

JAERI-M
84-003

野外測定用純Ge半導体検出器の
スペクトル-線量変換演算子の決定

1984年2月

長岡 鋭・坂本 隆一・森内 茂

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

野外測定用純 Ge 半導体検出器のスペクトル線量
変換演算子の決定

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

長岡 鋭・坂本 隆一・森内 茂

(1984年1月9日受理)

スペクトル線量変換演算子による線量評価のための純 Ge 半導体検出器用 $G(E)$ 関数を決定した。検出器は、有効体積 106.5cc の円筒形のもので、線量変換の対象とする γ 線エネルギー範囲は 40keV から 3MeV である。

NaI(Tl) シンチレーション検出器については、すでに数種類の円筒形及び球形のものに対する $G(E)$ 関数を決定しているが、純 Ge 検出器は、NaI(Tl) シンチレーション検出器に比べてエネルギー分解能が優れており、環境放射線測定分野ではこのスペクトル情報を用いたエネルギー解析、線量評価のために非常に有用である。

今回決定した $G(E)$ 関数は、環境 γ 線用の純 Ge 検出器のものであり、照射線量単位における評価精度は、全体にわたって約 $\pm 5\%$ 以内である。この線量評価法自体、極めて簡単で高精度の線量評価手法であるため、今後環境 γ 線の線量評価に活用できる。

Determination of Spectrum-Dose Conversion Operator for a Pure Germanium
Semi-Conductor Detector for Environmental γ -Ray Measurement

Toshi NAGAOKA, Ryuichi SAKAMOTO and Shigeru MORIUCHI

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 9, 1984)

The $G(E)$ functions of the spectrum-dose conversion operator for a cylindrical pure germanium semi-conductor detector to evaluate the exposure rate were determined.

Effective volume of the detector is 106.5 cm^3 ($5.43 \text{ cm } \phi \times 4.6 \text{ cm}$), and the energy range of gamma-ray applicable for the $G(E)$ function is from 40 keV up to 3 MeV.

Authors have already determined $G(E)$ functions for cylindrical NaI(Tl) scintillation detectors and for spherical ones. However, as germanium detectors are far superior to NaI(Tl) scintillation detectors in the point of energy resolution, they are very useful in the field of environmental gamma-ray measurement for gamma-ray energy analysis and exposure evaluation using their pulse height spectrum.

The present $G(E)$ functions are prepared for a pure germanium detector for environmental gamma-ray measurement. Exposure rate can be evaluated accurately and easily by using these $G(E)$ functions.

The measuring accuracy in the range of 40 keV up to 3 MeV for exposure unit are within about 5 %.

These $G(E)$ functions are useful for interconnecting the results measured by various instruments in environmental monitoring.

Keywords: Spectrum-dose Conversion Operator, $G(E)$ Function, Pure Ge Detector, Environmental γ -ray Measurement

目 次

1. 緒 言	1
2. スペクトル-線量変換演算子の概要	1
2.1 スペクトル-線量変換演算子	1
2.2 G(E)関数による線量計算	2
3. 実験による標準パルス波高スペクトル分布(応答関数)の決定	2
3.1 標準 γ 線源および線量計算	2
3.1.1 エネルギーによる γ 線源の選択	2
3.1.2 標準スペクトルに対応する照射線量率の計算	3
(1) 実効線量減衰係数 μ_{eff} の決定	3
(2) 実測スペクトルに対応する照射線量率	3
(3) モックスペクトルに対応する照射線量率	4
3.2 スペクトル分布の測定と調整	5
3.2.1 測定系及び実験	5
3.2.2 標準スペクトル	5
(1) 測定スペクトルの調整	5
(i) ピーク中心チャンネルの決め方	6
(ii) ピーク面積の求め方	6
(iii) パルス波高-エネルギーの直線性とエネルギー校正法	6
(iv) スペクトルのスムージング	7
(2) 混合スペクトルの分離	7
(3) 低エネルギー(120keV以下)モックスペクトルの作成	7
(4) 標準スペクトルの整備	8
3.2.3 実測スペクトル分布の検定	8
(1) バイアス電圧特性	8
(2) γ 線エネルギー特性	8
4. G(E)関数の計算	9
4.1 多項式近似による計算法	9
4.2 G(E)関数の決定	10
4.2.1 計算条件	10
(1) パラメータ	10
(2) 波高弁別レベル	10
4.2.2 最適近似関数の選定法	10
4.2.3 計算結果と検討	11
5. 結 言	12
参考文献	13
Appendix I 線源の自己吸収補正因子	14

Contents

1. Introduction	1
2. The outline of Spectrum-Dose conversion operator	1
2.1 Spectrum-Dose conversion operator	1
2.2 Dose calculation using G(E) function	2
3. Determination of response functions of the pure germanium detector by experiments	2
3.1 Standard gamma ray sources and exposures	2
3.1.1 Selection of gamma ray sources	2
3.1.2 Calculations of exposure rate corresponding to each standard pulse height spectrum	3
(1) Effective dose attenuation coefficient μ_{eff}	3
(2) Exposure rate corresponding to each measured pulse height spectrum	3
(3) Exposure rate corresponding to each mock pulse height spectrum	4
3.2 Measurements and adjustments of pulse height spectra	5
3.2.1 Measurement system and experiment	5
3.2.2 Standard pulse height spectra	5
(1) Adjustments of measured pulse height spectra	5
(i) The channel number of the center of the photo-peak	6
(ii) Total counts of a photo-peak	6
(iii) Linearity between pulse height and gamma energy, and energy calibration	6
(iv) Smoothing	7
(2) Separation of the subordinate pulse height spectrum	7
(3) Mock pulse height spectra for low energy (<120 keV)	7
(4) Preparation of standard pulse height spectra	8
3.2.3 Examinations of measured pulse height spectra	8
(1) Bias voltage characteristics	8
(2) Gamma-ray energy characteristics	8
4. Calculation of G(E) functions	9
4.1 Polynomial approximation	9
4.2 Determination of G(E) functions	10
4.2.1 Numerical conditions	10
(1) Parameters	10
(2) Pulse height discrimination level	10
4.2.2 Selection of optimum function	10
4.2.3 Results and discussion	11
5. Conclusion	12
References	13
Appendix I Correction factor for self absorption of the gamma-ray sources	14

1. 緒 言

Ge 半導体検出器は、検出体の質量が電離箱、GM計数管などの気体検出器に比べて大きくとれ、かつ高い原子番号の元素から構成されていると同時に、固体検出器の中でもNaI(Tl)シンチレーション検出器などに比べて格段に高いエネルギー分解能を有しており、現在、核種分析を始めとして広い分野で γ 線の高精度測定に用いられている。

現在最も一般的なGe検出器は、Ge(Li)型のもので、とくに実験室内における核種分析に用いられているが、近年、結晶処理技術の向上により、極めて高純度のGe結晶から成るいわゆる純Ge検出器が実用化されている。この両者は、検出器としての性能、特性上は殆ど差が無いが、Ge(Li)検出器が常時液体ちっ素温度(約77°K)に冷却しておかねばならないのに対し、純Ge検出器は使用する数時間前から冷却すればよく、常時冷却の必要がないという利点を有しているため、液体ちっ素の補給が容易でない野外における γ 線測定、或は車両に搭載して研究室から離れた地点で使用する場合などに有用である。

Ge検出器は、その高いエネルギー分解能を利用して、パルス波高スペクトル分布(以下「スペクトル分布」または単に「スペクトル」という)から核種の同定や定量をするために用いられることが多いが、測定場における空間線量率をスペクトル分布から直接求めることも可能である。この方法はスペクトル-線量変換演算子法であって、NaI(Tl)シンチレーション検出器に対する演算子値関数 $G(E)$ は、既にいくつかのNaI(Tl)シンチレーション検出器に対して決定され^{(1),(2)}、実際の環境 γ 線の線量測定、モニタリング等に利用されている。

本報告においては、とくに環境中における γ 線測定を念頭におき、 $0.1\mu\text{R}/\text{hr} \sim 1\text{mR}/\text{hr}$ 程度の低レベル γ 線場での高精度測定に用いる野外測定用純Ge半導体検出器用の $G(E)$ 関数を決定した。

2 スペクトル-線量変換演算子の概要

2.1 スペクトル-線量変換演算子

スペクトル-線量変換演算子についてはすでに報告されている⁽¹⁾ので、ここでは簡単にその概要を述べるにとどめる。

Ge検出器あるいはそれと同様の放射線検出特性をもつ検出器による任意の測定系において、単色エネルギー E_0 の γ 線場での吸収エネルギー-スペクトル分布を $n(E, E_0)$ 、これに対応する同一放射線場の求めるべき被照射物質の受ける線量を $D(E_0)$ と置くと、この二者を結合する演算子 $\int dE \cdot G(E)$ は線量測定のエネギー範囲 $E_L \leq E_0 \leq E_U$ にわたって次式を満たすものでなければならない。

1. 緒 言

Ge 半導体検出器は、検出体の質量が電離箱、GM計数管などの気体検出器に比べて大きくとれ、かつ高い原子番号の元素から構成されていると同時に、固体検出器の中でもNaI(Tl)シンチレーション検出器などに比べて格段に高いエネルギー分解能を有しており、現在、核種分析を始めとして広い分野で γ 線の高精度測定に用いられている。

現在最も一般的なGe検出器は、Ge(Li)型のもので、とくに実験室内における核種分析に用いられているが、近年、結晶処理技術の向上により、極めて高純度のGe結晶から成るいわゆる純Ge検出器が実用化されている。この両者は、検出器としての性能、特性上は殆ど差が無いが、Ge(Li)検出器が常時液体ちっ素温度(約77°K)に冷却しておかねばならないのに対し、純Ge検出器は使用する数時間前から冷却すればよく、常時冷却の必要がないという利点を有しているため、液体ちっ素の補給が容易でない野外における γ 線測定、或は車両に搭載して研究室から離れた地点で使用する場合などに有用である。

Ge検出器は、その高いエネルギー分解能を利用して、パルス波高スペクトル分布(以下「スペクトル分布」または単に「スペクトル」という)から核種の同定や定量をするために用いられることが多いが、測定場における空間線量率をスペクトル分布から直接求めることも可能である。この方法はスペクトル-線量変換演算子法であって、NaI(Tl)シンチレーション検出器に対する演算子値関数 $G(E)$ は、既にいくつかのNaI(Tl)シンチレーション検出器に対して決定され^{(1),(2)}、実際の環境 γ 線の線量測定、モニタリング等に利用されている。

本報告においては、とくに環境中における γ 線測定を念頭におき、 $0.1\mu\text{R}/\text{hr} \sim 1\text{mR}/\text{hr}$ 程度の低レベル γ 線場での高精度測定に用いる野外測定用純Ge半導体検出器用の $G(E)$ 関数を決定した。

2 スペクトル-線量変換演算子の概要

2.1 スペクトル-線量変換演算子

スペクトル-線量変換演算子についてはすでに報告されている⁽¹⁾ので、ここでは簡単にその概要を述べるにとどめる。

Ge検出器あるいはそれと同様の放射線検出特性をもつ検出器による任意の測定系において、単色エネルギー E_0 の γ 線場での吸収エネルギー-スペクトル分布を $n(E, E_0)$ 、これに対応する同一放射線場の求めるべき被照射物質の受ける線量を $D(E_0)$ と置くと、この二者を結合する演算子 $\int dE \cdot G(E)$ は線量測定のエネルギー範囲 $E_L \leq E_0 \leq E_U$ にわたって次式を満たすものでなければならない。

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E, E_0) \cdot G(E) dE = D(E_0) \quad (2-1)$$

ここで E_{\min} , E_{\max} は E の積分下限, 積分上限である。

上式を満たす関数 $G(E)$ が上に示すエネルギー範囲にわたって存在するか否かは $n(E, E_0)$ とその積分区間 E_{\min} , E_{\max} のとる値に関係してくる。

NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na) などの無機シンチレータを使用する検出器, Ge 検出器その他数種の検出器の $n(E, E_0)$ について上式を満足する $G(E)$ 関数は存在する⁽¹⁾。

2.2 $G(E)$ 関数による線量計算

多重波高分析器により測定されたパルス波高スペクトル分布を $N(E)$ とすると, 線量 D_T は次式から計算できる。

$$D_T = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} N(E) \cdot G(E) dE \quad (2-2)$$

E_{\min} , E_{\max} についてはすでに述べた通りである。

通常 $N(E)$ は多重波高分析器によってエネルギーをチャンネル番号で置き換えた不連続の分布で表わされているので, この場合は

$$D_T = \sum_{I=1}^{I_{\max}} N_M(I) \cdot G(E_I) \quad (2-3)$$

で計算される。ここで 1 チャンネルのエネルギー幅を ΔE とし, $E_I = \Delta E \times I$ である。

3 実験による標準パルス波高スペクトル分布 (応答関数)の決定

3.1 標準 γ 線源および線量計算

3.1.1 エネルギーによる γ 線源の選択

$G(E)$ 関数の計算においては, 計算に用いる標準スペクトル分布のエネルギー範囲が広く, 各スペクトル間のエネルギー間隔が対数上で等間隔で小さい程, すなわち入力データ数が多い程精度の高い演算子を決定できる。しかし, 必要とするエネルギー範囲を $40 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$ とした場合, 正確な decay scheme が分っており, 単色又は分離可能な複数の γ 線を放出し, 半減期が適当で, 入手が可能な核種は種類が限られている。本実験においては Table 1 に示す核種を標準 γ 線源として用いた。これらのうち, γ 線を 2 本放出する ^{24}Na , ^{88}Y , ^{22}Na および 73 keV の K-X 線を放出する ^{203}Hg の各スペクトルは, 不必要なスペクトル成分を分離して単色エネルギーのスペクトルにする必要がある。この分離方法については 3.2.2(2)において述べる。

Table 1 に示した γ 線源 (エネルギー) だけでは十分なエネルギー範囲, とくに低エネルギー

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E, E_0) \cdot G(E) dE = D(E_0) \quad (2-1)$$

