研究論文

1125. 固体放射線検出素子における γ 線応答の入射角度依存性

山西 弘城^{1,*}, 山口 作太郎^{1,†}, 山口 貴行², 植木 紘太郎³

Dependence on Incident Angle of Solid State Detector Response to Gamma-Rays

Hirokuni YAMANISHI, Satarou YAMAGUCHI, Takayuki YAMAGUCHI and Kohtaro UEKI

The shape and size of a NaI(Tl) scintillator that should maximize response variation with γ -ray incident angle was estimated by analytical model calculation. It proved that, even for gamma rays of energy exceeding 1 MeV, a slab detector measuring 50 cm $\times$ 50 cm $\times$ 5 cm thick should present a ratio of at least 4 between maximum and minimum responses against incidence at different angles. For a sample case of 60 keV gamma rays, estimation of the incident angle dependence by means of Monte Carlo simulation agreed well with experiment using a CZT detector. The counts from photoelectric peak varied with incident angle roughly along a sine curve. The foregoing finding served as basis for proposing a practical direction finder for γ -ray source operating on the principle of determining the source direction from variations in count with incident angle.

KEYWORDS: NaI(Tl) scintillator, CZT detector, gamma radiation, radiation detector, energy spectra, incident angle, detector response, MCNP, imaging detector, source distribution

I. 緒 言

空間線量率を測定するのに用いられる通常の放射線検出器は、その感度の入射角度依存性が小さくなるように設計製作されている。視点を変えて、入射角度依存性が大きくなるように放射線検出素子の形状を設計することによって、遠方にある γ 線源の方向を特定できる検出器の実現が可能になると考えられる。平板状の放射線検出素子は、形状が適当であれば、入射角度によって感度が異なる。この検出素子を γ 線場に設置し、計数の方向分布を得ることで γ 線の飛来方向を検出できるようになると考えられる¹⁾。

原子力や放射線利用分野において、遠隔に存在する放射線源の位置と強度分布の同定は重要課題の1つである。例えば、原子力施設等における表面汚染測定、漏洩放射線監視などに適用される。一方、 γ 線天文学の分野においても、 γ 線の飛来方向の特定が試みられている。現在利用されている γ 線画像検出器は、大きく3種類に分類できる。1つは、鉛製あるいはタングステン製のコリメータによって視野を制限し、視野をスキャンして広角の γ 線画像を得るもの²⁻⁶⁾。2つめは、線源と検出器の間にマスクパターンを置き、検出された影の形から線源分布を推定するもの⁷⁻⁹⁾。そして、3つめは、いわゆるコンプトンカメラで、1段目の検出器で検出された γ 線の散乱方向とエネ

ルギーを2段目の検出器で追跡するものである¹⁰⁻¹⁵⁾。コリメータを用いた装置は視野を限定しているので、検出効率が小さいという短所を持つ。さらに1 MeVを越える γ 線は遮蔽が難しくうまくコリメートできないので画像化は困難である。コンプトンカメラは、複雑で精密な信号処理系が必要である。コリメータ等によって視野を限定している装置は、着目する方向以外の線源については検出しづらい。

著者らの構想にある装置は検出素子の感度の入射角度依存性を利用したものであり、上記の3種類とは全く異なるものである。平板状検出素子を回転させて4 π 方向の計数分布を得て、その分布情報から γ 線の飛来方向を検出する。これは従来にない新発想である。コリメータによる視野の限定は最小限にとどめ、かつ有感体積の大きな検出素子を用いるので、従来の放射線画像装置に比べて検出効率が桁違いに大きくなる。そのため、飛来する γ 線の線量率が低レベルであっても短時間で測定できる。また、視野を広くとっているので死角なく測定しやすい。さらに、検出部の形状を最適化することで、従来の装置では困難であった1 MeVを越える γ 線をも画像化できる可能性がある。大量に発生した低レベル放射性廃棄物の選別にも有効であると考えられる。

以上の観点から、放射線検出素子の形状と γ 線エネルギースペクトルの入射角度による変化との関係について検討する意義があると考え、応用を視野に入れて特性について調べた。

II. 原理と解析的計算

平板形状のシンチレータや半導体素子を放射線検出素子に用いる。Fig. 1に示すように、平板形状の検出素子を γ

¹ 文部科学省核融合科学研究所 (Natl. Inst. for Fusion Sci.)

