

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6232059号
(P6232059)

(45) 発行日 平成29年11月15日(2017.11.15)

(24) 登録日 平成29年10月27日(2017.10.27)

(51) Int.Cl.

F 1

GO 1 T 1/164 (2006.01)

GO 1 T 1/164

1/164

B

GO 1 T 1/17 (2006.01)

GO 1 T 1/17

1/17

H

GO 1 T 1/161 (2006.01)

GO 1 T 1/161

1/161

A

請求項の数 15 (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2015-519392 (P2015-519392)
 (86) (22) 出願日 平成25年5月30日 (2013.5.30)
 (65) 公表番号 特表2015-528900 (P2015-528900A)
 (43) 公表日 平成27年10月1日 (2015.10.1)
 (86) 國際出願番号 PCT/IB2013/054466
 (87) 國際公開番号 WO2014/001926
 (87) 國際公開日 平成26年1月3日 (2014.1.3)
 審査請求日 平成28年5月27日 (2016.5.27)
 (31) 優先権主張番号 61/664,854
 (32) 優先日 平成24年6月27日 (2012.6.27)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 590000248
 コーニンクレッカ フィリップス エヌ
 ヴェ
 KONINKLIJKE PHILIPS
 N. V.
 オランダ国 5656 アーネー アイン
 ドーフェン ハイテック キャンパス 5
 High Tech Campus 5,
 NL-5656 AE Eindhoven
 (74) 代理人 100107766
 弁理士 伊東 忠重
 (74) 代理人 100070150
 弁理士 伊東 忠彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】デジタルPET(DPET)エネルギー校正方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

PET(Positron Emission Tomography)イベントデータのエネルギー訂正のためのシステムであって、

ガンマイベントに対応する複数の衝突イベントのイベントデータを受信するステップであって、各衝突イベントが検出モジュールのピクセルにより検出され、エネルギー及び時間を含む、受信するステップと、

散乱衝突イベントのエネルギー非線形性を補償するため、1以上のパラメータを含むエネルギー線形性訂正モデルを用いて前記衝突イベントのエネルギーを線形化するステップと、

前記衝突イベントの時間に基づき前記衝突イベントのクラスタを特定するステップであって、前記特定されたクラスタのそれぞれにおける衝突イベントは単一のガンマイベントに対応する時間ウィンドウ内にある、特定するステップと、

各クラスタの衝突イベントのサブセットに対応するピクセルに基づき前記クラスタのサブクラスタを特定するステップと、

第1訂正ファクタセットを用いて前記サブクラスタのエネルギーを訂正するステップと、

第2訂正ファクタセットを用いて複数のサブクラスタを含むクラスタのエネルギーを訂正するステップと、

を実行するようプログラムされた少なくとも1つのエネルギー訂正プロセッサを有するシ

10

20

ステム。

【請求項 2】

前記衝突イベントのエネルギーの線形化は、前記衝突イベントのそれについて、

前記エネルギー線形化訂正モデルのパラメータに対応するパラメータ値であって、前記衝突イベントに対応するピクセルに固有のパラメータ値を決定するステップと、

前記決定されたパラメータ値によって前記エネルギー線形化訂正モデルのパラメータを更新するステップと、

前記更新されたエネルギー線形化訂正モデルを用いて前記衝突イベントのエネルギーを訂正するステップであって、前記エネルギー線形性訂正モデルは、

【数 1】

10

$$P = -k_1 A \log_{10} \left(1 - \left(k_2 \frac{P_0}{A} \right)^{\frac{1}{k_3}} \right)$$

ただし、 k_1 、 k_2 、 k_3 は前記パラメータであり、 P_0 は前記衝突イベントのエネルギーであり、 P は前記衝突イベントの訂正されたエネルギーであり、 A はアクティブセルの個数である、訂正するステップと、

を含む、請求項 1 記載のシステム。

【請求項 3】

前記衝突イベントのエネルギーは、約 100 keV と約 500 keVとの間で線形化される、請求項 1 又は 2 記載のシステム。

20

【請求項 4】

前記サブクラスタの特定は、前記衝突イベントに対応する 1 以上の検出モジュールのピクセルを複数の重複しないブロックにグループ化するステップであって、前記検出モジュールのピクセルは前記衝突イベントに対応するピクセルを含む、グループ化するステップを含み、

前記サブクラスタのそれぞれは、前記重複しないブロックの 1 つに対応し、前記 1 つの重複しないブロックに対応する前記対応するクラスタの衝突イベントを含む、請求項 1 乃至 3 何れか一項記載のシステム。

【請求項 5】

前記第 1 訂正ファクタセット及び / 又は前記第 2 訂正ファクタセットの各訂正ファクタは、前記衝突イベントの検出モジュールのピクセルに固有であり、既知のピークエネルギーと対応する測定されたピークエネルギーとのレシオとの 1 以上である、請求項 1 乃至 4 何れか一項記載のシステム。

30

【請求項 6】

前記サブクラスタの訂正は、前記サブクラスタのそれについて、

前記サブクラスタの 1 以上の衝突イベントのエネルギーを合計することによって、前記サブクラスタのエネルギーを決定するステップと、

前記サブクラスタのメインの衝突イベントであって、前記サブクラスタの全ての衝突イベントの最大エネルギーを含むメインの衝突イベントを決定するステップと、

前記第 1 訂正ファクタセットを用いて、前記メインの衝突イベントに対応するピクセルに固有の訂正ファクタを決定するステップと、

40

前記訂正ファクタを前記サブクラスタのエネルギーに適用するステップと、
を含む、請求項 1 乃至 5 何れか一項記載のシステム。

【請求項 7】

複数のサブクラスタを含む前記クラスタの訂正は、複数のサブクラスタを含むクラスタのそれについて、

前記クラスタの 1 以上のサブクラスタのエネルギーを合計することによって、前記クラスタのエネルギーを決定するステップと、

前記クラスタのメインの衝突イベントであって、前記クラスタの全ての衝突イベントの最大エネルギーを有するメインの衝突イベントを決定するステップと、

50

前記第2訂正ファクタセットを用いて、前記メインの衝突イベントに対応するピクセルに固有の訂正ファクタを決定するステップと、

前記訂正ファクタを前記クラスタのエネルギーに適用するステップと、
を含む、請求項1乃至6何れか一項記載のシステム。

【請求項8】

患者の関心領域からガンマ光子を検出し、前記ガンマ光子に応答して前記イベントデータを生成する複数のソリッドステート検出モジュールと、

前記エネルギー訂正プロセッサにより訂正されるように前記イベントデータを処理し、
前記関心領域の画像表現を生成する再構成プロセッサと、
を更に有する、請求項1乃至7何れか一項記載のシステム。

【請求項9】

C₀57及びN_a22を含む複数のキャリブレーションソースのイベントデータを用いて、前記エネルギー線形性訂正モデルのパラメータ値を決定するキャリブレーションプロセッサを更に有する、請求項1乃至8何れか一項記載のシステム。

【請求項10】

PET(Positron Emission Tomography)イベントデータのエネルギー訂正のための方法であって、

少なくとも1つのプロセッサが、ガンマイベントに対応する複数の衝突イベントにイベントデータを受信するステップであって、各衝突イベントは、検出モジュールのピクセルにより検出され、エネルギー及び時間を含む、受信するステップと、

