

Ge 半導体検出器の遮蔽体の試作

川崎医療短期大学 放射線技術科

村中 明 板谷 道信 北山 彰 荒尾 信一
天野 貴司 松宮 昭

(平成 7 年 8 月 21 日受理)

A Trial Shielding for Ge-semiconductor Detector

Akira MURANAKA, Michinobu ITAYA, Akira KITAYAMA,
Shinichi ARAO, Takashi AMANO and Akira MATSUMIYA

*Department of Radiological Technology
Kawasaki College of Allied Health Professions
Kurashiki, Okayama 701-01, Japan
(Received on Aug. 21, 1995)*

Key Words : Ge 半導体検出器, 遮蔽体, バックグラウンドスペクトル, ピーク計数効率

概 要

環境放射能を測定することを目的に, Ge 半導体検出器の簡易遮蔽体を試作し, その効果を検討した。また, 低レベル放射能試料の長期間にわたる測定と放射能の定量のために必要な検出器の基本性能についても検討を加えた。

検出器の出力パルスの Shaping time が $6\ \mu\text{sec}$ のとき, 低計数率の条件では最も高いエネルギー分解能が得られた。長期間のパルス波高値の安定性の検討では, 1 日平均 0.012% の割合で低下する傾向が認められた。

厚さ 5 cm の鉛ブロックを組合せて, 鉛の厚さ 10 cm で 2 mm 厚の銅板を内張りにした遮蔽体を作成した。バックグラウンドの γ 線スペクトルの測定から, 遮蔽体を用いると ^{40}K の γ 線の計数は約 1/500, ラドンやトリンの娘核種は 1/100 ~ 1/200, 散乱線を含むスペクトル全体では約 1/60 に減少した。また, この遮蔽体中に 200 ml の測定試料を置いた場合の光電ピークの計数効率の推定を行い, ^{40}K で 0.065% であった。

1. はじめに

Ge 半導体検出器を用いた γ 線スペクトルの測定は, そのエネルギー分解能が他の検出器と比較して格段に優れており, 化学分析等の手段を必要とせずに多核種の同時定量分析が可能なことから, 環境試料中の γ 線放出核種を対象とした放射能分析の主要な手法として急速に発展普及してきた¹⁾。

Ge 半導体検出器で長時間バックグラウンド(自然放射線)を測定すると, 空気中や検出器周辺の建築資材等の中に存在する天然放射性同位元素の放出する多くの γ 線とその散乱線および宇宙

線に起因する散乱線が検出される。したがって, 環境試料等の低レベルの放射能の定量分析には, 検出器を厳重に遮蔽しバックグラウンドをできるだけ低減する必要がある。

今回, 川崎医療短期大学放射線技術科に設置されている Ge 半導体検出器で環境放射能分析を行なうことを目的に, 鉛ブロックを用いて簡易遮蔽体を作成し, その遮蔽効果を検討した。また, 低レベル放射能試料の長時間にわたる測定と放射能の定量に必要な検出器の基本性能についても検討を加えたので報告する。

2. 使用装置と実験方法

2.1 検出器の概要

使用した検出器は高純度型 Ge 半導体検出器 (GMX-10180-P, ORTIC 製) で, Ge 結晶の大きさは直径43.0 mmで長さが41.9 mmである。0.5 mm厚の Be ウィンドウを持っており, 3 keV~10 MeVの光子スペクトルの測定が可能である。ただし, 今回の実験では Be ウィンドウの保護のためプラスチックキャップを装着した状態で用いた。使用時には-2000 Vのバイアス電圧を印加し, 液体窒素で冷却する必要がある。スペクトル分析には8,000チャンネルの多重波高分析器 (MCA 7800, セイコー EG & G 製) を用いた。MCA の出力をパーソナルコンピュータ(PC-9801 RX)へ接続し, スペクトルの測定, 分析及び保存等は全てコンピュータ上で行った。

