

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12857

研究課題名（和文）3次元デジタルPET検出器の開発

研究課題名（英文）Development of depth-of-interaction digital PET detector

研究代表者

吉田 英治（Yoshida, Eiji）

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：50392246

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）：PETの画質を向上するために、視差誤差を低減するDOI情報と再構成画像上でSNを改善するTOF情報は、重要な要素技術である。しかしながら、両方の技術を劣化なしに同時に実現することは、困難な課題である。我々は、TOF-DOI検出器として、光センサーと同等の大きさの4分割fast LYSO結晶からなるループ構造と、風車状に配置された近接する4つの光センサーを光学的に結合させた3次元デジタルPET検出器を開発した。1.45 mmのfast LGSO結晶とESR反射材を用いた検出器は10.1%のエネルギー分解能、4.7 mmのDOI分解能、293 psの時間分解能が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本検出器は従来困難な課題であったDOIとTOFの両立を1.45 mmという高い空間分解能のシンチレータで達成した。小動物PETにおいてはDOIが、臨床PETにおいてはTOFが重要視されるため、本検出器は様々なPET装置に適用可能である。また、従来の2次元検出器に対して、本検出器の主な変更点は反射材構造のみであり、低コストでの製品化が可能である。

研究成果の概要（英文）：To improve PET image quality, depth-of-interaction (DOI) information, which can reduce the parallax error, and time-of-flight (TOF) information, which can enhance the signal-to-noise ratio in a reconstructed image, are key technologies. However, it is difficult to realize and employ both technologies at the same time without degradation of the information obtained. We have developed the 3D digital PET detector that optically couples the four-loop structure, consisting of quadrisectioned fast LGSO crystals comparable in size to a photo-sensor, to four photo-sensors in close proximity arranged in a windmill shape. In this work, we developed the PET detector using the fast LGSO crystal for the TOF-DOI PET system. The developed detector with 1.45-mm fast LGSO crystals and ESR reflectors provided 10.1% energy resolution, 4.7 mm DOI resolution, and 293 ps CRT.

研究分野：核医学

キーワード：PET 検出器 depth-of-interaction time-of-flight

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

非侵襲的に体内の薬剤分布を画像化できる PET 装置はポジトロンからの消滅放射線を被検者の周囲にリング上に配置した検出器で同時計数することによって高感度計測が可能な技術である。511 keV の消滅放射線を検出するために様々なタイプの PET 検出器が開発されている。一般的な PET 検出器は、微小なシンチレータと少数の受光素子から構成され、効率的な検出が可能であるが、アナログ演算（重心演算）の過程で誤差を生じる。

一方、シンチレータと受光素子を 1:1 で対応させることで演算誤差を生じないデジタル PET 検出器も開発されており、重心演算に比べて高い集光率を有することから時間分解能特性も改善できることが期待できる。しかしながら、受光素子のサイズでシンチレータのサイズが制限され、シンチレータごとに受光素子と信号処理回路が必要である。近年、半導体受光素子であるデジタル SiPM や半導体技術の発展によってデジタル PET 検出器は商用臨床 PET 装置（4 mm 程度の空間分解能）へ採用され始めているが、小動物 PET 装置等の高い空間分解能（1-2 mm）が必要な装置の開発は行われていない。

PET の画質を向上するために、検出器の 3 次元相互作用位置を用いて視差誤差を低減する depth-of-interaction (DOI) 情報と再構成画像上で SN を改善する time-of-flight (TOF) 情報は、重要な要素技術である。しかしながら、両方の技術を劣化なしに同時に実現することは、困難な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では高精度かつ効率的に信号を取得可能な 3 次元デジタル PET 検出器の開発を行う。本検出器は、受光素子の 1/4 サイズのシンチレータを用い、シンチレータ間の光学反射材の構造を最適化することによって、1.45 mm のシンチレータを容易に識別し、TOF 及び DOI 情報も取得可能となる。

### 3. 研究の方法

提案する検出器は、図 1 に示すように、14 x 14 の fast LGSO（オキサイド）アレイを 8 x 8 の MPPC（S14161-9865、浜松ホトニクス）アレイに光学結合した。fast LGSO 結晶のサイズは、1.45 x 1.45 x 15 mm<sup>3</sup> とした。光学反射材は、ルミラー（70-E20、東レ）または ESR（3M）を用い、3 層の異なる構造を結晶間に挿入した。一方で、反射材を有しない結晶間は、接着剤で光学接続した。上部と中心部の配置は、単一読み出し方式のループ構造を有する。下部の構造において、結晶間の光学接着剤は、MPPC の発光量の減衰を低減するために同じ MPPC に接続した近接する fast LGSO 結晶にシンチレーション光を広げる効果を有する。1 対の結晶の識別は 2 つの MPPC の出力差から行い、個々の結晶の応答は検出深さに依存して連続的な分布を有する。

