

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22987

研究課題名（和文）超高時間分解能タイムオブフライトPET検出器のための光検出法の研究

研究課題名（英文）Study of photon detection for time-of-flight PET

研究代表者

錦戸 文彦（Nishikido, Fumihiko）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子医科学研究所 先進核医学基盤研究部・主任研究員

研究者番号：60367117

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：近年のPET装置開発では高時間分解能を要求するタイムオブフライト型PETの開発が主流である。そこで本研究ではPET検出器で一般的に用いられるシンチレーション検出器を超える性能を持つ検出器の実現を目指し、半導体（臭化タリウム）をベースとしたPET検出器の時間分解能の改善のための研究を行った。実験ではチェレンコフ発光を利用することにより今までの半導体PET検出器では困難であった数百ピコ秒の時間分解能を達成することに成功した。またチェレンコフ光の集光量を増加させることにより更に高い時間分解能が得られることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年でタイムオブフライト型PET装置用検出器に必要な性能、特に時間分解能について焦点を当てて研究を行った。本研究では今までの半導体検出器の手法では達成困難であった1ナノ秒以下の時間分解能を実現することに成功した。今回得られた時間分解能と半導体検出器が持つ高いエネルギー分解能を利用したPET検出器の開発を行うことで、現存する装置と比較して高画質な画像が得られることが期待できる。実験の結果から更なる高時間分解能化の可能性も示されており、研究を進めることにより現在主流のシンチレーション検出器を超えるPET検出器の実現が期待される。

研究成果の概要（英文）：Recently, mainstream of PET scanner development is time-of-flight PET which requires high coincidence timing resolution. In this study, we investigated the improvement of the timing resolution of a semiconductor (thallium bromide)-based PET detector in order to realize performance PET detectors beyond the scintillation detectors typically used in PET detectors. In our experiments, we succeeded to obtain timing resolutions of several hundred picoseconds by using Cherenkov emission. In addition, the experimental result indicate that higher timing resolution could be achieved by increasing detected photons of Cherenkov radiation.

研究分野：放射線計測

キーワード：PET検出器 タイムオブフライトPET 半導体検出器 時間分解能

### 1. 研究開始当初の背景

Positron emission tomography (PET) は医学・生物学用のイメージング装置の一つであり、測定対象に陽電子核種 ( $^{18}\text{F}$  や  $^{11}\text{C}$  等) で標識された薬剤を測定対象に注入し、その分布を測定することで機能画像を得る手法である。PET 装置自体は既に商用機も存在し、がん診断・脳機能研究・マウスやラット等を用いた基礎研究など、広い分野で用いられている。PET の画質を向上させるための手法の一つ

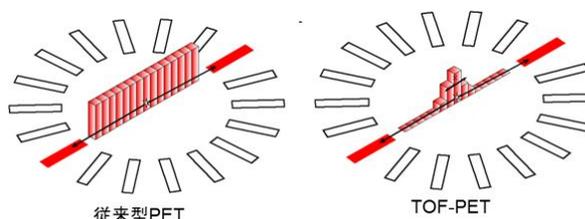


図1 TOF-PET の原理

に多タイムオブフライト PET (TOF-PET) がある。通常の PET では陽電子放出核から放出される陽電子の対消滅により発生する一対の消滅放射線を、放射線検出器を用いて計測する。一対の消滅放射線は約 180 度方向に発生するため、検出した検出器ペアで結ばれる線 (LOR) 上にガンマ線源を特定でき、多数の消滅放射線対を収集することで画像化が可能となる。しかしながら実際に陽電子放出核が存在する場所以外は偽情報であり、画像の雑音となる (図 1 左)。TOF-PET では、1 対の消滅放射線の検出時間差を計測することで LOR 上の一部 (検出器の時間分解能で決まる) に限定することが可能となり (図 1 右) 実質的な感度が向上することが知られている。そのため検出器の時間分解能を向上させることがより高い画質を得るために不可欠であるといえる。消滅放射線は光速であるため、患者内に位置を限定するためには最低でも数百ピコ秒の時間分解能が必要となる。

研究開始当初から現在までも PET 用検出器にはシンチレータと呼ばれる発光物質を使用したシンチレーション検出器と呼ばれる検出器を使用することが一般的であるが、そのメカニズムからエネルギー分解能に限界があると考えられる。そこで高いエネルギー分解能を目的として半導体検出器 (テルル化カドミウム、カドミウム亜鉛テルル化物、臭化タリウム等) を利用した検出器の研究も進められてきた。しかしながら高いエネルギー分解能が得られる一方で、半導体検出器は電場を掛けることで電子正孔対を移動させ信号を取り出すためシンチレーション検出器と比較して時間特性が悪く、1 ナノ秒以下の時間分解能を得ることは非常に難しいとされていた。そのため PET 検出器として利用されることはほとんど無かった。

