

委託研究「高性能PET装置に関する研究開発」
(研究開発テーマ：放射性同位元素の医学・工学等への応用)
研究成果報告概要

研究開発の概要

(研究実施期間) 平成29年～令和3年

(目的)

がん、脳疾患等の診療技術の向上に資するため、加速器によるRI等の医学・工学等への応用研究として、陽電子放射断層撮像(PET)に関する研究開発し、以下の必要に応えようとするものである。

(必要性)

高齢化社会を迎えた現在、医療費、年金などについて様々な問題が生じている。この問題に対処する1つの解決は、高齢者になっても、末永く健康で有り続け、経済活動に従事できることである。このためには、特に、3大老人病である、がん、認知症、心臓病に対する診断技術および治療技術の高度化が喫緊の課題として望まれる。

(新規性)

がんを画像化して診断できるPETの高空間分解能化の研究は、この20年間精力的に行われ、ヒト用PETとしては、今日では3～5mm(FWHM)に達している。本研究では、空間分解能1mm(FWHM)で3次元画像を提供する汎用PETの開発を目指す。

(独創性)

高空間分解能は、PET用検出器として、これまでのシンチレーターの使用から半導体の使用により実現する。

(有用性)

本装置により、脳の機能を微細に診断でき、認知症の早期診断が可能となる。さらに、高空間分解能を利用して、非常に小さな癌の画像化も可能とし、癌の早期発見も可能となる。

平成29年度の研究成果

まず、青森県量子科学センター医工学実験室において、本研究課題を実施する環境を整えた。豚程度の大型動物のPET診断が行える3次元PET(島津製作所製SET2400W)を同実験室に設置した(図1)。

2次元CdTe半導体検出器を円周上に並べた3次元半導体PETのプロトタイプ(640個の2次元CdTe半導体検出器を搭載)を同実験室に設置した(図2)。今後、本装置を用いて、3次元半導体PETの開発研究の環境が整えられた。CdTe結晶のショットキー障壁ダイオード特性による放射線計測時間応答の高分解能性能及びIn電極面の電気抵抗を利用した位置感性を利用した2次元位置敏感型ガンマ線検出器の開発を行った。2次元位置敏感型のCdTe素子に100V電圧をかけ、素子の5端子(位置信号4つ(カソード)、エネルギー信号1つ(アノード))から信号を取出し、ガンマ線の検出位置情報取得を行った。アノード信号であるガンマ線のエネルギースペクトルを図3に示す。一方、カソード信号は、位置を示す信号で、4隅の端子から得られる(図4)。図5は位置情報信号からガンマ線の2次元検出位置を求めて得られたものである。点線源が左下に位置していることを表している。



図1 3次元PET(SET2400W)