前記少なくとも1つのプロセッサが、散乱衝突イベントのエネルギー非線形性を補償するため、1以上のパラメータを含むエネルギー線形性訂正モデルを用いて前記衝突イベントのエネルギーを線形化するステップと、

前記少なくとも1つのプロセッサが、前記衝突イベントの時間に基づき前記衝突イベントのクラスタを特定するステップであって、前記特定された衝突イベントのクラスタのそれぞれにおける衝突イベントは単一のガンマイベントに対応する時間ウィンドウ内にある、特定するステップと、

前記少なくとも1つのプロセッサが、前記クラスタの衝突イベントに対応するピクセルに基づき前記クラスタのサブクラスタを特定するステップと、

前記少なくとも1つのプロセッサが、第1訂正ファクタセットを用いて前記サブクラスタのエネルギーを訂正するステップと、

前記少なくとも1つのプロセッサが、第2訂正ファクタセットを用いて複数のサブクラスタを含むクラスタのエネルギーを訂正するステップと、
を有する方法。

【請求項11】

前記サブクラスタの特定は、前記衝突イベントに対応する1以上の検出モジュールのピクセルを複数の重複しないブロックにグループ化するステップであって、前記検出モジュールのピクセルは前記衝突イベントに対応するピクセルを含む、グループ化するステップを含み、

前記サブクラスタのそれぞれは、前記重複しないブロックの1つに対応し、前記1つの重複しないブロックに対応する前記対応するクラスタの衝突イベントを含む、請求項10記載の方法。

【請求項12】

前記第1訂正ファクタセット及び/又は前記第2訂正ファクタセットの各訂正ファクタは、前記衝突イベントの検出モジュールのピクセルに固有であり、既知のピークエネルギーと対応する測定されたピークエネルギーとのレシオとの1以上である、請求項10又は11記載の方法。

【請求項13】

前記サブクラスタの訂正は、前記サブクラスタのそれぞれについて、

前記サブクラスタの1以上の衝突イベントのエネルギーを合計することによって、前記

10

20

30

40

50

サブクラスタのエネルギーを決定するステップと、

前記サブクラスタのメインの衝突イベントであって、前記サブクラスタの全ての衝突イベントの最大エネルギーを含むメインの衝突イベントを決定するステップと、

前記第1訂正ファクタセットを用いて、前記メインの衝突イベントに対応するピクセルに固有の訂正ファクタを決定するステップと、

前記訂正ファクタを前記サブクラスタのエネルギーに適用するステップと、
を含む、請求項1_0乃至1_2何れか一項記載の方法。

【請求項14】

複数のサブクラスタを含む前記クラスタの訂正は、複数のサブクラスタを含むクラスタのそれぞれについて、

10

前記クラスタの1以上のサブクラスタのエネルギーを合計することによって、前記クラスタのエネルギーを決定するステップと、

前記クラスタのメインの衝突イベントであって、前記クラスタの全ての衝突イベントの最大エネルギーを有するメインの衝突イベントを決定するステップと、

前記第2訂正ファクタセットを用いて、前記メインの衝突イベントに対応するピクセルに固有の訂正ファクタを決定するステップと、

前記訂正ファクタを前記クラスタのエネルギーに適用するステップと、
を含む、請求項1_0乃至1_3何れか一項記載の方法。

【請求項15】

前記少なくとも1つのプロセッサが、Co 57及びNa 22を含む複数のキャリブレーションソースのイベントデータを用いて、前記エネルギー線形性訂正モデルのパラメータ値を決定するステップを更に有する、請求項1_0乃至1_4何れか一項記載の方法。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本出願は、一般にPET(Positron Emission Tomography)に関する。それは、デジタルPET(DPET)検出装置のエネルギー校正に関して特定の用途を見出し、それを参照して説明される。しかしながら、それはまた他の利用シナリオにおいても用途を見出し、必ずしも上述した用途に限定される必要はないことが理解されるべきである。

30

【背景技術】

【0002】

PET検出装置の1つの仕様は、検出装置がどの程度良好に散乱イベントを拒絶するかを特徴付けるエネルギー分解能である。検出装置の散乱拒絶能力がより良好であるほど、生成される画像のコントラストはより高くなる。エネルギー分解能は、DPETが経時的に処置の有効性の定量的な解析を実行するとき、アナログPET検出装置よりDPET検出装置についてより重要となりうる。より小さなエネルギー分解能は、散乱イベントを真的活動分布から離れたものにし続けるのに役立ち、従ってSUV(Standardized Uptake Value)の精度を向上させる。

【0003】

40

DPET検出装置のキャリブレーション又は校正は、エネルギー分解能を向上させるのに重要である。DPET検出装置におけるエネルギー分解能に対する1つのチャレンジは、DPET検出装置のフォトダイオードリセット機構による光子計数における非線形性である。DPET検出装置を校正する現在の方法は、単一の対数モデルを用いて当該非線形性を訂正する。しかしながら、これは少なくとも2つの問題を提示する。対数モデルが全てのピクセルに対して良好には実行しないように、個々のピクセルは異なる訂正を必要とする。さらに、対数モデルは、クラスタリングに重要となる100~500keVの範囲のエネルギーレベルを過剰に訂正する。

【0004】

非線形性を訂正した後、DPET検出装置を校正する現在の方法は、Na 22などのキ

50

ヤリプレーションソースのパルス高スペクトルの重心を測定する。このとき、それは、理想的な重心に対する測定された重心のレシオを取得し、スケーリングファクタとして全てのガンマイベントと当該レシオとを乗算する。これは、単一の結晶によりキャプチャされたガンマイベントなどの非散乱ガンマイベントに対して良好に作用する。しかしながら、訂正係数は散乱イベントに対しては良好には作用せず、エネルギー分解能はより精度が低くなる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本出願は、上述した問題点等を解決する新規かつ改良されたシステム及び方法を提供する。 10

【課題を解決するための手段】

【0006】

一態様によると、PET (Positron Emission Tomography) イベントデータのエネルギー訂正のためのシステムが提供される。本システムは、ガンマイベントに対応する複数の衝突イベントのイベントデータを受信するようプログラムされた少なくとも1つのエネルギー訂正プロセッサを有する。各衝突イベントは、検出モジュールのピクセルにより検出され、エネルギー及び時間を含む。衝突イベントのエネルギーは、1以上のパラメータを含むエネルギー線形性訂正モデルを用いて線形化される。衝突イベントのクラスタは、衝突イベントの時間に基づき特定され、クラスタのサブクラスタは、クラスタの衝突イベントに対応するピクセルに基づき特定される。サブクラスタのエネルギーは、第1訂正ファクタセットを用いて訂正され、複数のサブクラスタを含むクラスタのエネルギーは、第2訂正ファクタセットを用いて訂正される。 20

【0007】

一態様によると、PET (Positron Emission Tomography) イベントデータのエネルギー訂正のための方法が提供される。本方法は、少なくとも1つのプロセッサにより実行され、ガンマイベントに対応する複数の衝突イベントのイベントデータを受信することを含む。各衝突イベントは、検出モジュールのピクセルにより検出され、エネルギー及び時間を含む。衝突イベントのエネルギーは、1以上のパラメータを含むエネルギー線形性訂正モデルを用いて線形化される。衝突イベントのクラスタは、衝突イベントの時間に基づき特定され、クラスタのサブクラスタは、クラスタの衝突イベントに対応するピクセルに基づき特定される。サブクラスタのエネルギーは、第1訂正ファクタセットを用いて訂正され、複数のサブクラスタを含むクラスタのエネルギーは、第2訂正ファクタセットを用いて訂正される。 30

