

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23602007

研究課題名(和文)次世代ペットの開発

研究課題名(英文)Development of next generation PET system

研究代表者

竹下 徹 (TAKESHITA, Tohru)

信州大学・理学部・教授

研究者番号：70154995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：次世代PET装置に要求されると考えられる、2つの性能(時間分解能と位置分解能)を究める研究を行った。その結果LFSという新規の重いシンチレータと半導体光センサーMPPCを用いる事によりふさわしい結果を得る事が出来る事を示した。

LFSシンチレータはガンマー線を受けて電子を発生する効率が高く、電子の出すシンチレーション光の時間構造が素早いことを見いだした。またこの性能を時間分解能に転化するために光半導体MPPCが最適であることも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have shown suitable results would be given by using LFS scintillators and MPPC photo-sensors. Those results are expected to have with the next generation PET system.

LFS has a high efficiency to convert the gamma rays to the electrons and high light yield of scintillation which has short time pulse to achieve good time resolution. The MPPC sensor has also good time resolution to generate short and rapid output signals. Therefore a combination of above two will make a good unit for the next generation PET system.

研究分野：時限

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：PET ガンマー線測定

1. 研究開始当初の背景

当時、次世代の PET 装置の要素として、時間分解能が高く、位置分解能に優れた素子の提案が求められていた。位置分解能は素子自体のガンマーを受ける断面を小さくする事により達成可能であるが、奥行き方向の分割 (DOI と呼ぶ) により装置全体位置分解能の一様性を高めることの強化も課題の一つであった。

時間分解能は、当時稼働中の PET 装置では 5~6 ns であり、開発として目指す値は 1 ns であった。

また位置分解能は、当時稼働中の PET 装置では 5~6 mm であり、開発として目指す値は 1 mm であった。

DOI に関するアイデアは存在したが、最適化された値は知られていなかった。

これらの解決には、当時の PET 装置が光電子増倍管と呼ばれる大型の光センサーと大型のシンチレータからその要素が構成されていた事を考えると、革新的に異なる要素そのものとアプローチが必要とされていた。

2. 研究の目的

当初の背景から、次世代 PET 装置のための要素として、当時使用されていた光電子増倍管方式の採用はありえないため、新型の光半導体素子を用いて、高速な立ち上がりをもつシンチレータ物質を見つけて両者の組み合わせで必要な要素技術を次世代 PET 装置のために提供できるかどうかを探る事が本研究の目的であった。

光半導体としては最近我々と企業が開発した新型の光半導体素子を用いること。また重いシンチレータとしては、最近我々が見いだした製品 LFS (Lutetium Fine Silicate) を用いることによりどこまで時間性能の向上を達成できるかを実験により検証し、位置分解能の向上と相まって次世代 PET としての基本性能を実証することが第一である。次

にこの要素を用いて DOI 技術の実験検証を行い、次世代 PET 装置の提案を行う。

3. 研究の方法

研究は3つの過程を通して行った。

(1) シミュレーションによる理解：ここでは位置分解能 1 mm を達成する重いシンチレータのサイズを決定した。長さ 15mm は十分なガンマー線の収集率を仮定した。またシミュレーションにより実施すべき実験の方法が明らかになった。

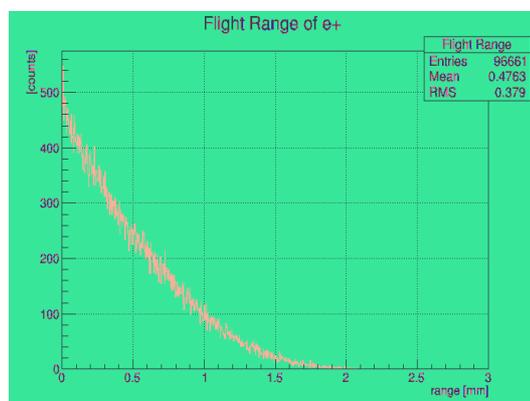
(2) 新型光半導体素子 (MPPC) と重いシンチレータ LFS の持つ時間性能と位置分解能を実証する実験を行った。さらにこの過程で発見された問題を解決する方法を編み出し、その実証実験も行った。

