

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20723

研究課題名（和文）多核種同時撮像のためのコンプトンカメラ機能を持つPET検出器の開発

研究課題名（英文）Advanced PET detector with function of Compton camera for simultaneous multi-nuclide imaging

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：核医学画像診断装置であるPETは、511 keV対消滅光子しか測定できないため、生体の複数の機能を同時に画像化することはできない。そこで本研究では、広範囲のエネルギーの放射線を同時に撮像できる、コンプトンカメラの機能を追加したPET検出器の開発を行った。GSOシンチレータとMPPCアレイモジュールを用いた2層構造の散乱検出器を開発し、所属ラボの別プロジェクトで開発されたPET検出器を吸収体として流用することで、コンプトンカメラ機能付加型PET検出器を構成した。Na-22およびCs-137のエネルギーの異なる点線源を同時に撮像し、各々を区別して画像化することが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PETは他の核医学診断装置であるSPECT（単一光子放射断層撮影）に比べ空間分解能や画像の定量性に優れているが、複数の分子プローブを同時に使用することはできず、複数の因子が複雑に関与する疾患等の発生要因を明らかにすることはできない。そこで、様々なエネルギーのガンマ線を可視化できるコンプトンカメラの技術に着目した。PET検出器にコンプトンカメラの原理を応用すれば、PETとしての空間分解能・感度を維持しながら、複数核種の同時撮像が可能となり、核医学診断の分野において大きなイノベーションになると期待する。

研究成果の概要（英文）：Positron emission tomography (PET), which is a nuclear medicine imaging modality, can only use 511 keV annihilation photons for imaging, and thus cannot visualize multiple functions of a living body simultaneously. In this study, we developed a PET detector with a function of Compton camera that can image a wide range of gamma ray energies simultaneously. A two-layered scatterer detector consisting of GSO scintillators and a multi-pixel photon counter (MPPC) array module was developed, and a PET detector developed in another project in our laboratory was used as an absorber detector to construct a PET detector with Compton camera function. Simultaneous imaging of point sources of Na-22 (511 keV and 1275 keV) and Cs-137 (662 keV) was performed, and each source could be visualized separately.

研究分野：医用放射線工学

キーワード：放射線検出器 コンプトンカメラ PET

1. 研究開始当初の背景

がんや認知症診断等で活躍する PET (positron emission tomography: 陽電子断層撮影法) は、陽電子放出核種で標識された放射性薬剤を体内に投与し、180 度反対方向に放出される 511keV 対消滅ガンマ線ペアを同時計数の原理で測定し、核種位置を線上に特定する (図 1 左)。これにより生体の様々な機能を高い定量性をもって画像化することができる。放射線検出器は、シンチレータで微弱な光に変換して光電子増倍管 (PMT) で検出する方式が一般的である。

PET 検査は保険適用を受けここ約 10 年で大きく普及が進んだ検査であるが、原理的に検出できる放射線は 511keV 対消滅ガンマ線ペアのみであり、一度の診断では生体内の単一の機能しか画像化できない。がんや生活習慣病は、複数の因子が複合的に関与

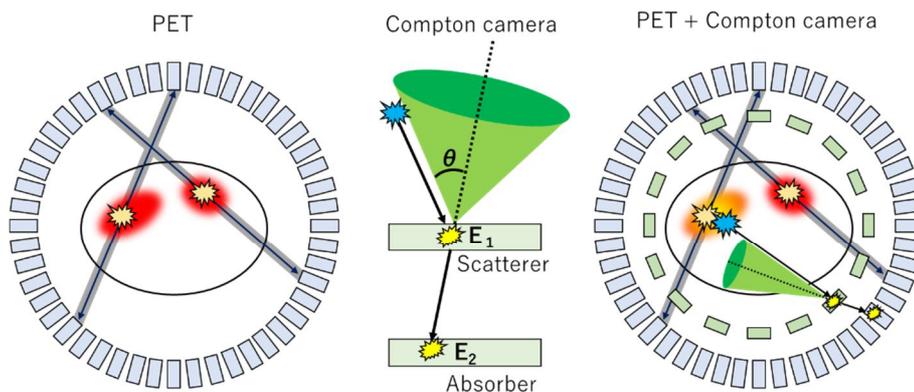


図1 PETとコンプトンカメラの原理および構想中のコンプトンカメラ・PETシステム (右図では、複数の薬剤集積とその関連性を同時に画像化できる)

