

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12705

研究課題名（和文）高感度PET用4層DOI検出器の分解能改善の研究

研究課題名（英文）Improvement of resolution on the 4-layer DOI detector for a high sensitive PET system

研究代表者

稲玉 直子（Inadama, Naoko）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子医科学研究所 先進核医学基盤研究部・主幹研究員

研究者番号：10415408

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：医療用画像診断装置であるPET装置の性能向上のため以前開発したDepth of interaction (DOI) 検出器において、画像ノイズとなり得る検出器の周縁部での性能劣化を本研究で解決することができた。DOI検出器とは、PET信号（放射線）の検出器内での検出ポイントを3次元で特定できるよう工夫された検出器であり、検出器内の反射材構造を最適化実験で見出した光学的に周縁部を分断する新たな構造にして周縁部の分解能を改善させた。周縁部での分解能の劣化はDOI以外の検出器でも起こることで、本手法が一般的な検出器に対しても効力があることも本研究で確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PETは例えば被検者のがん細胞に取り込まれたPET薬剤から発するいくつもの放射線を検出器で捕らえ、飛来方向の特定から体内の薬剤位置（がんの位置）や濃度（活性度）を計算し画像化する。検出器は撮像範囲を囲うようリング状に配置したり2つの2次元配列で撮像範囲を挟んだりするが、本研究による検出器の周縁部の分解能改善により、隣り合う検出器の端どうしが担う空間での放射線検出による画質の劣化が軽減し、より正確な画像が得られることになる。

研究成果の概要（英文）：The positron-emission-tomography (PET) system is a in vivo imaging device used in the medical field. For a high-performance PET system, we previously developed a Depth-of-interaction (DOI) detector that can provide 3D position information of the PET signal (radiation) detected point in the detector. The DOI detector works well other than peripheral part where resolution performance is degraded. In this study, we tried to improve the degradation and succeeded by the optimized arrangement of the reflectors in the detector that makes more strict optical separation of the peripheral part. The degradation of the resolution at the peripheral part is a general problem for radiation detectors and we proved that our method also improved the resolution of a general simple detector.

研究分野：医用システム関連 PET検出器開発

キーワード：PET検出器 放射線検出器 検出位置分解能 DOI検出器

1. 研究開始当初の背景

早期のがんや治療後に残留しているがんの発見には、小さいがんからの少ない信号が検知できるよう PET 装置の高感度化が必要となる。DOI 検出器を用いた近接撮像が装置感度の回復に有効であり、我々も独自の DOI 検出器を開発したが、検出器周縁部で分解能の劣化が見られていた。一般的に PET 検出器はシンチレータと呼ばれる物質と受光素子で構成され、シンチレータは入射した放射線と相互作用して発光し、受光素子はその発光を捕らえ信号とする。検出器の分解能とは、受光素子信号の演算による発光位置特定、つまり放射線検出位置特定の精度のことであり、分解能の劣化は PET 画像でのノイズや低解像度の要因となる。高分解能化のためシンチレータ部が細かい素子に分割され間に反射材が挿入された構造の検出器が多いが、発光後の光を絞って受光素子に送り込むことにより信号演算による正確な発光素子特定を促し素子サイズの分解能を得ることを目的としている。しかし一般的に受光素子の端に位置する周縁部で発光素子特定の精度が悪くなり、識別できない数個分の素子サイズに分解能が劣化してしまっていた。シンチレータ部の分割が多い DOI 検出器でも周縁部の分解能劣化が問題となっていた。世界的に PET 装置の開発が進む中、マンモ用や小動物用の PET 検出器の分解能についてより高いものが求められるようになっており、それらの用途への DOI 検出器の適用の際には周縁部の問題が無視できないものとなり、改善が必要となる。ライトガイドを挿入する一般的な改善法は本 DOI 検出器には有効ではなかった。

2. 研究の目的

高分解能の実現のため細かいシンチレータ素子で構成した DOI 検出器で周縁部における発光素子識別性能を改善し分解能の劣化を防ぎ、分解能がより重要になるマンモ PET や小動物用 PET などへの適応を可能にする。

