

氏名	きくち ようへい 菊池 洋平
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成19年 3月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成14年3月 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 博士課程前期課程修了
学位論文題目	CdTe 検出器を用いた高空間分解能 PET カメラの基礎開発 Fundamental Development of High Spatial Resolution PET Camera Using CdTe Detectors
論文審査委員	主査 東北大学教授 石井慶造 東北大学教授 阿部勝憲 東北大学教授 伊藤正敏 東北大学教授 山崎浩道

論文内容要旨

PET (Positron Emission Tomography) は、核医学診断で使用されている断層撮影法の一つである。陽電子放出核種で標識した薬剤を被験者に投与し、電子と陽電子の対消滅によって生じる 2 本の 511keV 消滅 γ 線を外部にリング状に設けられた検出器列 (ガントリー) を用いて計測し、細胞の生理学的機能情報を画像として得る方法である。PET は、臨床利用として癌診断に広く用いられているほか、ヒトの脳の高次機能解析における利用や、生化学や生理学的研究の成果をヒトに応用するための動物実験への応用などがなされており、頭部専用、動物専用等の高空間分解能 PET が開発されている。これらの PET は全身用 PET に較べガントリー径が小さく、良好な空間分解能を持っている。しかし、脳機能解析や小・中型動物を用いた研究をより高度な域で行なうためには、より高分解能の装置が必要であり、高分解能装置の開発が望まれている。特に現行の小動物用装置に関しては、1.5mm~2mm と高い分解能を持っているものの、より高分解能化への要求は極めて高い。

PET の分解能は、検出器幅、陽電子飛程、角度揺動の 3 つの要素によって制限されている。このうち、陽電子飛程の効果は薬剤の標識に用いられた核種に、角度揺動の効果はガントリー径に依存するが、動物用装置において、これらが分解能に与える寄与は最も主要な標識核種である ^{18}F を利用した場合、0.4mm 程度である。即ち、現在の空間分解能に支配的な影響を与えているのは検出器幅であり、これを縮小することで分解能の向上が可能である。

一方で、現在の PET 用検出器にはシンチレーション検出器が利用されているが、この場合、検出器の小型化による空間分解能の向上は困難であると考えられる。PET 用シンチレーション検出器の多くは、複数の細いシンチレータ結晶を束ねた結晶アレーと位置敏感型光電子増倍管によって構成されている。シンチレータは 511keV 光子からのエネルギー付与により蛍光を放出し、この蛍光は位置

敏感型光電子増倍管の受光面に達して、重心位置演算の結果、光子検出を行なったアレー中の結晶が特定される。シンチレータ結晶を縮小した場合（結晶を細くした場合）、発生した蛍光の受光面までの到達率が低下する。これは、PS-PMT の位置特定精度の劣化を招き、空間分解能の向上にはつながらない。

シンチレーション検出器の他に 511keV の γ 線検出に適しているものに半導体検出器が挙げられる。半導体検出器は放射線からの付与エネルギーを直接電気信号に変換することが可能であり、シンチレーション検出器のように小型化に伴い信号出力特性が変化することはない。このようなことから、小型半導体検出器を用いた高分解能の PET 装置、半導体 PET 装置の開発を提唱する。近年、PET 用検出器として必要な高い原子番号と室温動作性を有した化合物半導体検出器も商用化されており、高分解能 PET 装置の実用機開発は十分可能であると考えられる。その中でも、CdTe 検出器は優れた性能を持ち、他の医療診断機器に広く応用され始めている。この検出器の利用は極めて有効で、このため、本論文では CdTe 検出器を用いた高分解能 PET 実用機開発のための基礎開発を行なった。本研究の成果が活用される半導体 PET 実用機は、現在における高分解能装置の要求を鑑み、マウス、ラットを測定対象とした小径のガントリーを持つ動物用装置であり、1mm 以下の分解能の達成を目指す。これを実現するために、以下の研究・開発を行なった。

① CdTe 検出器の PET 用検出器としての特性調査

検出器は、電極構造によってその性能が異なる。このため、オーミック電極型検出器とショットキダイオード型検出器の 2 種類の CdTe 検出器に関して ^{22}Na 線源を用いたエネルギースペクトル測定と時間分解能測定を実施した。

