

「半導体 PET/CT 装置 Discovery MI 技術紹介」

GE ヘルスケア・ジャパン株式会社

MI 営業推進部 三宅 泰士



1. Discovery MI の特長

Discovery MI は、次世代型プラットフォームである Silicon Photomultiplier (以下、SiPM) 半導体 PET 検出器を搭載した、従来の PMT 検出器搭載の PET/CT とは全く次元の異なる性能を持つ、革新的なデジタル TOF-PET/CT であり、臨床 PET で優れた性能を発揮するとともに研究用途にも最適化された装置である。

Discovery MI では、SiPM を採用した“LightBurst Digital Detector”を搭載することにより、385ps という優れた TOF 時間分解能を達成しつつ、従来型 TOF-PET/CT 装置と比べ、優れた NEMA システム感度、高空間分解能、高 NECR を達成し、最新の 64 列マルチスライス CT (最大 128 スライス) を搭載している。

また、次世代の PET 画像再構成法である「Q.Clear」を標準装備し、画質 (SNR) を向上させるとともに信頼性のある安定した定量値 (SUV) を算出することを可能にした装置である。

2. SiPM 半導体 PET “Lightburst Digital Detector”

TOF 時間分解能を向上するには SiPM を使い検出器ブロックをコンパクトにすれば良いが、小型化するほど感度は劣化する。PET 検査は、他のモダリティとは異なり PET 装置内の検出器の Threshold が 511keV のガンマ線のみを検出するように設定されており、一般的に検出効率が低い。そのためコインシデンスを確実に検出することが求められる。特に ^{18}F -FDG のような低投与下における検査ではその傾向は一層強く、PET 装置において感度は最重要パラメータであると言える。

Lightburst Digital Detector は、検出器ブロックを小型パッケージ化し、新たに開発した GE 独自のテクノロジーであるコンプトン散乱リカバリを搭載した。これにより、小型化しても優れた

TOF 時間分解能を維持しつつ高感度と高空間分解能との両立に成功している。

2-1 クリスタル設計

PET/CT 装置におけるクリスタル設計は、検出器性能の主要因子の一つである。なぜなら入射光子がクリスタルと相互作用を起こさなかった場合、その下流のセンサーや電子回路がいかに高性能であってもイベント (信号が来たこと) は記録されないからである。

511KeV のコインシデンス検出効率を上げるには、クリスタルに大きな検出領域が求められる。つまり、高い阻止能を持った十分な厚さの高感度なクリスタル設計が必要になると言える (図 1)。

LightBurst Digital Detector は非常に優れた時間分解能と阻止能を持った LBS クリスタル (Lutetium based scintillators) を 25mm という厚さで採用し、高感度を実現している。

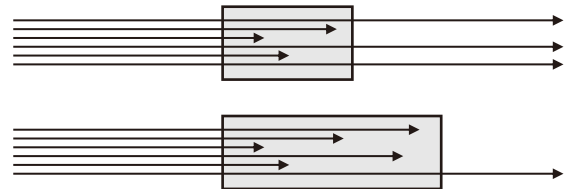


図 1. 検出器感度とクリスタルの厚の重要性
クリスタル厚が十分ないと入射した光子は認識されない。

また、クリスタルブロックは、3.95mm x 5.3mm x 25mm サイズの LBS クリスタルが 4 x 3 配列でブロック状に並んだ設計をしており (図 2)、このクリスタルブロックがライトガイドを介して SiPM 配列に結合している形をとっている。これらのクリスタルは互いに分離されていない為、シンチレーション光はクリスタルを通して SiPM 配列の複数の素子に拡散し、シンチレーションを起こしているクリスタルは、従来型 PMT PET/CT と同じ方法で SiPM 素子から生じる信号レベルから相対的に識別される。クリスタルの表面は、シンチレーションを起こしているクリスタルの誤識別を最小限に抑えるため、クリスタル間の光伝達を制御するように設計されている。



図2. クリスタルブロック

2-2 SiPM 設計

SiPM は $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ というサイズの数百、数千のマイクロセルから成り立っている。設計上、マイクロセルが小さく数が多いほど出力信号に対してより広いダイナミックレンジを与える。逆に、マイクロセルが大きくなるほど、デッドエリアが少なく、より高い光子検出効率を有することになるという相反する特性がある。GE では、 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ のマイクロセルサイズが最高の性能を発揮し、広い動作電圧範囲でその性能が安定するという結論に至り、非常に最適化されたマイクロセルサイズを採用している。

SiPM を形成するマイクロセルと同様に、各々の SiPM のサイズも重要である。なぜなら、SiPM のピクセルが小さくなる程デバイス容量が最小限に抑えられ時間分解能が向上し、これにより処理のデッドタイムを最小限に抑えて高いカウントレートを得る事ができるからである。

また、SiPM の数が少ないほど関連する電子部品が少なく済み、消費電力とシステムの複雑さが軽減される。これらのことを鑑み、LightBurst Digital Detector は、 $4\text{mm} \times 6\text{mm}$ の SiPM ピクセルサイズと合計 10,375 マイクロセルという、それぞれを最適化した非常にバランスの取れた設計を実現している。

