

# 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (医 学) 氏名 小川原 亮

## 学位論文題名

新しいパルス波形解析を利用した多層シンチレータ弁別による高分解能 PET 装置の検討  
(Feasibility study on high performance PET device using multi-layer scintillation detector with novel pulse shape discrimination method)

### 第1章 LaBr<sub>3</sub>:Ce シンチレータを用いた新しい信号パルス波形解析によるアルファ線自己放射能の除去

【背景と目的】LaBr<sub>3</sub>:Ce シンチレータは高い性能を持っているが、結晶内に含有された放射性核種による自己放射能バックグラウンドが存在する。先行研究ではLaBr<sub>3</sub>:Ceの $\alpha$ 崩壊自己放射能における信号パルス波形は、 $\gamma$ 線の信号パルス波形と比べピーク付近に僅かな差があると報告されている。本研究では信号パルス波形から $\alpha$ 線と $\gamma$ 線を弁別する方法の研究開発を行った。

【研究方法】本研究では信号パルス波形のピーク値 $V_p$ と全積分電荷 $Q$ の比 $V_p/Q$ 値を用いることで、アルファ線とガンマ線を弁別する peak-to-charge discrimination (PQD) 法を開発した。アルファ線とガンマ線を高精度で弁別するため理論的に閾値を決定し、PQD 法による弁別精度を検証した。また<sup>68</sup>Ga線源を用いて、一般的に利用されるバックグラウンド減算法とPQD法におけるアルファ線除去後のエネルギースペクトルを比較した。

【結果】本研究で開発したPQD法は1%以下のガンマ線誤排除率でアルファ線とガンマ線の弁別に成功した。バックグラウンド減算法とPQD法によるアルファ線除去後のエネルギースペクトルは互いに誤差範囲内で一致し、このときPQD法はバックグラウンド減算法に比べ統計誤差が55.2%小さいという結果が得られた。

【考察】バックグラウンド減算法では、真のイベントの統計誤差とバックグラウンドの統計誤差が誤差伝搬によって加算されるため、PQD法に比べて大きな統計誤差となったと考えられる。PQD法は信号パルス波形の僅かな差を高感度で検出可能であるため、減衰時定数の異なるシンチレータを積層したDOI(depth-of-interaction)検出器などに応用可能であると考えられる。

【結論】本研究で開発したPQD法は、バックグラウンド減算法と同様の結果をより小さい統計誤差で取得可能である。またPQD法はLaBr<sub>3</sub>:Ceシンチレータに限定した方法ではなく、パルス波形弁別の方法として幅広い測定分野に応用可能である。

### 第2章 新しい信号パルス波形解析による積層シンチレータ検出器の性能評価

【背景と目的】近年PET(positron emission tomography)装置では検出器深さ方向における相互作用位置の情報(DOI)を利用して画質を向上させている。第1章で開発したPQD法は異なる減衰時定数を持つシンチレータを積層したDOI検出器に応用可能であると着想し、その研究開発を行った。先ず本研究では積層に適切なシンチレータの選定を行った。次に選定したシンチレータを積層したDOI検出器を作成し性能評価を行い、PQD法を用いたDOI検出器の実現可能性を検討した。

【研究方法】積層に適切なシンチレータを調べるため、11種類の無機シンチレータにおける $V_p/Q$ 値と光学特性を調べた。その結果から積層に適切なシンチレータを選定し4層DOI検出器を作成した。<sup>137</sup>Cs線源を用いて作成したDOI検出器のパルス波形弁別精度と、積層状態におけるエネルギー分解能を評価した。

【結果】 $V_p/Q$  値と光学特性から、減衰時定数の異なる 4 種類の GSO:Ce シンチレータが積層に適切であることが示された。 $2.5 \times 2.5 \times 6 \text{ mm}^3$  の GSO:Ce シンチレータを用いて作成した 4 層 DOI 検出器は、PQD 法によって誤検知率 3% 以下の精度で互いに弁別可能であることを示した。また 662 keV 全エネルギーピークにおける各シンチレータの平均エネルギー分解能 (FWHM) は積層の有無でそれぞれ 9.36% と 10.95% であり、約 1.6% の僅かなエネルギー分解能の低下が確認された。

