

半導体PET-CTにおけるファントム試験とFDG2検定使用による臨床画像評価

Phantom test and clinical image evaluation using FDG2 test in semiconductor PET-CT

長瀬 智明

神奈川県立がんセンター 放射線診断技術科

Key words: semiconductor PET-CT, phantom test, clinical image evaluation, FDG 2 test

【Abstract】

Many semiconductor PET-CT systems are currently in operation in Japan. Our hospital started operation two years ago. In our hospital, the number of examinations per day is 16, and only two tests of the delivery formulation are used. The purpose of this study is to demonstrate that clinical images can be provided without any problems even with this operation. First, a phantom test was performed to investigate the performance of the semiconductor PET system. The bottom line was not met at low radiation dose and short acquisition time. Next, 489 patients were evaluated for clinical images. NECpatient, NECdensity, and liver SNR were used as evaluation indices. All measures met the bottom line in more than 99% of patients.

【要旨】

現在、国内には多くの半導体PET-CTが稼働している。当院でも2年前に稼働を開始した。当院の実情は、1日当たりの検査件数は16人、デリバリー製剤は2検定のみを使用である。本研究の目的は、この運用でも問題なく臨床画像を提供できることを示すことである。まずファントム試験を行い半導体PETの性能を調べた。低放射線量・短時間収集では、ボトムラインを満たさなかった。次に患者489人に対し臨床画像の評価を行った。評価指標にはNECpatient、NECdensity、肝SNRを用いた。いずれの指標も99%以上の患者でボトムラインを満たした。

緒 言

現在、国内には587台のPositron Emission Tomography-Computed Tomography (PET-CT)が稼働しており (PET/MR, MRPET, 乳房用PETを含む) (2021年1月1日時点)¹⁾、半導体検出器を用いたPET-CT (以下、半導体PET) を導入する施設が増えている²⁾。半導体PETは、従来の光電子増倍管を用いた検出器に代わり、半導体検出器 (SiPM) を使用している。そうすることで、高分解能な画像を得ることができ、短時間撮影が可能になるとされる³⁾。当院でも2021年1月より半導体PET (Discovery MI, GEヘルスケア社) が稼働しており、デリバリーによる放射性医薬品基準フルオロデオキシグルコース注射液 (FDG スキャン注, 日本メジフィジックス社) を用いて検査を実施している。

当院のPET-CT検査は1日当たりの検査可能人数を16人としており、デリバリーにて配送される検定時刻

(10:00, 12:30, 15:30)のうち10:00, 12:30の2検定を使用している。一人目の患者の投与開始時刻は8:50、患者の投与間隔は10~15分である。撮像は投与開始60分後である。1 bed当たりの収集時間 (以下、収集時間) は算出式を用いて、一人ひとり変更している。

しかしながら、FDG スキャン注を含む全ての放射性医薬品は、時間が経過するほど放射線量が減衰する性質を持っている。そのため、上記2検定で運用を行う場合、患者によっては放射線量が足りない可能性が出てくる。また、投与間隔10~15分では1人当たりの検査時間が短くなるため、収集時間も短くなる。

そこで、PET-CT検査を行う16人に対して2検定 (10:00, 12:30) の運用で安定した臨床画像を提供するために、まずはファントム試験を行った。その結果から得られた数値やファントム画像を基に、実臨床での収集時間を求めるためのデフォルト値を決定した。次にそのデフォルト値を用いて収集時間を算出し、その収集時間で撮像した臨床画像の評価を行った。

1. 方 法

1.0 使用機器の画像再構成法と性能

使用した半導体PETの画像再構成法はBlock Se-

NAGASE Tomoaki

Kanagawa Cancer Center, Department of Radiological Diagnosis Technology

Received March 3, 2023; accepted December 14, 2023

Table Technical parameters for Discovery MI PET-CT system

| PET-CT characteristics | |
|---------------------------------|--|
| Detector material | LBS (Lutetium Based Scintillator) |
| Coincidence window width (ns) | 5.25 |
| Detector ring diameter (mm) | 744 |
| Crystal size (mm ³) | 3.95 (trans axial) × 5.3 (axial) × 25 (radial) |
| Trans axial field of view (mm) | 700 |
| Axial field of view (mm) | 250 |
| Axial sampling interval (mm) | 2.78 |
| Number of imaging plane | 89 |
| Number of crystals/ ring | 544 |

