

JAERI-M

6 5 2 3

SGD-76017

Ge (Li) 検出器のスペクトル・  
線量変換演算子値関数

1976年5月

寺田 博海・阪井 英次・片桐 政樹

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

Ge(Li)検出器のスペクトル・線量変換演算子値関数

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

寺田博海・阪井英次・片桐政樹

(1976年4月9日受理)

環境ガンマ線の in-situ 測定用に製作した  $73\text{ cm}^3$  クローズド・エンド同軸型 Ge(Li) 検出器のスペクトル・線量変換演算子値関数を求めた結果を示した。また、この関数に影響を与える諸因子について検討した。

Spectrum-to-dose conversion operator  
value function of a Ge(Li) in-situ  
environmental gamma-ray spectrometer

Hiroshi TERADA, Eiji SAKAI, and Masaki KATAGIRI

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

( Received April 9, 1976 )

A spectrum-to-dose conversion operator value function was obtained for a 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) in-situ environmental gamma-ray spectrometer; factors influencing the function are considered.

## 目 次

## List of figures, photos, and tables

1. 緒言	1
2. スペクトル・線量変換演算子値関数 $G(E)$ の計算方法	1
3. Ge (Li) 検出器およびその特性	4
4. $G(E)$ の計算結果	4
5. $G(E)$ 関数決定における $m$ および $KMAX$ の選択	5
6. 環境ガンマ線の in-situ 測定	6
7. 照射線量率の計算	6
8. Ge (Li) $G(E)$ 関数法, HASL法および $3" \times 3"$ NaI (Tl) $G(E)$ 関数法の比較	6
9. 結論	7
謝辞	7
参考文献	8
Tables	9
Photos	11
Figures	12

## Contents

List of tables, photo, and tables .....	(i)
1. Introduction .....	1
2. Calculating method of spectrum-to-dose operator value function $G(E)$ ..	1
3. Ge(Li) detector and its detection characteristics .....	4
4. Calculated $G(E)$ .....	4
5. Selection of $m$ and $K_{MAX}$ in $G(E)$ function determination .....	5
6. In-situ measurement of environmental gamma-rays .....	6
7. Exposure rate calculation .....	6
8. Comparison of Ge(Li) $G(E)$ function method with HASL method and 3" x 3" NaI(Tl) $G(E)$ function method .....	6
9. Conclusion .....	7
Acknowledgment .....	7
References .....	8
Tables .....	9
Photo .....	11
Figures .....	12

List of tables, photo, and figures

- Table 1 Intensities of gamma-ray standard sources, Sets A and B
- Table 2 Accuracy of least square fitting of G(E) operator
- Table 3 Exposure rates calculated by various G(E) operators with the same spectrum
- Table 4 Comparison of exposure rates obtained by three methods
- Photo 1 Photograph of portable in-situ environmental gamma-ray spectrometer ( 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) detector in 7.5 liter liquid nitrogen cryostat )
- Fig.1 Calculating procedure of spectrum-to-dose conversion operator value function G(E) for Ge(Li) detector
- Fig.2 Peak detection efficiency per unit flux of 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer measured at source-to-detector distance 100cm
- Fig.3 Spectrum-to-dose conversion operator value function G(E) for 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer ( A ; G(E) calculated from the measurement made using ~100μCi standard sources. B ; G(E) calculated from the measurement made using ~10μCi standard sources
- Fig.4 Spectrum-to-dose conversion operator value function G(E) for 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer obtained by the measurement made using ~100μCi standard sources placed at  $\theta=0^\circ$  and  $\theta=90^\circ$
- Fig.5 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at  $\theta=0^\circ$  for parallel beam of gamma-rays ( From E.Sakai, H.Terada, and M.Katagiri; JAERI-M 6498 ( 1976 ) )
- Fig.6 Pulse height distributions of gamma-rays from <sup>57</sup>Co standard source placed at  $\theta=0^\circ$  and at  $\theta=90^\circ$ , obtained by 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) detector
- Fig.7 Accuracy of least square fitting for G(E) function, s(%), for different values of m and KMAX
- Fig.8 In-situ gamma-ray pulse height distribution measured on the lawn between Machine Shop and Storehouse in Japan Atomic Energy Research Institute, on October 26, 1975

## 1. 緒言\*

最近、エネルギー分解能の良い大体積 Ge (Li) 検出器が市販されるようになり、環境ガンマ線のスペクトル測定に使用され始めた<sup>1)~3)</sup>。H. L. Beck ら<sup>1)</sup>が開発した環境ガンマ線 in-situ 測定による Ge (Li) 検出器のパルス波高分布の解析方法を使用すれば、土壌中の U-238, Th-232, K-40, Cs-137 などの濃度 (pCi/g あるいは mCi/km<sup>2</sup>)、および、それらの核種のもたらす地上 1 m 高の検出器位置における線量率を求めることができる。しかし、H. L. Beck らの解析方法は、土壌中に U-238, Th-232, K-40 が一様に分布し、Cs-137 は土壌中の深さ方向 Z (cm) に対して、 $\exp(-\alpha Z)$  で分布しているという仮定に基づいたものである。この仮定が成立しない場合、例えば、原子力施設から放出される plumes などの線量率を求めるような場合に対して、H. L. Beck らの方法をそのまま適用することはできない。

一方、検出器のパルス波高分布は、何らかの形で、検出器位置における線量率を示していると考えらるならば、そのパルス波高分布から線量率に直接に換算することは可能であるはずで、原研の森内茂氏ら<sup>4)</sup>が NaI (Tl) シンチレータに対して開発したスペクトル線量変換演算子値関数法を Ge (Li) 検出器に対しても適用できるかどうかを検討することが望まれる。もしも、Ge (Li) 検出器のスペクトル線量変換演算子値関数が求めれば、ガンマ線発生源の分布に関する情報がなくても、検出器位置における線量率が測定できることになる。筆者らの知る限りでは、Ge (Li) 検出器のスペクトル線量変換演算子値関数を求めた例はない。

筆者らは、筆者らが試作した 73 cm<sup>2</sup> closed-end 同軸型 Ge (Li) 検出器<sup>2) 3)</sup>のスペクトル線量変換演算子値関数を求め、この関数に及ぼす諸パラメータの影響を調べた。また、環境ガンマ線の in-situ 測定を行なって得られたガンマ線パルス波高分布に、この関数を適用し、その検出器位置における照射線量率を求めた。また、H. L. Beck らの方法<sup>1)</sup>により求めた線量率および 3" × 3" NaI (Tl) 検出器のパルス波高分布をスペクトル線量変換演算子値関数法で解析して得た線量率と比較した。これらの結果について、以下に報告する。

## 2. スペクトル線量変換演算子値関数 G(E) の計算方法

エネルギー  $E_j$  [MeV] の単位線束 [photon/cm<sup>2</sup> · sec] のガンマ線が検出器に入射したとき生じるエネルギー E のパルスの分布関数を  $n(E, E_j)$  [counts/sec · MeV per photon/cm<sup>2</sup> · sec] とすると、検出器位置における照射線量率  $D(E_j)$  [ $\mu R(\mu R/h)$ ] は、

$$D(E_j) = \int_0^{\infty} n(E, E_j) \cdot G(E) dE \quad \dots (1)$$

となる。G(E) を高次多項式で表わし、標準スペクトルを(1)式に代入して未定係数法により多項式の係数を求める。

実際の測定においては、いろいろのエネルギーのガンマ線が混在しているので、そのガンマ線パルス波高分布 N(E) は、

$$N(E) = \sum_j \phi(E_j) \cdot n(E, E_j) \quad \dots (2)$$

\*本報告書の内容の一部は、日本原子力学会昭和51年年会 F10 (東海大学湘南校舎, 1976年3月25日) で発表された。



## 1. 緒言\*

最近、エネルギー分解能の良い大体积 Ge (Li) 検出器が市販されるようになり、環境ガンマ線のスペクトル測定に使用され始めた<sup>1)~3)</sup>。H. L. Beck ら<sup>1)</sup>が開発した環境ガンマ線 in-situ 測定による Ge (Li) 検出器のパルス波高分布の解析方法を使用すれば、土壌中の U-238, Th-232, K-40, Cs-137 などの濃度 (pCi/g あるいは mCi/km<sup>2</sup>)、および、それらの核種のもたらす地上 1 m 高の検出器位置における線量率を求めることができる。しかし、H. L. Beck らの解析方法は、土壌中に U-238, Th-232, K-40 が一様に分布し、Cs-137 は土壌中の深さ方向 Z (cm) に対して、 $\exp(-\alpha Z)$  で分布しているという仮定に基づいたものである。この仮定が成立しない場合、例えば、原子力施設から放出される plumes などの線量率を求めるような場合に対して、H. L. Beck らの方法をそのまま適用することはできない。

一方、検出器のパルス波高分布は、何らかの形で、検出器位置における線量率を示していると考えらるならば、そのパルス波高分布から線量率に直接に換算することは可能であるはずで、原研の森内茂氏ら<sup>4)</sup>が NaI (Tl) シンチレータに対して開発したスペクトル線量変換演算子値関数法を Ge (Li) 検出器に対しても適用できるかどうかを検討することが望まれる。もしも、Ge (Li) 検出器のスペクトル線量変換演算子値関数が求めれば、ガンマ線発生源の分布に関する情報がなくても、検出器位置における線量率が測定できることになる。筆者らの知る限りでは、Ge (Li) 検出器のスペクトル線量変換演算子値関数を求めた例はない。

筆者らは、筆者らが試作した 73 cm<sup>3</sup> closed-end 同軸型 Ge (Li) 検出器<sup>2) 3)</sup>のスペクトル線量変換演算子値関数を求め、この関数に及ぼす諸パラメータの影響を調べた。また、環境ガンマ線の in-situ 測定を行なって得られたガンマ線パルス波高分布に、この関数を適用し、その検出器位置における照射線量率を求めた。また、H. L. Beck らの方法<sup>1)</sup>により求めた線量率および 3"×3" NaI (Tl) 検出器のパルス波高分布をスペクトル線量変換演算子値関数法で解析して得た線量率と比較した。これらの結果について、以下に報告する。