図2 3次元半導体PETのプロトタイプ

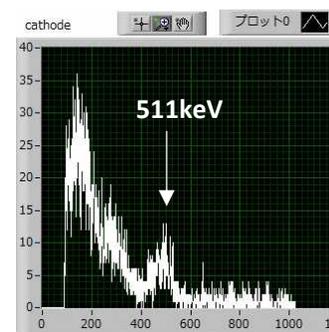


図3 エネルギー信号スペクトル アノード信号

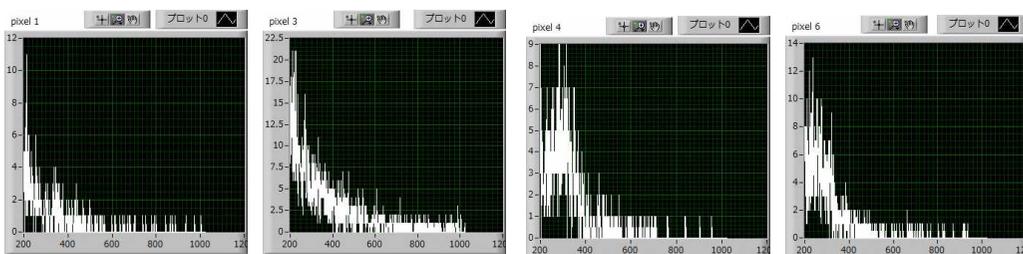


図4 位置情報信号スペクトル カソード信号

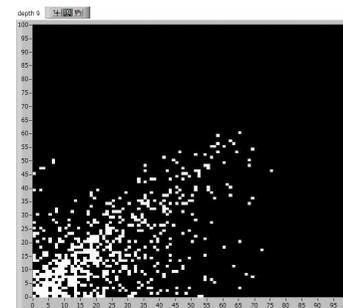


図5 ガンマ線検出2次元位置

平成30年度の研究成果

1) 高時間分解能2次元位置敏感型検出器の開発

幅1mm、溝0.2mmのストライプの8列からなる9.4mm×20mm×1mmのCdTe結晶を作成し、ストライプ側をInを300nm蒸着し陽極電極とし、その裏面をPtを蒸着したCdTe検出器(図1)を作成し、エネルギー特性、時間特性を調べた。図2の上図に511keVのガンマ線のエネルギースペクトルを示す。CdTe検出器のエネルギー分解能は数度差にコンプトン散乱されたガンマ線を十分に分離できることが分かった。この結果、本検出器を用いれば、体内でのコンプトン散乱同時計数を十分に除去できることが分かった。また、10%–90%の立ち上がり時間分布を調べたところ、図3に示すように200ナノ秒から700ナノ秒の間に分布した。これは、システムのノイズレベルを考えると十分に10ナノ秒の時間分解能での同時計数が可能と考えられる。

2) PET用TlBr検出器の開発

1.5mm×1.5mm×3.1mmの高位置分解能をねらったTlBr検出器を作成し、エネルギー特性を調べた。図2に示すように、CdTe検出器のエネルギー分解能に近くなった。

3) 半導体PETの高分解能化アルゴリズムの開発

半導体PETのガントリー内の径25cm内で1mmの分解能を得る方法として、Na-22点線源を用いて、検出器の位置を精度良く測定し、人間の脳が収まる20cm径のFOV内で1.6mmFWHMの分解能を与える方法を開発した。図4に示すように、検出器位置補正後の画像の改善が得られた。



