



展 TENBO 望

半導体 SPECT 装置の開発と 今後の展望



尾川 浩一
Ogawa Koichi
(法政大学理工学部)

1 はじめに

核医学における γ 線の検出では、H. Anger が初めてガンマカメラを開発した 1950 年代以降、NaI(Tl) シンチレータと光電子増倍管の組み合わせが用いられてきた。NaI(Tl) シンチレータが用いられてきた背景には、核医学の診断領域で用いられるアイソトープの γ 線（特性 X 線を含む）のエネルギーが 70 keV (^{201}Tl)~300 keV (^{67}Ga) であり、これらの光子に対して NaI(Tl) は原子番号が大きく密度も高いので、光電効果を効率よく起こすことができるからである。また、発光した蛍光の波長が光電子増倍管の感度特性と一致し、残光特性として減衰時間が短いこと、発光特性として多くの発光が起こることも重要な要素となる。さらに、大型の単結晶が利用可能になったことも大視野を一度に計測するという意味で重要である。一方、NaI(Tl) シンチレータと光電子増倍管の組み合わせによる γ 線の検出では、エネルギー分解能や固有空間分解能が低いというような問題も存在する。本稿では、このような従来型のガンマカメラが抱える問題点について述べ、これを克服するための半導体検出器の研究開発、並びに将来展望について述べる。

2 従来のガンマカメラの問題点

単光子放出核種を用いた核医学画像（シンチグラム、SPECT 画像）の画質は、 γ 線の入射方向を限定するコリメータ、 γ 線を検出する検出器、並びに画像再構成などのソフトウェア部によって決まる。このうち、検出器部分は γ 線をどのような形で電気的な信号にするかという意味で、最も重要な部分となる。 γ 線の検出では、間接検出（ γ 線をいったん蛍光に変え、その蛍光を電気信号に再度変換）あるいは直接検出（ γ 線のエネルギーを直接電気信号に変換）のいずれかの方式が用いられる（図 1 参照）が、従来のガンマカメラでは NaI(Tl) シンチレータと光電子増倍管による間接検出の方式が採用されてきた。この方式の第 1 の問題点は、エネルギー分解能の低さである。エネルギー分解能は、シンチレータ内部で相互作用を起こし発生した蛍光の量の揺らぎや、光電子増倍管での増幅時に生ずる揺らぎなども関わってくる。ガンマカメラのエネルギー分解能は、入射する光子のエネルギーに依存し、現在、よく用いられている NaI(Tl) シンチレータ（9 mm 厚）のエネルギー分解能は半値幅で 10% 程度（@140 keV）である。このため、エネルギースペクト

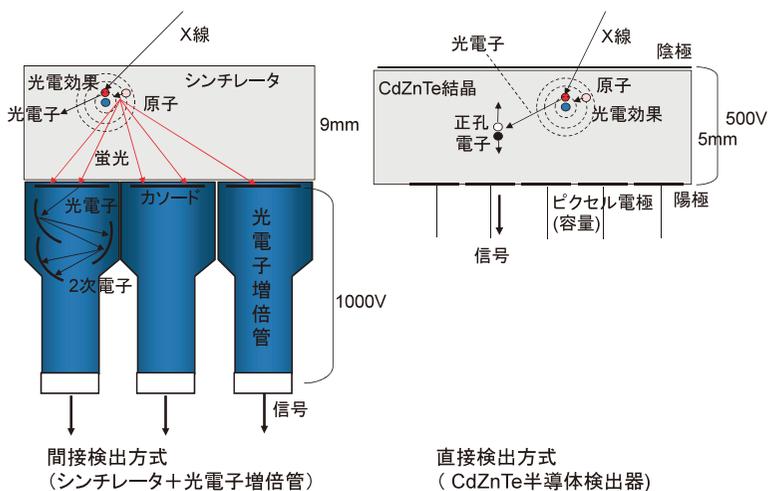


図1 γ 線検出方式の違い

ル上で単一のエネルギーとして計測されるべき γ 線は見掛け上広がり、ガウス分布のような形状を呈する。この結果、光子計測用のエネルギーウィンドウに混入するコンプトン散乱光子を本質的に除外することは不可能となる。

第2の問題点は固有空間分解能の低さである。単光子放出形のアイソトープを用いたイメージングシステムでは、シンチレータ及び光電子増倍管による計測システムの固有空間分解能とコリメータによる幾何学的空間分解能によって、システム全体の総合空間分解能が決定される。シンチレータで発生する蛍光はあらゆる方向に拡散して複数の光電子増倍管によって得られた電気信号から位置検出が行われるので、固有空間分解能が低下することになる。この固有空間分解能はシンチレータの厚さによっても影響を受け、厚いものほど低下することになる。空間分解能を向上させるために、シンチレータの厚さを薄くしたいところであるが、その場合には入射光子がシンチレータ内で相互作用を起こす確率が低下し、感度が減少する。これらの兼ね合いから、現在のガンマカメラの固有空間分解能は半値幅で3.5 mm程度になっている。