² アラサット㈱ (Arasat Co., Ltd.)

³ 海上技術安全研究所 (Natl. Maritime Res. Inst.)

(2001年 6月6日 受理; 2001年 9月27日 査読通過)

[†] 現在、中部大学工学部 (Fac. of Eng., Chubu Univ.)

* 著者連絡先: Tel. 0572-58-2084, Fax 0572-58-2610,

E-mail: yamanisi@nifs.ac.jp

Fig. 1 Schematic of the relationship between count and incident angles

線場に置いた時、検出される計数は検出素子表面への入射角度によって変化する。それは、線源と対面する検出素子表面への γ 線入射線束と検出素子での反応確率によって決まる。入射線束は、垂直入射の時最大となり、平行入射の時最小となる。 γ 線の反応確率が大きい時は、検出素子へ入射する線束の変化がそのまま計数の変化となって表れる。この時、 γ 線は検出素子表面でほとんどが相互作用するため、結果として、計数の分布は垂直入射を最大値とする正弦曲線に近い形となる。

次に、解析的計算によって、平板状検出素子の感度の入射角度依存性について計算し、適切な形状の素子は入射角度依存性が大きいことを示す。Fig. 2に解析モデルを示す。幅と奥行きが W 、厚みが T であるような平板状検出素子を仮定する。その検出素子に単色の γ 線が平行に入射する場合について計算する。検出素子内での反応量が計数となり、計数は反応確率と検出素子の幾何的断面積との積で決まる。そのうち反応確率は γ 線の検出素子内での通過距離に依存する。入射角は、Fig. 2に示すように、平板の大平面の法線方向を 90° とする。入射角 θ の範囲の違いで場合分けし、2種類の式を用いる。1つは平板に対して正面から入射する場合($\theta_0 < \theta \leq \pi/2$)であり、もう1つは側面から入射する場合($0 \leq \theta \leq \theta_0$)である。 θ_0 は、 $\tan \theta_0 = T/W$

$$i) \quad \theta_0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

Fig. 2 Analytical model for response calculation of slab detector

W に相当する角度である。

正面入射時の反応量 E_1 は、(1)式で表される。

$$E_1 = E_{1M} + 2E_{1C} \quad \left(\theta_0 < \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (1)$$

$$E_{1C} = W \sin \theta \int_0^{T/\tan \theta} \left[1 - \exp \left(-\mu \frac{x}{\cos \theta} \right) \right] dx \quad (1a)$$

$$E_{1M} = W \left(W - \frac{T}{\tan \theta} \right) \sin \theta \left[1 - \exp \left(-\mu \frac{T}{\sin \theta} \right) \right] \quad (1b)$$

そして、側面入射時の反応量 E_2 は(2)式で表される。

$$E_2 = E_{2M} + 2E_{2C} \quad (0 \leq \theta \leq \theta_0) \quad (2)$$

$$E_{2C} = W \sin \theta \int_0^W \left[1 - \exp \left(-\mu \frac{x}{\cos \theta} \right) \right] dx \quad (2a)$$

$$E_{2M} = W(T - W \tan \theta) \cos \theta \left[1 - \exp \left(-\mu \frac{W}{\cos \theta} \right) \right] \quad (2b)$$

端部と中央部に分けて計算しており、(1a)式と(2a)式は端部に関する計算であり、(1b)式と(2b)式は中央部に関する計算である。検出素子の着目する γ 線エネルギーに対する全減弱係数を μ で表した。

上述の式で示したように、入射角度依存性を大きくするには大きな μT が必要である。例えば、(1b)式において、 μT が大きい時、 E_{1M} が入射角 θ によって大きく変化する。もし、 μ の大きな物質であると検出素子が小さくても同じ性能を持つことができる。

