

令和元年6月12日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K09008

研究課題名(和文) 新しい半導体検出器を用いた大視野汎用型SPECTの開発に向けた基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study for development of a large field of view general-purpose SPECT using a new semiconductor detector

研究代表者

長野 宣道 (Nagano, Nobumichi)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：60757673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：新しい半導体検出器として、安価で高感度・高分解能な検出器を製作することが可能な臭化タリウム(TlBr)を用いて、心臓以外の部位の検査にも応用できる大視野汎用型SPECT装置の検出器の開発を目指して研究を行った。結晶の大きさが14 mm × 14 mm(陽極は1画素の大きさが2 mm × 2 mmの電極を4 × 4で16ピクセル配置した構造。陰極のほうは12 mm × 12 mmの平板型電極)で、厚さが3 mmの大面积TlBr検出器を製作し137Cs(662 keV)のパルス信号を計測することが出来た。以上により「大視野汎用型SPECTの開発」に向けた検出器の開発を具現化できる実績が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では核医学診断装置であるSPECTの高空間分解能化を実現するために、化合物半導体である臭化タリウム結晶を用いた新しい検出器の開発を行った。結晶育成、検出器の製作、検出器の評価および改善を行い、結晶サイズが14 mm × 14 mm × 3 mmであり、画素サイズが2 mm × 2 mmの大面积ピクセル型検出器の開発に成功した。本研究の成果は全身の検査に応用できる高性能SPECT装置の実現に繋がるものである。

研究成果の概要(英文)：A fundamental study was performed for developing large field of view general-purpose SPECT systems using a TlBr semiconductor detector. TlBr is a compound semiconductor suitable for fabricating low-cost and high-performance detectors. A large-area pixelated TlBr detector was fabricated in this study. The detector had the area of 14 mm × 14 mm on which 4 × 4 pixel electrodes (pixel size of 2 mm × 2 mm) were constructed. The thickness of the detector was 3 mm. The detector successfully detected gamma-rays from a 137Cs radiation source.

研究分野：放射線技術学

キーワード：核医学 SPECT 半導体検出器 臭化タリウム検出器 マルチピクセル検出器 高エネルギー分解能

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の核医学検査における単光子放射コンピュータ断層撮影 (Single photon emission computed tomography ; SPECT)装置の検出器の多くは、1950 年代にアンガーにより開発された間接変換方式 (シンチレータ + 光電子増倍管) を採用した装置が多い。しかし、2011 年に日本で初めて CdZnTe 半導体検出器を用いた直接変換方式の心臓専用 SPECT 装置が導入され、これにより SPECT 装置の空間分解能やエネルギー分解能は飛躍的に向上した。その結果、撮像時間の短縮や患者被ばくの低減などの利点もたらされた。半導体検出器を採用した SPECT 装置が高い評価を受け一方で、現時点では SPECT 装置に採用されている半導体は CdZnTe のみである。この半導体は大型結晶の育成が困難で高価な素子となっており、これに伴い装置自体も非常に高額なものとなっている。

心臓用 SPECT 半導体検出器の現状では既存の心臓用 SPECT に採用されている CdZnTe 半導体検出器の構造は、1 画素の大きさは 2.46 mm × 2.46 mm であり、これを縦と横に 16 × 16 マトリックス並べて、256 画素のピクセルサイズとしている。一つのモジュールの大きさとしては、40 mm × 40 mm × 5 mm となっている。このため検出できる視野も狭くなり、現時点では心臓専用の装置だけとなっている (図 1)。

この問題を解決するためにも検出効率が高く、位置・エネルギー分解能に優れ、性能的に CdZnTe 検出器をも凌ぐ検出器の開発が求められている。

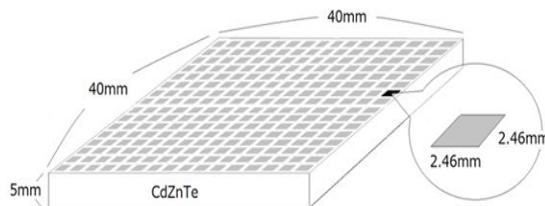


図 1 . CdZnTe 半導体検出器の構造

2. 研究の目的

本研究では、SPECT 用の新しい半導体として、CdZnTe の約 1/10 の経費で高純度・高性能な検出器を製作することが可能な臭化タリウム (TlBr) を用いて、他の部位の検査にも適用できる大視野汎用型 SPECT の開発を目指した。