3 半導体検出器の利用

前述のガンマカメラの抱える問題を解決するのが、常温で使用可能なCdTeやCdZnTe (CZT) 化合物半導体検出器¹⁾である。CdTeやCZT半導体検出器の研究の歴史は古いですが、近年になってようやく、一部の核医学検査装置^{2,3)}やX線診断装置⁴⁾に搭載されるようになってきた。半導体検出器は結晶内に放射線が入射し、相互作用をしたときに

発生する電子、正孔を、結晶を挟む電極に数百Vの高電圧を掛けて集め、その電荷量を計測するものである。一对の電子・正孔を発生させるのに必要なエネルギーがCdTeでは4.43 eV (CZT: 5 eV)と小さいため、エネルギー分解能が向上する。また、SiやGeよりもバンドギャップエネルギーが大きいため常温での使用が可能であり、原子番号もCd: 48, Te: 52と大きいので光子を効率よく光電吸収させることが可能である。CdTe結晶はtraveling heater method (THM)という方法によって作られるが、結晶自体の大きさは現在直径75 mm程度のものまで生成可能になっている。CZTはCdTeに少量のZnを混入させてバンドギャップエネルギーを増加させ漏洩電流を低下させたものであるが、半導体検出器の挙動はCdTeとほぼ同じである。発生した電子、正孔は2つの電極に向けて結晶体内を移動するが、途中でトラップされることがあるため電荷の輸送は光子の相互作用位置の関数として表され、CdTeのような化合物半導体では、エネルギー分解能はGeのような純結晶の半導体検出器よりも低下する。エネルギー分解能は、結晶の厚さや、電極の形状、電極の材質などによっても変化し、核医学で使用するエネルギーの γ 線に対しては5 mm厚程

度の結晶が用いられている。この場合のエネルギー分解能は半値幅で6% (@140 keV)程度となり、NaI(Tl)シンチレータの約半分程度まで向上する。また、このような半導体検出器はピクセル形の検出器の構造をとり、基本的にピクセル電極の大きさが、空間分解能を決定することになる。しかしながら、ピクセルの大きさを小さくしていくとピクセル当たりの感度が減少することになり、現在では $2 \times 2 \sim 3 \times 3 \text{ mm}^2$ 程度のピクセルでの実装が行われている。

4 半導体 SPECT システムの例

我々は3次元的に自由な角度から得られたデータから画像を再構成する心筋 SPECT システム⁵⁾並びに、よりスタティック(固定された)収集に近いデータ収集を可能とするマルチピンホール形頭部 SPECT システム⁶⁾の基礎研究を実施してきた。図2に示した心筋 SPECT システムでは、20個の CZT 半導体検出器モジュールを搭載した有効面積 $195 \times 156 \text{ mm}^2$ の検出器を2台用いている(検出器モジュール:結晶サイズ $39 \times 39 \text{ mm}^2$, 厚さ 5 mm, 画素サイズ 2.46



図2 心筋 SPECT システム

$\times 2.46 \text{ mm}^2$ [16×16画素])。検出器前面には厚さ 40 mm の LEHR コリメータを装着している。この SPECT システムは2台の検出器の位置関係を図3のように任意に変えることができ、また、各々の検出器は任意角度でのデータ収集が可能である。図4には心筋ファントム(高さ 19 cm, 横幅 30 cm の容器におがくずや心筋、背骨などを配し、心筋部には2個の欠損部用アクリル球 $2 \text{ cm } \phi$ を挿入)((株)京都科学製)を用いた実験結果を示す。アイソトープとしては $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (10 mCi) を心筋部に封入した。エネルギーウィンドウは 140 keV を中心に $\pm 5\%$ とし、データ収集時間は一方方向あたり 30 秒、コリメータの開口角は 2.38° とした。投影データは図3に示した角度範囲 (θ, ϕ) 内の 12 方向である。画像再構成には OS-EM 法を用い、再構成のプロセスにおいて、感度補正、吸収補正(吸収マップ: X線 CT 画像)、開口補正、散乱補正を行い、量子雑音除去 (Butterworth filter) も行った。再構成に用いたマトリクスサイズは $128 \times 128 \times 64$, ボクセルサイズは $2.46 \times 2.46 \times 2.46 \text{ mm}^3$ である。図4に示されているように、SN 比の良好な 12 方向の投影データを用いた再構成画像(右)は、従来の平面軌道の 60 方向の投影データから再構成された画像(左)とほぼ同等の画質になっている。

