

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2017年2月2日(02.02.2017)



(10) 国際公開番号

WO 2017/018362 A1

- (51) 国際特許分類:
G01T 1/29 (2006.01) G01T 1/16 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/071641
- (22) 国際出願日: 2016年7月22日(22.07.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2015-147065 2015年7月24日(24.07.2015) JP
- (71) 出願人: 三菱重工業株式会社 (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒1088215 東京都港区港南二丁目16番5号 Tokyo (JP). 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY) [JP/JP]; 〒1828522 東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 玄蕃 恵 (GEMBA Kei); 〒1088215 東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP). 黒田 能克 (KURODA Yoshikatsu); 〒1088215 東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP). 松浦 大介 (MATSUURA Daisuke); 〒1088215 東京都港区港南

二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP). 高橋 忠幸 (TAKAHASHI Tadayuki); 〒2525210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所内 Kanagawa (JP). 渡辺 伸 (WATANABE Shin); 〒2525210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所内 Kanagawa (JP). 武田 伸一郎 (TAKEDA Shin'ichiro); 〒2525210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所内 Kanagawa (JP).

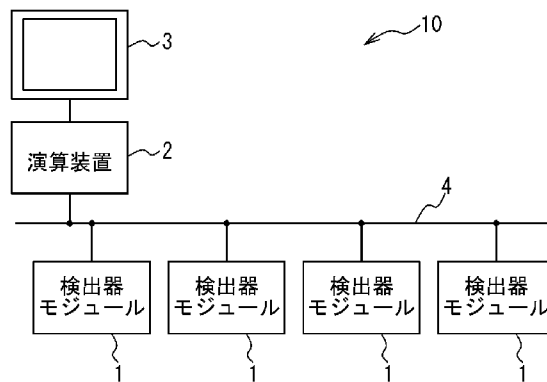
(74) 代理人: 工藤 実 (KUDOH Minoru); 〒1400013 東京都品川区南大井六丁目24番10号カドヤビル6階 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, 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, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, 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, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM,

[続葉有]

(54) Title: RADIATION MEASURING APPARATUS AND RADIATION MEASURING METHOD

(54) 発明の名称: 放射線測定装置及び放射線測定方法



1 Detector module
2 Calculation device

(57) Abstract: This radiation measuring apparatus comprises multiple detector modules and a calculation device. The multiple detector modules each include: multiple detectors; multiple analog signal processing units which are provided correspondingly to the multiple detectors and which each perform analog-digital conversion on an analog signal obtained from the corresponding detector to generate digital measurement data corresponding to the analog signal; and a digital processing unit that transmits, to the calculation device, digital communication data generated from the digital measurement data received from the multiple analog signal processing units. Each of the multiple detectors is either a scattering detector functioning as a scatterer or an absorbing detector functioning as an absorber. The calculation device generates, on the basis of the digital communication data received from the multiple detector modules, a radiation source distribution image indicating spatial distribution of radiation sources.

(57) 要約: 放射線測定装置が、複数の検出器モジュールと、演算装置とを具備する。複数の検出器モジュールのそれぞれは、複数の検出器と、複数の検出器に対

応して設けられ、対応する検出器から得られるアナログ信号に対してアナログ-デジタル変換を行ってアナログ信号に対応するデジタル測定データを生成する複数のアナログ信号処理部と、複数のアナログ信号処理部から受け取られたデジタル測定データから生成されたデジタル通信データを演算装置に送信するデジタル処理部とを含む。複数の検出器のそれぞれは、散乱体として機能する散乱体検出器、又は、吸収体として機能する吸収体検出器のいずれかである。演算装置は、複数の検出器モジュールから受け取られたデジタル通信データに基づいて、放射線源の空間分布を示す線源分布画像を生成する。



WO 2017/018362 A1



ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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,

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))
- 補正された請求の範囲及び説明書 (条約第 19 条(1))

明 細 書

発明の名称：放射線測定装置及び放射線測定方法

技術分野

[0001] 本発明は、放射線測定装置及び放射線測定方法に関し、特に、コンプトン散乱を利用して電磁放射線（例えば、X線、ガンマ線）を測定する装置及び方法に関する。

背景技術

[0002] コンプトンカメラは、放射線源の空間的分布を画像化する放射線測定装置の一種である。コンプトンカメラは、コンプトン散乱を利用して電磁放射線（例えば、X線、ガンマ線）の入射方向を特定し、特定された入射方向から放射線源の空間的分布を表す画像を生成する。

[0003] 図1は、コンプトンカメラの原理、特に、電磁放射線の入射方向の特定の原理を示す図である。コンプトンカメラの検出部は、典型的には、散乱体検出器101と、吸収体検出器102とを備えている。検出効率を上げるため、それぞれが複数の層状に配置されている場合もある。このような構成の検出部において、ある放射線源103から入射された電磁放射線の光子が散乱体検出器101においてコンプトン散乱され、コンプトン散乱された光子が吸収体検出器102で光電吸収によって吸収されるイベントが発生した場合、該電磁放射線の散乱角 θ （言い換えれば、放射線源103と位置X1とを結ぶ線分が、位置X1、X2を通過する直線となす角）は、下記式（1）で与えられる。

[数1]

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad \cdots (1)$$

ここで、 m_e は、電子の静止質量であり、 c は、光速である。また、 E_1 は、散乱体検出器101におけるコンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギーであり、 E_2 は、吸収体検出器102に吸収された光子のエネルギーである。

[0004] コンプトンカメラでは、このようにして得られた電磁放射線の散乱角 θ の情報に基づいて放射線源103の空間的分布を推定し、放射線源103の空間的分布を画像化する。より具体的には、各イベントにおけるコンプトン散乱が発生した位置 X_1 、光電吸収が行われた位置 X_2 及びコンプトン散乱の散乱角 θ の情報から、各イベントのコンプトンコーン104（放射線源が位置し得る点の集合で構成される円錐面）が再構成され、各イベントのコンプトンコーン104の重ね合わせに対応する画像が、放射線源103の空間的分布を示す線源分布画像として生成される。

[0005] なお、特開2011-85418号公報は、放射線のエネルギーに応じて最適な方式で放射線測定を行うための放射線測定装置を開示している。該放射線測定装置は、コンプトンカメラの原理に従って線源分布画像を得る第1測定モードと、検出構造体の応答特性と実際の検出結果とに基づく最尤推定期待値最大化演算により線源分布画像を得る第2測定モードを有している。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2011-85418号公報

発明の概要

[0007] 発明者の検討によれば、現在のコンプトンカメラの課題の一つは、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応できないことである。言い換えれば、現在のコンプトンカメラは、コンプトンカメラに対する様々な要求に柔軟に対応することが難しい。例えば、放射される電磁放射線のエネルギー及びフラックスは、様々な相違し得るが、現在のコンプトンカメラは、エネルギー及びフラックスの相違に柔軟に対応するように構成を自在に変えることは困難である。放射線源に関する柔軟性が高い放射線測定装置が提供されれば、ユーザとしては、同一の放射線測定装置で様々な測定を実施することができ、

利便性が向上する。放射線測定装置の製造者にとっても、放射線源の相違に合わせて様々な放射線測定装置を製造する必要性がなくなるという利点がある。

[0008] より具体的な例を挙げれば、コンプトンカメラに対する要求としては、例えば、下記が挙げられる：

- (a) 多様な核ガンマ線を識別するための高いエネルギー分解能（例えば、 $\Delta E / E$ が 3 % 程度）
- (b) 放射線源が集積する位置や距離を特定するためのガンマ線到来方向の高い分解能（例えば、角度分解能 10 度以下）。
- (c) 現場で管理が必要となる低濃度放射性物質の集積を短時間で可視化する感度
- (d) 多様な形態の放射線源の集積に対応するような広い視野
- (e) 医療用途において人体などに近接して設置可能なコンパクトさ
- (f) 医療用途において人体内のサブ mm から 1 mm の大きさの放射線源の集積を識別する角度分解能
- (g) 極めて高い放射線フラックス（高濃度放射性物質）に対してもパイルアップを起こすことなく計測可能な測定性能

このような要求に合わせて柔軟に対応可能な構成のコンプトンカメラが提供すれば、ユーザの利便性を向上させることができる。

[0009] したがって、本発明の目的の 1 つは、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応できる放射線測定装置を提供することにある。

[0010] 本発明の他の目的及び特徴は、以下の説明と添付図面から理解されるであろう。

[0011] 本発明の一の観点では、放射線測定装置が、複数の検出器モジュールと、演算装置を具備する。複数の検出器モジュールのそれぞれは、複数の検出器と、複数の検出器に対応して設けられ、対応する検出器から得られるアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってアナログ信号に対応するデジタル測定データを生成する複数のアナログ信号処理部と、複数のアナログ

信号処理部から受け取られたデジタル測定データから生成されたデジタル通信データを演算装置に送信するデジタル処理部とを含む。複数の検出器のそれぞれは、電磁放射線を散乱する散乱体として機能する散乱体検出器、又は、電磁放射線を吸収する吸収体として機能する吸収体検出器のいずれかである。当該放射線測定装置に含まれる検出器のうちの少なくとも一は、散乱体検出器であり、当該放射線測定装置に含まれる検出器のうちの少なくとも一は、吸収体検出器である。演算装置は、複数の検出器モジュールから受け取られたデジタル通信データに基づいて、放射線源の空間分布を示す線源分布画像を生成する。

[0012] このような構成の放射線測定装置では、放射線源の性質に応じて複数の検出器モジュールを配置することにより、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応できる。

[0013] 一実施形態では、演算装置は、複数の検出器モジュールのうちの第1検出器モジュールの散乱体検出器でコンプトン散乱が発生し、コンプトン散乱によって散乱された光子が複数の検出器モジュールのうちの第1検出器モジュールと異なる第2検出器モジュールの吸収体検出器において吸収される光電吸収が発生するイベントの発生を複数の検出器モジュールから受け取られたデジタル通信データに基づいて検出した場合、イベントに対応するコンプトンコーンの再構成を行い、コンプトンコーンに基づいて線源分布画像を生成するように構成されている。

[0014] 一実施形態では、演算装置は、複数の検出器モジュールのそれぞれに同期データ又は同期信号を供給し、複数の検出器モジュールのそれぞれは、同期データ又は同期信号に同期して生成された測定時刻データを含むようにデジタル通信データを生成する。この場合、演算装置は、測定時刻データに基づいて、第1検出器モジュールの散乱体検出器でコンプトン散乱が発生し、第2検出器モジュールの吸収体検出器においてコンプトン散乱で散乱された光子が吸収される光電吸収が発生するイベントの発生を検出する。このような構成によれば、異なる検出器モジュールでコンプトン散乱と光電吸収が発生

しても、それらが同一の光子に関係していることを確実に検知することができる。

[0015] 一実施形態では、複数の検出器モジュールのそれぞれのデジタル処理部は、複数の検出器のうちの散乱体検出器においてコンプトン散乱が発生した散乱位置及びコンプトン散乱において反跳電子に与えられたエネルギーである第1エネルギーをデジタル測定データに基づいて特定し、散乱位置及び第1エネルギーを記述したデータを含むようにデジタル通信データを生成するように構成されている。

[0016] 他の実施形態では、複数の検出器モジュールのそれぞれのデジタル処理部は、複数の検出器のうちの吸収体検出器において光電吸収が発生した吸収位置及び光電吸収において吸収されたエネルギーである第2エネルギーをデジタル測定データに基づいて特定し、吸収位置及び第2エネルギーを記述したデータを含むようにデジタル通信データを生成するように構成されている。

[0017] また、複数の検出器モジュールのそれぞれに含まれる複数の検出器の少なくとも一が、散乱体検出器であり、複数の検出器モジュール(1)のそれぞれに含まれる複数の検出器の少なくとも一が、吸収体検出器である場合、複数の検出器モジュールのそれぞれのデジタル処理部は、複数の検出器のうちの散乱体検出器においてコンプトン散乱が発生した散乱発生位置及びコンプトン散乱において反跳電子に与えられたエネルギーである第1エネルギーをデジタル測定データに基づいて特定し、複数の検出器のうちの吸収体検出器への光電吸収が発生した吸収位置及び光電吸収において吸収されたエネルギーである第2エネルギーをデジタル測定データに基づいて特定し、且つ、散乱発生位置、第1エネルギー、吸収位置及び第2エネルギーを記述したデータを含むようにデジタル通信データを生成するように構成されている。

[0018] これらの構成によれば、演算装置に送られるデジタル通信データのデータ量を低減することができる。

[0019] 一実施形態では、複数の検出器モジュールに含まれる散乱体検出器の数が同一であり、複数の検出器モジュールに含まれる吸収体検出器の数が同一で

ある。好ましくは、複数の検出器モジュールが、同一の構成を有している。このような構成によれば、各検出器モジュールのコストを低減することができる。

[0020] 一実施形態では、複数の検出器モジュールのそれぞれのデジタル処理部は、無線通信によって演算装置にデジタル通信データを送信する。このような構成によれば、複数の検出器モジュールの配置の自由度を向上させることができる。

[0021] 複数の検出器モジュールのそれぞれは、複数の検出器と、複数のアナログ信号処理部と、デジタル処理部とを収容する筐体を具備していてもよい。この場合、複数の検出器モジュールのそれぞれの筐体は、他の検出器モジュールの筐体と連結する連結機構を有していることが好ましい。このような構成によれば、複数の検出器モジュールの相対的な位置関係を確実に固定することができる。

[0022] 本発明の他の観点では、それぞれが複数の検出器を備えた複数の検出器モジュールと演算装置とを備える放射線測定装置であって、複数の検出器のそれぞれが、電磁放射線をコンプトン散乱によって散乱する散乱体として機能する散乱体検出器、又は、電磁放射線を吸収する吸収体として機能する吸収体検出器のいずれかであり、放射線測定装置に含まれる検出器のうちの少なくとも一は、散乱体検出器であり、放射線測定装置に含まれる検出器のうちの少なくとも一は、吸収体検出器である放射線測定装置を用いる放射線測定方法が提供される。当該放射線測定方法は、複数の検出器モジュールを配置するステップと、複数の検出器モジュールのそれぞれが、複数の検出器から得られるアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってアナログ信号に対応するデジタル測定データを生成するステップと、複数の検出器モジュールのそれぞれが、デジタル測定データからデジタル通信データを生成し、デジタル通信データを演算装置に送信するステップと、演算装置が、デジタル通信データに基づいて放射線源の空間分布を示す線源分布画像を生成するステップとを具備する。このような放射線測定方法では、放射線源の性質

に応じて複数の検出器モジュールを配置することにより、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応できる。

[0023] 本発明によれば、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応できる放射線測定装置を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0024] [図1]コンプトンカメラの原理、特に、電磁放射線の入射方向の特定の原理を示す図である。

[図2]コンプトンカメラの検出部の構成の一例を示す図である。

[図3]コンプトンカメラの検出部の構成の他の例を示す図である。

[図4]コンプトンカメラの検出部の構成の他の例を示す図である。

[図5]コンプトンカメラの検出部の構成の他の例を示す図である。

[図6]コンプトンカメラの検出部の構成の他の例を示す図である。

[図7]本発明の一実施形態の放射線測定装置の構成を示すブロック図である。

[図8]本発明の一実施形態の放射線測定装置の構成の変形例を示すブロック図である。

[図9]一実施形態における検出器モジュールの構成の一例を示すブロック図である。

[図10A]本実施形態における散乱体検出器及び吸収体検出器の構成の一例を示す平面図である。

[図10B]本実施形態における散乱体検出器及び吸収体検出器の構成の一例を示す断面図である。

[図11A]本実施形態における散乱体検出器及び吸収体検出器の構成の他の例を示す上面図である。

[図11B]本実施形態における散乱体検出器及び吸収体検出器の構成の他の例を示す下面図である。

[図11C]本実施形態における散乱体検出器及び吸収体検出器の構成の他の例を示す断面図である。

[図12A]本実施形態における検出器モジュールの構成の一例を示す斜視図であ

る。

[図12B]本実施形態における検出器ボードの構成の一例を示す平面図である。

[図12C]本実施形態における検出器ボードの構成の一例を示す平面図である。

[図13]本実施形態における検出器モジュールの配置の一例を示す概念図である。

[図14]本実施形態における検出器モジュールの配置の他の例を示す概念図である。

[図15]本実施形態における検出器モジュールの配置の他の例を示す概念図である。

[図16]本実施形態における検出器モジュールの配置の他の例を示す概念図である。

[図17]本実施形態における検出器モジュールの配置の他の例を示す概念図である。

[図18A]検出器モジュールの構成の変形例を示す概念図である。

[図18B]検出器モジュールの構成の変形例を示す概念図である。

[図19A]本実施形態において、視野角を広くするための検出器モジュールの配置の例を示す概念図である。

[図19B]本実施形態において、角度分解能を高くするための検出器モジュールの配置の例を示す概念図である。

[図20]本実施形態における線源分布画像の生成の手順を示すフローチャートである。

[図21A]本発明の一実施形態において、筐体に設けられた連結機構を用いた検出器モジュールの連結の一例を概念的に示す図である。

[図21B]該実施形態における、筐体に設けられた連結機構を用いた検出器モジュールの連結の他の例を概念的に示す図である。

発明を実施するための形態

[0025] 以下では、まず、本発明の技術的意義の理解を容易にするために、一般的なコンプトンカメラの課題について説明する。

[0026] 図2は、コンプトンカメラの検出部100の典型的な構成を概略的に示す図である。図2に示されるように、コンプトンカメラの検出部100には、典型的には、電磁放射線の入射側に散乱体検出器101が設けられ、後方に吸収体検出器102が設けられる。一般的には、散乱体検出器101におけるコンプトン散乱の発生確率を増加させるために複数の散乱体検出器101が設けられ、また、光電吸収による吸収確率を増加させるために複数の吸収体検出器102が設けられる。

[0027] しかしながら、このような構成のコンプトンカメラの検出部100は、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応することが困難である。例えば、高エネルギーの電磁放射線を測定する場合には、図3に示されるように、層方向に並べられる散乱体検出器101、吸収体検出器102の数が増加されることが望ましい。これは、高エネルギーの電磁放射線は、コンプトン散乱の発生確率及び光電吸収による吸収確率が低く、また、コンプトン散乱における散乱角が小さいためである。