### 2. 研究の目的

本研究では高エネルギー分解能・高時間分解能を両立する次世代の PET 検出器の開発を目指して、半導体検出器を用いた TOF-PET 検出器の高時間分解能化の研究を行う。一般的な半導体検出器の時間分解能である数ナノ秒から数十ナノ秒をはるかに超えた数百ピコ秒以下の時間分解能の実現を目指す。シンチレータと同等かそれ以上の時間分解能が得られれば、高いエネルギー分解能を生かした高性能な PET 検出器の実現が可能となる。

### 3. 研究の方法

(1) 高い時間分解能を得るためにはシンチレーション光を検出することが一般的であるが、シンチレーション過程の時間応答の改善が限界にきていることや、半導体検出器の様なエネルギー測定に電離電子を用いる検出器では信号を二分することになるためにその分性能が劣化してしまう。そのような状況を克服するために、最近ではシンチレーション過程よりもより速いチェレンコフ光を持ち出すことで時間分解能を改善しようという試みがなされている (文献 )。本研究でもチェレンコフ光を検出し時間情報のトリガとして利用することで高時間分解能を狙う。

(2) 本研究では半導体放射線検出器として臭化タリウムを用いた。臭化タリウムは高い原子番号を持つ物質で構成され、加えて  $7.56 \text{ g/cm}^3$  の高密度の半導体材料である。そのため PET 検出器で測定する  $511 \text{ keV}$  の消滅放射線に対しても十分な感度を持つ。加えて半導体検出器として動作させ電子正孔対を収集することにより高いエネルギー分解能を得ることが可能である。また、出力信号の波形解析を行うことで結晶内でのコンプトン散乱イベントの解析が可能であるなどシンチレーション検出器よりも優れた性能が得られることが期待できる。臭化タリウムが持つ最も重要な特性は放射線が入射した際にチェレンコフ光を放出することであり、臭化タリウム結晶を透明化することでチェレンコフ光を結晶内から取り出し光センサで測定することで高時間分解能を狙う。共同研究者の東北大グループは臭化タリウム開発では世界の最先端であり、本研究の結晶作製も当該グループが行う。

(3) 具体的な実験は下記の通りである (図 2)。実験で使用した臭化タリウム結晶はサイズが  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 3\text{mm}$  で、5 つの結晶面を ESR 膜とテフロンテープで覆い、光子検出面は覆わないようにした。チェレンコフ光は高速な半導体光センサの 1 つであるマルチピクセルフォトンカウンター

(MPPC, 浜松 S13360-3075CS) を用いて検出した。リファレンス検出器としてシンチレータの中で高い時間分解能を持つ LYSO シンチレータと MPPC (Hamamatsu, S13360-3050CS) を結合したものをを用いた。測定は  $^{22}\text{Na}$  校正用線源を用いて行い、511keV の 2 本の消滅放射線の同時計数計測を実施した。検出器からの信号は高周波増幅器(HF-amp)(文献 )で増幅した後、デジタイザ(CAEN, DT5742)で波形を記録した。トリガ信号は臭化タリウム検出器と LYSO 検出器の 2 つの同時計数信号(Coincidence)から生成した。データ収集終了後、ソフトウェアを用いて波形解析を行うことで時間分解能を算出した。

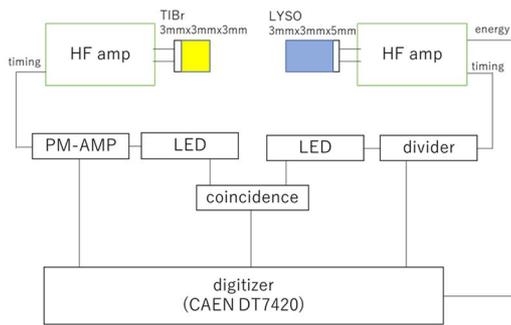


図2 実験セットアップ

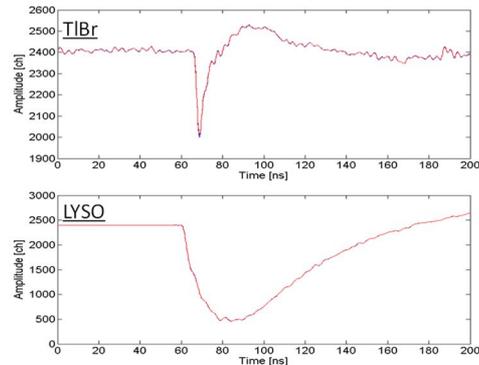


図3 各検出器からの出力信号の波形

#### 4. 研究成果

(1) 図3にデジタイザで記録された臭化タリウムと LYSO 検出器からの出力信号の波形を示す。図3上図のようにチェレンコフ光は非常に微弱な信号であるため臭化タリウム検出器では数光電子程度しか観測できていないが、立ち上がりが非常に鋭い出力信号が得られていることがわかる。この信号はリファレンス検出器との同時計数イベントとして得られた信号であるため、間違いなく臭化タリウムからの発光による信号が観測できていると言える。これらの波形にフィルタをかけノイズを減らした後、両検出器に消滅放射線が到達した時間(トリガタイミング)を決めるための処理を行った。また波形を積分することによりエネルギー情報を取得した。