これらの式を検出素子として一般的に使用されているNaI(Tl)シンチレータに適用し入射角を変化させたときのシンチレータの反応量を計算した。入射 γ 線エネルギーが低くなると μ が大きくなるため、計数の入射角度依存性は大きくなる。 μ が小さな場合として、 $\mu = 9 \text{ m}^{-1}$ で計算した。この値は、NaIでの最小の全減弱係数である $\mu = 13 \text{ m}^{-1}$ よりも小さい値である。

まず、入射角度依存性と検出素子の厚み T との関係に

ついて検討した。もし $\mu T \ll 1$ なら、 E_{1M} の θ による変化は小さい。 W を100 cmと固定して T を変化させた結果、厚みが厚いほど入射角度依存性が大きく、大きな入射角度依存性を持つために必要な厚みは5 cmであった。これは $\mu T = 0.45$ に相当する。

次に T を5 cmにした場合の必要な W について検討した。計算結果をFig. 3に示す。垂直入射時を1として規格化した。 W と T の比が1に近い時は、入射角による計数の変化は小さい。これは端部の計数の全計数に占める割合が中央部のそれよりも大きくなるためである。環境測定用の放射線検出器が入射角度依存性のないように形状を決めているのとは一致する。 W と T の比が大きくなるに従って入射角に対する計数変化は大きくなる。 W が大きいほど、入射角度依存性は大きくなるが、50 cmが適当な大きさと考えられる。以上の検討結果から、 $W = 50$ cm, $T = 5$ cmの平板状NaIが、1 MeVを超えるエネルギーの γ 線に対しても入射角度依存性を持つ形状であることを確認した。

III. MCNP による計算

前章で検討した形状について、モンテカルロ計算コードMCNP-4B¹⁶⁾を用いてシミュレーション計算を行い、着想の正しさを確認した。この計算によって、入射角度による γ 線エネルギースペクトルの変化も把握できる。 γ 線入射に伴う検出素子からの出力スペクトルは、 γ 線によって検出素子内で発生する2次電子の運動エネルギーではほぼ記述できると考えられる。したがって、ここでは、パルス高タリーを用いて検出素子の応答計算とする。エネルギービンは10 keV または 20 keV に設定した。

1 m 径 $\times$ 5 cm 厚の円盤型NaI(Tl)シンチレータについて、検出素子の遠方に点線源を置き、検出素子中心との距離を変えずに線源を移動させ、入射角度を変える。線源は、 ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co とした。Table 1にこれら線源の γ

Table 1 The attenuation coefficients of NaI for some γ -ray energies

Nuclide	γ -ray energy (keV)	Attenuation coefficient; μ (m^{-1})	$\mu \times 5$ cm
^{241}Am	60	2.0×10^3	101
^{57}Co	122	3.1×10^2	16
^{137}Cs	662	2.8×10^1	1.4
^{60}Co	1,173, 1,332	1.9×10^1	1.0

線エネルギーとそれに対するNaI(Tl)の全減弱係数とを示す。円盤状検出素子の法線を含む平面上に距離20 mで線源を設置する。法線方向を入射角 90° の垂直入射とし、入射角を 0° から 90° まで、 10° ごとに設定する。空気の組成は窒素80%, 酸素20%とし、シミュレーションにおいて机や部屋は考慮していない。Fig. 4に光電ピーク計数の入射角度による変化を示す。計数が角度の増加とともに大きくなっており、垂直入射時に最大となる。応答曲線の形状は、入射エネルギーによって異なる。低エネルギーでは、垂直入射時の計数と水平入射時の計数との比が約5であるが、高エネルギーになると約4になる。このように、1 MeVを超える γ 線に対しても計数の入射角度依存性が認められた。これは、先の解析的計算の結果と一致する。

次にエネルギースペクトルの変化に着目する。662 keVの γ 線が入射した場合の例をFig. 5に示す。光電ピークの高さは垂直入射時が最高で、角度が小さくなるに従って低くなっている。そのほかに、低エネルギー側でも入射角度の違いによってスペクトルの形状が異なっている。 γ 線飛来方向特定にこの形状変化のパターンを利用することも考えられる。

Fig. 3 Response variation between incident angles calculated with the analytical model

Fig. 4 Variation of photo-electric peak count with incident angles, simulated by MCNP

The distance between the detector and source was set as 20 m.