していることが明らかになっている。そのため、単一の機能を追うだけではその複雑な発症メカニズムを明らかにするには不十分とされている。それぞれの因子に対して特異性を持つ複数の薬剤を同時に用いその挙動を追跡することができれば、疾病の複雑なメカニズムやほかの生体反応との相互作用がよく理解でき、より高度で正確な診断が可能になると期待されている。

一方、近年では、宇宙物理学・環境放射線等の分野でコンプトンカメラの開発が精力的に進められている。コンプトンカメラは数段のガンマ線検出器を配置した検出器構造をしており、入射ガンマ線が前段の検出器(散乱検出器)でコンプトン散乱を起こし、後段の検出器(吸収検出器)で光電吸収された事象について、散乱体と吸収体それぞれに対するガンマ線の付与エネルギー (E_1 と E_2) と検出位置からガンマ線の入射方向を特定することができる (図 1 中央)。原理的には複数のエネルギーのガンマ線を識別して同時測定することが可能である。しかし現在まで開発が進められたコンプトンカメラの大部分は高価な半導体検出器を用いており [S. Motomura, et al., J. Anal. At. Spectrom., 23, 1089-1092, 2008]、検出効率の低さが欠点であった。そのため数時間~十数時間の非常に長い測定時間を要してしまい、薬剤の挙動・集積の経時変化を観察する定量性に乏しく、臨床用機器としては実用的ではなかった。

2. 研究の目的

そこで我々の研究グループでは、医療用ガンマ線検出器として高感度・高位置分解能を有する PET 検出器にコンプトンカメラの原理を応用して、広範囲のエネルギーの放射線を同時に計測できるコンプトンカメラ・PET システムの開発を構想中である (図 1 右)。

本研究では、PET の検出器としてもコンプトンカメラの検出器としても十分に機能するシンチレーション検出器を開発する。従来の PET では単一のエネルギーのガンマ線しか計測しないため、検出器のエネルギー分解能はあまり重要視されていなかった (15%程度@511 keV)。本研究の学術的独自性は、上記の PET 検出器実現のために、シンチレータ本来の性能を十分に引き出す受光素子配置、シンチレータ内での放射線相互作用位置の深さ情報を取得できる DOI (depth of interaction) 計測技術、検出器の特性を反映した信号処理アルゴリズムなどを新たに開発することである。

3. 研究の方法

1 年目は、コンプトンカメラの吸収体としての高エネルギー分解能 PET 検出器の開発研究を行った。アルミケーシングが施された $50 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$ のサンゴバン製 $\text{LaBr}_3: \text{Ce}$ モノリシックシンチレータを浜松ホトニクス製 64 ch マルチアノード光電子増倍管に光学結合し、片面読み出し方式の検出器を製作した。更に抵抗チェーン回路を用いて読み出し信号数を 64 から 4 チャンネルに削減した。また Python の Keras ライブラリを用いて測定データの深層学習を行い、位置精度の向上を試みた。Cs-137 線源を 1 mm 径でコリメートし、結晶上面から結晶の 4 分の 1 の領域において、1 mm ピッチで照射し学習データを得た。

2 年目は、コンプトンカメラの散乱体として使う高エネルギー分解能シンチレーション検出器

を開発し、画像化実験を行った。2.9×2.9×7.5 mm³のGS0シンチレータ結晶を1層目7×7、2層目8×8配列で光学結合し、2層構造のGS0結晶ブロックを製作した。この結晶ブロックを3mm角8×8チャンネルの浜松ホトニクス製multi-pixel photon counter (MPPC)アレイモジュールに結合した。この検出器と、所属ラボの別プロジェクトで開発されたPET検出器(同じサイズのGS0結晶を16×16×4層構造に配列したPET検出器)を吸収体として用いることで、コンプトンカメラ機能付加型PET検出器を構成した。Ba-133(主に81 keVと356 keV)、Na-22(511 keVと1275 keV)およびCs-137(662 keV)の3つの点線源を散乱検出器から5 cmの距離に重ねて置き、コンプトンカメラとしての測定を行った。上記エネルギーに相当するウィンドウを各々設定し、コンプトンカメラ画像再構成を行った。