2 つの検出器を用いて得られたエネルギースペクトルと時間分解能から、エネルギー特性、時間特性に関して、バイアス電圧による顕著な違いが見られた。特に時間分解能は PET 用検出器としては重要な性能であるが、良好な時間分解能を得るためには、高い印加バイアス電圧が不可欠である。一方で、高バイアスの印加は検出器の漏れ電流を増大することになり、これによって出力信号の S/N 比が悪化することになる。この S/N 比の悪化は、時間分解能にも悪影響を及ぼすことが判明した。このため、高バイアス印加時でも漏れ電流の少ないショットキ型検出器が PET 用検出器に相当であると考えられる。また、この検出器を用いて PET への応用が可能な 15nsec の時間分解能を得ることができた。

② 1mm 以下の高分解能を達成するために必要な装置構成を明らかにする研究

PET の空間分解能は主に陽電子飛程、角度揺動、検出器応答の影響によって決定する。本研究における高分解能化の手法は、小型化可能な半導体検出器を利用して検出器対の応答関数の影響を縮小することである。この応答関数は対抗する検出器対の間で陽電子放出核種の線源を走査し、各位置におけるイベントを計数することによって、実験的に求めることができる。

応答関数幅の縮小を確認するため、0.5mm、3.0mm、5.0mm 複数の幅を持つ検出器対間で応答関数を実測した。検出器幅が狭まるごとに、応答関数の半値幅が縮小することが確認された。また、最小の検出器幅である 0.5mm における半値幅は 0.6mm 程度であった。これは検出器幅の縮小により極めて高い空間分解能が実現できることを示唆している。

この 0.5mm 幅検出器を用いた PET が装置としてどの程度の分解能を実現しうるか、計算による

見積を行なった。装置の分解能は各要素のモデル関数を畳み込みによって得られる分布から算出可能である。分布の半値幅で評価した結果、30cm 以下のガントリー径において、1mm 以下の分解能が実現可能であることが判明した。また、小動物用 PET 装置を想定した 10cm でのガントリー径では、0.6mm 程度の分解能を得ることが可能であることが明らかになった。

以上で示された CdTe 検出器の利用による高分解能化を実証するため、幅 0.5mm の CdTe 検出器を 8 対持つ小規模な PET 計測システムを構築し、高空間分解能化の実証を行なった。直径 1mm 以下の ^{22}Na 点線源を測定対象として行なわれた計測から、極めて高い分解能の実現が確認された。詳細な分解能の評価のため、既知の間隔のホットスポットを複数持つ ^{22}Na ファントムを作製して点線源と同様に測定したところ、再構成画像上において明瞭なホットスポットの分離が確認された。0.8mm の間隔で配置されたホットスポットが分離されており、上記において実測と計算によって得られた結果が実証された。

③ 実用機に向けた検出器の高密度配置に関する研究

実用装置に対しては高密度な検出素子の配置が必要となる。これを実現する手法として、単一の検出器の陽極または陰極いずれかを分割することにより、多チャンネル化された検出器列の利用が有効である。このため、この手法を用いることで、1.2mm 幅を持つショットキ型検出素子を 1.4mm ピッチで 32 個配列させた CdTe 検出器列について、性能の評価とその使用条件の把握を行なった。性能の評価に関しては、 ^{22}Na のエネルギースペクトル測定と、高速の BaF₂ 検出器との同時計数実験を行なった。検出器列は良好なエネルギー分解能を示し、エネルギースペクトル上で 511keV の光電ピークがはっきりと確認された。また、4nsec 程度の高い時間分解能を有していることが判明した。

このような多チャンネル検出器列は半導体 PET の実用機開発において利用される蓋然性が非常に高い。実用機においては各チャンネルの性能の均一性や時間的安定性等が重要となるため、これらに関しても評価を行なった。各検出素子のエネルギースペクトルを比較したところ、それらの間の相違点は無く、エネルギー特性については十分な均一性を有していることが判明した。また、時間分解能に関しても、平均で 4.4nsec、最も性能に劣る素子に関しても 4.9nsec と均一性が確認され、検出器列内で 5nsec 以下の時間分解能が保証されていることがわかった。これらの確認された性能の均一性は、実用機のレベルでの装置キャリブレーションを考慮した場合、非常に有効である。以上から、検出器列は実用機用検出器として十分な性能を有していることが確認された。

