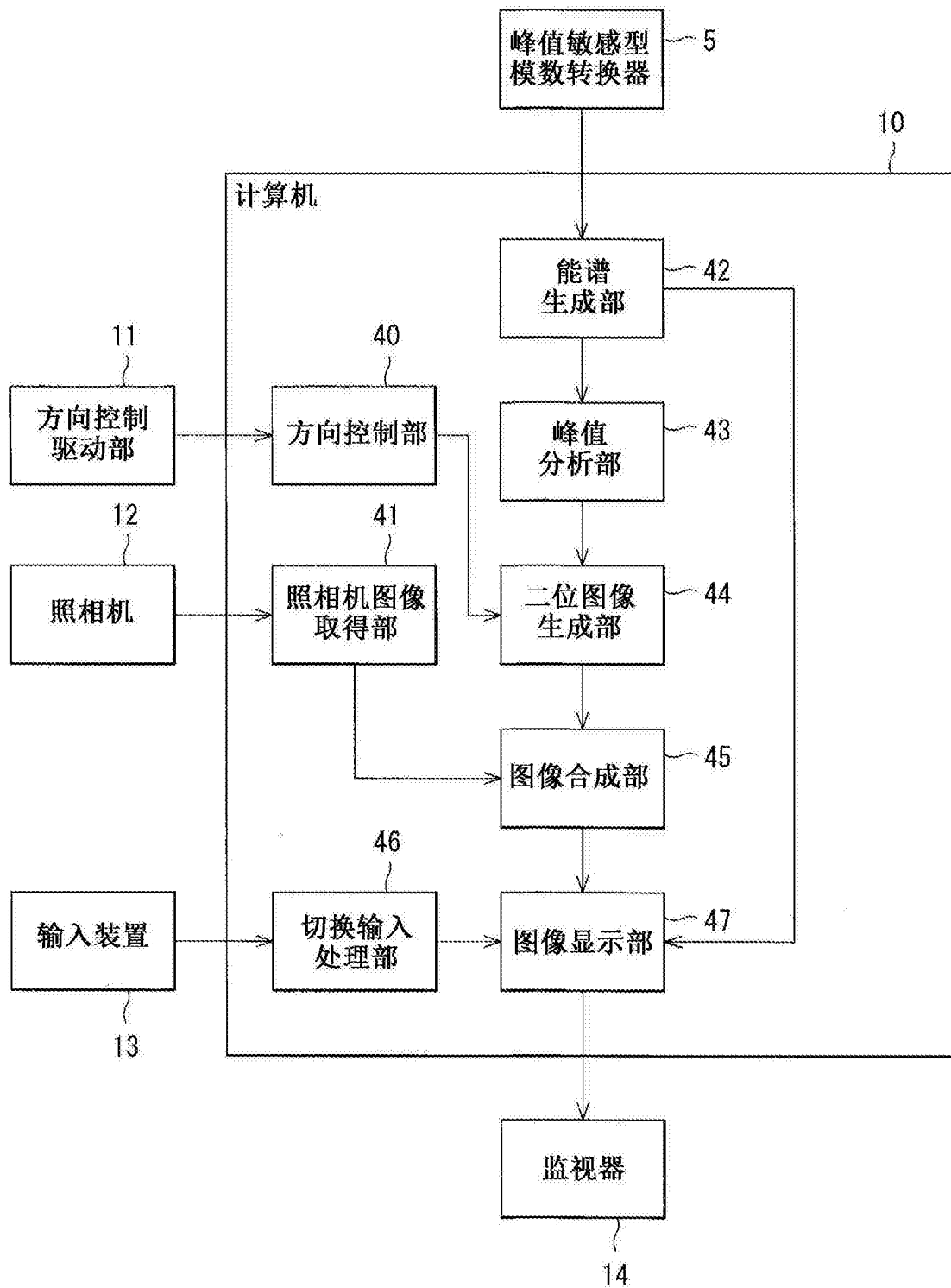


图6