## 2. スペクトル線量変換演算子値関数 G(E) の計算方法

エネルギー  $E_j$  [MeV] の単位線束 [photon/cm<sup>2</sup>·sec] のガンマ線が検出器に入射したとき生じるエネルギー E のパルスの分布関数を  $n(E, E_j)$  [counts/sec·MeV per photon/cm<sup>2</sup>·sec] とすると、検出器位置における照射線量率  $D(E_j)$  [ $\mu R(\mu R/h)$ ] は、

$$D(E_j) = \int_0^{\infty} n(E, E_j) \cdot G(E) dE \quad \dots (1)$$

となる。G(E) を高次多項式で表わし、標準スペクトルを(1)式に代入して未定係数法により多項式の係数を求める。

実際の測定においては、いろいろのエネルギーのガンマ線が混在しているので、そのガンマ線パルス波高分布 N(E) は、

$$N(E) = \sum_j \phi(E_j) \cdot n(E, E_j) \quad \dots (2)$$

\*本報告書の内容の一部は、日本原子力学会昭和51年年会 F10 (東海大学湘南校舎, 1976年3月25日) で発表された。

で表わされる。ここで、 $\phi(E_j)$  はエネルギー  $E_j$  のガンマ線束、したがって、照射線量率の総和  $D$  は、

$$\begin{aligned} D &= \sum_j \phi(E_j) D(E_j) \\ &= \sum_j [\phi(E_j) \int_0^\infty n(E, E_j) G(E) dE] \\ &= \int_0^\infty [\sum_j \phi(E_j) n(E, E_j)] G(E) dE \quad \dots (3) \end{aligned}$$

(2)式を代入して

$$D = \int_0^\infty N(E) G(E) dE \quad \dots (4)$$

となる。このように、いろいろのエネルギーのガンマ線が混存するときにも、 $G(E)$ を適用することができ、その場の照射線量率  $D$  を求めることができる。

以上のように定義されるスペクトル線量変換演算子値関数  $G(E)$  を求める計算手順を Fig. 1 にしたがって示す。

- ① 計算にあたってまず  $G(E)$  を求めるべき Ge (Li) 検出器によって標準線源を用いて標準スペクトル  $N_{ij}$  の測定を行う [ $i$ :チャンネル番号 (1~4096),  $j$ :標準線源の番号]。このとき標準線源はすべて検出器の中心から 1 m の距離に置く、そしてその線源が検出器中心に与える照射線量率  $D_j$  は次式によりあらかじめ計算によって求められる。

$$D_j = \frac{(\sum E_p \cdot r_p \cdot \mu_p) \times 1.602 \times 10^{-6} \times 3.7 \times 10^3 \times X_j}{84 \times 4\pi (100)^2} \quad \dots (5)$$

$j$  : 用いた標準線源の番号

$p$  : ガンマ線ピークの番号

$E_p$  : ピーク番号  $p$  のガンマ線エネルギー (MeV)

$r_p$  : そのガンマ線の放出率 (分岐比)

$\mu_p$  : 空気の true mass absorption coefficient ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )<sup>\*</sup>

$X_j$  : 線源  $j$  の強度 ( $\mu\text{Ci}$ )

これら標準スペクトル  $N_{ij}$  およびそのときの照射線量率  $D_j$  を標準線源の核種毎 ( $j=1 \sim \text{JMAX}$ ) に計算機へ入力する。

- ② 求めるべき  $G(E)$  を次式に示すような多項式<sup>1)</sup> で表わす。

$$G(E_i) = \sum_{K=1}^{\text{KMAX}} A_K \times (\log_{10} E_i)^{K-m-1} \quad \dots (6)$$

KMAX : 多項式の項数 (5節参照)

$m$  : 任意に選択する定数 (5節参照)

$i$  : パルス波高分布のチャンネル番号

\*  $\mu_p$  は「放射線データブック」(木村健二郎編著1958年) 5.7質量吸収係数P 177の値を用いた。

$E_i$  : パルス波高分布のチャンネル番号  $i$  に対応するガンマ線エネルギー

$A_K$  : 多項式の係数 ( $K=1 \sim KMAX$ )

この段階では  $A_K$  は未知である。標準スペクトル  $N_{ij}$  に(6)式を作用させて得られる照射線量率  $R_j$  は、次式のように表わされる。

$$R_j = \sum_{K=1}^{KMAX} A_K \times \left\{ \sum_i N_{ij} \times (\log_{10} E_i)^{K-m-1} \right\} \dots (7)$$

上式の中で { } の中を  $B_{jK}$  で表わす。

$$B_{jK} = \sum_i N_{ij} \times (\log_{10} E_i)^{K-m-1} \dots (8)$$

$i$  : パルス波高分布のチャンネル番号

この  $B_{jK}$  を計算条件 ( $KMAX, m$  の値) にしたがって各々の標準スペクトル  $N_{ij}$  について計算を行なう。

- ③ (5)式の  $D_j$  と(7)式の  $R_j$  は  $A_K$  が正しく求められていれば一致すべき性質のものである。逆に言えば  $D_j$  と  $R_j$  とが等しくなるように  $A_K$  を求めれば良い。このために次のように最小自乗法を適用する。まず  $D_j, R_j$  の差を  $S_j$  で表わすと

$$S_j = \frac{R_j}{D_j} - 1 = \frac{\sum_{K=1}^{KMAX} A_K \times B_{jK}}{D_j} - 1 \dots (9)$$

のようになる。 $S_j$  の自乗和  $S^2$  は

$$S^2 = \sum_{j=1}^{JMAX} \{ S_j \}^2 \dots (10)$$

である。この(10)式が最小となるような  $A_K$  を求める。すなわち

$$\frac{\partial S^2}{\partial A_K} = 0 \dots (11)$$

となるように  $A_K$  についての正規方程式

$$\left. \begin{aligned} C_{11} A_1 + C_{12} A_2 + C_{13} A_3 + \dots + C_{1\kappa} A_\kappa + H_1 &= 0 \\ C_{21} A_1 + C_{22} A_2 + C_{23} A_3 + \dots + C_{2\kappa} A_\kappa + H_2 &= 0 \\ C_{\ell 1} A_1 + C_{\ell 2} A_2 + \dots + C_{\ell n} A_n + C_{\ell \kappa} A_\kappa + H_\ell &= 0 \\ C_{\kappa 1} A_1 + C_{\kappa 2} A_2 + C_{\kappa 3} A_3 + \dots + C_{\kappa \kappa} A_\kappa + H_\kappa &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

を立てて係数  $C_{\ell n}$  および  $H_\ell$  の計算を行う。ここで  $\kappa = KMAX$ 。

- ④ (12)式の連立方程式を解いて  $A_1, A_2 \dots A_{KMAX}$  をそれぞれ求める。

- ⑤ 求められた  $A_1, A_2 \dots A_{KMAX}$  を(6)式に代入して  $E = 50 \text{ keV}$  から  $3000 \text{ keV}$  について  $G(E)$  値を計算する。

以上がスペクトル線量変換演算子値関数の定義および計算手順である。

### 3. Ge(Li) 検出器およびその特性\*

筆者らの試作した  $73\text{ cm}^3$  closed-end 同軸型 Ge(Li) 検出器を Photo-1 に示す。検出器中心が地上高  $1\text{ m}$  になるように写真機用の単脚 3 本で支持されている。この検出器は環境ガンマ線の in-situ 測定用として可搬性を重視して設計した。液体窒素容量は  $7.5\text{ l}$  で、満杯にしたときの検出器重量は、前置増幅器を含めて  $16\text{ kg}$  であった。液体窒素消費量は  $0.8\text{ l/日}$  であった。4 日に 1 度、液体窒素の補給を行なった。Ge 単結晶は、直径  $48\text{ mm}$ 、長さ  $44.5\text{ mm}$  の円柱形で、 $n^+$  層の厚さは  $\sim 0.5\text{ mm}$ 、p 層芯の直径は  $12.2\text{ mm}$  である。Fig. 2 中に Ge 結晶の概略図を示した。検出器前面・線源間距離  $25\text{ cm}$  においた  $\text{Co-60}$  標準線源からの  $1333\text{ keV}$  ガンマ線に対する検出器のピーク検出効率は、 $17.5\%$  ( $3'' \times 3''$  NaI(Tl) 検出器のピーク絶対検出効率  $1.2 \times 10^{-3}$  cts/photon に対して)、また、そのエネルギー分解能 (FWHM) は  $2.4\text{ keV}$  であった。

Table 1 に示したような  $\sim 100\mu\text{Ci}$  の 9 種の標準線源\*\* を検出器直下  $1\text{ m}$  において、それぞれの線源に対する検出器のパルス波高分布を測定した。線源からの直接ガンマ線以外の散乱ガンマ線の影響を極力減少させるために、検出器を野外の芝生の上に置いて測定した。このとき得られたパルス波高分布から各ガンマ線に対するピーク検出効率 (cps/(photon/cm<sup>2</sup> sec)) を計算した結果を Fig. 2 に示す。ガンマ線の分岐比は、文献 5) に示されている値を用いた。Fig. 2 で実線からずれた測定点が見られる。すなわち、Na-22 標準線源の  $511\text{ keV}$  (分岐比  $181\%$ )、および  $1274\text{ keV}$  (分岐比  $100\%$ ) ガンマ線のピーク検出効率の測定値が、実線上の値より  $\sim 10\%$  大きい。また、Zn-65 標準線源の  $1116\text{ keV}$  ガンマ線 (分岐比  $50.7\%$ ) のピーク検出効率の測定値が実線上の値より  $\sim 15\%$  低くでている。この原因について、種々検討したけれども不明であり、現在の所、結論がでない。次節で述べる  $G(E)$  関数の決定においては、Na-22 および Zn-65 標準線源の放射能を、日本アイソトープ協会の検定値  $86.8\mu\text{Ci}$  および  $98.9\mu\text{Ci}$  から、 $93.1\mu\text{Ci}$  および  $89.1\mu\text{Ci}$  に変更した値を使用した (Table 1, Table 2 参照)。