[0028] その一方で、低エネルギーの電磁放射線を測定する場合には、図4に示されるように、層方向に並べられる散乱体検出器101、吸収体検出器102の数が減少されると共に、吸収体検出器102が散乱体検出器101の後方のみならず、側方にも設けられることが望ましい。これは、低エネルギーの電磁放射線は、コンプトン散乱の発生確率及び光電吸収による吸収確率が高く、コンプトン散乱における散乱角が大きいからである。散乱体検出器101の側方に設けられた吸収体検出器102は、大きな散乱角で散乱した電磁放射線の光子を捕捉するために有用である。

[0029] 更に、高フラックスの電磁放射線を測定する場合には、図5に示されるように、層方向に並べられる散乱体検出器101、吸収体検出器102の数が減少されることが望ましい。一方、低フラックスの電磁放射線を測定する場合には、図6に示されるように、高感度で電磁放射線を測定する場合には、層方向に並べられる散乱体検出器101、吸収体検出器102の数が増加されることが望ましい。

[0030] このように、コンプトンカメラの検出部１００の望ましい構成は、放射線源の性質に応じて異なっている。これは、逆に言えば、ある特定の構成の検出部１００で様々な性質の放射線源から放出される電磁放射線の測定を適正に行うことは困難であることを意味している。以下に述べられる本発明の実施形態では、このような問題に対処し、放射線源の性質の相違に柔軟に対応可能な放射線測定装置が提示される。

[0031] 図７、図８は、本発明の一実施形態における放射線測定装置１０の構成を示すブロック図である。本実施形態では、放射線測定装置１０は、複数の検出器モジュール１と、演算装置２と、表示装置３とを備えている。複数の検出器モジュール１と演算装置２とは、通信可能に接続されている。一実施形態では、図７に示されるように、複数の検出器モジュール１と演算装置２とは、有線回線、より具体的には、有線ネットワーク４（例えば、有線ＬＡＮ（local area network））を介して接続されてもよい。また、図８に示されるように、複数の検出器モジュール１と演算装置２とは、無線通信（例えば、無線ＬＡＮ）によって接続されてもよい。複数の検出器モジュール１と演算装置２とが無線通信によって接続されることは、検出器モジュール１と演算装置２との間を配線で接続する必要をなくし、検出器モジュール１の配置の自由度を向上できる点で有用である。

[0032] 各検出器モジュール１には、電離放射線を検出するための複数の検出器が搭載されている。後述されるように、各検出器モジュール１は、それに搭載された複数の検出器から出力されるアナログ信号に基づいて、生成されたデジタル通信データを演算装置２に送信するように構成されている。演算装置２は、各検出器モジュール１から受け取られたデジタル通信データに基づいて放射線源の空間的分布を示す画像である線源分布画像を生成し、該線源分布画像を表示装置３に表示する。

[0033] 図９は、各検出器モジュール１の構成を概略的に示すブロック図である。各検出器モジュール１は、筐体１１と、受光部１２と、制御部１３とを備えている。受光部１２と制御部１３とは、筐体１１の内部に収容されている。

[0034] 受光部 12 は、電離放射線を検出するための複数の検出器を備えている。本実施形態では、各検出器モジュール 1 に含まれる複数の検出器のうち少なくとも一つが、散乱体検出器 14 であり、少なくとも一つが吸収体検出器 15 である。散乱体検出器 14 は、散乱体となる検出器であり、コンプトン散乱が起きやすくなるように、原子番号が小さい材料（例えば、シリコン）で形成される。散乱体検出器 14 は、電磁放射線が入射されたときにコンプトン散乱が発生した位置 X_1 、及び、該コンプトン散乱によって反跳電子が得たエネルギー E_1 （即ち、該コンプトン散乱により電磁放射線が散乱体検出器 14 において失ったエネルギー）の検出が可能であるように構成されている。一方、吸収体検出器 15 は、吸収体となる検出器であり、光電吸収が起きやすいように原子番号が大きい材料（例えば、CdTe 及び CdZnTe）で形成される。吸収体検出器 15 は、電磁放射線がコンプトン散乱後に光電吸収によって吸収体検出器 15 に吸収された位置 X_2 、及び、吸収体検出器 15 に吸収された電磁放射線のエネルギー E_2 の検出が可能であるように構成されている。

[0035] 図 9 の構成では、各検出器モジュール 1 の受光部 12 は、4 つの散乱体検出器 14 と、1 つの吸収体検出器 15 を備えている。ただし、受光部 12 に含まれる散乱体検出器 14、吸収体検出器 15 の数は、適宜に変更可能である。ただし、放射線測定装置 10 の全体としては、少なくとも一つの散乱体検出器 14 と、少なくとも一つの吸収体検出器 15 が含まれる。

[0036] 散乱体検出器 14 としては、様々な構成の検出器が使用され得る。図 10A、図 10B は、ピクセル型検出器として構成されている場合の散乱体検出器 14 の構成の一例を図示している。ここで、図 10A は、散乱体検出器 14 の構成を示す平面図であり、図 10B は、図 10A の A-A 断面における散乱体検出器 14 の構成を示す断面図である。図 10A、図 10B の構成では、散乱体検出器 14 が、半導体層 21 と、半導体層 21 の第 1 主面に行列に配置された複数の画素電極 22 と、半導体層 21 の第 2 主面（第 1 主面に対向する主面）のほぼ全体を被覆するように設けられた共通電極 23 とを具

備している。半導体層 2 1 の各画素電極 2 2 と共通電極 2 3 とで挟まれた部分が、電磁放射線を検出する一つのセルを形成している。電磁放射線の測定においては、各セルで生成された電荷の量に対応するアナログ信号が散乱体検出器 1 4 から出力される。散乱体検出器 1 4 の半導体層 2 1 は、コンプトン散乱を起こしやすい（即ち、原子番号が小さい）半導体材料、例えば、シリコンで形成される。画素電極 2 2 及び共通電極 2 3 は、半導体層 2 1 がシリコンで形成される場合、例えば、アルミニウムで形成される。

[0037] 図 1 1 A～図 1 1 C は、ストリップ型検出器として構成された散乱体検出器 1 4 の構成の一例を概念的に示す図である。ここで、図 1 1 A は、散乱体検出器 1 4 の構成を示す上面図であり、図 1 1 B は、散乱体検出器 1 4 の構成を示す下面図であり、図 1 1 C は、B－B 断面における散乱体検出器 1 4 の構成を示す断面図である。図 1 1 A～図 1 1 C に示される散乱体検出器 1 4 の構成では、画素電極 2 2 と共通電極 2 3 の代わりに、半導体層 2 1 の第 1 主面に形成された複数の第 1 ストリップ電極 2 4 と、半導体層 2 1 の第 2 主面に形成された複数の第 2 ストリップ電極 2 5 とが用いられる。図 1 1 A に示されるように、第 1 ストリップ電極 2 4 は、第 1 方向（図 1 1 A では、Y 軸方向）に延伸するように配置されており、第 2 ストリップ電極 2 5 は、第 1 方向に垂直な第 2 方向（図 1 1 B では、X 軸方向）に延伸するように配置されている。半導体層 2 1 の、一の第 1 ストリップ電極 2 4 と、該第 1 ストリップ電極 2 4 と交差する一の第 2 ストリップ電極 2 5 とで挟まれた部分が、電磁放射線を検出する一つのセルを形成している。第 1 ストリップ電極 2 4 をセルの選択に用いる場合、第 1 ストリップ電極 2 4 で選択されたセルのそれぞれで生成された電荷の量に対応するアナログ信号が第 2 ストリップ電極 2 5 から出力される。

[0038] 吸収体検出器 1 5 は、散乱体検出器 1 4 と同様に構成されている。ただし、吸収体検出器 1 5 では、散乱体検出器 1 4 と異なる材料の半導体層 2 1 が使用される。より具体的には、吸収体検出器 1 5 の半導体層 2 1 は、光電吸収が起きやすい（即ち、原子番号が大きい）半導体材料、例えば、CdTe

又はCdZnTeで形成される。

[0039] 図9を再度に参照して、制御部13は、ASIC (application specific integrated circuit) 16、17と、デジタル処理部18と、通信インタフェース19とを備えている。ASIC 16は、散乱体検出器14の各セルからアナログ信号を読み出し、該アナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成するアナログ信号処理部として動作する。各ASIC 16は、典型的には、散乱体検出器14の各セルから読み出されたアナログ信号を積分する積分器として動作するプリアンプ16aと、該プリアンプ16aの出力に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成するAD変換器16bとを備えている。

[0040] 図9には、1つの散乱体検出器14に対して1つのASIC 16が設けられている構成が示されるが、実際の実装においては、各散乱体検出器14が複数の領域に分割され、各領域に対して一つのASIC 16が設けられてもよい。この場合、該複数のASIC 16が、アナログ信号処理部として動作し、各ASIC 16は、対応する領域のセルから読み出したアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成する。

[0041] ASIC 17は、吸収体検出器15の各セルからアナログ信号を読み出し、該アナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成するアナログ信号処理部として動作する。ASIC 17は、典型的には、吸収体検出器15の各セルから読み出されたアナログ信号を積分する積分器として動作するプリアンプ17aと、該プリアンプ17aの出力に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成するAD変換器17bとを備えている。

[0042] 図9には、1つの吸収体検出器15に対して1つのASIC 17が設けられている構成が示されるが、実際の実装においては、吸収体検出器15が複数の領域（例えば、4つの領域）に分割され、各領域に対して一つのASIC 17が設けられてもよい。この場合、該複数のASIC 17が、アナログ信号処理部として動作し、各ASIC 17は、対応する領域のセルから読み

出したアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成する。

[0043] デジタル処理部 18 は、2つの機能を有している。第 1 に、デジタル処理部 18 は、所望のタイミングで散乱体検出器 14、吸収体検出器 15 からアナログ信号を読み出してデジタル測定データを生成するように A S I C 16、17 を制御する。加えて、デジタル処理部 18 は、A S I C 16、17 から受け取られたデジタル測定データから、演算装置 2 に送信するデジタル通信データを生成する。

[0044] 一実施形態では、デジタル処理部 18 は、A S I C 16、17 から受け取られたデジタル測定データを、そのまま纏めてデジタル通信データを生成する。デジタル処理部 18 は、生成された該デジタル通信データを、通信インタフェース 19 によって演算装置 2 に送信する。この場合、演算装置 2 は、受け取られたデジタル通信データに含まれているデジタル測定データに基づいて、散乱体検出器 14 に入射された電磁放射線についてコンプトン散乱が発生した位置 X_1 、該コンプトン散乱によって反跳電子が得たエネルギー E_1 、散乱後の電磁放射線が光電吸収によって吸収体検出器 15 に吸収された位置 X_2 、及び、吸収体検出器 15 に吸収された電磁放射線のエネルギー E_2 を特定する。

[0045] 他の実施形態では、デジタル処理部 18 は、A S I C 16、17 から受け取られたデジタル測定データから、コンプトン散乱が発生した位置 X_1 、該コンプトン散乱によって反跳電子が得たエネルギー E_1 、散乱後の電磁放射線が吸収体検出器 15 に吸収された位置 X_2 、及び、吸収体検出器 15 に吸収された電磁放射線のエネルギー E_2 を特定する演算を行うように構成されてもよい。この場合、デジタル処理部 18 は、位置 X_1 、エネルギー E_1 、位置 X_2 、及び、エネルギー E_2 を記述したデータを含むデジタル通信データを生成し、生成されたデジタル通信データを通信インタフェース 19 によって演算装置 2 に送信する。

[0046] 通信インタフェース 19 は、デジタル処理部 18 によって生成されたデジ

タル通信データを演算装置 2 に送信し、また、演算装置 2 から送られてくる制御データ（例えば、複数の検出器モジュール 1 の時間同期を確立するための同期データ）を、デジタル処理部 18 に転送する。通信インタフェース 19 と演算装置 2 の間の通信は、図 7 に示されるように、有線ネットワーク 4 によって行われてもよいし、また、図 8 に示されるように、無線通信によって行われてもよい。

[0047] 図 12A は、各検出器モジュール 1 の実装の例を示す斜視図であり、図 12B、図 12C は、それぞれ、散乱体検出器 14 及び吸収体検出器 15 が実装された検出器ボードの構成を示す平面図である。図 12A に示されるように、本実施形態では、筐体 11 が、台座 31 を有しており、台座 31 の上に、検出器ボード 32、33 が順次に積層されている。検出器ボード 32、33 は、台座 31 から検出器ボード 32、33 の積層方向に延伸する支持部材 34、35 により、筐体 11 内の所望の位置に固定されている。加えて、台座 31 には、上述のデジタル処理部 18 と通信インタフェース 19 とが搭載される（図 12A には図示されない）。

[0048] 図 12B に示されるように、各検出器ボード 32 は、散乱体検出器 14 と、該散乱体検出器 14 に接続された A S I C 16 とを搭載する基板 36 を備えている。本実施形態では、各散乱体検出器 14 が 4 つの領域に区分され、該 4 つの領域に対応して 4 つの A S I C 16 が設けられている。即ち、各検出器ボード 32 には、1 つの散乱体検出器 14 と、4 つの A S I C 16 とが設けられている。各 A S I C 16 は、配線 37 を介して散乱体検出器 14 の対応する領域に接続されており、対応する領域のセルから読み出したアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成する。A S I C 16 は、更に、配線 38 を介してデジタル処理部 18 に接続されている。図 12A に図示された構成では、各検出器モジュール 1 の受光部 12 に含まれる散乱体検出器 14 の数が 4 であり、よって、検出器ボード 32 の数も 4 である。

[0049] 検出器ボード 33 は、散乱体検出器 14 の代わりに吸収体検出器 15 を搭

載していることを除けば、検出器ボード 32 と同様の構成を有している。図 12C に示されるように、検出器ボード 33 は、吸収体検出器 15 と、該吸収体検出器 15 に接続された ASIC 17 とを搭載する基板 39 を備えている。本実施形態では、各吸収体検出器 15 が 4 つの領域に区分され、該 4 つの領域に対応して 4 つの ASIC 17 が設けられている。即ち、各基板 39 には、1 つの吸収体検出器 15 と、4 つの ASIC 17 とが設けられている。各 ASIC 17 は、対応する領域のセルから読み出したアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成する。各 ASIC 17 は、配線 40 を介して吸収体検出器 15 の対応するセルに接続されており、対応する領域のセルから読み出したアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行ってデジタル測定データを生成する。ASIC 17 は、更に、配線 41 を介してデジタル処理部 18 に接続されている。図 12A に図示された構成では、各検出器モジュール 1 の受光部 12 に含まれる吸収体検出器 15 の数が 1 であり、よって、検出器ボード 33 の数も 1 である。

[0050] 本実施形態では、上述の構成の検出器モジュール 1 を複数用いて、電磁放射線が測定され、より具体的には、放射線源の空間的分布を示す画像である線源分布画像が生成される。複数の検出器モジュール 1 を用いて電磁放射線の測定を行う場合の一つの問題は、複数の検出器モジュール 1 の間の時間的な同期の確立である。複数の検出器モジュール 1 が用いられる本実施形態の放射線測定装置 10 では、異なる検出器モジュール 1 で電磁放射線のコンプトン散乱と光電吸収が発生するという事態が生じ得る。この場合、当該コンプトン散乱と光電吸収が同一の光子について発生したイベントであるか否か（即ち、電磁放射線の同一の光子に対して行われたコンプトン散乱と光電吸収なのか）を判断する必要がある。そのためには、複数の検出器モジュール 1 が時間的に同期して動作していることが必要である。以下に述べられるように、本実施形態では、複数の検出器モジュール 1 を時間的に同期して動作させることにより、様々な要求に対応可能な（即ち、様々な用途に適用できる）放射線測定装置 10 が実現されている。

[0051] 詳細には、本実施形態では、各検出器モジュール 1 のデジタル処理部 18 と演算装置 2 とが、時間同期を確立可能であるように構成されている。詳細には、図 9 に示されるように、デジタル処理部 18 は、現在時刻を示す現在時刻データを逐次に出力する時間同期回路 18a を備えている。一方、演算装置 2 は同期データ（例えば、演算装置 2 のシステムクロック又はハードウェアクロックから得られる時刻データ）を有線通信又は無線通信によって各検出器モジュール 1 に配信する。時間同期回路 18a は、通信インタフェース 19 を介して演算装置 2 から同期データを受け取り、該同期データに同期して現在時刻データを生成する。デジタル処理部 18 は、該現在時刻データに同期して A S I C 16、17 を制御すると共に、時間同期回路 18a から出力された現在時刻データに基づいて生成される測定時刻データをデジタル通信データに含めて演算装置 2 に送信する。ここで、測定時刻データとは、現在時刻データに同期して（即ち、同期データに同期して）生成されるデータであり、電磁放射線の測定が行われた時刻（即ち、当該デジタル通信データの生成に用いられたデジタル測定データの元になるアナログ信号が A S I C 16、17 に入力された時刻）を示す。このような動作により、各検出器モジュール 1 の時間同期回路 18a の同期が実現され、演算装置 2 は、デジタル通信データに含まれる測定時刻データを参照して、ある散乱体検出器 14 で発生したコンプトン散乱と、ある吸収体検出器 15 で発生した光電吸収が、同一イベントに属するか否かを判断することができる。

[0052] なお、同期データを演算装置 2 から各検出器モジュール 1 に配信する代わりに、同期信号（例えば、クロック信号）を伝送する信号線が各検出器モジュール 1 と演算装置 2 との間に接続され、各検出器モジュール 1 の時間同期回路 18a が該同期信号によって同期されてもよい。この場合、現在時刻データ及び測定時刻データは、該同期信号に同期して生成される。

[0053] 続いて、本実施形態の放射線測定装置 10 における電磁放射線の測定、より具体的には、線源分布画像の生成について説明する。以下の説明においては、各検出器モジュール 1 に含まれる散乱体検出器 14 及び吸収体検出器 1

5 の数が同一であるとして、より具体的には、検出器モジュール 1 が、いずれも、4 つの散乱体検出器 1 4 と 1 つの吸収体検出器 1 5 を有しているとして説明する（なお、検出器モジュール 1 に含まれる散乱体検出器 1 4、吸収体検出器 1 5 の変形例については後述する）。

[0054] 本実施形態における電磁放射線の測定に際しては、放射線源から放射される電磁放射線が複数の検出器モジュール 1 に入射するように複数の検出器モジュール 1 が配置される。検出器モジュール 1 の配置は、放射線源の性質及び測定の目的に合わせて決定される。