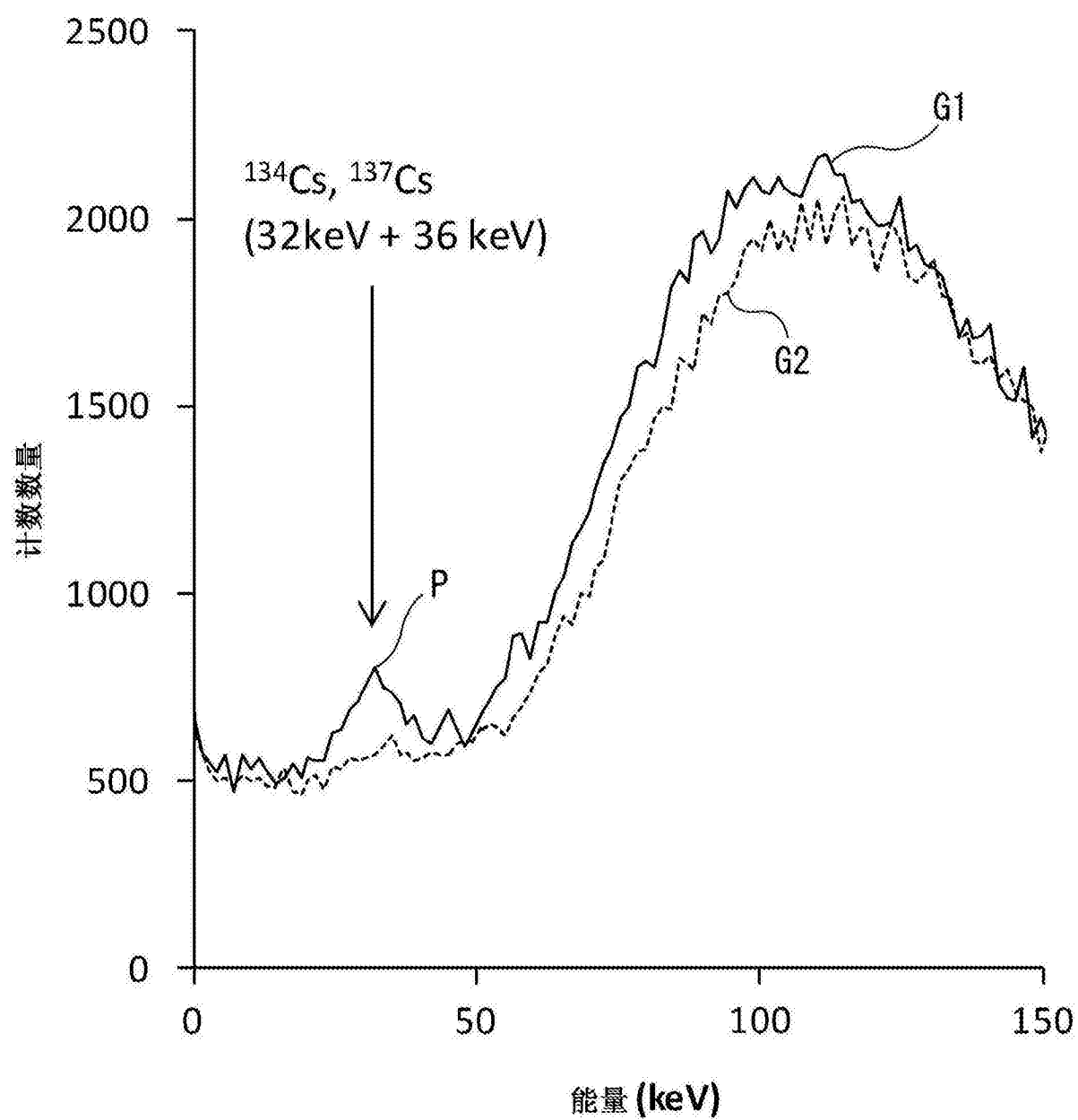


图7