### 4. $G(E)$ の計算結果

Fig. 3 に我々が求めた  $G(E)$  を示す。横軸はガンマ線のエネルギー、縦軸は  $G(E)$  の値である。図中には A, B の 2 本の曲線がある。A は各々  $\sim 100\mu\text{Ci}$  の 9 種の標準線源 (Table 1 参照) を検出器の直下  $1\text{ m}$  の距離に置いて測定した標準スペクトルから計算した  $G(E)$  であり、B は  $\sim 10\mu\text{Ci}$  の 7 種の標準線源 (Table 1 参照) を用いた結果である。計算条件としては、A では  $K_{\text{MAX}}=16$ ,  $m=1$ 、また B では  $K_{\text{MAX}}=12$ ,  $m=1$  を選んだ (第 5 節に  $K_{\text{MAX}}$ ,  $m$  を変えたときの  $G(E)$  の変化の検討を行っているので参照すること)。A および B の曲線はガンマ線エネルギー  $120\text{ keV}$  以下および  $1100\text{ keV}$  以上で形を異にしている。高エネルギーにおける両曲線の差を生じた原因は、標準線源のうちのもっともエネルギーの高いガンマ線は Y-88 の  $1836\text{ keV}$  ガンマ線であり、 $1836\text{ keV}$  以下のエネルギーのガンマ線を使用して  $G(E)$  関数を求めたために、 $1836\text{ keV} \sim 3\text{ MeV}$  の範囲の  $G(E)$  関数に誤

\*Ge(Li) 検出器および検出特性の詳細については文献 3) 参照のこと。

\*\*日本アイソトープ協会から購入したもの、昭和 51 年 3 月 13 日における放射能の総合誤差は  $4.1\%$  以内とされている。表に示した  $\mu\text{Ci}$  数は日本アイソトープ協会が検定した値である。後述するように、Na-22 および Zn-65 の値は、検定値よりも、 $93.1\mu\text{Ci}$ 、および  $89.1\mu\text{Ci}$  の方が正しいように思われるので、 $G(E)$  の計算には、後者を使用した。

### 3. Ge(Li) 検出器およびその特性\*

筆者らの試作した73cm<sup>3</sup> closed-end 同軸型Ge(Li) 検出器をPhoto-1に示す。検出器中心が地上高1mになるように写真機用の単脚3本で支持されている。この検出器は環境ガンマ線の in-situ 測定用として可搬性を重視して設計した。液体窒素容量は7.5ℓで、満杯にしたときの検出器重量は、前置増幅器を含めて16kgであった。液体窒素消費量は0.8ℓ/日であった。4日に1度、液体窒素の補給を行なった。Ge単結晶は、直径48mm、長さ44.5mmの円柱形で、n<sup>+</sup>層の厚さは~0.5mm、p層芯の直径は12.2mmである。Fig. 2中にGe結晶の概略図を示した。検出器前面・線源間距離25cmにおいたCo-60標準線源からの1333keVガンマ線に対する検出器のピーク検出効率は、17.5%(3"×3" NaI(Tℓ) 検出器のピーク絶対検出効率 $1.2 \times 10^{-3}$  cts/photonにに対して)、また、そのエネルギー分解能(FWHM)は2.4keVであった。

Table 1に示したような~100μCiの9種の標準線源\*\*を検出器直下1mにおいて、それぞれの線源に対する検出器のパルス波高分布を測定した。線源からの直接ガンマ線以外の散乱ガンマ線の影響を極力減少させるために、検出器を野外の芝生の上に置いて測定した。このとき得られたパルス波高分布から各ガンマ線に対するピーク検出効率(cps/(photon/cm<sup>2</sup> sec))を計算した結果をFig. 2に示す。ガンマ線の分岐比は、文献5)に示されている値を用いた。Fig. 2で実線からずれた測定点が見られる。すなわち、Na-22標準線源の511keV(分岐比181%)、および1274keV(分岐比100%)ガンマ線のピーク検出効率の測定値が、実線上の値より~10%大きい。また、Zn-65標準線源の1116keVガンマ線(分岐比50.7%)のピーク検出効率の測定値が実線上の値より~15%低くでている。この原因について、種々検討したけれども不明であり、現在の所、結論がでない。次節で述べるG(E)関数の決定においては、Na-22およびZn-65標準線源の放射能を、日本アイソトープ協会の検定値86.8μCiおよび98.9μCiから、93.1μCiおよび89.1μCiに変更した値を使用した(Table 1, Table 2参照)。

### 4. G(E)の計算結果

Fig. 3に我々が求めたG(E)を示す。横軸はガンマ線のエネルギー、縦軸はG(E)の値である。図中にはA, Bの2本の曲線がある。Aは各々~100μCiの9種の標準線源(Table 1参照)を検出器の直下1mの距離に置いて測定した標準スペクトルから計算したG(E)であり、Bは~10μCiの7種の標準線源(Table 1参照)を用いた結果である。計算条件としては、AではKMAX=16, m=1, またBではKMAX=12, m=1を選んだ(第5節にKMAX, mを変えたときのG(E)の変化の検討を行っているので参照すること)。AおよびBの曲線はガンマ線エネルギー120keV以下および1100keV以上で形を異にしている。高エネルギーにおける両曲線の差を生じた原因は、標準線源のうちのもっともエネルギーの高いガンマ線はY-88の1836keVガンマ線であり、1836keV以下のエネルギーのガンマ線を使用してG(E)関数を求めたために、1836keV~3MeVの範囲のG(E)関数に誤

\*Ge(Li) 検出器および検出特性の詳細については文献3)参照のこと。

\*\*日本アイソトープ協会から購入したもの、昭和51年3月13日における放射能の総合誤差は4.1%以内とされている。表に示したμCi数は日本アイソトープ協会が検定した値である。後述するように、Na-22およびZn-65の値は、検定値よりも、93.1μCi, および89.1μCiの方が正しいように思われるので、G(E)の計算には、後者を使用した。

差が生じるためである。この範囲のG(E)関数値は、この範囲内のガンマ線を放出する標準線源を使用して標準パルス波高分布を求めることにより、精度高く求めることができる。～10 $\mu$ Ciの標準線源は古く、Y-88の放射能は減衰していることと～100 $\mu$ Ciの標準線源の放射能の1/10であることにより、パルス波高分布の統計精度が低いことを考えると、曲線Aの方が曲線Bよりもより信頼できるG(E)関数であると言える。

Fig. 4には、～100 $\mu$ Ciの標準線源の位置を距離を1mに保持して、検出器の直下および鉛直線に対して90°に置いた2通りの標準パルス波高分布を用いた場合のG(E)の違いを示したものである。図から明らかなように350keV以下のエネルギーでのG(E)の形が大きく違っている。この原因の一つとして、Ge(Li)検出器に入射するガンマ線の入射角度によって検出効率およびパルス波高分布の形が変化する現象が考えられる、Fig. 5に製作した73cm<sup>3</sup> closed-end型Ge(Li)検出器のピーク検出効率入射角度依存性の1例<sup>2)3)</sup>を示す。図の横軸はガンマ線入射角度、縦軸は角度0°に規格化した相対的検出効率の値である。ガンマ線のエネルギーが356keV, 122keV, 80keV, 60keVと低くなるにつれて角度依存性が大きくなることがわかる。これがG(E)の計算に大きく影響していると考えられる。またピーク検出効率だけでなくガンマ線のパルス波高分布の形も異っていることを示したのがFig. 6である。Co-57線源(122keV, 136keV)の例を示す。ピーク左側の連続スペクトル部分に0°と90°で差が出ている。G(E)の計算にあたってはパルス波高分布全体を入力としているために、この連続スペクトル部分の違いも大きく影響していると考えられる。

### 5. G(E)関数決定におけるmおよびKMAXの選び方

(6)式を用いてG(E)関数を決定するとき、mおよびKMAXとして、どのような数値を選べばよいのであろうか。2節の③に述べたように、(5)式で与えられるD<sub>j</sub>と(7)式で与えられるR<sub>j</sub>は、A<sub>K</sub>が正しく求められていると、一致すべき性質のものである。この一致の度合を調べるために、R<sub>j</sub>とD<sub>j</sub>の差S<sub>j</sub>の自乗和S<sup>2</sup>の平方根Sを計算する。(10)式からSは

$$S = \sqrt{\sum_{j=1}^{JMAX} \left[ \sum_{k=1}^{KMAX} A_k \times \left\{ \sum_i N_{ij} \times (\log_{10} E_i)^{k-m-1} / D_j - 1 \right\}^2 \right]} \dots (13)$$

となる。

Table 1に示した標準線源(～100 $\mu$ Ci, JMAX=9)を検出器直下( $\theta=0^\circ$ )1mに置いて測定したパルス波高分布から、m=0, 1, 2, 3; KMAX=0～20(整数)と置いて計算したG(E)関数に対して、(13)式を計算すると、Fig. 7が得られる。Fig. 7からmの値(0, 1, 2, 3)の影響はほとんどないこと、5以下のKMAXの値は大きなSを与えること、5～20のKMAXの値はS<4%を与えること、KMAX $\geq$ 15でS=2.7%附近に落ち着くことが判る。すなわち、m=0, 1, 2, 3のいずれの値をとってもKMAX $\geq$ 15を取れば、R<sub>j</sub>とS<sub>j</sub>の差の自乗和の平方根は～2.7%となる。

Table 2の中央の欄は、m=1, KMAX=16として求めたG(E)関数から計算した線量率R<sub>j</sub>を示す。その右側のReferenceの欄は、(5)式を用いて線源強度から計算した線量率D<sub>j</sub>(j=1～9), およびその自乗和の平方根(13式)S=2.7%を示している。

差が生じるためである。この範囲のG(E)関数値は、この範囲内のガンマ線を放出する標準線源を使用して標準パルス波高分布を求めることにより、精度高く求めることができる。~10 $\mu$ Ciの標準線源は古く、Y-88の放射能は減衰していることと~100 $\mu$ Ciの標準線源の放射能の1/10であることにより、パルス波高分布の統計精度が低いことを考えると、曲線Aの方が曲線Bよりもより信頼できるG(E)関数であると言える。

Fig. 4には、~100 $\mu$ Ciの標準線源の位置を距離を1mに保持して、検出器の直下および鉛直線に対して90°に置いた2通りの標準パルス波高分布を用いた場合のG(E)の違いを示したものである。図から明らかなように350keV以下のエネルギーでのG(E)の形が大きく違っている。この原因の一つとして、Ge(Li)検出器に入射するガンマ線の入射角度によって検出効率およびパルス波高分布の形が変化する現象が考えられる、Fig. 5に製作した73cm<sup>3</sup> closed-end型Ge(Li)検出器のピーク検出効率入射角度依存性の1例<sup>2)3)</sup>を示す。図の横軸はガンマ線入射角度、縦軸は角度0°に規格化した相対的検出効率の値である。ガンマ線のエネルギーが356keV, 122keV, 80keV, 60keVと低くなるにつれて角度依存性が大きくなることがわかる。これがG(E)の計算に大きく影響していると考えられる。またピーク検出効率だけでなくガンマ線のパルス波高分布の形も異っていることを示したのがFig. 6である。Co-57線源(122keV, 136keV)の例を示す。ピーク左側の連続スペクトル部分に0°と90°で差が出ている。G(E)の計算にあたってはパルス波高分布全体を入力としているために、この連続スペクトル部分の違いも大きく影響していると考えられる。