Fig. 5 Variation of energy spectrum with incident angles, simulated by MCNP

The energy of incident γ -ray was 662 keV.

IV. CZT 実験

検出素子の γ 線スペクトルの入射角度依存性について、CZT 検出器を用いて実証し、MCNP の計算結果と比較した。CZT の γ 線減弱係数は、その密度と平均原子番号から、NaI(Tl) の約13倍と算定される。そのため、CZT を用いると NaI(Tl) に比べてよりコンパクトなシステムにできる。検出器と線源等の配置を Fig. 6 に示す。検出器の中心が回転台の中心になるように設置した。線源には、 ^{241}Am (3.6 MBq) と ^{57}Co (0.92 MBq) を用いた。実験に用いた CZT 検出器は eV PRODUCTS 社製の eV-1442 で、組成は $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ 、素子の寸法は $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 厚であった。素子への印加電圧は 300 V とし、素子からの出力信号は、前置増幅器および増幅器を介して多チャンネル波高分析器に送り、データを取得した。素子正面への垂直入射を 90° とし、回転台を $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で、 5° または 10° ごとに固定し、それぞれの位置でのスペクトル情報を得た。線源との距離を 25 cm、計数蓄積時間を 30

Fig. 6 Experimental arrangement on CZT

~240 s とした。

Fig. 7 に実験で得られたエネルギースペクトルの一例を示す。このように入射角度が異なるとエネルギースペクトルの形も異なる。これを利用して、エネルギースペクトルの形から γ 線の入射方向を特定できる可能性が示唆される。本研究では検討していないので、今後の課題である。

光電ピーク面積に着目して、その入射角度依存性の結果を Fig. 8 に示す。MCNP による計算結果とあわせて示す。垂直入射時の計数を 1 としてそれとの相対値を示している。 ^{241}Am の 60 keV への応答は、実験結果と計算結果とが一致しており、正弦曲線上にある。 γ 線のエネルギーが低い時には、 γ 線の減弱係数が大きく、ほとんどの γ 線が素子前面の表面領域で反応する。したがって、計数の大小は γ 線源から見た素子の投影面積、すなわち素子に入射した γ 線束に依存する。その結果として、入射角度に

Fig. 7 Obtained energy spectrum with CZT for ^{57}Co γ -ray source

Fig. 8 Comparison between the experiment and the simulation of photo-electric peak count with CZT
The source is set 25 cm away from the detector.

対する計数は正弦曲線上にある。一方、 ^{57}Co の122 keV γ 線への応答は、実験結果と計算結果とが一致していない。実験結果では入射角度による計数の差異は小さくなっている。これは、CZTの実効有感厚さが、計算で想定した2 mmよりも薄いためと考えている。実測した入射角度依存性と一致するような厚みを計算によって求めることによって、CZT検出器の実効有感厚さを推定する方法の可能性が示唆される。

V. 結 論

シンチレータや半導体素子の形状を適当に選択すると、 γ 線の入射角度に依存して検出感度が変わることが計算によって確認できた。解析的計算で、平板状のNaI(Tl)シンチレータの幅と厚みを様々に変えた場合の入射角度依存性について検討した。その結果、厚み5 cmで、幅と厚みの比が6以上であれば、1 MeVを超えるエネルギーの γ 線に対しても入射角度依存性が大きいことを確認した。モンテカルロ計算コードMCNPによる計算で、解析的計算の確認を行うと同時に、エネルギースペクトルの変化に関する情報を得た。さらに、CZT検出器についてMCNP計算結果と線源を用いた照射実験結果とを比較した。60 keVの γ 線に関する計数は入射角度に対して変化し、計算値と実験値の傾向が一致した。一方で122 keVの γ 線については一致しなかった。CZT素子の実効有感厚が計算で仮定した厚みよりも薄いため一致しなかったと考えている。