【0008】

他の態様によると、PET (Positron Emission Tomography) イベントデータのエネルギー訂正のためのシステムが提供される。本システムは、ガンマイベントに対応する複数の衝突イベントのイベントデータを受信するようプログラムされた少なくとも1つのエネルギープロセッサを有する。各衝突イベントは検出モジュールのピクセルにより検出され、エネルギー及び時間を含む。衝突イベントのエネルギーは、エネルギー線形性訂正モデルを用いて、約100keVと約500keVとの間で線形化される。衝突イベントのクラスタは、衝突イベントの時間に基づき特定され、特定されたクラスタのエネルギーは、複数レベルの訂正ファクタを用いて訂正される。共通のクラスタの衝突イベントの訂正されたエネルギーが合成され、合成された訂正されたエネルギーと所定の閾値とが比較される。 40

【発明の効果】

【0009】

1つの効果は、改良されたデジタルPETの検出装置のエネルギー分解能を向上させることである。

【0010】

50

他の効果は、より高いコントラストの画像を生じさせる。

【0011】

本発明の更なる効果は、以下の詳細な説明を参照及び理解した当業者に理解されるであろう。

【0012】

本発明は、各種コンポーネント及びコンポーネントの構成と、各種ステップ及びステップの構成とによる形態をとる。図面は、好適な実施例を説明するためのものにすぎず、本発明を限定するものとして解釈されるべきでない。

【図面の簡単な説明】

【0013】

10

【図1】図1は、ソリッドステート検出モジュールを利用するPETシステムを示す。

【図2】図2は、検出モジュールを示す。

【図3】図3は、PET処理システムを示す。

【図4】図4は、Co57キャリブレーションソースのパルス高スペクトルを示す。

【図5】図5は、Na22キャリブレーションソースのパルス高スペクトルを示す。

【図6】図6は、衝突イベントのエネルギー線形性訂正方法を示す。

【図7】図7は、非散乱イベント及び散乱イベントのパルス高スペクトルを示す。

【図8】図8は、エネルギー訂正をクラスタリングする方法を示す。

【図9A】図9Aは、エネルギー訂正後のPETシステムのエネルギー分解能を示す。

【図9B】図9Bは、エネルギー訂正前のPETシステムのエネルギー分解能を示す。

20

【図10】図10は、エネルギー線形性訂正モデルのパラメータ値を決定する方法を示す。

【図11】図11は、第1レベルスケーリングファクタを決定する方法を示す。

【図12】図12は、複数のピクセルの第1レベルパルス高スペクトルを示す。

【図13】図13は、第2レベルスケーリングファクタを決定する方法を示す。

【図14】図14は、複数のピクセルの第2レベルパルス高スペクトルを示す。

【発明を実施するための形態】

【0014】

図1を参照して、PET(Positron Emission Tomography)システム10は、イメージングする患者の関心領域(ROI)14を受信するためのイメージングボリューム12を有する。さらに、PETシステム10は、患者を支持し、及び/又はイメージングボリューム12にROI14を配置するための患者ベッドなどの患者サポート(図示せず)を有することが可能である。ROI14の具体例は、限ることなく、心臓、脳、甲状腺、骨、関節、靭帯、腱、筋肉、神経、腎臓、肺、腫瘍、病変などを含む。

30

【0015】

PETシステム10は更に、典型的には、イメージングボリューム12の周囲に円上に配置された複数のソリッドステート検出モジュール16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30(ソリッドステート検出モジュールなど)を有する。検出モジュール16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30は、イメージングボリューム12からガンマ光子を受光する受光面32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46を有する。ガンマ光子を受信したことに応答して、検出モジュールは、PETシステム10のPET処理システム48に提供されるガンマイベントのイベントデータを生成する。図示されるように、ガンマ光子のペアはROI14から発せられ、第1検出モジュール16と第2検出モジュール24とにほぼ同時に(すなわち、同時に)衝突する。

40

【0016】

図2を参照して、各検出モジュール16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30は、ピクセル化された検出グリッド54を定義する放射線感受性素子52などの複数の放射線感受性素子を有する。放射線感受性素子は、光子の衝突のエネルギーを含む対応する光子の衝突を検出し、それぞれはピクセル化された検出グリッド54のピクセルに対応す

50

る。ピクセル化された検出グリッド 5 4 は、ブロック 5 6 などの複数のオーバラップしないブロックに細分化可能であり、各ブロックは、 2×2 のピクセルのグループ化などのピクセルのグループ化から構成される。放射線感受性素子の具体例は、デジタル又はアナログシリコン光電子増倍管 (S i P M) 、フォトダイオード及び他の光電子トランジスタを含む。しかしながら、半導体結晶、C Z T (Z i n c - C a d m i u m T e l l u r i d e) 素子などの直接光電変換装置がまた考えられる。

【 0 0 1 7 】

放射線感受性素子は、典型的には、ガンマ光子と可視光光子との 1 つを検出する。放射線感受性素子がガンマ光子を検出する限り、ピクセル化された検出グリッド 5 4 は、典型的には、検出モジュール 5 0 の受光面を規定する。しかしながら、放射線感受性素子 5 2 が可視光光子を検出する限り、検出モジュール 5 0 は、典型的には、検出モジュール 5 0 の受光面を規定するシンチレータ素子などの 1 以上のシンチレータ素子を有する。シンチレータ素子は、ガンマ光子を可視光光子に変換し、放射線感受性素子に光学的に結合される。典型的には、シンチレータ素子は、放射線感受性素子と 1 : 1 のレシオにより光学的に相關する。ガンマ光子によって衝突されると、ガンマ光子はシンチレータ素子にエネルギーを与え、シンチレータ素子は検出グリッド 5 4 に対して可視光光子を発する。シンチレーション素子の具体例は、シンチレータプレート (ヨウ化ナトリウム結晶) 、個々のシンチレーション又はピクセル化された結晶 (L Y S O 、 L S O など) などを含む。

【 0 0 1 8 】

検出モジュール 5 0 は、放射線感受性素子を用いてガンマイベントのイベントデータを生成する。ガンマイベントは、ガンマ光子の受光に対応し、典型的には、散乱イベント及び非散乱イベントの一方である。検出モジュール 5 0 がシンチレータ素子を含む場合、非散乱イベントは、典型的には、単一のシンチレータ素子により完全にキャプチャされるガンマイベントであり、散乱イベントは、典型的には、複数のシンチレータ素子によりキャプチャされるガンマイベントである。ガンマイベントのイベントデータは、放射線感受性素子により検出される対応する衝突イベントを説明する。各衝突イベントのイベントデータは、対応する光子の衝突の位置、時間及びエネルギーを適切に特定する。

【 0 0 1 9 】

より詳細には、ガンマ光子がシンチレータ素子に当ると、それは散乱又は偏向されるかもしれない。軌跡の変化は、散乱又はコンプトン角度により規定される。シンチレータ素子に堆積するエネルギー量はコンプトン角度に比例し、堆積するエネルギー量は、シンチレーションにより生じる光の量又はエネルギーに直接的に相關する。図 2 の例では、ガンマ光子は、3 つの異なるシンチレータ素子において 3 つのシンチレーションを生じさせる第 3 シンチレータにおけるそのエネルギーの剩余を最終的に堆積する前に、2 つのシンチレータ素子において散乱する。

