

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24680057

研究課題名(和文)サブミリ解像度のPET動画像の実現に向けたガンマ線計測技術の確立

研究課題名(英文)Development of gamma-ray measurement technologies to achieve dynamic PET moving image with sub-millimeter resolution

研究代表者

菊池 洋平(Kikuchi, Yohei)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50359535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,200,000円

研究成果の概要(和文)：PET画像において高い解像力を実現するとともに有効データの増加(高感度化)によって画像取得時間の短縮化して「PET動画像」を可能とするため、ガンマ線の相互作用挙動を3次元的に把握可能な検出器ブロックに適用する位置敏感型検出器の要素技術を開発した。この開発ではプリントブルエレクトロニクス技術が応用されており、これは放射線計測分野では初の試みであると推測される。また、この検出器ブロックによって得られる複数の相互作用の付与エネルギーと位置から初回の相互作用を特定する手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve acquisition of “dynamic PET moving image” with a high spatial resolution by the increase of acquired data (improvement of scanner sensitivity), we developed element technologies to build position sensitive detectors for detector blocks which can track gamma-ray's interaction process three-dimensionally inside them. In this development, the printable electronics technology is applied, it might be as the first attempt in the field of radiation measurement. Also, we constructed a method to specify the first hit position from information of several interactions acquired with the blocks.

研究分野：医工学

キーワード：画像診断システム 核医学診断

1. 研究開始当初の背景

PET (Positron Emission Tomography : 陽電子放出断層画像撮影法)は陽電子放出薬剤を患者に投与し、電子 - 陽電子の対消滅現象によって 180° 反対方向に放出される 2本の消滅線を外部の検出器列で検出することにより薬剤の分布を画像化する核医学診断法です。現在の PET の解像度は全身用装置で 4mm 前後であり、画像取得の時間間隔は最短で数十秒 ~ 数分ごとになっています。

一方で、我々の先行研究ではサブ mm の解像度の装置が開発され、また、放射線検出法の改善で有効データの増加 (高感度化) で画像取得に要する時間も大幅に短縮できることが予想されます。これらは、「サブ mm の解像度」の「1 フレーム/数秒の PET 動画像」の可能性を示唆するものです。

2. 研究の目的

上記の PET 動画像の実現には線検出位置の特定精度を向上させ、薬剤から放出された陽電子の消滅位置情報 (= 線発生位置) を「緻密」かつ「正確」に求めることが要求されます。これを満たすために、本研究は新しい概念に基づく PET 用の位置敏感型半導体検出器 (PSD: Position Sensitive Semiconductor Detector) の作製技術と応用手法の確立を目的としています。これらの技術は PET 装置の性能に次の 2 つの効果をもたらします。

(1) PSD による解像度の向上

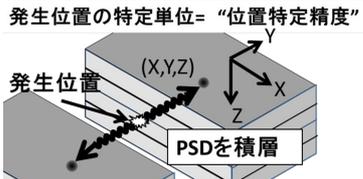
消滅線の検出は検出器の集合体である検出器ブロックが円形に配列したガントリーで行われます。ガントリー内での検出位置の特定精度を上げる手法として、検出器サイズを縮小すること挙げられます (図 1 上)。同時発生した 2 本の消滅線は向かい合う検出器対で同時計数されます。検出器の縮小は線発生位置の「緻密」な特定を可能にし、解像度向上に寄与します。一方で、PSD では演算によって検出位置 (X,Y) が算出されるため、位置精度が検出器の幅となる従来装置と比較して、より「緻密」な精度で発生位置を特定できる可能性があり、高解像度化が期待できます。

従来検出器の線発生位置の特定



図 1 : 従来型検出器における解像度の向上手段と PSD の応用による解像力向上

2D-PSDを用いた3次元検出器ブロック



(2) 3次元検出器ブロックによる高感度薄型の PSD の積層により、検出位置を 3 次元的に特定可能な 3 次元検出器ブロックが構成されます。このブロック内では線の挙動の正確な把握が可能です。