図1 製作したCdTe検出器

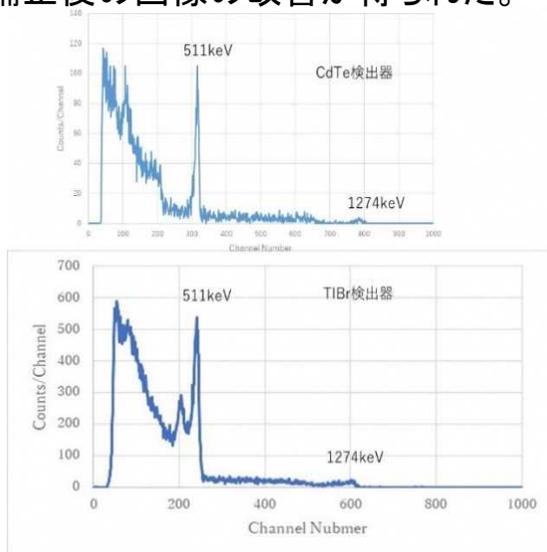


図2 CdTe検出器とTlBr検出器とのエネルギースペクトルの比較

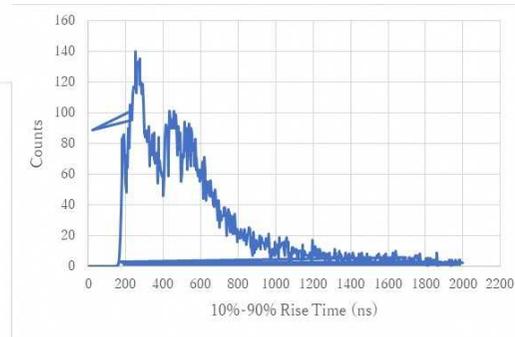


図3 10%–90%立ち上がり時間分布

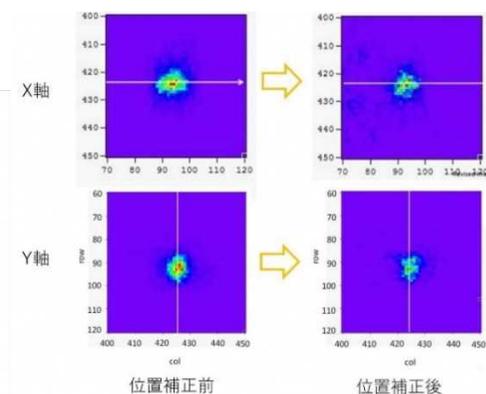


図4 検出器の位置の補正前後の点線源の画像

令和元年度の研究成果

2次元CdTe検出器の時間分解能及び空間分解能を調べるために、CdTe素子支持基盤を作成し、特性試験を行った。In電極の厚さが500 Å、600 Å、700 ÅのAgペーストとカーボンペーストの性能評価を行った。Agペーストは抵抗値が時間とともに上昇していく傾向があるのに対して、カーボンペーストは1ヶ月後に一定値となることが分かった。この結果から、カーボンペーストによる素子との接続を行うこととした。Inの厚さとストリップ抵抗値の相関を調べ、厚さが3倍になると抵抗値は3分の1になり、厚さに反比例することが分かった。従って、ショットキーダイオード特性も良くなること期待できる。¹³⁷Cs線源を2次元CdTe検出器の上部に置き、位置敏感試験を行った結果を図1に示す。上図の上段の画像から、Inの厚さが減るほど位置情報は実際の位置を表していることが分かる。しかし、1500 Åの場合、Y軸方向が歪んだ画像になっているが、我々のこれまでの研究成果より、X軸の2次関数で補正できる。中段の画像から、X軸方向の位置分解能と検出感度を調べることができる。位置分解能はInの厚さに依存せず、また検出感度はX軸に依存しないことが分かる。下段の画像は、Y軸方向の検出感度を示す。500 Åの場合、両端の感度に比べ、中央部分の感度が非常に低くなっていることが分かる。中央部の低下感度特性はInの厚さが厚くなるほど改善され、1500 Åでは感度がY軸上の位置に依存しなくなっている。²²Na線源を用い、2本の陽電子対消滅ガンマ線を測定して、時間分解能の評価を行った。BaF₂シンチレーター検出器でスタート信号を検出し、CdTe共通電極からの信号をストップ信号として時間差の分布を調べた。図2は、横軸の目盛200が400ナノ秒である。In電極厚が700 Å以下では、二つのピークが現れているのに対して、1500 Åは1つのピークとなっている。