ここで TlBr の物理的特性を示す。TlBr は高原子番号(81, 35)、高密度(7.56 g/cm³)を有する化合物半導体であり、医療で多用される ^{99m}Tc (140keV) のエネルギーで CdZnTe と線減弱係数を比較した場合、TlBr は CdZnTe の約三倍のガンマ線吸収効率を示す (図 2 , 表 1)。

表 1 . CdZnTe と TlBr の性能比較

	CdZnTe	TlBr
エネルギー分解能	6% @140keV	~5% @122keV
線減弱係数 [cm ⁻¹]	3.891	13.321

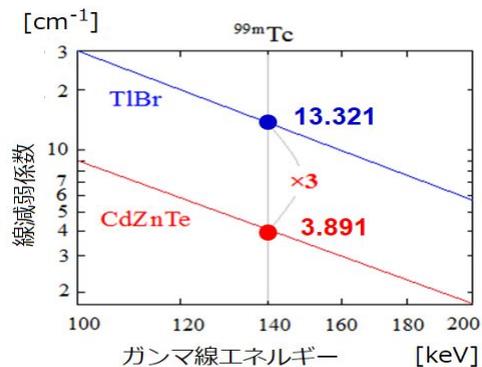


図 2 . 臭化タリウムの線減弱係数

今回はこの TlBr を使って検出器を製作し検出器の受光面を大型化することに焦点を置き、本研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究の最終的な目標は TlBr 半導体検出器の感度と分解能を向上させて、実際に臨床で使用されている SPECT 装置に搭載することである。

研究の基盤となるのは高性能な TlBr 半導体検出器を製作することであり、研究の一年目、二年目には結晶の育成方法、研磨方法、大きさ、形状、電極構造について十分な検討と議論を重ねて TlBr 検出器の高性能化を図った。また信号の読み出し系についても、この検出器に最適な信号処理方法の確立を目指した。最終年度では研究成果を実証するため、検出器からの信号読

みだし実験を重ね、大視野汎用型 SPECT 装置搭載用検出器の開発を目指した。

4. 研究成果

我々は臭化タリウム (TlBr) 半導体結晶の育成から電極製作、信号処理までを一貫して実施している。

本研究では最初に、製作した検出器からの信号の処理に用いるデジタルフィルタについて検討を行った。次に出来上がった検出器の耐性を調べるために連続負荷実験を実施した。この基礎実験の後に結晶の大型化、大面積検出器の製作を行った。

(1) デジタル信号処理方法の検討

半導体ガンマ線検出器を帯域精製法によって純化した素材から帯溶融法で成長させた TlBr 結晶から製造した。

検出器は4つの画素電極(画素サイズ: 1 mm × 1 mm)と平面陰極を有しており、全ての電極を電荷有感型前置増幅器に接続した。500 Vのバイアス電圧を陰極に印加し、陽極を接地電位に維持した。装置の陰極表面に ¹³⁷Cs ガンマ線を照射した。各前置増幅器からの出力パルス波形は、室温で 100 MS/s のサンプリングレートでデジタイザを使用して取得した(図 3)。