(2) 図4に臭化タリウム検出器を用いて得られた光電子スペクトルの例を示す。スペクトルのピークは検出された光電子の数を示している。最も低いピークでは1個の光電子が検出され、全体で6本の光電子ピークが観測された。出力信号のダイナミックレンジの関係により7個以上の光電子イベントからの信号は飽和してしまっており、最右のピークには7個以上の光電子が得られた場合のイベントも含まれている。チェレンコフ光は発光量が非常に低いため、通常のガンマ線のエネルギースペクトルとは異なり、このようなスペクトルになる。現段階では最大で約7光電子までしか得られていないが、集光法の改良などを進めることにより更に収集光電子数を増やすことが可能であると考えられる。下記の解析では、このスペクトルから臭化タリウム検出器の閾値レベルを決定した。

(3) 図5は閾値レベルと時間分解能の関係を示す。閾値レベルが0.5光電子の場合は600ピコ秒弱程度の時間分解能が得られている。この時間分解能は一般的な半導体検出器の時間分解能と比較すると一桁以上改善されているが TOF-PET 用検出器の時間分解能としては十分とは言えない。一方で閾値レベル高くしていくと時間分解能が改善されていき最終的に400ピコ秒以下の十分な時間分解能が達成されている。これらの関係から更に高い閾値レベルを実現することに成功すれば更に良い時間分解能が得られることが示唆されている。

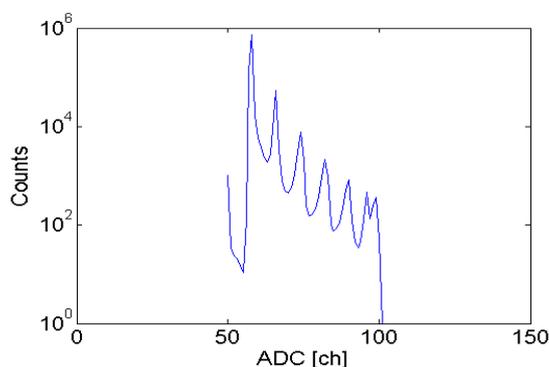


図4 光電子スペクトル

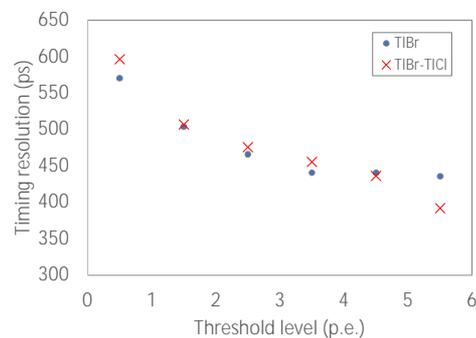


図5 時間分解能と閾値関係

(5) 本研究では今までの半導体検出器では達成困難であった時間分解能を実現することに成功

した。今回得られた時間分解能は TOF-PET を実現するために十分であるが、チェレンコフ光の検出効率を高めることによる更なる高時間分解能化の可能性も示されている。今後も更なる性能改善に向けて検出方法の最適化を進めていく予定である。

(6) この時間分解能と半導体検出器が持つ高いエネルギー分解能を利用して PET 検出器の開発を進めていけば、現存する装置と比較して更に高画質な画像が得られることが期待できる。今後は時間分解能の改善だけでなく、半導体検出器としてのエネルギー・位置情報測定と今回得られたチェレンコフ光測定を組み合わせた PET 検出器の実現を目指した開発を行っていく予定である。

#### <引用文献>

G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, Vol. A247, pp. 529-551, April 1955.

S. Korpar, R. Dolenc, P. Križan, R. Pestotnik, A. Stanovnik, "Study of TOF PET using Cherenkov light," *Vol. 654(1)*, 2011, pp. 532-538 Oct. 2011.

S. Gundacker, S. M Turtos, E. Auffray, M. Paganoni, and P. Lecoq, "High-frequency SiPM readout advances measured coincidence time resolution limits in TOF-PET," *Phys. Med. Biol.*, Vol. 64, 055012, Feb. 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>1.Fumihiko Nishikido, Eiji Takada, Masakazu Yamazaki, Yuji Okada, Sodai Takyu, Han Gyu Kan, Taiga Yamaya |
| 2. 発表標題<br>Organic radiation detector of 4HCB crystal for carbon beam irradiation                                   |
| 3. 学会等名<br>2020 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (国際学会)                                  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                 | 備考 |
|-------|--|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 人見 啓太郎<br><br>(Hitomi Keitaro)<br><br>(60382660) | 東北大学・工学研究科・准教授<br><br><br><br>(11301) |    |

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 |
|---------|---------|