

JAERI-M

6 5 5 5

コンプトン・シールドNaI(Tl)検出器を用いたアンチ  
コンプトン型Ge(Li) $\gamma$ 線スペクトロメータの製作と  
その低レベル計測への応用

1976年5月

東條 隆夫・近藤 真

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、複製などのお問合せは、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.

コンプトン・シールド NaI (Tl) 検出器を用いた  
アンチコンプトン型 Ge(Li)  $\gamma$  線スペクトロメータ  
の製作とその低レベル計測への応用

日本原子力研究所ラジオアイソトープ・原子炉研修所  
東條 隆夫 ・ 近藤 真

( 1 9 7 6 年 4 月 2 8 日受理 )

低レベルの  $\gamma$  放射性核種および集束  $\gamma$  線を用いた高レベル線源の核種分析を目的として、アンチコンプトン NaI (Tl) 検出器を用いたコンプトン・スペクトル抑制型 Ge (Li)  $\gamma$  線スペクトロメータが製作された。

検出部は 2 keV の FWHM と 10 % の相対効率を有する Ge (Li) 検出器と, 8 in. dia.  $\times$  8 in. long のアニュラス型および 3 in. dia.  $\times$  3 in. long のアンチコンプトン NaI (Tl) 検出器によって構成されている。

$^{137}\text{Cs}$  および  $^{64}\text{Mn}$  のような単一エネルギー  $\gamma$  放射性核種の点線源に対するコンプトン・スペクトル抑制因子としては最大 4 以上の値が得られた。自然バックグラウンドの連続スペクトル部のレベルは、アンチコンプトン型で動作させたことにより通常の方法における値の 43 % (最大値) に低減させることができた。 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  および  $^{144}\text{Ce}$  に対する検出可能な最小の壊変率としては、それぞれ 5.8, 17.1 および 33.5 dpm が 50 % 誤差で 1000 分間計測の場合に得られた。このことから、250 g の土壤試料を 1000 分間計測して得られる検出可能な最小の比放射能は、10 % 誤差の場合、 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  および  $^{144}\text{Ce}$  に対してそれぞれ 74 fCi/g, 240 fCi/g および 820 fCi/g であることが明らかになった。

Construction of an Anticompton Ge(Li) Gamma-Ray Spectrometer  
with Compton Shield NaI(Tl) Scintillators and its Applications  
to Low-Level Counting

Takao TOJO and Makoto KONDO

Radioisotope and Nuclear Engineering School, JAERI

(Received April 28 ,1976)

A Compton suppressed Ge(Li) gamma-ray spectrometer using anticompton NaI(Tl) scintillation detectors has been constructed to measure low-level radioactive samples and also to measure highly active samples by detecting the collimated gamma-rays.

The detector system consists of a coaxial Ge(Li) detector having 2keV FWHM and 19% relative efficiency, and anticompton NaI(Tl) detectors. The latter is composed of an annulus NaI(Tl) crystal, 8in.dia. x 8in.long, and a plug NaI(Tl) crystal, 3in.dia. x 3in.thick. For point sources of single gamma-ray emitters such as  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{54}\text{Mn}$ , the Compton suppression factor greater than 4 is obtained at maximum. Continuum natural background levels measured in the anticompton mode can be reduced to 43% of that measured in the normal mode. The minimum detectable disintegration rates of the spectrometer for  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{144}\text{Ce}$  are 5.8, 17.1 and 33.5 dpm, respectively, in 1000 min counting under threshold condition of 50% error. The lowest detectable specific activities per gram of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{144}\text{Ce}$  in 250g soil sample counting are 74 fCi/g, 240 fCi/g and 820 fCi/g, respectively, with precision of 10%.

## 目 次

1. 序	1
2. 機器の構成	1
2.1 検出部の構成	1
2.2 回路構成	2
3. 特性測定	3
3.1 Ge (Li) 検出器の特性	3
3.1.1 エネルギー分解能	3
3.1.2 検出効率	3
3.1.3 Ge (Li) 結晶の i 層領域	4
3.1.4 パルス波高の Ge (Li) 結晶内位置依存性	4
3.1.5 パルス波高分布の Ge (Li) 結晶内位置による変化	5
3.2 NaI (Tl) 検出系の特性	5
3.3 Ge (Li)-NaI (Tl) 検出系の時間分布	6
3.4 各種回路の出力パルス特性およびタイミング	6
4. アンチコンプトン型Ge (Li) $\gamma$ 線スペクトロメータの特性	7
4.1 薄い点線源をアンチコンプトンNaI (Tl) 検出器の内部に置いた場合の コンプトン・スペクトル抑制効果	7
4.2 体積線源をアンチコンプトンNaI (Tl) 検出器の内部に置いた場合の コンプトン・スペクトル抑制効果	8
4.3 線源をアンチコンプトンNaI (Tl) 検出器の外部に置いた場合のコンプトン ・スペクトル抑制効果	9
5. 各種試料測定への応用	10
5.1 自然バックグラウンドの測定	10
5.2 松葉試料の測定	11
5.3 二枚貝試料の測定	11
5.4 土壤試料の測定	12
6. スペクトロメータの検出感度	12
7. 結論	15
謝 辞	16
参考文献	17

## 1. 序

原子力利用の普及に伴い、原子力利用の環境に及ぼす影響の調査・研究の重要性が今日強く認識され、今後もその重要性を増していくものと考えられる。

環境中の種々な物質に含まれている微量な放射性核種の分析技術やそれによって得られた知見は環境保全を計り、または保全技術の開発を捉すために基本的に重要である。

今日では、微弱な $\gamma$ 放射性核種分析には高エネルギー分解能を有するGe(Li)検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメータが一般的に利用されている。スペクトロメータの検出感度の向上には、自然バックグラウンドおよびコンプトン・バックグラウンドの低減化が基本的に重要であり、これを積極的に行うため、アンチコインシデンス回路を利用したアンチコンプトン型 $\gamma$ 線スペクトロメータが微弱な核種分析の場合に特によく用いられている。このようなアンチコンプトン型 $\gamma$ 線スペクトロメータは環境<sup>1)～8)</sup> や生物学的分野<sup>7, 9)</sup>のみならず、放射化学分析<sup>10～13)</sup>、放射化分析<sup>14)</sup>、(n,  $\gamma$ )反応の研究目的で核物理<sup>15, 16)</sup> およびその他 $\gamma$ 線スペクトロスコピーを行う種々な分野<sup>17～20)</sup>においても使用されている。

アンチコンプトン・スペクトロメータにおけるアンチコンプトン（コンプトン・シールド）検出器としては、NaI(Tl)結晶<sup>1～4, 7, 13～15, 17, 19, 20)</sup><sup>1, 6, 16)</sup> を利用したものが多いが、プラスチック蛍光体や液体蛍光体<sup>5)</sup>を使ったものもある。

また、これらの中には $\gamma$ - $\gamma$ 相関やダブル・エスケープ・ピークの測定など、多結晶スペクトロメータとしての応用が可能なように、アンチコインシデンスのみならず、コインシデンス・スペクトロメータとしての活用をも当初より企図したものもある<sup>11, 14, 15, 17, 18, 21)</sup>。

一方、Ge(Li)検出器のみを使用したサム・コインシデンス方式のアンチコンプトン・スペクトロメータも試みられているが、検出効率およびエネルギー分解能が低下するため、微弱放射能測定には利用し難い。

ここでは、微量な $\gamma$ 放射性核種分析と集束 $\gamma$ 線測定に基づく、複雑なエネルギー・スペクトルと比較的強い強度を有する線源の核種分析を目的として、Ge(Li)検出器とアニュラス型アンチコンプトンNaI(Tl)検出器を用いたコンプトン・スペクトル抑制型 $\gamma$ 線スペクトロメータを試作し、その諸特性の測定と低レベル試料測定への応用を試みた。

## 2. 機器の構成

### 2.1 検出部の構成

検出部の構成を第1図に示す。同図に示されているGe(Li)検出器はエネルギー分析用検出器として、NaI(Tl)検出器はアンチコンプトン（コンプトン・シールド）用検出器として用いた。NaI(Tl)検出器系はHarshaw社製の8 in. dia. × 8 in. long のアニュラス型NaI(Tl)およびこのNaI(Tl)に同軸状に設けられた貫通孔を蓋する形で使用する3 in. dia. × 3 in. height のプラグ用NaI(Tl)（堀場製作所製）の2つから成立っている。

