

Ge(Li) 半導体検出器の測定効率

本郷昭三*1, 野田 豊*1, 横田繁明*2

(1975年8月18日受理)

Efficiency of Ge(Li) Detector

Syozo HONGO,*1 Yutaka NODA,*1 Shigeaki YOKOTA*2

I 序

優れた γ 線エネルギー分解能をもつ Ge(Li) 半導体検出器は、化学処理を必要とせず、多核種を分離定量でき、安全管理等保健物理的な面から、あるいは一般研究においても、利用性は大きい。上記の長所を生かして、種々の核種を含む、種々の形状の試料が半導体検出器を用いて定量され、種々の条件下で測定効率を求めておくことが必要となっている。測定効率を実験的に求める場合、あらかじめ、その値が推定できれば、測定条件(γ 線エネルギーや検出器と試料の相対位置等)を必要最小限にすることによって、多くの手数を減らすことができる。また、効率が求められていない条件下で定量する必要が生じた場合、すなわち緊急時や相対的な値が主たる問題の場合、測定効率を推定することによって、オーダをつかむことが可能となる。筆者らは 28.3 cc の同軸型 Ge(Li) 半導体検出器 (Fig. 1) の全エネルギーピーク効率を、市販の標準線源*3 を用いて実験的に求めた。これらの結果から、効率較正の行われていない条件に対する全エネルギーピーク効率の推定や、他の検出器に対する全エネルギーピーク効率 (以下効率と記す) の推定に資すべく検討を行った。

II 測定および結果

1. 検出器-線源の相対位置に対する効率の変化

^{54}Mn (γ : 835.3 keV) を用いて、検出器-線源の相対位置に対する効率を調べた。その結果を Fig. 2 に示す。同図で X 軸は検出器中心軸から、 Y 軸は検出器キャップから、線源までの距離を表わし、 Z 軸は中心軸上 5 cm のところを 1.0 とした相対効率を表わしている。各測定点の相対効率の値に、検出器の実行中心からの距離の 2 乗 ($R^2 = \{(X + \Delta X)^2 + Y^2\}$)*4 を乗ずるとはほぼ一定値となり、Fig. 2 の薄墨の部分においては、すべての値は平均値に対して $\pm 4\%$ 以内にある。同様に ^{137}Cs (γ : 661.6 keV) および ^{60}Co (γ : 1,332 keV) についても実験を実施したが、測定値に R^2 を乗ずると、それぞれの値は平均値の $\pm 3\%$ および $\pm 4\%$ 以内となった。

しかし ^{241}Am (γ : 59.5 keV) の場合には、21 点の測定に対して平均値の $\pm 4\%$ に入る点は全体の 1/3 以下で、平値均に対して最大の誤差は 25% にも達し、前述の比較的高いエネルギーの γ 線に対する効率変化とはかなり異なっている。特に顕著な差は、中心軸上から離れた点 ($X=3, 4, 5$) にみられる (Fig. 3 参照)。この主たる原因は γ 線のエネルギーが低いため、線源から放射さ

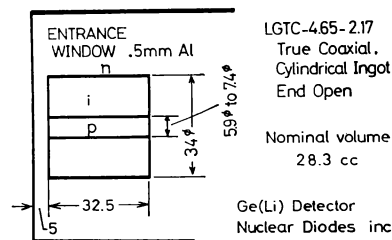


Fig. 1 Schematic diagram of the 28 cc Ge(Li) detector.

unit : mm.

*1 放射線医学総合研究所; 千葉市穴川 4-9-1 (〒280) National Institute of Radiological Sciences; 9-1, Anagawa 4-chome, Chiba-shi, Chiba-ken.

*2 東海大学医学部; 神奈川県伊勢原市望星台 (〒259-11) Tokai University School of Medicine, Boseidai, Isehara-shi, Kanagawa-ken.

*3 The Radio Chemical Center 製, 各々の線源の精度 2% 以内。

*4 後述(2)式参照, 本検出器の場合, $\Delta X=2$ cm となり, R はほぼ検出器中心からの距離とみなすことができた。

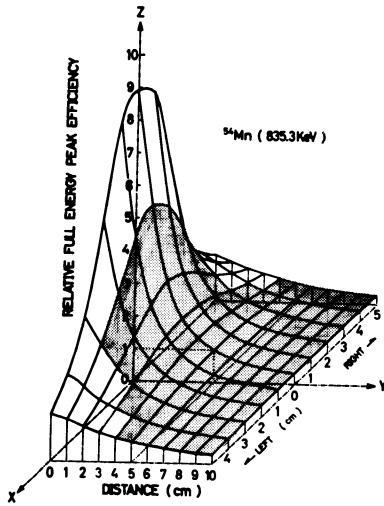


Fig. 2 Relative full energy peak efficiency of the 28 cc Ge(Li) detector for Mn-54 (835.3 keV) gamma-ray.