[0055] 図 1 3～図 1 7 は、検出器モジュール 1 の配置の例を示す図である。図 1 3 に示されるように、高エネルギーの電磁放射線を放射する放射線源 5 0 A について測定を行う場合には、層方向に並ぶ散乱体検出器 1 4 及び吸収体検出器 1 5 の数が増大するように複数の検出器モジュール 1 が配置される。より具体的には、複数の検出器モジュール 1 が、散乱体検出器 1 4 及び吸収体検出器 1 5 の層方向（図 1 3 における Z 軸方向）に並べて配置される。図 1 3 に示されている配置によれば、コンプトン散乱の発生確率及び光電吸収による吸収確率が低く、コンプトン散乱における散乱角が小さい高エネルギーの電磁放射線の検出感度を高くすることができる。

[0056] また、図 1 4 に示されるように、空間的に広く分布しており、且つ、低エネルギーの電磁放射線を放射する放射線源 5 0 B について測定を行う場合には、複数の検出器モジュール 1 が、散乱体検出器 1 4 及び吸収体検出器 1 5 の層方向（図 1 4 における Z 軸方向）と垂直な方向に並べて配置される。低エネルギーの電磁放射線を測定する場合には、層方向に並ぶ散乱体検出器 1 4 及び吸収体検出器 1 5 の数は少なくともよい。その一方で、複数の検出器モジュール 1 を、散乱体検出器 1 4 及び吸収体検出器 1 5 の層方向と垂直な方向に並べて配置することで、電磁放射線を測定する検出器の実効的な面積を増大させることができる。図 1 4 では、検出器モジュール 1 が X 軸方向に並んで配置されているように示されるが、実際には、検出器モジュール 1 は、X Y 平面に平行な面内に行列に並んで配置されてもよい。

[0057] 更に、図 15 に示されるように、低エネルギーの電磁放射線を放射する放射線源 50C についての測定を高効率で行う場合には、特定の検出器モジュール 1（図 15 では、符号 1A で示されている）の周囲に、向きが異なる検出器モジュール 1（図 15 では、符号 1B で示されている）が並べて配置されてもよい。より厳密には、複数の検出器モジュール 1 は、ある特定の検出器モジュール 1A の少なくとも一の散乱体検出器 14 の半導体層 21 の表側主面（放射線源 50C に面する主面）が位置する平面が、その周囲にある検出器モジュール 1B の少なくとも一の吸収体検出器 15 の半導体層 21 の表側主面と交差するように配置される。低エネルギーの電磁放射線は、コンプトン散乱の散乱角 θ が大きくなるが、図 15 に示されるような配置によれば、検出器モジュール 1A の散乱体検出器 14 で散乱された電磁放射線を、その周囲に配置された検出器モジュール 1B の吸収体検出器 15 で効率よく検出することができる。

[0058] また、図 16 に示されるように、放射線源 50D の分布が事前にある程度判明している場合には、放射線源 50D を取り囲むように複数の検出器モジュール 1 が配置されてもよい。

[0059] 更に、図 17 に示されるように、3 次元的に分布する放射線源 50E について 3 次元的な線源分布画像を得ようとする場合、複数の検出器モジュール 1 が分散して配置されてもよい。この場合、各検出器モジュール 1 において得られるデジタル測定データから、ステレオ視の原理により、3 次元的な線源分布画像を得ることができる。

[0060] 上述された本実施形態の図 13～図 17 の説明においては、検出器モジュール 1 の構成が同一であるとされている。言い換えれば、検出器モジュール 1 に含まれる散乱体検出器 14 及び吸収体検出器 15 の数が、検出器モジュール 1 の間で同一であるとされている（即ち、全ての検出器モジュール 1 が、4 つの散乱体検出器 14 と 1 つの吸収体検出器 15 とを備えているとされている）。

[0061] しかしながら、検出器モジュール 1 に含まれる散乱体検出器 14 及び吸収

体検出器 15 の数は、検出器モジュール 1 の間で相違していてもよい。また、図 18 A に示されるように、複数の散乱体検出器 14 を有している一方で、吸収体検出器 15 を含まない検出器モジュール 1 E が、放射線測定装置 10 の複数の検出器モジュール 1 に含まれていてもよい。更に、図 18 B に示されるように、複数の吸収体検出器 15 を有している一方で、散乱体検出器 14 を含まない検出器モジュール 1 F が放射線測定装置 10 の複数の検出器モジュール 1 に含まれていてもよい。ただし、放射線測定装置 10 の全体としては、少なくとも一つの散乱体検出器 14 と、少なくとも一つの吸収体検出器 15 が含まれる。検出器モジュール 1 に含まれる散乱体検出器 14 及び吸収体検出器 15 の数が検出器モジュール 1 の間で相違していても、検出器モジュール 1 を適正に配置すれば、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応しながら電離放射線の測定を行うことができる。

[0062] ただし、図 13 ～図 17 から理解されるように、本実施形態の放射線測定装置 10 では、検出器モジュール 1 の構成が同一であっても様々な放射線源の性質に合わせた測定を行うことができる。このような利点を生かしながら検出器モジュール 1 のコストを低減する観点では、検出器モジュール 1 の構成が同一であることが好ましい。

[0063] その一方で、複数の散乱体検出器 14 を有している一方で吸収体検出器 15 を含まない検出器モジュール 1 E（図 18 A 参照）と、複数の吸収体検出器 15 を有している一方で、散乱体検出器 14 を含まない検出器モジュール 1 F（図 18 B 参照）を用いる場合には、検出器モジュール 1 E と検出器モジュール 1 F との距離を適切に調節することにより、視野角（FOV : field of view）や角度分解能を調節できるという利点がある。

[0064] 図 19 A は、視野角を大きくするための検出器モジュール 1（1 E、1 F）の配置の例を示す図である。視野角を大きくするためには、散乱体検出器 14 が設けられた検出器モジュール 1 E と、吸収体検出器 15 が設けられた検出器モジュール 1 F との間の距離が小さくなるように検出器モジュール 1 E、1 F が配置される。このような配置では、散乱角 θ が比較的大きい場合

(例えば、図 19 A の散乱角 θ_2 、 θ_3) についても電磁放射線を検出できるので、結果として、視野角が大きくなる。ただし、検出器モジュール 1 E、1 F の距離が小さい配置では、散乱角 θ の角度分解能は低下してしまう。

[0065] 一方、図 19 B は、散乱角 θ の角度分解能を高くするための検出器モジュール 1 (1 E、1 F) の配置の例を示している。角度分解能を高くするためには、散乱体検出器 14 が設けられた検出器モジュール 1 E と、吸収体検出器 15 が設けられた検出器モジュール 1 F の間の距離が大きくなるように検出器モジュール 1 E、1 F が配置される。検出器モジュール 1 E、1 F の距離が大きい配置では、散乱角 θ が比較的大きい場合 (例えば、図 19 A の散乱角 θ_2 、 θ_3) には電磁放射線を検出できない。しかしながら、図 19 B の配置では、散乱角 θ を細かく特定できるので、散乱角 θ の角度分解能を向上させることができる。

[0066] 各検出器モジュール 1 が所望の位置に配置された後、電磁放射線が測定され、即ち、放射線源の空間的分布を示す線源分布画像の生成が行われる。図 20 は、本実施形態における線源分布画像の生成の手順を示すフローチャートである。

[0067] まず、検出器モジュール 1 の配置を示すモジュール配置データが演算装置 2 に設定される (ステップ S01)。例えば図 13 ~ 図 17、図 19 A、図 19 B に示されるように、本実施形態の放射線測定装置 10 は、複数の検出器モジュール 1 の配置が様々に変更され得るが、線源分布画像を得るためには、各検出器モジュール 1 の位置 (言い換えれば、散乱体検出器 14 及び吸収体検出器 15 それぞれの位置) が演算装置 2 に与えられる必要がある。ステップ S01 は、各検出器モジュール 1 の位置を演算装置 2 に認識させるために行われる。

[0068] 一実施形態では、モジュール配置データの設定は、測定モードを設定することで行ってもよい。詳細には、検出器モジュール 1 の配置に対応した複数の測定モードが用意され、更に、測定モードのそれぞれに対応する複数のモジュール配置データが用意される。演算装置 2 のユーザインタフェースを用

いて測定モードがユーザにより選択されると、選択された測定モードに対応するモジュール配置データが選択され、実際に用いられるモジュール配置データとして演算装置 2 に設定される。ある特定の配置で検出器モジュール 1 が配置されたときに演算装置 2 のユーザインタフェースを介して該配置に対応する測定モードを選択することにより、適正なモジュール配置データを演算装置 2 に設定することができる。

[0069] また、検出器モジュール 1 の配置を示すモジュール配置データが演算装置 2 に入力されてもよい。例えば、ユーザが、演算装置 2 のユーザインタフェースを用いてモジュール配置データを演算装置 2 に入力してもよい。また、各検出器モジュール 1 がそれぞれの位置を検出する機能を有している場合には、各検出器モジュール 1 自身がそれぞれの位置を検出し、それぞれの位置を示す位置データを演算装置 2 に送信してもよい。この場合、該位置データの集合がモジュール配置データとして演算装置 2 に設定される。

[0070] 更に、電磁放射線のデジタル測定データの採取が行われる（ステップ S 0 2）。より具体的には、各検出器モジュール 1 の A S I C 1 6、1 7 により、散乱体検出器 1 4、吸収体検出器 1 5 からアナログ信号が逐次に読み出され、読み出されたアナログ信号に対応するデジタル測定データが生成される。ある散乱体検出器 1 4 のあるセルにおいてコンプトン散乱が発生した場合、コンプトン散乱が発生したセルにおいて電荷が発生し、発生された電荷の量に応じたアナログ信号が生成される。また、ある吸収体検出器 1 5 のあるセルにおいて光電吸収が発生した場合、光電吸収が起きたセルにおいて電荷が発生し、電荷の発生量に応じたアナログ信号が生成される。生成されたアナログ信号に対してアナログーデジタル変換が行われてデジタル測定データが生成される。

[0071] 更に、コンプトンコーンの再構成に必要なデータが算出される（ステップ S 0 3）。一実施形態では、A S I C 1 6、1 7 によって生成されたデジタル測定データがデジタル通信データに組み込まれて演算装置 2 に送られる。演算装置 2 は、デジタル通信データに含まれるデジタル測定データを解析し

、下記の演算を行う：

(1) 散乱体検出器 14 においてある光子のコンプトン散乱が発生し、その後、該コンプトン散乱で散乱された光子が吸収体検出器 15 に光電吸収によって吸収されるイベントの発生の検出。

(2) 各イベントにおける、当該散乱体検出器 14 においてコンプトン散乱が発生した位置 X 1、該コンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギー E₁、当該吸収体検出器 15 において光電吸収が発生した位置 X 2、及び、光電吸収によって吸収された光子のエネルギー E₂ の算出。

(3) 各イベントにおける、該コンプトン散乱における電磁放射線の散乱角 θ の算出。

電磁放射線の散乱角 θ の算出は、下記の式 (2)、又は、下記式 (2) と等価な式に基づいて行われる：

[数2]

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad \dots (2)$$

ここで、 m_e は、電子の静止質量であり、 c は、光速である。ここで、放射線源から放出される電磁放射線の光子のエネルギー E_{i n} が既知である場合には、エネルギー E₁、E₂ の算出においては、下記式 (3) で表される関係を用いてもよい：

$$E_{i n} = E_1 + E_2 \quad \dots (3)$$

このようにして得られたコンプトン散乱が発生した位置 X 1、該コンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギー E₁、光電吸収が発生した位置 X 2、光電吸収によって吸収された光子のエネルギー E₂、及び、電磁放射線の散乱角 θ から、各イベントについてコンプトンコーンを再構成することができる。

[0072] 散乱体検出器 14 においてコンプトン散乱が発生し、該コンプトン散乱で散乱された光子が吸収体検出器 15 に光電吸収によって吸収されるイベントの発生の検出においては、あるコンプトン散乱とある光電吸収とが同一の光子について発生したイベントであるか否かの判断が必要である。ここで留意すべきことは、本実施形態の放射線測定装置 10 では、例えば図 13、図 15、図 19A、図 19B に示されるように、コンプトン散乱が発生した散乱体検出器 14 が属する検出器モジュール 1（第 1 検出器モジュール）と、該コンプトン散乱で散乱された光子の光電吸収が発生した吸収体検出器 15 が属する検出器モジュール（第 2 検出器モジュール）とが異なる場合があり得る点である。異なる検出器モジュール 1 でコンプトン散乱と光電吸収が発生しても、当該コンプトン散乱と当該光電吸収とが同一イベントに属することを適正に判断することが望ましい。

[0073] この問題に対処するために、一実施形態では、あるコンプトン散乱とある光電吸収とが同一の光子に対するイベントであるか否かの判断が、デジタル通信データに含まれる測定時刻データに基づいて行われてもよい。コンプトン散乱の発生と光電吸収の発生は、実質的に（即ち、アナログ信号処理やデジタルデータ処理に必要な時間との比較においては）、ほぼ同時であると考えてよい。一実施形態では、コンプトン散乱の発生が検出されたデジタル測定データに付された測定時刻データと、光電吸収の発生が検出されたデジタル測定データに付された測定時刻データに示されている時刻が同一である（又は、測定時刻データに示されている時刻の差が、極めて短時間である所定時間より小さい）場合に、コンプトン散乱の発生が検出された散乱体検出器 14 が属する検出器モジュール 1 と、光電吸収の発生が検出された吸収体検出器 15 が属する検出器モジュール 1 とが異なる場合でも、演算装置 2 が、当該コンプトン散乱と当該光電吸収とが同一の光子について発生したイベントに属すると判断してもよい。

[0074] あるコンプトン散乱とある光電吸収とが同一の光子に対するイベントであるか否かの判断においては、デジタル通信データに含まれる測定時刻データ

に加え、モジュール配置データに示されている検出器モジュール 1 の配置が参照されてもよい。例えば、コンプトン散乱が発生した散乱体検出器 1 4 と光電吸収が発生した吸収体検出器 1 5 が異なる検出器モジュール 1 に含まれているとき、該異なる検出器モジュール 1 が近接して配置されており、且つ、コンプトン散乱の発生が検出されたデジタル測定データに付された測定時刻データと、光電吸収の発生が検出されたデジタル測定データに付された測定時刻データに示されている時刻が同一である（又は、測定時刻データに示されている時刻の差が、極めて短時間である所定時間より小さい）場合に、演算装置 2 は、当該コンプトン散乱と当該光電吸収とが同一の光子に対するイベントであると判断してもよい。ただし、複数の検出器モジュール 1 が集まって配置される場合には、演算装置 2 は、モジュール配置データに無関係に、コンプトン散乱の発生が検出されたデジタル測定データに付された測定時刻データと、光電吸収の発生が検出されたデジタル測定データに付された測定時刻データに示されている時刻が同一である（又は、測定時刻データに示されている時刻の差が、極めて短時間である所定時間より小さい）場合に、当該コンプトン散乱と当該光電吸収とが同一の光子に対するイベントであると判断してもよい。

[0075] また、当該散乱体検出器 1 4 においてコンプトン散乱が発生した位置 X_1 、該コンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギー E_1 、当該吸収体検出器 1 5 において光電吸収が発生した位置 X_2 、及び、光電吸収によって吸収された光子のエネルギー E_2 の算出が、各検出器モジュール 1 のデジタル処理部 1 8 によって行われてもよい。この場合、コンプトン散乱が発生した位置 X_1 、該コンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギー E_1 、光電吸収が発生した位置 X_2 、光電吸収によって吸収された光子のエネルギー E_2 、及び、測定時刻データを含むデジタル通信データがデジタル処理部 1 8 によって生成され、該デジタル通信データが、演算装置 2 に送信される。このような構成は、デジタル通信データの通信量の低減のために有効である。デジタル通信データの通信量の低減は、有線ネットワーク 4 を用いてデジタル通信データを演算装

置 2 に送信する場合、無線 LAN を用いてデジタル通信データを演算装置 2 に送信する場合のいずれにおいても有用である。

[0076] この場合、演算装置 2 は、デジタル通信データに含まれる測定時刻データに基づいて、散乱体検出器 14 においてコンプトン散乱が発生し、該コンプトン散乱で散乱された光子が吸収体検出器 15 に光電吸収によって吸収されるイベントの発生を検出し、更に、各イベントに対してコンプトン散乱における電磁放射線の散乱角 θ の算出を行う。演算装置 2 に送信されたデジタル通信データから各イベントにおけるコンプトン散乱が発生した位置 X1、該コンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギー E_1 、光電吸収が発生した位置 X2、光電吸収によって吸収された光子のエネルギー E_2 を得ることができるので、各イベントについての電磁放射線の散乱角 θ の算出においては、これらの情報が用いられる。このようにして得られたコンプトン散乱が発生した位置 X1、該コンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギー E_1 、光電吸収が発生した位置 X2、光電吸収によって吸収された光子のエネルギー E_2 、及び、電磁放射線の散乱角 θ から、各イベントについてコンプトンコーンを再構成することができる。

[0077] 演算装置 2 は、更に、ステップ S03 において得られた情報（例えば、位置 X1、X2、エネルギー E_1 、 E_2 、散乱角 θ ）に基づいて、放射線源の空間的分布を示す線源分布画像を作成する（ステップ S04）。詳細には、演算装置 2 は、各イベントにおけるコンプトン散乱が発生した位置 X1、該コンプトン散乱で反跳電子が得たエネルギー E_1 、光電吸収が発生した位置 X2、光電吸収によって吸収された光子のエネルギー E_2 、及び、電磁放射線の散乱角 θ から、各イベントについてコンプトンコーンを再構成する。更に、演算装置 2 は、再構成したコンプトンコーンの重ね合わせに対応する画像を、放射線源 103 の空間的分布を示す線源分布画像として生成する。生成された線源分布画像は、演算装置 2 のユーザインタフェースに対するユーザによる操作に応じて、表示装置 3 に表示される。

[0078] 図 17 に示されるように、各検出器モジュール 1 が、ステレオ視の原理に

よって３次元的な線源分布画像を得るために分散して配置される場合には、演算装置２は、各検出器モジュール１において得られるデジタル測定データから各検出器モジュール１について個別にコンプトンコーンを再構成し、再構成されたコンプトンコーンとモジュール配置データとから、ステレオ視の原理によって３次元的な線源分布画像が生成されてもよい。言い換えれば、演算装置２は、各検出器モジュール１について個別にコンプトンコーンを再構成されたコンプトンコーンとモジュール配置データとから、ステレオ視の原理によって放射線源の位置が特定されてもよい。この場合、演算装置２は、特定した放射線源の位置に基づいて、放射線源の線源強度が算定されてもよい。