【考察】シンチレータを積層することによって、シンチレーション光は各境界面で反射現象を起こすと考えられる。そのため光電子増倍管へ到達する光子数のバラつきが増加し、エネルギー分解能の低下が引き起こされたと考えられる。しかし一般的に PET 装置に使用するシンチレータのエネルギー分解能は 10-20% 程度であるので、PQD 法を用いた DOI 検出器は十分な性能を示したと考えられる。また PQD 法を用いた 4 層 DOI 検出器の技術を応用することで、従来の PET 装置において検出器が設置不可能な空間にも検出器を設置することが可能であり、検出効率の向上が見込めるテーパー状 PET 装置のデザインが可能であると考えられる。

【結論】異なる時定数を持つ 4 種類の GSO:Ce シンチレータを用いた PQD 法による DOI 検出器は、互いを高精度で弁別可能であることが実験的に示された。また積層によるエネルギー分解能の低下も小さく、PQD 法の DOI-PET 装置への実装の実現可能性を示した。

### 第 3 章 新しいパルス信号波形解析による積層シンチレータ検出器を用いたテーパー状 PET 装置の実現可能性検討

【背景と目的】近年小動物用 PET 装置の性能は飛躍的に向上している。しかし高分解能の再構成画像を得るためには非常に小さい画素サイズが要求され、そのため高い検出効率を実現する PET 装置のデザインが要求されている。先行研究ではテーパー状 PET 装置をデザインし検出効率の向上を行っている。しかし先行研究では DOI 情報の取得によるエネルギー分解能の低下と、特殊な形状のシンチレータが用いていることから製作コストの増加が懸念されている。本研究で開発した PQD 法による 4 層 DOI 検出器の技術を用いることで、これらの問題を解決した積層型テーパー状 PET 装置のデザインが可能であると着想した。本研究では Geant4 モンテカルロコードを用いて積層型テーパー状 PET 装置の実現可能性を検討した。

【研究方法】 $2.5 \times 2.5 \times 7.5 \text{ mm}^3$  の GSO:Ce シンチレータを 4 層積層した検出器を用いて、FOV (field of view) 75 mm、検出器数 6656 個のテーパー状 PET 装置をデザインした。Siddon のアルゴリズムを応用して幾何学的に決定される感度分布を解析し、0.2, 0.5, 1.0 mm の画素サイズにおける感度分布の均一性を評価した。FOV 中心から 0-30 mm の位置に点線源を設置した場合を Geant4 によってシミュレーションし、検出効率と空間分解能を解析した。画像再構成アルゴリズムには OSEM 法 (20 subsets, 2 iteration) を使用した。またテーパー部分のない PET 装置でも同様の計算を行い、テーパー部分の有無による結果を比較した。

【結果】0.2, 0.5, 1 mm の画素サイズにおいて、感度分布の均一性はテーパー部分が有る状態が無い場合に比べてそれぞれ 1.27 倍、1.39 倍、1.95 倍という結果が得られた。FOV 中心から 0-30 mm の距離における平均の検出効率は、テーパー部分の有無によって約 1.39 倍の差が生じた。空間分解能はテーパー部分の有無による差は示されず、FOV 中心でテーパー部分の有無でそれぞれ約 1.02 mm と約 1.01 mm という結果が得られた。

【考察】テーパー部分による検出器の体積増加率は 1.3 倍であり、本研究ではそれを上回る検出効率の向上を示した。検出器を設置できない空間に対向する領域のシンチレータは、テーパー部分が無い場合対消滅ガンマ線への感度が存在しないため、単純な体積増加率より高い検出効率が得られたと考えられる。本研究で使用したシンチレータは先行研究に比べサイズが大きく、また数も少ない。したがって、先行研究の様に  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$  のような入射面の小さいシンチレータを用いることで空間分解能が向上すると考えられる。

【結論】本研究でデザインしたテーパー状 PET 装置は空間分解能を損なわず検出効率と感度分布の一様性を向上させることが可能である。これらの結果より PQD 法による 4 層 DOI 検出器の技術を応用することで、DOI 情報の取得によるエネルギー分解能の劣化が小さく、製作コストの小さいテーパー状 PET 装置が実現可能であると考えられる。