## 1. 序

原子力利用の普及に伴い、原子力利用の環境に及ぼす影響の調査・研究の重要性が今日強く認識され、今後もその重要性を増していくものと考えられる。

環境中の種々な物質に含まれている微量な放射性核種の分析技術やそれによって得られた知見は環境保全を計り、または保全技術の開発を捉すために基本的に重要である。

今日では、微弱な $\gamma$ 放射性核種分析には高エネルギー分解能を有するGe(Li)検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメータが一般的に利用されている。スペクトロメータの検出感度の向上には、自然バックグラウンドおよびコンプトン・バックグラウンドの低減化が基本的に重要であり、これを積極的に行うため、アンチコインシデンス回路を利用したアンチコンプトン型 $\gamma$ 線スペクトロメータが微弱な核種分析の場合に特によく用いられている。このようなアンチコンプトン型 $\gamma$ 線スペクトロメータは環境<sup>1)～8)</sup>や生物学的分野<sup>7, 9)</sup>のみならず、放射化学分析<sup>10～13)</sup>、放射化分析<sup>14)</sup>、(n,  $\gamma$ )反応の研究目的で核物理<sup>15, 16)</sup>およびその他 $\gamma$ 線スペクトロスコピーを行う種々な分野<sup>17～20)</sup>においても使用されている。

アンチコンプトン・スペクトロメータにおけるアンチコンプトン（コンプトン・シールド）検出器としては、NaI(Tl)結晶<sup>1～4, 7, 13～15, 17, 19, 20)</sup><sup>1, 6, 16)</sup>を利用したものが多いが、プラスチック蛍光体や液体蛍光体<sup>5)</sup>を使ったものもある。

また、これらの中には $\gamma$ - $\gamma$ 相関やダブル・エスケープ・ピークの測定など、多結晶スペクトロメータとしての応用が可能のように、アンチコインシデンスのみならず、コインシデンス・スペクトロメータとしての活用をも当初より企図したものもある<sup>11, 14, 15, 17, 18, 21)</sup>。

一方、Ge(Li)検出器のみを使用したサム・コインシデンス方式のアンチコンプトン・スペクトロメータも試みられているが、検出効率およびエネルギー分解能が低下するため、微弱放射能測定には利用し難い。

ここでは、微量な $\gamma$ 放射性核種分析と集束 $\gamma$ 線測定に基づく、複雑なエネルギー・スペクトルと比較的強い強度を有する線源の核種分析を目的として、Ge(Li)検出器とアニュラス型アンチコンプトンNaI(Tl)検出器を用いたコンプトン・スペクトル抑制型 $\gamma$ 線スペクトロメータを試作し、その諸特性の測定と低レベル試料測定への応用を試みた。

## 2. 機器の構成

### 2.1 検出部の構成

検出部の構成を第1図に示す。同図に示されているGe(Li)検出器はエネルギー分析用検出器として、NaI(Tl)検出器はアンチコンプトン（コンプトン・シールド）用検出器として用いた。NaI(Tl)検出器系はHarshaw社製の8 in. dia. × 8 in. long のアニュラス型NaI(Tl)およびこのNaI(Tl)に同軸状に設けられた貫通孔を蓋する形で使用する3 in. dia. × 3 in. height のプラグ用NaI(Tl)（堀場製作所製）の2つから成立っている。

Ge(Li) 検出器は Canberra 社製の真の同軸型であり、その仕様を第 1 表に示す。

Ge(Li) 結晶はその有感長さの中心がアニュラス型 NaI(Tl) 結晶の有感長さの中心にそれぞれの軸を共有する形で一致するように配置した。この際、それぞれの検出器の有感長さは実験結果に基づいて定められた。

NaI(Tl) 検出器系の仕様を第 2 表に示す。

アニュラス型 NaI はルーサイト製の保持具で固定され、その側面は 10 cm 厚の鉛遮蔽体で覆われているが、光電子増倍管が装着されている側では、NaI 端面より 13 cm 離れた位置でこの遮蔽体は開放状態になっている。プラグ用 NaI(Tl) 検出器部の側面は 20 cm の鉛遮蔽で覆われている。鉛遮蔽体の内面は鉛の特性 X 線の低減を計るため、銅およびカドミウム板によって内張されている。

測定試料はプラグ用 NaI(Tl) 検出器を引抜くことによって交換するように設計されている。

アニュラス型 NaI(Tl) 結晶はその軸に沿って 2 等分され、光学的に遮蔽されたそれには 3 本の RCA 8053 型光電子増倍管が装着されており、多結晶スペクトロメータなどへの応用が可能なように配慮されている。

## 2. 2 回路構成

ここで用いたアンチコインシデンス回路を用いたアンチコンプトン型  $\gamma$  線スペクトロメータ回路部のブロックダイヤグラムを第 2 図に示す。

Ge(Li) 検出器からの出力パルスは Canberra 社製 9701C 型前置増幅器を通して、ORTEC 社製 452 型スペクトロスコピー用比例増幅器に導かれる。その出力の一方は ORTEC 社製 455 型 コンスタント・フラクション式のシングル・チャネル波高分析器に導かれてパルス波高の弁別が行われる。このシングル・チャネル波高分析器の出力は ORTEC 社製 414A 型ファスト・アンチコインシデンス回路のコインシデンス入力パルスとして用いられる。また、452 型の他方のリニア・パルスは分析されるべきパルスとして Nuclear Data 社製の多重波高分析器（チャネル容量：2048）の入力部に供給される。

NaI(Tl) 検出器系からの出力パルスは東京原子工業社製の S-477 型サム回路において 1 つのパルスに合成され、その出力パルスは ORTEC 社製 410 型マルチモード用比例増幅器に導かれる。その出力パルスは 455 型波高分析器で弁別される。この波高分析器の出力は 414A 型アンチコインシデンス回路のアンチゲート・パルスとして用いられ、NaI(Tl) 検出器系と同時に発生した Ge(Li) 検出器の出力ロジック・パルスをブロックする役目を果たす。

Ge(Li) 検出器にパルスが発生しても、NaI(Tl) 検出器系に同時にパルスが発生した場合、414A 型回路には出力パルスは発生しない。414A 型回路の出力パルスはコインシデンス・モードで作動するように設定された多重波高分析器のコインシデンス・ゲート・パルスを発生させるために用いられているので、このパルスが同時に存在しない場合の多重波高分析器の入力パルスは分析・記録されない。換言すれば、NaI(Tl) 検出器系に同時にパルスが発生しなかった場合の Ge(Li) 検出器出力パルスのみが多重波高分析器で分析・記録されることになる。

414A 型回路に後続する ORTEC 社製 416A 型ゲート・ディレイ・パルス発生回路は、414A 型出力パルス波形を多重波高分析器入力パルス波形に適したゲート・パルスに整形する波形回路とともに、リニア・パルスと同時性を確保するためのゲート・パルス遅延回路の 2 つの役割を果している。

Ge (Li) 検出器のバイアス電源としては ORTEC 社製 459 型 ( $\pm 5$  kV 最大) が、 NaI (Tl) 検出器系用の高圧電源としては Fluke 社製 415B 型 ( $\pm 3$  kV 最大) が用いられた。

415B 型の出力は S-477 型回路に付属した直流電圧分岐・調節回路に供給され、適当な電圧に微調整された後、それぞれの光電子増倍管に供給されるように設計されている。

### 3. 特性測定

#### 3.1 Ge (Li) 検出器の特性

##### 3.1.1 エネルギー分解能

$^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{152}\text{Eu}$  などの線源を用いて Full Width at Half Maximum (FWHM) の  $\gamma$  線エネルギー依存性を測定し、その結果を第 3 図に示す。

1332 keV の  $\gamma$  線に対する FWHM としては 2.17 keV, FWTM (Full Width at Tenth Maximum) としては 4.14 keV, パルサ・レゾリューション (FWHM) としては 1.31 keV が波形整形時定数  $2 \mu\text{sec}$  で得られた。パルサとしては東京原子工業社製の精密級の 715-2 型水銀パルス発振回路を使用した。