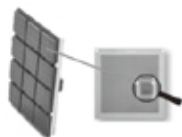


図3. 数百数千というマイクロセルからなる SiPM デバイス

2-3 クリスタルと SiPM のバランス設計

Discovery MI では最適化された SiPM 設計とクリスタル設計であることは前述の通りだが、クリスタルと SiPM 素子の組み合わせにおいてもバランスの取れた設計が採用されている。

クリスタルと SiPM 素子の組み合わせが 1 対 1 のデザインを採用していない理由は以下である。

2-3-1 クリスタルの集光率

まず最も重要なこととして、クリスタルと SiPM が 1 対 1 結合の設計では各々のクリスタルが独立しているため、クリスタルブロック設計と比較して集光率が劣ってしまう。光子は長く狭いクリスタルを通して SiPM に到達する必要がある。しかしながらシンチレーション光は反射の数が多いため、光を共有できない 1 対 1 結合では各クリスタル周辺のリフレクタにわずかでも問題があると、実質的な信号損失を引き起こしてしまう。

2-3-2 クリスタルと SiPM サイズの最適化

また、1 対 1 結合のデザインではクリスタルと SiPM 素子とがお互い同じサイズでなければならず、設計する上でクリスタルと SiPM 素子それぞれのパラメータを独立して最適化することができない。一方、光を共有する設計にすることより、クリスタルと SiPM の設計を独立したものとし、各々の最適化を可能にした。これにより、システム全体のパフォーマンスを最大限に向上させることが可能となった。

2-3-3 感度の重要性

1 対 1 結合では、511keV 光子の大部分が検出器ブロック内のクリスタルから外のクリスタルに散乱するため、感度の低下を招く。Light sharing Crystal Block のような光を共有する設計では、ブロック内の様々な相互作用からすべてのエネルギーを効率的に収集する事が可能である。また、後述するコンプトン散乱リカバリ機能と組み合わせることで、検出器の感度を大きく向上させることができる。一方、1 対 1 結合の設計では、光を共有する設計ではより簡単に行われていることを実現するために、大規模な回路または計算能力の追加が必要となる。

3. コンプトン散乱リカバリ

前述したように、LightBurst Digital Detector 設計の重要な機能の 1 つは、検出器内にコンプトン散乱した事象を記録する能力である。LBS クリスタルで相互作用する 511keV 光子は、その約 30% のみが光電効果を起こし、一つの相互作用として蓄積する。ほとんどの相互作用はコンプトン散乱であり、検出器を飛び出すか、または検出器内で別の相互作用を引き起こす二次光子を生成する。511keV 光子による一つのコンプトン散乱は相互作用部位に 340keV 以下しか蓄積せず、二次光子が検出器を飛び出した場合、一次光子の相互

作用のみから収集された信号は低エネルギーしきい値を通過することができない為、記録されない。

前世代の GE PET / CT のような検出器ブロックが大きい設計では、二次光子の多くは同じ検出器ブロック内で相互作用を起すため、二つの相互作用からの信号であるにもかかわらず一つの相互作用が起こったかのように認識される。しかしながら、LightBurst Digital Block のように検出器サイズが小さくなると二次光子の多くがブロックを飛び出し、別のブロックで相互作用を起すことになる。これらのイベントを見つけて再構成するように設計された回路がなければ、検出器はそれらの信号を失い、システムの感度は低下してしまう。

LightBurst Digital Block のシステム設計では、隣接するブロックが相互にコンタクトしてこれらの散乱イベントを回復する事が可能である。本機能により、スキャナの真のイベント感度は 20% のリカバリが可能である。

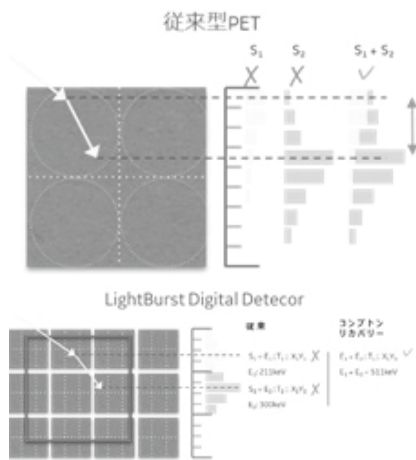


図4. コンプトン散乱リカバリ

従来 PET はブロックが大きい検出器によって自動的に記録される (上図)。ブロックが小さい場合、イベントが適切に記録されるためにはコンプトン散乱リカバリが必要 (下図)。コンプトン散乱リカバリは、カウントロスした 511Kev 光子を、隣り合うブロックでエネルギー合算しリカバリして感度向上しつつ、分解能劣化も抑えられる。

4. 次世代 PET 画像再構成 Q.Clear

PET 検査は治療効果を簡便に確認でき、最適な治療方針の判断に利用される事が期待されている。しかしながら、従来の PET 逐次近似再構成法では、演算を繰り返して正しい画像データに近づけようとする為にその繰り返し回数 (Iteration) を増加させると同時に画像中のノイズを増幅させ