線は 1 回の光電効果 (図 2 中の A) により吸収 (= 検出信号の発生) されるほかに、高い頻度で B のような多重相互作用によって吸収され、複数の信号を発生します。B では「正確」な線発生位置情報を含むのは初回の位置だけで、現在の計測法では正しいデータを除外し、誤った位置情報をデータ化する場合が避けられません。3 次元ブロックによる線挙動の把握は初回位置の識別を可能とし、これまでノイズデータとなっていた線検出データを有効化することができるために測定時間の大幅な短縮が可能となります。

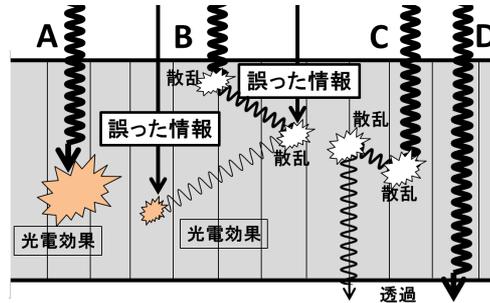


図 2 : 検出器内でのガンマ線の挙動

これまでに我々は解像度向上のために CdTe 化合物半導体を材料とする PSD の開発を行っており、検出器電極厚さを通常 の 20% 程度に低減することにより一様な抵抗電極面を持つ PSD の作製に成功しました。一方で、この開発を通して下記のような 2 つの知見を得ています。

・一様な抵抗性電極では検出器全域において高い位置特定能を得ること困難である

図 3 右は、作製した CdTe-PSD に線を一樣に照射して、演算による検出位置特定を行った結果です。理想的には四角になる分布が星形に歪んでいます。中央以外の領域では実際の検出位置と特定位置の線形性が保たれておらず、それに伴って位置精度も低くなります。

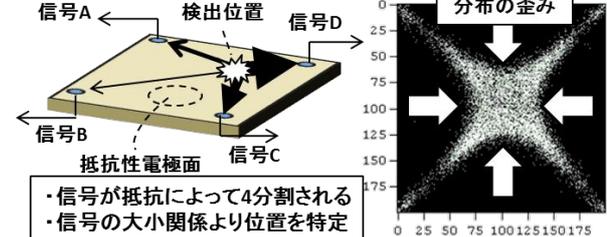


図 3 : PSD の原理と演算位置分布の歪み

・電極の構造変更により、検出器本来の性能が損なわれる

PET 検出器には 2 本の消滅線の同時性を確認するための高い時間判別能力 (時間分解能) が必要です。加えて、線の挙動追跡

を行う場合、吸収したエネルギーを正確に計測する能力（高いエネルギー分解能）も欠かせません。一方で、PSD では電極等の改質のために通常型検出器と同等の性能を満たすことは難しく、上記の開発でも性能劣化が確認されました。このため、新たな PSD の開発コンセプトには、最大性能をもたらす検出器構造を保持することが要求されます。

上記から、高い位置精度・エネルギー分解能・時間分解能を持つ PSD の実現には、健全な性能を保ちつつ、検出器全域で線形性を実現しうる非一様な抵抗面を形成する技術が必要です。そこで、ピクセル状電極面を持つ検出器の表面に直接的に薄膜抵抗回路網を形成する手法を提案します。ここで、抵抗面は回路網で模擬することが可能です。このため、各抵抗素子の値を制御することで非一様な抵抗面と等価な回路網を形成可能であると考えます。本研究では、このような回路を非侵襲的に検出器上に形成する手法を開発します。

また、本研究では、3次元検出器ブロックを用いた初回相互作用位置の特定手法を確立します。線の散乱角度と検出器の吸収エネルギーの間には物理的な関係（クライン-仁科の式）が成り立ちます。ブロック内での多重相互作用の位置関係と各点での吸収エネルギーは必ずこの関係を満たすため、これを元に相互作用の順序を特定し、初回相互作用位置を特定します。

3. 研究の方法

(1) 抵抗回路網の設計とパラメータの検討

検出位置との優れた線形性を持ち、非一様な抵抗性電極と等価な抵抗回路網の設計を行います。まず、線形性を示す非一様な抵抗面の抵抗分布を複数提案し、有望な分布の形状を調査します。この調査は電子回路シミュレータを使用した計算によって行われます。また、分布形状の決定したのちに抵抗値の最適化を行うことで分解能に優れ、工学的に最も妥当な回路網を求めます。