ここで E_{\min} , E_{\max} は E の積分下限, 積分上限である。

上式を満たす関数 $G(E)$ が上に示すエネルギー範囲にわたって存在するか否かは $n(E, E_0)$ とその積分区間 E_{\min} , E_{\max} のとる値に関係してくる。

NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na) などの無機シンチレータを使用する検出器, Ge 検出器その他数種の検出器の $n(E, E_0)$ について上式を満足する $G(E)$ 関数は存在する⁽¹⁾。

2.2 $G(E)$ 関数による線量計算

多重波高分析器により測定されたパルス波高スペクトル分布を $N(E)$ とすると, 線量 D_T は次式から計算できる。

$$D_T = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} N(E) \cdot G(E) dE \quad (2-2)$$

E_{\min} , E_{\max} についてはすでに述べた通りである。

通常 $N(E)$ は多重波高分析器によってエネルギーをチャンネル番号で置き換えた不連続の分布で表わされているので, この場合は

$$D_T = \sum_{I=1}^{I_{\max}} N_M(I) \cdot G(E_I) \quad (2-3)$$

で計算される。ここで 1 チャンネルのエネルギー幅を ΔE とし, $E_I = \Delta E \times I$ である。

3 実験による標準パルス波高スペクトル分布 (応答関数)の決定

3.1 標準 γ 線源および線量計算

3.1.1 エネルギーによる γ 線源の選択

$G(E)$ 関数の計算においては, 計算に用いる標準スペクトル分布のエネルギー範囲が広く, 各スペクトル間のエネルギー間隔が対数上で等間隔で小さい程, すなわち入力データ数が多い程精度の高い演算子を決定できる。しかし, 必要とするエネルギー範囲を $40 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$ とした場合, 正確な decay scheme が分っており, 単色又は分離可能な複数の γ 線を放出し, 半減期が適当で, 入手が可能な核種は種類が限られている。本実験においては Table 1 に示す核種を標準 γ 線源として用いた。これらのうち, γ 線を 2 本放出する ^{24}Na , ^{88}Y , ^{22}Na および 73 keV の K-X 線を放出する ^{203}Hg の各スペクトルは, 不必要なスペクトル成分を分離して単色エネルギーのスペクトルにする必要がある。この分離方法については 3.2.2(2)において述べる。

Table 1 に示した γ 線源 (エネルギー) だけでは十分なエネルギー範囲, とくに低エネルギー

ギー範囲をカバーできないため、40keV から120keV のモックスペクトルを準備した。このモックスペクトルの作成については3.2.2(3)において述べる。

今回使用した γ 線源の大半は市販されている γ 線源の中から高精度のものを選び購入したもので、購入時に線源強度などの情報が明らかになっている。これらの情報の妥当性については後述する。一方、 ^{24}Na だけは半減期が15時間と短いため、粒状で高純度の Na_2CO_3 をポリエチレン容器に封入してJRR-4において照射して得た。この強度は、他の標準 γ 線の本純Ge検出器に対するPeak Efficiency(後述)のエネルギー特性を外挿して得た ^{24}Na (2.754 MeV)のPeak Efficiencyと ^{24}Na の波高スペクトル分布のピーク計数値より求めた。このような線源強度の求め方は、Ge検出器のようにエネルギー分解能の良い検出器による測定において、一般的かつ高い精度で行われており、 ^{24}Na の線源強度の値に精度上の問題は無いと考えられる。また後述の検定においてもとくに問題は無かった。

3.1.2 標準スペクトルに対応する照射線量率の計算

(1) 実効線量減衰係数 μ_{eff} の決定

標準スペクトルに対応する照射線量率の計算を行う際には γ 線源と注目地点(検出器)との間における減衰を考慮せねばならない。一般に減衰係数は γ 線の吸収を表わす減衰係数 μ_{abs} と散乱を表わす減衰係数 μ_{scatt} であるが、一度散乱した γ 線でもその内のある部分は小角散乱、多重散乱などの結果、実際の線量率に寄与すること、また、一般の減衰係数は γ 線束あるいは全エネルギー束に対するものであり、線量率の減衰係数ではないことを考慮して、線量の減衰を表わす係数(以下「実効線量減衰係数」という)として

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{abs}} + X \cdot \mu_{\text{scatt}} \quad (3-1)$$

の形式を考え、実験的に最も適当な X を求めて⁽²⁾ μ_{eff} を決定した。ここでは $X=0.5$ とした。なお、この μ_{eff} は後述する線量率の計算に用いられた。

(2) 実測スペクトルに対応する照射線量率

エネルギー E_j の γ 線の実測スペクトルに対応する照射線量率は次式から求めた。

$$D(E_j) = \alpha \cdot q \cdot \mu_{\text{en}}^{\text{air}}(E_j) \cdot E_j \left(\frac{100}{R_{\text{sd}}} \right)^2 \cdot \eta \cdot \xi(E_j) \cdot AF \quad (\mu\text{R/h}) \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{4\pi(100)^2} \times (3.7 \times 10^4) \times 10^6 \times \frac{1}{W} \times (4.8 \times 10^{-10}) \\ &\quad \times (60 \times 60) \times 10^6 \\ &= 1.51 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ここで、

$D(E_j)$: 実測スペクトルに対応する照射線量率 ($\mu\text{R/h}$)

- q : 線源強度 (μCi)
 W : 空気のW値 = 33.75 eV
 $\mu_{\text{en}}^{\text{air}}(E_j)$: エネルギー- E_j の γ 線に対する空気のエネルギー吸収係数
 (1/cm)
 E_j : 標準 γ 線エネルギー (MeV)
 R_{sd} : γ 線源と検出器間の距離 (cm)
 η : γ 線放出率 (γ/dis)
 $\xi(E_j)$: γ 線源-検出器間での空気による γ 線減衰の補正項 = $e^{-\mu_{\text{eff}}^{\text{air}}(E_j) \cdot R_{\text{air}}}$
 AF : 線源による γ 線の自己吸収補正因子
 (詳しくはAppendix Iを参照のこと)
 $\mu_{\text{eff}}^{\text{air}}(E_j)$: 空気の実効線量減衰係数 (1/cm)
 R_{air} : γ 線源-検出器間の空気層厚さ (cm)

また、 γ 線束密度 ϕ ($\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{q}{4\pi R_{\text{sd}}^2} \cdot (3.7 \times 10^4) \cdot \eta \cdot \xi \quad (3-3)$$

ここで、検出器の実効中心は、 γ 線が検出器(円筒形)の軸に対して直角方向に入射の場合には円筒軸の中心とし、円筒軸方向に入射の場合には吸収されたエネルギーの実効中心とし、次式より求めた。

$$d = -\frac{1}{\mu(E_j)} \ln \left(\frac{1 - e^{-\mu(E_j) \cdot D}}{2} \right)$$

- ここで、 d : 検出器表面から実効中心までの距離 (cm)
 $\mu(E_j)$: Geのエネルギー吸収係数 (1/cm)
 D : Ge検出器の厚さ (cm)

(3) モックスペクトルに対応する照射線量率

モックスペクトルは、Ge検出器の存在する場へ 10^6 photons/hr入射として作成した。従ってそのような場の照射線量率 $D(E_j)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 D(E_j) &= 10^6 \times \mu_{\text{en}}^{\text{air}}(E_j) \times (E_j \times 10^6) \times \frac{1}{W} \times \frac{1}{\pi r_d^2} \times 10^6 \times 4.8 \times 10^{-10} \\
 &= \mu_{\text{en}}^{\text{air}}(E_j) \cdot E_j \times 6.14 \times 10^5 \quad (\mu\text{R/hr})
 \end{aligned}$$

ここで r_d は検出器の半径 (2.72 cm)

3.2 スペクトル分布の測定と調整

3.2.1 測定系及び実験

測定系の概観をFig. 1 に示す。

検出器には、高圧バッファを経由して3800Vのバイアス電圧を印加した。検出器で得られた電気信号（パルス）は、プリアンプ、リニアアンプを経由して4096チャンネルの波高分析器で波高分析を行った。ここで得られたパルス波高スペクトル分布のデータは、オープンリール磁気テープレコーダで磁気テープに記録された。

ここで用いた純Ge 半導体検出器は、デュワービンと検出器との間に約70cm のコールドフィンガーを設けてデュワービンによる γ 線の散乱・吸収を抑える、検出器のヘッドをコールドフィンガーを軸にして回転できるような構造にする、 γ 線入射方向依存性を平坦にするため検出器有感部分の直径と長さの比を6:5とするなど、環境 γ 線測定用として良好な特性をもつように設計された。

検出器の写真と基礎特性仕様書（本純Ge検出器の製作者の提示したもの）とを、それぞれPhoto. 1, Table 2 に示す。

また、 γ 線の入射方向依存性を示すものとして、入射方向による全吸収ピーク計数の変化をFig. 2-1~2-3 に示す。 γ 線エネルギーが60keV (^{241}Am) の場合には、検出器後部に接続されている前置増中器などによる吸収、散乱の影響を受けやすいが、662keV (^{137}Cs) と1332keV (^{60}Co) とでは相対的にはほぼ同様の方向特性を示した。これは光電効果による吸収係数が、662keV と1332keV とではほぼ等しく、60keVでは高くなるという事実から考えて妥当な結果である。

実験は、散乱線の影響をさけるため、シャドーシールド法を用いて実施した。シャドーシールド法は、線源からの直接線、散乱線及びバックグラウンドを含むスペクトルと、鉛ブロックなどにより直接線のみをしゃへいしたスペクトルとの差をとることによって、バックグラウンドとともに、測定系周辺の壁や空気による線源起因の散乱線を除いた一次 γ 線のみを測定する方法であり、G(E)関数の計算に必要な標準単色 γ 線スペクトルの測定に有利な方法である。

測定中における電気信号のゲイン変動等については、それをチェックするために1つの線源（エネルギー）に対する測定毎に ^{226}Ra を用いて測定系全体のゲイン変動チェックを行ったが、一連の実験を通して修正を要するようなゲイン変動は生じなかった。

また、検出器-線源間の距離は約1m以上離すことによりできるだけ平行な線束を得ることに努めるとともに計測時間は全吸収ピーク計数が 10^4 カウント以上となるように設定した。ここで、 γ 線の入射方向は、Ge検出器の軸に対して平行方向と直角方向の2通りについて測定したが、G(E)関数の計算については軸方向入射の波高スペクトル分布を標準とした。

3.2.2 標準スペクトル

(1) 測定スペクトルの調整

測定スペクトルを利用するためには、ピーク中心チャンネル、ピーク面積などの決め方、エネ

ルギー校正方法などを統一してスペクトルを調整せねばならない。以下に測定スペクトルの調整について述べる。

(i) ピーク中心チャンネルの決め方

本測定においては次の手順によりピーク中心チャンネル（注目するピークスペクトルの中心に対応するチャンネル番号）を決定した。

- ① 目視によりピークスペクトルのベースライン（直線）を決める。
- ② 目視によりみかけのピーク中心チャンネル CH_0 及びそのピークの左端 CH_1 ^{注1)} 及び右端 CH_2 ^{注2)} を決める（Fig. 3 参照）。
- ③ ベースライン以下の部分を除き、正味の“ピークスペクトル”を求める。
- ④ CH_0 を中心に ± 2 チャンネル（合計5チャンネル）乃至 ± 3 チャンネル（合計7チャンネル）分のピークスペクトルの形を2次式で最小二乗近似し、この二次曲線の極値となる点（一次微係数=0となる点）をピーク中心チャンネルとする。ここで CH_0 、 CH_1 、 CH_2 のとり方、及び最小二乗近似を $CH_0 \pm 2$ チャンネルで行うか、或は $CH_0 \pm 3$ チャンネルで行うかは、ピーク中心チャンネルの決定に殆ど影響を及ぼさなかった。

(ii) ピーク面積の求め方

上記③で求めた正味のピークスペクトルの計数を CH_1 から CH_2 まで合計し、これをピーク面積とした。ピークスペクトルの形は非常にシャープであるため、ピーク面積の大きさは殆ど CH_0 付近の計数に支配され、 CH_1 、 CH_2 のとり方による変化は殆ど無かった。

(iii) パルス波高—エネルギーの直線性とエネルギー校正法

G(E)関数法は、検出器内に吸収されたエネルギースペクトル分布から線量を求める方式であるため、吸収エネルギーと波高分析器によって得られたパルス波高との間の直線関係を正確に知る必要がある（例えばNaI(Tl)シンチレーション検出器の場合には、発光効率のエネルギー依存性のため、両者は完全な比例関係にない。）。

そこでGe 検出器についてもパルス波高と γ 線エネルギーとの関係を実験により求めるとともにエネルギー校正法について検討した。

測定は既知のエネルギーをもつ γ 線を複数本放出する ^{226}Ra を用いて行った。 ^{226}Ra のスペクトルのうち、352、609、1120、1764、2204及び2448keVのピーク中心チャンネルを(i)により求め、この6点のチャンネル（波高）—エネルギーの関係を直線で近似して、この近似直線と実際のスペクトルにおけるチャンネル—エネルギー関係を比較した。その結果、近似直線と実際のスペクトルにおけるチャンネル—エネルギー関係との差は最大でも約0.1%であり、また近似直線においてエネルギー0 keVに相当するチャンネル番号と、波高分析器において波高=0 keVとなるチャンネル番号との差は約1 keV相当未満であり、今回対象としている測定範囲が40keV—3MeVであることから、パルス波高とエネルギーとは十分直線関係にあることが分った。従って、エネルギー既知の核種（例えば ^{226}Ra 等）から放出される複数本の γ 線のスペクトルから、波高—エネルギー関係（最小二乗法で直線近似）を

注1) ベースラインとピークスペクトルとの低エネルギー側交点

注2) ベースラインとピークスペクトルとの高エネルギー側交点

求め、この直線に基づいてスペクトルのエネルギー校正（チャンネル中の決定）を行った。

(IV) スペクトルのスムージング

測定して得られたパルス波高分布は、統計的な変動要因を含んでいる。そのため、得られたパルス波高分布をスムージング（平滑化）することによりバックグラウンドの差し引きなどによる誤差の増大を抑える必要がある。ここでは、パルス波高分布スペクトル全体を移動平均によって平滑化した。