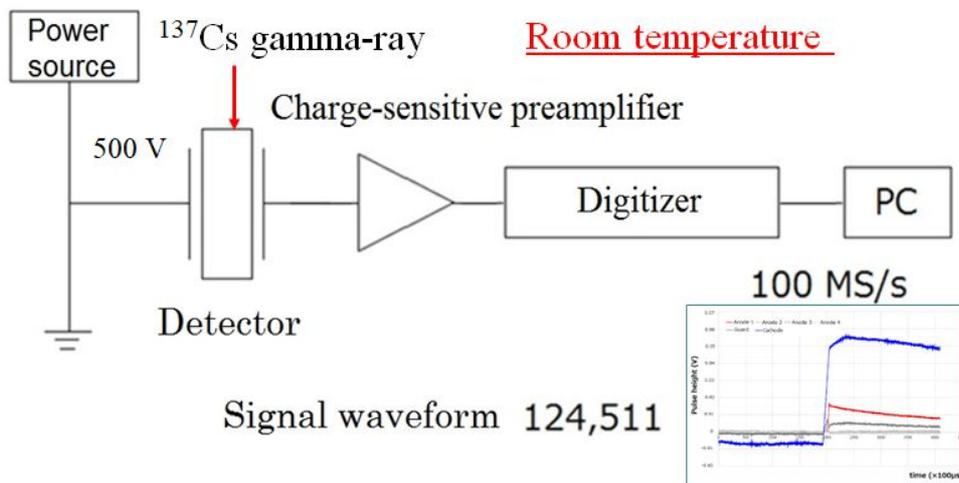


図 3. デジタル信号処理系

次に波高スペクトルを得るためにデジタル台形フィルタを波形に適合させた。台形フィルタのピーキング時間を 1 ~ 30 μs に、そしてプラトー時間を 0 ~ 6 μs に変更することにより、検出器のエネルギー分解能を評価した(図 4)。

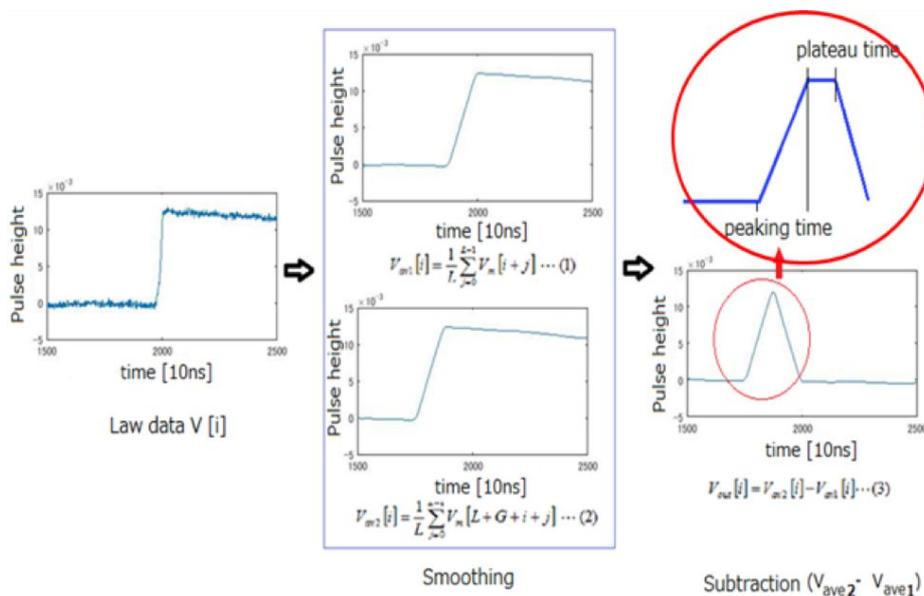


図 4. デジタル台形フィルタ

その結果、 ^{137}Cs ガンマ線についてはピーキング時間 12 μs 、プラトー時間 2 μs のときに 2.8% (半値幅) のエネルギー分解能を示した。また、 ^{57}Co では 7.8% のエネルギー分解能を示した(図 5, 6, 7)。