(3) 積層化して DOI を実現するための素子の製作と基本性能試験を行った。これにより DOI の必然性が認められた。

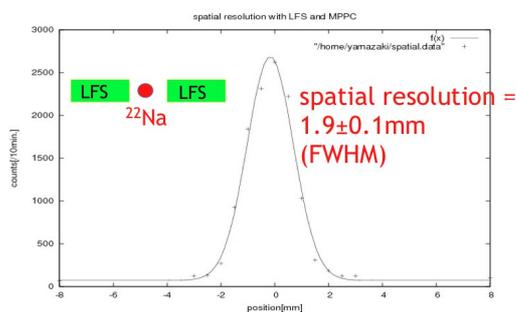
4. 研究成果

研究の方法 (1) (2) (3) に従って成果を述べる。

(1) シミュレーションを初めてまず問題となったことは、陽電子放出点と対消滅点の距離である。その分布を次の図に示す。

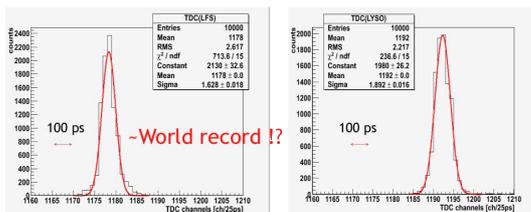


横軸は陽電子の水中での発生点と対消滅点の距離 (mm) であり、縦軸はその頻度である。これから分かるように PET装置では原理的に 1 mm 以下の位置分解能は達成できない。従って目標値は 1 mm となる。位置分解能の指標は、固定した一つの MPPC に対して陽電子発生源を移動させて見積もられた。その結果、シンチレータサイズが 3 mm の時、標準偏差で 1.9mm だと予言される。これはつぎで述べる実験の結果と全く一致した。



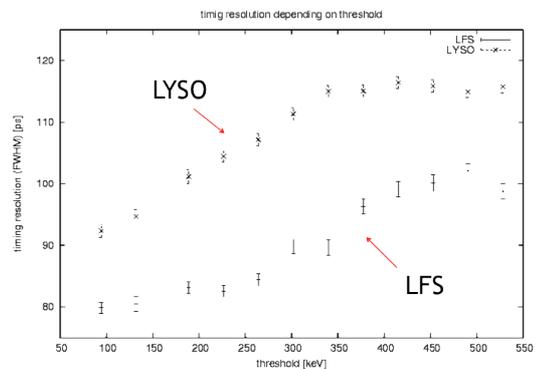
上図は (2) の位置分解能性能検証実験の結果であり、位置分解能が 1.9mm(FWHM) で有る事を示す。これはシミュレーションの予言と一致している。

(2) 時間分解の性能の実証： LSF はその速いシンチレーション光の減衰 (36ns) で高い時間分解能を有すると期待される。光センサーは今までの経験でずっと短い時間で反応する事が知られており、両者の組み合わせは高い時間分解能を有する可能性を秘めていた。実験はナトリウム 22 というベータ+線源からの陽電子が線源近くで電子と対消滅してでる 2つの反対方向の 0.511MeV ガンマー線を同時計測し、その到着時間分布から測定された。結果を次の図に示す。



左は LFS に対する結果であり、FWHM で 0.1n 秒の時間分解能を有していることを

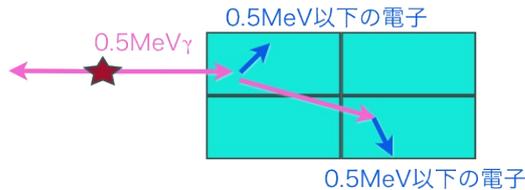
示す。右は最近用いられる LYSO という重いシンチレータであるが、時間分解能は LFS に比べて劣る事がわかる。これにより我々の提唱する、光半導体 MPPC と LFS の組み合わせが次世代の PET装置の要求を十分にクリアする事を示した。これを論文 2 に公表した。しかしながらあまりに時間性能がすばらしかったため、多くの追試実験を行った (論文 1)。例えばデジタル信号を得るためのアナログ信号のしきい値依存性は次の図に示すように、デジタル化する機器 (Leading edge discriminator) との組み合わせが重要である事を示した。