(2) 混合スペクトルの分離

3.1.1 に述べたように ^{24}Na , ^{88}Y , ^{22}Na は2種類の γ 線を放出し、そのスペクトル分布においては、標準 γ 線（高エネルギー側 γ 線）のコンプトン散乱部分に妨害 γ 線（低エネルギー側の不必要な γ 線）の波高スペクトル分布が重なっている。この場合には標準 γ 線のコンプトン端近傍のスペクトルの傾斜を低エネルギー側へ直線外挿することによって妨害 γ 線のスペクトル成分を取り除いた。 ^{60}Co は2種類の γ 線（1.17, 1.33 MeV）を放出するが、両者のエネルギーが接近しているため、G(E)関数の立場からはその混合スペクトルは平均エネルギーの γ 線によるスペクトルと等価であるとみなした。また γ 線放出に伴ってK-X線を放出する ^{203}Hg のスペクトルについても、K-X線のスペクトル成分を分離して単色エネルギーのスペクトルとする必要がある。これに対しては ^{203}Hg の妨害 γ 線エネルギー（73 keV）付近にK-吸収端を有するカドミウムの薄板（厚さ2 mm）を用いてしゃへいすることにより容易に γ 線のみ γ スペクトル分布が得られる。一方 ^{139}Ce , ^{113}Sn , ^{137}Cs も約20~30 keVのK-X線を放出するが、本G(E)関数は40 keV ~ 3 MeVを線量評価対象としており、40 keV以下の妨害スペクトルは無視することができる。

なお、薄板によるしゃへいに伴う主ピークの減衰分は、しゃへいしない場合の全吸収ピーク面積としゃへいした場合の全吸収ピーク面積の比を乗ずることによって補正した。

(3) 低エネルギー（120 keV 以下）モックスペクトルの作成

低エネルギー範囲（120 keV 以下）のスペクトルとして使用した半理論的スペクトル（モックスペクトル）の作成法について述べる。

120 keV 以下の γ 線で、正確な decay scheme が分っており、単色又は分離可能な複数の γ 線を放出し、半減期が適当なものは多くない。そこでG(E)関数を計算する際の標準スペクトルとして半理論的なモックスペクトルを作成しそれを用いた。

低エネルギーの γ 線は、後方散乱等周囲の物質との相互作用を起しやすいため、後方散乱を無視し得る程度の薄い γ 線源（ ^{57}Co ; 122 keV, 136 keV, ^{109}Cd ; 88 keV, ^{241}Am ; 60 keV, ^{137}Cs のX線 ; 37 keV, 32 keV）を用いてその波高スペクトル分布を測定し、そのスペクトルの特性（Peak Efficiency, Interaction Ratio）のエネルギー傾向を求めた上、必要なエネルギーに対するモックスペクトルを作成して標準スペクトルとした。

即ち、実測スペクトルからGe検出器への入射光子数と全吸収ピーク計数率及び全計数率との比（Peak Efficiency 及び Interaction Ratio）を求め、 $10^6 \gamma/\text{hr} \cdot \text{detector}$ 当りの入射に対するスペクトルを作成した。ここではGeの結晶に入射した光子は全て全吸収

されると仮定したが、120keV以下の γ 線のエネルギー吸収係数から考えてこの仮定はほぼ妥当なものと考えられる。またNaI(Tl)における測定で問題になった検出器構成材のK-X線のエスケープについては、GeのK-X線が10keV以下であり光電吸収係数が約184(1/cm)と大きいため、一次 γ 線が光電効果を起こした場所がGe結晶の表面近くであっても、その際に生ずるK-X線が結晶外へエスケープする確率は十分小さいと考えられるためこれを無視した。

具体的には、実測スペクトルのPeak Efficiency 曲線を用いてモックスペクトルの全吸収ピーク計数率を求めた。また、実測スペクトルのInteraction Ratio を用いて全吸収ピーク計数率を除いた計数率を求め、全吸収ピーク以外の部分のスペクトルの形状を矩形で近似して上述の全吸収と合成してモックスペクトルを作成した。なおこの矩形近似については、実測スペクトルの形状から見て妥当なものと考えられる。

(4) 標準スペクトルの整備

以上のように作成されたスペクトルは、低エネルギー側のもの(最低40keV)から順に並べ(最高2.754MeV)磁気テープ及び磁気ディスクへ記録した。一方これらのスペクトルに対応するエネルギー、チャンネル巾、全吸収ピークチャンネル、照射線量率等G(E)関数の計算に必要な値もスペクトルと対応するように並べて磁気ディスクへ記録した。以後、これらの標準スペクトル及びそれに対応する線量率等の中から必要なものを選んでG(E)関数の計算を行った。

3.2.3 実測スペクトル分布の検定

実測スペクトルを各標準スペクトルに調整した後、それらのスペクトル分布の形、線源強度の値付け、適用バイアス電圧等の妥当性を検討するために、スペクトル分布の特徴の γ 線エネルギーに対する傾向を見た。 γ 線エネルギーに対して系統的な傾向から大きく外れる点は、線源強度などの情報や不必要なスペクトル成分の塗り方などの調整方法などに問題があると考え、原因及び対策を検討する資料とした。検討内容を以下に示す。

(1) バイアス電圧特性

検出器に印加するバイアス電圧が検出器の特性に与える効果を試験するため、 ^{137}Cs (662keV)、及び ^{60}Co (1.332MeV)の γ 線を用いて①ピーク効率、②Peak to Compton比、③ピークチャンネル位置、④半値巾、⑤1/10値巾のバイアス電圧による変化を測定した。ここで γ 線の入射方向は検出器軸方向とした。

結果をFig. 4~Fig. 8に示す。

上記①~⑤の各項目とも3000Voltを超えるとほぼ飽和値に達し、本検出器の仕様書による印加バイアス電圧3800Voltが妥当であることが裏付けられた。

なお、バイアス電圧が2kVoltから3kVoltの範囲で②、④、⑤の特性が特異な傾向を示した。この原因は不明であるが、バイアス電圧が3800Voltとする限り、とくに問題とはならない。

(2) γ 線エネルギー特性

今回のG(E)関数の計算に用いた波高スペクトル分布(印加バイアス電圧=3800Volt)を

用いて、 γ 線エネルギーによるピーク効率、半値巾、1/10値巾の変化傾向を測定した。 γ 線入射方向は、検出器軸方向とした。

(1) ピーク効率F (Fig. 9)

ピーク効率Fは、Ge検出器への単位入射当りの全吸収ピーク計数、即ち検出器中で全吸収を起す割合である。全吸収ピーク計数は3.2.2(1)(ii)に述べたように、スペクトル分布の形を見ながら注目している全吸収ピークの左右両端のチャンネルを定め、各チャンネルの計数を積算して求めた。全吸収ピーク計数の大半はピーク中心付近の計数に支配されるため、全吸収ピークの左右両端チャンネルの取り方には殆ど左右されない。

γ 線は、エネルギーが低いほどGe検出器との相互作用を起しやすく、しかも全吸収の割合が高くなるためFは高くなる。しかし、一方、検出器の容器などによる減衰のため、100 keV以下では逆にFは低くなる。

^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV) の値が全体の傾向から外れているのは、線源強度の精度や1.17 MeVの全吸収ピークが1.33 MeVのコンプトン散乱成分(コンプトンエッジは1.12 MeV)と重なるため分離精度が低下することによるものと考えられる。同様に ^{113}Sn (393 keV)についても、妨害 γ 線(255 keV)と393 keVのコンプトン散乱成分(コンプトンエッジは238 keV)とが重なるため、分離精度上の問題がピーク効率の値の誤差の原因となっているかも知れない。

(2) 半値巾FWHM及び1/10値巾FWTM (Fig. 10)

Ge検出器のエネルギー分解能のめやすとしてよく用いられるパラメータである半値巾FWHM及び1/10値巾FWTMをFig. 10に示す。

両者とも、エネルギーが高くなるほど高い値となり、全体的な傾向も互いに似ている。

複数の γ 線を放出する γ 線源の場合、低エネルギー側の γ 線に対する値が全体の傾向からやや外れているのは、分離精度の問題と考えられる。

これらの検討により、複数エネルギーの γ 線を放出する線源の波高スペクトル分布のうち、とくにコンプトン散乱成分の分離や線源強度の精度に問題のあった ^{60}Co 、 ^{113}Sn 及びモックスペクトルを用いたエネルギー範囲(40 keV~120 keV)にある実測波高スペクトル分布である ^{241}Am (59.5 keV)、 ^{57}Co (124 keV)を用いない、バイアス電圧は3800 Voltとする、などの処置を施した。

4 G(E)関数の計算

4.1 多項式近似による計算法

G(E)関数を求めるには、原理的には次の積分方程式を解けばよい。

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E, E_j) \cdot G(E) dE = D(E_j) \quad (4-1)$$

用いて、 γ 線エネルギーによるピーク効率、半値巾、1/10値巾の変化傾向を測定した。 γ 線線入射方向は、検出器軸方向とした。

① ピーク効率F (Fig. 9)

ピーク効率Fは、Ge検出器への単位入射当りの全吸収ピーク計数、即ち検出器中で全吸収を起す割合である。全吸収ピーク計数は3.2.2(1)(ii)に述べたように、スペクトル分布の形を見ながら注目している全吸収ピークの左右両端のチャンネルを定め、各チャンネルの計数を積算して求めた。全吸収ピーク計数の大半はピーク中心付近の計数に支配されるため、全吸収ピークの左右両端チャンネルの取り方には殆ど左右されない。

γ 線は、エネルギーが低いほどGe検出器との相互作用を起しやすく、しかも全吸収の割合が高くなるためFは高くなる。しかし、一方、検出器の容器などによる減衰のため、100 keV以下では逆にFは低くなる。

^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV) の値が全体の傾向から外れているのは、線源強度の精度や1.17 MeVの全吸収ピークが1.33 MeVのコンプトン散乱成分(コンプトンエッジは1.12 MeV)と重なるため分離精度が低下することによるものと考えられる。同様に ^{113}Sn (393 keV)についても、妨害 γ 線(255 keV)と393 keVのコンプトン散乱成分(コンプトンエッジは238 keV)とが重なるため、分離精度上の問題がピーク効率の値の誤差の原因となっているかも知れない。

② 半値巾FWHM及び1/10値巾FWTM (Fig. 10)

Ge検出器のエネルギー分解能のめやすとしてよく用いられるパラメータである半値巾FWHM及び1/10値巾FWTMをFig. 10に示す。

両者とも、エネルギーが高くなるほど高い値となり、全体的な傾向も互いに似ている。

複数の γ 線を放出する γ 線源の場合、低エネルギー側の γ 線に対する値が全体の傾向からやや外れているのは、分離精度の問題と考えられる。

これらの検討により、複数エネルギーの γ 線を放出する線源の波高スペクトル分布のうち、とくにコンプトン散乱成分の分離や線源強度の精度に問題のあった ^{60}Co 、 ^{113}Sn 及びモックスペクトルを用いたエネルギー範囲(40 keV~120 keV)にある実測波高スペクトル分布である ^{241}Am (59.5 keV)、 ^{57}Co (124 keV)を用いない、バイアス電圧は3800 Voltとする、などの処置を施した。

4. G(E)関数の計算

4.1 多項式近似による計算法

G(E)関数を求めるには、原理的には次の積分方程式を解けばよい。

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E, E_j) \cdot G(E) dE = D(E_j) \quad (4-1)$$

ここで $n(E, E_j)$ はエネルギー E_j をもつ γ 線が Ge 検出器に入射した時に発生する波高 E のパルスの分布関数 (スペクトル分布) で、 E_{\min} 、 E_{\max} はそれぞれスペクトル分布の下限波高値、上限波高値、 $D(E_j)$ はそのスペクトル分布に対応する線量率である。電子計算機 (原研計算センター FACOM 230/75 を用いた) を用いることにより、 $G(E)$ を多項式近似し最小二乗法を適用させて $G(E)$ 関数を高次関数として求めた。計算方法の詳細は参考文献(1)にゆずる。なお $G(E)$ 関数は、波高弁別レベル (40 keV 及び 50 keV の 2 通り) から 3 MeV まで 5 keV 毎に計算した。

4.2 $G(E)$ 関数の決定

4.2.1 計算条件

(1) パラメータ

4.1 で述べたように、得られる $G(E)$ の値はパラメータ $KMAX$ 、 M 、 $g(E)$ の選び方によって異なる。それぞれのパラメータに適当な値を入れて、計算された $G(E)$ 値の中から最適なものを選択するために、各パラメータに次のような値を代入して計算した。

$$KMAX = 7, 8, 9, \dots, JMAX \text{ (} JMAX \text{ は標準スペクトルの個数)}$$

$$M = 0, 1, 2, 3$$

$$g(E) = \log_{10} E$$

内挿精度を全エネルギー範囲について同程度にするためには、各標準スペクトルのエネルギーをできるだけ等間隔に近く選ぶ必要があり、さらに関数 $g(E)$ の形が内挿精度に大きな影響を与える。一般に各標準スペクトルのエネルギー間隔は、対数軸上ではほぼ等間隔になるような分布で標準線源を選ぶことが容易であり、 $G(E)$ 関数も対数間隔ではほぼ一様なエネルギー傾向を示す。したがって、 $g(E) = E$ とするとエネルギー間隔の広い高エネルギー部分では振動を生じ、正確な内挿が行えない。そこで $g(E) = \log_{10} E$ と置き、対数軸上ではほぼ等間隔な点を与えることによって内挿精度を均等化させた。

(2) 波高弁別レベル

多重波高分析器によって実際に得られるパルス波高スペクトル分布は、雑音信号の影響を避けるために、ある波高値 (波高弁別レベル) 以下の計数を 0 にしている。今回の計算においては波高弁別レベル $E_{\min} = 40 \text{ keV}$ 、 50 keV の二通りについて行った。

E_{\min} の値は、波高値を示す場合とエネルギー値を示す場合とが考えられるが、ここでは 3.2.1(1)(iii)において示したチャンネル巾を基準にして、波高弁別レベルを含むチャンネル未満のチャンネルの計数率 = 0 とした。

