

—原 著—

# 核医学イメージングにおけるエネルギー分解能を 考慮した適正エネルギーウィンドウ設定についての検討

—第1報：エネルギースペクトルによる解析—

古嶋 昭博<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>熊本大学生命資源研究・支援センター

渡邊 裕之<sup>2)</sup> 荒尾 裕一<sup>2)</sup> 川崎 雅明<sup>2)</sup>

<sup>2)</sup>熊本市民病院

野口 輝也<sup>3)</sup>

<sup>3)</sup>熊本地域医療センター

松本 政典<sup>4)</sup>

<sup>4)</sup>熊本大学医学部保健学科

## Optimal Energy Window Setting Depending on the Energy Resolution for Radionuclides Used in Gamma Camera Imaging : Energy Spectrum Analysis

Akihiro KOJIMA<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Resource Development and Analysis, Kumamoto University

Hiroyuki WATANABE<sup>2)</sup>, Yuichi ARAO<sup>2)</sup> and Masaaki KAWASAKI<sup>2)</sup>

<sup>2)</sup>Kumamoto City Hospital

Teruya NOGUCHI<sup>3)</sup>

<sup>3)</sup>Kumamoto Regional Medical Center

Masanori MATSUMOTO<sup>4)</sup>

<sup>4)</sup>Course of Radiological Sciences, Kumamoto University School of Health Sciences

(article received : Jan 30, 2006 ; revision accepted : May 16, 2006)

### Summary

We measured the intrinsic energy resolution of a newer full-digital gamma camera using some radionuclides and investigated appropriate energy window setting for eleven photon-energies emitted from seven radionuclides which are commonly employed in nuclear medicine imaging.

The intrinsic energy resolution was about 9.35% at 140 keV of Tc-99m. For all the photoelectric energy peaks, the energy spectra ranged from 50 keV to 350 keV were analyzed. The energy window width which can detected 90% of the whole primary counts in the photoelectric energy peak was about 15% at the photon energy below 100 keV except Hg-201 characteristic x-rays (69–83 keV) from Tl-201 and about 13% above 100 keV. The width of the energy window of about 25% could reach the whole primary counts. For the complex photoelectric peak of Hg-201 characteristic x-rays, counting primary photons with the energy window whose center was placed at the center-of-mass of 72.54 keV was better

than at the peak energy of 71 keV.

In order to measure the primary counts of the targeted radionuclide more efficiently and more effectively in the nuclear medicine imaging, it is important to set an appropriate energy window width corresponding to the energy resolution of the gamma camera at each photoelectric energy peak.

**Key words:** Gamma camera, Energy resolution, Energy spectrum, Energy window setting

## 要 旨

最新のガンマカメラを用いて出力されたエネルギースペクトルから装置固有のエネルギー分解能を測定し、このエネルギー分解能を基にしたエネルギースペクトル解析により核医学イメージングに用いられている7核種11種類の光子エネルギーそれぞれに対するエネルギーウィンドウ設定について検討した。

測定の結果、対象としたガンマカメラのエネルギー分解能は140 keVにおいて約9.35%であった。このエネルギー分解能を有する装置において、Tl-201の特性X線69~83 keVを除く核種の光電ピークについては、全直接線の90%を計数できるエネルギーウィンドウ幅は100 keVより低い光電ピークで約15%および100 keVより高い光電ピークで約13%であり、ほぼ100%の直接線を計数できるエネルギーウィンドウ幅は全エネルギー範囲で約25%であった。Tl-201の特性X線69~83 keVの複合光電ピークについては、エネルギーウィンドウの中心をピーク位置よりもピークの重心においた方が同じ%エネルギーウィンドウ幅での計数効率性は良くなった。

核医学イメージングにおいて直接線を効率的かつ効果的に計測するためには、対象とする核種の光電エネルギーピーク毎に、使用するガンマカメラのエネルギー分解能に応じた適切なエネルギーウィンドウ幅を設定することが重要である。

## 1. 緒 言

現在、ガンマカメラによる核医学検査イメージングにはいろいろな核種が用いられているが、それぞれの核種はエネルギーの異なる $\gamma$ 線あるいは特性X線を放出している。そのエネルギーは、Hg-201の特性X線エネルギー69~83 keVからI-131の $\gamma$ 線エネルギー364 keVまでの約300

keVの広い範囲に渡り、対象とする核種の一般的なイメージングは、それぞれの光電ピークに単一または複数のエネルギーウィンドウを設定して行われる。このときのエネルギーウィンドウ幅は、ガンマカメラのエネルギー分解能が一般に悪いために、これまでほとんどの核種に対して一律的に20%が推奨されてきた<sup>1)</sup>。