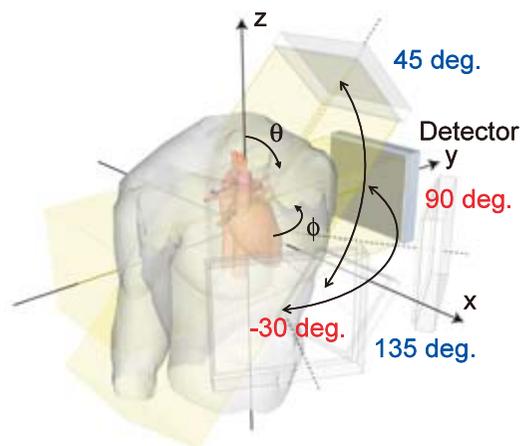


図3 データ収集可能な角度範囲

図5は前述した検出器ユニットを3台、六角形のガントリ面に平行に配置した脳 SPECT の基礎研究システムである。検出器と平行なガントリ面にはそれぞれ3個のピンホールが開けら

れている。このシステムでは検出器を固定したまま、内部のガントリを微小回転して異なる投影角度のデータを収集することが可能となっており、また、検出器とガントリを同時に回転することも可能となっている。このように半導体検出器を用いることで、大変コンパクトなシステムが実現する。図6は、このシステムでどこまで空間分解能の高い画像を実現できるかをシミュレーションした結果である。ここで、検出器は3回回転移動(0, 40, 80°)し、ガントリの角度位置を3, 5, 7回と変えたデータから ML-EM 法で再構成した画像を示している。最小のデータ収集条件でも4mm程度のホットロッドが映像化され、脳の画像でも高い空間分解能の画像が得られていることが分かる。

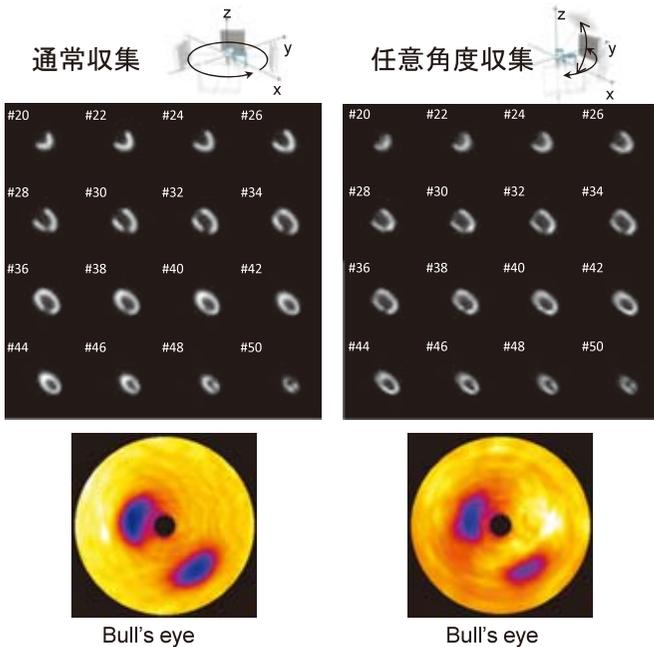


図4 通常の円軌道データ収集(60方向)と3次元任意角度収集(12方向)のSPECT画像

このような半導体検出器を実装した市販の心筋 SPECT 装置の例を紹介する。Discovery NM530c (GEヘルスケア・ジャパン(株))⁷⁾は5mm厚の CZT 半導体検出器モジュール(40×40 mm²)を4個、正方形に並べた検出器ユニット(有効面積80×80 mm²)を19個、心臓を取り巻くように配置している。画素サイズ