4.2.2 最適近似関数の選定法

4.1 に述べた要から分るように、多項式近似により得られる $G(E)$ 関数は、パラメータ $KMAX$ 、 M についてその組み合わせの数だけ計算される。この近似関数は、最小二乗法により入力データに最もフィットするように求められたものであるが、同時に入力データの無い部分についても適切な内挿を行っているような関数であることが選定の条件である。このため、得

られたG(E)関数を入力スペクトルに適用して計算した線量率値と入力線量率値との誤差分布および、G(E)関数の形を総合的に吟味した上で最も良好なG(E)関数を選定せねばならない。今回は、G(E)関数のグラフ及び誤差分布をグラフィック COM^(*) によってマイクロフィルムに出力し、誤差分布が均一で誤差自体が小さいこと、G(E)関数のカーブが滑らかで振動していないことにとくに留意して選定を行った。なお、標準スペクトルとして40keVから120keVまでの半理論的線スペクトル9個と59.5keVから275.4keVまでの実測スペクトル12個を準備したが、前述した標準スペクトルの検定(3.2.3)およびG(E)関数計算の数値実験より40keVから120keVまでの半理論的線スペクトル7個(E_{min}の場合には40keVのスペクトルを除く6個)と実測スペクトル8個を採用し、標準スペクトルの数J_{MAX}=15(E_{min}=50keVの場合はJ_{MAX}=14)として計算を行った。使用した標準スペクトルの一覧表をTable 3に示す。

4.2.3 計算結果と検討

計算された誤差分布 $\frac{D_1(J) - D(J)}{D(J)}$ (ここでD(J)は入力線量率、D₁(J)は得られたG(E)関数をスペクトル分布に作用させて得た線量率)は、約±2%以内に収っていたが、60keVから80keVの誤差が、他のエネルギー範囲に比べて大きいという傾向を示した。これは得られたG(E)関数が70keV付近で極小値を示し、G(E)関数の曲線の形が大きく変化するため、多項式によってこの曲線の形を近似した場合、相対的にこの領域の近似の精度が下るためであると考えられる。

このように誤差 $\frac{D_1(J) - D(J)}{D(J)}$ の段差が他より大きい状態で最小二乗法を適用すると、残差の二乗和の多くがこの領域に起因することとなり、高エネルギー領域での精度の低下が懸念される。

そこで、60~80keVに集中している残差の二乗和を全エネルギー範囲へ均等に配分するために、60~80keVのスペクトル分布に対応する入力線量率D(J)として新たにD₁(J)を与えて再度G(E)関数を計算し直してみた。以下第1回目の計算から得たG(E)関数をCAL1、再計算から得られたG(E)関数をCAL2と表わす。CAL2における評価誤差分布D₂(J)/D(J)はD₁(J)/D(J)よりも改善される傾向を示し、またG(E)関数の形も全般的にCAL1よりもCAL2の方が良好なものが多い。

CAL2の誤差分布は改善されるとはいえ、60~80keV付近の段差は完全には解消されない。しかし実際にG(E)関数を適用して線量計算を行う場合、測定スペクトルは測定系に起因する統計的分布を用い、かつ60~80keVの領域のみが強調されているようなスペクトル分布を対象にすることも殆ど無いため、実用上は全く問題ない。

以上の計算結果の中から最も良好と考えられるG(E)関数を、各検出器につき1つずつ選定した。その計算条件をTable 4に示す。

(*) Computer Output Microfilm の略称で、16384×16384のメッシュに区切られたCRT (Cathode Ray Tube)上を電子ビームがドット方式で走査し、その交点上で輝度を変化させて図形を表現し、マイクロフィルムに撮影するシステム。

KMAX の値は9前後が良好な結果を与える傾向を示している。一方Mの値はまちまちであるが、全般的にM値は1以上に選ぶ方が70keV以下の負の傾斜部分を表現しやすいようである。Fig. 11-1, 11-2に選定した最適近似関数を、Fig. 12に近似誤差分布を示す。またTable 5-1, 5-2にG(E)値を0~3MeVまで5keV間隔で示す。

比較のため、Fig. 13に今回得た純Ge検出器用G(E)関数と同時に、既に決定されている2"φ球形及び2"φ×2"円筒形並びに3"φ球形及び3"φ×3"円筒形NaI(Tl)シンチレーション検出器用G(E)関数を示す。今回使用した純Ge検出器用G(E)関数の値は、2"φ球形及び2"φ×2"円筒形並びに3"φ球形及び3"φ×3"円筒形NaI(Tl)シンチレーション検出器用G(E)関数の中間の値を示している。この結果は、これらの検出器の検出効率から考えて妥当なものである。

最後に、ここで決定したG(E)関数による線量率評価誤差を評価する。

線量率評価に伴う誤差要因の主なもの、決定したG(E)関数による評価誤差 μ_1 とG(E)関数の計算に用いた各標準スペクトルに対応する線量率の評価誤差 μ_2 である。前者 μ_1 は、決定したG(E)関数を、その計算に用いた標準スペクトルに適用した場合の評価誤差であり、Fig. 12に示すように最大でも±2%以内に収っており $\mu_1=2\%$ と見積られる。後者 μ_2 は主に線源強度の値付け誤差と線源-検出器間距離の測定誤差から成る。今回の実験に用いた線源は、 ^{24}Na を除き半減期3年以下のものが仏国LMRI社製で、強度の値付け誤差は1.5~2%、3年以上のものが日本のRI協会製で、値付け誤差は最大5%であった。また、線源-検出器間距離は1~2mとしたので、読み取り誤差を±1mmとして距離の測定誤差は0.1%である。従って $\mu_2=5\%$ と見積られる。

以上より、 $\sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2} = 5.4\%$ となり、ここで決定したG(E)関数を用いた場合の線量率評価誤差は、約5%と評価される。

5. 結 言

環境放射線の測定評価に関する研究は、ここ数年の間にかかなりの進歩を見た分野である。とくにNaI(Tl)シンチレーション検出器による空間線量率測定やGe(Li)半導体検出器による核種分析は既にルーチン業務の中に組み込まれており、特殊技術ではなくなっている。

さらに、純Ge半導体検出器の出現により、Ge半導体検出器が野外環境における測定に容易にできるようになってきた。

本研究においては、純Ge半導体検出器のG(E)関数を決定した。これにより、Ge半導体検出器を用いて、核種分析だけでなく線量測定にも利用できるようになった。今後、分解能が高いというGe半導体検出器の特性を生かして、野外で線量測定と核種分析を同時に行う手法の検討、或は放射線場の精密解析などに有効な手段として利用してゆけるものと考えられる。

KMAX の値は9前後が良好な結果を与える傾向を示している。一方Mの値はまちまちであるが、全般的にM値は1以上に選ぶ方が70keV以下の負の傾斜部分を表現しやすいようである。Fig. 11-1, 11-2に選定した最適近似関数を、Fig. 12に近似誤差分布を示す。またTable 5-1, 5-2にG(E)値を0~3MeVまで5keV間隔で示す。

比較のため、Fig. 13に今回得た純Ge検出器用G(E)関数と同時に、既に決定されている2"φ球形及び2"φ×2"円筒形並びに3"φ球形及び3"φ×3"円筒形NaI(Tl)シンチレーション検出器用G(E)関数を示す。今回使用した純Ge検出器用G(E)関数の値は、2"φ球形及び2"φ×2"円筒形並びに3"φ球形及び3"φ×3"円筒形NaI(Tl)シンチレーション検出器用G(E)関数の中間の値を示している。この結果は、これらの検出器の検出効率から考えて妥当なものである。

最後に、ここで決定したG(E)関数による線量率評価誤差を評価する。

線量率評価に伴う誤差要因の主なものは、決定したG(E)関数による評価誤差 μ_1 とG(E)関数の計算に用いた各標準スペクトルに対応する線量率の評価誤差 μ_2 である。前者 μ_1 は、決定したG(E)関数を、その計算に用いた標準スペクトルに適用した場合の評価誤差であり、Fig. 12に示すように最大でも±2%以内に収っており $\mu_1=2\%$ と見積られる。後者 μ_2 は主に線源強度の値付け誤差と線源-検出器間距離の測定誤差から成る。今回の実験に用いた線源は、²⁴Naを除き半減期3年以下のものが仏国LMRI社製で、強度の値付け誤差は1.5~2%、3年以上のものが日本のRI協会製で、値付け誤差は最大5%であった。また、線源-検出器間距離は1~2mとしたので、読み取り誤差を±1mmとして距離の測定誤差は0.1%である。従って $\mu_2=5\%$ と見積られる。

以上より、 $\sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2} = 5.4\%$ となり、ここで決定したG(E)関数を用いた場合の線量率評価誤差は、約5%と評価される。

5. 結 言

環境放射線の測定評価に関する研究は、ここ数年の間にかかなりの進歩を見た分野である。とくにNaI(Tl)シンチレーション検出器による空間線量率測定やGe(Li)半導体検出器による核種分析は既にルーチン業務の中に組み込まれており、特殊技術ではなくなっている。

さらに、純Ge半導体検出器の出現により、Ge半導体検出器が野外環境における測定に容易にできるようになってきた。

本研究においては、純Ge半導体検出器のG(E)関数を決定した。これにより、Ge半導体検出器を用いて、核種分析だけでなく線量測定にも利用できるようになった。今後、分解能が高いというGe半導体検出器の特性を生かして、野外で線量測定と核種分析を同時に行う手法の検討、或は放射線場の精密解析などに有効な手段として利用してゆけるものと考えられる。

参 考 文 献

- (1) 森内 茂 ; JAERI 1209 (1971)
- (2) 森内 茂 , 長岡 銳 , 坂本 隆一 , 斎藤 公明 ; JAERI-M8092 (1979)

Appendix I 線源の自己吸収補正因子

今回使用した線源の一部は液体状で、ガラス製アンブル中に封入されたものである。従って、線源を点として扱うためには、液体状線源そのものによる自己吸収、ガラスによる吸収（以下、両者を併せて「自己吸収」と呼ぶ。）を補正する必要がある。ここでは、その補正方法について述べる。

(1) 検出器と線源の位置

標準スペクトル測定時における検出器と、アンブル入り液体状線源との配置をFig. A1 に示す。線源はGe 検出器の円筒軸上に置かれた。

(2) 自己吸収の考え方

線源内において、 γ 線は等方的に放置されるが、Ge 検出器へ到達する一次 γ 線は、線源と検出器の各々中心を結ぶ線（以下「S-Dライン」と呼ぶ。）に対してほぼ平行に放出されたものである。従って、線源の自己吸収は、S-Dラインに平行に放出された γ 線（発生位置はFig. A2 の (x, y) ）が液体とガラスによって吸収、散乱される確率と考えられる。

(3) 自己吸収を逃れる確率E

F は次式から計算した。

$$F = \int_{-R_s}^{R_s} \int_{-R_s}^{R_s} e^{-\mu_g \cdot a(y)} e^{-\mu_s \cdot b(x, y)} dx dy$$

ここで、 μ_g : ガラスの実効線量減衰係数

μ_s : 液体線源の実効線量減衰係数

なお、ガラスはAl、液体線源はH₂O として扱った。

(4) 自己吸収の補正

上述した自己吸収を逃れる確率F を用いて、次のように線量率を補正した。

$$X = X_0 \cdot F$$

ここでX は各波高スペクトル分布に適用する線量率、 X_0 は自己吸収がなく、 γ 線源はアンブル中心に集中しているとした場合の線量率である。

Table 1 Nuclides and energies of standard spectrum
used for calculation of G(E) function

Nuclide	Energy (Mev)	Intensity (γ /dis.)	Half-life (days)	Remarks
²⁴¹ Am	0.060	0.36	167170.	
⁵⁷ Co	0.124	0.962	271.4	
¹³⁹ Ce	0.166	0.801	137.63	with La K-X (33keV)
²⁰³ Hg	0.279	0.814	46.8	with Tl K-X (73keV)
¹¹³ Sn	0.393	0.642	115.09	with In K-X (24keV)
	0.255	0.0207		
⁸⁵ Sr	0.514	0.9928	64.68	
¹³⁷ Cs	0.662	0.852	10950.	with Ba K-X (32keV)
⁵⁴ Mn	0.835	0.9998	312.3	
²² Na	1.275	0.9995	949.75	
	0.511	1.812		
⁶⁰ Co	1.332	1.0	1919.9	
	1.173	1.0		
⁸⁸ Y	1.836	0.9944	106.6	
	0.898	0.94		
²⁴ Na	2.754	1.0	0.625	
	1.369	1.0		

Table 2 Specification chart of the pure Ge detector.



Box 641 • Princeton, N.J. 08540
 Telephone (609) 924-7310
 Cable PRINGAMTEC • Telex: 843486

IG DETECTOR DATA SHEET

Detector Serial number: 727
 Type of detector: planar closed ended coax
 true cylindrical coax well coax
 Active area: _____ mm², Thickness: _____ mm
 Diameter: 54.31 mm, Length: 46.0 mm
 Volume: 106.5 cc, Detector window thickness: .39 mm
 Distance detector to cryostat front face: 25 mm
 Detector fully depletes at +3300 Volts
 Recommended operating bias: +3800 Volts, Polarity: POS
 Leakage current at operating bias: ~700 pA
 Energy resolution: _____ eV at _____ keV, 1.23 eV at 122 keV
 Co-60 1.33 MeV line FWHM: 2.07 keV, FWTM: 3.78 keV
 Peak/Compton: 49.5/1, Efficiency: 22% (relative to 3 x 3
 inch NaI(Tl) detector at 25 cm source to detector distance)
 DC Voltage at preamplifier "Test Point": -3.55 Volts

Additional Data: _____

Detector was tested with the following equipment:
 Amplifier: P6T-340, Shaping time constant: 4 microsec.
 Bias Supply: AEL-5000B, Pulse Height Analyzer: NS-720A

DATE: 1-25-79

Table 3 Energies of standard spectrum used for calculation of G(E) function.