エネルギー分解能が良くなれば直接線のエネルギー分布である光電ピークの広がり方がより狭くなるので、必然的に波高分析器のエネルギーウィンドウ幅を狭くすることができる。エネルギーウィンドウ幅を狭くすれば、測定データ中に混入する散乱線も減少するために画質の向上が期待できる。最近の市販されているガンマカメラのエネルギー分解能は、Tc-99mの140 keVに対して9%程度まで向上している。したがって、なるべく多くの直接線を計数し、できる限り散乱線含有割合(直接線計数に対する散乱線計数の比, scatter fraction, SF)を下げるためにはエネルギー分解能に応じた適切なエネルギーウィンドウ幅を選択することが重要になる<sup>2~3)</sup>。

本研究では、現在核医学検査で用いられているTl-201, Xe-133, Ga-67, Tc-99m, I-123, In-111, Kr-81mの7核種のイメージングにおいて、ガンマカメラより直接出力されるエネルギースペクトルを解析することにより、それぞれエネルギーの異なる光子に対するエネルギーウィンドウ幅と直接線計数割合との関係について調べ、装置固有のエネルギー分解能に応じた適正と思われるエネルギーウィンドウ幅を推定した。なお、エネルギーウィンドウの中心は、光電ピーク領域でのピーク位置、すなわち光子のエネルギー値とした。また、Tl-201のイメージングに利用されるHg-201特性X線の光電ピークに対しては、エネルギーウィンドウの中心が光電ピーク領域での全計数の重心位置(72.54 keV)にある場合につい

でも調べた。さらに、エネルギースペクトルデータを直接的にも間接的にも得ることができないガンマカメラに対して、エネルギー分解能を簡便に測定し、そのときのエネルギーウィンドウ幅とイメージ計数率およびSFの関係から適切なエネルギーウィンドウ幅について考察した。

## 2. 方 法

### 1) エネルギースペクトル解析によるエネルギー分解能の測定および光電ピークの計算

NEMA<sup>4)</sup>が規定している固有エネルギー分解能の測定法にしたがい、エネルギースペクトルを直接デジタル出力することが可能な最新の2検出器型ガンマカメラ(E. CAM, SIEMENS 社製)を用いて、Tl-201, Ga-67, Tc-99mの3核種から放出される $\gamma$ 線エネルギーに対してコリメータがない状態でエネルギースペクトル収集を行った。データ収集の際に数え落としが発生しないように、各核種の放射エネルギーは、微量(3.7 MBq)とし、距離は検出器から約2 mとした。

5つのエネルギー(93, 140, 167, 185, 300 keV)に対して得られたエネルギースペクトルデータを解析して、エネルギー分解能(%) (= 光電ピークの半値幅/光子エネルギー $\times 100$ )を測定した。次に、測定されたこれらのエネルギー分解能より50~350 keVの範囲における光子エネルギー(keV)とエネルギー分解能(%)との関係式を対数近似で求めた。このエネルギー分解能式を用いて、光子エネルギー( $E_0$ )に対する直接線のみによる光電ピークの分布を関数

$$f(E) = \sqrt{4(\ln 2)/\pi} / G(E) \cdot \exp[-4(\ln 2)/G(E)^2 \cdot (E - E_0)^2] \quad (1)$$

で近似した。ここで、 $G(E) = E \cdot R(E)/100$ ,  $R(E)$ は $E$ におけるエネルギー分解能(%)である。

光電ピークにおいて、エネルギーウィンドウの中心を $E_0$ とした、あるエネルギーウィンドウ幅( $E_1$ から $E_2$ )に対する直接線計数は、 $f(E)$ に適切な規格化係数を掛けて $E_1$ から $E_2$ まで積分することにより求めた。これよりピーク領域毎に設定したエネルギーウィンドウ幅(%) (= エネルギーウィンドウ幅(keV)と $E_0$ (keV)の比(%))に対する直接線計数を算出し、全光電ピークの直接線計数(全直接線計数)とそれぞれのエ

ネルギーウィンドウ幅(%)における直接線計数との比(相対直接線計数, relative primary counts)を計算した。また、対象とした全核種の光子について、「エネルギー分解能の値(%)がこの研究で使用した装置のエネルギー分解能の値(%)よりも全エネルギー範囲で一律に3(%)だけ値が大きい」とした場合もシミュレーションし、同様にエネルギーウィンドウ幅と相対直接線計数との関係を求めた。

### 2) エネルギーウィンドウ幅とイメージ計数値との関係を用いたエネルギー分解能の測定およびそのエネルギー分解能におけるイメージ計数率測定

エネルギースペクトルデータを直接的にも間接的にも得ることができないガンマカメラに対して、エネルギー分解能を簡便に測定し、そのエネルギー分解能におけるイメージ計数率を得るために次のような実験を行った。