一方で、CdTe 検出器に一般的に発生するとされるポーラリゼーションに伴う検出器特性の時間的変化がこの検出器列に関しても観測された。この現象はバイアスの長時間印加時に出力信号の波高が低下する現象であり、バイアスのリセットによって解消されるものである。本研究においては、この影響は出力波高低下に伴う計数率の減少と時間分解能の悪化という形で現れた。バイアス印加時から 12 時間経過後までの連続的なエネルギースペクトルの取得と時間分解能の測定を通じて、バイアス印加は短時間に留めてリセットを繰り返すといった使用条件を設けることが有効であることがわかった。

④ 高分解能 CdTe 半導体 PET のプロトタイプ機の開発と分解能向上の実証

上記の検出器列を組み込んだ小動物用高分解能 PET 装置の開発を想定し、PET 測定を通じて検出器列の使用による高空間分解能化の実証および実用機の基礎設計を行なった。1 対の検出器列を組み込んだ移動式の対向型ガントリーシステムを構築し、 ^{22}Na 点線源と ^{18}F ファントムの測定を行なっ

た。 ^{22}Na 点線源測定から得られた再構成画像と、検出器列の素子対に関して得られた応答関数の比較から、このシステムが十分に検出器列固有の分解能を引き出していることが判明し、実用機開発においても同様の展望を期待することができる。 ^{18}F ファントム測定に関しても、分解能の観点から良好な結果を得ることができ、実用機においても 1mm 以下の分解能を得ることが可能であることが確認された。

また、CdTe 検出器列を利用した高分解能装置に関して、得られる装置感度をシミュレーションにより推定した。このシミュレーションを通じて、検出器の放射線入射方向に対して実効的な奥行きを十分持たせることにより商用化されている動物用シンチレーション PET 装置を上回ることが可能であることが判明した。

本研究を通じて得られた CdTe 検出器の 511keV γ 線の検出特性、および小型化による解像力は 1mm 以下の PET 装置の実現を強く示唆するものである。また、実用機に即時適用可能な形での検出器列の作製も可能であることが明らかになった。また、その検出器列を組み込んだプロトタイプ機によって得られた画像は 1mm 以下の分解能を達成しており、このことから、1mm 以下の分解能を有する実用機開発が可能であることが明らかになった。

論文審査結果の要旨

本論文は、現在利用されているシンチレーション検出器に代わって CdTe 半導体検出器を用いることで実現の可能性がある高空間分解能 PET 装置のための基礎技術を開発したものである。

本論文は全 7 章で構成されている。

第 1 章は総論であり、背景および目的を述べている。

第 2 章では、PET の測定原理、空間分解能などの装置性能に関する事項、および PET 用検出器に関して述べている。

第 3 章では、オーミック型とショットキダイオード型の異なる電極構造を有する CdTe 検出器に関して、PET 用検出器としての性能を調査しており、良好な逆バイアス特性を有するショットキダイオード型検出器が優れた性能を持ち、PET 用検出器として利用可能であることを明らかにしている。

第 4 章では、CdTe 検出器を利用した装置で実現し得る空間分解能に関しての研究を行っている。複数の視野幅の CdTe 検出器対に関して応答関数を実測によって求め、小型半導体検出器を利用することの有用性を確認した。また、分解能に影響する各要素の関数モデルを適用することによって装置の高分解能化の可能性とその限界値を計算している。さらに、少数の検出器を組み込んだ検出システムを構築し、これを用いて実際の放射能分布を測定することで、上記で得られた高空間分解能化の可能性を実証している。

第 5 章においては、CdTe 検出器を用いた PET 装置の実用機開発に必要な検出器高密度配置法に関しての検討として、多チャンネル CdTe 検出器列の性能を調査している。CdTe 検出器列の性能はエネルギー特性、時間特性に関して、単体の検出器に匹敵する性能を保持していることを明らかにした。

第 6 章では、第 5 章で実用機への応用の有効性が確認された CdTe 検出器列を対向配置させ、半導体 PET 装置の対向型プロトタイプ機を開発し、これを用いて放射能分布の測定を行い、高分解能画像の取得に成功している。これにより、高分解能の実用機が開発が可能であることを実証した。

第 7 章において、各章の議論を元に本論文を総括している。

以上、要するに本論文は、CdTe 半導体検出器が PET に応用可能であること、その利用により装置の空間分解能を向上することが可能であること、および、高分解能の実用機開発が可能であることを示したものであり、量子エネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。