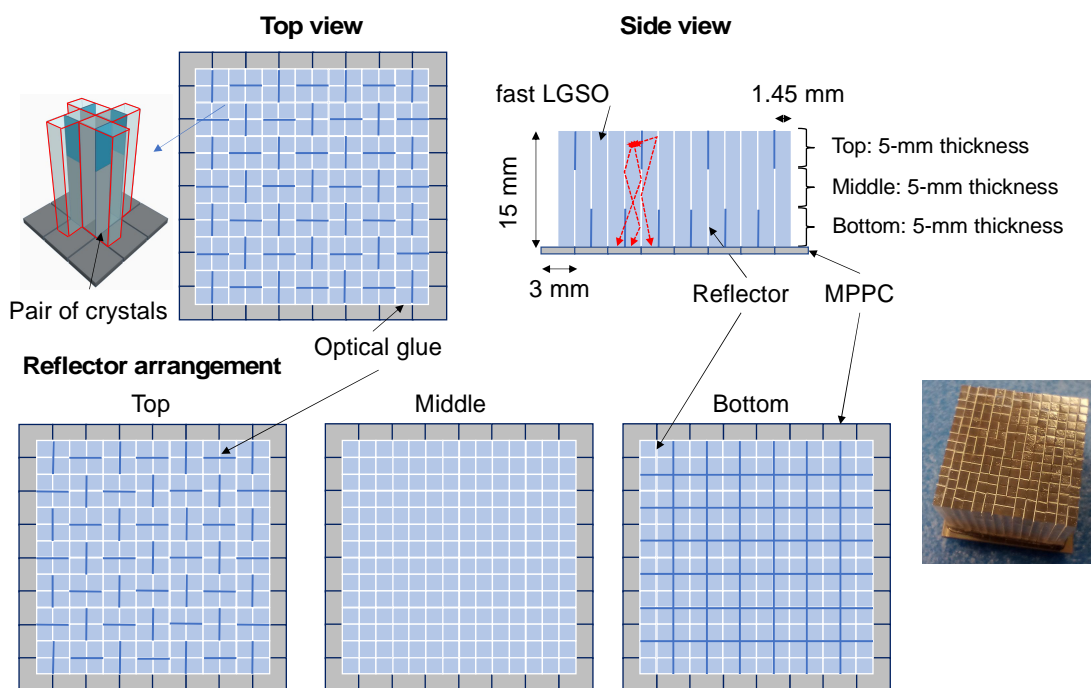


図 1 開発した 3 次元デジタル PET 検出器

#### 4. 研究成果

図2に $^{22}\text{Na}$ の一樣照射によって得られた2次元ポジションヒストグラムとエネルギースペクトルを示す。すべての結晶アレイにおいて、良好な結晶識別が可能であった。図3は、661 keVのスリット照射から算出したDOIの推定位置とDOI分解能を示したものである。fast LGSOアレイ（ESR）の平均DOI分解能は、4.7 mmであったが、結晶端部のDOI分解能は中央部に比べて悪い傾向があった。一方、fast LGSOアレイ（ルミラー）では、平均で2.7mmの均一なDOI分解能が得られた。時間分解能を評価するために、一対の検出器を反対方向に配置し、中央に配置された $^{22}\text{Na}$ 点線源で同時計数測定を行った。図4にタイミングヒストグラムを示す。反射材をESRに変更することで、200 ps台の時間分解能を実現した。