[0079] 以上に説明されている本実施形態の放射線測定装置１０の一つの利点は、放射線源の性質の相違や測定の目的に対して柔軟に対応しながら電離放射線の測定を行うことができる点である。本実施形態の放射線測定装置１０は、複数の検出器モジュール１を含んでいる。該検出器モジュール１の配置を、例えば図１３～図１７、図１９Ａ、図１９Ｂに示されるように放射線源の性質及び測定の目的に合わせて決定することで、本実施形態の放射線測定装置１０は、放射線源の性質の相違に対して柔軟に対応しながら電離放射線の測定を行うことができる。

[0080] ここで、本実施形態の放射線測定装置１０においては、電磁放射線の測定の間、検出器モジュール１の間の相対的な位置関係が確実に保持されることが望ましい。電磁放射線の測定の間に検出器モジュール１の間の相対的な位置関係が変化すると、コンプトン散乱が発生した位置や光電吸収が発生した位置を正確に特定することができなくなるためである。

[0081] 検出器モジュール１の間の相対的な位置関係を確実に保持するためには、各検出器モジュール１の筐体１１に、他の検出器モジュール１の筐体１１と連結するための連結機構が設けられることが好ましい。図２１Ａは、このような構成の検出器モジュール１を概念的に示す図である。図２１Ａに示されるように、各検出器モジュール１の筐体１１には連結機構１１ａが設けられ

ている。隣接する検出器モジュール１の筐体１１は、それぞれに設けられた連結機構１１ａによって連結される。図２１Ａでは、検出器モジュール１は、連結機構１１ａにより、散乱体検出器１４と吸収体検出器１５の層方向（図２０ＡのＺ軸方向）に並んで連結されている。連結機構１１ａを用いることにより、検出器モジュール１の間の相対的な位置関係を確実に保持することができる。

[0082] 筐体１１に設けられる連結機構１１ａは、隣接する検出器モジュール１を、散乱体検出器１４と吸収体検出器１５の層方向（図２１ＡのＺ軸方向）と層方向と垂直な方向（図２１ＡのＸ軸方向）の両方に連結可能に構成されていることが好ましい。図２１Ｂは、該連結機構１１ａにより、散乱体検出器１４と吸収体検出器１５の層方向と垂直な方向に並んで連結された検出器モジュール１を概念的に示す図である。図２１Ｂでは、検出器モジュール１がＸ軸方向に並んで配置されているように示されるが、実際には、検出器モジュール１は、ＸＹ平面に平行な面内に行列に並んで連結されてもよい。

[0083] 以上には、本発明の実施形態が様々に記載されているが、本発明は、上記の実施形態には限定されない。本発明が、様々な変更と共に実施され得ることは、当業者には自明的であろう。

請求の範囲

[請求項1]

複数の検出器モジュールと、
演算装置と
を具備し、
前記複数の検出器モジュールのそれぞれは、
複数の検出器と、
前記複数の検出器に対応して設けられ、対応する前記検出器から
得られるアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行って前記
アナログ信号に対応するデジタル測定データを生成する複数のアナロ
グ信号処理部と、
前記デジタル測定データから生成されたデジタル通信データを前記
演算装置に送信するデジタル処理部と
を含み、
前記複数の検出器のそれぞれは、電磁放射線を散乱する散乱体とし
て機能する散乱体検出器、又は、電磁放射線を吸収する吸収体として
機能する吸収体検出器のいずれかであり、
当該放射線測定装置に含まれる前記検出器のうちの少なくとも一は
、前記散乱体検出器であり、
当該放射線測定装置に含まれる前記検出器のうちの少なくとも一は
、前記吸収体検出器であり、
前記演算装置は、前記デジタル通信データに基づいて、放射線源の
空間分布を示す線源分布画像を生成する
放射線測定装置。

[請求項2]

請求項1に記載の放射線測定装置であって、
前記演算装置は、
前記複数の検出器モジュールのうちの第1検出器モジュールの散
乱体検出器でコンプトン散乱が発生し、前記コンプトン散乱で散乱さ
れた光子が前記複数の検出器モジュールのうちの第2検出器モジュ-

ルの吸収体検出器において吸収される光電吸収が発生するイベントの発生を、前記デジタル通信データに基づいて検出した場合、前記イベントに対応するコンプトンコーンの再構成を行い、前記コンプトンコーンに基づいて前記線源分布画像を生成するように構成された放射線測定装置。

[請求項3]

請求項2に記載の放射線測定装置であって、

前記演算装置は、前記複数の検出器モジュールのそれぞれに同期データ又は同期信号を供給し、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれは、前記同期データ又は同期信号に同期して生成された測定時刻データを含むように前記デジタル通信データを生成し、

前記演算装置は、前記測定時刻データに基づいて、前記第1検出器モジュールの散乱体検出器で前記コンプトン散乱が発生し、前記第2検出器モジュールの吸収体検出器において前記コンプトン散乱で散乱された光子が吸収される前記光電吸収が発生する前記イベントの発生を検出する

放射線測定装置。

[請求項4]

請求項1に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、

前記複数の検出器のうちの前記散乱体検出器においてコンプトン散乱が発生した散乱位置及び前記コンプトン散乱において反跳電子に与えられたエネルギーである第1エネルギーを前記デジタル測定データに基づいて特定し、前記散乱位置及び前記第1エネルギーを記述したデータを含むように前記デジタル通信データを生成するように構成された

放射線測定装置。

[請求項5]

請求項1に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、

前記複数の検出器のうちの前記吸収体検出器において光電吸収が発生した吸収位置及び前記光電吸収において吸収されたエネルギーである第2エネルギーを前記デジタル測定データに基づいて特定し、前記吸収位置及び前記第2エネルギーを記述したデータを含むように前記デジタル通信データを生成するように構成された放射線測定装置。

[請求項6]

請求項1に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれに含まれる前記複数の検出器の少なくとも一は、前記散乱体検出器であり、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれに含まれる前記複数の検出器の少なくとも一は、前記吸収体検出器である放射線測定装置。

[請求項7]

請求項6に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、

前記複数の検出器のうちの前記散乱体検出器においてコンプトン散乱が発生した散乱発生位置及び前記コンプトン散乱において反跳電子に与えられたエネルギーである第1エネルギーを前記デジタル測定データに基づいて特定し、前記複数の検出器のうちの前記吸収体検出器への光電吸収が発生した吸収位置及び前記光電吸収において吸収されたエネルギーである第2エネルギーを、前記デジタル測定データに基づいて特定し、且つ、前記散乱発生位置、前記第1エネルギー、前記吸収位置及び前記第2エネルギーを記述したデータを含むように前記デジタル通信データを生成するように構成された放射線測定装置。

[請求項8]

請求項6又は7に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールに含まれる前記散乱体検出器の数が同一であり、

前記複数の検出器モジュールに含まれる前記吸収体検出器の数が同

一である

放射線測定装置。

[請求項9] 請求項8に記載の放射線測定装置であって、
前記複数の検出器モジュールが、同一の構成を有している
放射線測定装置。

[請求項10] 請求項1乃至9のいずれかに記載の放射線測定装置であって、
前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、
無線通信によって前記演算装置に前記デジタル通信データを送信する
放射線測定装置。

[請求項11] 請求項1乃至10のいずれかに記載の放射線測定装置であって、
前記複数の検出器モジュールのそれぞれは、前記複数の検出器と、
前記複数のアナログ信号処理部と、前記デジタル処理部とを収容する
筐体を具備し、
前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記筐体は、他の検出器
モジュールの前記筐体と連結する連結機構を有している
放射線測定装置。

[請求項12] それぞれが複数の検出器を備えた複数の検出器モジュールと演算装
置とを備える放射線測定装置を用いる放射線測定方法であって、前記
複数の検出器のそれぞれが、電磁放射線をコンプトン散乱によって散
乱する散乱体として機能する散乱体検出器、又は、電磁放射線を吸収
する吸収体として機能する吸収体検出器のいずれかであり、前記放射
線測定装置に含まれる前記検出器のうちの少なくとも一は、前記散乱
体検出器であり、前記放射線測定装置に含まれる前記検出器のうちの
少なくとも一は、前記吸収体検出器であり、
前記複数の検出器モジュールを配置するステップと、
前記複数の検出器モジュールのそれぞれが、前記複数の検出器から
得られるアナログ信号に対してアナログーデジタル変換を行って前記
アナログ信号に対応するデジタル測定データを生成するステップと、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれが、前記デジタル測定データからデジタル通信データを生成し、前記デジタル通信データを前記演算装置に送信するステップと、

前記演算装置が、前記デジタル通信データに基づいて放射線源の空間分布を示す線源分布画像を生成するステップと
を具備する

放射線測定方法。

補正された請求の範囲
[2017年1月17日(17.01.2017) 国際事務局受理]

[請求項1] (補正後) 複数の検出器モジュールと、

演算装置と

を具備し、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれは、

複数の検出器と、

前記複数の検出器に対応して設けられ、対応する前記検出器から得られるアナログ信号に対してアナログ-デジタル変換を行って前記アナログ信号に対応するデジタル測定データを生成する複数のアナログ信号処理部と、

前記デジタル測定データから生成されたデジタル通信データを前記演算装置に送信するデジタル処理部と

を含み、

前記複数の検出器のそれぞれは、電磁放射線を散乱する散乱体として機能する散乱体検出器、又は、電磁放射線を吸収する吸収体として機能する吸収体検出器のいずれかであり、

当該放射線測定装置に含まれる前記検出器のうちの少なくとも一は、前記散乱体検出器であり、

当該放射線測定装置に含まれる前記検出器のうちの少なくとも一は、前記吸収体検出器であり、

前記演算装置は、前記デジタル通信データに基づいて、放射線源の空間分布を示す線源分布画像を生成するように構成され、

前記演算装置は、前記複数の検出器モジュールのうちの第1検出器モジュールの散乱体検出器でコンプトン散乱が発生し、前記コンプトン散乱で散乱された光子が前記複数の検出器モジュールのうちの第2検出器モジュールの吸収体検出器において吸収される光電吸収が発生するイベントの発生を、前記デジタル通信データに基づいて検出した場合、前記イベントに対応するコンプトンコーンの再構成を行い、前記コンプトンコーンに基づいて前記線源分布画像を

生成する

放射線測定装置。

〔請求項 2〕 (削除)

〔請求項 3〕 (補正後) 請求項 1 に記載の放射線測定装置であって、

前記演算装置は、前記複数の検出器モジュールのそれぞれに同期データ又は同期信号を供給し、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれは、前記同期データ又は同期信号に同期して生成された測定時刻データを含むように前記デジタル通信データを生成し、

前記演算装置は、前記測定時刻データに基づいて、前記第 1 検出器モジュールの散乱体検出器で前記コンプトン散乱が発生し、前記第 2 検出器モジュールの吸収体検出器において前記コンプトン散乱で散乱された光子が吸収される前記光電吸収が発生する前記イベントの発生を検出する

放射線測定装置。

〔請求項 4〕 請求項 1 に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、

前記複数の検出器のうちの前記散乱体検出器においてコンプトン散乱が発生した散乱位置及び前記コンプトン散乱において反跳電子に与えられたエネルギーである第 1 エネルギーを前記デジタル測定データに基づいて特定し、前記散乱位置及び前記第 1 エネルギーを記述したデータを含むように前記デジタル通信データを生成するように構成された

放射線測定装置。

〔請求項 5〕 請求項 1 に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、

前記複数の検出器のうちの前記吸収体検出器において光電吸収が発生した吸収位置及び前記光電吸収において吸収されたエネルギーである第 2 エネルギーを前記デジタル測定データに基づいて特定し、前記吸収位置及び前記第

2 エネルギーを記述したデータを含むように前記デジタル通信データを生成するように構成された

放射線測定装置。

〔請求項 6〕 請求項 1 に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれに含まれる前記複数の検出器の少なくとも一は、前記散乱体検出器であり、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれに含まれる前記複数の検出器の少なくとも一は、前記吸収体検出器である

放射線測定装置。

〔請求項 7〕 請求項 6 に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、

前記複数の検出器のうちの前記散乱体検出器においてコンプトン散乱が発生した散乱発生位置及び前記コンプトン散乱において反跳電子に与えられたエネルギーである第 1 エネルギーを前記デジタル測定データに基づいて特定し、前記複数の検出器のうちの前記吸収体検出器への光電吸収が発生した吸収位置及び前記光電吸収において吸収されたエネルギーである第 2 エネルギーを、前記デジタル測定データに基づいて特定し、且つ、前記散乱発生位置、前記第 1 エネルギー、前記吸収位置及び前記第 2 エネルギーを記述したデータを含むように前記デジタル通信データを生成するように構成された

放射線測定装置。

〔請求項 8〕 請求項 6 又は 7 に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールに含まれる前記散乱体検出器の数が同一であり、

前記複数の検出器モジュールに含まれる前記吸収体検出器の数が同一である

放射線測定装置。

〔請求項 9〕 請求項 8 に記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールが、同一の構成を有している
放射線測定装置。

〔請求項 10〕（補正後） 請求項 1、3 乃至 9 のいずれかに記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記デジタル処理部は、無線通信
によって前記演算装置に前記デジタル通信データを送信する
放射線測定装置。

〔請求項 11〕（補正後） 請求項 1、3 乃至 10 のいずれかに記載の放射線測定装置であって、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれは、前記複数の検出器と、前記複数の
のアナログ信号処理部と、前記デジタル処理部とを収容する筐体を具備し、
前記複数の検出器モジュールのそれぞれの前記筐体は、他の検出器モジュール
の前記筐体と連結する連結機構を有している
放射線測定装置。

〔請求項 12〕（補正後） それぞれが複数の検出器を備えた複数の検出器モジュールと演
算装置とを備える放射線測定装置を用いる放射線測定方法であって、前記複数の
の検出器のそれぞれが、電磁放射線をコンプトン散乱によって散乱する散乱体
として機能する散乱体検出器、又は、電磁放射線を吸収する吸収体として機能
する吸収体検出器のいずれかであり、前記放射線測定装置に含まれる前記検出
器のうちの少なくとも一は、前記散乱体検出器であり、前記放射線測定装置に
含まれる前記検出器のうちの少なくとも一は、前記吸収体検出器であり、

前記複数の検出器モジュールを配置するステップと、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれが、前記複数の検出器から得られる
アナログ信号に対してアナログ－デジタル変換を行って前記アナログ信号に
対応するデジタル測定データを生成するステップと、

前記複数の検出器モジュールのそれぞれが、前記デジタル測定データからデ
ジタル通信データを生成し、前記デジタル通信データを前記演算装置に送信す

るステップと、

前記演算装置が、前記デジタル通信データに基づいて放射線源の空間分布を示す線源分布画像を生成するステップと

を具備し、

前記線源分布画像を生成するステップにおいて、前記演算装置は、前記複数の検出器モジュールのうちの第1検出器モジュールの散乱体検出器でコンプトン散乱が発生し、前記コンプトン散乱で散乱された光子が前記複数の検出器モジュールのうちの第2検出器モジュールの吸収体検出器において吸収される光電吸収が発生するイベントの発生を、前記デジタル通信データに基づいて検出した場合、前記イベントに対応するコンプトンコーンの再構成を行い、前記コンプトンコーンに基づいて前記線源分布画像を生成する

