

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18378

研究課題名（和文）TOF計測とDOI計測の両立が可能なPET用次世代検出器の開発

研究課題名（英文）Development of a next-generation PET detector with TOF and DOI detection capability

研究代表者

田久 創大（Takyu, Sodai）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 先進核医学基盤研究部・博士研究員（任常）

研究者番号：60796473

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：がん診断等に活躍するPET（陽電子断層撮影法）は、未だ装置の潜在能力を活かしきれておらず、空間分解能や装置感度に課題が残されている。そこで本研究では、ガンマ線飛行時間差（time-of-flight: TOF）計測技術と三次元放射線位置（depth-of-interaction: DOI）計測技術の両立が可能である実用的なPET検出器の開発研究を行った。片端光読み出し方式についてはDOI分解能5 mm程度で400 ps台、両端光読み出し方式についてはDOI分解能~4 mm程度で200 ps台のTOF分解能が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PETの診断精度向上のためには、現状4-5mm程度の解像度と5%以下の装置感度について、共に改善を図る必要がある。また、TOF計測とDOI計測の両立が可能なPET用検出器は従来技術ではまだ実用化されていない。本研究成果により、上記の解像度と感度を超えるPET装置の開発が可能となり、がんやアルツハイマー病の早期診断において、より早期発見が可能な短時間・低被ばく・低コストなPET検査の実現が促進されると期待される。

研究成果の概要（英文）：Positron emission tomography (PET), which is a powerful imaging modality used for clinical and research purposes, has not fully utilized its potential performance in terms of spatial resolution and sensitivity. Therefore, in this study, we developed a next-generation practical PET detector with time-of-flight (TOF) and depth-of-interaction (DOI) detection capability. The developed single-end readout detector showed around 5 mm DOI resolution and less than 500 ps TOF resolution. Also, the developed dual-end readout detector showed a less than 4 mm DOI resolution and less than 300 ps TOF resolution.

研究分野：医用放射線工学

キーワード：放射線検出器 PET DOI TOF

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

全身のがん診断に活用される PET (positron emission tomography) 装置は、陽電子放出核種 (18F) で標識した (がんに集まりやすい) ブドウ糖類似体を検査 1 時間前に投与し、約 180 度反対方向に放出されるガンマ線ペアを同時計数の原理で測定することで、核種位置を線上に特定する (図 1 左)。放射線検出器は、シンチレータで微弱な光に変換する方式である。受光素子は、市販装置では光電子増倍管が使われるが、小型で高性能な半導体受光素子 (SiPM) へのシフトが進められている。同時計数イベントを 10^6 - 10^9 カウント程度集めて、画像再構成により核種体内分布を 3 次元画像化する。

PET がん診断は、保険適用を受け大きく普及が進んだ検査であるが、装置はまだ PET のもつ潜在能力を活かしきれていない。具体的には、空間分解能や装置感度に課題が残

され、次世代技術の開発は世界的な競争下にある。より早期のがん検出など診断精度向上のためには、現状 4-5mm 程度の解像度と現状 5% 以下の装置感度について、共に改善を図る必要がある。解像度と感度の両立に向けたここ 10 ~ 15 年間の研究動向は、2 つのアプローチに分類できる。同時計数の時間差 (time-of-flight: TOF) 計測と、シンチレータ内の放射線深さ位置 (depth-of-interaction: DOI) 計測である。TOF 型 PET は、2005 年頃から製品化されるようになり、現在各社最上位機種は TOF 型 PET となっている。最新機種の TOF 分解能は 500 ps (位置に換算すると 7.5 cm) 前後であるが、研究室レベルでは、100 ps (1.5 cm に相当) 台のチャンピオンデータが得られている [D Schaart, Phys. Med. Biol. N179, 2010]。DOI は、シンチレータ厚みによる解像度低下を抑える技術であり、特に視野周辺での高解像度化の効果がある。十分なシンチレータ厚により感度を確保しつつ、高い解像度も維持できるため、TOF に続く PET 検出器の技術革新として実用化が期待されている。放医研の所属チームが世界に先駆けて 4 層 DOI 検出器の実用化に成功している [T Tsuda, IEEE Trans. Nucl. Sci. 51, 2537-2542, 2004]。