4. 研究成果

1年目に開発した検出器におけるエネルギー分解能は、662 keVに対して約4~5%であった。位置分解能については、結晶の中心付近では約6 mmであったが、辺縁部に進むほど劣化した。辺縁部では4チャンネルの出力信号にあまり違いが生まれなため、位置精度が劣化すると考えられた。コリメート照射したデータに対して深層学習を適用したところ、位置精度は約5.4mmに改善した。信号数を削減しても深層学習による位置精度改善が見込まれた。

2年目に開発した散乱検出器のエネルギー分解能を実測したところ、81 keVで23.5%、141 keVで14.7%、202 keVで12.7%、307 keVで11.2%、511 keVで10.4%、662 keVで10.1%と良好なエネルギー分解能値が得られた。他核種同時撮像実験の結果は、Ba-133点線源は画像化出来なかったが、511 keV、1275 keV、662 keVの3つのガンマ線を区別して画像化することが出来た。多核種同時撮像が可能なコンプトンカメラ機能を持つPET検出器の開発に成功した。

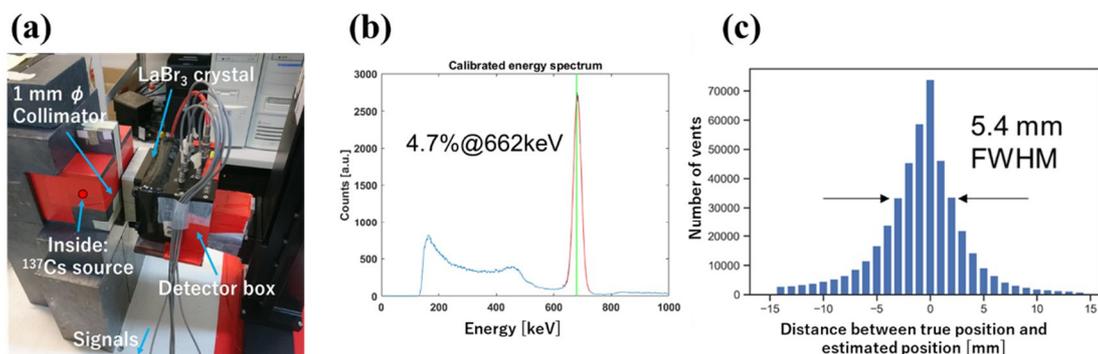


図2 a)LaBr₃吸収検出器実験時の外観写真、b)エネルギー校正後のエネルギースペクトル、c)深層学習を用いた際の位置演算結果のエラーヒストグラム

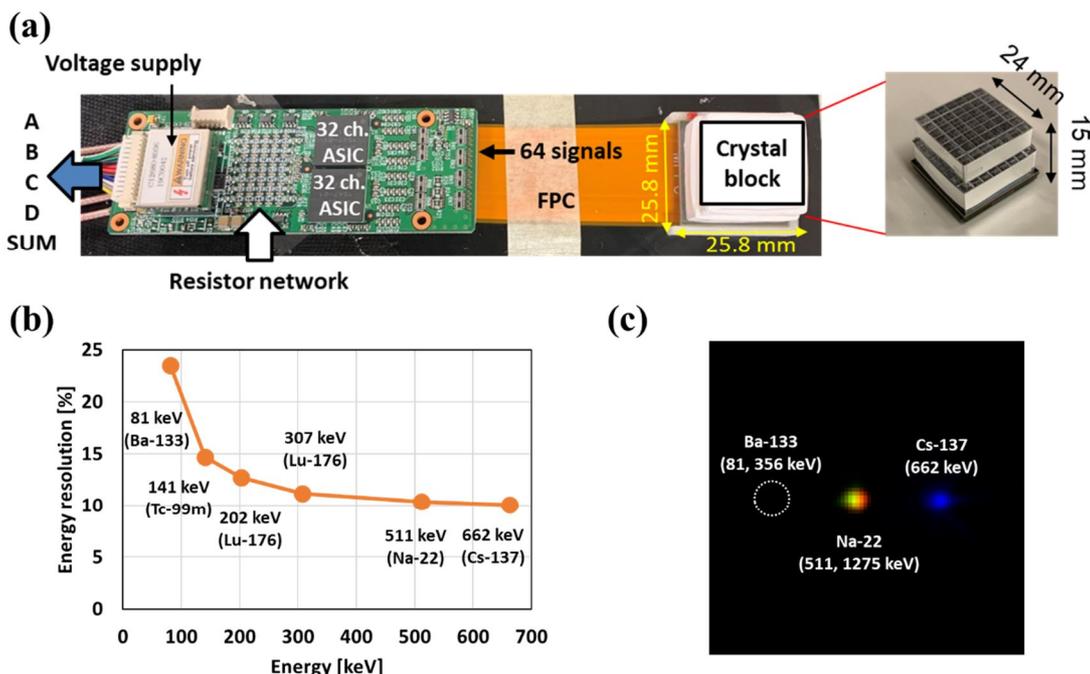


図3 a)開発した2層構造散乱検出器の外観写真、b)エネルギー分解能解析結果、c)複数核種同時撮像結果(Na-22とCs-137は画像化に成功)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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, Nishikido Fumihiko, Yoshida Eiji, Nitta Munetaka, Kamada Kei, Yoshikawa Akira, Yamaya Taiga	4. 巻 990
2. 論文標題 GAGG-MPPC detector with optimized light guide thickness for combined Compton-PET applications	5. 発行年 2021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 164998 ~ 164998
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164998	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Takyu, H. Tashima, E. Yoshida, H. Wakizaka, F. Obata, M. Takahashi, K. Nagatsu, A. Tsuji, K. Parodi, T. Yamaya
2. 発表標題 Whole Gamma Imaging: the 3rd Prototype With aTwo-layer DOI GSOZ Scatterer Detector