quential Regularized Expectation Maximization (BSREM) 法を用いた画像再構成法 (Q.Clear, GEヘルスケア社) である。このQ.Clearには罰則付き最尤推定が組み込まれており、罰則パラメーター (β 値, GEヘルスケア社) によりノイズがコントロールされる。そのためIterationやSubsetの設定は必要なく、設定が必要なパラメーターは β 値のみである。この β 値は1から10,000まであり、本研究での β 値はファントム試験・臨床画像評価共に400とした。この理由は、全身¹⁸F-FDG検査は400~500の β 値を使用すること⁴⁾、肺結節の評価では400または600の β 値を使用すること^{5,6)} と、おおよその報告で400が提案されていたためである。なお、その他の性能はTableに示す。

1.1 ファントム試験

用いたファントムはNEMA Bodyファントム (以下、ファントム) である。『¹⁸F-FDGを用いた全身PET撮像のためのファントム試験手順書 第3版』⁷⁾ (以下、手順書) を参考に、ファントムの球対バックグラウンド (BG) が4対1となるようにFDGスキャン注を封入した。ファントム撮像のタイミングは、BG領域の放射能濃度が4.22 kBq/ml, 2.11 kBq/ml, 1.45 kBq/mlの3回とした。この理由は、手順書にあるようにFDGスキャン注370 MBq, 185 MBqを体重60 kgの患者に投与 (370/60=6.2 MBq/kg, 185/60=3.2 MBq/kg) し、60分後に撮像することを想定したため、また、『FDG PET, PET/CT診療ガイドライン2020』⁸⁾ にあるよ

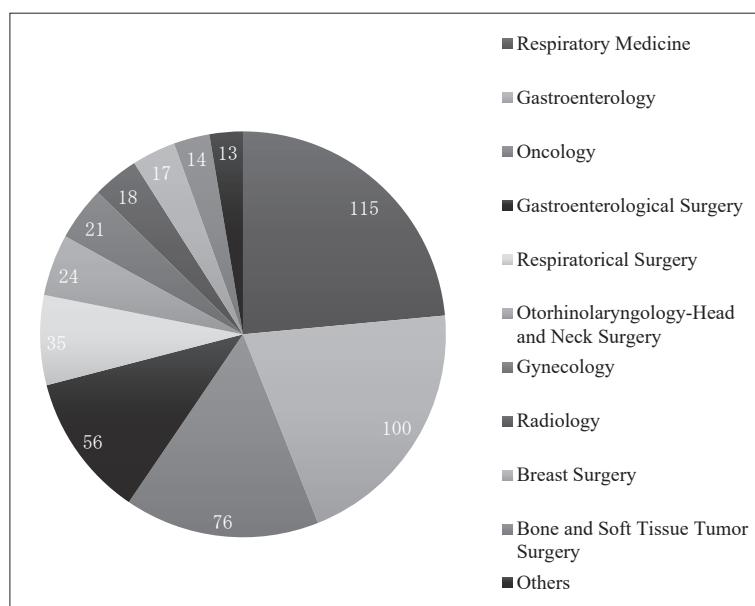


Fig.1 Breakdown of 489 persons (Departments)

うに、体重当たりの投与量2~5 MBq/kgの範囲の中で最低に近い2.1 MBq/kgの60分後に撮像することを想定したためである。収集時間は30分収集とし、画像再構成は1分収集から1分おきとした。このファントム試験で、ファントムの10 mm球のQN比 (以下、 Q/N_{10mm})、相対リカバリ係数 (以下、リカバリ係数) を調べた。なお、『がんFDG-PET/CT撮像法ガイドライン 第2版』⁹⁾ (以下、ガイドライン) による Q/N_{10mm} の基準値は2.8%、手順書によるリカバリ係数の目標値は0.38である。

1.2 臨床画像評価

対象は、2021年2月8日から同年4月2日までに検査を行った患者489人 (依頼診療科の内訳はFig.1) と

した。収集時間の算出式は以下の通りである。

ファントム撮像時の放射能濃度 (MBq/kg) :

$$\frac{1}{\text{ファントム撮像時の収集時間 (秒)}} = \frac{\text{投与量 (MBq)}}{\text{体重 (kg)}} \times \frac{1}{\text{収集時間 (秒)}} \quad \text{①}$$