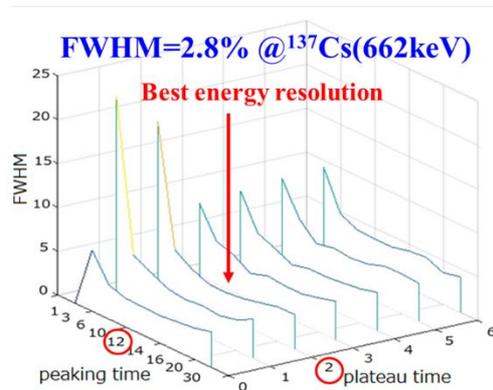


図 5. 最適ピーキング時間とプラトー時間の選択

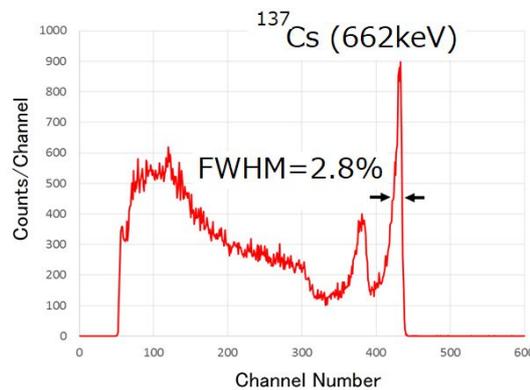


図 6. ^{137}Cs スペクトル

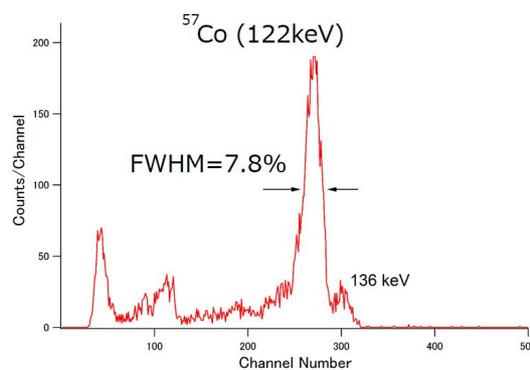


図 7. ^{57}Co スペクトル

(2) 検出器の連続使用試験 (安定性試験)

製作した TlBr 検出器 (ピクセルサイズ: $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$, 1 pixel, 陰極: 平面, 厚さ: 4 mm) の安定性を調べるために、実際の臨床現場を模擬して一日 6 回 (午前中 3 回、午後 3 回) の検査を実施すると仮定して、中一日を空けた計 8 日間の連続計測安定性試験を実施した。

室温と湿度はエアコンで調整して概ね一定として、陰極に 500 V の電圧を印加し各電極を電荷有感型前置増幅器に接続した。

陰極に ^{57}Co からのガンマ線を入射させ、その出力信号を MCA で PC に取り込み経時的な波高値スペクトルのピーク位置と半値幅の変化を観察した。

医療現場の実働機器の使用時間を模擬して耐久試験を実施し、経過時間に対応して波高値スペクトルを取得した。ピーク位置と半値幅を算出しその変化を検討した結果、本検出器の波高値スペクトルのピーク位置、半値幅 ($4.21 \pm 0.20\%$) 共に大きな変化は見られなかった (図 8)。

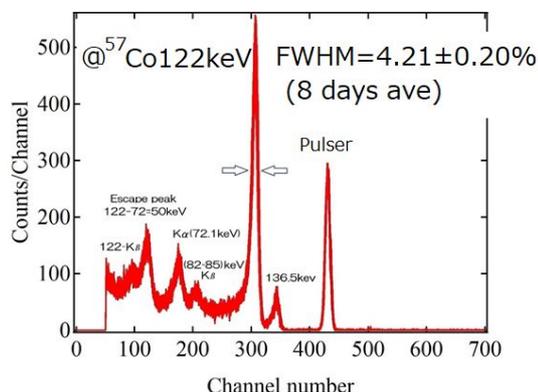


図 8.8 日間連続負荷試験でのエネルギー分解能

(3) 大面積ピクセル型の検出器の製作

帯域精製法で純化した素材の高純度部のみを取り出し、ブリッジマン法で結晶育成した。育成した結晶から大面積マルチピクセル型検出器（図 9，結晶サイズ：14 mm × 14 mm × 3 mm，陽極：4 mm²，16 pixel，陰極：平板型）を製作し、 ^{137}Cs 線源からのガンマ線を計測した結果、パルス信号を得ることが出来た。