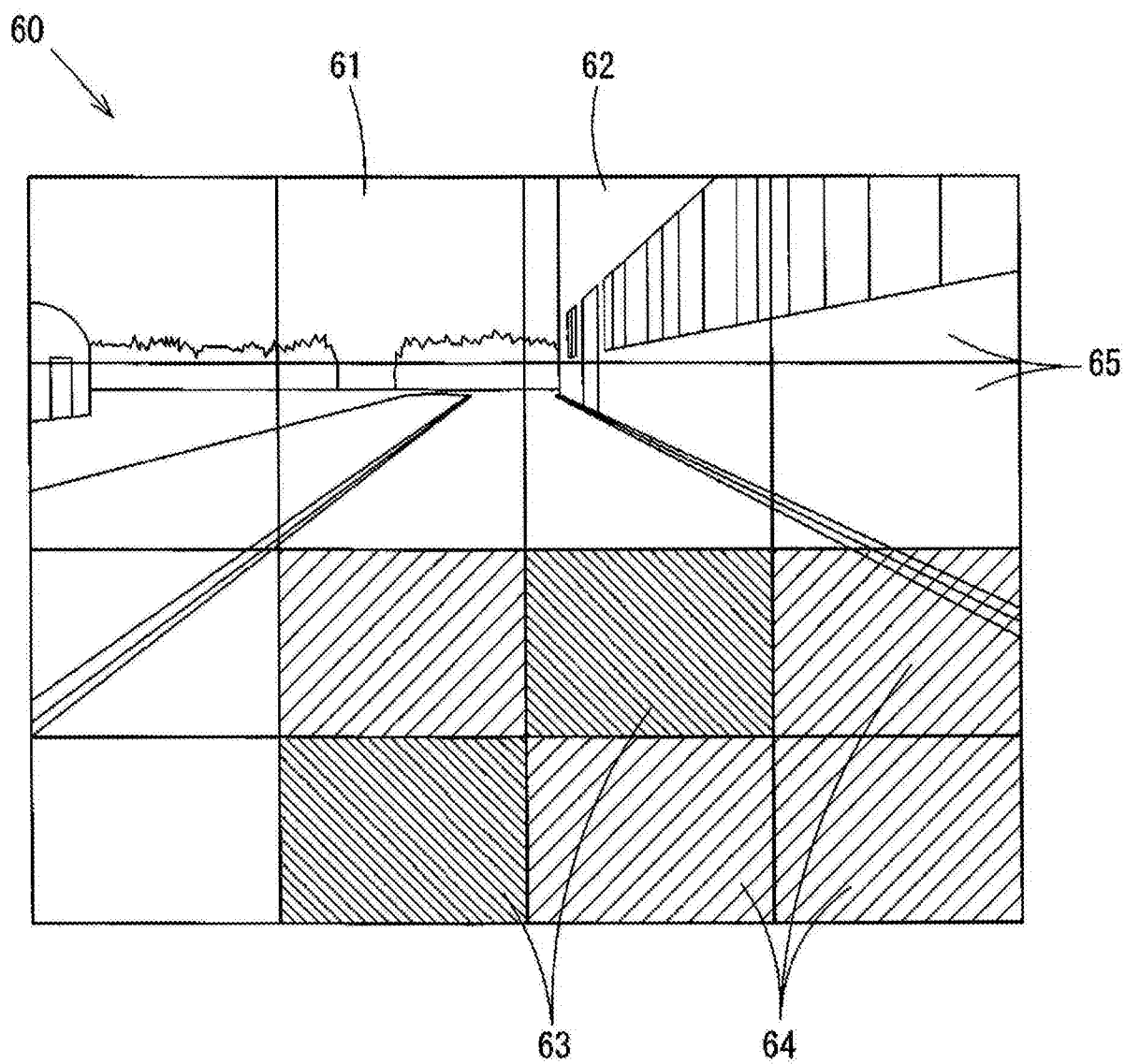


图8

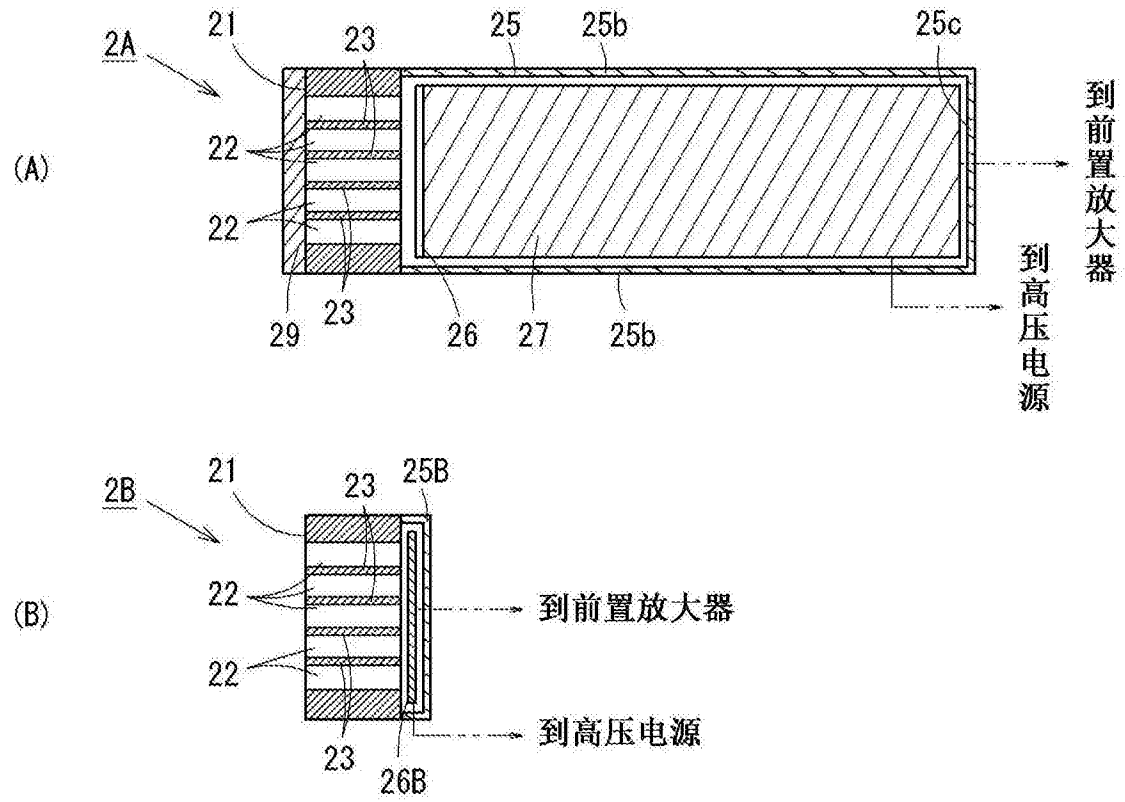