Energy (MeV)	Note
0.040	Semi-theoretical line spectrum
0.050	"
0.060	"
0.070	"
0.080	"
0.100	"
0.120	"
0.166	Measured spectrum (^{139}Ce)
0.279	" (^{203}Hg)
0.514	" (^{85}Sr)
0.662	" (^{137}Cs)
0.835	" (^{54}Mn)
1.275	" (^{22}Na)
1.836	" (^{88}Y)
2.754	" (^{24}Na)

Table 4 Parametric conditions of G(E) calculation.

E_{min}	JMAX	KMAX	M	CAL 1/2
40 keV	15	11	1	1
50 keV	14	9	1	1

Table 5-1 G(E) value for the pure Ge semi-conductor detector ; $E_{min} = 40 \text{ keV}$ (unit; $\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}/\text{cpm}$)

E(keV)	5		10		15		20		25		30		35		40		45		50	
	0.	55	0.	60	0.	65	0.	70	0.	75	0.	80	0.	85	0.	90	0.	95	0.	100
0	1.029150-04	8.882050-05	8.264940-05	8.110860-05	8.266650-05	8.641160-05	9.169530-05	9.802640-04	3.937140-04	2.054660-04	1.335310-04									
100	1.200460-04	1.277660-04	1.355300-04	1.433200-04	1.511510-04	1.590560-04	1.670810-04	1.752760-04	1.836970-04	1.923590-04	1.124280-04									
200	3.162110-04	3.304100-04	3.450910-04	3.602410-04	3.758450-04	3.918840-04	4.083420-04	4.252730-04	4.4266090-04	4.600190-04	1.923590-04									
300	6.710260-04	6.912840-04	7.116440-04	7.320900-04	7.526060-04	7.731790-04	7.937940-04	8.144600-04	8.351030-04	8.557720-04	4.600190-04									
400	1.080850-03	1.100920-03	1.120890-03	1.140760-03	1.160540-03	1.180220-03	1.199790-03	1.219250-03	1.238600-03	1.257840-03	8.557720-04									
500	1.661690-03	1.679510-03	1.697200-03	1.714780-03	1.732240-03	1.749580-03	1.766820-03	1.783960-03	1.801000-03	1.817940-03	1.257840-03									
600	1.796480-03	1.812120-03	1.827680-03	1.843140-03	1.858510-03	1.873790-03	1.888990-03	1.904100-03	1.919140-03	1.934090-03	1.817940-03									
700	2.093720-03	2.107840-03	2.121900-03	2.135900-03	2.149840-03	2.163730-03	2.177570-03	2.191360-03	2.205100-03	2.218780-03	1.934090-03									
800	2.366510-03	2.379710-03	2.392880-03	2.406030-03	2.419140-03	2.432220-03	2.445270-03	2.458300-03	2.471300-03	2.484270-03	2.218780-03									
900	2.625540-03	2.638270-03	2.650990-03	2.663690-03	2.676380-03	2.689050-03	2.701710-03	2.714360-03	2.726990-03	2.739620-03	2.484270-03									
1000	2.877850-03	2.890370-03	2.902880-03	2.915380-03	2.927890-03	2.940390-03	2.952870-03	2.965340-03	2.977800-03	2.990250-03	2.739620-03									
1100	3.022780-03	3.035240-03	3.047710-03	3.060160-03	3.072620-03	3.085070-03	3.097510-03	3.109940-03	3.122360-03	3.134770-03	2.990250-03									
1200	3.251440-03	3.263840-03	3.276240-03	3.288640-03	3.301030-03	3.313420-03	3.325810-03	3.338200-03	3.350580-03	3.362960-03	3.134770-03									
1300	3.498930-03	3.511270-03	3.523600-03	3.535930-03	3.548260-03	3.560580-03	3.572900-03	3.585220-03	3.597530-03	3.609830-03	3.362960-03									
1400	3.746900-03	3.759070-03	3.771240-03	3.783400-03	3.795560-03	3.807710-03	3.819860-03	3.832010-03	3.844150-03	3.856290-03	3.609830-03									
1500	4.008530-03	4.020620-03	4.032710-03	4.044800-03	4.056890-03	4.068980-03	4.081070-03	4.093150-03	4.105230-03	4.117310-03	3.856290-03									
1600	4.278000-03	4.289660-03	4.301320-03	4.312980-03	4.324640-03	4.336300-03	4.347960-03	4.359620-03	4.371280-03	4.382940-03	4.117310-03									
1700	4.579900-03	4.589350-03	4.600780-03	4.612200-03	4.623600-03	4.635000-03	4.646360-03	4.657720-03	4.669060-03	4.680380-03	4.382940-03									
1800	4.914510-03	4.925480-03	4.936430-03	4.947370-03	4.958290-03	4.969200-03	4.980090-03	4.990960-03	5.001820-03	5.012660-03	4.680380-03									
1900	5.234680-03	5.247090-03	5.259500-03	5.271820-03	5.284140-03	5.296460-03	5.308770-03	5.321080-03	5.333390-03	5.345690-03	5.012660-03									
2000	5.643610-03	5.655090-03	5.666500-03	5.677920-03	5.689340-03	5.700750-03	5.712160-03	5.723570-03	5.734980-03	5.746390-03	5.345690-03									
2100	6.145020-03	6.155090-03	6.165150-03	6.175220-03	6.185290-03	6.195360-03	6.205430-03	6.215500-03	6.225570-03	6.235640-03	5.746390-03									
2200	6.744260-03	6.754110-03	6.763960-03	6.773810-03	6.783660-03	6.793510-03	6.803360-03	6.813210-03	6.823060-03	6.832910-03	6.235640-03									
2300	7.443610-03	7.452880-03	7.462150-03	7.471420-03	7.480690-03	7.489960-03	7.499230-03	7.508500-03	7.517770-03	7.527040-03	6.832910-03									
2400	8.242600-03	8.251270-03	8.259940-03	8.268610-03	8.277280-03	8.285950-03	8.294620-03	8.303290-03	8.311960-03	8.320630-03	7.527040-03									
2500	9.141600-03	9.149270-03	9.156940-03	9.164610-03	9.172280-03	9.179950-03	9.187620-03	9.195290-03	9.202960-03	9.210630-03	8.320630-03									
2600	10.140600-03	10.147270-03	10.153940-03	10.160610-03	10.167280-03	10.173950-03	10.180620-03	10.187290-03	10.193960-03	10.200630-03	9.210630-03									
2700	11.239600-03	11.245270-03	11.250940-03	11.256610-03	11.262280-03	11.267950-03	11.273620-03	11.279290-03	11.284960-03	11.290630-03	10.200630-03									
2800	12.438600-03	12.443270-03	12.447940-03	12.452610-03	12.457280-03	12.461950-03	12.466620-03	12.471290-03	12.475960-03	12.480630-03	11.290630-03									
2900	13.737600-03	13.741270-03	13.744940-03	13.748610-03	13.752280-03	13.755950-03	13.759620-03	13.763290-03	13.766960-03	13.770630-03	12.480630-03									
3000	15.136600-03	15.139270-03	15.141940-03	15.144610-03	15.147280-03	15.149950-03	15.152620-03	15.155290-03	15.157960-03	15.160630-03	13.770630-03									

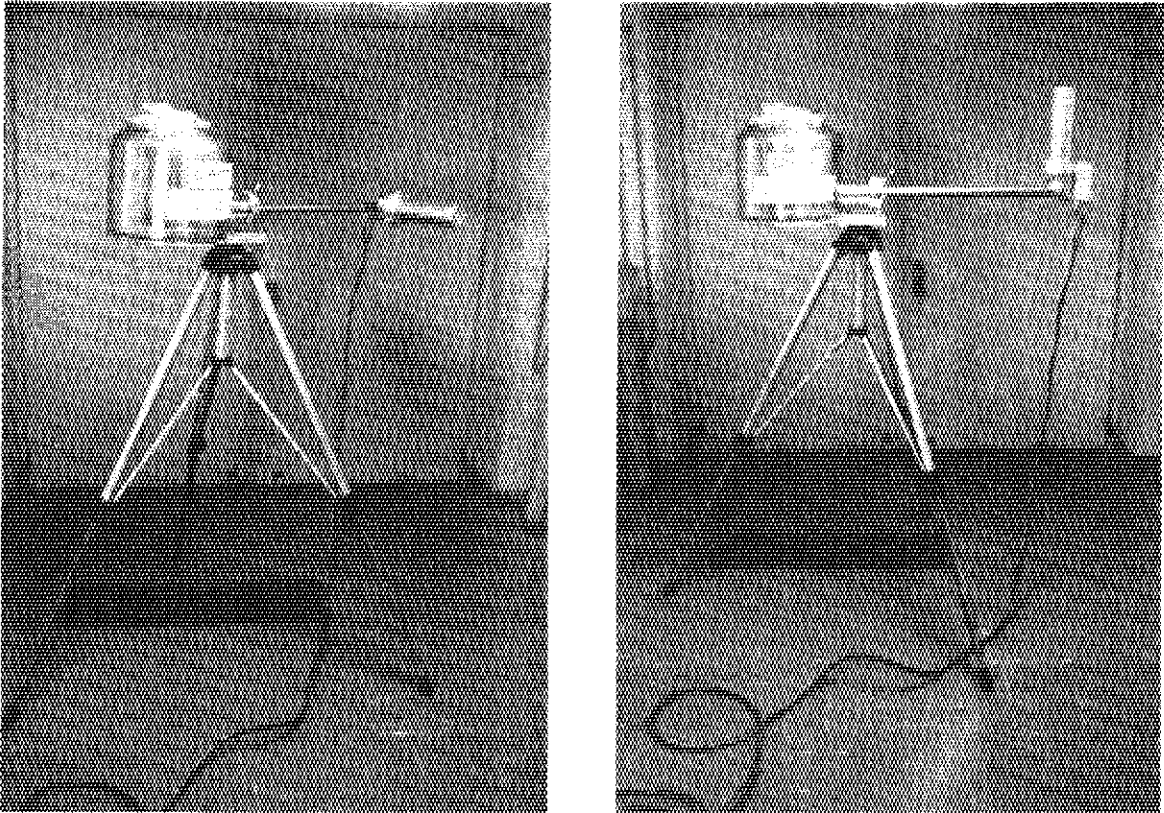
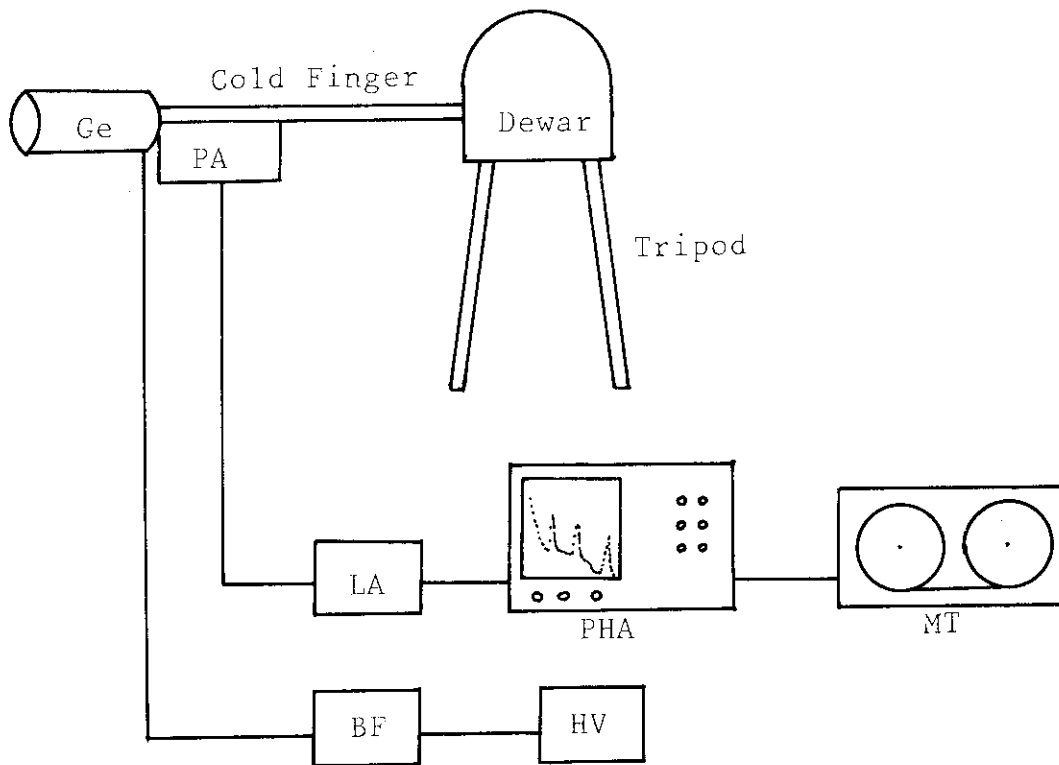


Photo. 1 Pure Ge detector.



Ge; Pure Ge detector
 PA; Pre amplifier
 LA; Linear amplifier
 HV; High voltage power supply
 BF; High voltage buffer
 PHA; Pulse height analyzer
 MT; Magnet tape recorder

Fig. 1 Experimental arrangement.