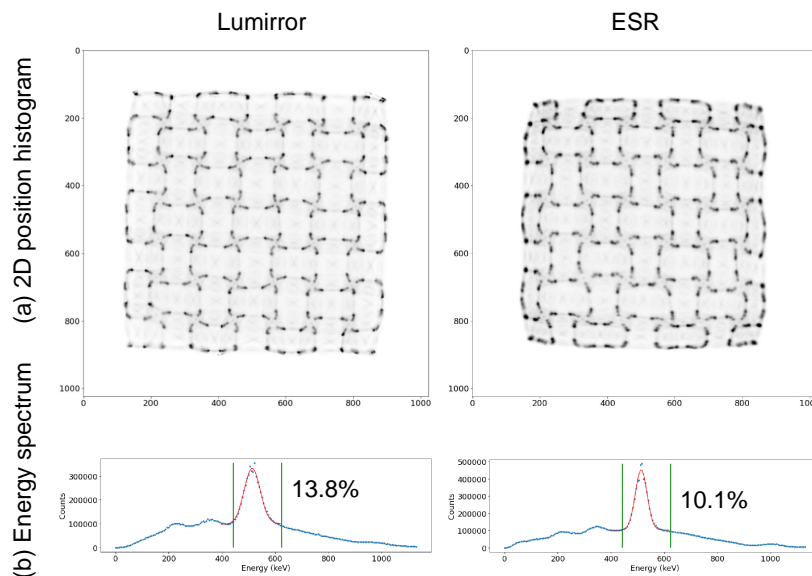


図2 結晶識別結果とエネルギースペクトル

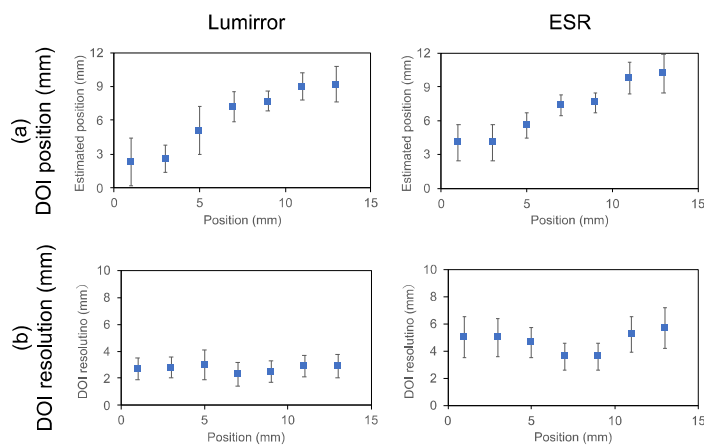


図3 算出したDOI位置とDOI分解能

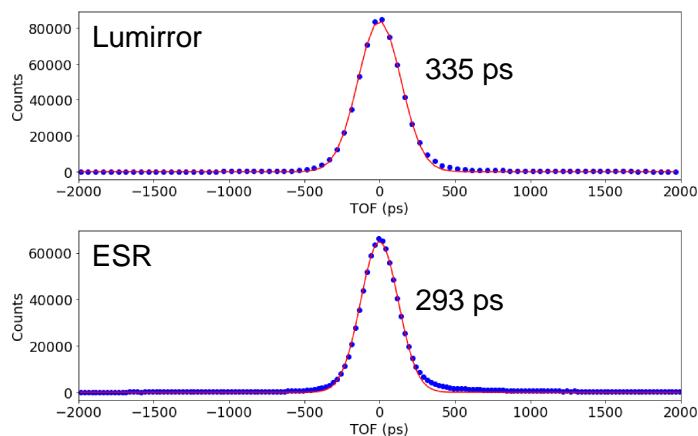


図4 タイミングヒストグラムと時間分解能

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshida Eiji, Obata Fujino, Kamada Kei, Yoshikawa Akira, Yamaya Taiga	4. 巻 66
2. 論文標題 Development of crosshair light sharing PET detector with TOF and DOI capabilities using fast LGSO scintillator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 225003 ~ 225003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6560/ac2f8b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yoshida Eiji, Obata Fujino, Kamada Kei, Yoshikawa Akira, Yamaya Taiga	4. 巻 1021
2. 論文標題 Gapless implementation of crosshair light-sharing PET detector	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165922 ~ 165922
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2021.165922	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshida Eiji, Obata Fujino, Kamada Kei, Yamaya Taiga	4. 巻 4
2. 論文標題 Development of Single-Ended Readout DOI Detector With Quadrisectioned Crystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 563 ~ 569
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TRPMS.2020.2990788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshida Eiji, Obata Fujino, Kamada Kei, Yamaya Taiga	4. 巻 5
2. 論文標題 A crosshair light sharing PET detector with DOI and TOF capabilities using four-to-one coupling and single-ended readout	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TRPMS.2020.3032466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Eiji, Akamatsu Go, Tashima Hideaki, Kamada Kei, Yoshikawa Akira, Yamaya Taiga	4. 巻 66
2. 論文標題 First imaging demonstration of a crosshair light-sharing PET detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 065013 ~ 065013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/abe839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 赤松 剛, 吉田 英治, 田島 英朗, 伊藤 繁記, 岩男 悠真, 脇坂 秀克, 高橋 美和子, 山谷 泰賀
2. 発表標題 20cmの体軸方向視野を有する小動物用高分解能ポータブルPETの開発
3. 学会等名 第61回日本核医学会学術総会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akamatsu Go, Yoshida Eiji, Tashima Hideaki, Ito Shigeki, Takahashi Miwako, Yamaya Taiga
2. 発表標題 First bench-top breast-dedicated PET prototype with a dual round-edge detector arrangement
3. 学会等名 2021 IEEE NSS/MIC, IEEE NPSS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akamatsu Go, Yoshida Eiji, Tashima Hideaki, Ito Shigeki, Iwao Yuma, Wakizaka Hidekatsu, Takahashi Miwako, Yamaya Taiga
2. 発表標題 CLS-PET: a high-resolution multi-purpose portable small-animal PET with DOI and TOF capability
3. 学会等名 2021 IEEE NSS/MIC, IEEE NPSS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田英治、鎌田圭、山谷泰賀
2. 発表標題 ローカル重心演算による3次元PET検出器の開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 放射線位置検出器	発明者 吉田英治、山谷泰賀	権利者 国立研究開発法人量子科学技術 研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-126957	出願年 2019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