X-axis : radial distance from source to the detector axis, Y-axis : vertical distance from source to the detector end cap.

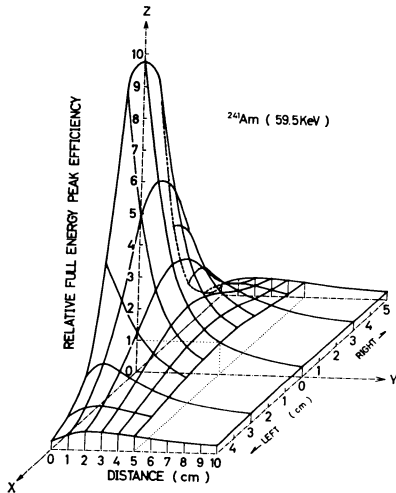


Fig. 3 Relative full energy peak efficiency of the 28 cc Ge(Li) detector for Am-241 (59.5 keV) gamma-ray.

れた γ 線が検出器の有効部分に達する間に比較的大きい吸収 (キャップ部アルミ等) が起り, その割合が線源の位置によって異なることと, 実行中心が比較的高いエネルギーをもつ γ 線の場合と異なることによるものと考えられる。

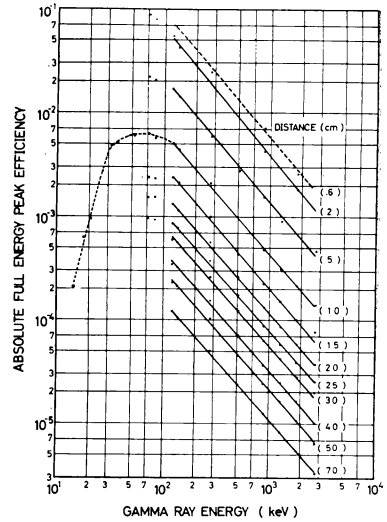


Fig. 4 Absolute full energy peak efficiency of the 28 cc Ge(Li) detector.

Parameter : distance from source to the Ge(Li) detector surface.

Table 1 Estimated value of K , B and coefficient of correlation.

Distance (cm)	K	B	Coefficient of correlation
0.6	1.19	22.6	0.9988
2	1.23	18.8	0.9999
5	1.19	5.09	//
10	1.17	1.42	//
15	1.18	0.702	//
20	1.15	0.335	//
25	1.15	0.214	//
30	1.16	0.165	//
40	1.15	0.0952	//
50	1.15	0.0624	//
70	1.15	0.0300	//

2. γ 線エネルギー (E) に対する効率の変化

2,734.4 keV, 1,836.1 keV, 1,274.5 keV, 898.0 keV, 511 keV, 279.2 keV, 136.3 keV および 121.9 keV, (^{88}Y , ^{22}Na , ^{203}Hg および ^{57}Co) の γ 線を用いて, エネルギーに対する効率の変化を調べた。その結果を Fig. 4 に示す。121.9 keV (^{57}Co) から 2,734.4 keV (^{88}Y) の間では効率の対数值 ($\log \epsilon$) と γ 線エネルギーの対数值 ($\log E$) はよい直線関係にある。この関係を $\log \epsilon = \log B - K \log$

E で近似し、最小 2 乗法によって B および K の値を求め、結果を Table 1 に示した。

III 考 察

1. 測定結果の関数近似

比較的低いエネルギーの γ 線の場合は、位置に対する効率変化はエネルギーによって異なっており、簡単な関数近似はむずかしい。一方、比較的高いエネルギーの γ 線の場合、位置に対する効率変化と、エネルギーに対する効率変化は互いに独立とみることができ、簡単な関数近似が可能となる。

^{137}Cs (γ : 662 keV), ^{54}Mn (γ : 835 keV), ^{60}Co (γ : 1,332 keV) の γ 線に対する測定結果は、Fig. 2 に示される薄墨の範囲で、次式で近似的に表わすことができる。

$$\varepsilon = \frac{C}{R^2} E^{-K} \quad (1)$$

$$R^2 = (X + \Delta X)^2 + Y^2 \quad (2)$$

ここで ε : 全エネルギーピーク効率

E : 入射 γ 線のエネルギー (keV)

X : 検出器表面から線源までの距離 (cm)

ΔX : 検出器表面から実行中心までの距離 (cm)

Y : 検出器中心軸から線源までの距離 (cm)