### 5. G(E)関数決定におけるmおよびKMAXの選び方

(6)式を用いてG(E)関数を決定するとき、mおよびKMAXとして、どのような数値を選べばよいのであろうか。2節の③に述べたように、(5)式で与えられるD<sub>j</sub>と(7)式で与えられるR<sub>j</sub>は、A<sub>K</sub>が正しく求められていると、一致すべき性質のものである。この一致の度合を調べるために、R<sub>j</sub>とD<sub>j</sub>の差S<sub>j</sub>の自乗和S<sup>2</sup>の平方根Sを計算する。(10)式からSは

$$S = \sqrt{\sum_{j=1}^{JMAX} \left[ \sum_{k=1}^{KMAX} A_k \times \left\{ \sum_i N_{ij} \times (\log_{10} E_i)^{k-m-1} / D_j - 1 \right\}^2 \right]} \dots (13)$$

となる。

Table 1に示した標準線源(~100 $\mu$ Ci, JMAX=9)を検出器直下( $\theta=0^\circ$ )1mに置いて測定したパルス波高分布から、m=0, 1, 2, 3; KMAX=0~20(整数)と置いて計算したG(E)関数に対して、(13)式を計算すると、Fig. 7が得られる。Fig. 7からmの値(0, 1, 2, 3)の影響はほとんどないこと、5以下のKMAXの値は大きなSを与えること、5~20のKMAXの値はS<4%を与えること、KMAX $\geq$ 15でS=2.7%附近に落ち着くことが判る。すなわち、m=0, 1, 2, 3のいずれの値をとってもKMAX $\geq$ 15を取れば、R<sub>j</sub>とS<sub>j</sub>の差の自乗和の平方根は~2.7%となる。

Table 2の中央の欄は、m=1, KMAX=16として求めたG(E)関数から計算した線量率R<sub>j</sub>を示す。その右側のReferenceの欄は、(5)式を用いて線源強度から計算した線量率D<sub>j</sub>(j=1~9), およびその自乗和の平方根(13式)S=2.7%を示している。

## 6. 環境ガンマ線の in-situ 測定

Fig. 8は、昭和50年(1975年)10月26日14:00から2時間、73 cm<sup>3</sup> closed-end 同軸型Ge(Li) 検出器を野外に持ち出して測定した環境ガンマ線のパルス波高分布を示す。測定場所は、原研構内の工作工場と器財課倉庫の間の芝生の上である(文献2, 3)参照)。K-40(1461 keV), U-238崩壊系列のRa-226(186 keV), Pb-214(242 keV, 352 keV), Bi-214(609 keV, 1120 keV, 1765 keV, 2205 keV)とTh-232崩壊系列のAc-228(338 keV, 463 keV, 911 keV, 965+969 keV), Tl-208(583 keV, 2614 keV)などの天然放射性核種からのガンマ線ピークおよびフォールアウト核種のCs-137(662 keV)のガンマ線ピークが見られる。

4節, 5節で求めたG(E)関数をFig. 8に示したガンマ線パルス波高分布に作用させて線量率を求めることができる。次節で異なったG(E)関数を作用させたときの線量率を求める。

## 7. 照射線量率の計算

4節に述べたようにG(E)はいくつかのパラメータによって異なった値をとる、これが最終的な照射線量率の計算結果に与える影響について検討を行う。Fig. 3のA, B, およびFig. 4の0°, 90°の4種のG(E)関数をFig. 8に示した環境ガンマ線のパルス波高分布に作用させて、線量率を計算した。その結果をTable 3に示す。

検出器直下( $\theta = 0^\circ$ )に標準線源をおいて測定した標準パルス波高分布から求めたG(E)関数を作用させて得られた線量率は、90°のデータから求めたG(E)関数を作用させて得られた値よりも0.19  $\mu\text{R}/\text{h}$  (4%) 小さかった。これはFig. 4に示したように検出器の検出効率のガンマ線入射角度依存性がG(E)関数には大きな影響を与えるけれども、環境ガンマ線パルス波高分布に作用させて線量率を計算した結果には、4%程度の差しかもたらしめていないことを示している。

100  $\mu\text{Ci}$ あるいは $\sim 10 \mu\text{Ci}$ の標準線源を用いた測定から求めたG(E)関数(Fig. 3のAあるいはB)を作用させて得られた線量率はTable 3の下欄に示したように4.58  $\mu\text{R}/\text{h}$ あるいは4.47  $\mu\text{R}/\text{h}$ であり、その差0.11  $\mu\text{R}/\text{h}$ は2%の差でしかなかった。

## 8. Ge(Li) G(E)関数法, HASL方式および3"×3" NaI(Tl) 検出器G(E)関数法との比較

1節に述べたように環境ガンマ線の in-situ 測定から照射線量率を求める方法としては他にH. L. Beckらが行ったHASL方式<sup>1)</sup> および3"×3" NaI(Tl) 検出器に対して森内氏が計算したG(E)を作用させる方法<sup>4)</sup> などがある。これらの方法で求めた結果と前節で求めたGe(Li) 検出器のG(E)関数を作用させる方法で求めた結果との比較を行う。比較に用いたG(E)はFig. 4のAに示した関数値(線源の強度 $\sim 100 \mu\text{Ci}$ , 位置は0°のときの値)を使用した。ただし、G(E)関数法では宇宙線の寄与が含まれているので、その寄与分0.23  $\mu\text{R}/\text{h}^*$ を引き去った。HASL方式を適用した環境ガンマ線パルス波高分布はFig. 8に示したもので、G(E)を作用させたものと同一である。また3"×3" NaI(Tl) 検出器による方法は、測定日時がFig. 8とは異なっているが測定場所は同じである。Table 4に示した通りこれら3種の方法を比較してみると、Ge(Li) 検出器のG(E)法および3"×3" NaI(Tl) 検出器のG(E)法は良く一致している、一方HASL方式は前2者より小さ目の値となった。これら3方法は一致すべき値と考えるが現状では上記の結果となっている。

\* 森内氏の私言(3 MeV以下)



## 6. 環境ガンマ線の in-situ 測定

Fig. 8は、昭和50年(1975年)10月26日14:00から2時間、73 cm<sup>3</sup> closed-end 同軸型Ge(Li) 検出器を野外に持ち出して測定した環境ガンマ線のパルス波高分布を示す。測定場所は、原研構内の工作工場と器財課倉庫の間の芝生の上である(文献2), 3) 参照)。K-40 (1461 keV), U-238崩壊系列のRa-226 (186 keV), Pb-214 (242 keV, 352 keV), Bi-214 (609 keV, 1120 keV, 1765 keV, 2205 keV) とTh-232崩壊系列のAc-228 (338 keV, 463 keV, 911 keV, 965+969 keV), Tl-208 (583 keV, 2614 keV) などの天然放射性核種からのガンマ線ピークおよびフォールアウト核種のCs-137 (662 keV) のガンマ線ピークが見られる。

4節, 5節で求めたG(E) 関数をFig. 8に示したガンマ線パルス波高分布に作用させて線量率を求めることができる。次節で異なったG(E) 関数を作用させたときの線量率を求める。

## 7. 照射線量率の計算

4節に述べたようにG(E) はいくつかのパラメータによって異なった値をとる、これが最終的な照射線量率の計算結果に与える影響について検討を行う。Fig. 3のA, B, およびFig. 4の0°, 90°の4種のG(E) 関数をFig. 8に示した環境ガンマ線のパルス波高分布に作用させて、線量率を計算した。その結果をTable 3に示す。

検出器直下( $\theta = 0^\circ$ )に標準線源をおいて測定した標準パルス波高分布から求めたG(E) 関数を作用させて得られた線量率は、90°のデータから求めたG(E) 関数を作用させて得られた値よりも0.19  $\mu\text{R}/\text{h}$  (4%) 小さかった。これはFig. 4に示したように検出器の検出効率のガンマ線入射角度依存性がG(E) 関数には大きな影響を与えるけれども、環境ガンマ線パルス波高分布に作用させて線量率を計算した結果には、4%程度の差しかもたらしめていないことを示している。

100  $\mu\text{Ci}$ あるいは $\sim 10 \mu\text{Ci}$ の標準線源を用いた測定から求めたG(E) 関数(Fig. 3のAあるいはB)を作用させて得られた線量率はTable 3の下欄に示したように4.58  $\mu\text{R}/\text{h}$ あるいは4.47  $\mu\text{R}/\text{h}$ であり、その差0.11  $\mu\text{R}/\text{h}$ は2%の差でしかなかった。

## 8. Ge(Li) G(E) 関数法, HASL 方式および3"×3" NaI(Tl) 検出器G(E) 関数法との比較

1節に述べたように環境ガンマ線の in-situ 測定から照射線量率を求める方法としては他にH. L. Beckらが行ったHASL方式<sup>1)</sup> および3"×3" NaI(Tl) 検出器に対して森内氏が計算したG(E) を作用させる方法<sup>4)</sup> などがある。これらの方法で求めた結果と前節で求めたGe(Li) 検出器のG(E) 関数を作用させる方法で求めた結果との比較を行う。比較に用いたG(E) はFig. 4のAに示した関数値(線源の強度 $\sim 100 \mu\text{Ci}$ , 位置は0°のときの値)を使用した。ただし、G(E) 関数法では宇宙線の寄与が含まれているので、その寄与分0.23  $\mu\text{R}/\text{h}^*$ を引き去った。HASL方式を適用した環境ガンマ線パルス波高分布はFig. 8に示したもので、G(E) を作用させたものと同様である。また3"×3" NaI(Tl) 検出器による方法は、測定日時がFig. 8とは異なっているが測定場所は同じである。Table 4に示した通りこれら3種の方法を比較してみると、Ge(Li) 検出器のG(E) 法および3"×3" NaI(Tl) 検出器のG(E) 法は良く一致している、一方HASL方式は前2者より小さ目の値となった。これら3方法は一致すべき値と考えるが現状では上記の結果となっている。

\* 森内茂氏の私言(3 MeV以下)