3. 学会等名 2020 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田久創大, 田島英朗, 吉田英治, 脇坂秀克, 小畠藤乃, 高橋美和子, 永津弘太郎, 辻厚至, Katia Parodi, 山谷泰賀
2. 発表標題 Whole Gamma Imaging: 小動物用原理実証機の改良
3. 学会等名 第60 回日本核医学会学術総会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田久創大, 田島英朗, 吉田英治, 脇坂秀克, 小畠藤乃, 高橋美和子, 永津弘太郎, 辻厚至, Katia Parodi, 山谷泰賀
2. 発表標題 Zr-89 Whole Gamma Imaging のための2 層DOI 型GSO 散乱検出器の開発
3. 学会等名 第81 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sodai Takyu, Eiji Yoshida, Akram Mohammadi, Kei Kamada, Taiga Yamaya
2. 発表標題 Development of a two-layer staggered detector for a scatterer of whole gamma imaging
3. 学会等名 第119 回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Takyu, S. Liprandi, H. G. Kang, M. Kawula, M. Nitta, F. Nishikido, N. Inadama, K. Parodi, P. Thirolf, T. Yamaya
2. 発表標題 Reduction of readout channels of a monolithic LaBr3:Ce detector by resistive-chain and neural networks
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Takyu, E. Yoshida, A. Mohammadi, K. Kamada, T. Yamaya
2. 発表標題 Two-Layer DOI Staggered GAGG Scatterer Detector for WGI
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田久創大, 吉田英治, 仁科匠, 菅幹生, 鎌田圭, 山谷泰賀
2. 発表標題 Whole gamma imaging のための 2 層スタガー型 GAGG 散乱検出器
3. 学会等名 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

次世代PET開発研究会報告書
<https://www.nirs.qst.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/main.html>

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			
ドイツ	LMU Munchen			