2. 研究の目的

そこで本研究では、TOF 計測と DOI 計測を同時に可能な実用的 PET 検出器の開発を行った (図 1 右)。TOF 分解能と DOI 分解能の両立に適した検出器方式として短冊シンチレータの片端光読み出し方式と両端光読み出し方式の 2 つを検討した。本研究の独自性は、シンチレータ内光伝播特性に着目してシンチレータの長さや表面光学条件 (表面状態や遮光材) を最適化し、それらを踏まえた受光素子のゲインやタイミング調整をする点にある。両端読み出し方式の検出器については、2 次元の放射線位置とタイミング (TOF) 情報は片側の受光素子が決定し、DOI 情報とエネルギー情報は上下面の光量比・和から計算する。

3. 研究の方法

まず、製品として入手可能な受光素子モジュールを用いた、検出器構造最適化のための試行実験を行った。シンチレータについては、TOF 用として優れた性能を収めている LYSO・LFS シンチレータを用いた。それらの長さ (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm 等) を変えた検討に加えて、表面研磨状態や結晶間材料 (反射材の種類や挿入パターン) を変えた実験を行った。また受光素子については、TOF 用受光素子として実績の多い SiPM として、浜松ホトニクス MPPC アレイモジュールを採用した。MPPC の有効受光面サイズ ($3 \times 3 \text{ mm}^2$, $4 \times 4 \text{ mm}^2$, $6 \times 6 \text{ mm}^2$) やサブピクセルサイズ ($25 \text{ }\mu\text{m}$, $50 \text{ }\mu\text{m}$, $75 \text{ }\mu\text{m}$) 及びそのモジュールのデータ処理方式などを変えた検討を行った。

上記の結果を踏まえ、片端光読み出し方式の検出器については、ブロック検出器を製作する検討を行った。層ごとに反射材の挿入位置を変えることによってシンチレーション光を分配することにより、2 mm ~ 4 mm 角の結晶で 4 層 DOI 結晶ブロックを複数作製した (図 2 a)。単一結晶及び 1 層の結晶アレイを用いて、各 MPPC チャンネルのゲインやタイミング等の特性を調べた。次に 4 層 DOI 結晶ブロックと MPPC アレイモジュールを光学結合することにより検出器プロトタイプを開発した。それらの間に挿入するライトガイドの厚みを変えた検討や、各 MPPC の特性の補正法やデータ処理方式を変えた検討を行った。