2.2 遮蔽体の作成

図1に今回試作した Ge 半導体検出器の遮蔽体の概要を示した。厚さ5 cmの種々の大きさの鉛ブロックを組み合わせて, 内容積が $20 \times 35 \times 10$ cmで厚さ10 cmの遮蔽体を作成した。ブロック間の隙間から入ってくる放射線を防ぐために, ブロックを互い違いに組み合わせた。さらに, 鉛からの特性X線を低減させる目的で2 mm厚の銅板を内張りした。また, 検出器挿入口から直接入る放射線を遮蔽するために, Dewar の後に厚さ10 cmの鉛に2 mm厚の銅板を張り合わせた遮蔽体を設置した。環境放射能測定用の試料容器には, 容量200 ml (試料厚さ3.5 cm) のプラスチ

ック容器を使用した。検出器の中心軸と測定試料の中心が一致し, 検出器—試料容器間の距離が4 cmになるように固定器具を作成した。遮蔽体中への試料の出し入れは, 左側面の鉛ブロックの移動で可能である。

2.3 実験方法

今回の実験では, MCA を4,096チャンネルに設定し, およそ0~2 MeV (0.5 keV/ch.) のエネルギー範囲を測定できるように校正した。測定した γ 線スペクトルについて, 光電ピークの中心チャンネル, 半値幅 (FWHM), 1/10幅 (FWTM), 正味の計数値と標準偏差はコンピュータの定性・定量分析プログラム (GAMMA2)²⁾ を用いて自動的に求めた。エネルギー分解能が最も高くなる条件でスペクトルを測定するため, ^{137}Cs (662 keV) 線源を用いて比例増幅器の出力パルス幅 (Shaping time) と光電ピークの FWHM, FWTM の関係を検討した。

バックグラウンドの γ 線スペクトルは, 測定時間を24時間 (86,400 sec) に設定し, 遮蔽体内に検出器を設置した場合と遮蔽体を用いない場合について繰返し測定した。得られたスペクトル中の主な光電ピークおよび連続スペクトル部分の計数を比較し, 遮蔽体の効果を検討した。また, ^{40}K の光電ピーク (1,460 keV) の中心チャンネル数の変動を指標として, 連続した24日間にわたるパルス波高値の安定性を調べた。

環境試料の放射能分析を念頭に置き, 遮蔽体内に試料容器 (200 ml) を置いた場合の光電ピークの計数効率の推定を行なった。まず, ^{22}Na (1275 keV), ^{57}Co (14.4, 122, 136 keV), ^{60}Co (1173, 1333 keV), ^{133}Ba (53.2, 81.0, 276, 303, 356, 384 keV), ^{137}Cs (662 keV) のディスク状標準線源 (線源直径: 10 mm) を検出器中心軸上で4 cmの距離に置き, 200~7,200秒間測定した。各核種の光電ピークの計数率と線源放射能 (Bq) から各光電ピークの計数効率を計算し, γ 線エネルギーと効率との関係 (検出効率校正曲線) を求めた。次に, 塩化カリウム10 g (^{40}K 17.46 Bq を含む) と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (141 keV) 溶液の一定量をディスク状標準線源と同様な条件で測定した後, 200 mlの水に溶かし試料容器に入れて測定して200 ml容積試料の計数効率を推定した。

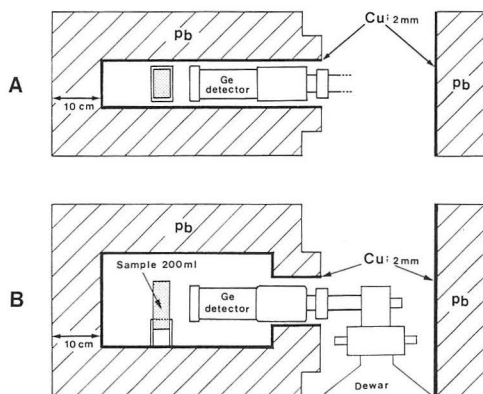


Fig. 1 Schematic construction of shielding :
(A) plane view, (B) cross-sectional view