この結果、1332 keV  $\gamma$  線に対する Ge (Li) 検出器自身の FWHM としては 1.73 keV が得られた。

第 3 図に示されている FWHM の  $\gamma$  線エネルギー依存性の傾向は、 $\gamma$  線エネルギーの増加に伴う FWHM の急激な増加傾向を示さず、Ge (Li) 検出器自身の FWHM が大略  $\gamma$  線エネルギーの平方根に比例する傾向を示している。一方、FWTM が FWHM の 2 倍以下の値を示していることは、全エネルギー吸収ピークのパルス波高分布はテイリングの少ない、ほぼ左右対称な良好な分布であることを示している。これらの点から、この Ge (Li) 検出器の結晶の品質の均一性、電荷収集効率、 $p$  および  $n$  層との境界領域における  $i$  層の状態、などが比較的良好であることが明らかになっている。

##### 3.1.2 検出効率

$^{60}\text{Co}$  点線源を用いた 3 in. dia.  $\times$  3 in. height の NaI (Tl) に対する相対的 2.5 cm 効率としては、第 1 表に示されている仕様書値に一致する結果が得られた。この際、NaI (Tl) に対する 1332 keV  $\gamma$  線に対する絶対 2.5 cm 効率としては、R. L. Heath による値、 $1.2 \times 10^{-3}$ <sup>26)</sup> を用いた。

実用的な検出効率としては、点線源に対する絶対全エネルギー吸収ピーク効率としての 5 cm 効率および体積線源の 0 cm 効率を  $\gamma$  線エネルギーの関数として測定し、それらの結果を第 4 図に示す。

点線源 5 cm 効率の測定においては、 $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  標準線源および相対効率測定用に  $^{66}\text{Co}$  線源が用いられた。これらの線源においては自己吸収が無視できるように、アルミニウム薄板またはプラスチック・フィルムでサンドイッチした線源を用い、特に低エネルギー領域用に用いた  $^{75}\text{Se}$  においては約 7 mg/cm<sup>2</sup> のプラスチック・フィルムに標準溶液を滴下・乾燥させた線源を使用した。

体積線源の線源容器としては、上部内径 5.8 mm (底部: 5.5 mm), 深さ 3.2 mm の密閉可能なプラスチック製容器 (肉厚: 1 mm) を用いた。線源としては、 $^{75}\text{Se}$  および  $^{66}\text{Co}$  を海岸砂および水中に均一に混合させたものを用いた。

砂線源の放射能濃度の均一性としては、一定量の砂を抽出した試料の比放射能測定の結果、4.5%

Ge (Li) 検出器のバイアス電源としては ORTEC 社製 459 型 (±5 kV 最大) が、 NaI (Tl) 検出器系用の高圧電源としては Fluke 社製 415B 型 (±3 kV 最大) が用いられた。

415B 型の出力は S-477 型回路に付属した直流電圧分岐・調節回路に供給され、適当な電圧に微調整された後、それぞれの光電子増倍管に供給されるように設計されている。

### 3. 特性測定

#### 3.1 Ge (Li) 検出器の特性

##### 3.1.1 エネルギー分解能

$^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{152}\text{Eu}$  などの線源を用いて Full Width at Half Maximum (FWHM) の  $\gamma$  線エネルギー依存性を測定し、その結果を第 3 図に示す。

1332 keV の  $\gamma$  線に対する FWHM としては 2.17 keV, FWTM (Full Width at Tenth Maximum) としては 4.14 keV, パルサ・レゾリューション (FWHM) としては 1.31 keV が波形整形時定数  $2 \mu\text{sec}$  で得られた。パルサとしては東京原子工業社製の精密級の 715-2 型水銀パルス発振回路を使用した。

この結果、1332 keV  $\gamma$  線に対する Ge (Li) 検出器自身の FWHM としては 1.73 keV が得られた。

第 3 図に示されている FWHM の  $\gamma$  線エネルギー依存性の傾向は、 $\gamma$  線エネルギーの増加に伴う FWHM の急激な増加傾向を示さず、Ge (Li) 検出器自身の FWHM が大略  $\gamma$  線エネルギーの平方根に比例する傾向を示している。一方、FWTM が FWHM の 2 倍以下の値を示していることは、全エネルギー吸収ピークのパルス波高分布はテイリングの少ない、ほぼ左右対称な良好な分布であることを示している。これらの点から、この Ge (Li) 検出器の結晶の品質の均一性、電荷収集効率、 $p$  および  $n$  層との境界領域における  $i$  層の状態、などが比較的良好であることが明らかになっている。

##### 3.1.2 検出効率

$^{60}\text{Co}$  点線源を用いた 3 in. dia.  $\times$  3 in. height の NaI (Tl) に対する相対的 25 cm 効率としては、第 1 表に示されている仕様書値に一致する結果が得られた。この際、NaI (Tl) に対する 1332 keV  $\gamma$  線に対する絶対 25 cm 効率としては、R. L. Heath による値、 $1.2 \times 10^{-3}$ <sup>26)</sup> を用いた。

実用的な検出効率としては、点線源に対する絶対全エネルギー吸収ピーク効率としての 5 cm 効率および体積線源の 0 cm 効率を  $\gamma$  線エネルギーの関数として測定し、それらの結果を第 4 図に示す。

点線源 5 cm 効率の測定においては、 $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  標準線源および相対効率測定用に  $^{66}\text{Co}$  線源が用いられた。これらの線源においては自己吸収が無視できるように、アルミニウム薄板またはプラスチック・フィルムでサンドイッチした線源を用い、特に低エネルギー領域用に用いた  $^{75}\text{Se}$  においては約 7 mg/cm<sup>2</sup> のプラスチック・フィルムに標準溶液を滴下・乾燥させた線源を使用した。

体積線源の線源容器としては、上部内径 5.8 mm (底部: 5.5 mm), 深さ 3.2 mm の密閉可能なプラスチック製容器 (肉厚: 1 mm) を用いた。線源としては、 $^{75}\text{Se}$  および  $^{66}\text{Co}$  を海岸砂および水中に均一に混合させたものを用いた。

砂線源の放射能濃度の均一性としては、一定量の砂を抽出した試料の比放射能測定の結果、4.5%

の標準偏差が得られた。

体積線源はGe(Li)検出器入射窓に密着させた状態で効率の測定が行われた。

第4図の点線源に対する結果は、250 keV以下のエネルギーの $\gamma$ 線に対して入射窓の吸収効果が現れはじめ、150 keVで最大の効率を示した後、かなり急激に効率が減少することを表わしている。 $^{60}\text{Co}$ の1332 keVおよび $^{137}\text{Cs}$ の661 keV $\gamma$ 線に対してはそれぞれ $9.8 \times 10^{-4}$ および $2.1 \times 10^{-3}$ の5 cm効率が得られている。

砂および水の混合線源に対しては350 keV以上のエネルギー領域においては自己吸収の効果を無視することができ、両者の線源に対して同一の効率曲線を使用することができる。また、両線源とも150 keVにおいて最大の効率を示すが、砂線源の自己吸収は水線源に比べて大きいため、150 keVにおける砂線源の効率は水線源より17%低くなっている。

1332 keVおよび661 keVの $\gamma$ 線に対する効率としてはそれぞれ $2.3 \times 10^{-3}$ および $4.8 \times 10^{-3}$ が得られている。

### 3.1.3 Ge(Li)結晶のi層領域

集束 $\gamma$ 線の測定の際などに役立てるため、Ge(Li)結晶のi層領域の寸法および結晶の真空ハウジング内におけるマウント位置を明確にする測定を行った。集束 $\gamma$ 線をGe(Li)結晶に照射するためには、直径2mm、長さ20cmの貫通孔を有する鉛製のコリメータが、線源としては約10mCiの $^{137}\text{Cs}$ が用いられた。

この測定はエンド・キャップ前面の中心を通る半径方向およびハウジングの軸に沿った長さ方向に集束 $\gamma$ 線を走査し、それぞれの位置における661 keV $\gamma$ 線の全エネルギー吸収ピークの計数率を求める方法で行った。

第5～6図に示した結果は、半径方向および軸方向に集束 $\gamma$ 線を走査させて測定した各位置における全エネルギー吸収ピークの相対的計数率（相対効率）をそれぞれ示している。

第5図の結果からは、計数率が $1/2$ に減少する位置をi層の境界とするならば、i層の厚さは15mm、p芯の直径は8.3mmであり、仕様書値の16mmおよび8mmとほぼ一致することが明らかになっている。また、p芯の軸はエンド・キャップ前面に向って右側に約2mmずれていることも示されている。