以上の結果から、2次元CdTe検出器の出力端子の構造としては、カーボンペーストおよびIn電極厚1500 Åの選択が良いことが分かった。

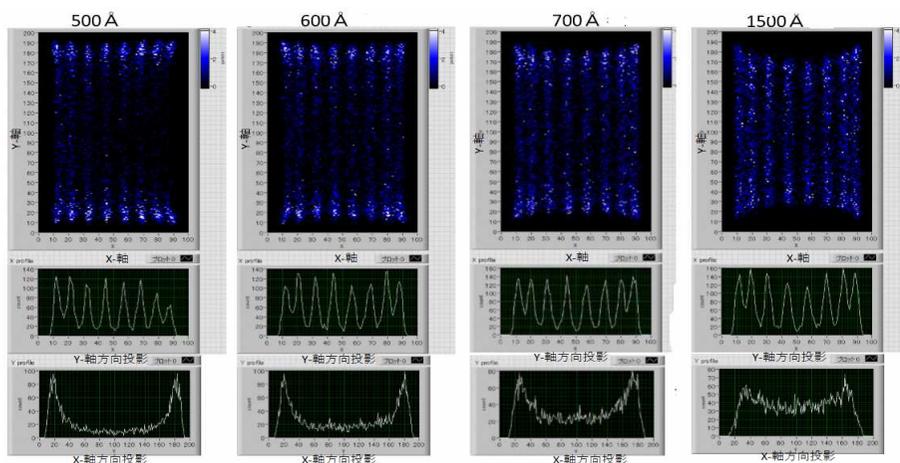


図1 位置敏感試験

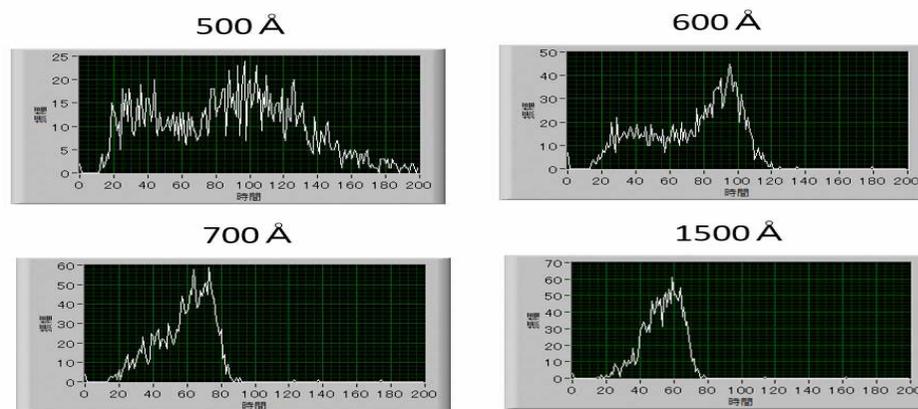


図2 時間差の分布

令和2年度の研究成果

2次元半導体検出器の高性能化に成功し、これを用いた植物用PETの開発に成功した。これまでの研究によりCペースト接続のIn膜厚1500ÅのCdTe検出器が最良であることが明らかになったので、これを2枚対向1組とした簡易植物用PETのプロトタイプを作成した。図1は、植物PETの電子回路図を示す。2次元位置敏感型素子に入射したガンマ線の信号を4端子で分割し、8chのデータ収集系(DAQ)に入力し、4分割信号の和によってエネルギーを求め、比によって検出位置を決定し、DAQへの入力時間で信号到着時間としている。2つの2次元位置敏感型素子からの信号が時間幅(150n秒~1000n秒)の間であれば同時計数とみなす。同時計数した2つの2次元位置敏感型素子での検出位置を結んだ直線がそれらの間の垂直面と交叉した点が陽電子放出核種が存在した位置となる。図2は簡易植物用PETの写真と2次元PET画像である。2次元PET画像は10mm×20mmである。図2では、点線源を6mmずつ移動した場合の2次元PET画像が示されている。空間分解能は1.2mmであった。

マウス又はラットを用いた動物実験が行えるように、空間分解能0.78mmFWHMの3次元CdTe半導体PETを整備した。

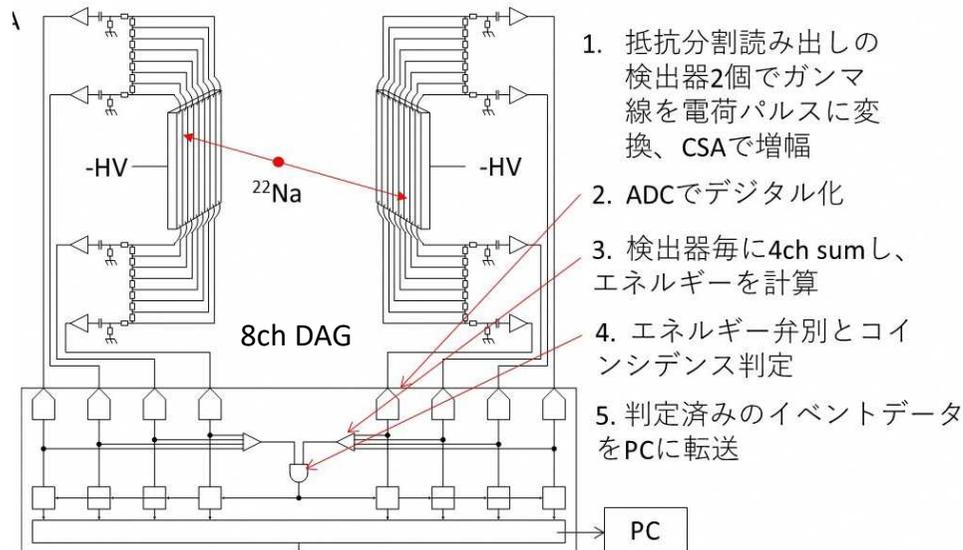


図1 簡易植物用PETの電子回路のブロックダイアグラム

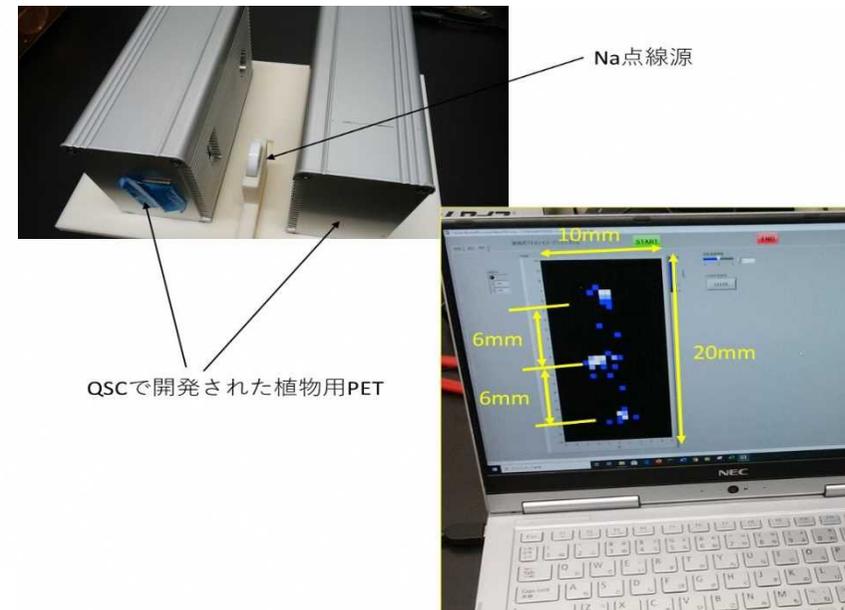
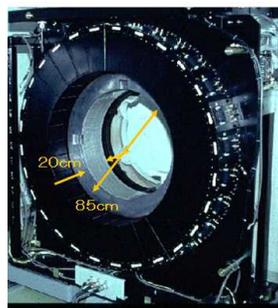