## 6. 環境ガンマ線の in-situ 測定

Fig. 8は、昭和50年(1975年)10月26日14:00から2時間、73 cm<sup>3</sup> closed-end 同軸型Ge(Li) 検出器を野外に持ち出して測定した環境ガンマ線のパルス波高分布を示す。測定場所は、原研構内の工作工場と器財課倉庫の間の芝生の上である(文献2, 3)参照)。K-40(1461 keV), U-238崩壊系列のRa-226(186 keV), Pb-214(242 keV, 352 keV), Bi-214(609 keV, 1120 keV, 1765 keV, 2205 keV)とTh-232崩壊系列のAc-228(338 keV, 463 keV, 911 keV, 965+969 keV), Tl-208(583 keV, 2614 keV)などの天然放射性核種からのガンマ線ピークおよびフォールアウト核種のCs-137(662 keV)のガンマ線ピークが見られる。

4節, 5節で求めたG(E)関数をFig. 8に示したガンマ線パルス波高分布に作用させて線量率を求めることができる。次節で異なったG(E)関数を作用させたときの線量率を求める。

## 7. 照射線量率の計算

4節に述べたようにG(E)はいくつかのパラメータによって異なった値をとる、これが最終的な照射線量率の計算結果に与える影響について検討を行う。Fig. 3のA, B, およびFig. 4の0°, 90°の4種のG(E)関数をFig. 8に示した環境ガンマ線のパルス波高分布に作用させて、線量率を計算した。その結果をTable 3に示す。

検出器直下( $\theta = 0^\circ$ )に標準線源をおいて測定した標準パルス波高分布から求めたG(E)関数を作用させて得られた線量率は、90°のデータから求めたG(E)関数を作用させて得られた値よりも0.19  $\mu\text{R}/\text{h}$  (4%) 小さかった。これはFig. 4に示したように検出器の検出効率のガンマ線入射角度依存性がG(E)関数には大きな影響を与えるけれども、環境ガンマ線パルス波高分布に作用させて線量率を計算した結果には、4%程度の差しかもたらしめていないことを示している。

100  $\mu\text{Ci}$ あるいは $\sim 10 \mu\text{Ci}$ の標準線源を用いた測定から求めたG(E)関数(Fig. 3のAあるいはB)を作用させて得られた線量率はTable 3の下欄に示したように4.58  $\mu\text{R}/\text{h}$ あるいは4.47  $\mu\text{R}/\text{h}$ であり、その差0.11  $\mu\text{R}/\text{h}$ は2%の差でしかなかった。

## 8. Ge(Li) G(E)関数法, HASL方式および3"×3" NaI(Tl) 検出器G(E)関数法との比較

1節に述べたように環境ガンマ線の in-situ 測定から照射線量率を求める方法としては他にH. L. Beckらが行ったHASL方式<sup>1)</sup> および3"×3" NaI(Tl) 検出器に対して森内氏が計算したG(E)を作用させる方法<sup>4)</sup> などがある。これらの方法で求めた結果と前節で求めたGe(Li) 検出器のG(E)関数を作用させる方法で求めた結果との比較を行う。比較に用いたG(E)はFig. 4のAに示した関数値(線源の強度 $\sim 100 \mu\text{Ci}$ , 位置は0°のときの値)を使用した。ただし、G(E)関数法では宇宙線の寄与が含まれているので、その寄与分0.23  $\mu\text{R}/\text{h}^*$ を引き去った。HASL方式を適用した環境ガンマ線パルス波高分布はFig. 8に示したもので、G(E)を作用させたものと同様である。また3"×3" NaI(Tl) 検出器による方法は、測定日時がFig. 8とは異なっているが測定場所は同じである。Table 4に示した通りこれら3種の方法を比較してみると、Ge(Li) 検出器のG(E)法および3"×3" NaI(Tl) 検出器のG(E)法は良く一致している、一方HASL方式は前2者より小さ目の値となった。これら3方法は一致すべき値と考えるが現状では上記の結果となっている。

\* 森内氏の私言(3 MeV以下)

## 9. 結 論

Ge (Li) 検出器のスペクトル—線量変換演算子値関数:  $G(E)$  を求め、環境ガンマ線のパルス波高分布に作用させて照射線量率の計算を行った。これらの結果から次のような結論を得た。

- (1) Ge (Li) 検出器の  $G(E)$  を求める場合に主なパラメータと考えられるのは、
  - i) Ge (Li) 検出器の検出効率入射角度依存性
  - ii) 標準スペクトルを測定するために用いる標準線源の種類および数
  - iii) 標準線源の強度
  - iv) 多項式の項数  $KMAX$
  - v) 任意定数  $m$  の値
 などである。
  - i) に関しては、 $G(E)$  に与える影響が大きいので、入射角度依存性をできるだけ持たないような検出器を使用することが望ましいのは当然である。
  - ii) に関しては、正確に強度が判明している標準線源を用いること、およびそのガンマ線エネルギーが適当な間隔で、3 MeV までカバーしていることが望まれる。
  - iii) に関しては、環境バックグランド・ガンマ線よりも充分強い計数率を与える線源強度（例えば  $\sim 100 \mu Ci$ ）を持つことが望まれる。
  - iv), v) については  $m=0, 1, 2, 3$  のいずれに対しても  $KMAX \geq 15$  と取れば充分であることが判った。
- (2) Ge (Li) 検出器は標準の規格がなく、特性が個々の検出器により異なるため、 $G(E)$  の値は、それぞれの検出器に対して求めなければならない。
- (3) 筆者らの試作した  $7.3 \text{ cm}^3$  closed-end 同軸型 Ge (Li) 検出器を使用して測定した環境ガンマ線のパルス波高分布に  $G(E)$  関数を作用させて得た線量率は、 $G(E)$  関数自体が大きく異なっても (Fig. 3, 4), その影響を余り受けなかった。また、H. L. Beck らの解析方法<sup>1)</sup>を使用した結果とも余り大きく異ならなかった。
- (4)  $G(E)$  を作用させて照射線量率を求める方法は原理的には線源の分布が未知であっても求まるはずであるが、検出器側の問題としてガンマ線の入射角度によって検出効率が増減すれば線源の分布によって偏った値を与えてしまう。これを改善するためには、
  - i) 入射角度依存性のない Ge (Li) 検出器を製作する。
  - ii) 通常の Ge (Li) 検出器は Ge 結晶前面方向からの入射ガンマ線の吸収を小さくするようにエンドキャップ底部を薄くするなどの工夫がなされている。逆に結晶側面方向からの入射ガンマ線の吸収は若干大きくなっている。したがって前面方向に適当な吸収板を置いて側面方向と吸収特性を揃えてやれば検出効率の入射角度依存性を小さくすることが可能である。このような工夫を行えば通常の Ge (Li) 検出器を使うことができると思われる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって、

- 1)  $3'' \times 3''$  NaI (T $\ell$ ) 検出器に対する  $G(E)$  関数値および照射線量計算のためコード
- 2) 地上高 1 m における宇宙線の寄与 (3 MeV 以下) に関するデータ ( $0.23 \mu R/h$ )

## 9. 結 論

Ge (Li) 検出器のスペクトル—線量変換演算子値関数:  $G(E)$  を求め、環境ガンマ線のパルス波高分布に作用させて照射線量率の計算を行った。これらの結果から次のような結論を得た。

- (1) Ge (Li) 検出器の  $G(E)$  を求める場合に主なパラメータと考えられるのは、
  - i) Ge (Li) 検出器の検出効率入射角度依存性
  - ii) 標準スペクトルを測定するために用いる標準線源の種類および数
  - iii) 標準線源の強度
  - iv) 多項式の項数  $KMAX$
  - v) 任意定数  $m$  の値
 などである。
  - i) に関しては、 $G(E)$  に与える影響が大きいので、入射角度依存性をできるだけ持たないような検出器を使用することが望ましいのは当然である。
  - ii) に関しては、正確に強度が判明している標準線源を用いること、およびそのガンマ線エネルギーが適当な間隔で、3 MeV までカバーしていることが望まれる。
  - iii) に関しては、環境バックグラウンド・ガンマ線よりも充分強い計数率を与える線源強度（例えば  $\sim 100 \mu Ci$ ）を持つことが望まれる。
  - iv), v) については  $m=0, 1, 2, 3$  のいずれに対しても  $KMAX \geq 15$  と取れば充分であることが判った。
- (2) Ge (Li) 検出器は標準の規格がなく、特性が個々の検出器により異なるため、 $G(E)$  の値は、それぞれの検出器に対して求めなければならない。
- (3) 筆者らの試作した  $73 \text{ cm}^3$  closed-end 同軸型 Ge (Li) 検出器を使用して測定した環境ガンマ線のパルス波高分布に  $G(E)$  関数を作用させて得た線量率は、 $G(E)$  関数自体が大きく異なっても (Fig. 3, 4), その影響を余り受けなかった。また、H. L. Beck らの解析方法<sup>1)</sup>を使用した結果とも余り大きく異ならなかった。
- (4)  $G(E)$  を作用させて照射線量率を求める方法は原理的には線源の分布が未知であっても求まるはずであるが、検出器側の問題としてガンマ線の入射角度によって検出効率が変われば線源の分布によって偏った値を与えてしまう。これを改善するためには、
  - i) 入射角度依存性のない Ge (Li) 検出器を製作する。
  - ii) 通常の Ge (Li) 検出器は Ge 結晶前面方向からの入射ガンマ線の吸収を小さくするようにエンドキャップ底部を薄くするなどの工夫がなされている。逆に結晶側面方向からの入射ガンマ線の吸収は若干大きくなっている。したがって前面方向に適当な吸収板を置いて側面方向と吸収特性を揃えてやれば検出効率の入射角度依存性を小さくすることが可能である。このような工夫を行えば通常の Ge (Li) 検出器を使うことができると思われる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって、

- 1)  $3'' \times 3''$  NaI (T $\emptyset$ ) 検出器に対する  $G(E)$  関数値および照射線量計算のためコード
- 2) 地上高 1 m における宇宙線の寄与 (3 MeV 以下) に関するデータ ( $0.23 \mu R/h$ )