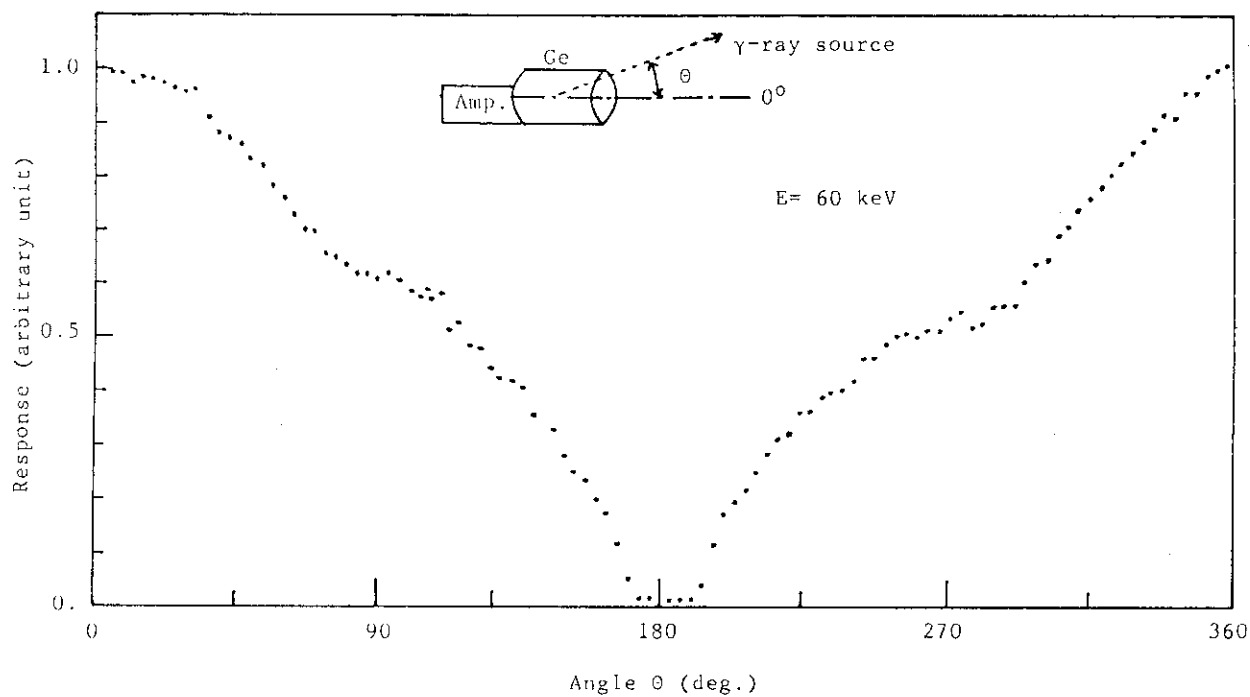


Fig. 2-1 Directional response of the pure Ge detector (photon energy= 60 keV).

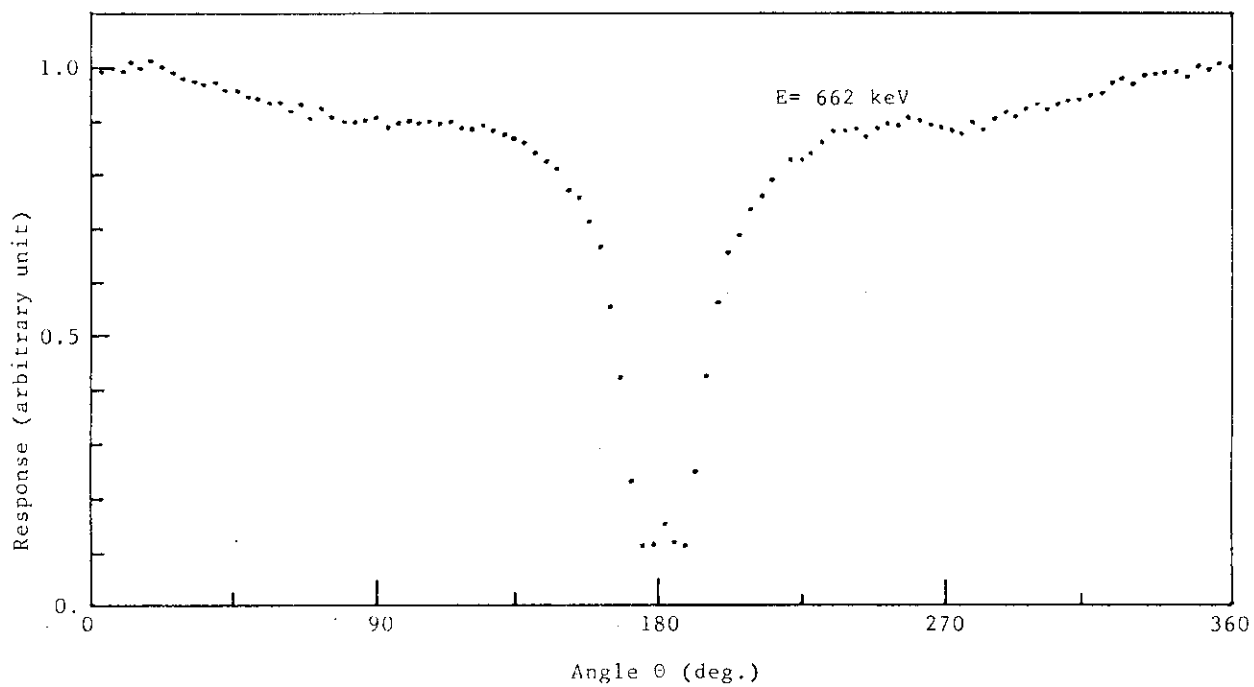


Fig. 2-2 Directional response of the pure Ge detector (photon energy= 662 keV).

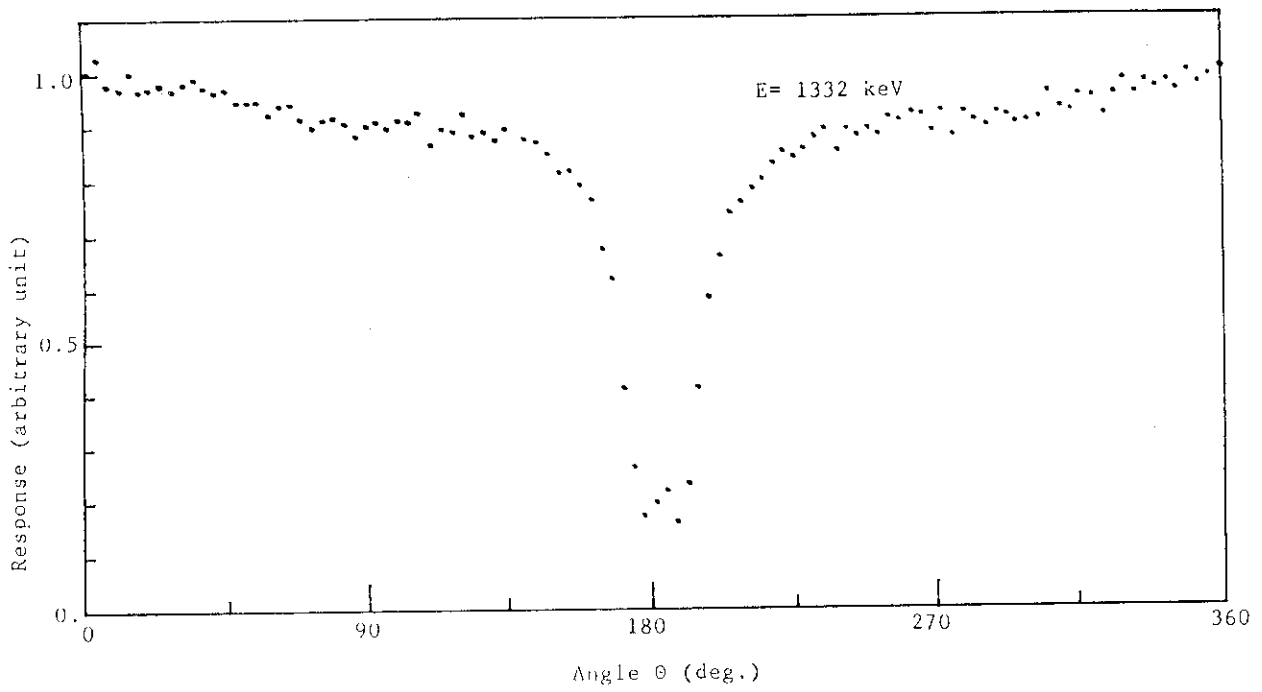


Fig. 2-3 Directional response of the pure Ge detector (photon energy= 1332 keV).

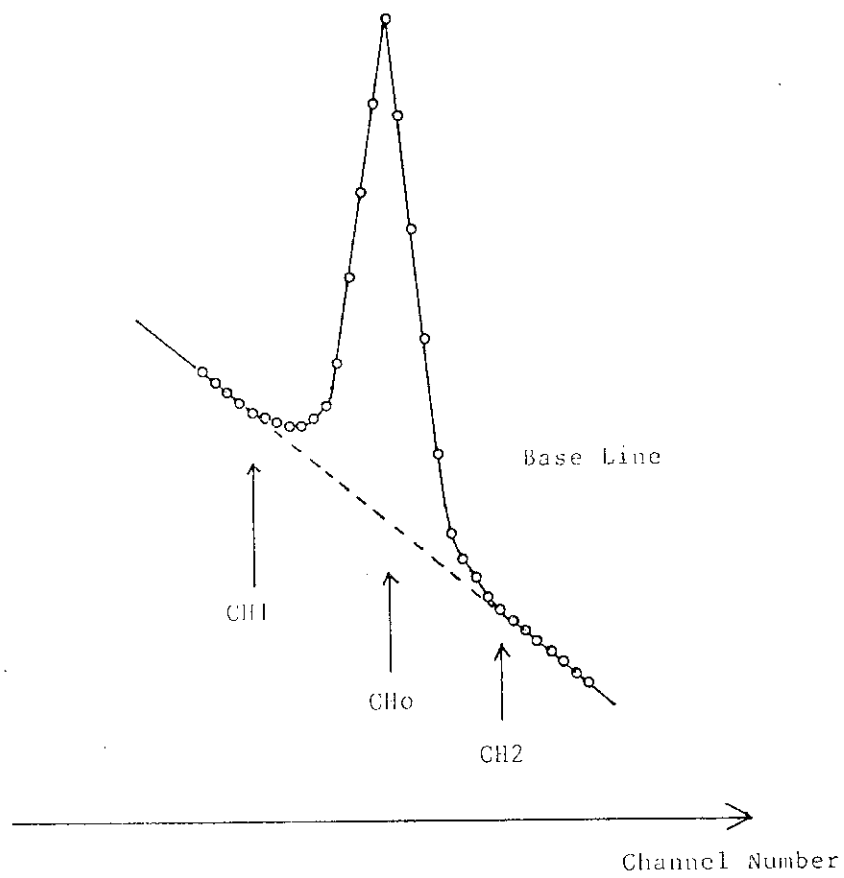


Fig.3 Concept on determination of the net spectrum.

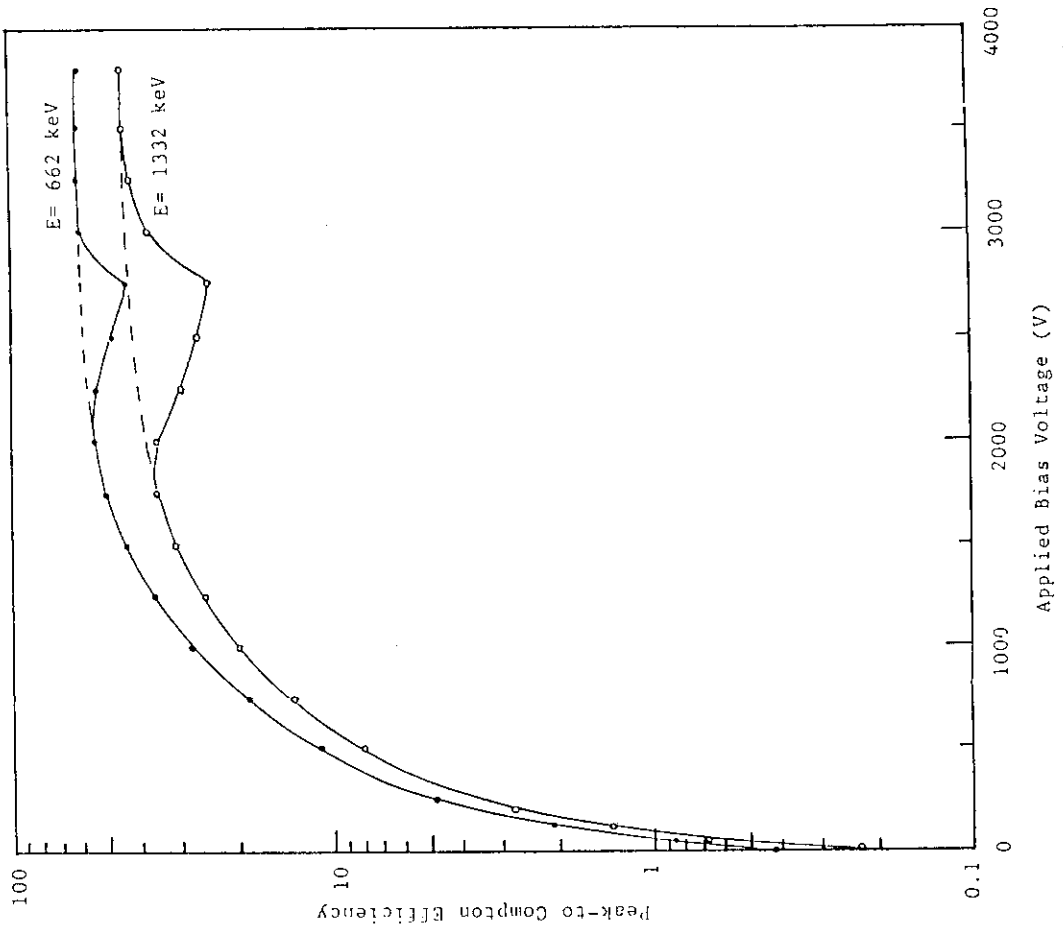


Fig. 5 Relation between applied bias voltage and Peak-to-Compton ratio.