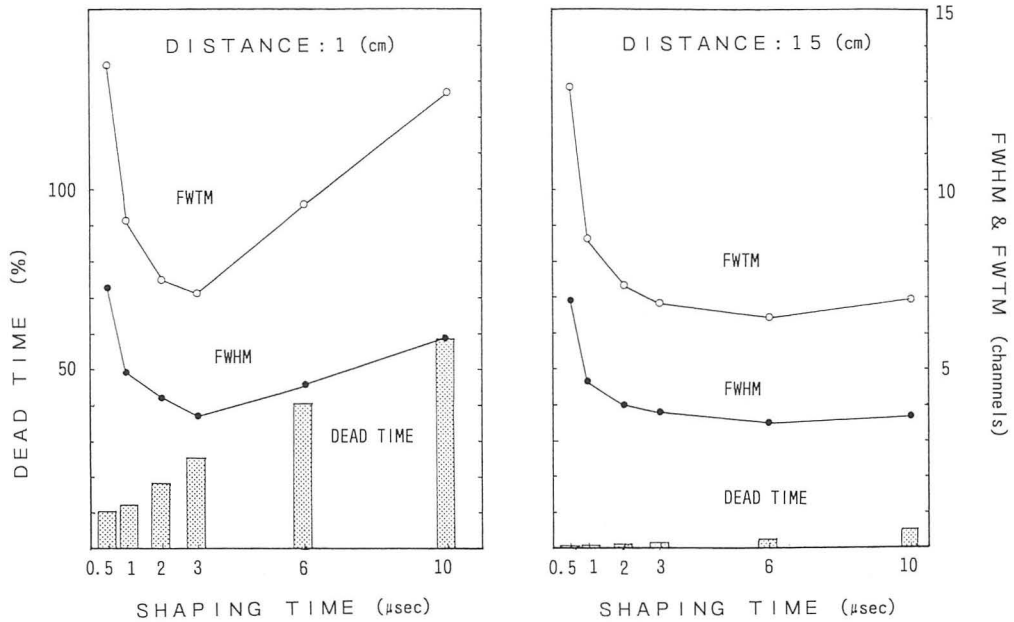


Fig. 2 Effects of shaping time on dead time, FWHM and FWTM

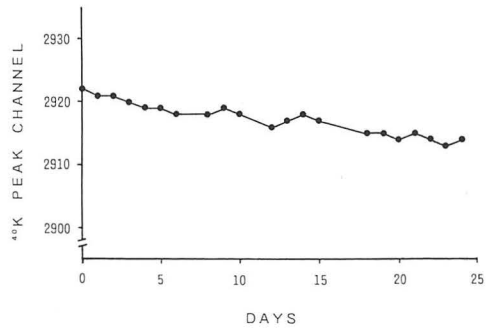
3. 結 果

3.1 Shaping time の FWHM, FWTM におよぼす影響

^{137}Cs 線源—検出器間距離を 1 cm と 15 cm に設定し, Shaping time の FWHM と FWTM におよぼす影響を検討した結果を図 2 に示した。距離が 1 cm (計数率は約 2,500 cps) で MCA の不感時間が大きくなる条件では, FWHM および FWTM は Shaping time が 3 μsec のとき最小になった。一方, 距離が 15 cm (計数率は約 120 cps) で MCA の不感時間が 5 % 以下と小さくなる条件では, FWHM および FWTM は Shaping time が 6 μsec のとき最小値を示した。環境放射能測定の場合は低計数率であり, Shaping time を 6 μsec に設定したとき最もエネルギー分解能が高いスペクトルが得られると考えられ, 以下の測定はすべてこの条件で行った。

3.2 パルス波高値の変動

バックグラウンドの測定を行った連続した 24 日間 (電源を ON にし続けた状態) において, ^{40}K の光電ピークチャンネルの変動を測定した結果を図 3 に示した。24 時間における変動は ± 1 チャンネル以内であったが, 時間が経過するに