評価項目は、ガイドラインに記載されている被検者雑音等価係数Noise Equivalent Count (NEC) patient, NECdensity, 肝の信号対雑音比Signal to Noise Ratio (以下、肝SNR) の3つである。NECpatientとは測定範囲の軸長で正規化したもの、NECdensityとは測定範囲の身体体積で割ったものである。ガイドラインでは臨床画像の評価項目に評価基準が定められており、NECpatient, NECdensity, 肝SNRの評価基準はそれぞれ13, 0.2, 10とされている。なお、NECpatient, NECdensityの算出には核医学業務支援システム (onti, イメージワン社) を用いた。肝SNRの算出についてはガイドラインを参考にした。

1.3 倫理的配慮

本研究は、当院臨床審査委員会の承認 (2021疫24) を得て実施した。臨床画像を評価した489人の患者には侵襲や介入がないため、同意を取らずにオプトアウトを用いた。

2. 結 果

2.1 ファントム試験

Q/N_{10mm}は、1.45 kBq/mlの1分収集以外の全てで基準値の2.8%を上回ることができた(Fig.2)。参考画像として、4.22 kBq/ml, 2.11 kBq/ml, 1.45 kBq/mlの1分収集, 2分収集, 3分収集, 4分収集, 30分収集のファントム画像を示す (Fig.3)。リカバリ係数は10 mm球以外の球で全て約1.0となった。10 mm球では、4.22 kBq/mlが0.69, 2.11 kBq/mlが0.68, 1.45 kBq/mlが0.74となった (Fig.4-5)。これらの結果から、1.45 kBq/mlに対応する2.1 MBq/kgの2分収集を算出式でのデフォルト値として採用し、臨床

| | Acquisition time (min.) | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 4.22 kBq/ml | 5.39 | 7.78 | 9.30 | 9.92 | 10.27 | 10.99 | 11.71 | 12.38 | 12.80 | 12.95 |
| 2.11 kBq/ml | 3.02 | 5.04 | 6.55 | 7.40 | 8.03 | 8.16 | 8.34 | 8.48 | 8.64 | 8.86 |
| 1.45 kBq/ml | 2.64 | 3.98 | 4.82 | 5.69 | 6.66 | 7.46 | 8.00 | 8.29 | 8.46 | 8.82 |

Fig.2 QH ratio for 10 mm sphere size at each radioactivity concentration per acquisition time

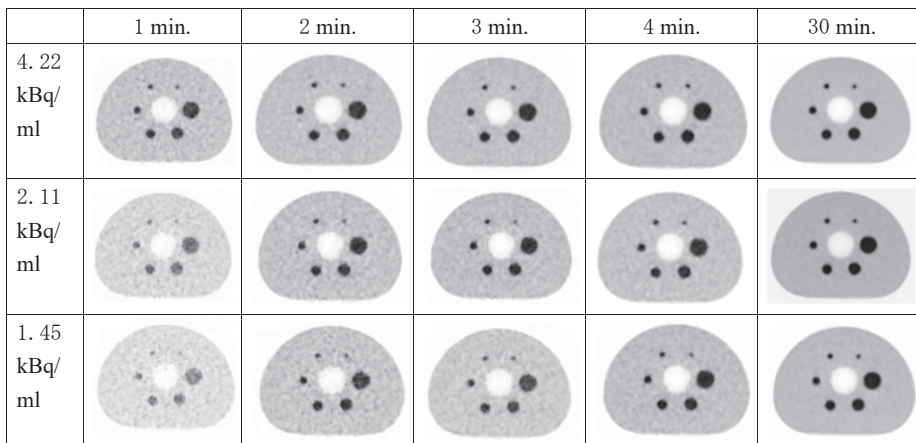


Fig.3 Phantom image for each acquisition time at each radioactivity concentration

| Sphere size[mm] | 10 | 13 | 17 | 22 | 28 | 37 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| 4.22 kBq/ml | 0.69 | 1.03 | 1.07 | 1.05 | 1.03 | 1.00 |
| 2.11 kBq/ml | 0.68 | 0.99 | 1.05 | 1.03 | 1.03 | 1.00 |
| 1.45 kBq/ml | 0.74 | 1.01 | 1.02 | 1.03 | 0.97 | 1.00 |