(2) 検出器上へのパターン電極と抵抗回路網作製技術の開発

PSD にはパターン電極（ピクセル状電極など）と上記(1)を優れた検出器性能を担保しつつ作製することが求められます。本研究では、プリンタブルエレクトロニクス技術（PE 技術）の一つであるインジェット法（IJ 法）を用いた電極・回路形成を試みます。IJ 法では材料を含む溶液の小滴で基板上にパターンを描画することで回路を形成します。この手法の特徴は試作や小ロット生産におけるコストを低減できる点であり、放射線診断装置のような非消費者機器の製造への潜在的な適用性があることが推測されます。

(3) 初回相互作用位置の特定手法の開発

ブロック内でn回の相互作用が発生したと

き、これらの発生順序はnの階乗通りのパターンが想定されます。その中から最も妥当なものを特定し、初回相互作用位置を特定する手法を構築します。計測された吸収エネルギーから各点での散乱角度が物理的に求められます。これらの散乱角度を満たすものが最も妥当なパターンとなります。この調査では複数の PSD から構成される検出器ブロックをモンテカルロシミュレーション上で仮定して実施します。シミュレーションから得られた相互作用データに提案する初回相互作用位置の特定アルゴリズムを適用することで、特定精度を評価します。

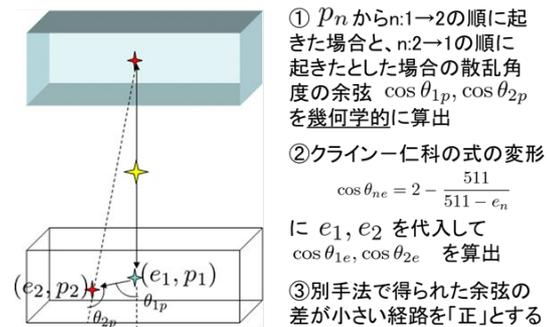


図4：初回相互作用位置の特定手法

4. 研究成果

(1) 抵抗回路網の抵抗値分布形状・抵抗値を最適化

抵抗回路網は以下の図5に示すような4つの抵抗器を接続した抵抗網の最小単位（抵抗器ユニット）から構成され、これを16個×16個配列させてできています。四隅に配置された4つの端子(S1,S2,S3,S4)はそれぞれが各引出し電極に、電流源が入射放射線によって生じた電荷に対応しており、この電流源を入力する位置を移動させることで、電極面内の様々な位置に放射線が入射した際の各出力値の変化を模擬しています。

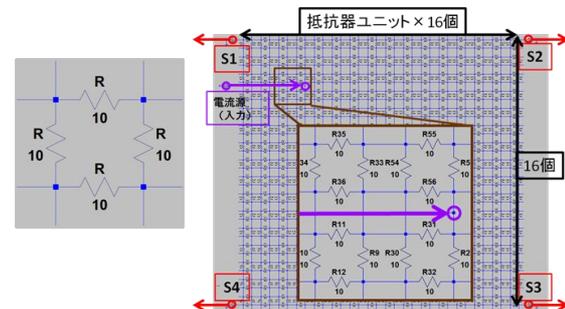


図5：非一様な電極（抵抗回路網）のシミュレーション体系

この体系で「A. 正方形高抵抗 $N \times N$ 型」、「B. 十字高抵抗 $N \times N$ 型」、「C. ひし形高抵抗型」、「D. 円形高抵抗型」、「E. 正方形排除型」、「F. 十字排除型」の計6つの抵抗分布形状を提案し、それぞれの検出位置の演算結果について評価を行いました。