3. 研究の方法

我々が以前開発した DOI 検出器を図 1 に示す。受光素子上の 2 次元の放射線検出位置だけでなく 4 層分の深さ方向の識別が可能である。一般の検出器では隣り合うシンチレータ素子間すべてに反射材を入れるが、4 層 DOI 検出器では反射材を挿入する箇所を指定し受光素子上への光の広がりを制御することで深さ方向に積み上げた 4 つのシンチレータ素子における発光素子、つまり放射線検出素子の識別を可能にする。識別は受光素子信号の x 方向、y 方向それぞれに対する演算で作られる 2 次元ヒストグラムを用いて行う。1 回の放射線検出の演算結果が 2 次元ヒストグラム上の放射線検出素子に対応する座標に 1 カウントとしてプロットされるため、検出器全体に多数の放射線を一樣照射することですべてのシンチレータ素子に対して対応するヒストグラム上の位置にカウントのピーク（応答）が形成される。この各素子応答が分離していれば素子識別が可能となり素子サイズの分解能が保証されるが、応答が重なると対応する素子のどちらで放射線を検出したか判断できず、そこでの分解能はそれらの素子を合わせたサイズに劣化することになる。図 2 は放射線の一樣照射実験で実際に得られた 2 次元ヒストグラムである。周縁部で応答の重なりが見られる。応答の濃淡について、実験では放射線を上方から照射したので 1 層目のシンチレータ素子の応答を形成するプロット数が多く濃い応答となっている。

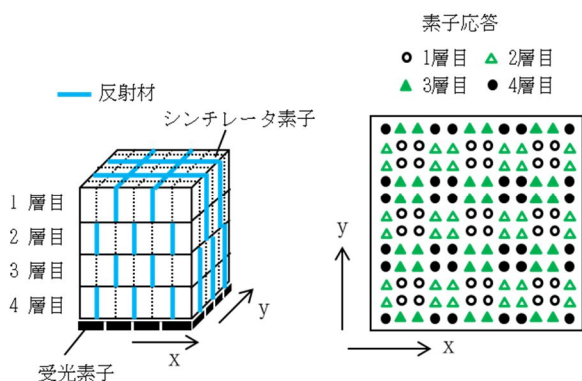


図 1 4層 DOI 検出器

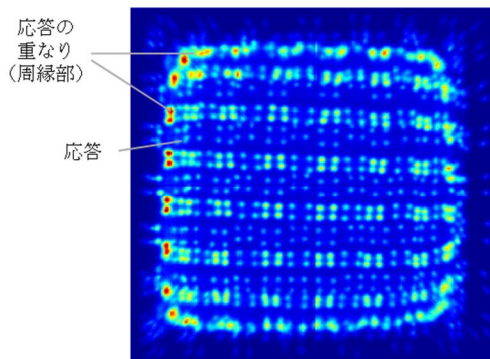


図 2 事前実験で得られた 2次元ヒストグラム

応答の重なりについて、今までの様々な検出器実験の経験より、端のシンチレータ素子での発光による光が中央部へ漏れ込んでいて周縁部の応答の重なりを引き起こしている可能性を考え、

本研究で、光広がりを遮るはずの反射材の構造の再検討を行った。図 1 に見られるように 4 層 DOI 検出器では各層内の反射材は格子状になっている。格子は反射材にスリットを入れスリットを合わせて組み上げていく。本研究では端のシンチレータ素子に対しスリットからの光漏れをなくすためスリットなしの反射材を用い、必要な個所の光学的な分離を強化した構造を考える。実験と得られた 2 次元ヒストグラムの検証を繰り返し、スリットなし反射材の使用箇所の最適化を図る。

受光素子には 8 × 8 チャンネル MPPC アレイモジュール（浜松ホトニクス社製 S13361-3050AE-08、感度有効領域：3 × 3 mm²、ピクセルサイズ：50 μm）を用いた。シンチレータ素子として小動物用 PET を意識した材質とサイズである 1.53 × 1.53 × 4.5 mm³ の LGSQ (Lu_{2x}Gd_{2(1-x)}SiO₅) シンチレータ（オキサイド社製、表面处理：化学研磨）を用意し、MPPC 表面のサイズとなるよう LGSQ 素子を 16 × 16 配列にして 4 層分積み上げた。反射材には ESR film（住友 3M、反射率 98%、厚さ 0.065 mm）を用いた。層間、シンチレータ部と MPPC 間を RTV ゴム（KE420、信越シリコン社製、屈折率：1.45）で光学結合し、同じ層内の LGSQ 素子間は空気のままとした。PET で検出する放射線のエネルギー（511 keV）を発する ²²Na 線源を検出器上方に設置し、NIM-CAMAC システムにより MPPC 信号の収集を行った。