放射線測定方法。

条約第19条(1)に基づく説明書

請求項1は、請求項2の内容を組み込むように補正された。

請求項2は、削除された。

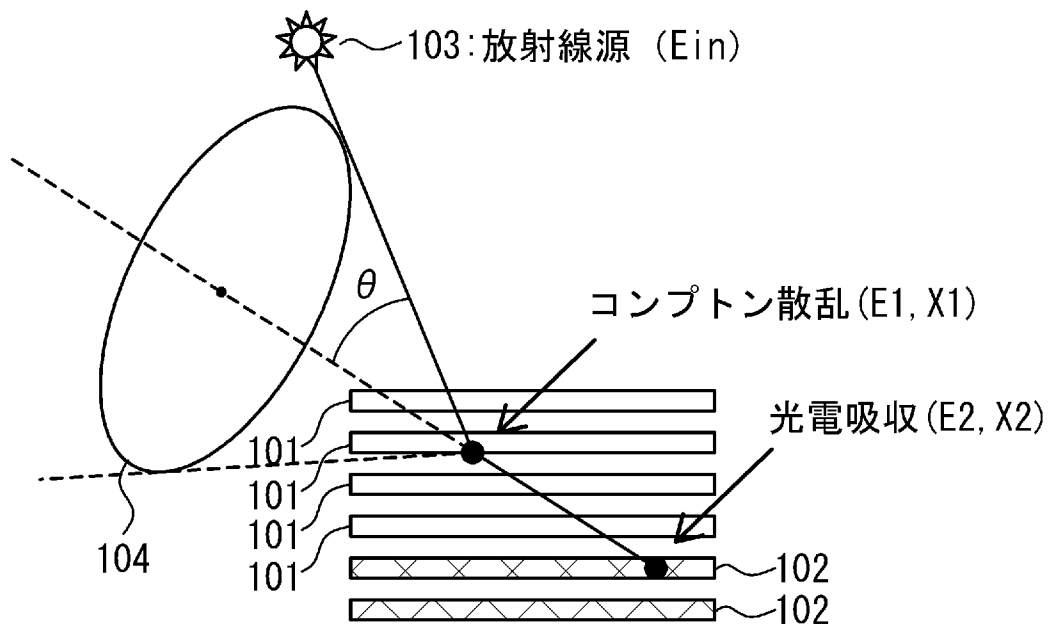
請求項3は、請求項1に従属するように補正された。

請求項10は、請求項1、3-9に従属するように補正された。

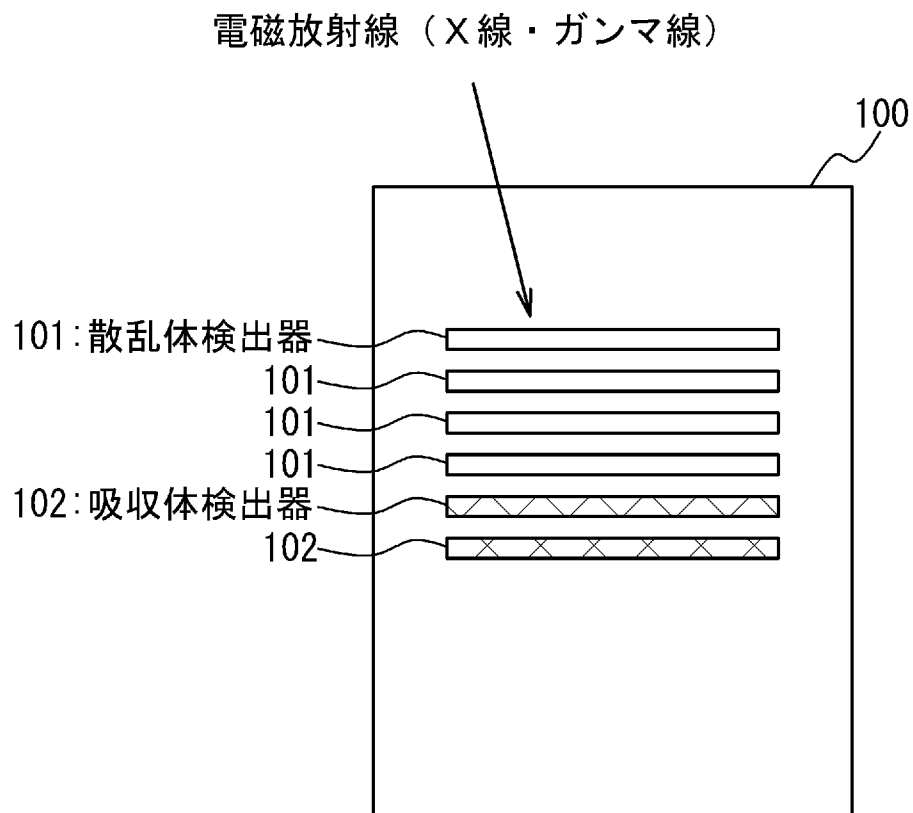
請求項11は、請求項1、3-9に従属するように補正された。

請求項12は、請求項1と同様に補正された。

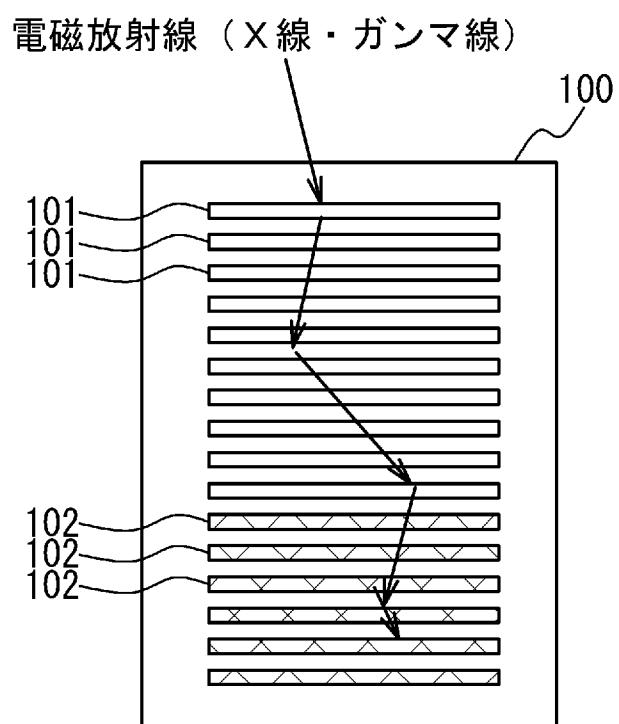
[図1]



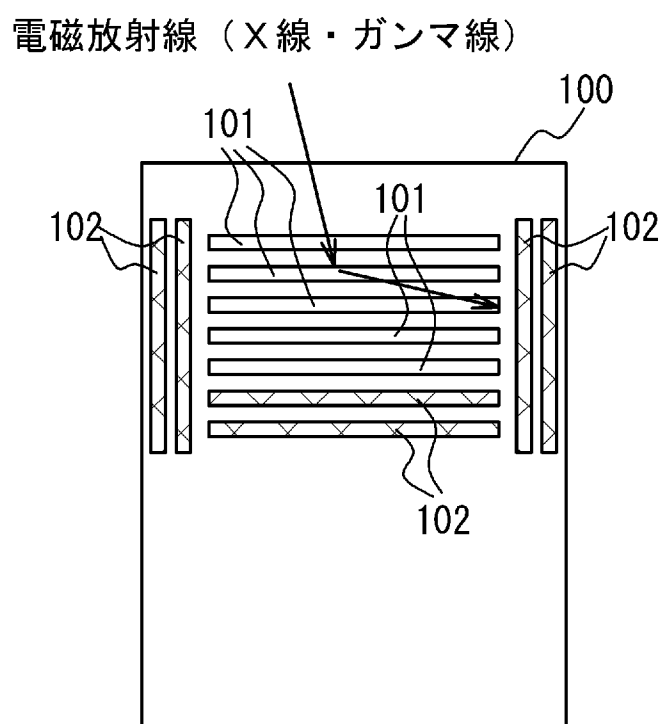
[図2]



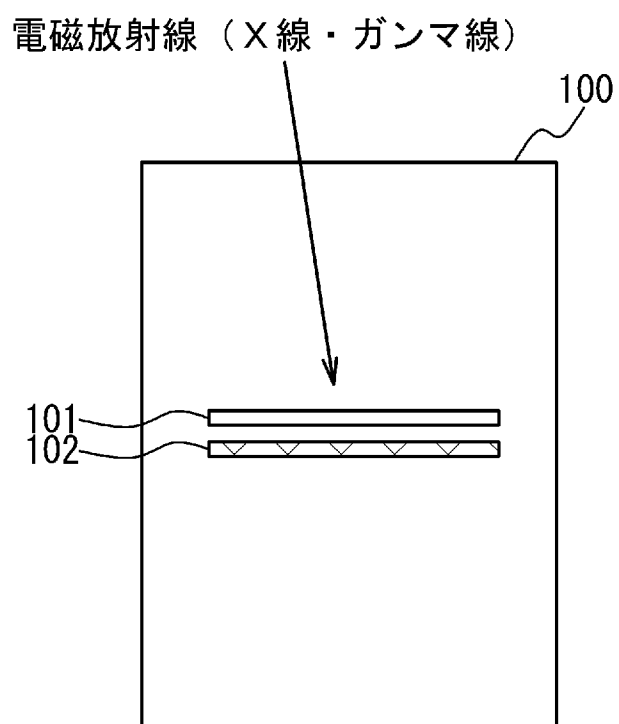
[図3]



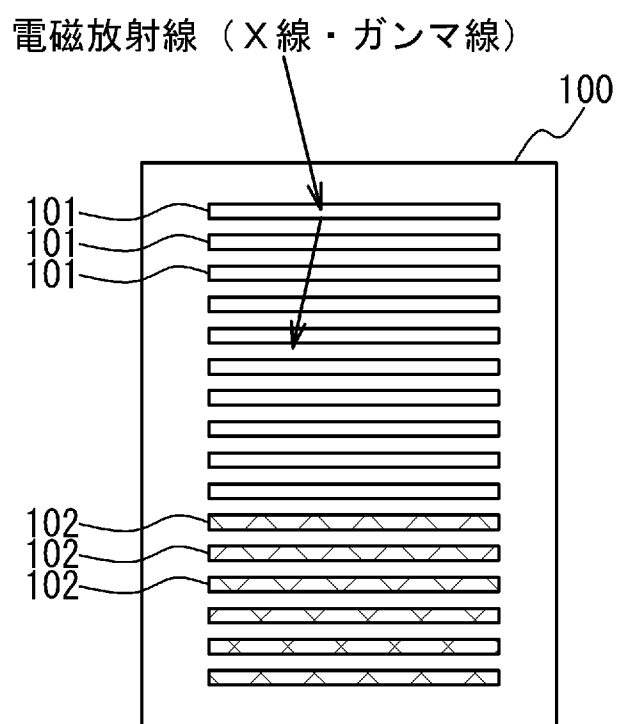
[図4]



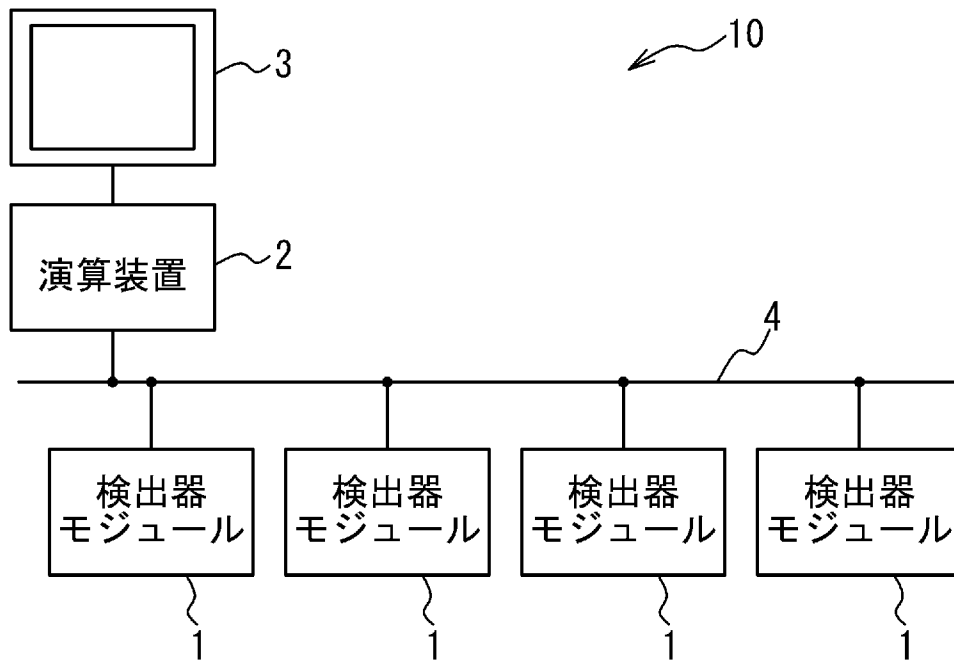
[図5]



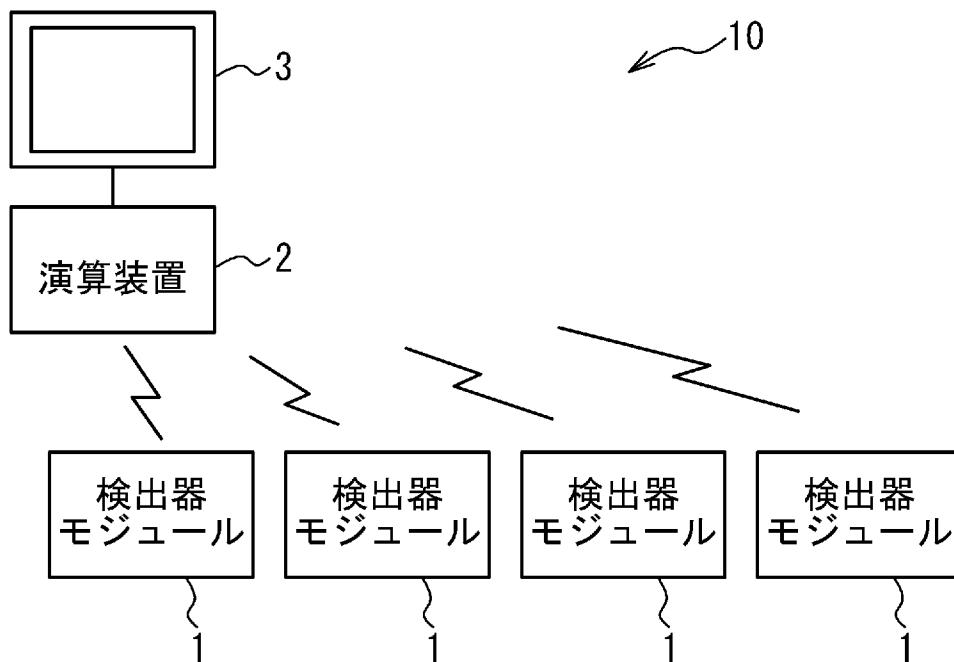
[図6]



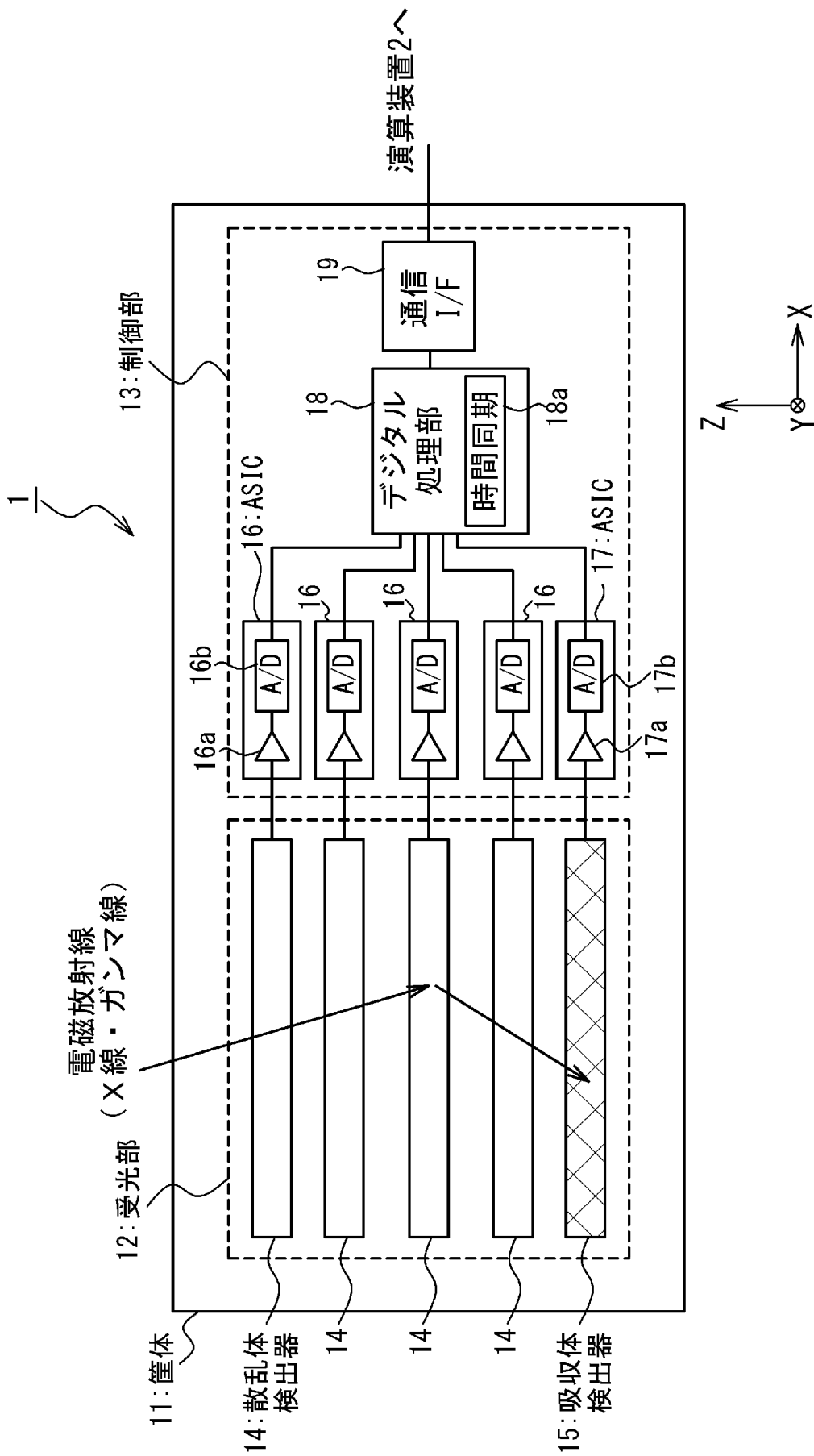
[図7]



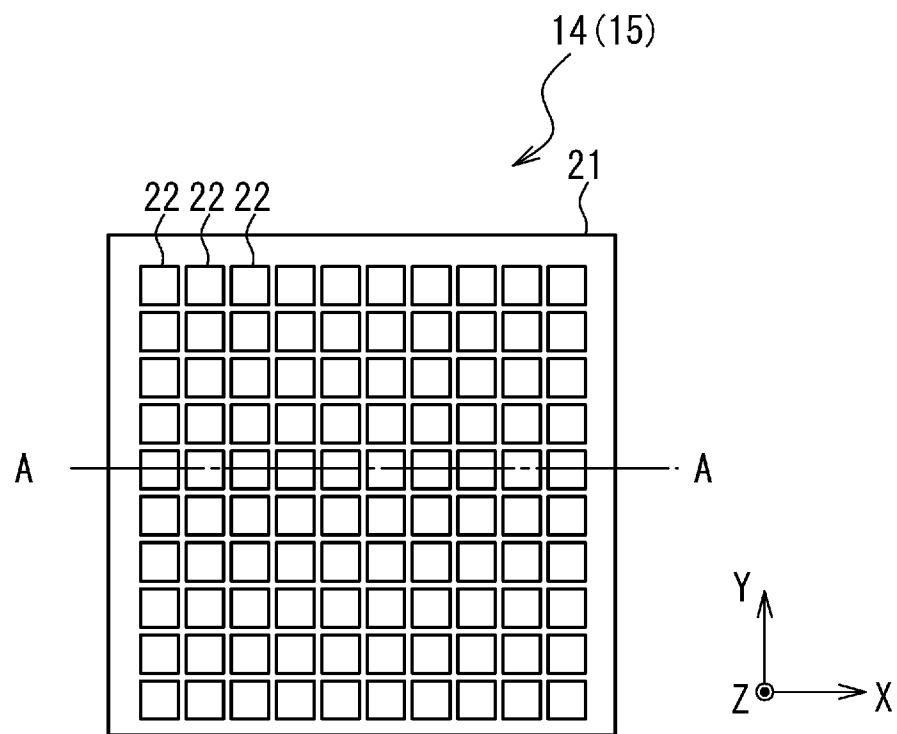
[図8]