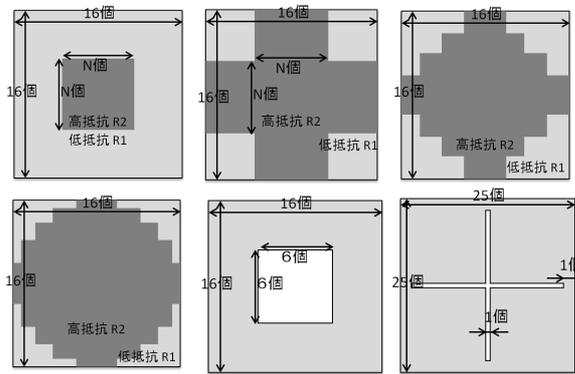


図 6：抵抗分布形状

定量的な分析の結果、「A. 正方形高抵抗 $N \times N$ 型」の $N=14$ 時に実際の検出位置と演算が最も良い一致を見ることが判明しました。この形状において、低抵抗部のユニットの抵抗値を $R1$ に対する高抵抗部の抵抗値 $R2$ の比 f ($f = R2/R1$) の最適化を行った結果、 $f=3.8$ のときに最もひずみが小さい演算位置分布が得られることが明らかになりました。

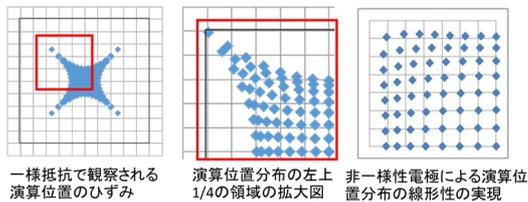


図 7：非一様抵抗分布による改善

(2) CdTe 半導体結晶上への IJ 法による電極形成・抵抗形成についての手法を開発

本研究では電極材料として金ナノ粒子を含有するインク（以下、金ナノインク）を用いました。バルクでの金の融点は 1000 程度ですが、ナノ構造となることで 300 程度以下まで低下します。本研究では 1 ノズル型のインクジェット装置によって金ナノインクで電極パターンを CdTe ウエハ上に描画後、電気炉で焼結されることで金薄膜の形成を試みました。

パターンの描画精度は基板の撥水性・濡れ性に影響を受けるため粗さの異なるウエハに対して描画した結果、鏡面まで研磨した最も撥水を示すことが推測されるウエハでにじみの少ない描画が可能であることが分かりました。また、CdTe は熱処理によって材料自体の劣化・検出器性能の悪化が報告されておりますが、200 近辺での焼成を行うことにより、電極として十分な導電性を確保したうえで良好な検出器性能を実現することが可能であることが判明しました。

この検出器において従来法で作製された CdTe 検出器にそん色ない 3%以下 (662keV ガンマ線に対して) のエネルギー分解能を達成しています。

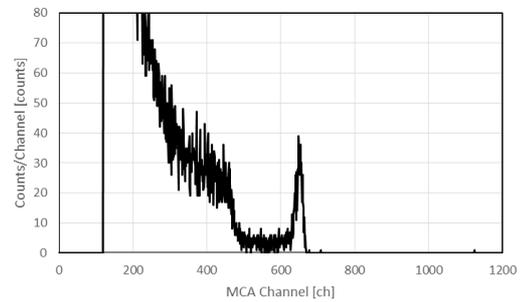


図 8：IJ 法で作製した CdTe 検出器による Cs-137 のエネルギースペクトル

また、図 9 は焼成温度と金薄膜の面抵抗の調査結果を示しています。金ナノインクは 120 程度の焼成では基板への固着を示しませんでした。150 程度以上では電極として物理的に形成できることが確認されています。一方で、その面抵抗には顕著な焼成温度依存性が見られました。この結果は、固着可能な 150 から検出器性能を担保できる 210 まで約 5 桁のオーダーで制御することが可能であることを意味しており、パターン電極間を結ぶ抵抗性配線の形成時の焼成温度を選択することで抵抗値のオーダーを決定し、線幅や長さによって値を調整することが可能であることを示しています。