比較的旧機種である2検出器型ガンマカメラ(GCA7200A, 東芝製)を用いた。(1)コリメータを外した検出器表面からTc-99m点状線源(3.7 MBq)を空中で2 m離れた場合と、(2)低エネルギー用高分解能(HR)コリメータを装着し、Tc-99m点状線源(150 MBq)とコリメータ表面までの距離を11 cmにして、前方吸収散乱のためのタフウォーターファントム(30 $\times$ 30 cm, 5 cm厚, 京都科学製)がある場合とない場合(空中)に対して、エネルギーウィンドウの中心を140 keVに固定したままその幅を5~30%まで1%毎に変化させながらプラナーイメージを撮像した(マトリックスサイズ256 $\times$ 256, 拡大率1.5倍, 収集時間1分)。

コリメータを外して収集された全てのイメージに有効視野とほぼ同じ大きさの関心領域(ROI)(50 $\times$ 40 cm)を設定して、1%ずつ異なるエネルギーウィンドウ幅のイメージに対する直接線計数値を求めた。次に、Tc-99mの光電ピーク全域をカバーする30%エネルギーウィンドウ幅のときの計数値(全直接線計数値)とそれぞれのエネルギーウィンドウ幅(%)における直接線計数値との比(相対直接線計数値)を求め、式(1)で140 keVでのエネルギー分解能を8, 10, 12%と一定にして計算されたそれぞれの光電ピークに対して得られた相対直接線計数値と比較した。

イメージ計数率（直接線計数率，散乱線計数率，全計数率）および SF を得るために，HR コリメータで収集された点状線源イメージそれぞれに  $10 \times 10$  cm の ROI を設定し，各エネルギーウィンドウ幅に対するイメージ計数率を算出した．なお，吸収散乱体がある場合の散乱線計数率は，直接線計数率と仮定した空中での計数率に  $\exp(-0.151/\text{cm} \times 5 \text{ cm})$  をかけたものを全計数率から引き算することにより求めた．また，散乱線計数率を直接線計数率で割ることにより，SF を計算した．全ての計数率に対して時間減衰補正を行った．

### 3. 結 果

#### 1) エネルギースペクトル解析によるエネルギー分解能の測定および光電ピークの計算

Figure 1 に，3つの核種に対して装置より出力されたエネルギースペクトルを解析して得られた各エネルギーでのエネルギー分解能とその近似曲線を示す．エネルギー分解能を算出するための真の光電ピークは，測定エネルギースペクトルから全領域で推定したバックグラウンド計数を減算することにより求めた．光子エネルギー  $E$  が  $50 \sim 120$  keV のときエネルギー分解能  $[R(E) (\%) = -3.898 \log(E - 50) + 16.874]$ ， $120 \sim 350$  keV のときエネルギー分解能  $[R(E) (\%) = -1.338$

$\log(E - 50) + 12.09]$  の2相性の対数曲線で近似した．なお，Tc-99m の  $\gamma$  線エネルギー  $140$  keV に対するエネルギー分解能は約  $9.35\%$  であった．光子エネルギーが低くなるにしたがい，エネルギー分解能は悪くなった．

Figure 2 に，Tl-201，Tc-99m，Ga-67 の3つの核種について式 (1) で計算されたエネルギースペクトルと測定されたエネルギースペクトルの比較を示す．Tl-201 から出る Hg-201 の光電ピークは，放出割合の異なる4つの特性X線の複合として計算した<sup>5)</sup>．光電ピーク領域において，計算されたエネルギースペクトルは測定されたエネルギースペクトルとよく一致していた．

Figure 3 に，7核種11種類の特性X線と  $\gamma$  線に対して式 (1) を用いて計算された光電ピークの分布を示す．全てのピーク面積は同じとしているが，エネルギーが低くなるほどピーク値が大きくなり，エネルギー分布領域も狭くなった．したがって，光電ピーク領域での単位エネルギー当たりの計数値は低エネルギー側光電ピークの方が大きくなるため，エネルギーウィンドウ幅のわずかな変化により計数が大きく増減することがわかった．また，2核種同時検査においては使用する放射エネルギーの違いも考慮しなければならないが，この図は近接した  $\gamma$  線エネルギーの光電ピーク同士の重なりをよく表しているため，適切なエネルギー