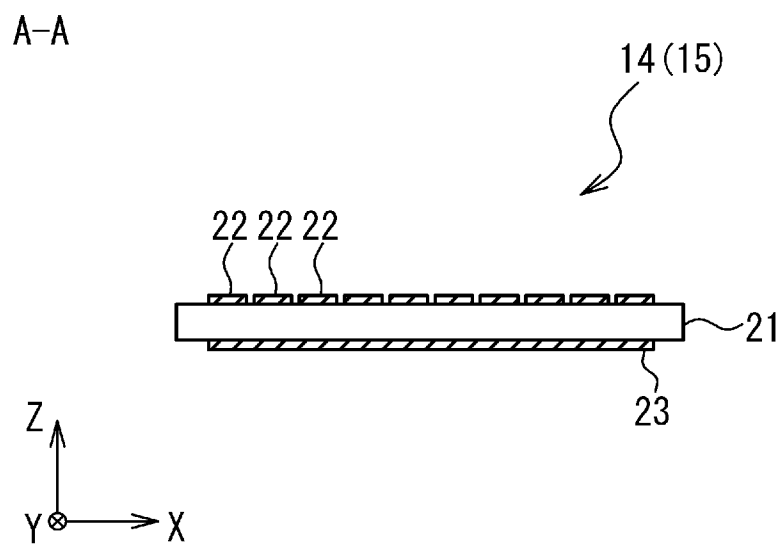
[図9]



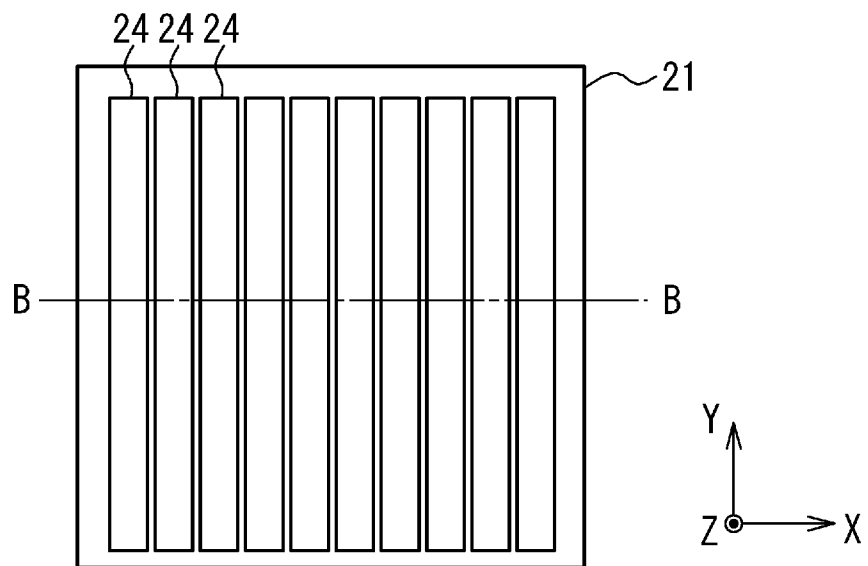
[図10A]



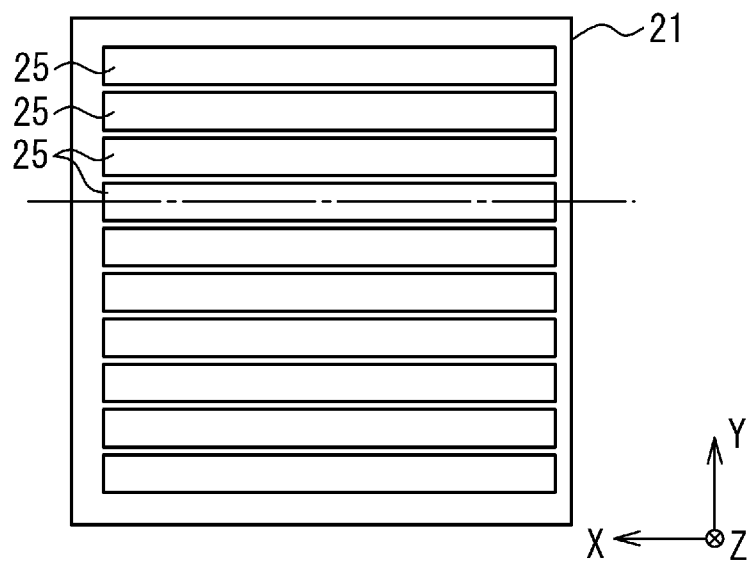
[図10B]



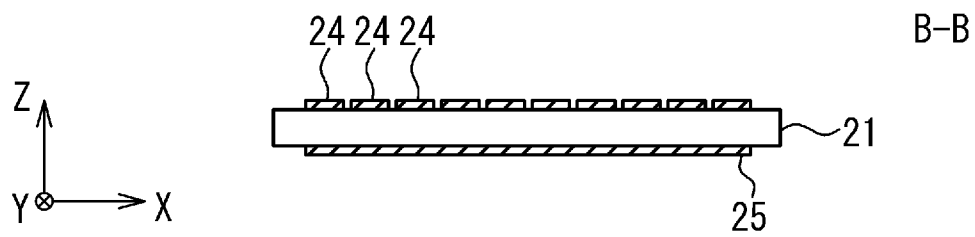
[図11A]



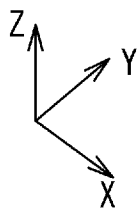
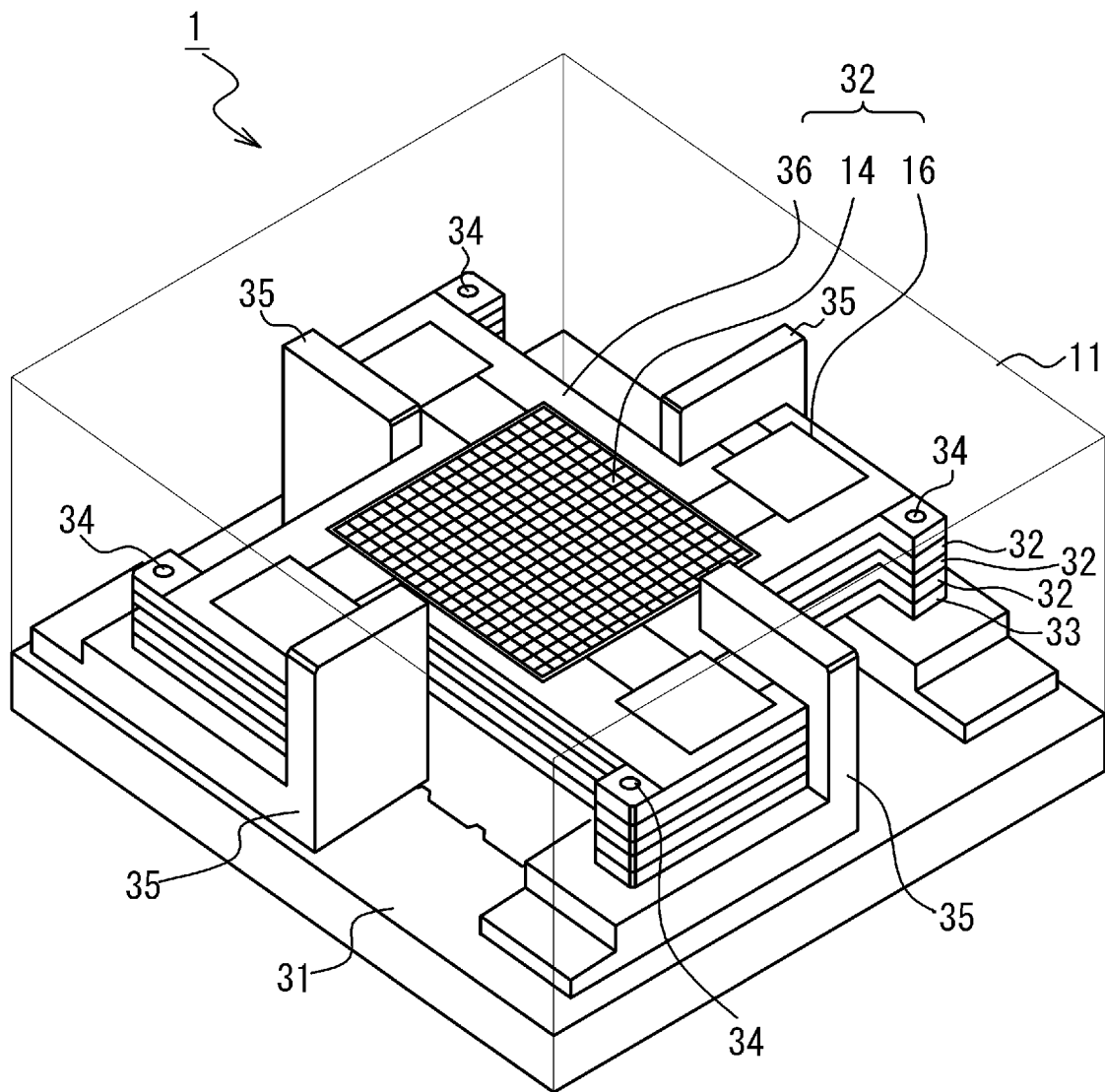
[図11B]



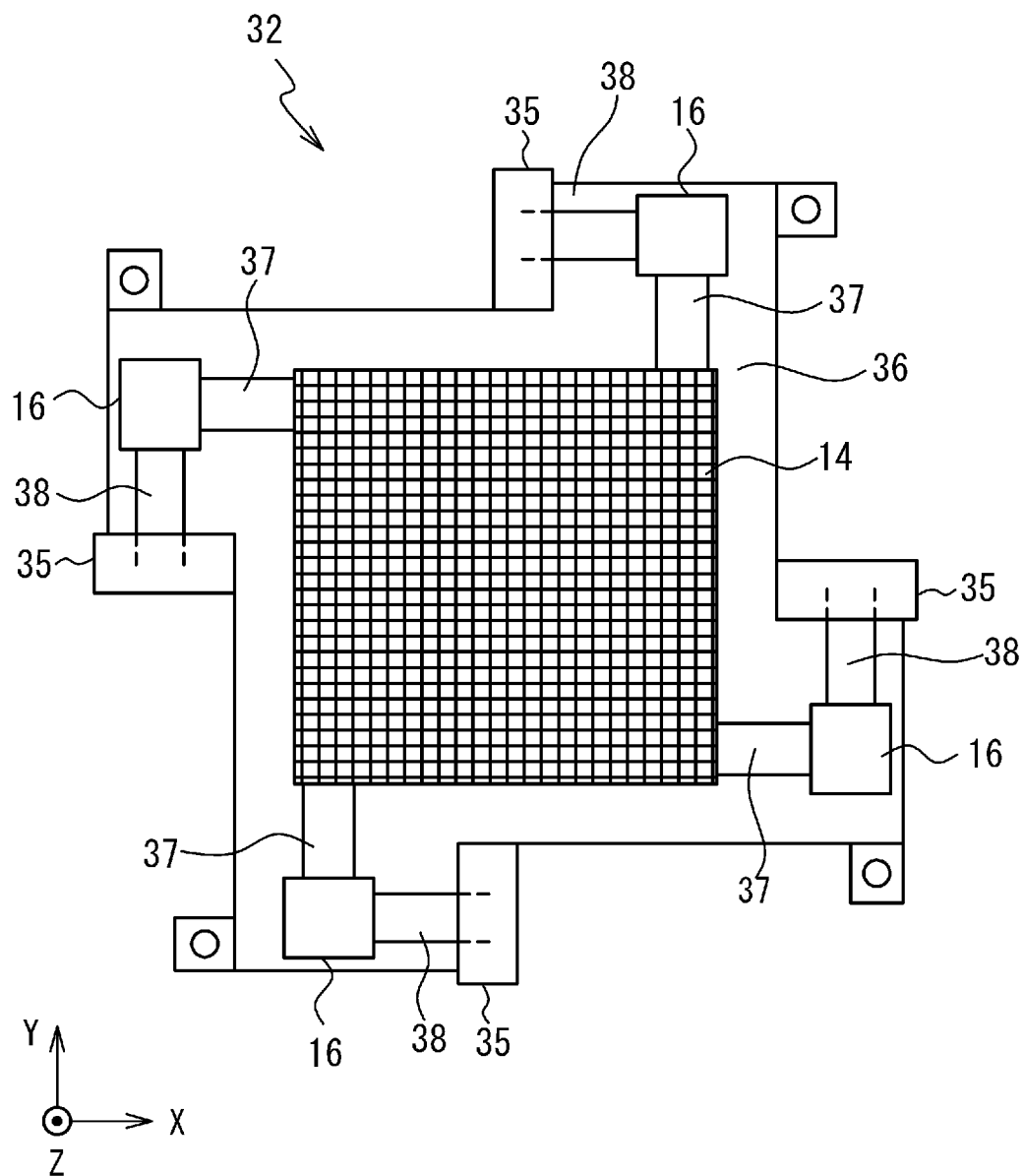
[図11C]



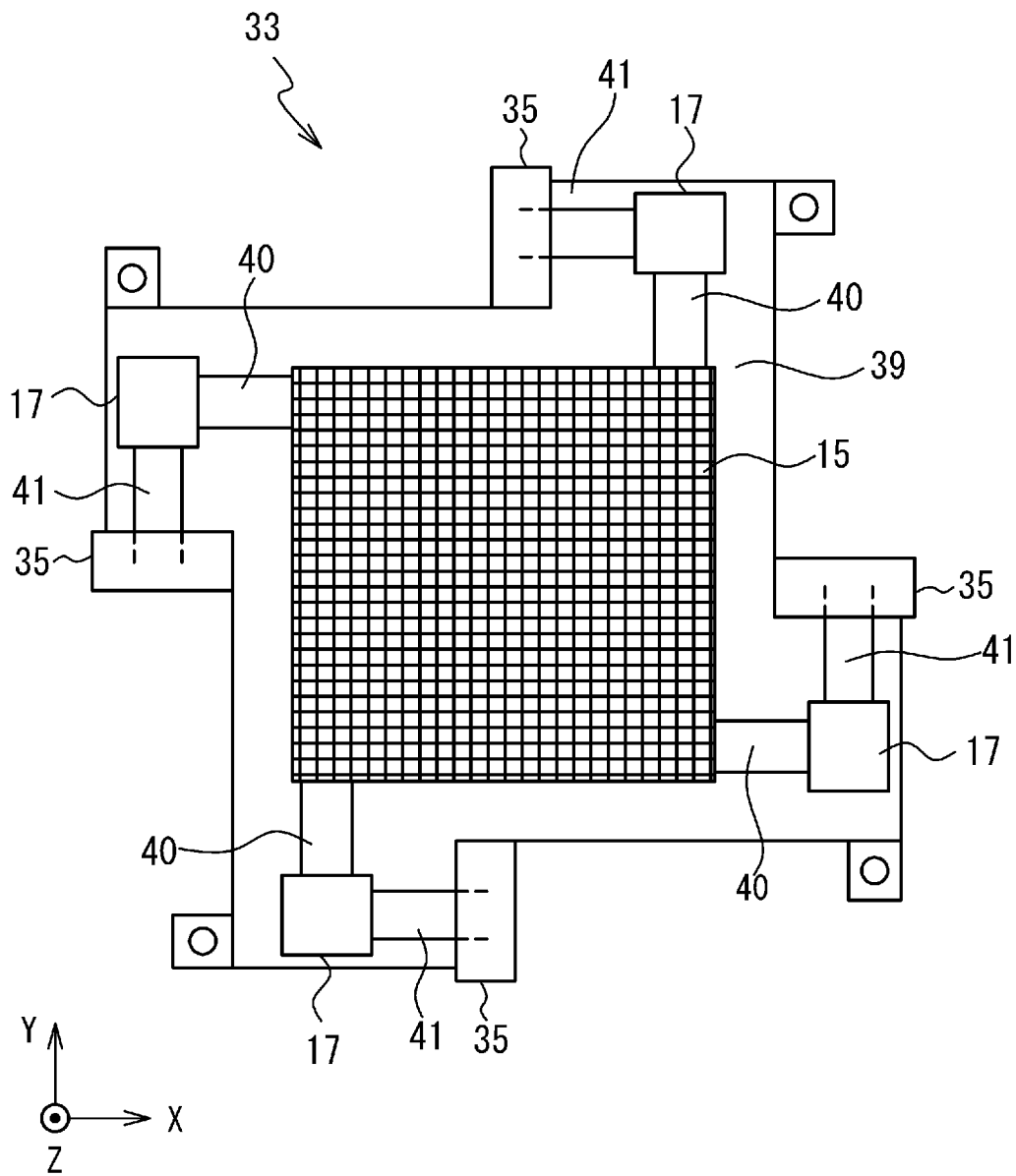
[図12A]



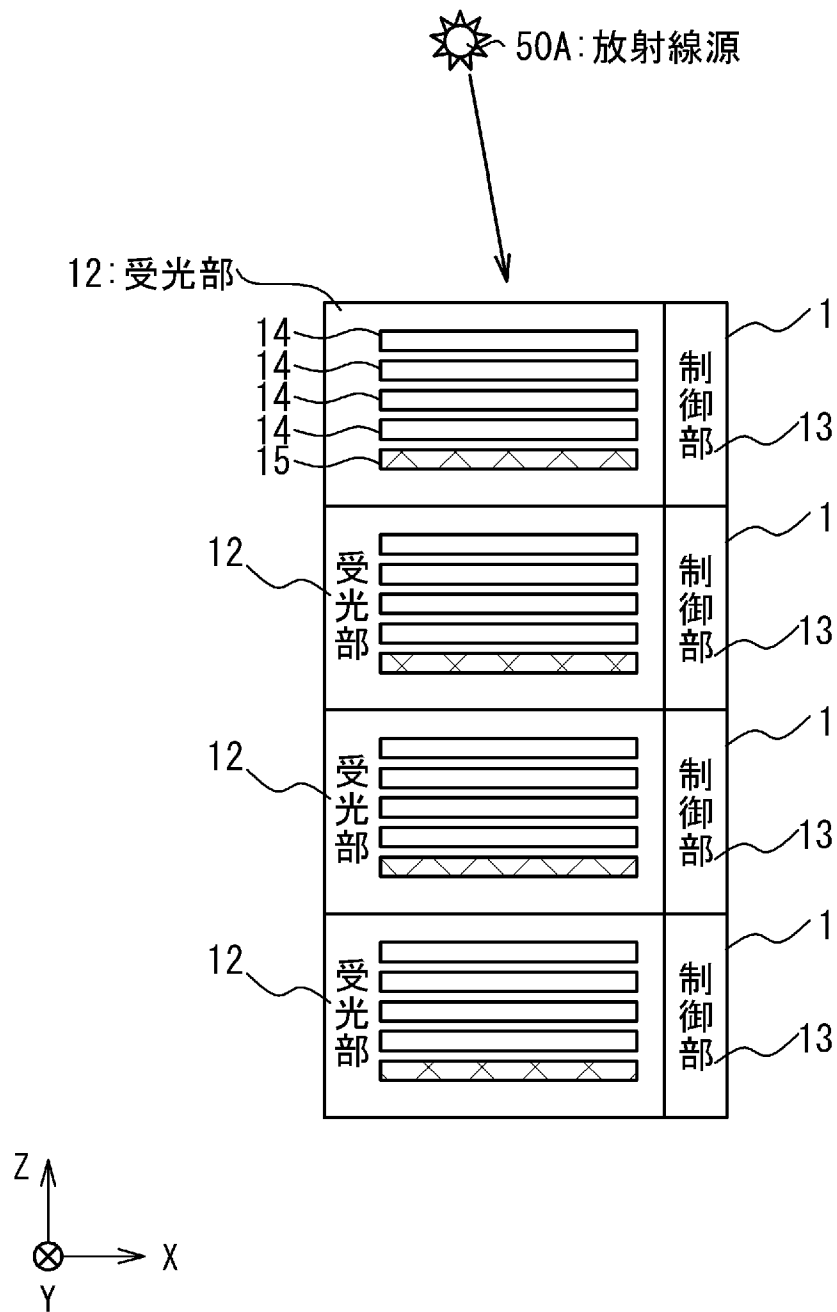
[図12B]