第6図から、Ge(Li)結晶の有感面はハウジング前面より17mm後方にあり、有感長は39mmであることが明らかになっている。この結果は、第1表の仕様書値より9mm後方にずれ、有感長さは結晶の長さより7mm短くなっていることを示している。

### 3.1.4 パルス波高のGe(Li)結晶内位置依存性

前項の測定において同時に測定した661 keVの $\gamma$ 線の全エネルギー吸収ピークのパルス波高のGe(Li)結晶内位置依存性の結果を第7～8図に示す。

第7図の結果は半径方向について測定したものである。

同図で最も高いパルス波高を有しているのは図における左右のi層ともその中間厚さの位置(+14.5mm, -9mm)においてであり、それらの波高値には明確な有意差は認められ難い。

また、検出効率が $1/2$ になるp芯側の各位置の波高値も左右で等しい値を有し、それらの値は最大波高値に比べ0.06%減少することが明らかになっている。

第8図は軸方向について測定したものであり、ここでは検出効率が $1/2$ を超える有感領域において

は、ほぼ一定の波高値が得られている。

i層の境界付近におけるパルス波高の減少は補償領域の不完全性に基因するものと考えられる。

### 3.1.5 パルス波高分布のGe(Li)結晶内位置による変化

Ge(Li)結晶の代表的な位置に<sup>137</sup>Cs(661keV)線源からの集束γ線を照射して測定したパルス波高分布を第9～10図に示す。

第9図は半径方向の代表的な各位置(第5図において星印で示されている)におけるパルス波高分布である。

同図中Case 1として示されている最も検出効率が高いi層の中間位置およびCase 2の検出効率が最大値の1/2になる位置のピーク/コンプトン・エッジ( $P/C \cdot E$ )はそれぞれ48および32となり、中間位置でコンプトン・スペクトルが最も低減する当然の結果が明らかになっている。また、Case 3のp芯の中心位置においては、全エネルギー吸収ピークは遮蔽体からの漏えいγ線程度しか確認されていない。

第10図は軸方向の各位置、最大検出効率を示す位置(Case 1)、有感長の中間位置(Case 2)および最大値の1/2の検出効率を有する位置(Case 3)におけるパルス波高分布を示している。Case 1, Case 2およびCase 3の $P/C \cdot E$ はそれぞれ45, 43および25を示し、この場合でも最大検出効率を有する位置のコンプトン・スペクトルが最も低減化されていることが明らかになっている。ピーク/コンプトンおよびピーク/谷についてはCase 1が最大で、Case 3が最小の値を示している。

### 3.2 NaI(Tl)検出器系の特性

アニラス型NaI(Tl)検出器の光電子増倍管のそれぞれに800Vの電圧を印加し、<sup>137</sup>Cs線源をアニラス部の中心に置き、各光電子増倍管の出力パルスを分析する方法でそれぞれの感度を測定した結果を第3表に示す。

同表は光電子増倍管自身の感度および結晶に装着された位置によって変化する集光効率などの総合結果を表わしている。この表から、最低感度の光電子増倍管は最高感度のそれの14%であり、感度に大きな差があることがわかる。この差の主たる原因としては、光学的遮蔽体に接近して装着されている1, 3, 4, 6番の感度が全体として高く、遮蔽体間の中間に位置する2, 5番の感度が低く測定されている点から、遮蔽体が光学的反射体としても働くことによる集光効率の装着位置による変化が考えられる。

以上のような感度のばらつきの調整は、S-477型の電圧調整回路による印加電圧の調節により行い、±1%の範囲内で感度を一致させた。プラグNaI(Tl)検出器の出力パルス波高もアニラス型NaI(Tl)検出器のサム回路出力に一致させた。

第11～12図に<sup>137</sup>Csおよび<sup>60</sup>Co線源を用いた場合のNaI(Tl)検出器系のパルス波高分布を示す。これらの線源は3.1.2で用いたものと同じ砂の体積線源であり、線源距離としては0cmが用いられた。

第11図はアニラス型およびプラグNaI(Tl)検出器の661keVγ線に対する相対的FWHMは、それぞれ12.1%（これにはプラグNaIの寄与があり、アニラス型のみでは11.7%）および8.0%であることを示している。

第12図にNaI(Tl)検出器の<sup>60</sup>Co線源に対するパルス波高分布を示す。同図には2505keVの顕著なサム・ピークの発生が観測され、その相対的FWHMとして7.2%が得られている。また、1173と1332keVピークの間の谷部の計数率はピーク値の1/2を超えた結果になっている。

第13図はアニュラス型NaI(Tl)検出器の<sup>137</sup>Cs線源からの661keVγ線に対するピーク・トウ・トータル比および全エネルギー吸収ピーク効率のNaI(Tl)結晶の位置による変化を示している。この測定においては、<sup>137</sup>Cs点線源(0.50μCi±3%)をアニュラスNaI(Tl)結晶の軸上を移動させた。

第13図から、このNaI(Tl)結晶の最高検出効率を示す位置、すなわち中心は結晶ハウジングの前面より11cm後方の軸上にあることを示しており、この結果はHarshaw社の製作承認図面と一致した。また、検出効率は27%から57%まで、ピーク・トウ・トータル比は0.56から0.7まで変化することが明らかになった。

### 3.3 Ge(Li)-NaI(Tl)検出器系の時間分布

Ge(Li)およびアニュラス型NaI(Tl)検出器の有感長さの中心を互いに一致させた状態(プラグNaIも使用)に配置し、砂の体積<sup>60</sup>Co線源の線源距離0cmにおいて、この検出器系の時間分布の測定を行った。

スタート・パルスにはNaI(Tl)検出器の出力パルスを、ストップ・パルスにはGe(Li)検出器の出力パルスを用いた。

時間-波高変換回路にはORTEC社製437型を、時間対波高値の較正にはORTEC社製425型ナノセック遅延回路を用いた。Ge(Li)およびNaI(Tl)両系のシングル・チャネル波高分析器は実際のアンチコントラクトロメータの使用条件に即して、インテグラル・モードで使用し、その弁別レベルは全エネルギー吸収ピークの波高値に対して、Ge(Li), NaI(Tl)両系とも約6%とした。

第14図に時間分布の測定結果を示す。同図から時間分解能は、FWHMで109nsec, FWTMで238nsecであることが明らかになっている。

### 3.4 各種回路の出力パルス特性およびタイミング

第15aおよびb図にGe(Li)およびNaI(Tl)検出器で<sup>137</sup>Cs線源のγ線を検出した場合の比例主増幅器出力パルスを示す。Ge(Li)系の比例増幅器の波形整形時定数は2μsecであり、リニア・パルスには単極性パルスを、ロジック・パルス用には双極性パルスを用いた。

NaI(Tl)系の比例増幅器の積分時定数は0.5μsecであり、微分時定数は第1段が0.8μsec、第2段が2μsecである。

第15a図はGe(Li)の単極性出力パルス幅は5.2μsec, b図の双極性パルスのそれは0.6μsecであることを示している。

NaI(Tl)系の波高分析器の出力パルス幅はアンチコインシデンスのゲート・パルス時間幅となるため重要である。この時間幅はコンプトン・パルスを効率よくブロックするためにはロジック・パルス相互間の時間的ゆらぎを考慮して十分長くする必要があり、偶然の同時パルスによってGe(Li)系の全エネルギー吸収パルスが除去される確率を最少にするためには十分短かくする必要がある。一

方、第14図の時間分布の測定結果は、殆んど全ての同時パルスを除去するためのアンチゲート・パルスの時間幅が460 nsecである。換言すれば、このアンチゲート・パルス幅は殆んど全てのコンプトン・パルスを除去するに必要な最小の時間幅であることを示している。これらの理由から、この時間幅にはほぼ等しい490 nsecのパルス幅を有するNaI(Tl)系の波高分析器の出力パルスがそのままアンチゲート・パルスとして用いられた。

多重波高分析器のコインシデンス・ゲート・パルス幅は第15a図に示したリニア・パルスのパルス幅および多重波高分析器の入力パルス波形特性を考慮して3~4 μsecが適当と判断される。

アンチコインシデンス部およびコインシデンス部のタイミングの調整は、前者にあってはアンチコインシデンス出力パルス率が最小になるように、後者にあっては、全エネルギー吸収ピークの波高値が最も大きく、かつ遅延時間の微少な変化に対して安定になるように行われた。