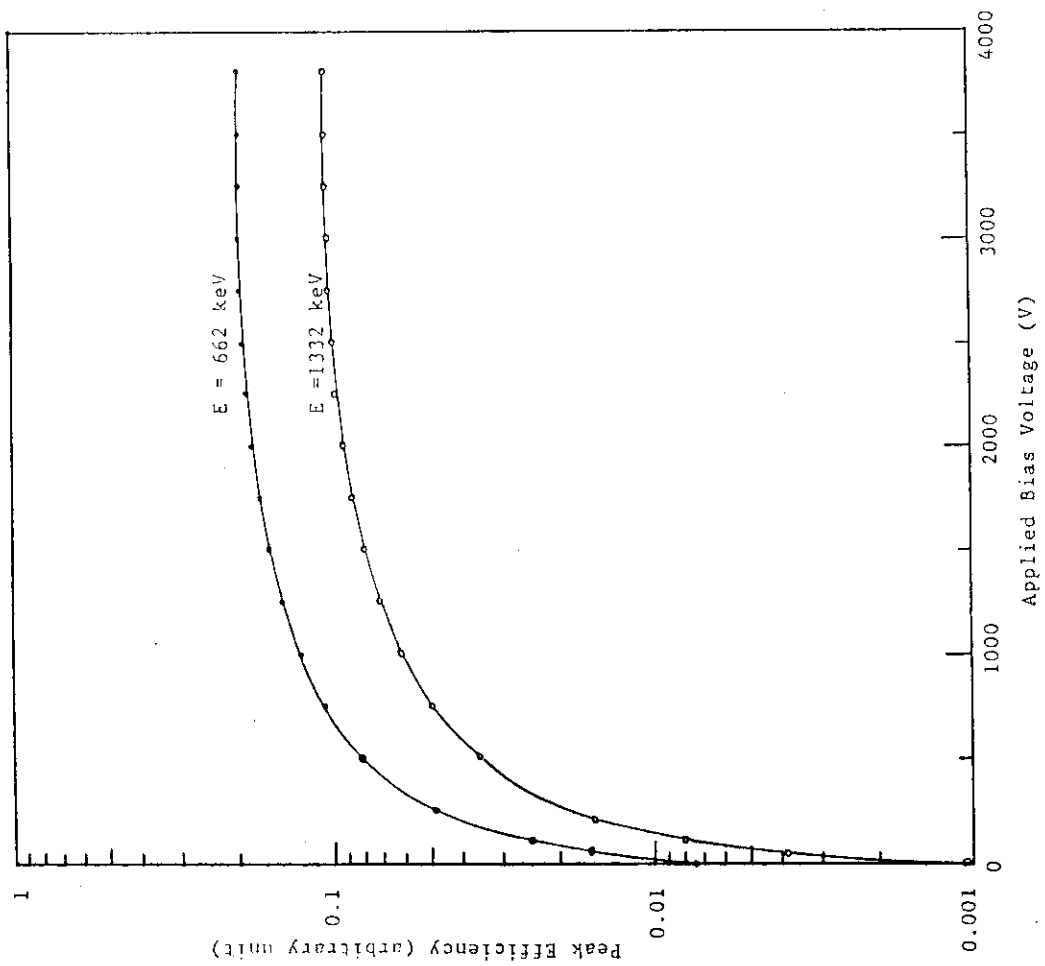


Fig. 4 Relation between applied bias voltage and peak efficiency.

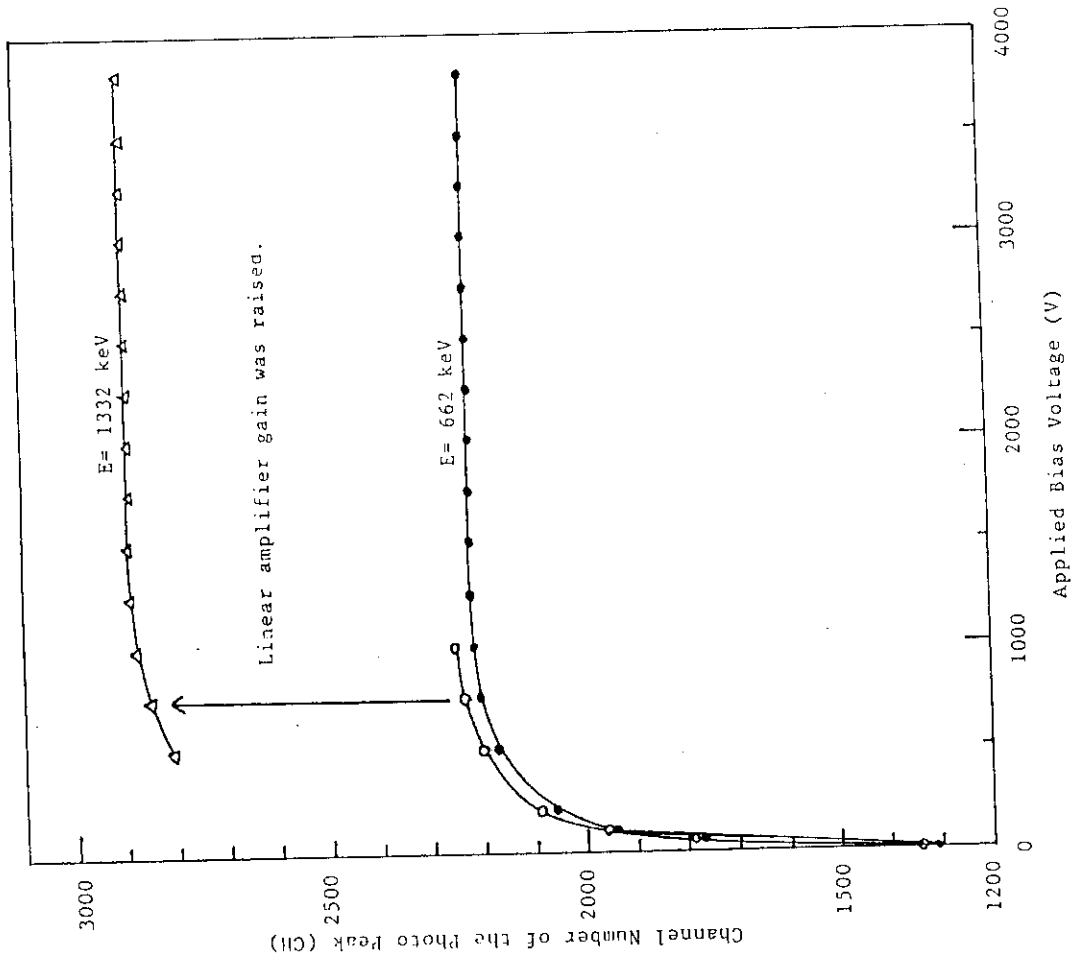


Fig.6 Relation between applied bias voltage and the channel number of the photo peak.

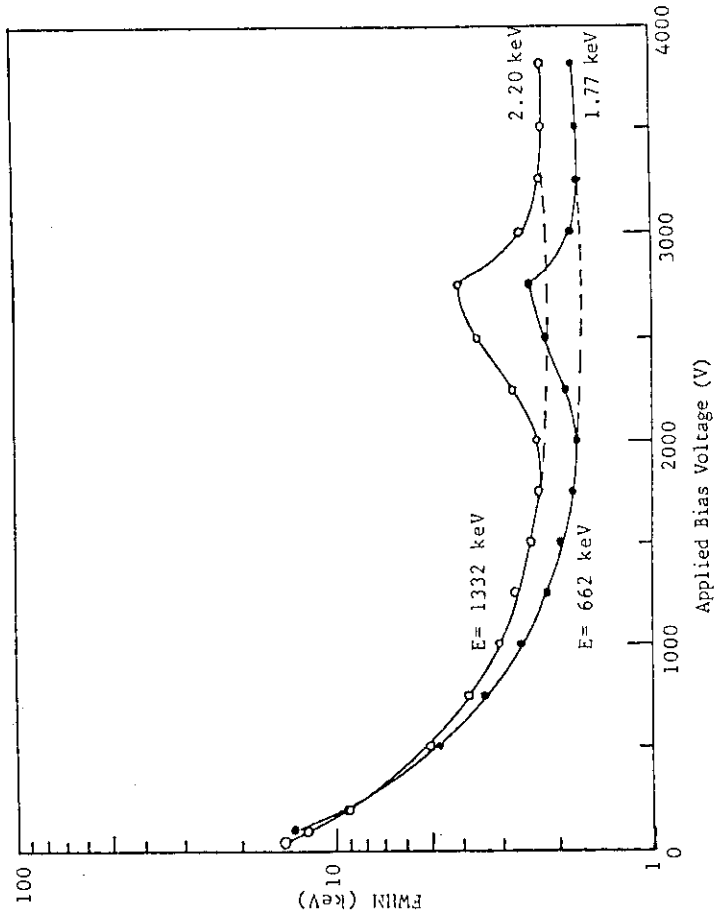


Fig.7 Relation between applied bias voltage and FWHM (Full Width at Half Maximum).

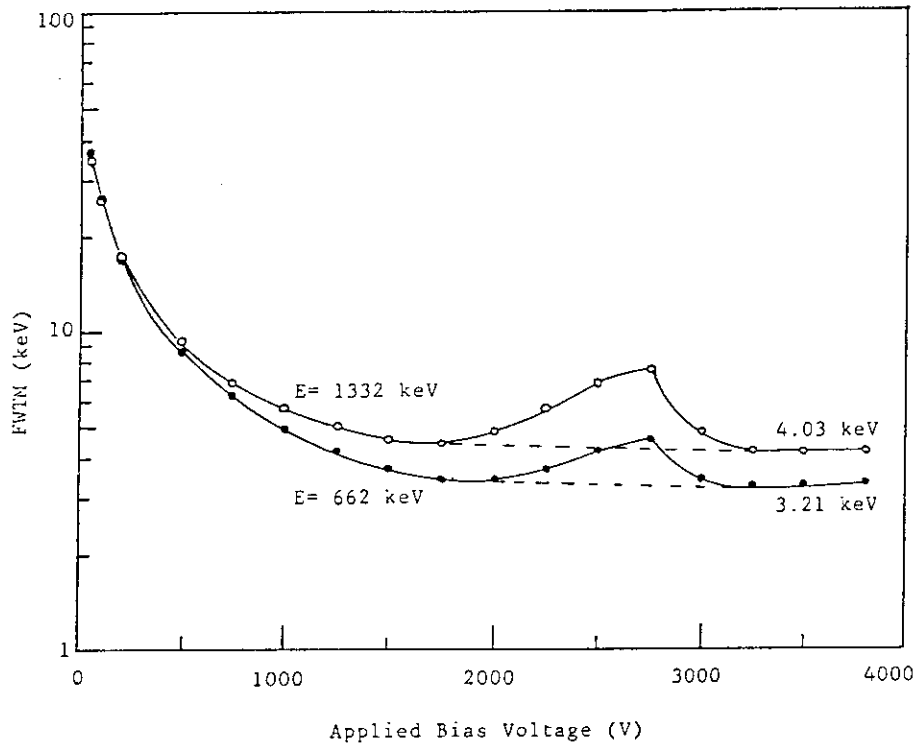


Fig.8 Relation between applied bias voltage and FWTM(Full Width at Tenth Maximum).

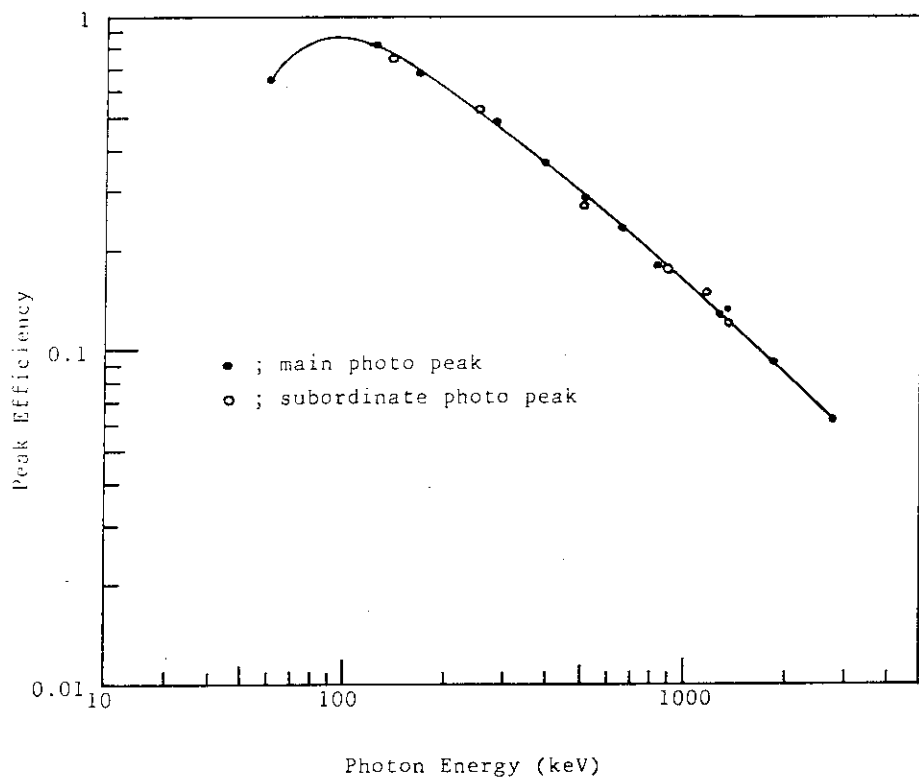


Fig.9 Relation between photon energy and peak efficiency.