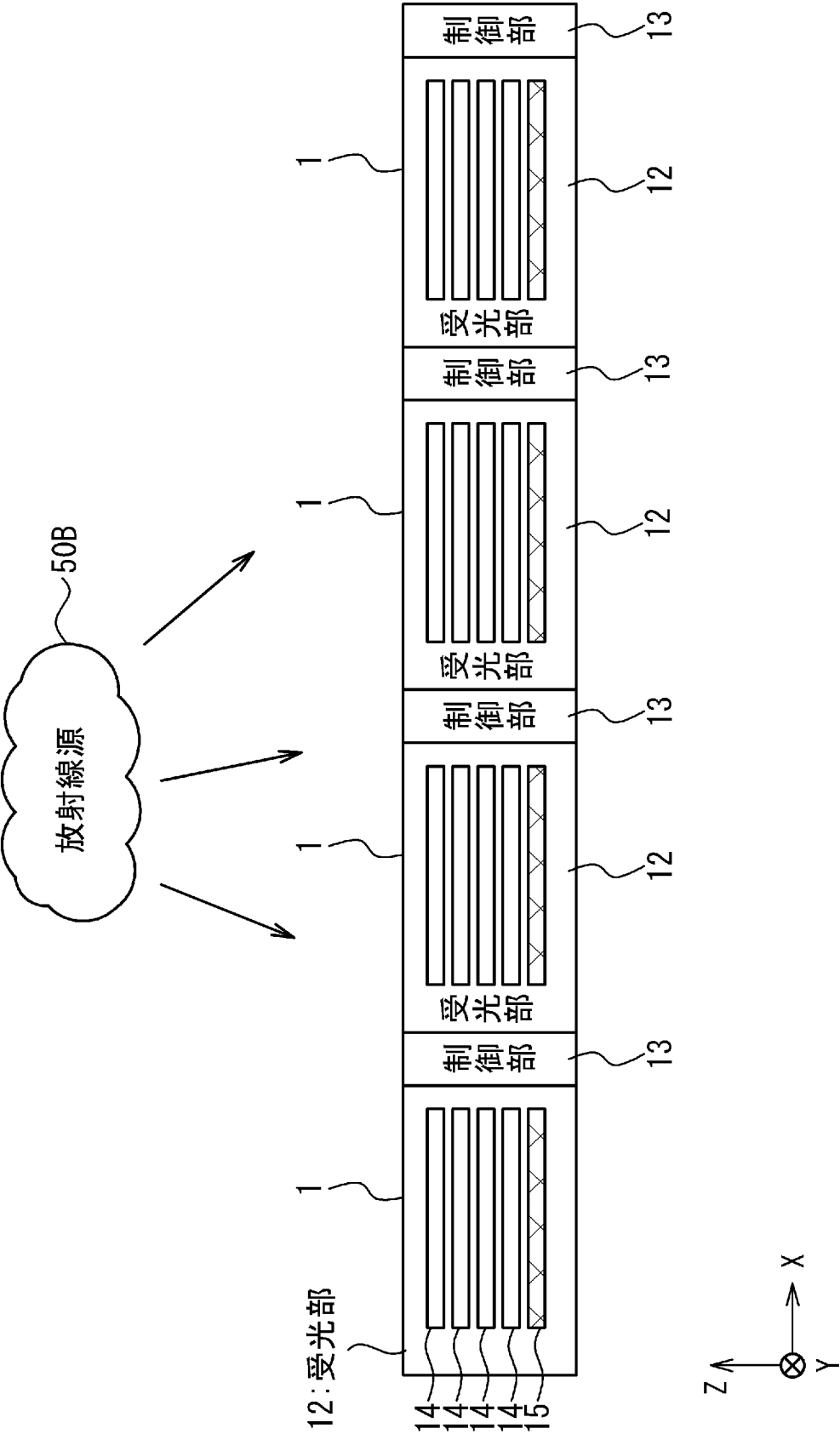
[図12C]



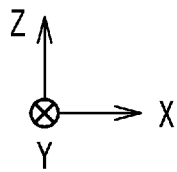
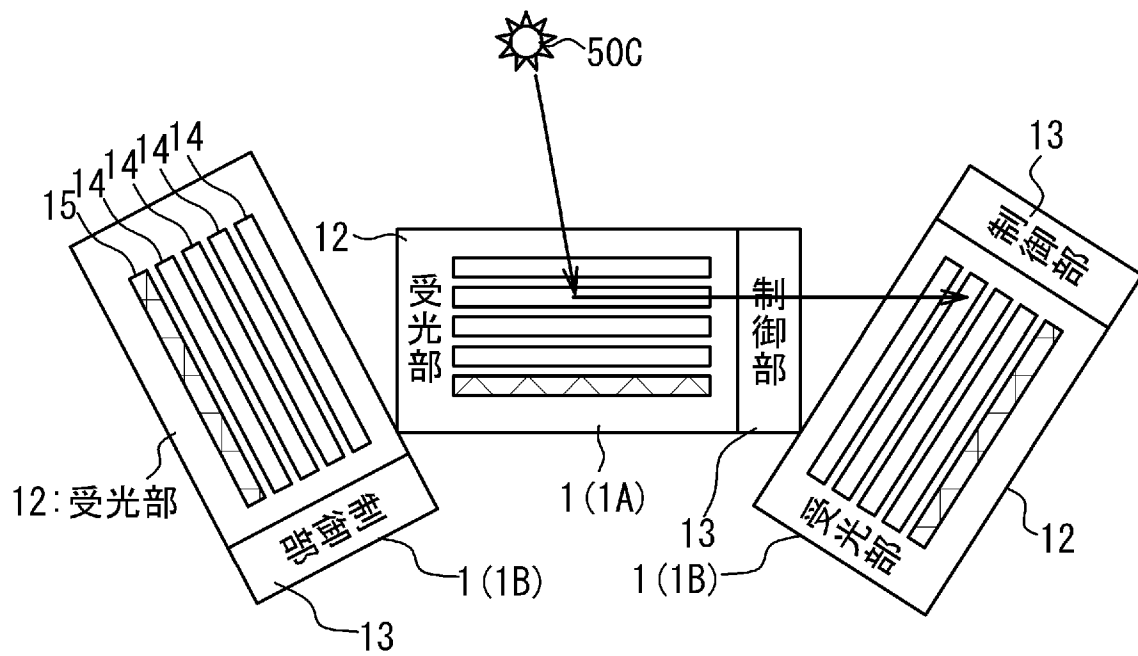
[図13]



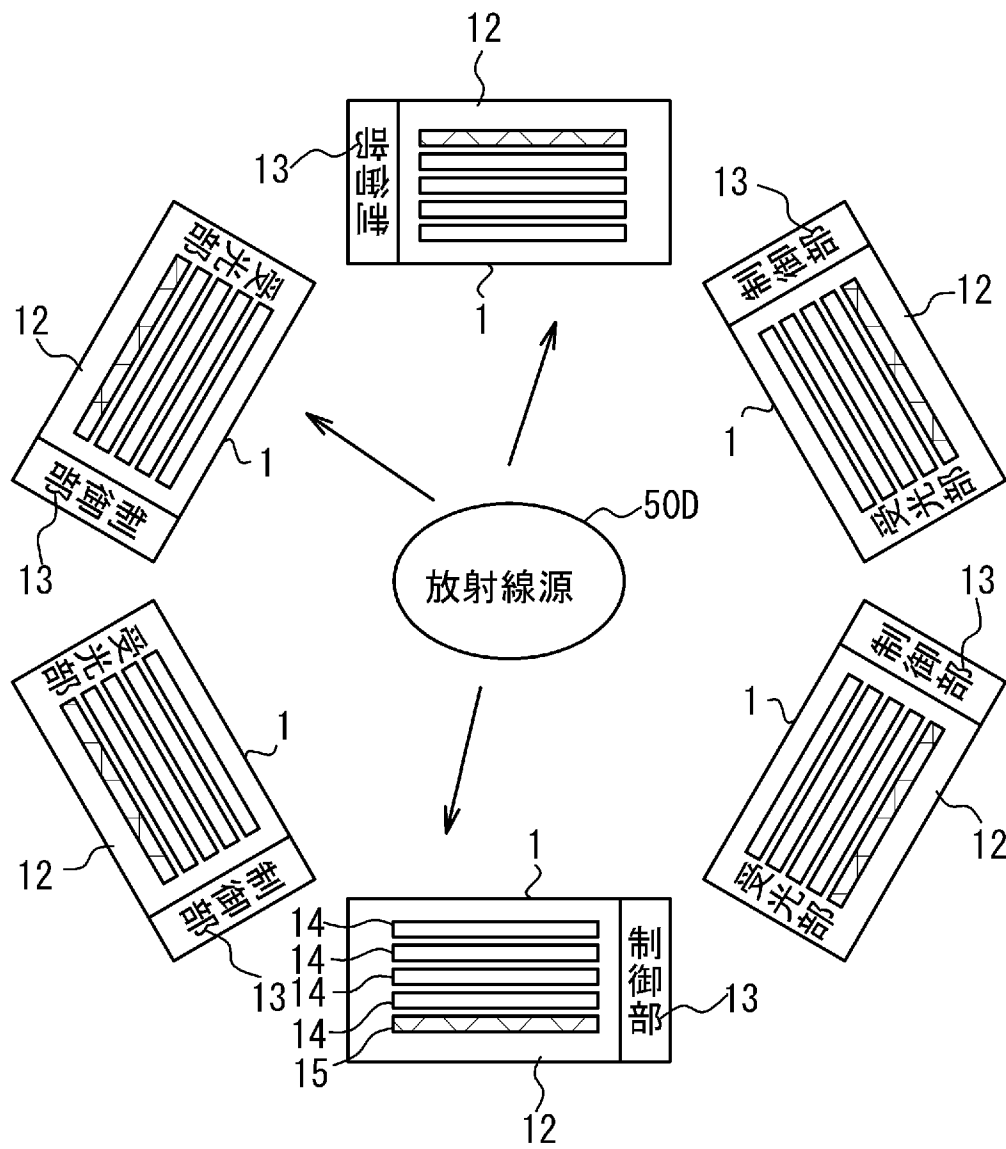
[図14]



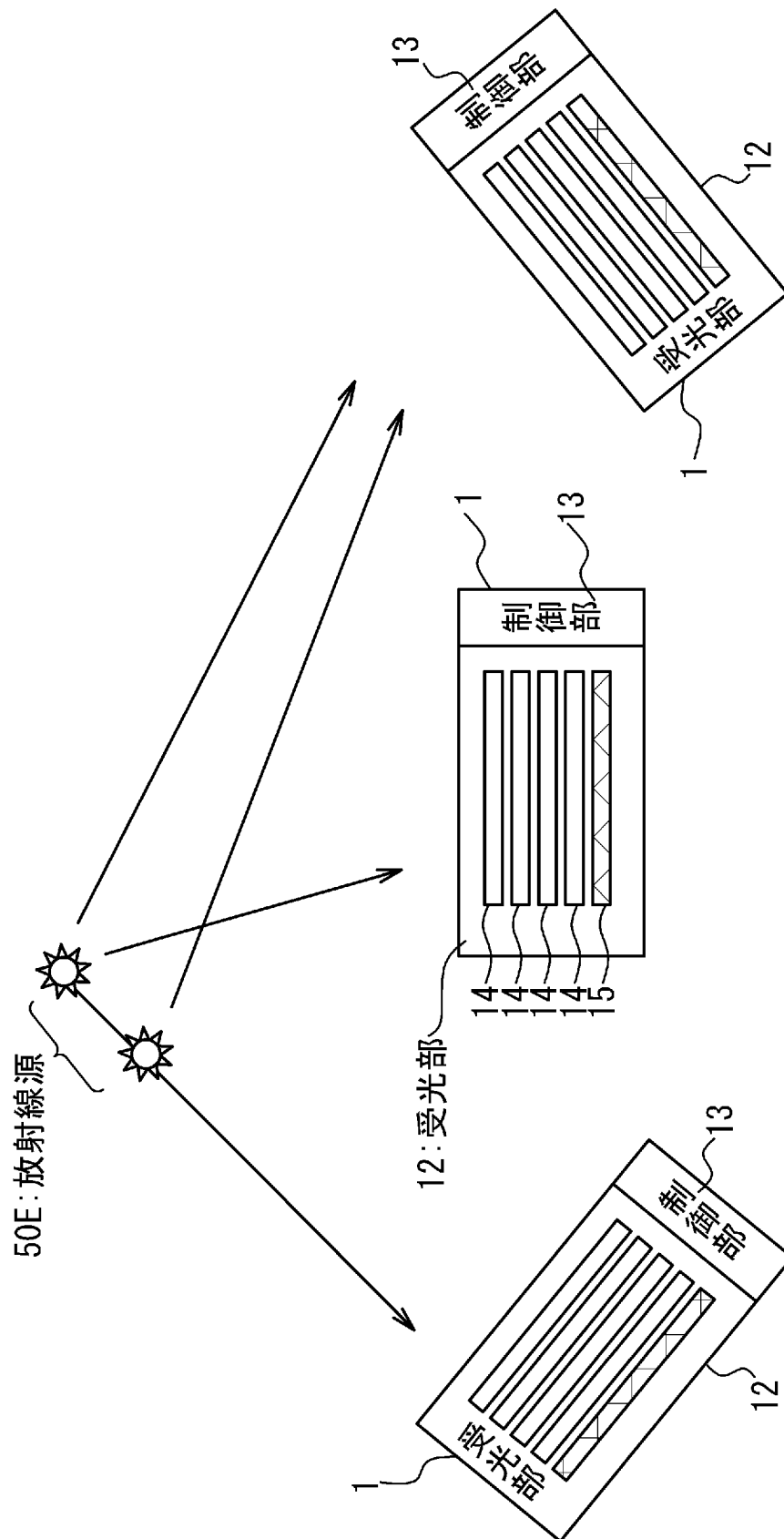
[図15]



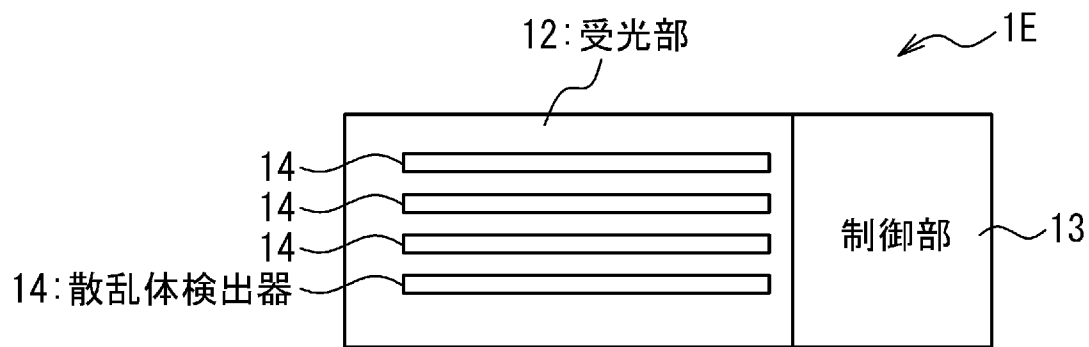
[図16]



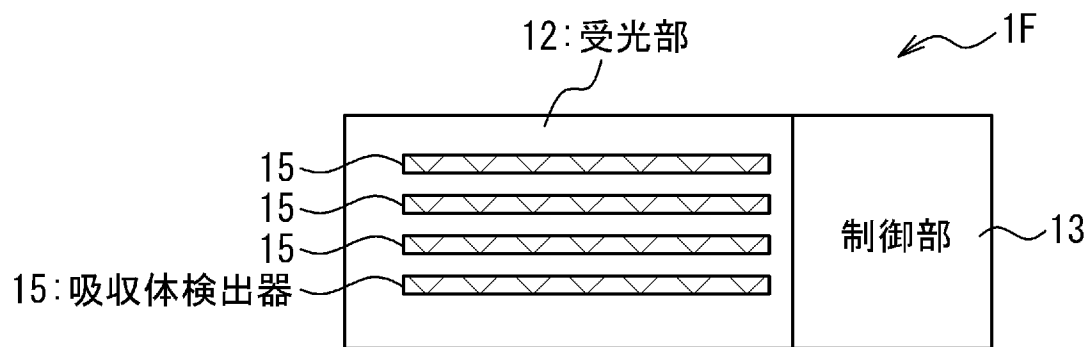
[図17]