【 0 0 2 0 】

図 3 を参照して、P E T 处理システム 4 8 はデータ取得プロセッサ 6 2 を有する。データ取得プロセッサ 6 2 は、15 分などの所定の長さのデータ取得期間において検出モジュール 1 6 , 1 8 , 2 0 , 2 2 , 2 4 , 2 6 , 2 8 , 3 0 からイベントデータを取得する。各衝突イベントのイベントデータが検出装置のピクセル又は素子 5 2 、エネルギー及びイベントの時間を特定する場合、イベントデータは、データ取得期間中に検出モジュール 1 6 , 1 8 , 2 0 , 2 2 , 2 4 , 2 6 , 2 8 , 3 0 により検出された全ての衝突イベントのイベントデータを含む。データ取得プロセッサ 6 2 は、R O I 1 4 をイメージングするためにイベントデータを取得するため、及び / 又は検出モジュール 1 6 , 1 8 , 2 0 , 2 2 , 2 4 , 2 6 , 2 8 , 3 0 の校正のためにイベントデータを取得するため利用可能である。

【 0 0 2 1 】

データ取得プロセッサ 6 2 がR O I 1 4 をイメージングするのに利用されている場合、データ取得プロセッサ 6 2 は、R O I 1 4 から発せられたガンマ光子のイベントデータを取得し、取得したイベントデータをイメージングバッファ 6 4 に格納する。当該取得を準

10

20

30

40

50

備するのに、R O I 1 4 は 1 以上の放射線同位体と共に注入される。このような放射線同位体の具体例は、限定することなく、T c - 9 9 m、G a - 6 7 及びI n - 1 1 1 を含む。放射線同位体は、特定タイプの組織に対して曲がる又は好ましくは吸収される放射性医薬品を生成するため、放射線リガンドと合成及び注入可能である。さらに、R O I 1 4 はイメージングボリューム 1 2 において配置される。例えば、患者は患者サポートに配置され、患者サポートはイメージングボリューム 1 2 に対して R O I 1 4 を移動する。

【 0 0 2 2 】

データ取得プロセッサ 6 2 が検出モジュール 1 6 , 1 8 , 2 0 , 2 2 , 2 4 , 2 6 , 2 8 , 3 0 の校正のために利用されている場合、データ取得プロセッサ 6 2 は、1 以上のキャリブレーションソースのそれぞれについて、キャリブレーションソースから発せられたガンマ光子のイベントデータを取得し、取得したイベントデータをキャリブレーションバッファ 6 6 に格納する。典型的には、キャリブレーションソースは、N a 2 2 及びC o 5 7 キャリブレーションソースなどの複数のキャリブレーションソースを含む。さらに、キャリブレーションソースは、5 1 1 k e V などの 1 以上の既知のエネルギーピークを含み、典型的には、1 2 2 k e V、5 1 1 k e V 及び1 2 7 5 k e V などの約1 0 0 ~ 5 0 0 k e V の範囲の複数の既知のエネルギーピークを含む。キャリブレーションソースのエネルギーピークは、キャリブレーションソースのパルス高スペクトル上のピークである。キャリブレーションソースは、典型的には、全ての検出素子に等しく放射線を照射するため球状に形成される。利用可能なキャリブレーションソースの具体例は、N a 2 2 、C o 5 7 、T c 、N a 1 7 及びガンマ光子を発する他のソースを含む。キャリブレーションソースの1つについて取得を準備するのに、キャリブレーションソースは、イメージングボリューム 1 2 内に、典型的には、イメージングボリューム 1 2 の中心に配置される。

【 0 0 2 3 】

P E T 处理システム 4 8 のエネルギー訂正プロセッサ 6 8 は、R O I 1 4 のイメージングのため、データ取得プロセッサ 6 2 により取得されたイベントデータを処理する。イベントデータは、典型的には、イメージングバッファ 6 4 を介し受信される。当該処理は、イベントデータに対してエネルギー線形性訂正 (E L C) を実行することを含む。E L C は、所与の極めて短い期間において検出装置の衝突イベントのエネルギーを加え、当該エネルギーが実質的に5 1 1 k e V であるか否かを判断するクラスタリングに重要である。エネルギーの追加は、エネルギーがリニアスケールに属する場合には正確である。クラスタリングは、ガンマ光子のエネルギーが全てのガンマイベントの約3 0 % を説明する検出素子の複数のシンチレータ素子に堆積する検出装置の散乱イベントにとって特に重要である。しかしながら、E L C の既知の方法は、典型的には、この非線形性を正確に補償するには不適切である。

【 0 0 2 4 】

説明のため、図 4 及び5 が注目される。図 4 は、1 2 2 k e V の既知のエネルギーピークを有するC o 5 7 キャリブレーションソースを用いて取得されたパルス高スペクトルを示し、図 5 は、5 1 1 k e V 及び1 2 7 5 k e V の既知のエネルギーピークを有するN a 2 2 キャリブレーションソースを用いて取得されたパルス高スペクトルを示す。E L C がない場合、1 2 2 k e V 、5 1 1 k e V 及び1 2 7 5 k e V の既知のエネルギーピークに対応する測定されたエネルギーピークは、それぞれ1 1 8 k e V 、4 8 9 k e V 及び1 1 6 4 k e V である。

【 0 0 2 5 】

E L C の既知の方法は、典型的には、以下の対数モデルを利用する。

【 0 0 2 6 】

【 数 1 】

$$P = -A \log_{10} \left(1 - \frac{P_0}{A} \right) \quad (1)$$

ただし、P ₀ は検出されたエネルギーであり、P は実際のエネルギーであり、A はアクト

10

20

30

40

50

イブセルの個数である。この関数を用いて 122 keV、511 keV 及び 1275 keV について実際に測定されたエネルギーピークをについてエネルギーを訂正すると、訂正されたエネルギーピークは、130 keV、518 keV 及び 1261 keV となる。しかしながら、訂正されたエネルギーピークはガンマ光子の既知のエネルギーピークにより近くなるが、誤差は依然として大きい。さらに、非線形性は、訂正されたエネルギーピークのレシオ及び既知のエネルギーが異なるため、単一の乗算器を用いて訂正することはできない。例えば、

【0027】

【数2】

$$\frac{130 \text{ keV}}{122 \text{ keV}} = 1.06 \text{ and } \frac{518 \text{ keV}}{511 \text{ keV}} = 1.01$$

10

である。

【0028】

既知の ELC 方法の不適切さを解決するため、以下の対数モデルが ELC について利用される。

【0029】

【数3】

$$P = -k_1 A \log_{10} \left(1 - \left(k_2 \frac{P_0}{A} \right)^{k_3} \right) \quad (2)$$

20

ただし、 k_1 、 k_2 及び k_3 はパラメータであり、 P_0 は検出されたエネルギーであり、 P は実際のエネルギーであり、 A はアクティブセルの個数である。

【0030】

図 6 を参照して、衝突イベントの ELC のための方法 100 が提供される。方法 100 は、エネルギー訂正プロセッサ 68 により実行され、1 以上のパラメータを含む式 (2) の対数モデルなどの ELC モデルを利用する。ELC モデルは、入力として検出されたエネルギーを取得し、訂正されたエネルギーを出力する。