などについて日本原子力研究所保健物理安全管理部環境放射能課森内茂氏の御助力を得ましたのでここに深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) H. L. Beck, J. A. De Campo, and C. V. Gogolak : In-situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry, HASL-258 (1972)。その他の文献については、文献3)中の参考文献を参照すること。
- 2) E. Sakai, H. Terada, and M. Katagiri : In-situ gamma-ray measurement using Ge(Li) detectors, IEEE Trans, **NS-23(1)** 726-733 (1976)
- 3) 阪井英次, 寺内博海, 片桐政樹 : 可搬型Ge(Li)検出器を用いた環境ガンマ線のin-situ測定, JAERI-M 6498 (1976年3月)
- 4) 森内茂 : スペクトル-線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定, JAERI 1209 (1971年7月)
- 5) Chr. Meixner : Gammaenergien 2, Auflage, JUL-1087-RX (Teil I) (Juli 1974)

などについて日本原子力研究所保健物理安全管理部環境放射能課森内茂氏の御助力を得ましたのでここに深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) H. L. Beck, J. A. De Campo, and C. V. Gogolak : In-situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry, HASL-258 (1972)。その他の文献については、文献3)中の参考文献を参照すること。
- 2) E. Sakai, H. Terada, and M. Katagiri : In-situ gamma-ray measurement using Ge(Li) detectors, IEEE Trans, **NS-23(1)** 726-733 (1976)
- 3) 阪井英次, 寺内博海, 片桐政樹 : 可搬型Ge(Li)検出器を用いた環境ガンマ線の in-situ 測定, JAERI-M 6498 (1976年3月)
- 4) 森内茂 : スペクトル-線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定, JAERI 1209 (1971年7月)
- 5) Chr. Meixner : Gammaenergien 2, Auflage, JUL-1087-RX (Teil I) (Juli 1974)

Table 1 Intensities of gamma-ray standard sources  
Sets A and B

Set	A	B
Nuclide	$\mu\text{Ci}$ at March 13, 1976	$\mu\text{Ci}$ at October 9, 1975
Y-88	100	1.01
Co-57	100	4.17
Co-60	95.6	9.00
Se-75	97.8	—
Na-22	86.8(93.1*)	9.16
Am-241	98.5	12.02
Cs-137	96.6	10.9
Mn-54	97.4	4.77
Zn-65	98.8(89.1*)	—

Set A; Japan Radioisotope Association, Gamma-ray standard source Type JDD-761

Set B; The Radiochemical Centre Amersham England, Gamma reference source set QCR 2

\* Assigned by the authors, see text.

Table 2 Accuracy of least square fitting of G(E) operator

Nuclide j	Activity( $\mu\text{Ci}$ ) $X_j$	Exposure rates at 1m ( $\mu\text{R/h}$ ) $0^\circ$		
		G(E) <sup>#</sup> method <sup>*</sup>	Reference <sup>**</sup>	Deviation
Y-88	100	136.6 $\mu\text{R/h}$	136.9 $\mu\text{R/h}$	-0.24%
Co-57	100	5.70	5.71	-0.12
Co-60	95.6	129.3	128.8	0.34
Na-22	93.1 (86.8 <sup>+</sup> )	116.3	115.0	1.08
Se-75	97.8	20.6	20.6	0.15
Am-241	98.5	1.23	1.23	-0.03
Cs-137	96.6	31.6	32.1	-1.61
Mn-54	97.4	47.6	47.0	1.42
Zn-65	89.1 (98.9 <sup>+</sup> )	28.0	28.4	-1.19
Root mean square				2.71%

$$* D = \int_0^\infty N(E)G(E)dE$$

$$\# m=1, KMAX=16$$

$$** D = \frac{(\sum E \cdot \gamma \cdot \mu) \cdot 1.602 \times 10^{-6} \cdot 3.7 \times 10^{10} \cdot 3.6 \times 10^3 \cdot X_j}{84 \cdot 4\pi(100)^2}$$

+ Assigned by Japan Radioisotope Association

Table 3 Exposure rates calculated by various G(E) operators with same spectrum

Parameters of G(E) operator	Calculated exposure rates with same spectrum
Source position 0°	4.58 $\mu\text{R/h}$ (<3MeV)
90°	4.77 "
Source intensity $\sim 100\mu\text{Ci}$	4.58 $\mu\text{R/h}$ (<3MeV)
$\sim 10\mu\text{Ci}$	4.47 "

Table 4 Comparison of exposure rates obtained by three methods  
In-situ measurement point: On the lawn between Machine Shop and Storehouse

Method	Detector	Exposure rate
G(E)	Ge(Li)detector	4.35* $\mu\text{R/h}$
HASL	Ge(Li)detector	4.00 "
G(E) <sup>+</sup>	3"x3" NaI(Tl)	4.64* "

\* Contribution of cosmic rays (0.23 $\mu\text{R/h}$ ) has been already subtracted.

+ The day of measurement is different from upper two cases but measurement point is same.



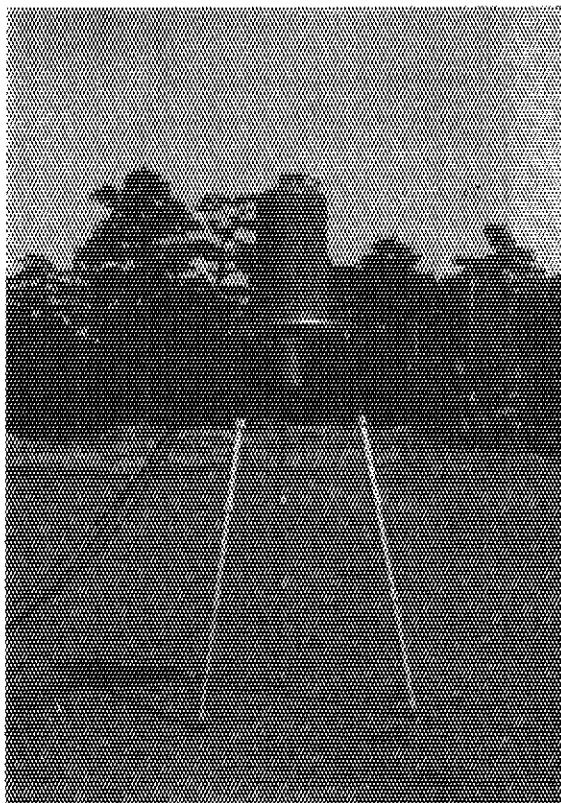


Photo 1 Photograph of portable in-situ environmental gamma-ray spectrometer  
(  $73\text{cm}^3$  closed-end coaxial Ge(Li) detector in 7.5 liter liquid  
nitrogen cryostat )

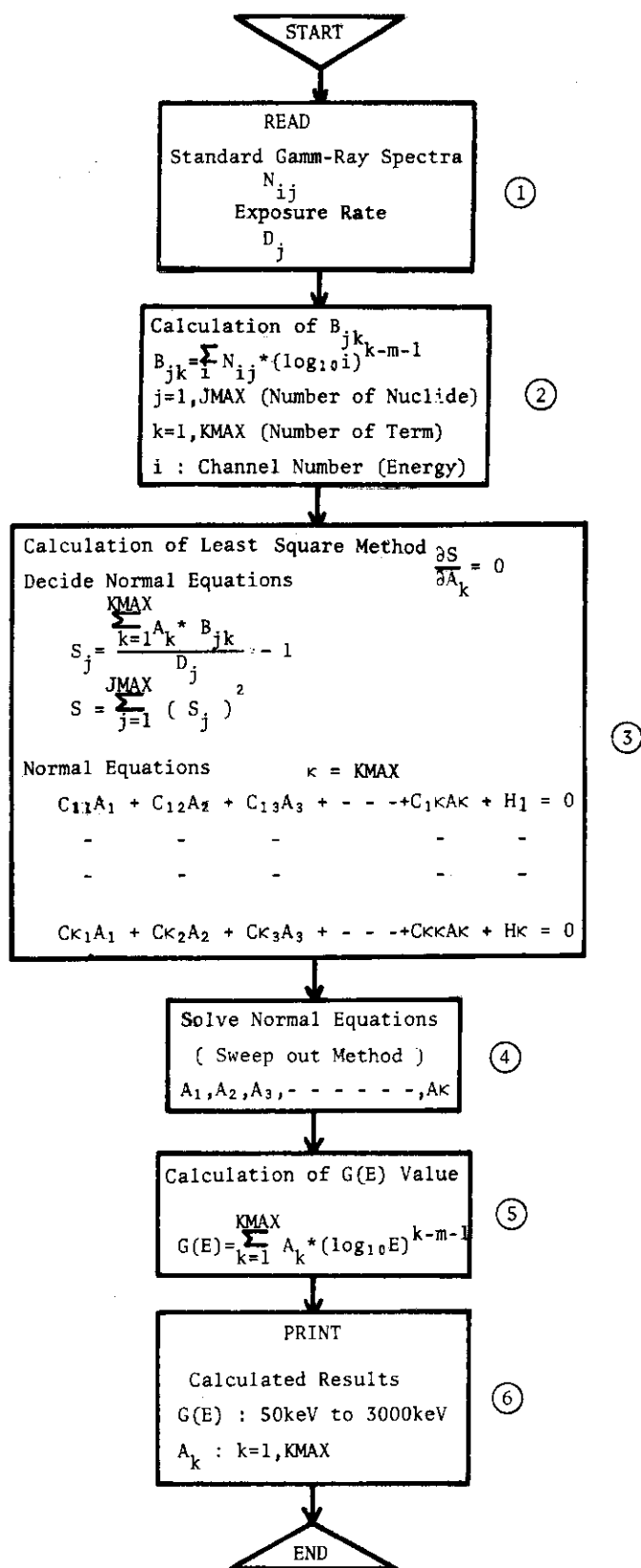


Fig.1 Calculating procedure of spectrum-to-dose conversion operator value function G(E) for Ge(Li) detector