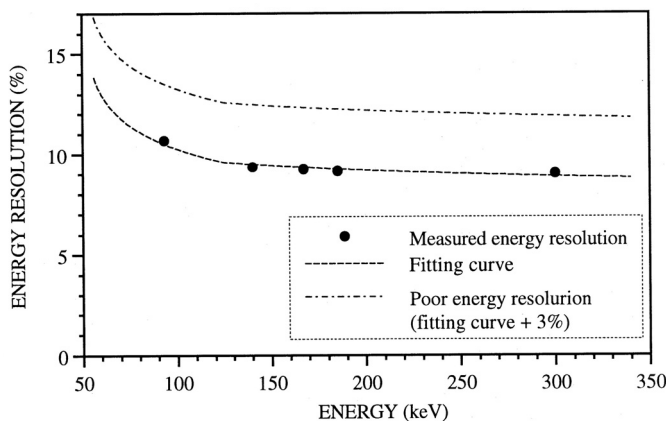


Fig. 1 エネルギースペクトルより測定されたエネルギー分解能に対する2相対の対数関数による近似．その近似曲線はさまざまな光子エネルギーの光電ピークを計算するために使用された．また，それよりも一律に3%だけ劣化したと仮定したときのエネルギー分解能についてもこの研究でシミュレーションされた．



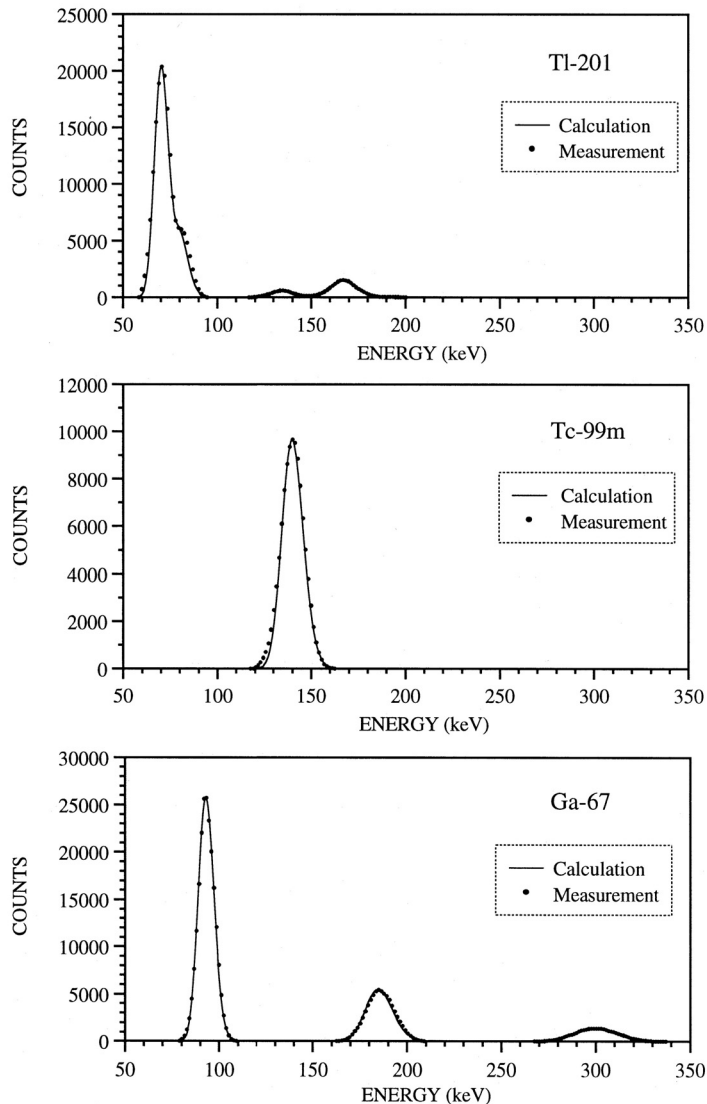


Fig. 2 Tl-201, Tc-99m, Ga-67 の3つの核種に対して測定されたエネルギースペクトルと計算で求められたエネルギースペクトルの比較。

ギーウィンドウ設定を行う際の参考になることもわかった。

今回使用したガンマカメラが有するエネルギー分解能で計算したエネルギーウィンドウ幅と直接線計数の関係を **Figure 4 (a)** に、このエネルギー分解能が全エネルギー領域で一律に3%劣化した(値で3%増加)と仮定して計算したものを **Figure 4 (b)** に示す。この研究では、文献2より90%の直接線を計数できるエネルギーウィンドウ幅が適切と考えた。そのときのエネルギーウィ

ンドウ幅は **Figure 4 (a)** から、Hg-201 特性X線エネルギーを除いて、81 keV (Xe-133) と 93 keV (Ga-67) に対して15%程度、その他の核種に対しては約13%となり、エネルギーウィンドウ幅が25%以上であればほぼ100%の直接線を計数できた。しかし、エネルギー分解能が一律に3%劣化した場合、**Figure 4 (b)** より直接線を90%計数できるエネルギーウィンドウ幅はそれぞれ19%と17%、ほぼ全計数を行うには30%のエネルギーウィンドウ幅が必要となることがわかった。