Fig.4 Recovery factor for each sphere size at each radioactivity concentration

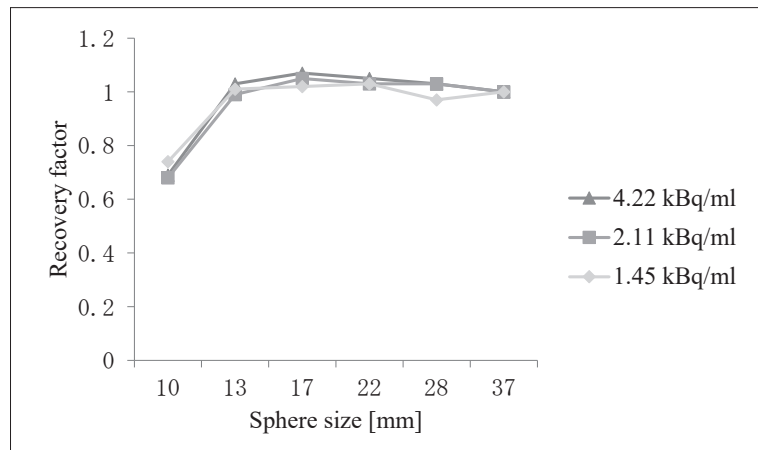


Fig.5 Recovery factor for each sphere size at each radioactivity concentration

での収集時間の算出に用いた。

2.2 臨床画像評価

収集時間は

$$2.1 \text{ (MBq/kg)} : \frac{1}{120 \text{ (秒)}} = \frac{\text{投与量 (MBq)}}{\text{体重 (kg)}} : \frac{1}{\text{収集時間 (秒)}} \quad \text{②}$$

により算出した。NECpatientは、489人中488人(99.8%)で評価基準の13以上であった(Fig.6)。NECdensityは、489人全て(100%)で評価基準の

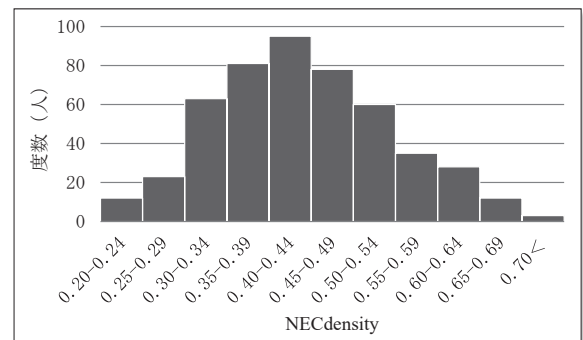


Fig.7 Histogram of NECdensity

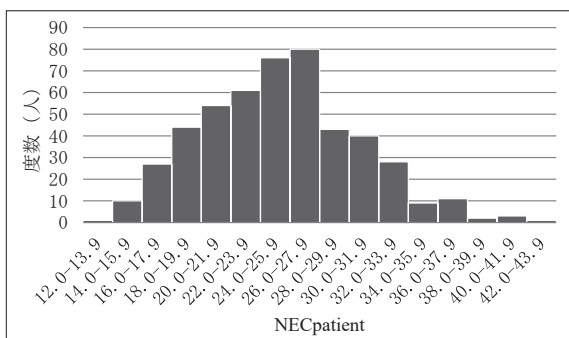


Fig.6 Histogram of NECpatient

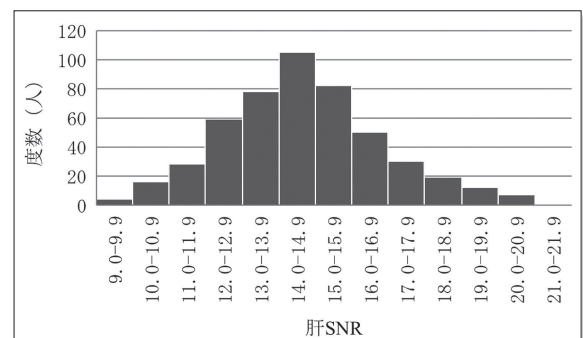


Fig.8 Histogram of Liver SNR

0.2以上であった (Fig.7). 肝SNRは、489人中486人 (99.3%) で評価基準の10以上であった (Fig.8). なお、489人の体重の平均は58.2 kg, 体重当たりの投与量の平均は4.3 MBq/kg, 最大は8.9 MBq/kg, 最少は1.6 MBq/kg, Uptake Timeの平均は62.5分であった.