C, K : 検出器によって定まる定数

$\Delta X = 2$ cm とし、測定値を $R^2 \times \varepsilon$ に変換し最小 2 乗近似すると、 $K = 1.16$, $C = 171$ の値が得られた。このときの最大誤差は 12%、標準誤差は 5% であった。

2. 効率の推定

効率が(1)式で表わされるものとし、 C および K を推定してみる。通常、Ge(Li) 半導体検出器の規格として、検出器-線源距離 25 cm における、3'' ϕ \times 3'' NaI(Tl) 検出器に対する ^{60}Co ($E_\gamma = 1,332$ keV) の相対効率 (ε_{RN}) が示されている。NaI(Tl) 3'' ϕ \times 3'' 検出器の全エネルギーピーク効率が 1.2×10^{-3} ¹⁾ であることを用いると、(1)式から

$$C = 1.2 \times 10^{-3} \cdot (25 + \Delta X)^2 \frac{\varepsilon_{RN}}{1,332^{-K}} \quad (3)$$

となる。いま、 K および ΔX が実験的に求められているとし、マニュアル(カタログ)データの $\varepsilon_{RN} = 0.0465$ を代入すると $C = 171$ となり、実験値とよく一致する。

K の値が実験的に求められていない場合、E. VANO¹⁾ らの提案する次式から K を求める。

$$K = 2.13 - 0.629 \log(V_a) \quad (4)$$

ここで V_a は有効体積 (cc) である。(4)式を用いて $V_a = 28.3$ cc を代入すると、 $K = 1.22$ となり、実験値との誤差は 5% である。この K 値を(3)式に代入すると、 $C = 264$ を得る。これらの値を用いると 122 keV \sim 2,734 keV の範囲では、実験的に求めた前述の値を用いた場合に対する効率の最大誤差は 13% となった。

3. 効率推定に伴う誤差について

ある距離で求められた K および C に誤差を含んでいるとし、かつ C はエネルギー E_0 で求められた効率を用いて算出されたとすれば、測定効率の相対誤差 $\Delta \varepsilon_R$ は(1)式より

$$\Delta \varepsilon_R = \left(1 + \frac{\Delta C}{C}\right) E^{-JK} - 1 = (1 + \Delta \varepsilon_{OR}) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-JK} - 1 \quad (5)$$

となる。右辺の定数を左辺に移行し、対数をとると、 $\log(\Delta \varepsilon_R + 1)$ と $\log E$ とは線形となり、 $\Delta \varepsilon_R + 1$ の最大値、最小値は E の境界で得られることになる。従って、 $E_1 \leq E \leq E_2$ とすれば、 $|\Delta \varepsilon_R|$ の最大値は次の式で表わされる。

$$\text{Max}|\Delta \varepsilon_R| = \text{Max} \left\{ \left| (1 + \Delta \varepsilon_{OR}) \left(\frac{E_1}{E_0}\right)^{-JK} - 1 \right|, \left| (1 + \Delta \varepsilon_{OR}) \left(\frac{E_2}{E_0}\right)^{-JK} - 1 \right| \right\} \quad (6)$$

$\Delta K, \Delta C$: K および C の誤差

$\Delta \varepsilon_{OR}$: E_0 における ε の相対誤差

マニュアル(カタログ)データを使用することを前提として、 $\text{Max}|\Delta \varepsilon_R|$ を求めてみる。マニュアル(カタログ)に示される有効体積は、通常必ずしも正確ではない。いま、この誤差を $\pm 5\%$ と見積ると、(4)式の微分形から ΔK が $\pm 3.2\%$ ^{*1} となることが導かれる。E. VANO らが報告するように、(4)式が 3% 誤差をもっているとし、これらの誤差が独立にランダムに現われるとすれば、 $\Delta K = (3.2^2 + 3^2)^{1/2} = 4.4 \approx 5\%$ と見積ることができる。そこで $\Delta K, \Delta \varepsilon_{OR}$ を $\pm 5\%$ と見積り、 $E_1 = 200$ keV, $E_2 = 3,000$ keV, $E_0 = 1,332$ keV とすれば、最大誤差は $E = E_1$ で現われ、 $\text{Max}|\Delta \varepsilon_R| = 0.16$ (16%) となる。 $\text{Max}|\Delta \varepsilon_R|$ は E_0 の値によって変るが、もし E_0 が任意に選べるとすれば、 $\log \varepsilon$ と $\log E$ が直線関係で表されるとしたことから推測できるように、 $E_0 = (E_1 \cdot E_2)^{1/2}$ とすればよいことが(6)式から導かれる^{*2}。