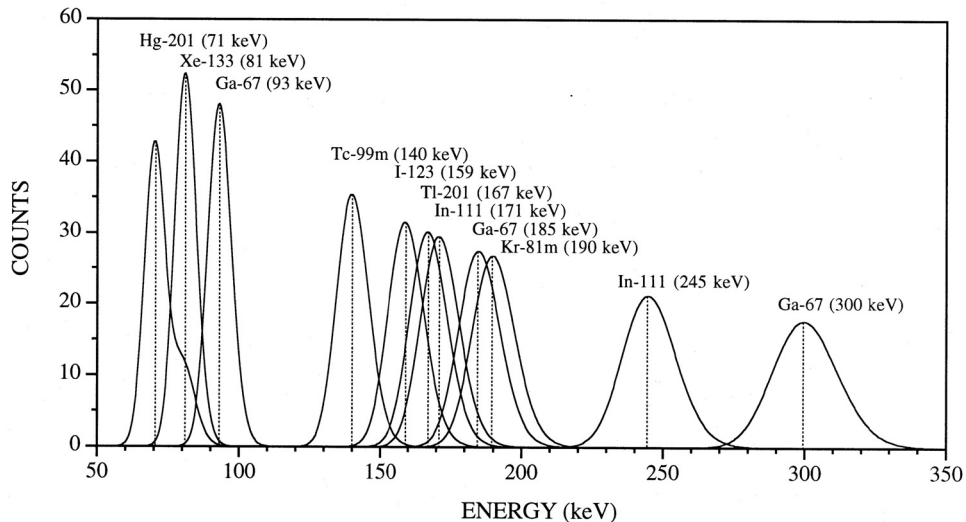


Fig. 3 7核種のさまざまな光子エネルギーに対して計算された光電ピーク。すべての光電ピーク面積は等しい。Hg-201 (71 keV) の光電ピークのみが約 80 keV のところに肩を持っており、簡単なガウス分布形をしていない。

Thallium-201 が放出する Hg-201 特性X線の光電ピークについては、エネルギーウィンドウ中心をピーク位置 (71 keV) と重心位置 (72.54 keV) に置いた場合について調べた。エネルギーウィンドウ中心が重心にある方が同じ%エネルギーウィンドウ幅に対する直接線の計数が大きくなった。従って、Hg-201 特性X線の光電ピークに対して90%の直接線を計数しSFを小さくするようなエネルギーウィンドウとしては、140 keVでのエネルギー分解能が9~10%の装置では、エネルギーウィンドウ中心を72.54 keVとしてエネルギーウィンドウ幅を25%に、そのエネルギー分解能が12%程度であればエネルギーウィンドウ幅を28%にする設定が適当であることがわかった。

2) エネルギーウィンドウ幅とイメージ計数値との関係を用いたエネルギー分解能の測定およびそのエネルギー分解能におけるイメージ計数率測定

Figure 5 にコリメータがない状態で測定された Tc-99m 光電ピーク領域でのエネルギーウィンドウ幅と相対直接線計数との関係を、また、Figure 6 に5 cmの吸収散乱体がある場合とない場合でのエネルギーウィンドウ幅とイメージ計数率およびSFとの関係を示す。Figure 5において、測定により得られた結果は140 keVで計算されたエネルギー分解能10%のデータにほとんど一致し、使用したガンマカメラのメーカーが公表し

ている性能と同じであった。

Figure 6 より、直接線計数率はエネルギーウィンドウ幅が約20%で飽和したが、散乱線計数率はエネルギーウィンドウ幅の広がりとともに直線的に増加した。したがって、SFもエネルギーウィンドウ幅が広くなると同様に増加したが、エネルギーウィンドウ幅が約14%以上でその増大率はより大きくなった (図中点線表示)。このエネルギーウィンドウ幅14%は Figure 5 から約90%の直接線を計数できる広さであるが、エネルギー分解能約9.35%のとき Figure 4 (a) で示された90%の直接線計数率が得られるエネルギーウィンドウ幅13%よりも少し広がったことと矛盾していなかった。

#### 4. 考 察

ガンマカメラの性能の進化と共にエネルギー分解能の改善も目覚ましく、最新のガンマカメラが有するエネルギー分解能は約9%を達成している。エネルギー分解能が向上すると光電ピークの広がり小さくなるため、体外で直接線と散乱線を検出する際のエネルギー的な分離がより容易になる。しかし、イメージ収集のためには光電ピーク領域にある程度の幅を持ったエネルギーウィンドウを設けなければならないため、必然的に散乱線も直接線と共に計測されることになる。