3. 考察

本研究は、半導体PETの有している性能を調べ、この性能から導いた収集時間による臨床画像を評価した.

ファントム試験では $Q/N_{10\text{mm}}$ とリカバリ係数を調べた。 $Q/N_{10\text{mm}}$ では、BG領域の放射能濃度が4.22 kBq/ml, 2.11 kBq/mlの場合、収集時間が1分から基準値を満たすことができた。しかし、1.45 kBq/mlの場合、収集時間が1分では基準値を満たすことができなかった (Fig.2)。半導体PETがいかに高感度といえども、低過ぎる放射能濃度、短過ぎる収集時間では基準値を満たせないものといえる。ファントム画像からも明らかのように、1.45 kBq/mlの1分収集ではノイズが多く含まれ、10 mm球の視覚的な評価はほとんどできない (Fig.3)。そこで本研究では、臨床で用いるデフォルトを1.45 kBq/mlに対応する2.1 MBq/kgの2分収集が望ましいと判断した。この理由は、1.45 kBq/mlの2分収集と2.11 kBq/mlの1分収集では1.45 kBq/mlの2分収集の方が $Q/N_{10\text{mm}}$ も良く、ファントム画像でも10 mm球をより良く評価できたため、予約時間帯によっては体重当たりの投与量が2.1 MBq/kgを切ることも考えられたため、短過ぎる収集時間では時間を持て余してしまう可能性があったためである。リカバリ係数では、10 mm球が0.68~0.74となり、13 mm球以上の球ではどの放射能濃度においてもほとんど1.0に収束する結果となった (Fig.4-5)。手順書による相対リカバリ係数の目標値は0.38であるため、半導体PETの断面方向分解能の高さがうかがい知れる。また、10 mm球のリカバリ係数については、各放射能濃度の中で1.45 kBq/mlが最も良い結果となった。放射線の測定は不規則であり、何回か測定する必要がある¹⁰⁾。ファントム試験の回数は1回のみであったため、その回数を増やすことで結果が変わっていたのではないかと考えられた。

臨床画像評価ではほとんどの症例で、NECpatient, NECdensity, 肝SNRのそれぞれで十分評価基準を満たしていた (Fig.6-8)。本研究で用いた収集時間の

算出式①, ②は当院独自の算出式である。この算出式には体重当たりの投与量と収集時間の逆数の比を用いた。この理由は、体重当たりの投与量が高い場合 (または低い場合)、収集時間が短くても (または長くても) 同等の肝SNRになる報告があるためである¹¹⁾。また、本研究の対象患者489人は、選択バイアスのない連続サンプリングによる抽出である。そして依頼診療科はさまざまであり (Fig.1), FDG集積もさまざまであると考えられる。さらにファントム試験の結果から採用した算出式でのデフォルト値2.1 MBq/kgも、臨床では投与から撮像前までに患者は排尿するため、臨床での撮像時の放射能濃度はファントム時のそれとは異なる。しかし、ほとんど全ての症例で3つの評価項目の評価基準を満たしていた。そのため臨床で用いた収集時間の算出式で問題なかったといえる。また、Uptake Timeの平均が62.5分であったため、収集時間が長く他の患者に影響したということはなく、ほぼ当院の決められた予約枠、1人当たりの検査時間内で収めることができた。従って臨床で用いたデフォルト値の2.1 MBq/kgの2分収集についても問題なかったといえる。一方、一部の臨床画像については評価基準を満たさなかった。これらの臨床画像について、評価基準を満たさなかった評価項目以外の2つの評価項目は大きく評価基準を満たしていたため問題なしと判断し、原因の追究はしなかった。