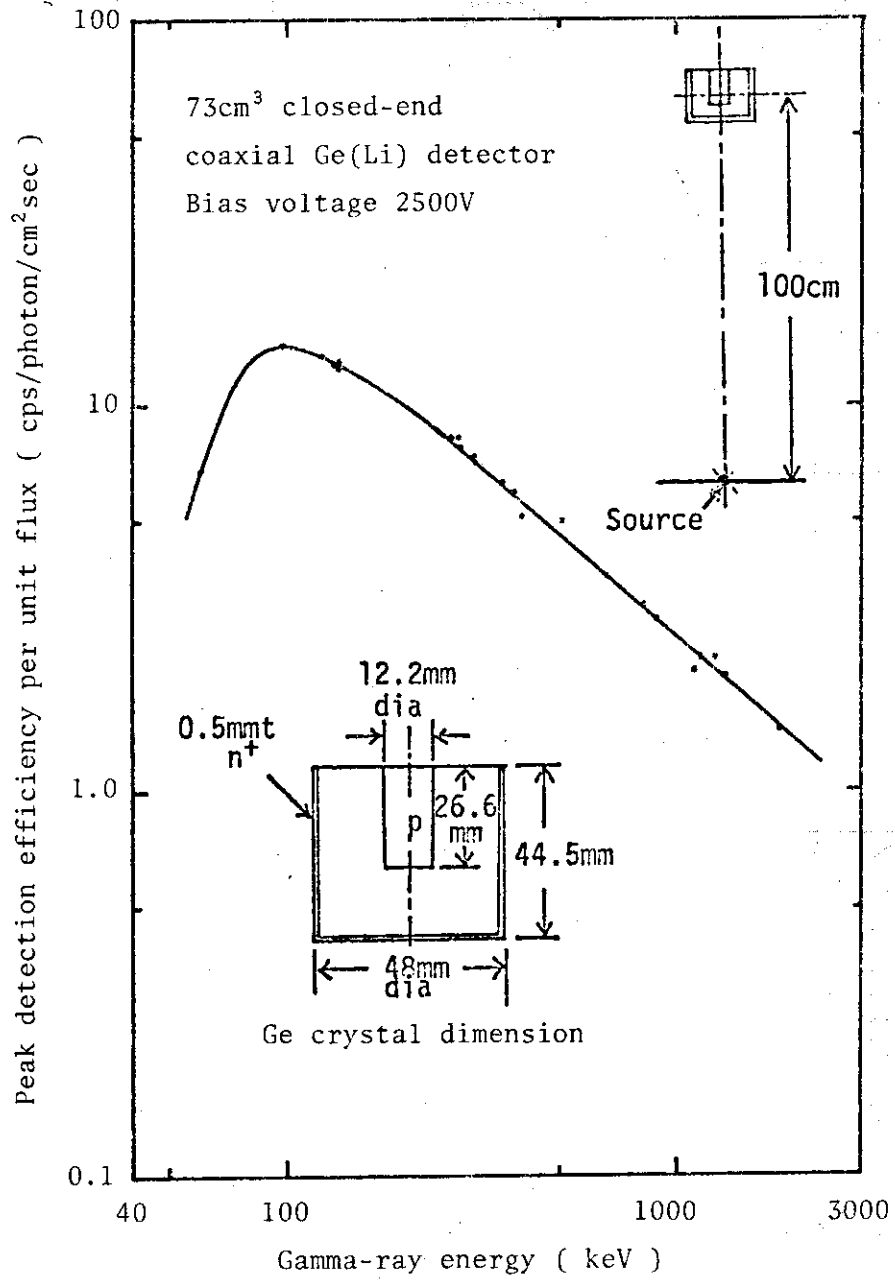


Fig. 2 Peak detection efficiency per unit flux of 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer measured at source-to-detector distance 100cm

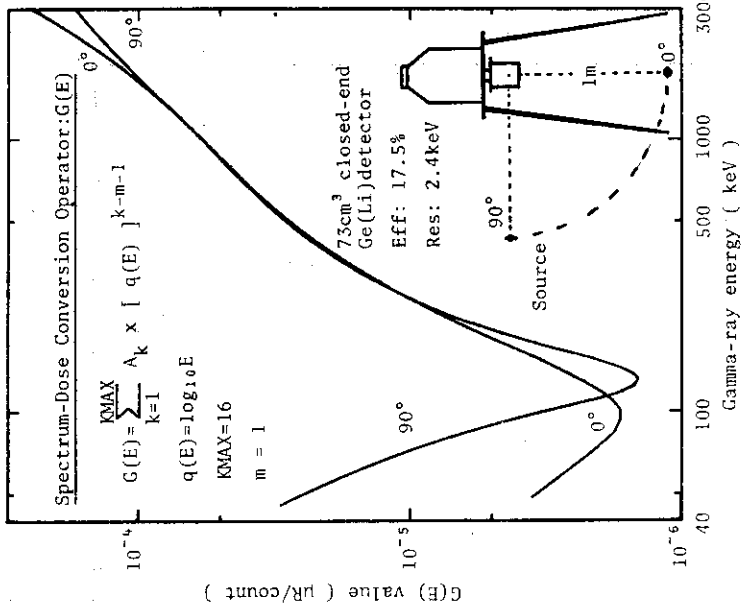


Fig.4 Spectrum-to-dose conversion operator value function  $G(E)$  for 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer obtained by the measurement made using <sup>60</sup>Co standard sources placed at  $\theta=0^\circ$  and  $\theta=90^\circ$

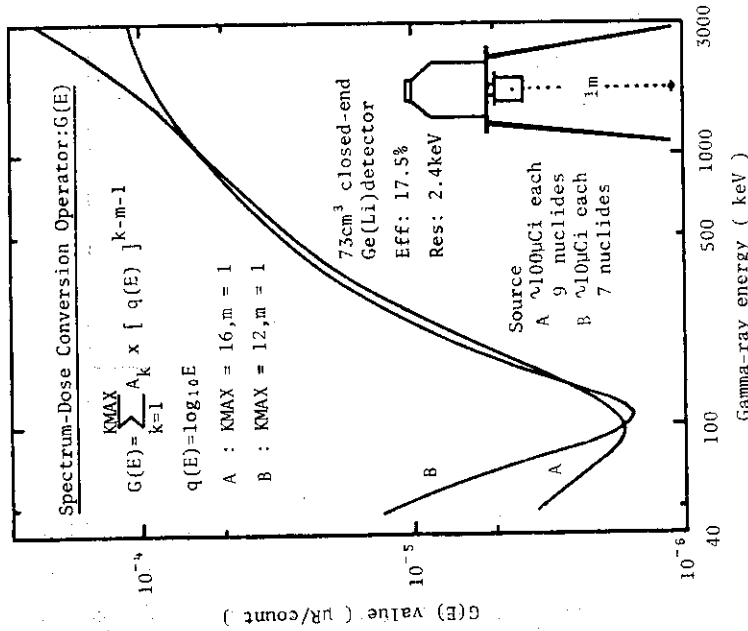


Fig.3 Spectrum-to-dose conversion operator value function  $G(E)$  for 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer ( A :  $G(E)$  calculated from the measurement made using <sup>60</sup>Co standard sources. B :  $G(E)$  calculated from the measurement made using <sup>60</sup>Co standard sources.

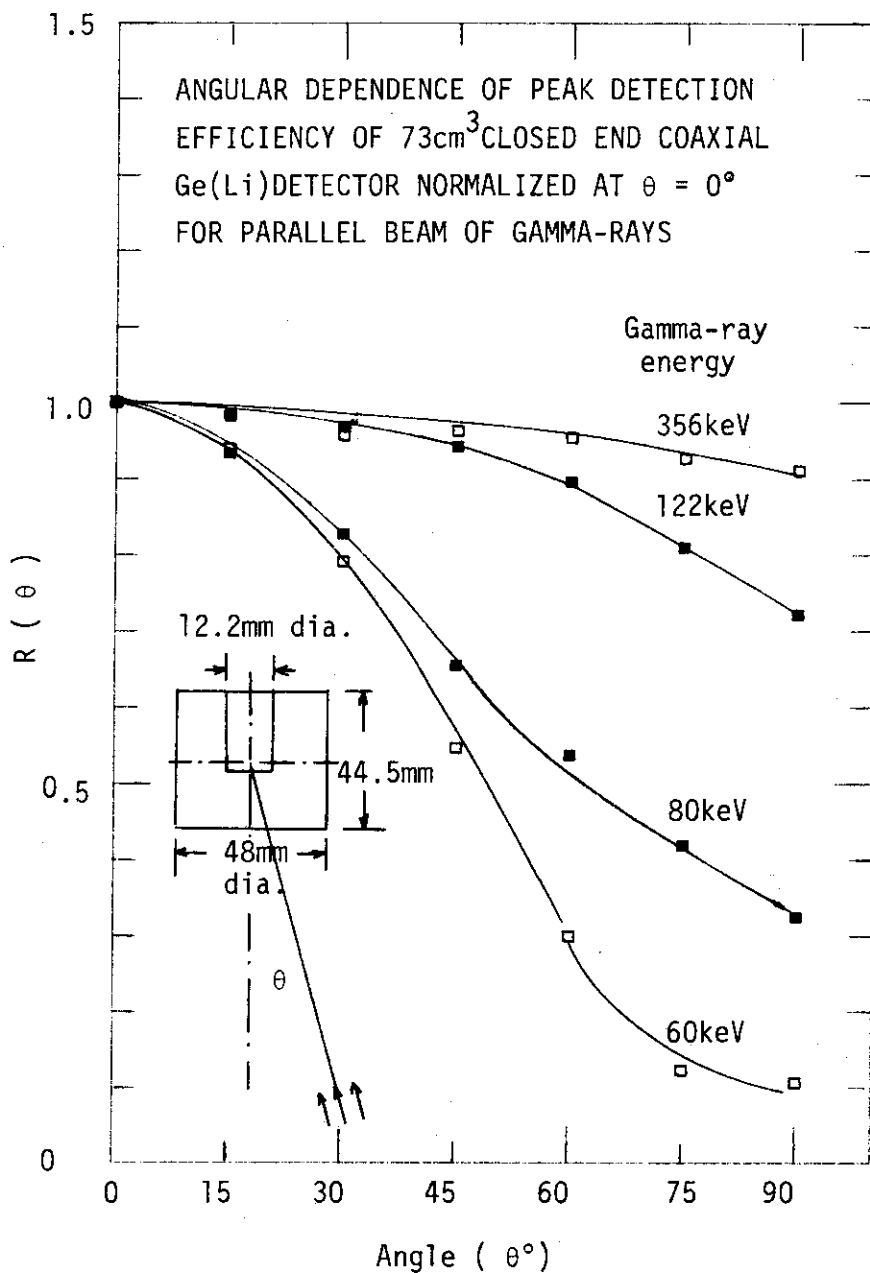


Fig.5 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm<sup>3</sup>closed-end coaxial Ge(Li)detector normalized at  $\theta = 0^\circ$  for parallel beam of gamma-rays