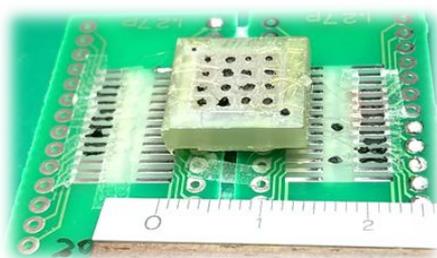


図 9. 結晶サイズ 14 mm × 14 mm × 3 mm，陽極サイズ 4 mm²，16 ピクセル検出器

この三年間の基礎的研究の結果、結晶の大きさが 14 mm × 14 mm（陽極は 1 画素の大きさが 2 mm × 2 mm の電極を 4 × 4 で 16 ピクセル配置した構造。陰極のほうは 12 mm × 12 mm の平板型電極）で、厚さが 3 mm の大面積検出器を製作し ^{137}Cs (662 keV) のパルス信号を計測することが出来た。

以上の研究結果により「大視野汎用型 SPECT の開発」に向けた検出器の開発を具現化できる実績が得られた。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 8 件)

長野宣道，人見啓太郎，河村誠治，小野寺敏幸，野上光博，伊藤辰也，金聖潤，石井慶造，SPECT 用半導体検出器の製作 = 結晶育成からの臭化タリウム検出器製作 = ，日本放射線技術学会近畿支部 第 62 回学術大会，平成 30 年 11 月，奈良春日野国際フォーラム。

長野宣道，人見啓太郎，河村誠治，小野寺敏幸，野上光博，伊藤辰也，金聖潤，石井慶造，臭化タリウム (TlBr) を用いた新しい SPECT 用検出器の開発 = 大面積ピクセル型の検出器の製作 = ，日本放射線技術学会秋季学術大会 第 46 回秋季学術大会，平成 30 年 10 月，仙台国際センター。

Nobumichi Nagano, Keitaro Hitomi, Seiji Kawamura, Toshiyuki Onodera, Tatsuya Ito, Seong-Yun Kim, Keizo Ishii. The Development of New Semiconductor Detectors Using Thallium Bromide for Single-Photon Emission Computed Tomography - Performance evaluation of a cylindrical large crystal of 1 inch in diameter - ，日本放射線技術学会第 74 回総合学術大会，平成 30 年 4 月，パシフィコ横浜。

N. Nagano, K. Hitomi, T. Onodera, M. Nogami, S. - Y. Kim, T. Ito, K. Ishii, Feasibility Study of Using Thallium Bromide Detectors for Single Photon Emission Computed Tomography, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference 24th Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop, 2017, 10, Georgia, Atlanta USA .

長野宣道，人見啓太郎，河村誠治，小野寺敏幸，野上光博，伊藤辰也，金聖潤，石井慶造，

SPECT 用半導体検出器 -大型結晶の育成-, 日本放射線技術学会秋季学術大会 第 45 回秋季学術大会, 平成 29 年 10 月, 広島国際会議場.

Nagano Nobumichi, Hitomi Keitaro, Kawamura Seiji, Onodera Toshiyuki, Ito Tatsuya, Kim Seong-Yun, Ishii Keizo, The Development of New Semiconductor Detectors Using Thallium Bromide for Single-Photon Emission Computed Tomography: Performance Evaluation of the Multi-Pixel Detector, 日本放射線技術学会 第 73 回総合学術大会, 平成 29 年 4 月, パシフィコ横浜.

長野宣道, 人見啓太郎, 河村誠治, 小野寺敏幸, 伊藤辰也, 金聖潤, 石井慶造, Stability evaluation of a new semiconductor detector for single photon emission computed tomography, 日本放射線技術学会 第 44 回秋季学術大会. 平成 28 年 10 月, ソニックシティ (さいたま市).

Nobumichi Nagano, Keitaro Hitomi, Toshiyuki Onodera, Tatsuya Ito, Seong-Yun Kim, Keizo Ishii, Development of Digital Signal Processing Methods for New Semiconductor Detectors for Single-photon Emission Computed Tomography, 日本放射線技術学会 第 72 回総合学術大会, 平成 28 年 4 月, パシフィコ横浜.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 河村 誠治

ローマ字氏名: Kawamura Seiji

所属研究機関名: 純真学園大学

部局名: 保健医療学部放射線技術科学科

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 00617350

研究分担者氏名: 人見 啓太郎

ローマ字氏名: Hitomi Keitaro

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 60382660

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、研究者個人に帰属されます。