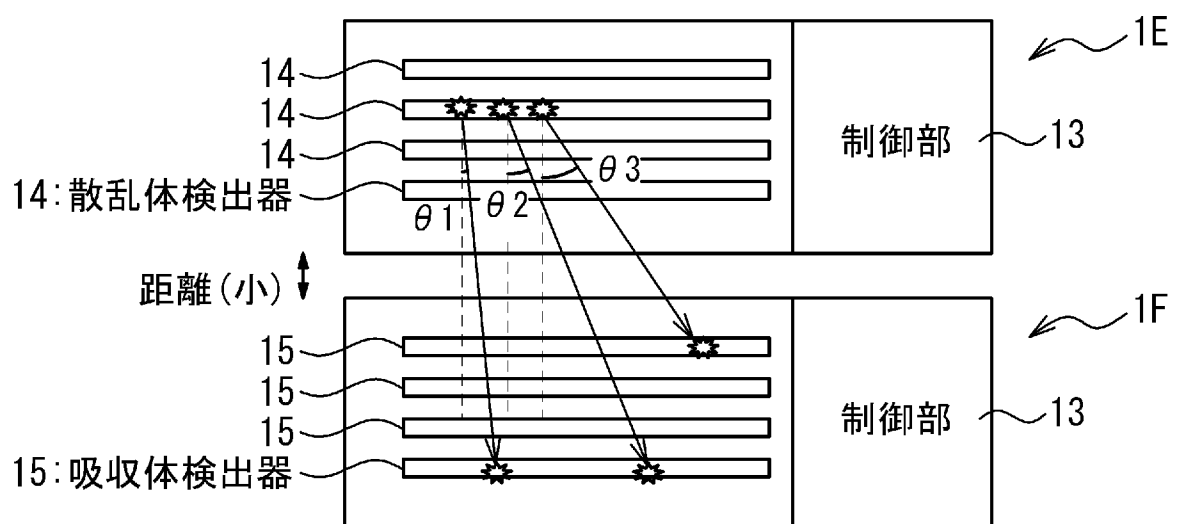
[図18A]



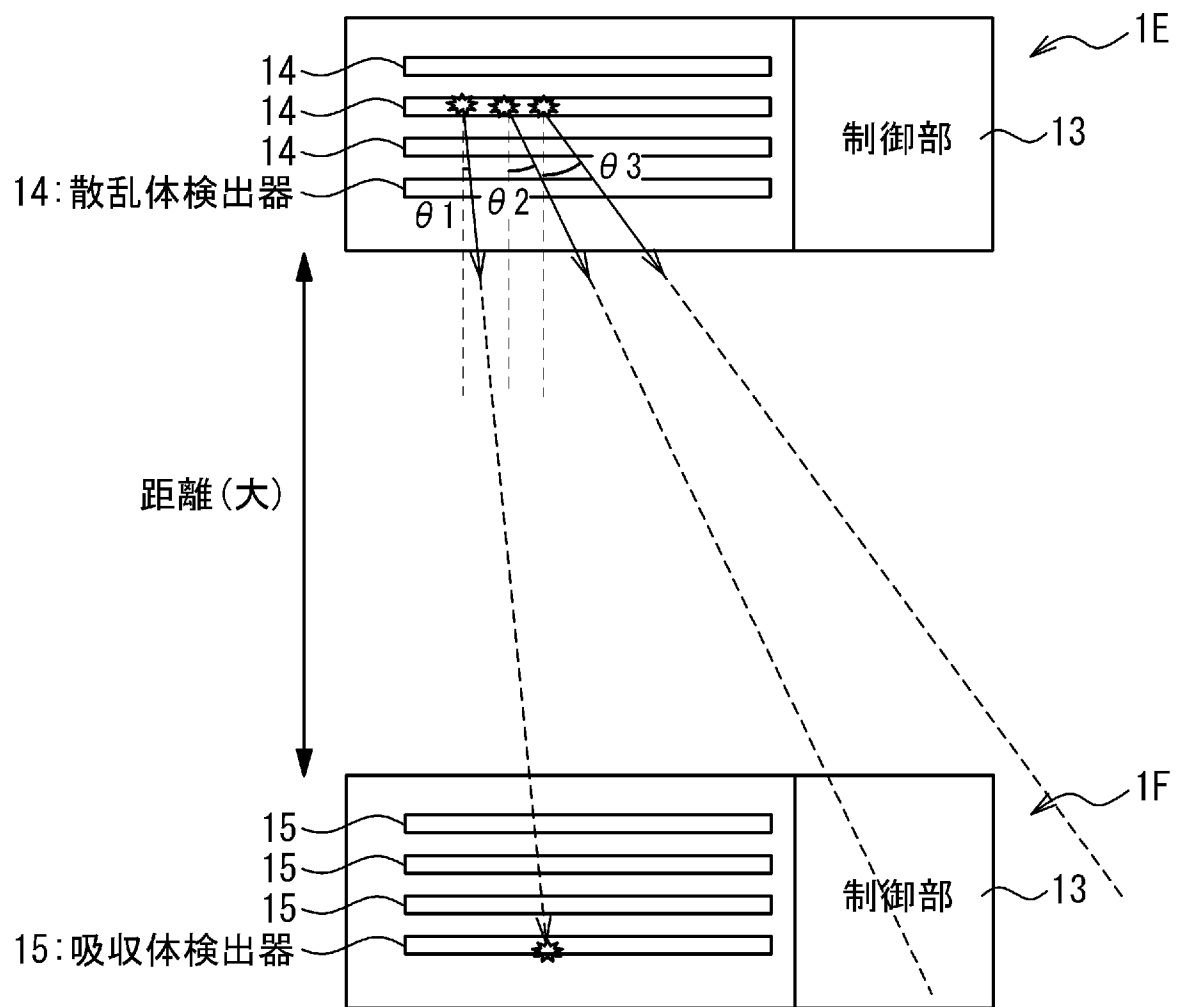
[図18B]



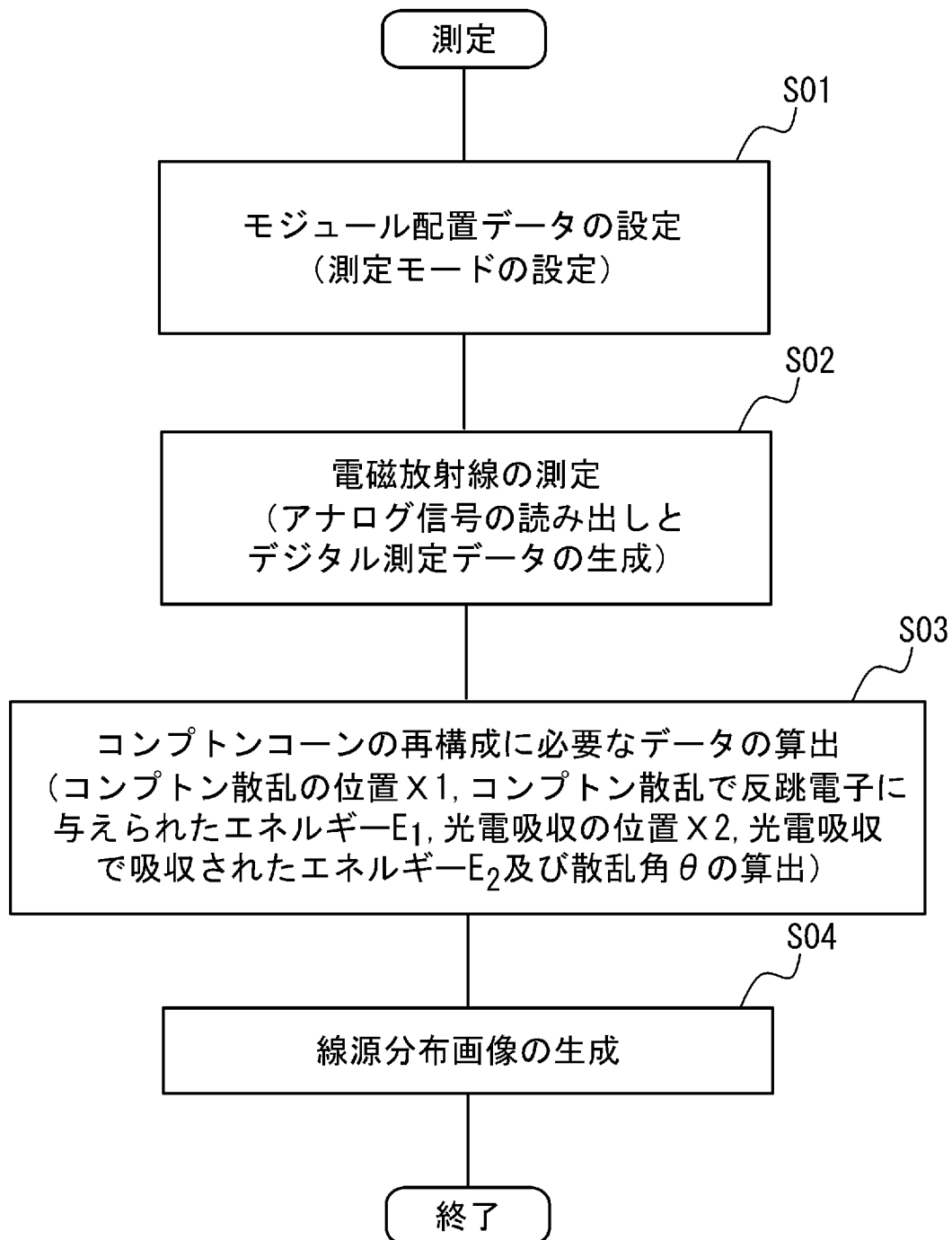
[図19A]



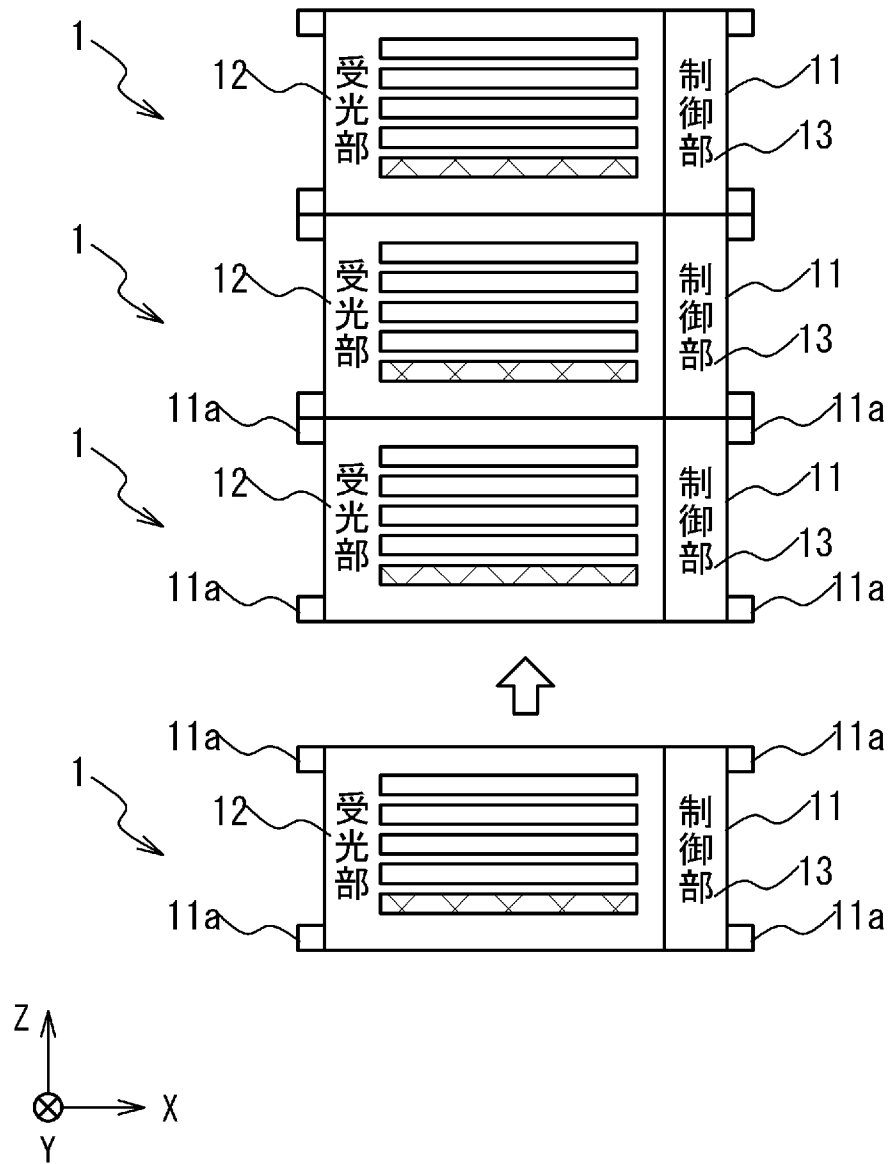
[図19B]



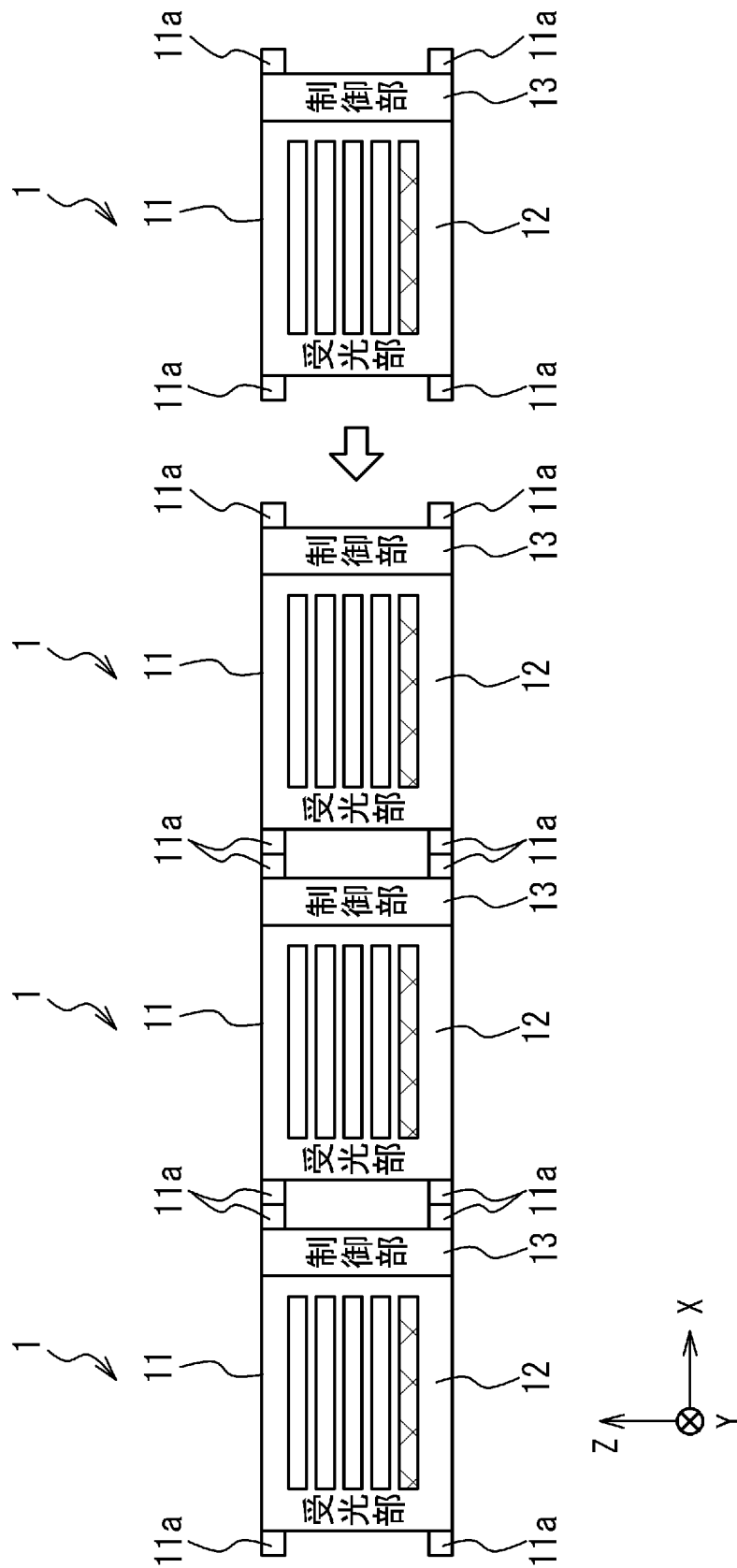
[図20]



[図21A]



[図21B]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/071641

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01T1/29(2006.01)i, G01T1/16(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01T1/29, G01T1/16

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	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	WO 2012/077468 A1 (Riken, Japan), 14 June 2012 (14.06.2012), fig. 1 to 3, 6; paragraphs [0030] to [0047], [0062] to [0064] & US 8847166 B2 fig. 1 to 3, 6; column 8, line 10 to column 13, line 35; column 17, line 5 to column 18, line 3 & WO 2012/077468 A1	1, 4-12 2-3
A	JP 2005-208057 A (Riken, Japan), 04 August 2005 (04.08.2005), fig. 1; paragraphs [0016] to [0022] & US 2005/0139775 A1 fig. 1; paragraphs [0040] to [0045] & EP 1548465 A1	1-12

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
29 August 2016 (29.08.16)

Date of mailing of the international search report
06 September 2016 (06.09.16)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/071641

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 2015-75424 A (Waseda University), 20 April 2015 (20.04.2015), fig. 2; paragraphs [0015] to [0029] & WO 2015/053098 A1	1-12

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, G01T1/16(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, G01T1/16

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016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
X A	WO 2012/077468 A1（独立行政法人理化学研究所） 2012.06.14, 第1-3図, 第6図, 第[0030]-[0047] 段落, 第[0062]-[0064]段落 & US 8847166 B2 第1-3図, 第6図, 第8カラム第10行-第1 3カラム第35行, 第17カラム第5行-第18カラム第3行 & WO 2012/077468 A1	1, 4-12 2-3
A	JP 2005-208057 A（独立行政法人理化学研究所） 2005.08.04, 第1図, 第[0016]-[0022]段落	1-12

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願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

29.08.2016

国際調査報告の発送日

06.09.2016

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）

関根 裕

21

5552

電話番号 03-3581-1101 内線 3273

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	& US 2005/0139775 A1 第1図, 第[0040] – [0045] 段落 & EP 1548465 A1 JP 2015-75424 A (学校法人早稲田大学) 2015.04.20, 第2図, 第[0015] – [0029] 段落 & WO 2015/053098 A1	1-12