Fig. 3 Change of peak-channels of ^{40}K during 24 days

つれてピークチャンネルは下降する傾向を示した。24 日間に 9 チャンネル (4.5 keV) 下降し, 1 日平均の変動率は γ 線のエネルギーに対して 0.012 % であった。

3.3 バックグラウンドスペクトルにおける遮蔽体の効果

図 4 に遮蔽体がある場合とない場合で測定したバックグラウンドの γ 線スペクトルの一例を示した。また, スペクトル中に観測された主な光電ピーク 17 個について核種を同定し, 遮蔽体がない場合とある場合で正味の計数を比較した結果を表 1 に示した。遮蔽体を用いない場合のス

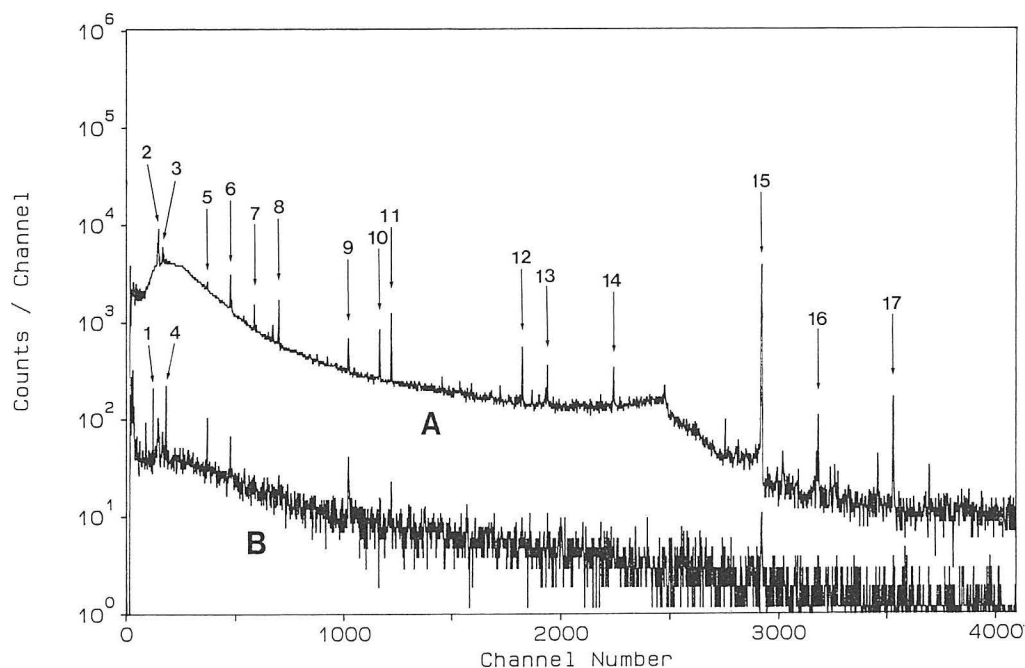


Fig. 4 Background γ -ray spectrum measured by pure germanium detector :
(A) without shielding, (B) with shielding (Pb 10cm + Cu 2mm)

Table 1 Major peaks observed in background spectrum

Peak No.	Center channel	Nuclide	Energy (keV)	Net counts (counts/24 hours)		(B)/(A)
				(A)*	(B)*	
1	126	Th-234	63.3	1506 \pm 371	991 \pm 49	0.658
2	149	Pb-K α_1	75.0	27938 \pm 415	228 \pm 46	0.008
3	169	Pb-K β_1	84.9	12365 \pm 398	232 \pm 42	0.019
4	185	Th-234	92.8	1863 \pm 423	1359 \pm 52	0.729
5	371	Ra-226	186.0	2506 \pm 347	538 \pm 43	0.215
6	477	Pb-212	238.6	11540 \pm 281	163 \pm 36	0.014
7	590	Pb-214	295.2	5164 \pm 235	87 \pm 30	0.017
8	703	Pb-214	352.0	9275 \pm 211	151 \pm 28	0.016
9	1022	Annihi. Rad.	511.0	4795 \pm 148	399 \pm 30	0.083
10	1166	Tl-208	583.1	5639 \pm 150	83 \pm 22	0.015
11	1218	Bi-214	609.3	8799 \pm 160	119 \pm 23	0.014
12	1821	Ac-228	911.1	4165 \pm 117	17 \pm 17	0.004
13	1937	Ac-228	968.9	2384 \pm 100		
14	2239	Bi-214	1120.2	2075 \pm 102		
15	2918	K - 40	1460.8	47048 \pm 222	76 \pm 14	0.002
16	3181	Tl-208	1587.9	1188 \pm 47		
17	3524	Bi-214	1764.5	1948 \pm 52	27 \pm 8	0.014