上図では横軸に、しきい値相当エネルギー値 (keV)、縦軸に時間分解能を示す。リーディングエッジディスクリ装置のために信号が小さいもののほうが時間のふらつきが小さい事により理解できる事を示すまた多種の光半導体センサーについてもテストを行い正しいチューニングを行えばほとんどの MPPC も時間分解能 0.1ns の性能を得る事が出来る事を示した。

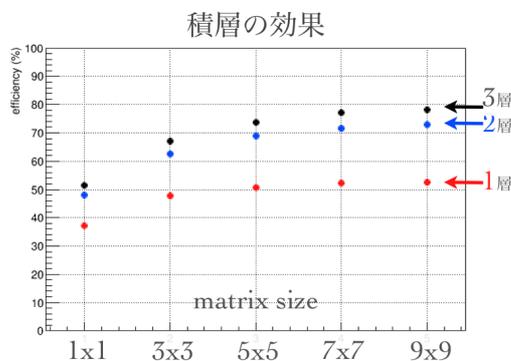
(3) DOI性能の検証：位置分解能を追求する過程で 3mmx3mm のシンチレータを用いる事により位置分解の 2 mm 程度を実現できる事を示したが、この事は一方でコンプトン効果のために事象を失う可能性がある事が判明した。そこでコンプトン効果を取り入れる次世代 PETすなわちコンプトン PETを提案し、高いガ

ンマー線の利用率を実現するシミュレーションと実証実験を行った。現行の PET装置では光電効果のみを起こしたガンマー線をデータとして使用する。ほぼ半分のガンマー線はコンプトン効果を起こす。コンプトン効果を起こして次の層にとんだ低エネルギーのガンマー線を拾い上げる事の出来る PETがコンプトン PETである。次に概念図を示す。



上図：第1層目でコンプトン散乱を起こした場合、第二層目で拾い上げる場合を示している。

シミュレーションにより一層目の周りにどれだけのシンチレータを監視すれば良いかを 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 の場合について計算した。その結果が次の図である。

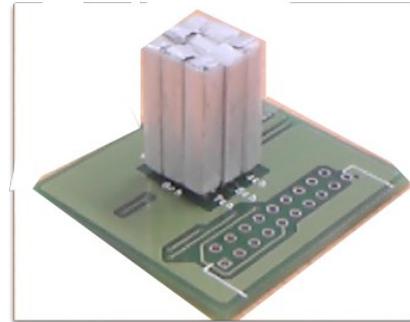


上図は横軸にコンプトン散乱を起こしたシンチレータの周りのシンチレータの広さ、縦軸にガンマー線使用率を示した。

その結果 5x5 のタワー内で信号を探れば2層の場合で 70%の効率に出来る事がわかる。これは 1x1 のコンプトン効果を考えない通常の場合に比べて約2倍になっている。さらにこの事は反対側のガンマー線でも同じ事が起きるため、実質3倍の高性能を有することを示す。