図5 脳 SPECT システム

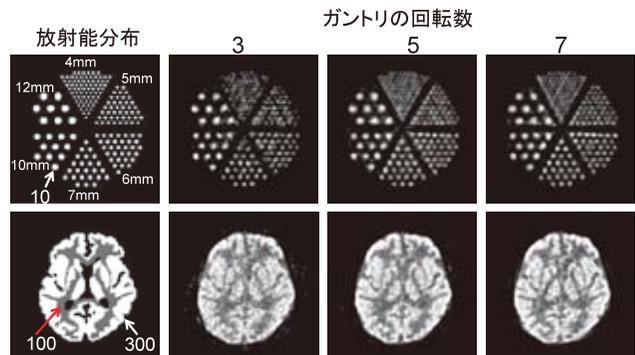


図6 脳 SPECT システムのシミュレーション

は $2.46 \times 2.46 \text{ mm}^2$ であり 1 ユニットには 1,024 (32×32) 個の画素が存在する。個々の検出器ユニットの前面に穴径 4.75 mm のピンホールコリメータを置き、データを収集する仕組みとなっている。図 7 は、この装置で撮影された心筋 SPECT 画像を従来型の 2 検出カメラの画像と比較したものである。多数の検出器ユニットの使用により、短時間収集でも従来型のカメラに匹敵する画像が再構成されている。この装置によって、従来機に対して 2 倍の空間分解能、4 倍の感度の向上があるとしている。また、D-SPECT (Spectrum-Dynamics, Israel)⁸⁾ は、5 mm 厚の CZT 半導体検出器モジュール ($40 \times 40 \text{ mm}^2$) を 4 個、縦方向に並べた検出器ユニット (有効面積 $40 \times 160 \text{ mm}^2$) を 10 個、心臓を取り巻くように配置している。画素のサイズは $2.46 \times 2.46 \text{ mm}^2$ であり 1 ユニットには 1,024 (16×64) 個の画素が存在する。個々の検出器ユニットの前面には長さ 21.7 mm、隔壁厚 0.2 mm のタングステン製の平行多孔形コリメータが置かれ、検出器ユニットと一体になって心臓の方向を回転スキャンする形でデータの収集が行われ、5.5 mm 程度の空間分解能を得ることが可能になっている。これにより、従来機に対して 2 倍の空間分解能、10 倍の感度、1.7 倍のエネルギー分解能の向上があるとしている。

5 今後の展望

半導体検出器は、エネルギー分解能や空間分解能を改善できるものの、SPECT 画像の画質を従来と比較して、ドラスティックに変えることが可能かといえ、残念ながらそこまでは至っていない。また、現時点では検出器が非常に高価であり、コストパフォーマンスの観点から従来の大型の検出器をそのまま半導体検出器に置き換えたシステムは市場で受け入れられるとは言い難い。したがって、例えば対象臓器の

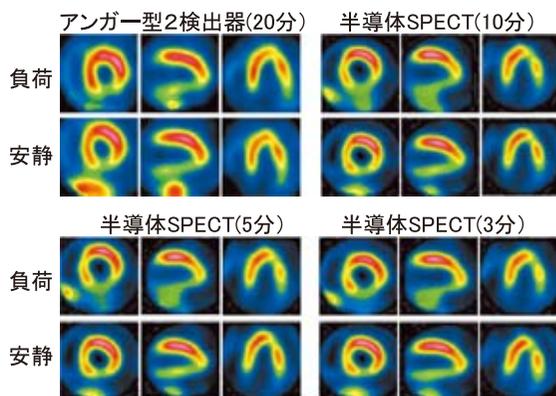


図 7 従来型 2 検出器 SPECT と半導体 SPECT 画像の比較
70 歳代男性：右胸背部痛 陳旧性心筋梗塞（右冠動脈 #3）+ 狭心症（左回旋枝）
RI：^{99m}Tc-tetrofosmin（負荷時：8 mCi 静注，安静時：20 mCi 静注）
（愛媛大学医学部放射線科 望月輝一教授の御好意による）

周りを検出器で取り囲むような、検出器のコンパクト性を生かしたデザインと柔軟な画像再構成法を組み合わせることで特定臓器をイメージングするようなどころから、次第に核医学領域での半導体検出器の利用が拡大していくものと思われる。

参考文献

- 1) Knoll, G.F. : Radiation detection and measurement, 3rd ed., John Wiley & Sons (2000)
- 2) Ben-Halm, S., *et al.*, Eur J Nucl Med Mol Imaging, **37**, 1710-1721 (2010)
- 3) Bocher, M., *et al.*, Eur J Nucl Med Mol Imaging, **37**, 1887-1902 (2010)
- 4) Ogawa, K., *et al.*, Nucl Instr Meth Phys Res A, **664**, 29-37 (2012)
- 5) Ogawa, K., *et al.*, Proc of IEEE Nucl Sci Symp Med Imag Conf, 2553-2556 (2010)
- 6) Donai, T., *et al.*, Proc 6th Japan-Korea Joint Meeting Med Phys (CD-ROM) (2011)
- 7) http://www.innervision.co.jp/expo/spect_spectct/ge/discovery_nm530c/index.html
- 8) <http://www.spectrum-dynamics.com/products/d-spect.html>