両端光読み出し方式の検出器において、実用的な検出器構造を模索する実験を行った。実験に

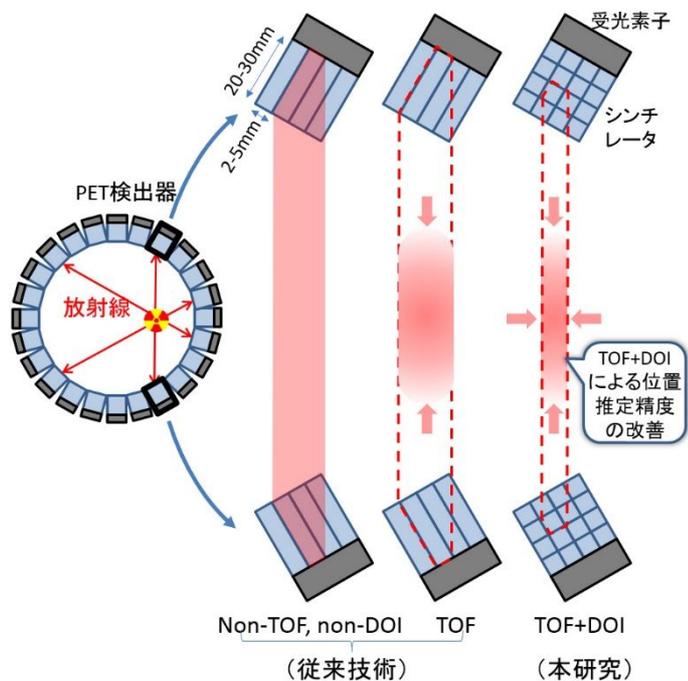


図 1 本研究が目指す TOF+DOI 型 PET の効果

は 3 mm 角の LYSO・LFS シンチレータと MPPC アレイモジュールを用いた (図 3 a)。MPPC の有効受光面サイズは 3 x 3 mm²、サブピクセルサイズは 75 μm である。シンチレータの長さ (10 ~ 20 mm) や DOI 分割数 (2 ~ 6 層 DOI 等) を変えた検討に加えて、表面研磨状態や結晶辺縁材料 (反射材の種類や巻き方・挿入方法等) を変えた実験を行った。

上記の実験により得られた DOI 分解能・TOF 分解能を踏まえて、頭部用 PET 装置を模擬した装置性能を比較する GEANT4 モンテカルロシミュレーションを行った。

4 . 研究成果

開発したプロトタイプブロック検出器において、片端光読み出し方式については、各層 5 mm 厚 (DOI 分解能 5 mm) の 4 層 DOI 結晶ブロックで 500 ps 前後の TOF 分解能が得られた (図 2 b) と c)。しかし 2 mm 角 ~ 3 mm 角の結晶を使用した場合に結晶識別能の若干の低下が見られた。また両端光読み出し方式については、DOI 分解能 3 ~ 4 mm 程度で 200 ps 台の優れた TOF 分解能が得られた (図 3 b)。

得られた検出器性能を踏まえた GEANT4 シミュレーションによる分解能・感度・画質の評価結果から、従来と比較して優れた性能が得られることを確認した。したがって、本研究で得られた DOI 分解能と TOF 分解能を両立する検出器を用いることで、PET 装置の画質は大きく改善することが分かった。