#### 4. アンチコンプトン型Ge(Li) $\gamma$ 線スペクトロメータの特性

ここで組立てたアンチコンプトン型Ge(Li) $\gamma$ 線スペクトロメータのコンプトン・スペクトル抑制効果を測定した。コンプトン抑制効果は線源をアニュラス型NaI(Tl)検出器の内部に置いた場合と外部に置いた場合の両方について測定した。線源を内部に置いた場合においては、薄い点線源と砂の体積線源の両方について測定を行った。

##### 4.1 薄い点線源をアンチコンプトンNaI(Tl)検出器の内部に置いた場合のコンプトン・スペクトル抑制効果

$\gamma$ 線源としては、7 mg/cm<sup>2</sup>のプラスチック・フィルムでサンドイッチした点状の<sup>137</sup>Cs(約260 nCi), <sup>54</sup>Mn(約570 nCi), <sup>60</sup>Co(約160 nCi)および<sup>22</sup>Na(約160 nCi)を用いた。これらの線源をプラグNaI(Tl)検出器前面の中心に固定(線源距離:約6 cm)し、それぞれの線源について測定したシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルの比較を第16~19図に示す。これらの結果は、壊変に伴い1個またはそれ以下の $\gamma$ 線が放出される単一エネルギー $\gamma$ 線源に対するものである。

第16図は<sup>137</sup>Cs線源について測定した結果である。

同図から、661 keV $\gamma$ 線に対するアンチコンプトン・スペクトルのP/C·Eはシングルの場合の43から117に2.7倍改善されたことを示している。また、最も低い計数値を示す部分のコンプトン・スペクトルの平均計数値に対するピークの最大計数値の比、P/C·Mはコンプトン・スペクトル抑制効果により52から220に、すなわち4.2倍改善されていることが明らかになっている。一方、コンプトン端エネルギーE<sub>c</sub>の0.75E<sub>c</sub>(第16図では950チャネルに相当する)から0.80E<sub>c</sub>(1020チャネル)領域の平均計数値に対するピークの最大計数値の比として定義<sup>27)</sup>されるピーク/コンプトン(P/C)は、第16図から明らかなように、ほぼP/C·Mの値と一致する。一方、後方散乱のエネルギー領域(500チャネル近傍)のコンプトン・スペクトルの改善度が幾分悪化しているのはプラグNaI(Tl)検出器による後方散乱の寄与によるものと考えられる。

また、第16図の両スペクトルのピーク面積の比較においては統計的に有意な差は認められ難い結

方、第14図の時間分布の測定結果は、殆んど全ての同時パルスを除去するためのアンチゲート・パルスの時間幅が460 nsecである、換言すれば、このアンチゲート・パルス幅は殆んど全てのコンプトン・パルスを除去するに必要な最小の時間幅であることを示している。これらの理由から、この時間幅にはほぼ等しい490 nsecのパルス幅を有するNaI(Tl)系の波高分析器の出力パルスがそのままアンチゲート・パルスとして用いられた。

多重波高分析器のコインシデンス・ゲート・パルス幅は第15a図に示したリニア・パルスのパルス幅および多重波高分析器の入力パルス波形特性を考慮して3~4 μsecが適当と判断される。

アンチコインシデンス部およびコインシデンス部のタイミングの調整は、前者にあってはアンチコインシデンス出力パルス率が最小になるように、後者にあっては、全エネルギー吸収ピークの波高値が最も大きく、かつ遅延時間の微少な変化に対して安定になるように行われた。

#### 4. アンチコンプトン型Ge(Li) $\gamma$ 線スペクトロメータの特性

ここで組立てたアンチコンプトン型Ge(Li) $\gamma$ 線スペクトロメータのコンプトン・スペクトル抑制効果を測定した。コンプトン抑制効果は線源をアニュラス型NaI(Tl)検出器の内部に置いた場合と外部に置いた場合の両方について測定した。線源を内部に置いた場合においては、薄い点線源と砂の体積線源の両方について測定を行った。

##### 4.1 薄い点線源をアンチコンプトンNaI(Tl)検出器の内部に置いた場合のコンプトン・スペクトル抑制効果

$\gamma$ 線源としては、7 mg/cm<sup>2</sup>のプラスチック・フィルムでサンドイッチした点状の<sup>137</sup>Cs(約260 nCi), <sup>54</sup>Mn(約570 nCi), <sup>60</sup>Co(約160 nCi)および<sup>22</sup>Na(約160 nCi)を用いた。これらの線源をプラグNaI(Tl)検出器前面の中心に固定(線源距離:約6 cm)し、それぞれの線源について測定したシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルの比較を第16~19図に示す。これらの結果は、壊変に伴い1個またはそれ以下の $\gamma$ 線が放出される単一エネルギー $\gamma$ 線源に対するものである。

第16図は<sup>137</sup>Cs線源について測定した結果である。

同図から、661 keV $\gamma$ 線に対するアンチコンプトン・スペクトルのP/C·Eはシングルの場合の43から117に2.7倍改善されたことを示している。また、最も低い計数値を示す部分のコンプトン・スペクトルの平均計数値に対するピークの最大計数値の比、P/C·Mはコンプトン・スペクトル抑制効果により52から220に、すなわち4.2倍改善されていることが明らかになっている。一方、コンプトン端エネルギーE<sub>c</sub>の0.75E<sub>c</sub>(第16図では950チャネルに相当する)から0.80E<sub>c</sub>(1020チャネル)領域の平均計数値に対するピークの最大計数値の比として定義<sup>27)</sup>されるピーク/コンプトン(P/C)は、第16図から明らかなように、ほぼP/C·Mの値と一致する。一方、後方散乱のエネルギー領域(500チャネル近傍)のコンプトン・スペクトルの改善度が幾分悪化しているのはプラグNaI(Tl)検出器による後方散乱の寄与によるものと考えられる。

また、第16図の両スペクトルのピーク面積の比較においては統計的に有意な差は認められ難い結

果が得られている。このことは、アンチコインシデンス・ゲート・パルス幅が検出効率の低下をきたさない適当な時間幅であること、 $260\text{ nCi}$  程度の線源強度においては偶然の同時計数による計数損失はあまり重要な問題にはならない、ことを意味している。

第17図に示した  $570\text{ nCi}$  の  $^{54}\text{Mn}$  線源を用いた場合にも、アンチコンプトン・スペクトルのピーク面積はシングル・スペクトルのそれと 90% の信頼水準において有意差は認められていない。このことは、 $1\text{ }\mu\text{Ci}$  程度の単一エネルギー  $\gamma$  線源の場合には偶然の同時計数による検出効率の低下は重要な問題とはならないことを示している。第17図は単一エネルギー  $\gamma$  線源である  $^{54}\text{Mn}$  の 835 keV の  $\gamma$  線に対するコンプトン抑制効果は  $^{137}\text{Cs}$  の場合より幾分悪い結果を示している。この原因として、さらに詳しい検討が必要であるが、アンチコンプトン Na I (Tl) 検出器の散乱  $\gamma$  線に対する検出効率がエネルギーの増加に伴い低下したことが一因と考えられる。

第18～19図は、壊変に伴い実質的に1個以上の  $\gamma$  線が放出される多重エネルギー  $\gamma$  線源（マルチ  $\gamma$  線源）とでも呼ぶべき、 $^{60}\text{Co}$  および  $^{22}\text{Na}$  線源についての測定結果である。

第18図は  $^{60}\text{Co}$  線源に対するものであり、コンプトン・スペクトルの抑制効果と同時に、ピーク計数値の顕著な減少が示されている。これは、一方の  $\gamma$  線が全エネルギー吸収ピークとして検出されても、そのパルスがそれと同時に放出された他方の  $\gamma$  線によるアンチゲート・パルスによってブロックされるマルチ  $\gamma$  線効果とでも呼ぶべき効果に起因している。同図から、 $P/C \cdot E$  は 27 から 65 へと 2.4 倍 ( $P/C$  は 28 から 84 へと 3 倍) 改善されているが、ピーク・チャネルの計数値は  $1/2.3$  (ピーク面積も同様であった) に低下していることが明らかになっている。