4. 研究成果

(1) 高分解能 4 層 DOI 検出器の性能改善

本研究を進める中で、スリットなし反射材の導入は本来の目的である光漏れ防止の効果だけではなく、スリットなし反射材によって端の 1 × 16 × 4 層の LGSQ 素子配列が光学的に中央部から独立することにより図 1 に見られる中央の反射材配置の制限を受けずに端にとって最適な位置に自由に反射材を挿入することができることを見出した。図 3、4 に、工夫前の 2 次元ヒストグラムとスリットなし反射材を用い端の LGSQ 素子列の反射材配置も変えて反射材構造を最適化することによって得られた 2 次元ヒストグラムを示す。周縁部で重なっていた応答を分離させることができ、LGSQ 素子サイズの高分解能を得ることが可能となった。

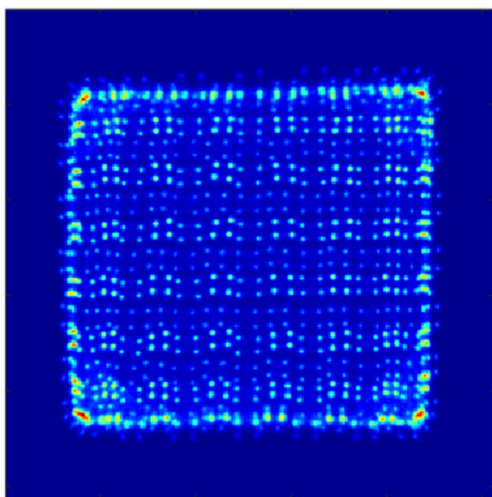


図 3 2次元ヒストグラム（改良前）

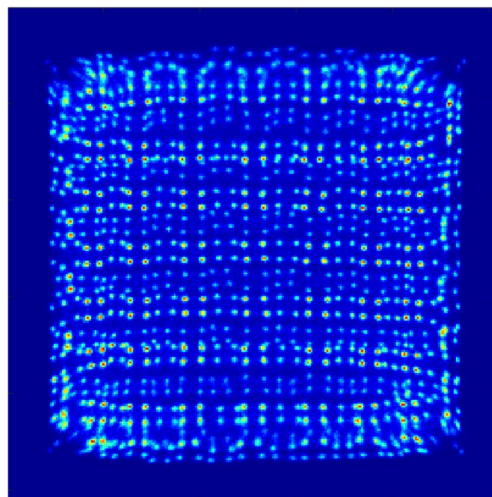


図 4 2次元ヒストグラム（改良後）

(2) OpenPET® 用 4 層 DOI 検出器への研究成果の応用

4 層 DOI 検出器は重粒子線治療での活用を目的として我々のグループで開発した開放型 PET 装置「OpenPET®」に搭載されている。OpenPET 装置は治療ビームが通過する空間が確保された特別な検出器配置になっており検出器の DOI 情報が重要な役割を果たしている。本研究の最終年度に OpenPET 装置がいくつかの検出器の取り出しが可能な状況となったため、本研究の適応による分解能改善を試みた。実用検出器としてしっかり固定されているシンチレータ素子すべての光学接着剤を剥がす作業が困難なため構造の変更は周縁部の素子のみとしたため、研究結果の反射材構造とは異なる OpenPET 検出器に特化した反射材構造の追及が必要であった。新たな最適化実験を繰り返した結果、スリットなし反射材を用いた構造で周縁部の分解能劣化が改善されたことを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Naoko Inadama
2. 発表標題 The improved edge crystal separation in the 4-layer DOI PET detector with a staggered reflector arrangement
3. 学会等名 2021 VIRTUAL IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 放射線検出器、シンチレータユニット及び画像生成装置	発明者 稲玉直子, 山谷泰賀	権利者 量子科学技術研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、2021-050842	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------