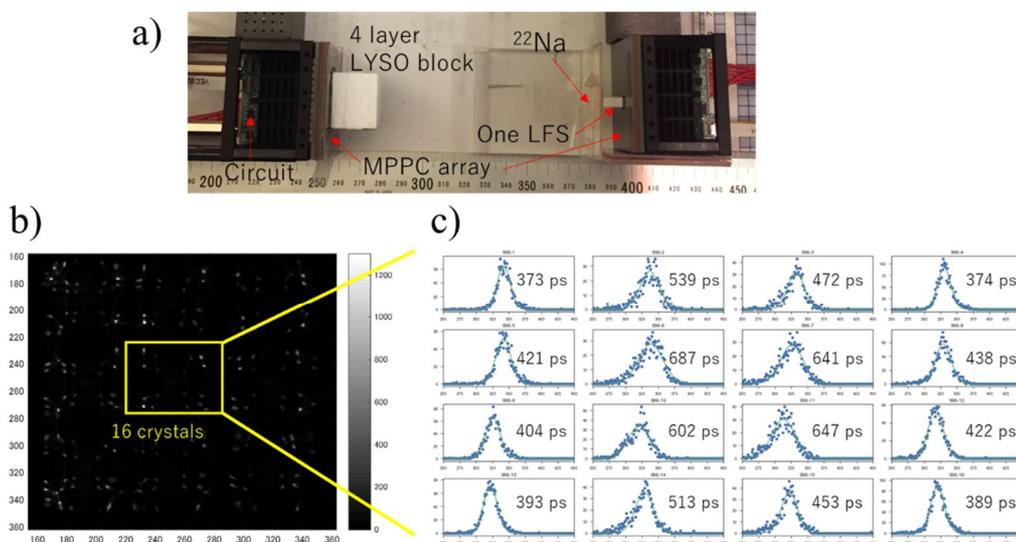


図2 a) 片端光読み出し方式検出器の実験外観, b) 2次元ポジションヒストグラム, c) 中央16結晶のタイミングスペクトル

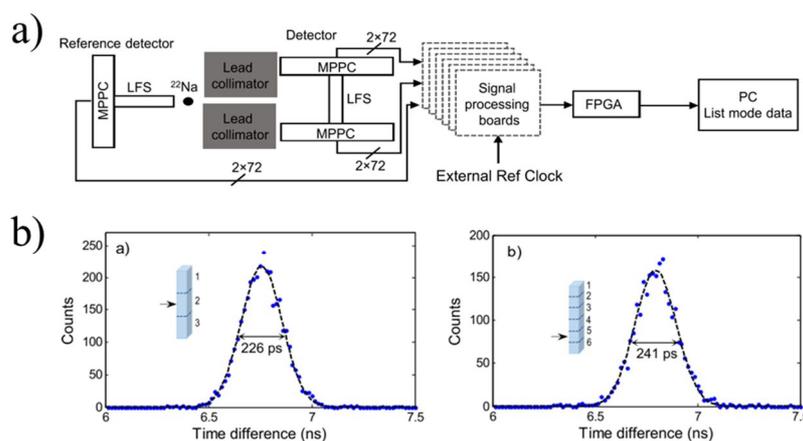


図3 a) 両端光読み出し方式検出器の実験セットアップ
b) 2次元ポジションヒストグラム (左:3層DOI、右:6層DOI)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takyu Sodai, Ahmed Abdella M., Yoshida Eiji, Tashima Hideaki, Yamashita Taichi, Yamaya Taiga	4. 巻 -
2. 論文標題 Suitability of a 280 ps-CRT non-DOI detector for the helmet-neck PET	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Conference record of 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)	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/NSSMIC.2017.8532709	査読の有無 無
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 Takyu Sodai, Yoshida Eiji, Nishikido Fumihiko, Nitta Munetaka, Akamatsu Go, Yamaya Taiga	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a 4-Layer DOI TOF-PET detector module with a 6 mm-pitch MPPC array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Conference record of 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)	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/NSSMIC.2018.8824383	査読の有無 無
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 Mohammadi Akram, Takyu Sodai, Nishikido Fumihiko, Yoshida Eiji, Shimizu Keiji, Sakai Toshiaki, Yamaya Taiga	4. 巻 931
2. 論文標題 Development of a dual-end detector with TOF and DOI capabilities using crystal bars segmented by subsurface laser engraving	5. 発行年 2019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 236 ~ 241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.04.016	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 Takyu Sodai, Ahmed Abdella M, Yoshida Eiji, Tashima Hideaki, Kumagai Masaaki, Yamashita Taichi, Yamaya Taiga	4. 巻 65
2. 論文標題 Design study of a brain-dedicated time-of-flight PET system with a hemispherical detector arrangement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 035012 ~ 035012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6560/ab63ee	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 3件）

1. 発表者名 S. Takyu, E. Yoshida, F. Nishikido, M. Nitta, G. Akamatsu, T. Yamaya
2. 発表標題 Development of a 4-Layer DOI TOF-PET detector module with a 6 mm-pitch MPPC array
3. 学会等名 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sodai Takyu, Eiji Yoshida, Fumihiko Nishikido, Hideaki Tashima, Taiga Yamaya
2. 発表標題 Evaluation of time-of-flight PET detector using LFS with 10 mm length and MPPC module
3. 学会等名 The 5th NIRS-SNU Workshop on Nuclear Medicine Imaging Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sodai Takyu, Abdella M. Ahmed, Eiji Yoshida, Hideaki Tashima, Taichi Yamashita, and Taiga Yamaya
2. 発表標題 Suitability of a 280 ps-CRT non-DOI detector for the helmet-neck PET
3. 学会等名 IEEE NSS MIC 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田久創大, アハマドアブデラ, 吉田英治, 田島英朗, 熊谷雅章, 山下大地, 山谷泰賀
2. 発表標題 ヘルメットPET装置のためのtime of flight型検出器の検討
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----