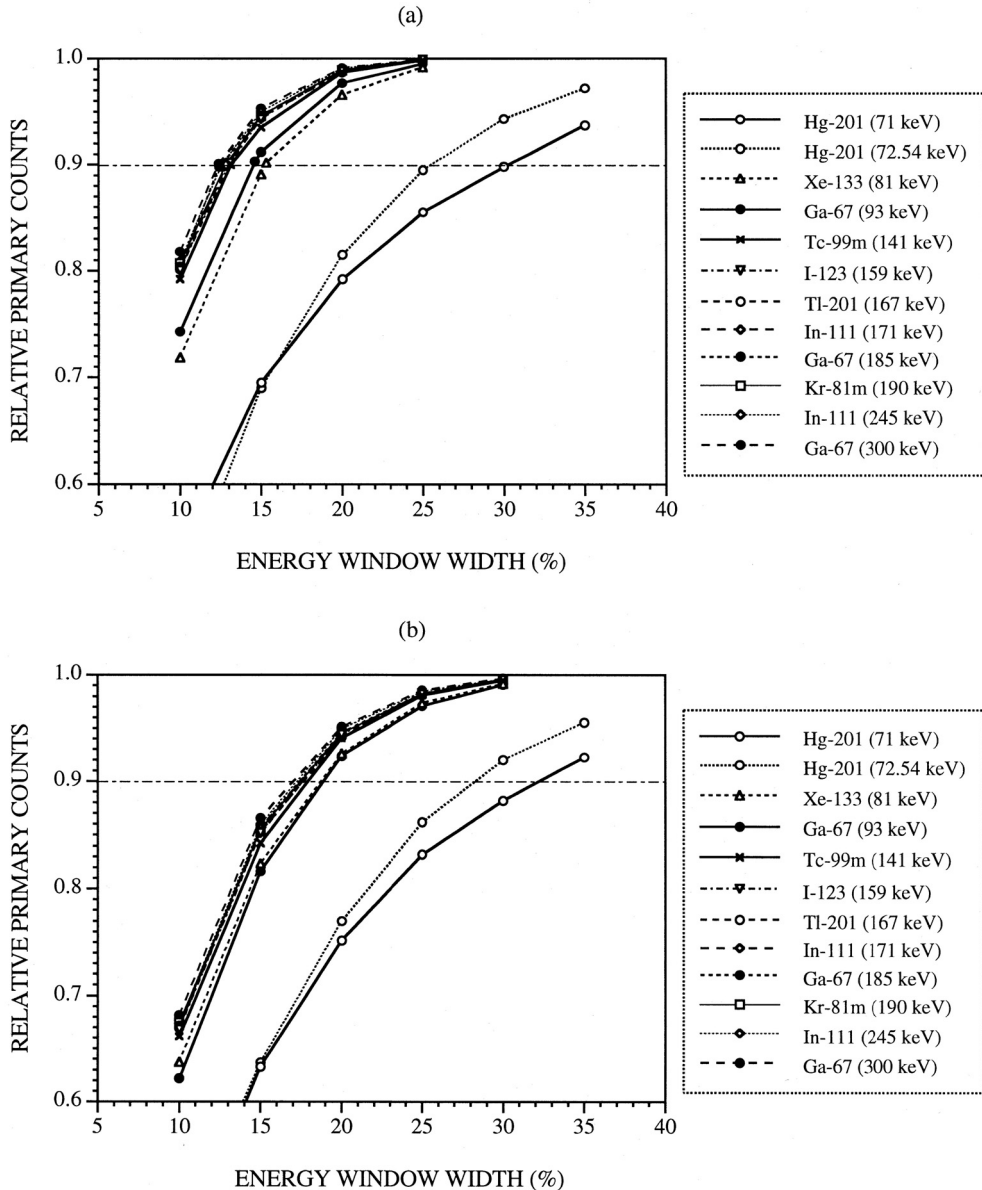


Fig. 4 さまざまな光子エネルギーに対するエネルギーウィンドウ幅 (%) と相対直接線計数との関係。エネルギーウィンドウ幅 (%) は、エネルギーウィンドウ幅 (keV) と光子エネルギー (keV) との比で定義された。(a) エネルギー分解能が良い場合 (Fig. 1 の近似曲線)。(b) エネルギー分解能が悪い場合 (Fig. 1 の近似曲線+1% 3%)。

われわれは以前、光電ピーク領域にエネルギーウィンドウを設定する際に、ガンマカメラ固有のエネルギー分解能に応じた適切なエネルギーウィンドウ位置と幅を用いなければ、エネルギー分解能が良いという利点を画質向上のために活用していないことを報告した<sup>2-3)</sup>。偽の位置情報を持っている散乱線が画像に数多く含まれていると、線