リミテーションとして、ファントム試験時に臨床での患者の体重や体重当たりの投与量が予測できないことが挙げられる。本研究での対象患者489人の体重の平均は58.2 kg, 体重当たりの投与量の平均は4.3 MBq/kg, 最大は8.9 MBq/kg, 最少は1.6 MBq/kgであった。ファントム試験では6.2 MBq/kg, 3.2 MBq/kg, 2.1 MBq/kgを想定し、2.1 MBq/kgを臨床での収集時間の算出に用いるデフォルト値とした。デリバリーによる施設の場合、患者それぞれの体重当たりの投与量が異なるため、デフォルト値を高くすると臨床での体重当たりの投与量が大きく下回る場合もある。そのため、体重当たりの投与量を2.1 MBq/kgとできる限り少なく想定したファントム試験の結果から、連続サンプリングである489人に対してNECpatient, NECdensity, 肝SNRを算出できたことは評価できるといえる。

結論

ファントム試験では、 $Q/N_{10\text{mm}}$ がガイドラインの基

準値を超えたのは、ファントム内のBG領域の放射能濃度が4.22 kBq/ml, 2.11 kBq/mlでは1分収集から、1.45 kBq/mlでは2分収集からであった。また、いずれの放射能濃度も10 mm球ではリカバリ係数は1に満たなかったが、13 mm球からはほぼ1となった。

臨床画像評価では、2.1 MBq/kgの2分収集をデフォルトとした収集時間では、NECpatientではほぼ100%の患者で、NECdensityでは100%の患者で、肝SNRでは99.3%の患者でガイドラインを満たした。

利益相反

開示すべき利益相反はない。

表の説明

Table Discovery MIの性能

図の説明

- Fig.1 489人の内訳（診療科別）
 Fig.2 各放射能濃度における収集時間ごとの10 mm球のQH比
 Fig.3 各放射能濃度における収集時間ごとのファントム画像
 Fig.4 各放射能濃度における球体サイズごとのリカバリ係数
 Fig.5 各放射能濃度における球体サイズごとのリカバリ係数
 Fig.6 NECpatientのヒストグラム
 Fig.7 NECdensityのヒストグラム
 Fig.8 肝SNRのヒストグラム

参考文献

- 1) 医学中央雑誌刊行会：PET・PET/CT・サイクロトロン等設置施設名簿. 月間新医療, 第48巻第3号, 2021.
- 2) 医学中央雑誌刊行会：PET・PET/CT・サイクロトロン等設置施設名簿. 月間新医療, 第45巻第3号, 2018.
- 3) 金田朋洋：PET装置の進歩—半導体PET/CTを中心に—. 臨床画像, Vol.35, No.8, 890-898, 2019.
- 4) Teoh EJ, et al.: Phantom and Clinical Evaluation of the Bayesian Penalized Likelihood Reconstruction Algorithm Q.Clear on an LYSO PET/CT System. J Nucl Med, 56 (9), 1447-1452, 2015.
- 5) Teoh EJ, et al.: Novel penalized likelihood reconstruction of PET in the assessment of histologically verified small pulmonary nodules. Eur Radiol, 26 (2), 576-584, 2016.
- 6) Messerli M, et al.: Impact of a Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm on image quality in novel digital PET/CT: clinical implications for the assessment of lung tumors. EJNMMI Physics, 5 (1), 27, 2018.
- 7) 日本核医学会・PET核医学委員会：¹⁸F-FDGを用いた全身PET撮像のためのファントム試験手順書 第3版. 2018. http://www.jsnm.org/wp_jsnm/wp-content/themes/theme_jsnm/doc/FDG_WBscan_PhantomTest_20180117.pdf (2020.12.25)
- 8) 日本核医学会：FDG PET, PET/CT 診療ガイドライン 2020.
- 9) 福喜多博義, 他：がんFDG-PET/CT撮像法ガイドライン 第2版. 核医学技術, 33, 377-420, 2013.
- 10) 日本アイソトープ協会：はじめての放射線測定. 丸善出版, 2012.
- 11) 甲谷理温, 他：肝SNRを用いたデリバリー¹⁸F-FDG使用時のPET画像に影響を及ぼす因子および収集時間の検討. 日放技学誌, Vol.70, No.8, 784-792, 2014.