上記の「導電性の電極形成」および「抵抗性の配線形成」によって位置敏感型の検出器の作製が可能です。

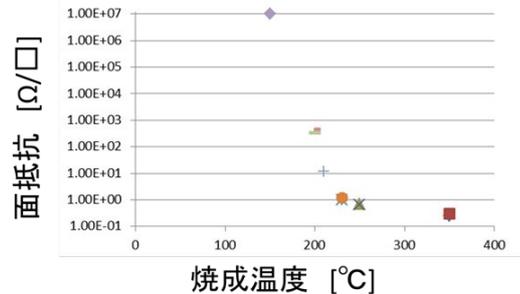


図 9：Au ナノインクの面抵抗の焼成温度依存性

(3) 初回相互作用位置の特定法の確立とそれによる感度向上を確認

$20 \times 20 \times 1.0\text{mm}^3$ の CdTe を材料とする PSD を 100 枚積層させた検出器ブロック ($20 \times 20 \times 100\text{mm}^3$) を仮定してシミュレーションを行いました。従来のガンマ線検出方法では 11%に留まる検出効率が、初回相互作用位置の特定に成功することで 2 回相互作用 (完全吸収前に 1 回の散乱) までのイベントを有効化できれば 35%、3 回相互作用までのイベントであれば 38%まで向上することが分かりました。

また、初回相互作用位置の特定手法の精度に関して検出器の位置分解能とエネルギー分解能に対する依存性を明らかにすることができました。これによれば、理想的なガンマ線検出能力 (位置分解能が 0mmFWHM、

エネルギー分解能が 0%) における特定精度が 99.5%であることに対して、現在での現実的な検出能力である位置分解能 1mm、エネルギー分解能 3%での精度は 78.9%程度になることが推測されます。

さらに、特定精度が画質へ与える影響も明らかになりました。これはシミュレーションデータを提要して実際の再構成画像を取得することによって調査しています。得られた画像から、空間分解能に与える影響特定精度が 60%までは大きな影響が見られないことが判明しました。一方で、特定精度 60%時に対する 100%時の点状の放射能集積に対する画像感度は 1.7 倍程度となり、特定精度の向上が画像感度へ顕著に依存することが分かりました。

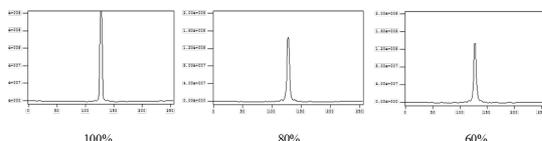


図 10：点線源の再構成画像におけるプロファイルの初回相互作用位置特定精度依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Y. Kikuchi, A. Ahmed, “Application of List Mode Image Reconstruction to Fine DOI-PET Scanner Using Position-Sensitive CdTe Semiconductor Detector”, IFMBE Proceedings: The 15th International Conference on Biomedical Engineering, 43, 2013, 605-608

A. Ahmed, Y. Kikuchi, “Design of whole body PET scanner based on advanced semiconductor detectors: A simulation study”, Journal of Nuclear Medicine and Biology, 54(supp. 2) 2013, 2169

〔学会発表〕(計 6 件)

菊池洋平、“核医学画像診断装置用半導体検出器の作製についてのプリンタブルエレクトロニクス技術の応用”、第 55 回日本核医学会学術総会、2015 年 11 月 5 日～11 月 7 日、東京都・ハイアットリージェンシー東京

S. Takyu, “Basic Evaluation of Three Dimensional Position Sensitive CdTe Detector Unit for Clinical Use of Ultra-High Resolution Human PET Scanner”, 2014 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM & MEDICAL IMAGING CONFERENCE, 2014 年 11 月 8 日～11 月 15 日, Seattle, USA

Y. Kikuchi, “Feasibility of CT Imaging with Detection Module of

High-Resolution CdTe-Semiconductor PET scanner”, 2014 World Molecular Imaging Congress, 2014 年 9 月 17 日～9 月 20 日, Seoul, Korea

Y. Kikuchi, A. Ahmed, “Application of List Mode Image Reconstruction to Fine DOI-PET Scanner Using Position-Sensitive CdTe Semiconductor Detector Unit” The 15th International Conference on Biomedical Engineering, 2013 年 12 月 4 日～12 月 7 日, Singapore, Singapore

A. Ahmed, “Design of whole body PET scanner based on advanced semiconductor detectors: A simulation study”, The SNMMI 2013 Annual Meeting, 2013 年 6 月 8 日～6 月 12 日, Vancouver, Canada

Y. Kikuchi, “Three-Dimensional Position Sensitive CdTe Detector Unit for High Resolution Human PET scanner”, 2012 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM & MEDICAL IMAGING CONFERENCE, 2012 年 11 月 2 日, Anaheim, USA

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 洋平 (KIKUCHI, Yohei)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 50359535