图9

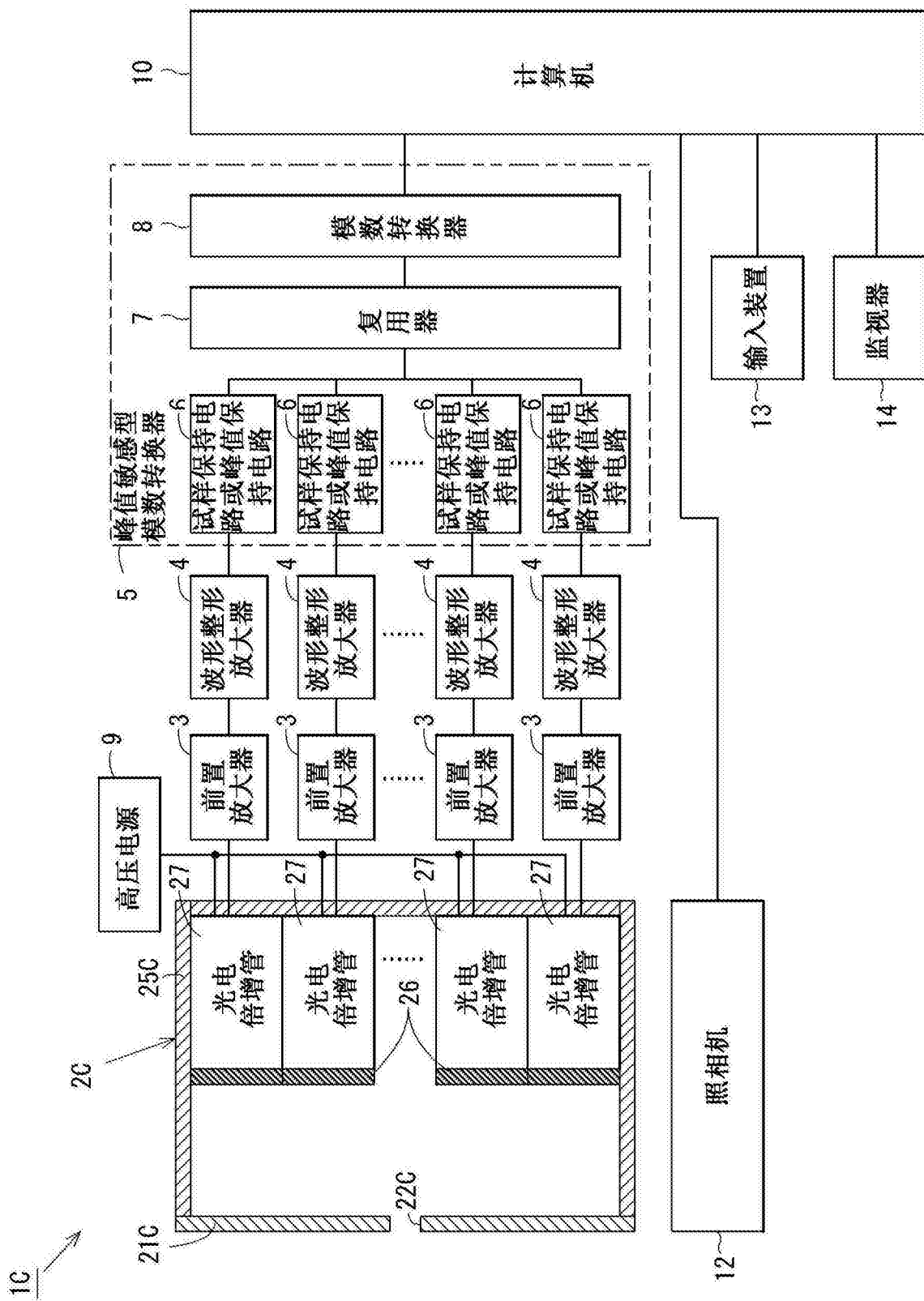