* (A) : without shielding, (B) : with shielding (Pb 10cm + Cu 2mm)

ベクトルで観測されたピークの中で ^{40}K が最も計数が高かったが、遮蔽体を置くことによって約1/500に減少し最も効果的に遮蔽された。ウラン系列の気体であるラドン(^{222}Ra)の娘核種(^{214}Pb , ^{214}Bi)およびトリウム系列の気体であるトロン(^{220}Rn)の娘核種(^{208}Tl , ^{212}Pb)は空気中にも存在すると考えられるが、その γ 線は遮蔽体によって1/60~1/70に減少した。トリウム系列のトロン以前の核種である ^{228}Ac の γ 線は効果的に遮蔽された。しかし、ウラン系列のラドン以前の核種である ^{234}Th と ^{226}Ra では遮蔽効果が少なく、遮蔽体を用いた場合の方が際立ったピークを形成した。消滅放射線のピークは、種々の核種や宇宙線にも影響されるため例外である。鉛の特性X線は、銅板を付加することによって効果的に減少し、1/50~1/100に遮蔽された。予備実験の結果では、鉛のみの遮蔽体では鉛特性X線の計数は銅板を付加した場合の3~10倍の計数になる。

表2に250 keV ごとの散乱線からなる連続スペクトル部分(光電ピークも含む)における遮蔽体の効果を検討した結果を示した。計数率は7回づつ測定したスペクトルの平均値と標準偏差を示している。遮蔽体なしの場合の散乱線の計数率は低エネルギーになるほど著しく増加しているが、遮蔽体の効果は低エネルギーほど大きくなり、スペクトルの全計数率では約1/60に減少した。

3.4 光電ピーク計数効率の測定

図5に実線でディスク状標準線源を用いて求

めた γ 線エネルギー (keV) とピーク効率 (%) との関係 (検出効率校正曲線) を示した。検出効率校正曲線は両対数のグラフで表すと、 γ 線のエネルギー130 keV を境界値とした二相性のほぼ直線になった。この校正曲線の関数は、 $[\text{効率}] = \exp(A + B \cdot \ln[\text{エネルギー}] + C \cdot \ln[\text{エネルギー}]^2)$ の形で表すと、係数はそれぞれ境界値以下では $A = -4.70$, $B = 4.60 \times 10^{-2}$, $C = 2.13 \times 10^{-2}$ であり、境界値以上では $A = 4.68$, $B = -2.18$, $C = 8.49 \times 10^{-2}$ であった。

また、図5に塩化カリウム(^{40}K を含む)および $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 線源を測定して求めたピーク効率を白丸(○)で示した。塩化カリウム10 gを測定して得られたピーク効率は0.122 %で、ディスク線源の検出効率校正曲線の関数を用いた計算値とほぼ同じであった。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (141 keV)と ^{40}K (1460 keV)の200 ml容積試料のピーク効率はそれぞれ0.83 %, 0.065 %であった。ディスク線源の校正曲線は直線になることから、200 ml容積試料についてもこの二点間は直線で補間できると考えられ、境界値(130 keV)以上のエネルギーについては200 ml容積試料の光電ピーク計数効率の推定が可能である。