てしまうため、画質を優先して正しい定量値 (SUV) に至る前に演算数を制限せざるをえなかった (図5)。こうした課題を克服する為に、Q.Clear では逐次近似法において画像を再構成する際に演算の繰り返し数を増加させてもノイズが増幅しないよう、アルゴリズム内にノイズをコントロールするための新たな演算式を組み込んだ。

これにより、従来相反関係にあった画質と定量性の双方が向上して充分収束した SUV を提供でき、継続的な治療効果判定への PET 利用が可能となった。加えて Q.Clear では、従来 PET 画像再構成法と比較して画質が向上した事により、微小病変の描出能力や隣接する病変の識別能力が高まった。さらには肝臓のようなノイズの多くなりやすい部位でもクリアな画質を実現できる為、診断性能の飛躍的向上が期待される。

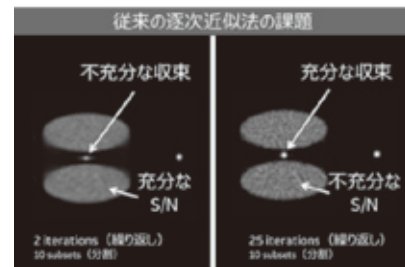


図5. 従来逐次近似法の課題

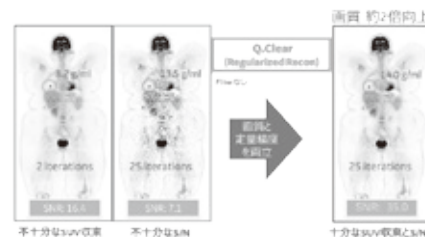


図6. Q.Clear の概念図

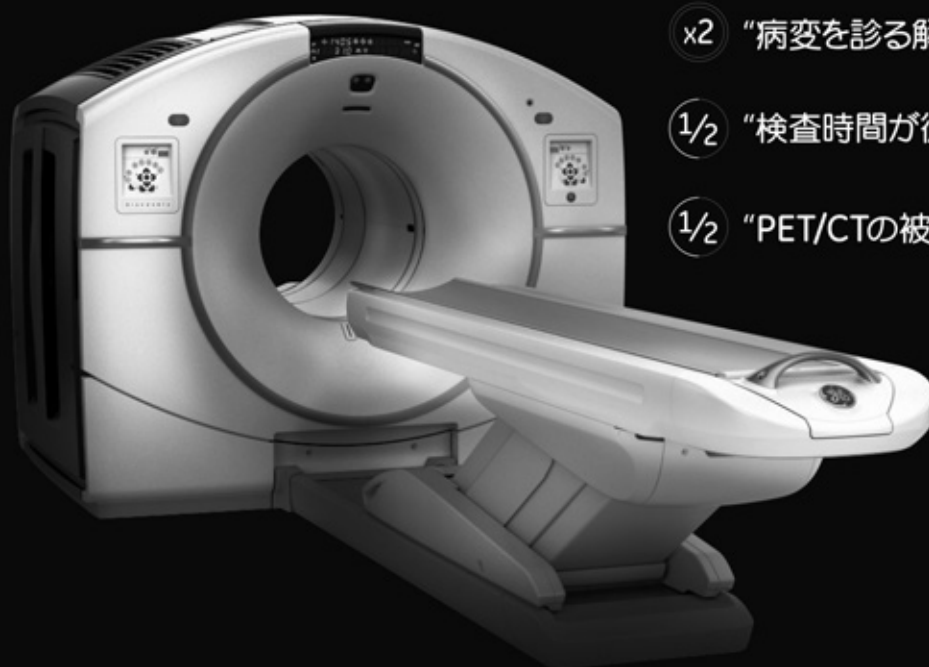
5. さいごに

本稿では革新的なデジタル TOF-PET/CT 装置である Discovery MI について紹介した。半導体技術によって、更なる診断能の向上や新たな検査の可能性が大きく期待される。

薬事認証番号：221ACBZX00029000
 販売名：X線 CT 組合せ型ポジトロン CT 装置
 Optima PET/CT500, Discovery PET/CT600
 類型：Discovery MI-15, Discovery MI-20
 JB58069JA

GE Healthcare

半導体PETで真の診断を Molecular Imagingは新たな時代へ



- x2 “病変を診る解像度が2倍^{*1}”
- 1/2 “検査時間が従来の半分に”
- 1/2 “PET/CTの被ばくが半分に”

New Light Burst Digital検出器(PET)
高感度と高分解能の高次元両立



Discovery MI

GE 核医学検査装置 🔍 で検索



*1. 病変を診る解像度とは体積分解能(Volumetric Resolution)のことです。

業事保証番号: 221ACBZK00029000
販売名: x線CT組合せ型ポトロンCT装置Optima PET/CT500, Discovery PET/CT600
類型: Discovery MI-15, Discovery MI-20

J842620JA