【0031】

方法 100 は、典型的には、PET 处理システム 48 の ELC メモリ 70 から、検出モジュール 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 の各ピクセルの ELC モデルのパラメータに対応するパラメータ値を受信する (102) ことを含む。パラメータ値は、PET システム 10 の校正中に決定される。パラメータ値は、例えば、各検出モジュール 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 の ELC ルックアップテーブル (LUT) を受信するなどによって受信可能であり、ここで、ELC-LUT は、検出ピクセル及び検出モジュールに基づきインデックス付けされ、検出モジュールの各ピクセルのパラメータ値を含む。各衝突イベントについて、衝突イベントのパラメータ値が決定される (104)。例えば、衝突イベントのパラメータ値は、衝突イベントのピクセルに基づき衝突イベントの検出モジュールに対応する ELC-LUT において検索される。ELC モデルは、その後、決定されたパラメータ値により更新され (106)、衝突イベントのエネルギーは、更新された ELC モデルを用いて訂正される (108)。

30

【0032】

イベントデータの ELC 後、エネルギー訂正プロセッサ 68 は、衝突イベントの時間を使ってイベントデータから衝突又はシンチレーションイベントのクラスタを特定する。クラスタは、互いに時間的に近接して発生し、同一の検出モジュール 50 により検出された衝突イベントを検出することによって、単一のガンマ光子から生じする衝突又はシンチレーションイベントを特定する。さらに、エネルギー訂正プロセッサ 68 は、衝突イベントに対応する検出ピクセル又は検出素子に基づき、クラスタから衝突イベントのサブクラスタを特定する。サブクラスタは、 2×2 のピクセルブロックなどの検出ピクセルのプロック 56 に対応するクラスタの 1 以上の衝突イベントのグループ化である。上述されたように、プロック 56 は、検出モジュール 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 40

40

50

のピクセル化された検出グリッド 5 4 の細分化である。何れかの個数の周知の技術が、クラスタ及びサブクラスタを特定するのに利用可能である。

【 0 0 3 3 】

例えば、ガンマ光子は光の速さで移動する。エネルギーと各検出間の時間を検出する検出素子 5 2 の相対的な位置に基づき、検出されたイベントは、共通のガンマ光子から生じる検出イベントについてスクリーニング可能である。

【 0 0 3 4 】

特定されたクラスタ及びサブクラスタを利用して、エネルギー訂正プロセッサ 6 8 は、クラスタリングエネルギー訂正 (C E C) を実行する。C E C は、非散乱イベントと散乱イベントとのエネルギーピークの間の差分を訂正するのに重要である。非散乱イベントは、典型的には、単一のシンチレータ素子によりキャプチャされ、散乱イベントは、典型的には、複数のシンチレータ素子によりキャプチャされる。図 7 に示されるように、非散乱イベントと散乱イベントとのパルス高スペクトルを別々に生成して、エネルギーピークの差分が観察できる。

10

【 0 0 3 5 】

図 8 を参照して、C E C のための方法 1 5 0 が提供される。方法 1 5 0 は、エネルギー訂正プロセッサ 6 8 により実行され、典型的には、2 つのエネルギー訂正レベルを用いて実行される。しかしながら、当業者は、更なるエネルギー訂正レベルが利用可能であることを理解するであろう。第 1 エネルギー訂正レベルは、クラスタのサブクラスタのエネルギーを訂正し、第 2 エネルギー訂正レベルは、訂正されたサブクラスタのエネルギーから決定されるようなクラスタのエネルギーを訂正する。

20

【 0 0 3 6 】

方法 1 5 0 は、典型的には、P E T 处理システム 4 8 の第 1 及び第 2 レベル C E C メモリ 7 2 , 7 4 のそれぞれから、検出モジュール 5 0 の各ピクセルの第 1 及び第 2 レベルスケーリングファクタを受信する (1 5 2) 。スケーリングファクタは、後述されるように、P E T システム 1 0 の校正中に決定され、例えば、各検出モジュール 1 6 , 1 8 , 2 0 , 2 2 , 2 4 , 2 6 , 2 8 , 3 0 の第 1 及び第 2 レベル C E C L U T を受信するなどによって受信可能である。ただし、第 1 及び第 2 C E C L U T は、検出モジュールのピクセルに基づきインデックス化され、検出モジュールの各ピクセルについてそれぞれ第 1 及び第 2 レベルスケーリングファクタを含む。

30

【 0 0 3 7 】

各サブクラスタについて、サブクラスタのエネルギーは、以下に示されるように、サブクラスタの衝突イベントのエネルギーを合計することによって決定される (1 5 4) 。

【 0 0 3 8 】

【 数 4 】

$$E_j = \sum_{i=1}^n e_i \quad (3)$$

ただし、 E_j はサブクラスタ j のエネルギーであり、 e_i はサブクラスタ j の衝突イベント i のエネルギーであり、 n はサブクラスタ j の衝突イベントの回数である。サブクラスタ j に対応する検出モジュールの受光面上のサブクラスタ j に対応する受光したガンマ光子の位置は、以下のように推定可能である。

40

【 0 0 3 9 】

【 数 5 】

$$x_j = \frac{\sum_{i=1}^n e_i x_i}{E_j} \quad (4)$$

$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^n e_i y_i}{E_j} \quad (5)$$

50

ただし、 x_j 及び y_j は衝突イベント i に対応する検出ピクセルのそれぞれ x 及び y の位置である。

【0040】

サブクラスタのエネルギーを決定した後、エネルギーは、第1レベルスケーリングファクタを用いてスケーリングされる(156)。これは、サブクラスタの衝突イベントのエネルギーを解析することによって、サブクラスタのメインの衝突イベントを決定することを含む。メインの衝突イベントは、最大エネルギーを有する衝突イベントである。メインの衝突イベントを決定した後、第1レベルスケーリングファクタは、メインの衝突イベントのピクセルに基づき決定される。例えば、第1レベルスケーリングファクタは、メインの衝突イベントのピクセルに基づきメインの衝突イベントの検出モジュールに対応する第1レベルCECLUTにおいて検索される。このとき、第1レベルスケーリングファクタは、以下のようにサブクラスタのエネルギーに適用される。

【0041】

【数6】

$$E'_j = E_j x \alpha \quad (6)$$

ただし、 E'_j はサブクラスタ j の訂正されたエネルギーであり、 E_j はサブクラスタ j のオリジナルのエネルギーであり、 α はスケーリングファクタである。

【0042】

1つのサブクラスタしか含まない各クラスタについて、クラスタのエネルギーはサブクラスタのエネルギーである。しかしながら、複数のサブクラスタを含む各クラスタについて、クラスタのエネルギーは、以下に示されるように、サブクラスタのエネルギーを合計することによって決定される(158)。

【0043】

【数7】

$$E_k^C = \sum_{j=1}^m E'_j \quad (7)$$

ただし、 E_k^C はクラスタ k のエネルギーであり、 E_j はクラスタ k のサブクラスタ j のエネルギーであり、 m はクラスタ k のサブクラスタの個数である。クラスタ k に対応する検出モジュール50の受光面上のクラスタ k に対応する受光したガンマ光子の位置は、以下のように推定できる。