第9図は  $^{22}\text{Na}$  線源に対するものであり、2個の消滅  $\gamma$  線と 1275 keV の  $\gamma$  線が同時に放出される確率があるため、マルチ  $\gamma$  線効果が一層顕著に現われている。特に、511 keV の消滅  $\gamma$  線のピークの減少は、消滅  $\gamma$  線は殆んどの場合 2 個の  $\gamma$  線として同時に互いに  $180^\circ$  方向に放出されること、および Ge (Li) 検出器と線源をはさんで向いあっていいるプラグ Na I (Tl) 結晶の有感厚さが厚い、などの理由から一層著しくなっている。

第19図は、1275 keV  $\gamma$  線に対する  $P/C \cdot E$  は 2.5 倍改善されているが、ピーク・チャネルの計数値は消滅  $\gamma$  線によるブロック効果のため  $1/5.2$  (ピーク面積は  $1/4.7$  であった) に減少していることを明らかにしている。

#### 4. 2 体積線源をアンチコンプトン Na I (Tl) 検出器の内部に置いた場合のコンプトン・スペクトル抑制効果

体積線源に対するコンプトン・スペクトル抑制効果を自己吸収および散乱  $\gamma$  線に対する吸収効果が比較的大きな海岸砂の線源を用いて測定した。線源核種としては  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  が、線源距離としては 0 cm が用いられた。

第20図および第21図はそれぞれ  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  線源に対するシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルを示す。

第20図と第16図を比較すると、線源・検出器の配置条件も関係するが、線源からの散乱  $\gamma$  線の増加および Ge (Li) 検出器からの後方散乱  $\gamma$  線の線源による吸収などにより体積線源のシングル・スペクトルの  $P/C \cdot E$  などは点線源のそれに比べて小さくなり、コンプトン抑制効果においても点線源のそれに比べて劣っていることが明らかになっている。

第21図と第18図の比較においても<sup>137</sup>Csの場合と同様に、<sup>60</sup>Co線源の場合も体積線源のコンプトン・スペクトル抑制効果は点線源のそれに比べて小さくなっている。

第21図に示したアンチコンプトン・スペクトルのピーク計数値はシングル・スペクトルのそれに對して1/2.6(ピーク面積も同じ)になり、第16図の1/2.3に比べて低減度が大きくなっている。この原因としては、点線源の線源位置の周囲が円板状のアニュラス型NaI(Tl)結晶ハウジング前面部(ステンレス鋼8mm厚)に囲まれている検出器の構造上、点線源のマルチ $\gamma$ 線効果が小さくなつたことが考えられる。

#### 4.3 線源をアンチコンプトンNaI(Tl)検出器の外部に置いた場合の

##### コンプトン・スペクトル抑制効果

放射能強度が大きな線源の場合には、偶然の同時計数による検出効率の低下を防止するため、線源距離を大きくする必要がある。このことによって、線源が検出器に対して張る立体角が小さくなり、マルチ $\gamma$ 線効果も低減する。例えば、核燃料中の核分裂生成物の核種分析などのように、複雑なエネルギー・スペクトルを有する強い線源を測定する場合には、コンプトン・スペクトルが低減でき、かつマルチ $\gamma$ 線効果によるピーク面積の減少を著しく、または無視できる程小さくし得るので、線源をアンチコンプトンNaI(Tl)検出器の外部に置いた場合のアンチコンプトン・スペクトロメータが非常に有効になる。

このような線源を外部に置いた場合のコンプトン・スペクトル抑制効果を調べるために、<sup>137</sup>Csおよび<sup>60</sup>Co線源とコリメータを用いてパルス波高分布を測定した。

測定にあたって、プラグNaI(Tl)検出器は除去し、 $\gamma$ 線がGe(Li)検出器のほぼ全有感面積を照射(光学的方法による観察)でき、アニュラス型NaI(Tl)結晶を直接照射しないようにコリメータの位置を調節した。

第22図は<sup>137</sup>Cs線源を用いた場合のシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルである。図は、平坦な分布を示すコンプトン・スペクトル部分の抑制効果は第16図の結果と同程度であることを示している。しかし、コンプトン端付近に対する抑制効果は、プラグNaI(Tl)検出器の除去により著しく悪くなり、コンプトン端が著しく盛りあがっている。また、コリメータによる後方散乱 $\gamma$ 線の寄与が、アンチコンプトン・スペクトル上にその低計数値の故に明確に現われている。

第23図は<sup>60</sup>Co線源を用いた場合の測定結果である。同図はP/C・Eは優勢なコンプトン端のため、2倍程度しか改善されていないが、P/Cはシングル・スペクトルの29からアンチコンプトン・スペクトルの89へと3倍改善されていることを示している。

一方、ピーク面積はマルチ $\gamma$ 線効果の大幅な低下により、両スペクトルともほぼ同様な値を示し、第18図に示した場合のようにピーク面積が半分以下になるような現象は現われていない。第23図では1332keVより1173keVのピーク面積の方が低下しやすい傾向が示されているが、これはコリメータから高エネルギー線の方が漏れやすく、これによるブロック効果が働いたことによると考えられる。以上の結果に現われた多少のマルチ $\gamma$ 線効果も、十分な遮蔽効果をもつ適當なコリメータを用いて $\gamma$ 線強度を適當な範囲にし、その集束 $\gamma$ 線をGe(Li)の最適な位置に照射する、などによつて殆んど無視できる程小さくすることができる。また、これによって優れた特性のパルス波高分布が得られると思われる。

## 5 各種試料測定への応用

ここで組立てた $\gamma$ 線スペクトロメータを土壤、植物および海産物などの種々な試料の測定に応用し、あわせてスペクトロメータの特性を把握しようと試みた。

これらの測定におけるパルス波高分布の解析はBOB 73 コード<sup>28)</sup>を用いて行った。各種試料は5.8 mm dia. × 3.2 mm depth のプラスチック容器に密封し、0 cm 効率の条件下において測定された。

### 5.1 自然バックグラウンドの測定

約 1.5 MeVまでのエネルギー範囲における自然バックグラウンドの測定を、有効（ライブ）計数時間 400 k 秒 (111.1 時間)、チャネル幅 0.75 keV の条件でシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルのそれぞれについて測定し、そのパルス波高分布を第 24 図に示す。

同図に示された主要なピークの 1000 分あたりの計数率（ピーク面積）およびその $\gamma$ 線放出核種を第 4 表に示す。

第 24 図および第 4 表から明らかなように、ウラニウムおよびトリウム系列の核種や<sup>40</sup>K のような天然放射性核種のほか、<sup>60</sup>Co および<sup>137</sup>Cs の人工放射性核種も検出されている。これらのうち、壊変系列に属する天然放射性核種は主として鉛遮蔽材中に、<sup>40</sup>K は Na I (Tl) 結晶中に、<sup>60</sup>Co は遮蔽体架台の鋼材中に含まれているものと考えられる。

また、<sup>137</sup>Cs は遮蔽体のフォール・アウトによる汚染に基因するものと思われる。

ここで用いた検出系および遮蔽体などは低バックグラウンド化のために特に材料を厳選して製作したものではなく、また遮蔽体の一部が開放されているなどの理由で比較的高いバックグラウンドを示している。

例えば、全ての構成材料を厳選し、アンチコンプトン検出器としてプラスチック蛍光体を用いて行われた D. C. Camp<sup>1)</sup> らによる測定においては、ここで用いたものより 1.5 倍検出率が高い Ge (Li) 検出器を用いているにもかかわらず、ピーク面積は核種によってばらつきはあるが、大略すれば天然放射性核種と<sup>60</sup>Co では 1/1.5 程度、<sup>137</sup>Cs では 1/3 程度第 4 表より小さい結果が報告されている。<sup>60</sup>Co および<sup>137</sup>Cs は分析に供せられる機会が多い重要な核種であり、これらによる汚染はこれら核種の検出限界を低下させるため、スペクトロメータの性能に及ぼす影響も大きい。

第 25 図に、核種の検出限界を評価するために必要な、バックグラウンドの連続スペクトル部のシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルを示す。同図には第 24 図に示された分布の平均計数値を求め、これを用いて求めた単位 keVあたり、100 分計数時間あたりのバックグラウンド計数率が $\gamma$ 線エネルギーの関係において示されている。

第 25 図において 100 keV 毎に記されている旗は標準偏差を示し、200 keV 毎に記されている  $N_S/N_A$  はアンチコンプトン・スペクトルの計数率に対するシングル・スペクトルの計数率、すなわちバックグラウンドのコンプトン抑制効果を示している。同図はコンプトン抑制効果によりバックグラウンドが 1/1.5 ~ 1/2.3 に減少することを示している。1000 ~ 1200 keV のエネルギー領域で最も抑制効果が高くなっているのは、優勢なバックグラウンド源である<sup>40</sup>K (1460 keV) のコンプトン端付近のスペクトルの減少に起因している。