源像の辺縁にボケが生じたり、また欠損部のコントラストが低下したり、さらに放射能の定量化が困難になる。これまで、光電ピーク領域でのエネルギーウィンドウ設定を工夫することにより簡単に SF を小さくする方法として、古くから、エネルギーウィンドウの中心位置を変えずに幅を狭くする対称エネルギーウィンドウ法<sup>6)</sup>や、エネルギー

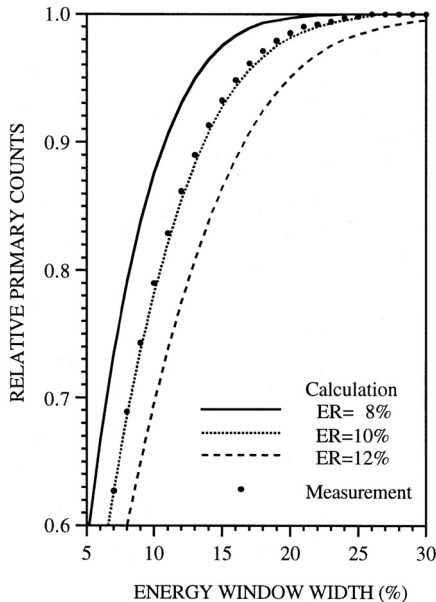


Fig. 5 Tc-99m 点線源を空中で測定したときの各エネルギーウィンドウ幅 (%) に対する相対直接線計数と 3 つのエネルギー分解能 (8, 10, 12%) に対して計算された相対直接線計数との比較。エネルギーウィンドウ幅 (%) は、エネルギーウィンドウ幅 (keV) と光子エネルギー (keV) との比で定義された。

ギーウィンドウの中心位置をピークよりも高い方へシフトする非対称エネルギーウィンドウ法<sup>7)</sup>が用いられてきた。しかし、これらの方法は同時に直接線計数率も低下させるという欠点も持っている。その後、光電ピーク全体の直接線を計数しながら散乱線を簡便に精度良く取り除く散乱線補正法として TEW 法が提案され、その有効性については数多く報告されている<sup>8)</sup>。

散乱線補正法を使わない一般的なイメージングの場合、直接線計数と散乱線計数の含有割合は、それらが構成する画像の画質に影響を及ぼすが、これらの割合を決定するエネルギーウィンドウ設定は、これまでエネルギー分解能にかかわらず、ガンマカメラメカによる指導または従来の古い機種からの継続、あるいはイメージングプロトコルの勧告<sup>1)</sup>を参考にして経験的に行われてきた。NEMA の方法<sup>4)</sup>に従い、ガンマカメラとマルチチャンネルアナライザーの組み合わせまたはガンマカメラ単独でエネルギースペクトルを出力できれば、装置の固有エネルギー分解能を容易に

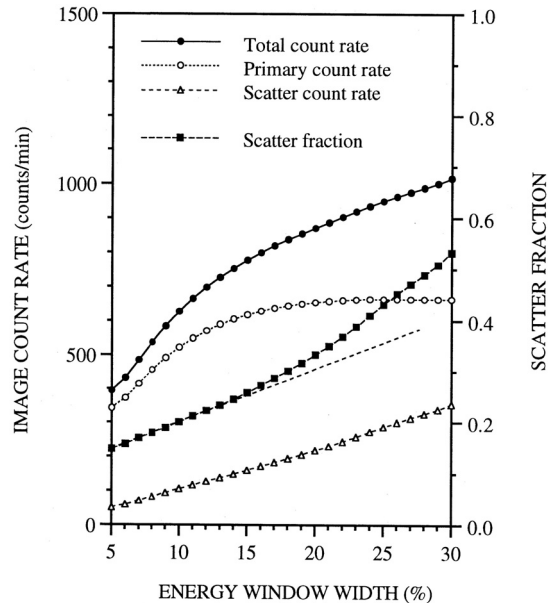


Fig. 6 5 cm 厚の水等価物質 (前方散乱) を有する Tc-99m 点線源に対して測定されたエネルギーウィンドウ幅 (%) とイメージ計数率および散乱線含有割合 (SF) との関係。エネルギーウィンドウ幅 (%) は、エネルギーウィンドウ幅 (keV) と光子エネルギー (keV) との比で定義された。

測定することができる。しかし、Figure 5 で示したように、装置よりエネルギースペクトルデータを直接的または間接的に出力できない場合でも、たとえば空中に置かれた Tc-99m を使ってエネルギーウィンドウ幅を少しずつ変化させながら撮像したデータと、あらかじめ様々なエネルギー分解能に対して計算されたエネルギーウィンドウ幅と相対直接線計数の関係とを比較することによりガンマカメラ固有のエネルギー分解能を推定することができる。もし、このような実測あるいはメーカー公表によりエネルギー分解能がわかれば、その分解能に適したエネルギーウィンドウ幅を設定することができ、SF をなるべく増やさずに直接線をできるかぎり多く計数するような効果的なイメージングが可能となる。