【0044】

【数8】

$$x_k = \frac{\sum_{j=1}^m E_j x_j}{E_k^C} \quad (8)$$

$$y_k = \frac{\sum_{j=1}^m E_j y_j}{E_k^C} \quad (9)$$

ただし、 x_j 及び y_j はサブクラスタ j に対応するブロックのそれぞれ x 及び y の位置である。

【0045】

クラスタのエネルギーを決定した後、第2レベルスケーリングファクタを用いてエネルギーがスケーリングされる(160)。これは、クラスタの衝突イベントのエネルギーを解析することによって、クラスタのメインの衝突イベントを決定することを含む。上述されるように、メインの衝突イベントは、最大エネルギーを有する衝突イベントである。メインの衝突イベントを決定した後、第2レベルスケーリングファクタは、メインの衝突イベントのピクセルに基づき決定される。例えば、第2レベルスケーリングファクタは、メ

10

20

30

40

50

インの衝突イベントのピクセルに基づきメインの衝突イベントの検出モジュールに対応する第2レベルCEC-LUTにおいて検索される。その後、第2レベルスケーリングファクタは、以下のようにクラスタのエネルギーに適用される。

【0046】

【数9】

$$E_k^{c'} = E_k^c \times \beta \quad (10)$$

ただし、 $E_k^{c'}$ はクラスタ k の訂正されたエネルギーであり、 E_k^c はクラスタ k のオリジナルのエネルギーであり、 β はスケーリングファクタである。

【0047】

10

効果的には、ELCとCECとの双方を適用することは、PETシステム10のエネルギー分解能を向上させる。図9A及び9Bを参照して、エネルギー訂正前及びエネルギー訂正後のPETシステム10のエネルギー分解能が示される。図9Aはエネルギー訂正後のエネルギー分解能を示し、図9Bはエネルギー訂正前のエネルギー分解能を示す。さらに、エネルギー訂正がない場合、エネルギースペクトルは正確でない。これは、適合ガウス曲線204と測定されたエネルギー曲線との比較を介して観察できる。エネルギー訂正前の測定されたエネルギー曲線202は、適合ガウス曲線204の外側により広いテール部分を有する。

【0048】

20

図3を再び参照して、PET処理システム48の再構成プロセッサ76は、エネルギー訂正されたイベントデータを処理し、ROI14の画像表現を生成する。これは、511keV以外のエネルギーを有するガンマイベントなどの無効なガンマイベントをフィルタリングし、ライン・オブ・レスポンス(LOBR)を規定するため時間に基づきガンマイベントをペアリングし、LOBRを画像表現に再構成することを含む。無効なガンマイベントのフィルタリングに関して、エネルギー訂正されたクラスタは、イベントが有効であり、再構成のために利用可能であるか判断するため、エネルギー閾値と比較される。PETスキャナでは、クラスタ及び非散乱イベントのみが再構成に利用される。残りは無視される。その後、画像表現は以降の利用のためPET処理システム48の画像メモリ78に格納される。例えば、画像表現はビデオプロセッサにより利用可能であり、及び/又はディスプレイ上に表示可能である。

30

【0049】

PET処理システム48のキャリブレーションプロセッサ80は、検出モジュール16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30を校正するためのキャリブレーション用にデータ取得プロセッサ62により取得されたイベントデータを処理する。イベントデータは、典型的には、キャリブレーションバッファ66を介し受信される。当該処理は、検出モジュールの各ピクセルについてELCモデルのパラメータ値、第1レベルスケーリングファクタ及び第2レベルスケーリングファクタを決定することを含む。上述されたように、追加的なレベルのためのスケーリングファクタがまた決定可能である。適切には、パラメータ値、第1レベルスケーリングファクタ及び第2レベルスケーリングファクタは、異なるデータ取得期間中に取得されたイベントデータから生成される。

40

【0050】

図10を参照して、ELCモデルのパラメータ値を決定する方法250が提供される。方法250は、キャリブレーションプロセッサ80により実行され、式(2)の対数モデルなどのELCモデルを利用する。方法250は、検出モジュール16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30の各ピクセルについて、各キャリブレーションソースのイベントデータからピクセルのパルス高スペクトルを決定する(252)ことを含む。ピクセルのパルス高スペクトルは、その後、キャリブレーションソースの122keV、511keV及び1275keVなどの1以上の既知のエネルギーピークの測定されたエネルギーピークを決定するため解析される(254)。既知のエネルギーピークの測定されたエネルギーピークは、既知のエネルギーピークの+/-15keVの範囲内など、既知の工

50

エネルギーピークの近傍のエネルギーピークを検索することによって決定可能である。

【0051】

パルス高スペクトルから測定されたエネルギーピークを決定した後、エネルギー線形化モデルのパラメータ値が、測定されたエネルギーピークを用いてピクセルについて決定される(256)。これは、出力エネルギーPの誤差がエネルギーピークについて最小二乗の意味で最小になるように、回帰分析と既知及び測定されたエネルギーピークとを用いてパラメータを最適化することを含む。例えば、式(2)のモデルのパラメータは、例えば、122 keV、511 keV及び1275 keVのエネルギーピークなどについて最適化可能である。適切には、既知のエネルギーピークの個数は、式(2)のELCモデルのパラメータ k_1, k_2, k_3 の個数以上である。

10

【0052】

図11を参照して、第1レベルスケーリングファクタを決定する方法300が提供される。方法300は、キャリブレーションプロセッサ80により実行され、キャリブレーションソースの1つについてイベントデータの衝突イベントのエネルギー線形性を訂正し(302)、イベントデータから衝突イベントのサブクラスタを特定し(304)、対応する衝突イベントのエネルギーを合計することによって、サブクラスタのエネルギーを決定する(306)ことを含む。適切には、キャリブレーションソースは、511 keVのエネルギーピークを含む。ELC、サブクラスタの特定及びサブクラスタのエネルギーの決定が、エネルギー訂正プロセッサ68に関して上述したように実行される。

20

【0053】

サブクラスタの決定されたエネルギーを利用して、第1レベルパルス高スペクトルが各ピクセルについて決定される(308)。パルス高スペクトルは、カウントとエネルギーとのプロットである。ピクセルのパルス高スペクトルは、各サブクラスタについてサブクラスタに対応するパルス高スペクトルにサブクラスタのエネルギーのカウントを加えることによって決定できる。サブクラスタに対応するパルス高スペクトルは、サブクラスタのメインの衝突イベントのピクセルのパルス高スペクトルである。上述されるように、メインの衝突イベントは、最大エネルギーを有する衝突イベントである。

30

【0054】

ピクセルの第1レベルパルス高スペクトルを決定した後、パルス高スペクトルは、キャリブレーションソースの511 keVなどの既知のエネルギーピークの測定されたエネルギーピークを決定するため、解析される(310)。既知のエネルギーピークの測定されたエネルギーピークは、既知のエネルギーピークの+/-15 keVの範囲内などの既知のエネルギーピークの近傍のエネルギーピークを検索することによって決定可能である。その後、ピクセルの第1レベルスケーリングファクタが、既知のエネルギーピークに対する測定されたエネルギーピークのレシオとして決定される(312)。図12を参照して、複数のピクセルの第1レベルパルス高スペクトルが示される。各パルス高スペクトルは、既知のエネルギーピークに対するエネルギーピークを含む。測定されたエネルギーピーク及び既知のエネルギーピークの理想位置が、垂直ラインによりパルス高スペクトル上にマーク付けされる。