4. 考 察

バックグラウンドの遮蔽体として、光子に対

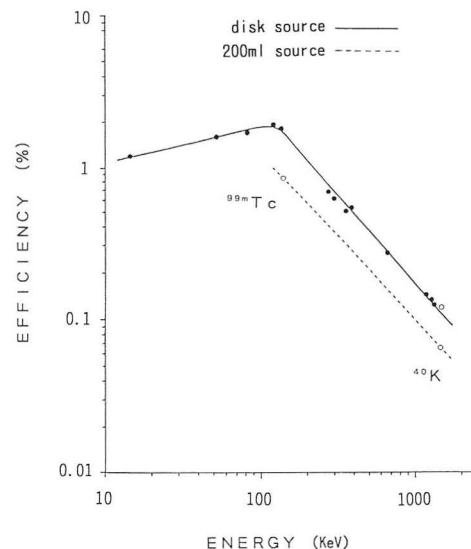


Fig. 5 Peak counting efficiency curves for disk sources and 200ml volume samples

Table 2 Counting rates of continuous parts in background spectrum

Energy (keV)	Counting rate (cpm)		(B)/(A)
	(A)*	(B)*	
5~ 250	2919.1± 8.3	39.12±0.21	0.013
250~ 500	678.4± 2.8	12.40±0.14	0.018
500~ 750	268.2± 1.2	6.17±0.11	0.023
750~1000	169.2± 0.8	3.72±0.10	0.022
1000~1250	140.9± 0.7	3.17±0.10	0.022
1250~1500	85.7± 0.6	1.93±0.09	0.023
1500~1750	16.8± 0.2	1.05±0.06	0.063
1750~2000	11.3± 0.2	0.76±0.06	0.067
5~2000	4289.5±11.1	68.31±0.30	0.016

* (A) : without shielding,

(B) : with shielding (Pb 10cm+Cu 2mm)

して遮蔽効果の大きい高原子番号物質の鉛や鉄が一般的に使用されている。低レベルの環境試料の測定では、通常 4π 方向にわたって10~15 cm 厚の鉛で遮蔽される¹⁾。15 cm 以上の厚さの鉛を遮蔽体として用いても、全スペクトルの遮蔽効果はあまり変わらないと言われている³⁾。また、鉛の遮蔽体の表面から発生する鉛の特性X線やウラン系列およびトリウム系列の核種からの低エネルギー γ 線を低減させるために、銅やカドミウムが内張り用いられている¹⁾。今回作成した遮蔽体は鉛ブロックを組み合わせたものでブロック間の隙間があり、また検出器挿入口があいており、厳密な遮蔽体とは言えない。しかし、 ^{40}K 光電ピークの計数率は約0.05 cpm まで低減し、他家の報告^{3,4)}と比較しても遜色がなく十分な遮蔽効果が得られた。

バックグラウンドの γ 線スペクトルでは多くのピークが観測されたが、それぞれのエネルギーの光子の発生源によって遮蔽体の効果は異なる。実験室の壁や床等のコンクリートのなかに含まれていると考えられる ^{40}K の γ 線が、最も低減率が大きかった。ラドンとトロン崩壊生成物の ^{214}Pb , ^{214}Bi と ^{208}Tl , ^{212}Pb は空気中にエアロゾルとしても存在するため、遮蔽の効果は ^{40}K より小さくなった。これらの核種の計数は、遮蔽体の厚さよりも検出器の設置環境や室の空調によって大きく影響されるといわれており³⁾、単純には他家の報告と比較できない。また、これらの核種の計数の低減と安定化のために、Ge 半導体検出器の冷却に使用されている液体窒素の気化ガスを遮蔽体のなかに還流する方法が報告されている⁵⁾。

^{238}U を親核種とするウラン系列の娘核種である ^{234}Th と ^{226}Ra も検出された。これらの核種の計数は低エネルギーにもかかわらず遮蔽効果が少なく、また予備実験として行った銅板の有無によっても影響されなかったことから、これらの核種は検出器の構成材料にも存在すると考えられる。遮蔽に用いる材料や検出器のエンドキャップを構成している Al 材にもウラン系列やトリウム系列の放射能が含まれているという報告があり^{6,7)}、微量の放射能分析には遮蔽体の材料の吟味とともに検出器自身の放射能汚染の多少という観点からの吟味も必要である。