*1 $K \neq 1$ とし、 $\Delta K/K \approx \Delta J/K$ としている。

*2 ΔC と ΔK のあらゆる付号の組合せを(6)式に入れると、8個の値が求まる。このうち4個は、その大小関係から省略ができ、残りの4個は E_0 に対して単調増加の組と単調減少にわけられ、結局、 $\Delta \varepsilon_R$ が等しい点で最小となる。

IV 結 論

28 cc 同軸型半導体検出器の全エネルギーピーク効率
は, ^{137}Cs (γ : 662 keV), ^{54}Mn (γ : 835 keV), ^{60}Co (γ :
1,332 keV) の点線源に対して, Fig. 2 に薄墨で示され
る範囲内で(1)式で近似することができ, 等感度面は球
面となった。このときの最大誤差は 12%, 標準誤差は
5% であった。 K の値が実験的に求められたと仮定し,
マニュアル(カタログ)データから C を求めると, 実験
的に求めた値との差は 1% 以下であった。実験値が全く
ないことを仮定し, E. VANO らの式とマニュアル(カ
タログ)データから測定効率を求めると, 122 keV~
2,734 keV の範囲で実験的に求めた式の値との最大誤差
は 13% であった。

通常の半導体検出器においては, 200 keV~3,000 keV
の範囲で検出器から適度に離れた前方*1 において, 全エ
ネルギーピーク効率は(1)式で近似できると考えられ
る^{2-6)*2}。このとき実験値がない場合においても, 点線
源に対する全エネルギーピーク効率は, 有効体積 (V_a),
3'φ×3' NaI(Tl) に対する相対効率 ϵ_{RN} から推定する
ことができる。(1)式で全エネルギーピーク効率が完全
に表わされるものとしたとき, 推定に伴う最大誤差は
(6)式で表わされ, 前述の V_a および ϵ_{RN} の誤差を 5%
としてみると, 効率の最大誤差は 16% となる。このよ
うな効率の推定値は測定に際して良い目安となり, その
推定値を用いて放射能の絶対値を推定することが可能で
あり, また効率較正時の手数を大幅に減ずることができ
ると考えられる。

付 録

(5)式の説明

(1)式を用いると

*1 おおよそ検出器の長さ程度離れ, 中心軸からの開角が
45° 以内の範囲。

*2 有効体積が大きくなると, 近似が悪くなる傾向が見られ
る。

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_R &= \frac{\epsilon' - \epsilon}{\epsilon} = \frac{\epsilon'}{\epsilon} - 1 = \frac{C' \cdot E^{-K'} / R^2}{C \cdot E^{-K} / R^2} - 1 \\ &= \frac{C'}{C} \cdot E^{-K'(K)} - 1 = \left(1 + \frac{\Delta C}{C}\right) E^{-JK} - 1 \end{aligned} \quad (5')$$

ここで

ϵ' , K' および C' は, それぞれ誤差を含む効率, K お
よび C とする。また, E_0 の 1 点で絶対効率 $\epsilon'(E_0)$ が
求められており, それが $\Delta\epsilon_{OR}$ の相対誤差をもっている
とすれば

$$\begin{aligned} \epsilon'(E_0) &= \epsilon(E_0) (1 + \Delta\epsilon_{OR}) \\ C' \cdot E_0^{-K'} / R^2 &= C \cdot E_0^{-K} / R^2 (1 + \Delta\epsilon_{OR}) \\ \frac{C'}{C} &= E_0^{JK} (1 + \Delta\epsilon_{OR}) \end{aligned} \quad (5'')$$

(5'')を(5')に代入すれば

$$\Delta\epsilon_R = (1 + \Delta\epsilon_{OR}) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-JK} - 1$$

となる。

参 考 文 献

- 1) E. VANO, L. GONZALEZ, R. GAETA and J.A. GONZALEZ; *Nucl. Instr. and Meth.*, **123**, 573 (1975).
- 2) H. SEYFARTH, A.M. HASSAN, B. HRASTNIK, P. GOTTEL and W. DELANG; *Nucl. Instr. and Meth.*, **105**, 301 (1972).
- 3) G. AUBIN, J. BARRETE, G. LAMOUREX and S. MONARO; *Nucl. Instr. and Meth.*, **76**, 85 (1969).
- 4) G. WALLAGE and G.E. COOTE; *Nucl. Instr. and Meth.*, **74**, 353 (1969).
- 5) F. ADAMS and R. DAMS; "Applied Gamma-Ray Spectrometry," 2nd ed., p. 201 (1970), Pergamon Press.
- 6) 小林久伸; 原子力工業, **18**(7), 75 (1972).