Figure 4 の結果より、Tc-99m の  $\gamma$  線エネルギー 140 keV でのエネルギー分解能が 9 ~ 10% のとき、イメージングに用いる光子エネルギーピークに対するエネルギーウィンドウ幅を 15% にすれば、Hg-201 特性 X 線を除いた実用核種に対して直接線を 90% 計測できる。しかし、エネルギー

ギー分解能が12%程度まで劣化するとエネルギーウィンドウ幅が19%以上でなければ90%の直接線計数が不可能になる。

TEW 法は、メインウィンドウからサブウィンドウ計数により推定された散乱線成分を差し引いて散乱線補正を行う方法であるが、なるべくサブウィンドウに直接線成分を含まないように、直接線の光電ピークを十分にカバーするようなメインウィンドウ幅を設定した方が散乱線補正効果は高くなる<sup>9)</sup>。したがって、この場合には、140 keVでのエネルギー分解能が9～10%のときメインウィンドウ幅を25%、そのエネルギー分解能が12%程度ではメインウィンドウ幅を30%に設定した方が良いと思われる。

以上のように、イメージングに用いられる直接線の光電ピークが単純なガウス分布であるときは、エネルギーウィンドウ中心をピーク位置にして適切なエネルギーウィンドウ幅を決めることができるが、Tl-201 のイメージングに利用される Hg-201 の光電ピークは、複数の特性X線から構成されているため単純なガウス分布でなく、その重心はピーク位置よりも高いエネルギー側にある。したがって、エネルギーウィンドウ中心を重心に置いた方が当然直接線の計数効率は高くなる。また、TEW 法を適用する際も、直接線をほとんど計数するためには、メインウィンドウ幅をかなり広く取る必要がある (71 keV でエネルギー分解能12%のとき、エネルギーウィンドウ中心 73 keV で幅47%)<sup>9)</sup>。

本研究では、I-131 イメージング用  $\gamma$  線エネルギー 364 keV については計算を行わなかったが、**Figure 1** より推定される 364 keV でのエネルギー分解能より、Tc-99m の  $\gamma$  線エネルギー以上のエネルギーウィンドウ設定条件と同じにすれば十分である。また今回は、エネルギースペクトル解析によりエネルギー分解能に応じた適切なエネルギーウィンドウの設定について検討したが、今後、それらの設定の効果について、イメージ評価により確認したい。

## 5. 結 論

最新のガンマカメラから出力されるエネルギー

スペクトルを解析することにより、その装置固有のエネルギー分解能を測定し、実用核医学イメージング用 7 核種の光子エネルギー毎のエネルギーウィンドウ設定について検討した。本研究の結果より、直接線を効率よく検出するためには、使用するガンマカメラのエネルギー分解能に応じて適切なエネルギーウィンドウを設定することが重要であることがわかった。今後、これらのエネルギーウィンドウの設定効果について、さらにイメージ解析により検証および評価したい。

## 参考文献

- (社)日本アイソトープ協会医学・薬学部会, 核医学イメージング規格化専門委員会: 標準的核医学イメージングプロトコル (1994年第3次改訂). RADIOISOTOPES, **43**(9): 81-114, 1994
- 藤田 透, 渡部洋一編: 放射線医療技術学叢書 (9). 「核医学検査技術学入門」: 63-65, 日本放射線技術学会, 1995
- Kojima A, Matsumoto M, Takahashi M, et al: Effect of energy resolution on scatter fraction in scintigraphic imaging: Monte Carlo study. Med Phys, **20**(4), 1107-1113, 1993
- National Electrical Manufacturers Association: Performance measurements of scintillation cameras. Standards Publ., No. NU1-1980, Washington. D.C., 1980
- 古嶋昭博, 松本政典, 大山洋一, 他: TI-201 イメージングのための Hg-201 特性X線ピーク領域におけるエネルギースペクトル解析. 核医学, **34**(2): 95-103, 1997
- Sanders TP, Sanders TD and Kuhl DE: Optimizing the window of an angier camera for Tc-99m, J Nucl Med, **12**(11): 703-706, 1971
- La Fontaine RL, Stein MA, Graham LS and Winter J: Cold lesions: enhanced contrast using asymmetric photopeak windows. Radiology, **160**(6): 255-260, 1986
- Ichihara T, Ogawa K, Motomura N, Kubo A and Hashimoto S: Compton scatter compensation using the triple-energy window method for single- and dual-isotope SPECT. J Nucl Med, **34**(12): 2216-2221, 1993
- 古嶋昭博, 松本政典, 大山洋一, 他: TI-201 イメージングにおける off-peak triple energy window 収集による散乱線補正. 核医学, **34**(9): 789-796, 1997