図2 簡易植物用PETの写真と点線源の位置を表した2次元PET画像

令和3年度の研究成果

青森県量子科学センターにおいてPETによる動物診療を実現することを目的として、大口径3次元PETの整備を行った。図1は、本研究で使用する東北大学が開発した体軸視野20cm、断面の有効視野径59cmの大口径3次元PETを示す。このPETに使用されている検出器はBGOシンチレーター結晶なので、511keVのガン線に対して非常に検出効率が高いので、PET画像の空間分解能として、X-Y軸断面において2mm、Z軸方向で3.1mmの解像力を持つ。連続スキャンによって体軸175cm内の動物のPET画像を取得でき、動物診療に十分に利用できる。このPETは、使用停止してから6年近くになるので再調整を行った結果、次の問題点が見つかり、対処した。電気回路キャビネットの空調が十分でないため、プラスチック板を組み合わせて排気ダクトを製作した。データ収集のVMEボードが動作不良だったので、中古品を探し交換した。将来、同ボードの機能を果たす電子回路の開発を行う必要あり。ノーマライゼーションデータ、ブランクデータ、アテヌエーションデータ取得のためのライン線源として、内径1mmのゴムチューブにF18アイソトープを注入することによって、作成可能であることが分かった。PET装置とPET操作は別々の部屋で行うためのPET操作室が必要のため、簡易パーティションを用いて、RI棟の医工学実験室内にPET操作室を製作した。

認知症等の脳の高次機能を診断できる高分解能半導体3次元PETの開発が行われた。2次元位置敏感型CdTe半導体検出器を用いた同PETを図2に示す。本PETのガントリーは、80個の検出器ユニットから構成される。各検出器ユニットには20mm×20mm×厚さ1mmの2次元位置敏感型CdTe検出器(図2の上図の上右)8枚を重ねて内臓しており、計640個の検出器から成る。2次元位置敏感型検出器を考慮すると検出素子163840個となり、大口径3次元PETの8倍の数になる。従って、解像力1mmFWHMが期待でき、脳の高次機能診断に有用と期待できる。しかしながら、現状の2次元位置敏感型CdTe検出器の動作状況は悪く、いくつかの検出器から不良データが測定された。そこで、不良検出器を取り出し、故障原因を調査できるモデル80363/8CH/ADCを用いた2次元位置検出型CdTe検出器検査ソフトを開発した。これを用いて、現在所有している検出器の良・不良の分別を行い、正常検出器でのPET構成を行うことができるようになった。



結晶: BGO
結晶サイズ: 3.8×6.25×30mm
検出器リング径: 850 mm
結晶数: 21504個
PMTの数: 896個
検出器リング数: 32個
体軸方向スライス数: 63個
FOV (X-Y面)径: 590 mm
FOV (z-軸): 200 mm
体軸スキャン長: 1750 mm

図1 大口径3次元PET



ガントリー体系



検出器ユニット



検出器

図2 高分解能半導体3次元PETのガントリー、検出器及び検出器ユニット

研究発表

1. 令和2年8月3日、東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻、令和2年度東北大学大学院工学研究科学位論文審査会、久保信「植物ポジトロンイメージング装置用2次元位置検出型検出器の開発」として題して発表した。

研究会等の開催

1. 特に無し。

発表論文

1. A point source method to position 2D position-sensitive detectors correctly to obtain brain PET images with a resolution of 1 mm over a region of 25 cm Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:,A902(2018) 211-218,Tetsuo Matsuyama, Keizo Ishii, Manato Kikuchi, Motohiro Inoue and Atsuki Terakawa.
2. Development of a 2-dimensional position-sensitive CdTe detector for PET application, 放射線 (Ionizing Radiation) , Vol.45, No.3, p111-p222, 2019, Shin KUBO, Keitaro HITOMI, Mitsuhiro NOGAMI, Atsuki TERAKAWA and Keizo ISHII.

青森県内への波及効果

本研究では、認知症診断用高分解能3次元半導体PETの開発、大口径3次元PETの動物診療への応用、小型半導体PET(Fine PET)の小動物実験への応用、半導体PETの植物中での代謝の研究への応用を行っており、青森県民の健康の向上、伴侶動物の健康診断を伴った観光業の振興等に役立たせるとともに、開発した装置を製造する企業を青森県に興し、青森県の経済の推進に貢献することが期待できる。