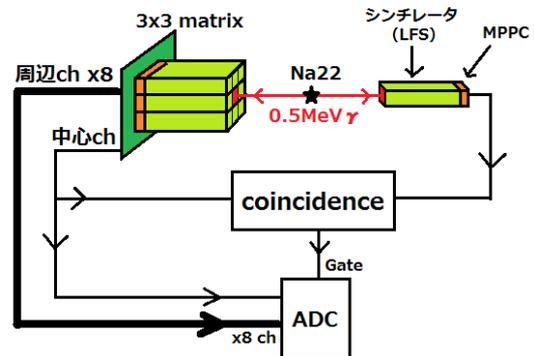
これを実証するために次のような装置を組

み立てた。



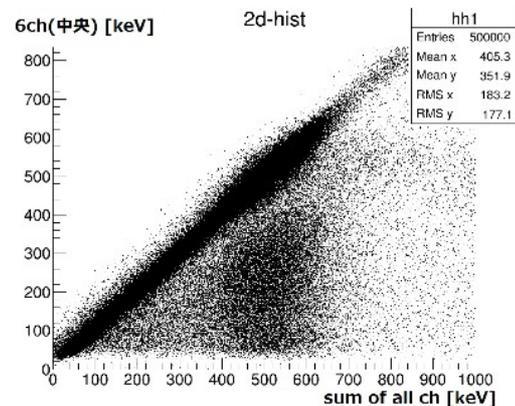
上の写真は 3x3 のシンチレータと MPPC の組である。これを上下2層につなげて DOIを実証できる。

まず第1層内での効果を検証した。その実験のための装置概念図を示す。



ガンマー線源の右に1個のシンチレータと MPPCの組に信号が入ると左の 3x3 の真ん中にもガンマー線が入る。このとき、他のシンチレータの信号も全て収集する。

その結果は次の図である。



上図の横軸はすべてのチャンネルの測定エ

エネルギーの和で keV 単位に換算してあり、縦軸は 3x3 の真ん中のシンチレータの測定したエネルギー (keV) である。

横軸 511keV 付近で、縦軸も 511keV 付近は、中央シンチレータで光電効果 1 回でガンマー線が吸収されているが、中央エネルギーが 400keV より低い集団はコンプトン事象で周囲にガンマー線が逃げてこれを周囲のシンチレーターが拾えば元のエネルギーである 511keV になる事を示している。その事象数の増加は 23 % でありコンプトン PET の有用性が示された。シミュレーションによる増加数の予言は 28% で、おおむね一致している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Analysis of MPPCs with LFS and its application for PET system, M.Yamazaki, T.Takeshita, Y.Hasegawa, Journal of Instrumentation, 8 (2013) 1018-2024. 査読あり
2. Next-generation PET capability with Lutetium Fine Silicate and Multi-Pixel Photon Counter, M.Yamazaki, T.Takeshita, Y.Hasegawa, Journal of Instrumentation, 7 (2012) 10014-10020. 査読あり

[学会発表] (計 5 件)

1. Comparison of Timing Properties of MPPCs for TOF-PET Application. M.Yamazaki, T.Takeshita, Y.Hasegawa, IEEE-NSS 2013 at California/USA, 30Oct2012.

2. STUDY OF TOF PET SYSTEM WITH LFS AND MPPC, M.Yamazaki, T.Takeshita, Y.Hasegawa, IEEE-NSS 2011 at VaLENCIA, 24Oct2011.P
3. Study of time flight capability with Lutetium Fine silicate and Multi-pixel photon counter, M.Yamazaki, T.Takeshita, Y.Hasegawa, CISP-BMI 2011 at Shanghai, 16Oct2011.
4. Progress of TOF capability with LFS and MPPC, M.Yamazaki, T.Takeshita, Y.Hasegawa, JKMP-AOCMP at Fukuoka, 30Sep2011 at Kyushu university.
5. 次世代 PET における時間分解能向上、山崎真、竹下徹、長谷川庸司、日本物理学会, 2011 年 9 月 17 日、弘前大学

[その他]

ホームページ等

<http://atlas.shinshu-u.ac.jp/pet.html>

これらの研究成果は、高エネルギー物理学の経験と英知を放射線医療分野に応用したものであり、それを信州大学見本市に出展した。このコーナーは NHK テレビの地方ニュースで取り上げられた。2014 年 3 月 4 日 「信州 845」

6. 研究組織

(1) 研究代表者:

竹下 徹 (TAKESHITA, Tohru)

信州大学・理学部・教授

研究者番号: 70154995

(2) 研究分担者: 該当なし

(3) 連携研究者: 該当なし