このように、バックグラウンドに対するコンプトン・スペクトル抑制効果が第16～23図の結果に比較して小さいのは、バックグラウンド $\gamma$ 線においては散乱 $\gamma$ 線が優勢であることも一因であると思われる。

### 5.2 松葉試料の測定

松は常緑樹であらゆる地域に広く分布しているなどの理由で環境中の放射能調査にあたっては、よく試料に供せられている。

ここでは、1235 gの松葉を採集し、電気炉で420℃前後の温度で灰化して得た灰18.5 gを体積線源用のプラスチック容器に密封し、0 cmの線源距離において測定した。第26図に試料作成後約6カ月経過した後の試料に対するシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルを示す。同図に示された星印の付されたピークは天然放射性核種に起因するピークを示している。第26図には、<sup>95</sup>Zr (<sup>95</sup>Nb), <sup>106</sup>Rh, <sup>125</sup>Sb, <sup>137</sup>Cs および <sup>144</sup>Ce (<sup>144</sup>Pr) などの核分裂生成物が確認され、フォール・アウトの影響が顕著に裏付けられている。

第5表に松葉試料において確認された各ピーク面積および主要な核種の比放射能を示す。比放射能に対する標準偏差は検出効率や $\gamma$ 線放出率などによる総合的誤差を一部を除いて7%と仮定して求められている。また、同表中で空欄になっているのは、スペクトル上はピークが存在しているかにみえても、計算機によるピーク・フッティングに失敗したため、ピーク面積を求め得なかつことによる。<sup>125</sup>Sbについては、種々なエネルギーの $\gamma$ 線に注目してそれぞれ求めた比放射能も示されている。

一方、検出効率としては第4図の水試料に対する値が使われているため、水より自己吸収が少ない灰試料における<sup>144</sup>Ceについては幾分大きい値が得られているものと考えられる。

第5表の両スペクトルを比較すれば、単一エネルギー核種またはそれに近い核種に対してはアンチコンプトン・スペクトルの方がピーク検出と測定精度の向上がみられるが、マルチ $\gamma$ 放射能核種については良い結果は得られていない。

また、バックグラウンドの<sup>60</sup>Co 1173 keV  $\gamma$ 線のシングル・スペクトル上におけるピーク検出の失敗は、ピーク・プロファイルも関係するが、このピーク位置が<sup>40</sup>Kのコンプトン端付近に位置することに起因している。一方、この領域のコンプトン・バックグラウンドの低減が計られたアンチコンプトン・スペクトルでは両者のピーク検出に成功している。

このことは、<sup>40</sup>Kのような特定エネルギーのバックグラウンドが非常に優勢な試料については、アンチコンプトン・スペクトロメータが有効になり得ることを示唆している。

### 5.3 二枚貝試料の測定

二枚貝の肉のみを2000 g採集し、松葉の場合と同様な試料作製・測定方法でパルス波高分析を行った。その結果を第27図に示す。同図には、人工 $\gamma$ 放射性核種として、<sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs および <sup>144</sup>Ce (<sup>144</sup>Pr) の存在が示されている。

また、<sup>7</sup>Beは天然放射性核種であるが、単一エネルギー核種としてスペクトロメータの特性を調べる上で有用であるため、特に図中に核種名を示した。

第6表に二枚貝中の人工 $\gamma$ 放射性核種に対するピーク面積と比放射能を示す。同表中の<sup>7</sup>Beは第26図の場合と同じ理由により表に示されている。

第6表から明らかなように、<sup>144</sup>Ce および <sup>7</sup>Be はアンチコンプトン・スペクトルにおいてのみ、

ピーク面積の算出が行われている。これは、<sup>7</sup>Beが単一エネルギー $\gamma$ 放出核種であり、<sup>144</sup>Ceの場合には分岐比19%の $\beta$ 壊変で到達した133.5 keVの励起レベルから直接基底状態に達する際の $\gamma$ 線であるため、マルチ $\gamma$ 線効果が働くことなく、アンチコンプトン・スペクトルのバックグラウンド低下が検出感度の向上に直接つながったことに基づいている。

一方、<sup>60</sup>Coについてはマルチ $\gamma$ 線効果が顕著に現われている。

以上の結果から、単一エネルギー $\gamma$ 放射性核種やマルチ $\gamma$ 放射性核種にあっても、マルチ $\gamma$ 線効果が無視できる核種の微弱放射能測定にはアンチコンプトン・スペクトロメータの有用性が明らかになっている。

第6表の結果は、<sup>144</sup>Ceおよび<sup>137</sup>Csの存在からフォール・アウトの影響が示されているとともに中性子誘導の放射性核種である<sup>60</sup>Coが極微量存在していることが確認されている。中性子誘導放射性核種である<sup>60</sup>Coもフォール・アウト中に含まれている<sup>29)</sup>ので、その影響の可能性も考えられる。

#### 5.4 土壤試料の測定

土壤中の核種分析を行うにあたっては、含まれている核種を明確に把握できるように、核種が濃縮された形になっている試料の分析を先ず行って基礎的な知見を得ようと試みた。このため、試料としては雨樋から流れ落ちた水の溜場の表面の土壤（主として海岸砂、表土のため枯葉などが混入している）80.6 gを採取し、松葉の場合と同様にプラスチック容器に密封（試料密度：1.2 g/cm<sup>3</sup>）して測定した。そのパルス波高分布を第28図に示し、ピーク面積および比放射能を第7表に示す。

これらの結果は、<sup>144</sup>Ce (<sup>144</sup>Pr), <sup>125</sup>Sb, <sup>106</sup>Rh, <sup>137</sup>Cs および <sup>95</sup>Zr (<sup>95</sup>Nb) のような核分裂生成物によって土壤が汚染され、長寿命核種である<sup>137</sup>Csが蓄積されて特に大きな比放射能になっていることを示している。また、<sup>60</sup>Coのような中性子誘導放射性核種の濃縮効果によって比較的明瞭なピークとして観測されている。

ここで用いた試料は地表から10 cm間隔の深さで採取した第1番目のものである。地表から10 cm深さで採取した試料では<sup>137</sup>Cs以外の核分裂性核種は確認されていない。<sup>137</sup>Csの比放射能 (PCi/g) については、地表、10 cm深さ、20 cm深さ、30 cm深さおよび40 cm深さで採取した試料についてそれぞれ、31.4±7.1%, 0.64±8.2%, 0.11±1.9%, 0.09±2.1%および0.03±6.1%が得られた。また、50 cmの深さで採取した試料においては<sup>137</sup>Csは検出されていない。

### 6 スペクトロメータの検出感度

Ge (Li) 検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメータの感度を支配する種々な基本的因子については、J. A. Cooper<sup>30)</sup> や G. V. Walford<sup>31,32)</sup> によって論じられている。

CooperはエネルギーEの $\gamma$ 線を測定した場合の、検出可能な最小の壊変率、 $D_m(E)$ を次のように示している。

$$D_m(E) = \frac{A}{\varepsilon(E) \cdot f \cdot t} \left\{ (W(E) (B_N(E) + B_c(E)) + \frac{A^2}{4}) + \frac{A}{2} \right\} \quad (1)$$

ピーク面積の算出が行われている。これは、<sup>7</sup>Beが単一エネルギー $\gamma$ 放出核種であり、<sup>144</sup>Ceの場合には分岐比19%の $\beta$ 壊変で到達した133.5 keVの励起レベルから直接基底状態に達する際の $\gamma$ 線であるため、マルチ $\gamma$ 線効果が働くことなく、アンチコンプトン・スペクトルのバックグラウンド低下が検出感度の向上に直接つながったことに基づいている。

一方、<sup>60</sup>Coについてはマルチ $\gamma$ 線効果が顕著に現われている。

以上の結果から、単一エネルギー $\gamma$ 放射性核種やマルチ $\gamma$ 放射性核種にあっても、マルチ $\gamma$ 線効果が無視できる核種の微弱放射能測定にはアンチコンプトン・スペクトロメータの有用性が明らかになっている。