40

【0055】

図13を参照して、第2レベルスケーリングファクタを決定する方法350が提供される。方法350はキャリブレーションプロセッサ80により実行され、キャリブレーションソースの1つについてイベントデータの衝突イベントのエネルギー線形性を訂正し(352)、イベントデータから衝突イベントのサブクラスタ及びクラスタを特定し(354)、サブクラスタに対して第1レベルCECを実行し(356)、対応するサブクラスタのエネルギーを合計することによって、クラスタのエネルギーを決定する(358)を含む。適切には、キャリブレーションソースは、511 keVエネルギーピークを含む。ELC、クラスタ及びサブクラスタの特定、第1レベルCEC並びにクラスタのエネルギーの決定は、エネルギー訂正プロセッサ68に関して上述したように実行される。

50

【0056】

クラスタの決定されたエネルギーを利用して、各ピクセルについて第2レベルパルス高スペクトルが決定される(360)。ピクセルのパルス高スペクトルは、各クラスタについて、クラスタに対応するパルス高スペクトルにクラスタのエネルギーのカウントを加えることによって決定可能である。クラスタに対応するパルス高スペクトルは、サブクラスタのメインの衝突イベントのピクセルのパルス高スペクトルである。

【0057】

ピクセルの第2レベルパルス高スペクトルを決定した後、パルス高スペクトルが、キャリブレーションソースの511 keVなどの既知のエネルギーピークの測定されたエネルギーピークを決定するため解析される(362)。既知のエネルギーピークの測定されたエネルギーピークは、既知のエネルギーピークの+/-15 keVの範囲内など、既知のエネルギーピークの近傍のエネルギーピークを検索することによって決定可能である。その後、ピクセルの第2レベルスケーリングファクタが、既知のエネルギーピークに対する測定されたエネルギーピークのレシオとして決定される(364)。図14を参照して、複数のピクセルの第2レベルパルス高スペクトルが示される。各パルス高スペクトルは、既知のエネルギーピークに対応するエネルギーピークを含む。測定されたエネルギーピーク及び既知のエネルギーピークの理想位置が、垂直ラインによりパルス高スペクトル上にマーク付けされる。

10

【0058】

ここで用いられるメモリは、非一時的なコンピュータ可読媒体、磁気ディスク若しくは他の磁気記憶媒体、光ディスク若しくは他の光記憶媒体、RAM(Random Access Memory)、ROM(Read-Only Memory)、他の電子メモリデバイス若しくはチップ若しくは動作可能に相互接続されたチップのセット、格納された命令がインターネット/インターネット若しくはローカルエリアネットワークを介し抽出されるインターネット/インターネットサーバなどの1以上を含む。さらに、ここで用いられるように、プロセッサは、マイクロプロセッサ、マイクロコントローラ、グラフィック処理ユニット(GPU)、特定用途向け集積回路(ASIC)、FPGA(Field-Programmable Gate Array)などの1以上を含み、コントローラは少なくとも1つのメモリ及び少なくとも1つのプロセッサを含み、プロセッサはメモリ上のプロセッサにより実行可能な命令を実行し、ユーザ入力装置は、マウス、キーボード、タッチ画面ディスプレイ、1以上のボタン、1以上のスイッチ、1以上のトグルなどの1以上を有し、表示装置は、LCDディスプレイ、LEDディスプレイ、プラズマディスプレイ、プロジェクションディスプレイ、タッチ画面ディスプレイなどの1以上を含む。

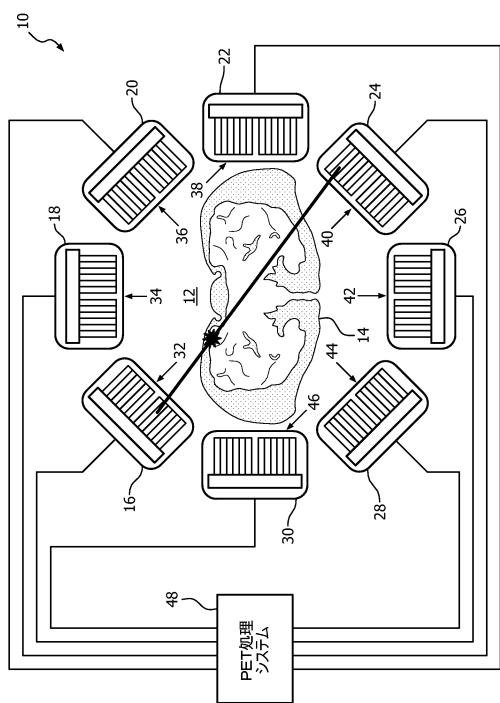
20

【0059】

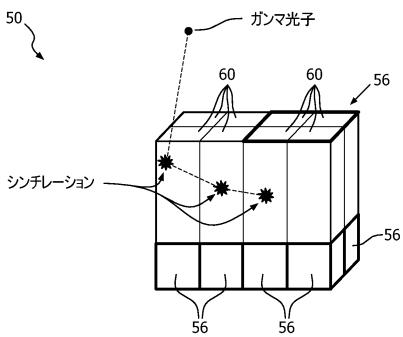
本発明が好適な実施例を参照して説明された。詳述した詳細な説明を参照及び理解した他者には改良及び変更が想到しうる。添付した請求項又はその均等の範囲内に属する限り、本発明はこのような全ての改良及び変更を含むものとして解釈されることが意図される。

