



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	波高積分電荷比を用いた3次元シンチレータ発光位置弁別システムの開発〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	宮田, 賢人
Description	配架番号 :
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医理工学)
Dissertation Number	甲第15656号
Issue Date	2023-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90966
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Miyata_Kento_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医理工学） 氏 名 宮田 賢人

学 位 論 文 題 名

波高積分電荷比を用いた 3 次元シンチレータ発光位置弁別システムの開発

(Development of a data acquisition system for 3-dimensional position detection of scintillation
using a Peak-to-Charge discrimination method)

【背景と目的】小動物用 PET 装置はマウスやラットなどの実験用小動物における様々な生物学的プロセスを可視化することが可能であり、多様な研究に用いられている。小動物用 PET 装置には小動物の微細な解剖学的構造を描出するための高い空間分解能が要求される。PET 装置の空間分解能を向上させる方法のひとつに、検出器リング径を小さくすることで消滅ガンマ線の非共線性による影響を低減するという方法がある。しかし、リング径を小さくするほど特に FOV 辺縁部で、視差誤差と呼ばれる検出器サイズによる LOR の誤差が生じ、再構成画像の画質が低下してしまうという問題がある。この視差誤差を低減して画質の低下を抑制するために、検出器のシンチレータと消滅ガンマ線が相互作用を起こした位置の深さ情報である DOI 情報を得ることが可能な、DOI 検出器が用いられる。DOI 情報を得る手法は多数あるが、そのひとつに異なる発光減衰時間を持つシンチレータを積層し、出力波形に対して波形弁別を行うことで発光したシンチレータを同定する波形弁別法と呼ばれる手法がある。この手法は計測器に特別なハードウェアを追加する必要無しに DOI 情報を得ることが可能で、費用対効果比が高く、拡張可能性も高いという利点がある。PET 装置の検出器として用いられることの多い GSO:Ce シンチレータは発光減衰時間が Ce の添加濃度に依存することが知られており、Ce 添加濃度の異なる GSO:Ce シンチレータを 4 層積層した Phoswich 検出器の出力波形に対して当研究室で開発された波形弁別法の一つである PQD 法を用いて波形弁別法を行った先行研究では、高精度な DOI 情報の取得に成功している。しかし、先行研究は PQD 法による DOI 検出器の実現可能性の検討が主目的であったため、使用された光電子増倍管は位置検出能を持たず、データ収集には汎用のオシロスコープが用いられていた。これらは DOI 検出器に特化した構成ではなく、PET 装置やその他の計測システムに DAQ として実装することは困難である。そこで本研究では、PQD 法を用いた DOI 検出器専用の計測システムを構築し、その性能を評価することを目的とした。

【材料と方法】本研究で使用した検出器は 4 層の GSO:Ce シンチレータによる Phoswich 検出器であり、シンチレータはそれぞれ公称 Ce 濃度が 0.5 mol% と 1.5 mol% のインゴットの上部と下部から得られた。また、光電子増倍管は SiPM に比べてノイズ特性に優れていることから PQD に適していると考えられるため、本研究では光検出素子に位置検出能有する光電子増倍管である、PS-PMT を使用した。PS-PMT からの出力信号は、発光したシンチレータの光電面上の位置を推定するために抵抗チェーンを用いたアンダー型回路を通り X⁺、X⁻、Y⁺、Y⁻ の 4 つの信号に分流される。それぞれの信号は A/D 変換のために負荷抵抗を用いて

電流・電圧変換され、後段のデータ収集基板に入力される。データ収集基板には Cosmo-Z を使用した。Cosmo-Z には FPGA と CPU を 1 チップ内に同居させたものである Xilinx Zynq-7000 SoC と、それに接続された 8ch 12-bit の Flash ADC が搭載されており、Zynq-7000 SoC の動作を書き換えることによって PQD を用いた DOI 検出器に特化した in-house の DAQ を設計した。また、PS-PMT から出力される波形に含まれる高周波ノイズ成分が PQD の性能を低下させる要因になるため、DAQ には FIR フィルタによるカットオフ周波数 35 MHz のローパス・フィルタを実装してノイズの低減を図った。Back-end PC はソケット通信によって DAQ から計測データを受け取り、GUI ソフトウェアによってデータの後処理や可視化などが行われる。4 層 GSO:Ce シンチレータによる Phoswich 検出器を in-house の DAQ に接続し、123.9 MBq の ^{137}Cs 線源をコリメートせずに 4 層全て同時に照射する非コリメート照射と、線源をコリメートして 1 層ずつ照射するコリメート照射の 2 つの照射方法で、PQD 法による DOI 弁別能やエネルギー分解能の評価、比較を行った。

【結果】収集した flood histogram より、コリメート照射では狙った層が正確に照射されていることが分かった。コリメート照射においてわずかにリークイベントが観測されたが、これはクロストークによるものではなく、コリメータの直径と実験体系のセットアップに起因するものであると考えられる。また、コリメートの有無による検出器性能に差は認められなかった。エネルギー分解能、DOI 弁別能はすべて先行研究と同等で DOI 検出器としての性能を十分に満たしていた。シンチレータ層の位置に応じて PS-PMT に到達する光量に差があるためにシンチレータ層ごとの 662keV 全吸収ピーク位置が異なることを利用し、積算電荷量と V_p/Q 値の両方を用いた二次元 PQD 法による DOI 弁別を行ったところ、DOI 弁別能が大きく向上した。

【考察】二次元 PQD 法において、検出器に使用するシンチレータの減衰定数とシンチレータの積層位置、光学グリスの材質などを最適化することで、DOI 弁別能を向上させることができる可能性がある。また、PQD 法は波形弁別法の一つであり、PQD 法を Light sharing 法や Laser engraving 法と組み合わせることでシンチレータの層数をより増やした Phoswich 検出器でも DOI 弁別が可能になると考えられる。本研究で開発した DAQ で処理可能な最大のイベントレートは約 3,000 events/sec であった。より処理速度を向上させるためには、可視化のための後処理の省略、通信のハードコード、PQD 法の完全な FPGA 実装、イベントパケットの圧縮、Back-end PC の性能向上などが有効であると考えられる。本研究では、積層シンチレータ一組だけを用いて計測を行い、PET 装置で通常用いられるシンチレータアレイでは計測を行っていない。シンチレータアレイではクロストークによって PQD 法による DOI 弁別能やエネルギー分解能などの検出器性能が低下する可能性もあるため、今後アレイを用いた計測を行い、その影響を検討する必要があると考えられる。また、将来的に PS-PMT の出力波形を Cosmo-Z の入力電圧範囲ぎりぎりまで増幅する、低ノイズかつ高帯域のトランス・インピーダンス・アンプを設計することで、PQD 法による DOI 弁別能を向上させることができる可能性がある。さらに、位置推定用のアンガー型回路の抵抗チェーンの最適化なども、性能向上に寄与する可能性がある。

【結論】PS-PMT を用いた PQD 法による DOI 検出器を開発した。この検出器は DOI 検出器として十分な性能を持ち、将来的に DOI-PET に実装可能であると考えられる。また、二次

元 PQD 法によってより多層のシンチレータ弁別が可能であると考えられる。