環境放射能の分析においては、その放射能が極低レベルであるため長時間の測定が必要である。したがって、測定装置の長時間にわたる安定性が要求される。測定装置の安定性の指標として ^{40}K ピークチャンネルの変動を検討した結果では、1 日間の変動は1チャンネル以内であり測定時間が24時間以内であれば特に問題がない。また、長期間の変動をみるとピークチャンネルは平均0.36 ch./日の割合で下降した。 γ 線の光電ピークの半値幅は1~2 keV (2~4 ch.) であり、この範囲の変動であればコンピューターで自動的に核種の同定が可能である。したがって、連続して測定する場合には約1週間に1回の間隙でエネルギー校正曲線を作り直す必要があると考えられる。

環境放射能分析における測定試料はある程度の容量が必要であり、試料の放射能を定量するには容積試料に対する光電ピークの計数効率を求める必要がある。幾何学的な効率、 γ 線の自己吸収、試料容器による吸収と散乱等の複雑な補正を考慮すると、実際の試料測定と同じ条件(試料容器、容量、原子番号・密度など)で標準線源を作成し、容積試料のピーク効率を求めるのが理想的である。しかし、今回は非密封の標準線源を入手し容積線源を作成するのが困難であったため、先ず密封のディスク状の標準線源によるピーク効率を求めた。次に、入手可能な ^{40}K と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ について試料容器200 ml の容積試料の効率を求めた。 γ 線のエネルギーに対する効率の変化は、両対数のグラフではほぼ直線になることが知られており¹⁾、130 keV 以上のエネルギーをもつ他の核種の容積試料の効率の推定が可能であった。容積試料のピーク効率の決定には種々の計算法が提案されており^{8,9)}、今回の結果の精度の確認と130 keV 以下のエネルギーに対するピーク効率の決定のために、さらに検討する必要がある。

謝 辞

本研究にご協力頂いた、放射線技術科第14期生の橋口志津香さん、又木千穂さん、野山正利君、第15期生の小野勇君、荷川取健君、第16期生の富山朋和君、平嶋良一君に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 科学技術庁編：ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー．日本分析センター，(1991)
- 2) セイコー EG & G 株式会社編：定性・定量分析プログラム取り扱い説明書．セイコー EG & G 株式会社，(1988)
- 3) 静間 清，深見健司，手島和範，岩谷和夫，葉佐井博巳：低バックグラウンド井戸型 Ge 検出器の遮蔽とバックグラウンド特性．RADIOISOTOPES, **38**, 516—519, (1989)
- 4) 広瀬妙子，佐藤 純，佐藤和郎：新しい鉄材を遮蔽に用いたガンマ線スペクトロメータ．RADIOISOTOPES, **28**, 163—165, (1979)
- 5) 左合 勉，五十棲泰人：ゲルマニウム半導体スペクトロメータの γ 線バックグラウンドスペクトルに対する空气中ラドンの影響とその低減方法．RADIOISOTOPES, **36**, 70—73, (1987)
- 6) 櫻井次郎，小村和久：Ge (Li) 検出器のバックグラウンドの経年変化．RADIOISOTOPES, **30**, 471—474, (1981)
- 7) Heusser, G : The Background Components of Germanium Low-Level Spectrometers. Nucl. Instr. Methods, Phys. Res. B **17**, 418—423, (1986)
- 8) 中村尚司，大久保徹，林 剛：容積試料に対する高純度ゲルマニウム検出器のピーク検出効率の評価．RADIOISOTOPES, **32**, 595—601, (1983)
- 9) 高野直人：ゲルマニウム半導体検出器の半実験的な効率計算．RADIOISOTOPES, **36**, 379—383, (1987)