30

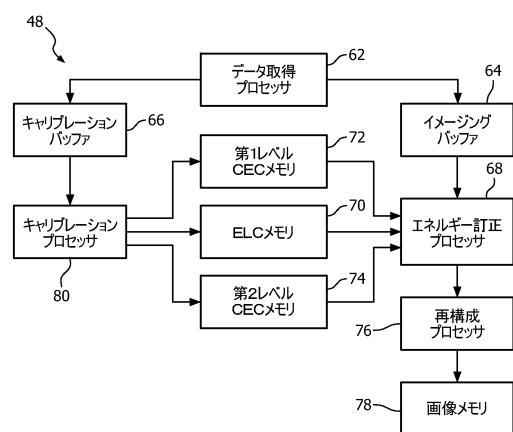
【図1】



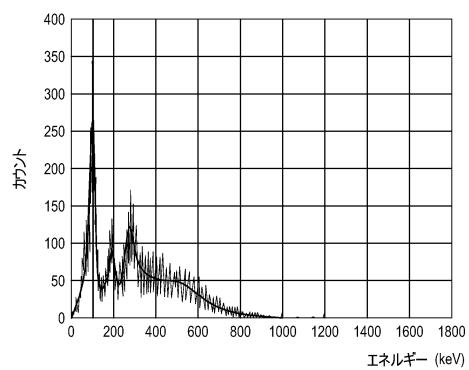
【図2】



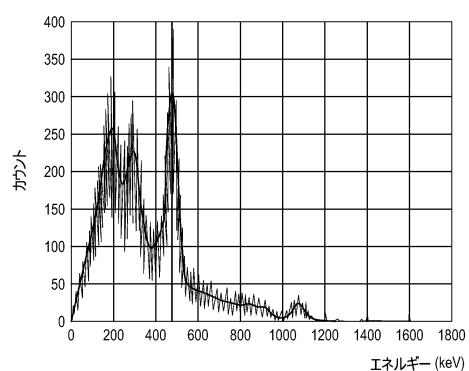
【図3】



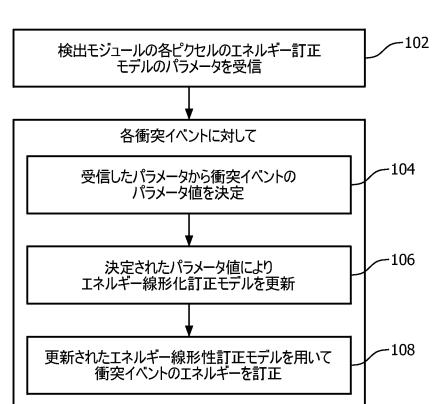
【図4】



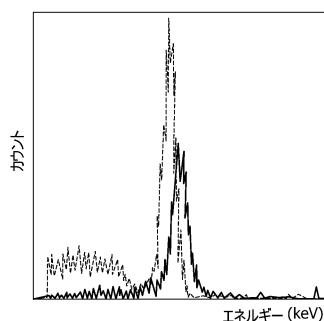
【図5】



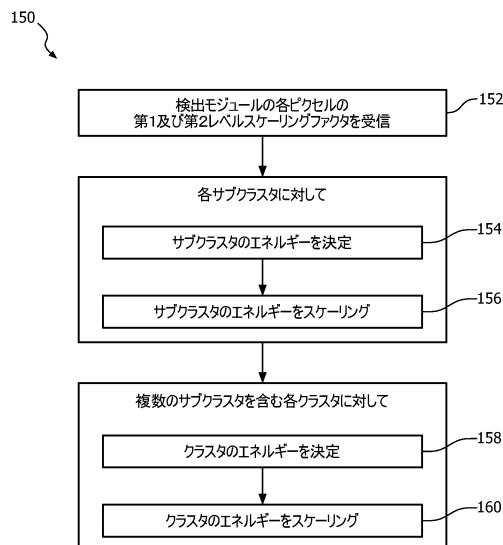
【図6】



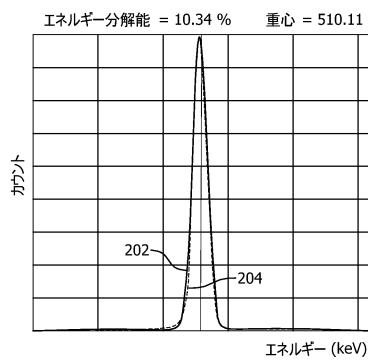
【図7】



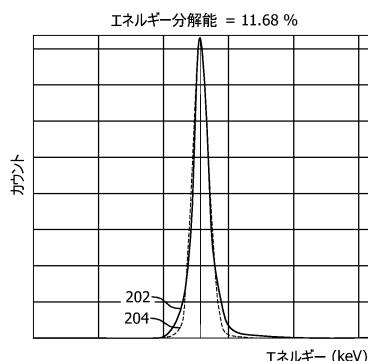
【図8】



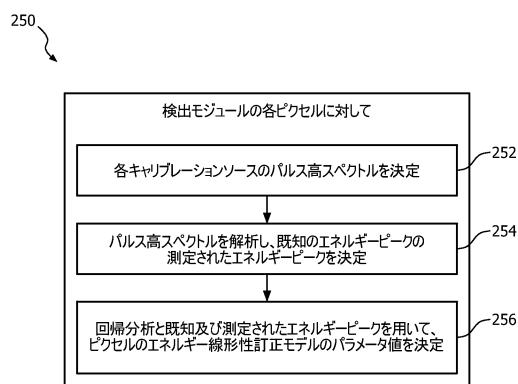
【図9A】



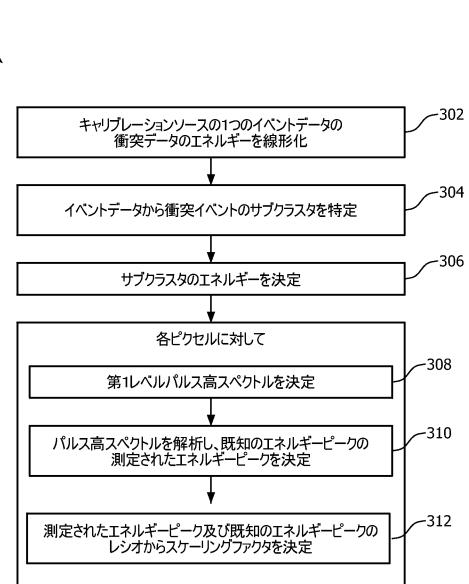
【図9B】



【図10】



【図11】



【図12】

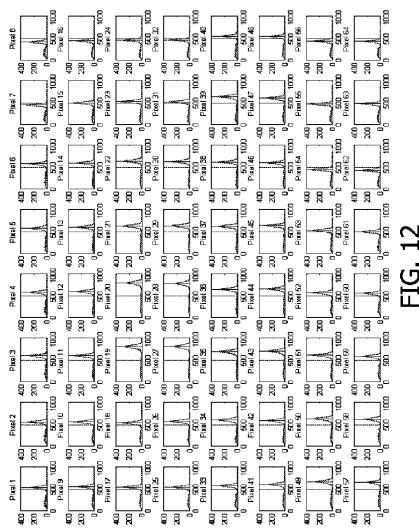
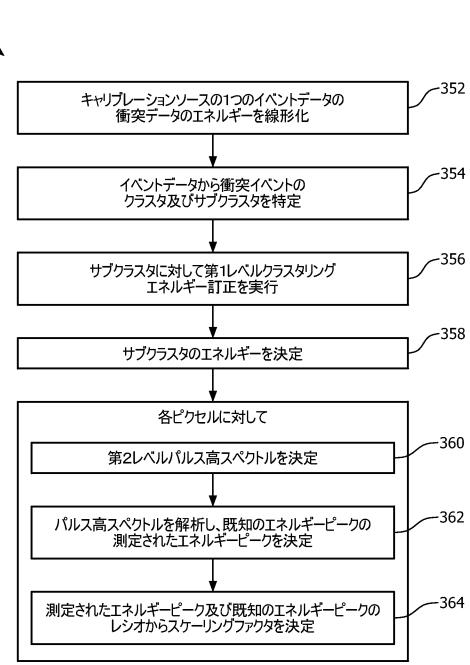


FIG. 12

【図13】



【図14】

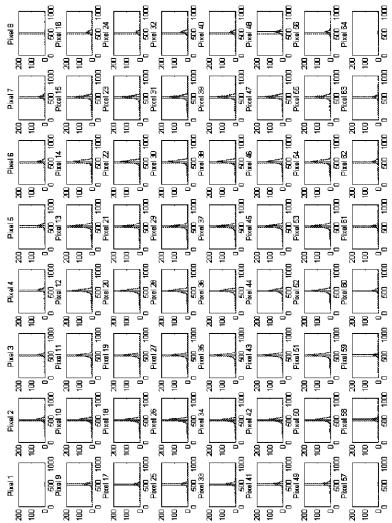


FIG. 14

フロントページの続き

(74)代理人 100091214

弁理士 大貫 進介

(72)発明者 ワン, シャロン シャオロン

オランダ国, 5656 アーエー アインドーフェン, ハイ・テク・キャンパス・ビルディング

5

(72)発明者 ローレンス, トーマス リーロイ

オランダ国, 5656 アーエー アインドーフェン, ハイ・テク・キャンパス・ビルディング

5

審査官 遠藤 直恵

(56)参考文献 特開平09-145842 (JP, A)

特開2010-160045 (JP, A)

米国特許出願公開第2008/0277587 (US, A1)

特開平08-160141 (JP, A)

米国特許第06410919 (US, B1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01T 1/00 - 1/40