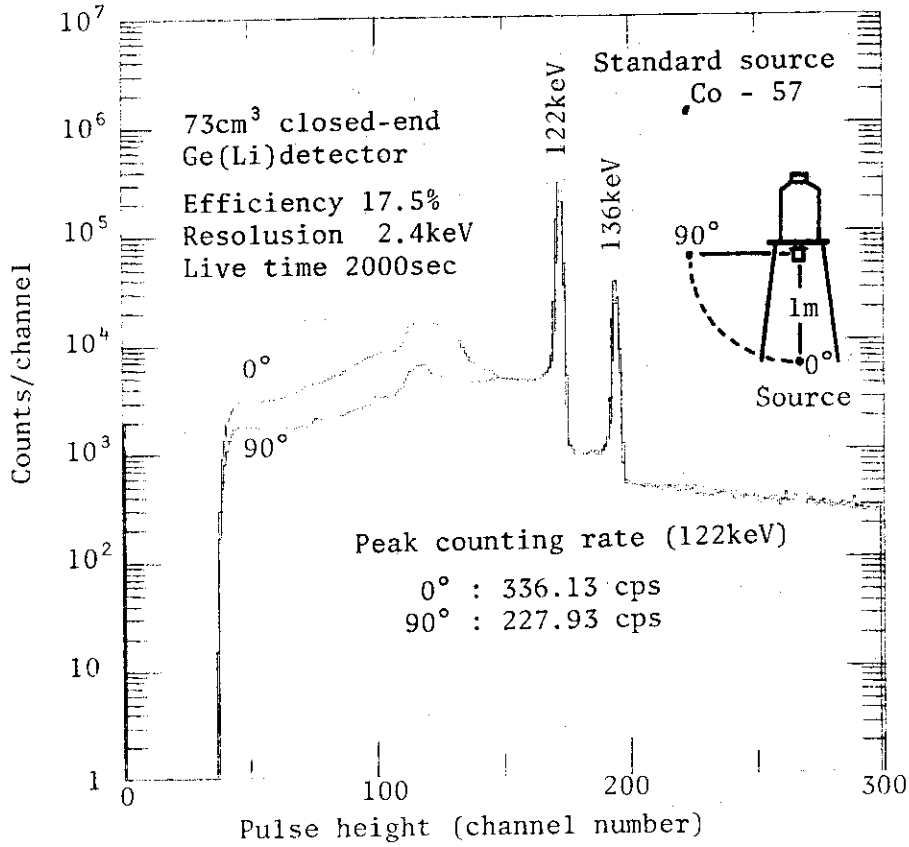


Fig.6 Pulse height distributions of gamma-rays from  $^{57}\text{Co}$  standard source placed at  $\theta=0^\circ$  and at  $\theta=90^\circ$ , obtained by 73cm<sup>3</sup> closed-end coaxial Ge(Li) detector

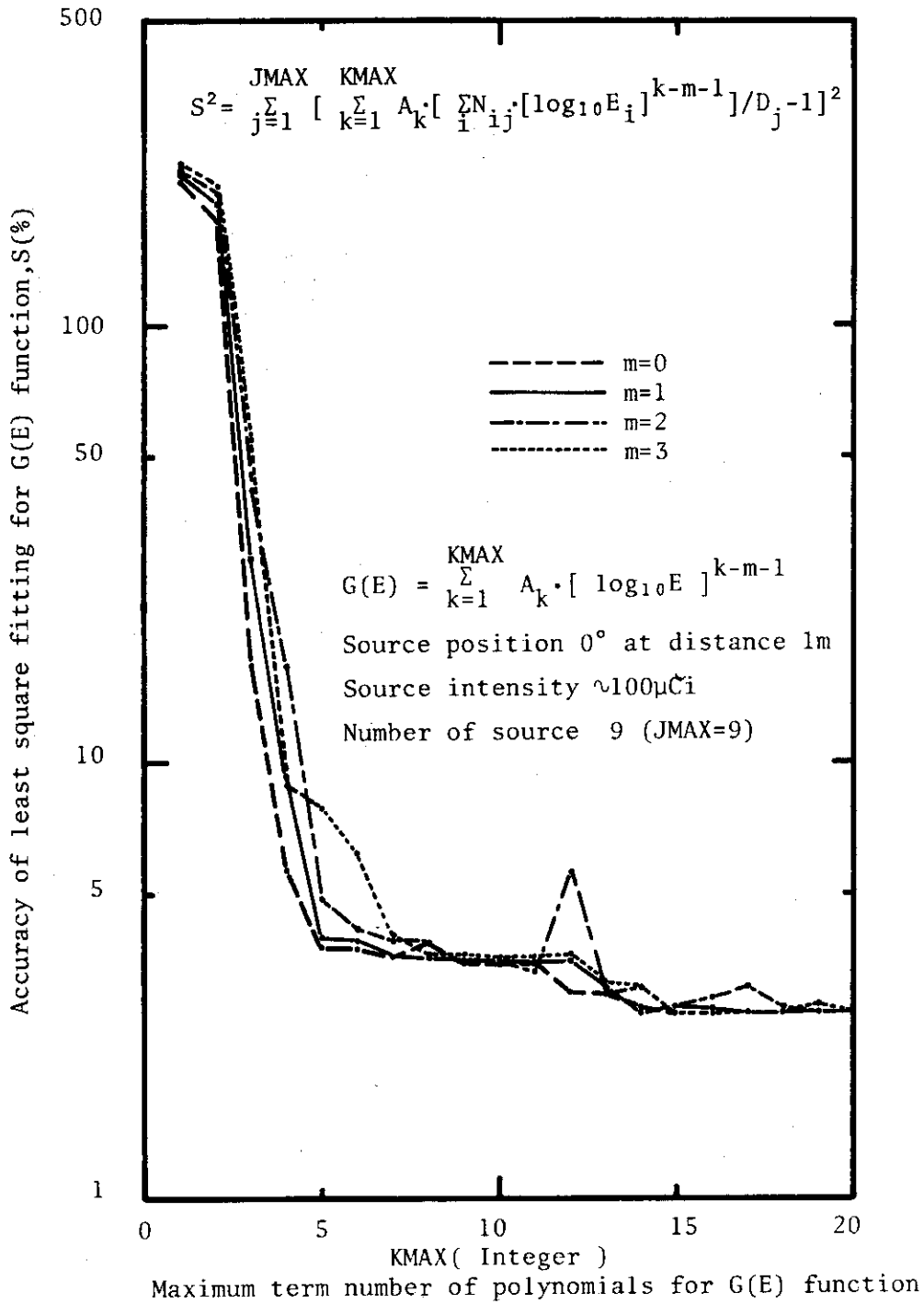


Fig. 7 Accuracy of least square fitting for G(E) function, S(%), for different values of m and KMAX

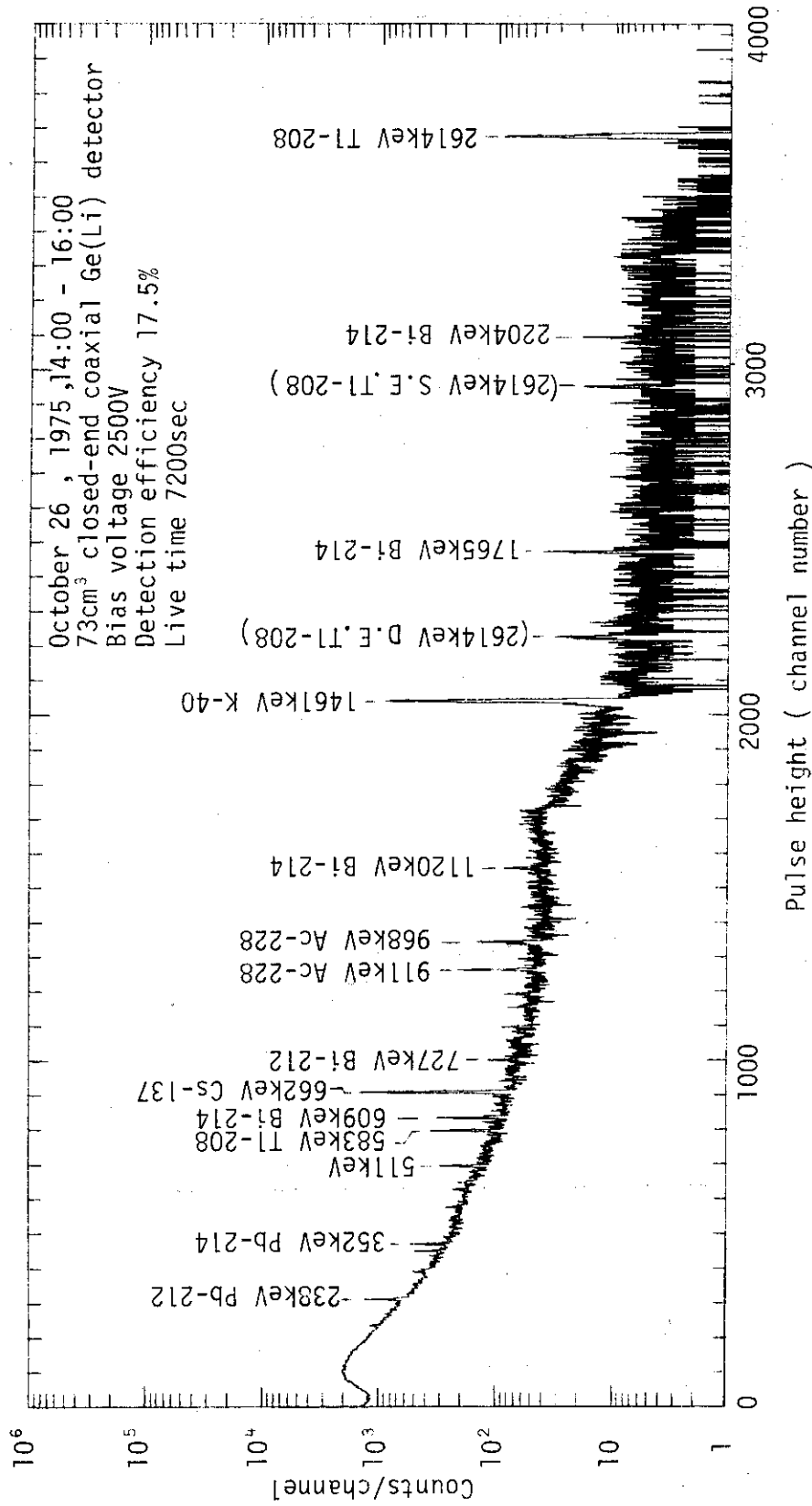


Fig.8 In-situ gamma-ray pulse height distribution measured on the lawn between Machineshop and Storehouse in Japan atomic Energy Research Institute on October 26, 1975