本研究で得た知見に基づいて、迅速簡便な γ 線飛来方向検出器への応用について考案した。入射角度依存性を持つ平板状の検出素子を 4π 方向について粗く回転スキャンする、もしくは複数の検出素子を場に設置して、その検出された計数の方向分布等から γ 線の飛来方向を割り出す。高い空間分解能は期待できないけれども、線源の有無と強度そしておおよその方向を把握することが可能である。さらに、線源のある方向について、詳細な計数分布測定を行い、スペクトル情報をデータ処理することで、より正確な方向を特定できる可能性がある。このように γ 線飛来方向検出器への応用を考えた場合、複数線源への対応、方向分解能の向上のためのスペクトル情報処理方法の開発などの課題が残されている。

本研究は、文部科学省核融合科学研究所の共同研究を推進する過程で発案し、まとめたものであり、大林治夫氏、佐久間洋一氏には共同研究推進にご尽力頂き、多大な助力を得ました。共同研究のメンバーである寺町康昌、佐藤利和、尾鍋秀明、神野郁夫、磯部光孝、野村和泉、宇田達彦の各氏には、実験データの収集作業や様々な議論に参加い

いただきました。ここに付記して謝意を表します。

— 参考文献 —

- 1) 山西弘城, 山口作太郎, 大林治夫, 他, “検出部の形状効果を利用したガンマ線画像装置の開発”, 原子力学会「1998秋の大会」予稿集, 第I分冊, B68, (1998).
- 2) 宮尾英彦, 間野 正, 池田諭志, 塩月正雄, 菅谷敏克, “放射線映像化装置の開発”, 原子力誌, **30**[11], 971(1988).
- 3) R. Gould, J. E. Tarpinian, E. S. Kenney, “An automated system for gamma radiation field mapping”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A299**, 538(1990).
- 4) R. H. Redus, V. Nagarkar, L. J. Cirignano, W. McGann, M. R. Squillante, “A nuclear survey instrument with imaging capability”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **39**[4], 948(1992).
- 5) V. G. Baryshevsky, A. A. Khrutchinsky, V. I. Moroz, M. D. Dezhurko, “Gamma-ray spectroscopic system for remote detection and monitoring of fissile materials”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **41**[4], 971(1994).
- 6) S. V. Guru, Z. He, D. K. Wehe, G. F. Knoll, “A portable gamma camera for radiation monitoring”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **42**[4], 940[1995].
- 7) G. Ventura, H. M. Horstman, A. Brighenti, C. Cavani, M. Camprini, P. Cazzola, G. Giovannini, C. Labanti, J. M. Poulsen, “A balloon-borne instrumentation for cosmic gamma-ray burst detection and measurement”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **226**, 524(1984).
- 8) K. P. Ziocok, C. J. Hailey, T. B. Gosnell, J. H. Lupton, F. A. Harrison, “A gamma-ray imager for arms control”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **39**[4], 1046(1992).
- 9) J. M. Perez, P. Olmos, “The CIEMAT-PSD gamma camera prototype results of the tests in a controlled installation”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A348**, 536(1994).
- 10) J. B. Martin, G. F. Knoll, D. K. Wehe, N. Dogan, V. Jordanov, N. Perick, M. Singh, “A ring Compton scatter camera for imaging medium energy gamma rays”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **40**[4], 972(1993).
- 11) H. J. P. Kuykens, S. A. Audet, “A 3×3 silicon drift chamber array for application in an electronic collimator”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A273**, 570(1988).
- 12) G. W. Phillips, “Gamma-ray imaging with Compton cameras”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **B99**, 674(1995).
- 13) D. Doria, M. Singh, “Comparison of reconstruction algorithms for electronically collimated gamma camera”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-29**[1], 447(1982).
- 14) R. B. Piercey, A. G. Weisenberger, J. E. McKisson, C. Girit, “Preliminary characteristics of a germanium-based, Compton-scatter telescope”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **36**[1], 887(1989).
- 15) N. Dogan, D. K. Wehe, G. F. Knoll, “Multiple Compton scattering gamma ray imaging camera”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A299**, 501(1990).
- 16) J. F. Briesmeister, (Ed.), *MCNPTM—A General Monte Carlo N-particle Transport Code Version 4B*, LA-12625-M, (1997).