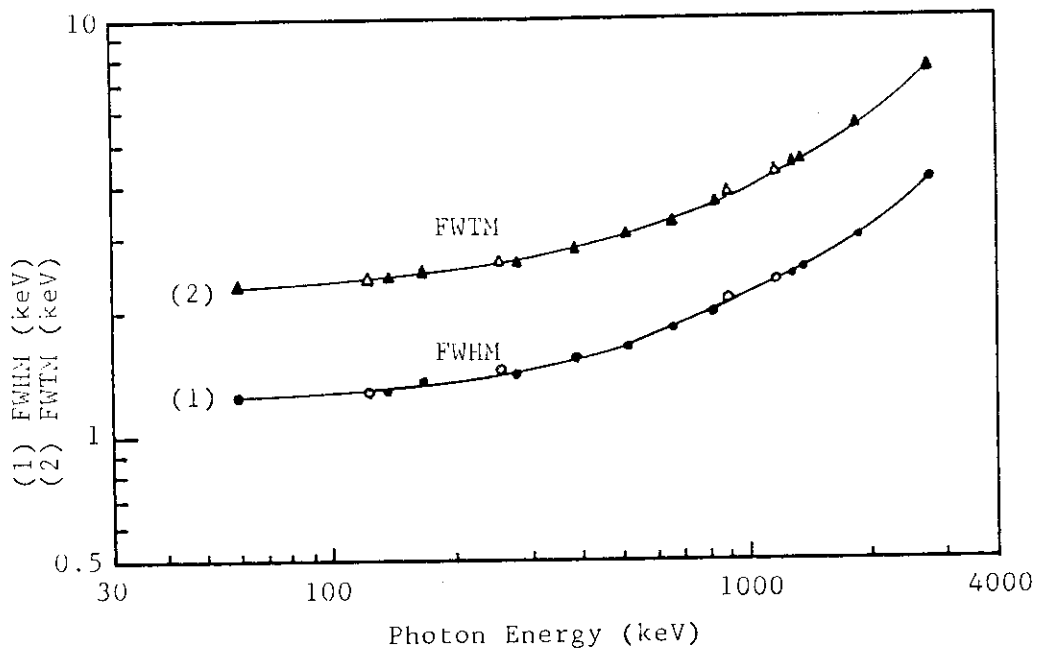


Fig.10 (1) Relation between photon energy and FWHM
 (2) Relation between photon energy and FWTM

●, ▲ ; for main photo-peak
 ○, △ ; for subordinate photo-peak

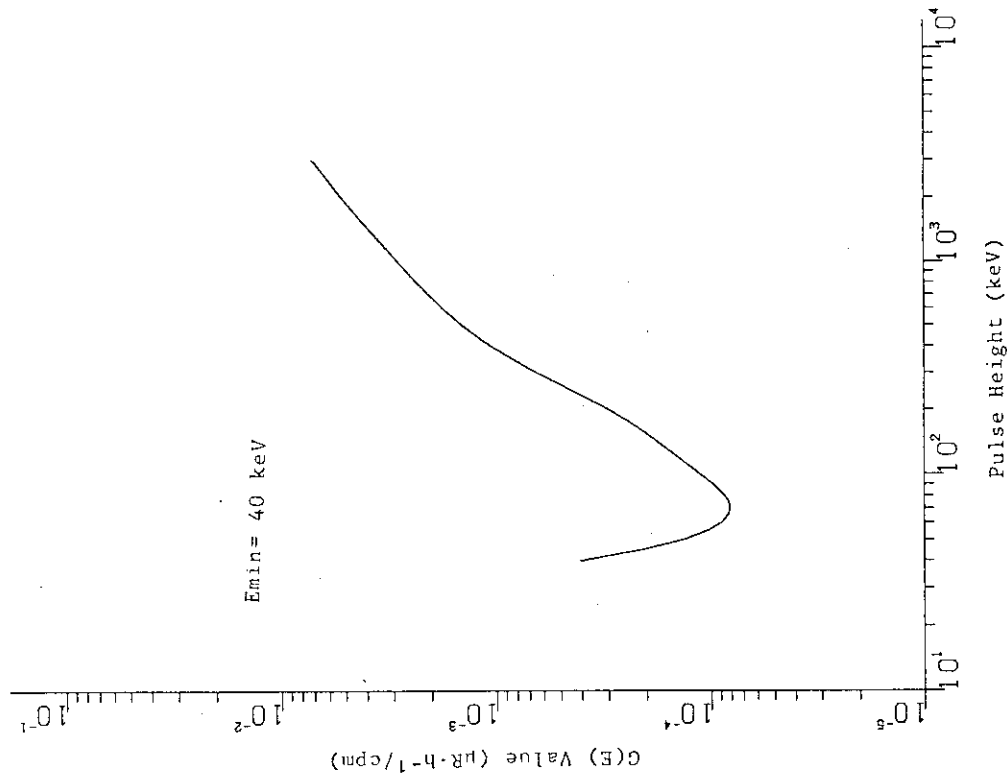
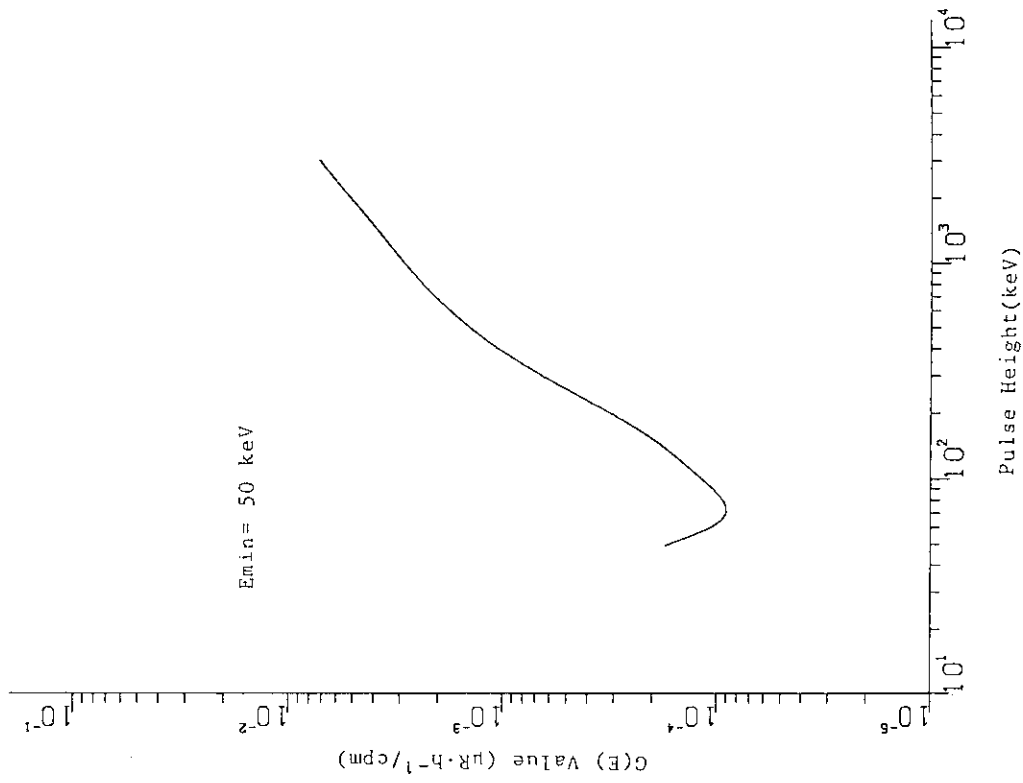


Fig. 11-1 G(E) function for the pure Ge semi-conductor detector calculated from standard spectra determined experimentally. Pulse height discrimination level $E_{min} = 40 \text{ keV}$.

Fig. 11-2 G(E) function for the pure Ge semi-conductor detector calculated from standard spectra determined experimentally. Pulse height discrimination level $E_{min} = 50 \text{ keV}$.

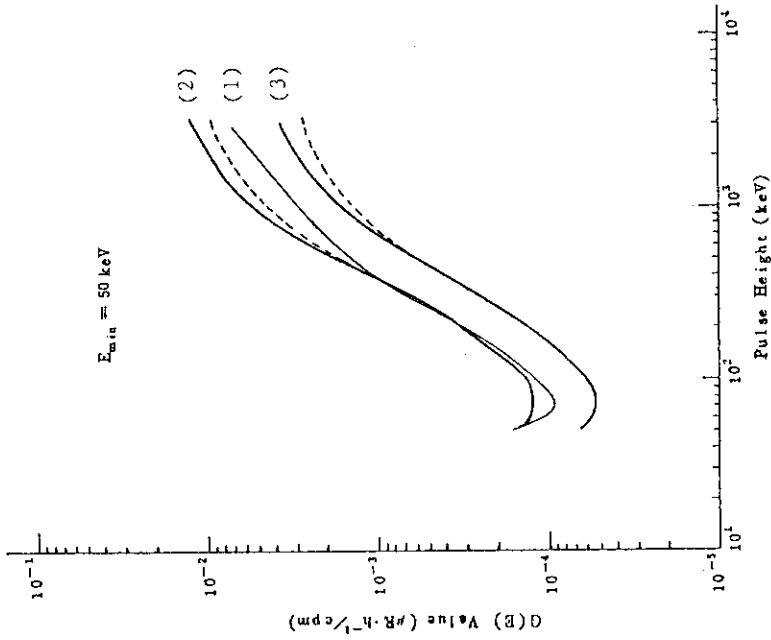


Fig. 13 Comparison of G(E) functions between the pure Ge detector and NaI(Tl) scintillation detectors. Pulse height discrimination level $E_{min} = 50$ keV.

- (1) G(E) function for the pure Ge detector.
- (2) G(E) functions for 2" ϕ spherical (solid line), and for 2" ϕ x 2" cylindrical (dashed line) NaI(Tl) scintillation detector.
- (3) G(E) functions for 3" ϕ spherical (solid line), and for 3" ϕ x 3" cylindrical (dashed line) NaI(Tl) scintillation detector.

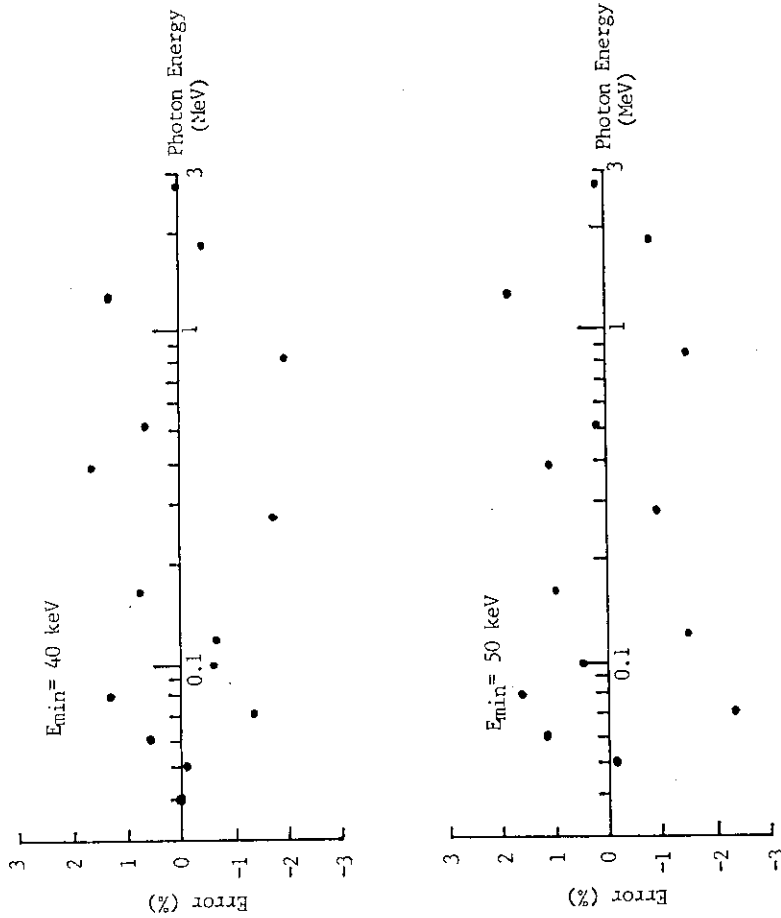


Fig. 12 Approximation error of G(E) functions when applied to input data.

- (1) $E_{min} = 40$ keV
- (2) $E_{min} = 50$ keV

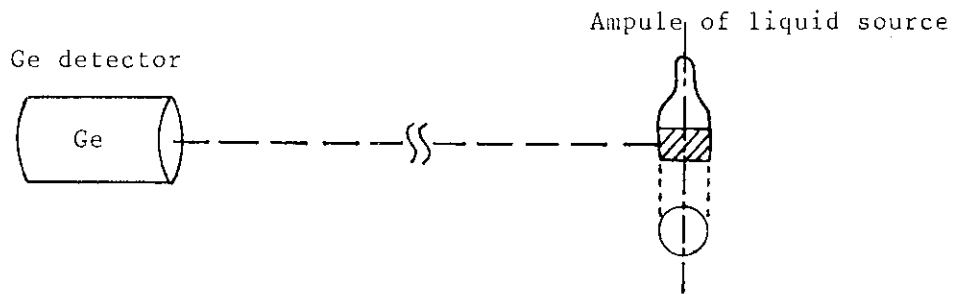


Fig. A1 Arrangement of the Ge detector and liquid γ -ray source in an ampule.

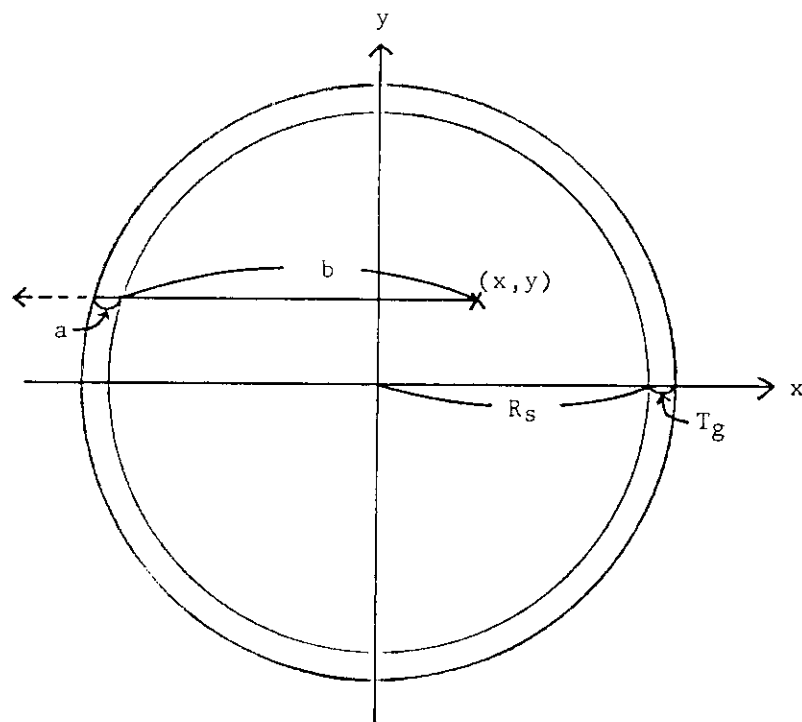


Fig. A2 Illustrative figure of γ -ray self-absorption in liquid source and glass ampule.

a; Pass through length of γ -ray in the wall of the glass ampule.

b; Pass through length of γ -ray in liquid source.

R_s ; Inside diameter of the glass ampule=16 mm.

T_g ; Thickness of the glass ampule= 1 mm.

(x,y); Coordinate of the point where γ -ray was generated.