图10

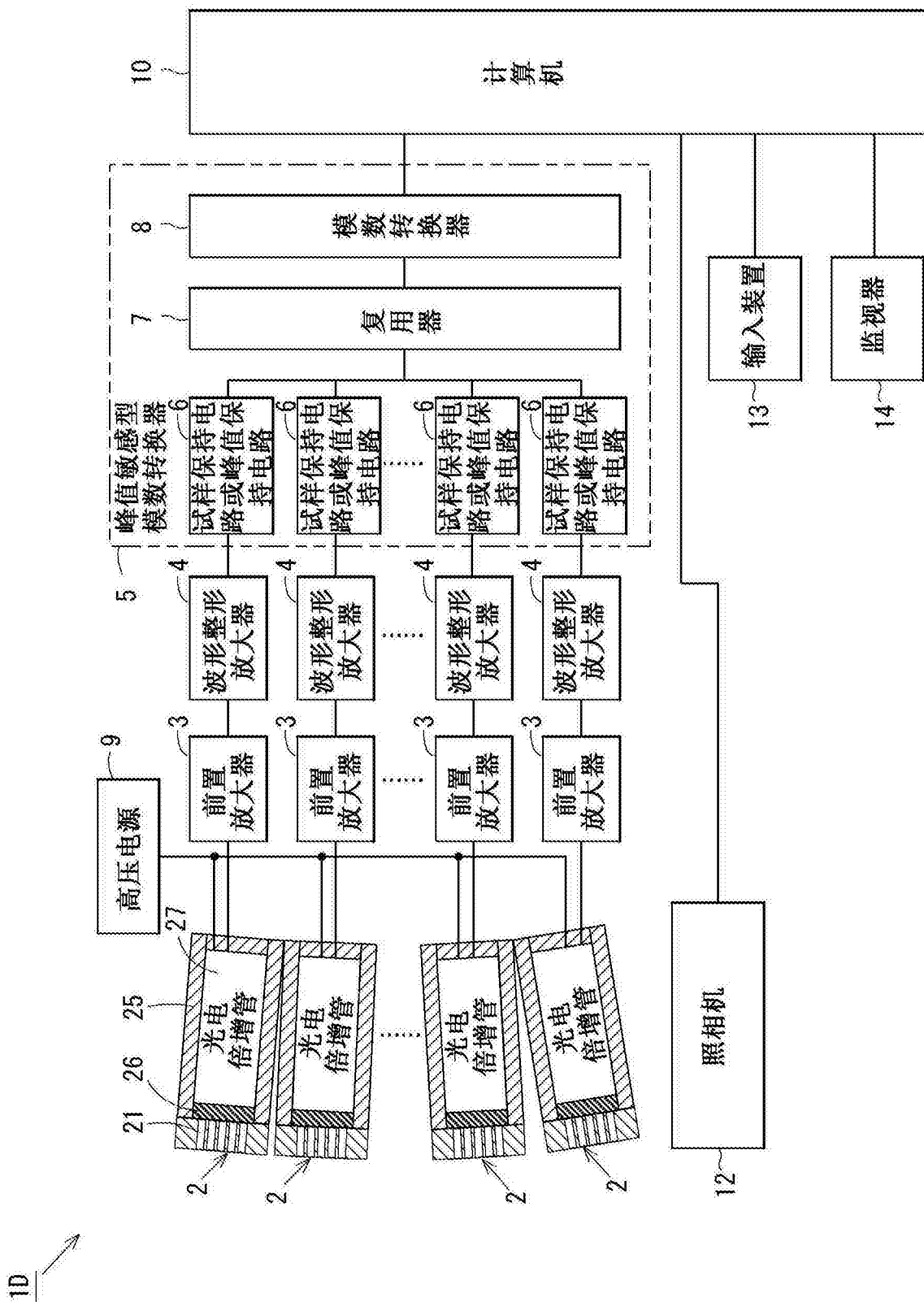


图11