第6表の結果は、<sup>144</sup>Ceおよび<sup>137</sup>Csの存在からフォール・アウトの影響が示されているとともに中性子誘導の放射性核種である<sup>60</sup>Coが極微量存在していることが確認されている。中性子誘導放射性核種である<sup>60</sup>Coもフォール・アウト中に含まれている<sup>29)</sup>ので、その影響の可能性も考えられる。

#### 5.4 土壤試料の測定

土壤中の核種分析を行うにあたっては、含まれている核種を明確に把握できるように、核種が濃縮された形になっている試料の分析を先ず行って基礎的な知見を得ようと試みた。このため、試料としては雨樋から流れ落ちた水の溜場の表面の土壤（主として海岸砂、表土のため枯葉などが混入している）80.6 gを採取し、松葉の場合と同様にプラスチック容器に密封（試料密度：1.2 g/cm<sup>3</sup>）して測定した。そのパルス波高分布を第28図に示し、ピーク面積および比放射能を第7表に示す。

これらの結果は、<sup>144</sup>Ce (<sup>144</sup>Pr), <sup>125</sup>Sb, <sup>106</sup>Rh, <sup>137</sup>Cs および <sup>95</sup>Zr (<sup>95</sup>Nb) のような核分裂生成物によって土壤が汚染され、長寿命核種である<sup>137</sup>Csが蓄積されて特に大きな比放射能になっていることを示している。また、<sup>60</sup>Coのような中性子誘導放射性核種の濃縮効果によって比較的明瞭なピークとして観測されている。

ここで用いた試料は地表から10 cm間隔の深さで採取した第1番目のものである。地表から10 cm深さで採取した試料では<sup>137</sup>Cs以外の核分裂性核種は確認されていない。<sup>137</sup>Csの比放射能 (PCi/g) については、地表、10 cm深さ、20 cm深さ、30 cm深さおよび40 cm深さで採取した試料についてそれぞれ、31.4±7.1%, 0.64±8.2%, 0.11±1.9%, 0.09±2.1%および0.03±6.1%が得られた。また、50 cmの深さで採取した試料においては<sup>137</sup>Csは検出されていない。

## 6 スペクトロメータの検出感度

Ge (Li) 検出器を用いた $\gamma$ 線スペクトロメータの感度を支配する種々な基本的因子については、J. A. Cooper<sup>30)</sup> や G. V. Walford<sup>31,32)</sup> によって論じられている。

CooperはエネルギーEの $\gamma$ 線を測定した場合の、検出可能な最小の壊変率、 $D_m(E)$ を次のように示している。

$$D_m(E) = \frac{A}{\epsilon(E) \cdot f \cdot t} \left\{ (W(E) (B_N(E) + B_c(E)) + \frac{A^2}{4}) + \frac{A}{2} \right\} \quad (1)$$

ただし、 $A$ ：分率誤差の逆数（10%誤差では10, 50%誤差では2）

$\epsilon(E)$ ：エネルギー $E$ の $\gamma$ 線に対する全エネルギー吸収ピーク効率

$f$ ：エネルギー $E$ の $\gamma$ 線に対する $\gamma$ 線放出率

$t$ ：計数時間

$W(E)$ ：エネルギー $E$ のピークを形成しているチャネル数（ピーク面積を得るためにのウインド幅）

$B_N(E)$ ：エネルギー $E$ における計数時間・チャネルあたりのバックグラウンドの計数値

$B_c(E)$ ：線源から放出された全ての $\gamma$ 線によって発生したエネルギー $E$ における計数時間・チャネルあたりのコンプトン・バックグラウンドの計数値

一方、分析しようとする目的核種と同一の核種によってスペクトロメータが汚染されている場合は、(1)式に汚染によるバックグラウンドを加味する必要があり、 $^{137}\text{Cs}$ の検出限界壊変率 $D_m(\text{Cs})$ を例にとって表わせば、次のようになる。

$$D_m(\text{Cs}) = \frac{A}{\epsilon(\text{Cs}) \cdot f \cdot t} \left\{ [W(\text{Cs})(B_N(\text{Cs}) + B_c(\text{Cs}) + B_{cont}(\text{Cs})) + \frac{A^2}{4}]^{\frac{1}{2}} + \frac{A}{2} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $B_{cont}(\text{Cs})$ は $^{137}\text{Cs}$ の汚染による計数時間・チャネルあたりのバックグラウンドの計数値である。

ここで用いたスペクトロメータの検出限界壊変率をCooperによる式によって、シングル・スペクトロメータおよびアンチコンプトン・スペクトロメータとして用いた場合についてそれぞれ評価する。

先ず、検出可能か否かの評価を50%誤差と仮定し、1000分間計数した場合の検出限界壊変率はシングル・スペクトロメータとして使用した場合、次のようになる。

$\epsilon(\text{Cs})$ としては第4図より、 $4.9 \times 10^{-3}$ が得られ、 $^{137}\text{Cs}$ の661 keV $\gamma$ 線に対する $f$ としては0.851が広く用いられている。

661 keVの $\gamma$ 線に対するFWHMは第3図より1.8 keVが得られ、ウインド幅としては5.0 keVで十分と考えられる。このため、コンバージョン・ゲインを0.5 keV/チャネルとするならば、 $W(\text{Cs})$ は10チャネルになる。 $B_N(\text{Cs}) + B_c(\text{Cs})$ としては80 k秒の計数時間と0.75 keV/チャネルの条件で測定した第28図の結果から、27.5/1000分・チャネルが得られ、 $B_{cont}(\text{Cs})$ としては第4表の結果から23/1000分・10チャネル=2.28/1000分・チャネルが得られる。

これらの値を(2)式に用いれば、シングル・スペクトロメータとして用いた場合の土壤試料中の $^{137}\text{Cs}$ の検出限界壊変率は8.8 dpmとなる。

$$D_m(\text{Cs}) = \frac{2}{4.9 \times 10^{-3} \cdot 0.851 \cdot 10^3} \left\{ [10(27.5+2.3) + \frac{4}{4}]^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{2} \right\}$$

$$= 8.8 \text{ [dpm]}$$

一方、アンチコンプトン・スペクトロメータとして用いた場合の  $D_m(\text{Cs})$  は、 $B_N(\text{Cs}) + B_c(\text{Cs}) = 10/1000 \text{ 分} \cdot \text{チャネル}$  が第 28 図より得られるので、5.8 dpm となる。

$$\begin{aligned} D_m(\text{Cs}) &= \frac{2}{4.9 \times 10^{-3} \cdot 0.851 \cdot 10^3} \{ (10(10+2.3)+1)^{\frac{1}{2}} + 1 \} \\ &= 5.8 [\text{dpm}] \end{aligned}$$

このとき、スペクトロメータが  $^{137}\text{Cs}$  によって汚染されていなかったと仮定するならば、 $D_m(\text{Cs})$  として 5.3 dpm が得られ、さらに線源から放出される  $\gamma$  線によるコンプトン・バックグラウンドがなく、バックグラウンドとしては自然バックグラウンドだけであると仮定するならば、第 25 図より  $B_N(\text{Cs}) = 8/1000 \text{ 分} \cdot \text{チャネル}$  が得られるので、 $D_m(\text{Cs})$  は 4.8 dpm となる。

以上のような土壤中核種の検出限界壊変率を  $^{60}\text{Co}$  および  $^{144}\text{Ce}$  についてもそれぞれ求め、それらの結果を  $^{137}\text{Cs}$  に対する結果とともに第 8 表に示す。

ただし、同表に示された  $^{60}\text{Co}$  の結果は、1173 keV の  $\gamma$  線に注目し、 $A=1$ ,  $f=1$ , FWHM=2.1 keV,  $W=11$  とし、シングル・スペクトルに対しては、 $B_N + B_c = 16$ ,  $B_{\text{cont}} = 2.6$ ,  $\epsilon = 2.7 \times 10^{-3}$  とし、アンチコンプトン・スペクトルに対しては、 $B_N + B_c = 4.5$ ,  $B_N = 3.1$ ,  $B_{\text{cont}} = 1.8$ ,  $\epsilon = 1.1 \times 10^{-3}$  (第 4 図と第 21 図の結果からアンチコンプトン・スペクトロメータの場合の検出効率を求めた) として求めた。

一方、 $^{144}\text{Ce}$  の結果は、133.5 keV の  $\gamma$  線に注目し、 $A=2$ ,  $f=0.108$ , FWHM=1.6 keV,  $W=8$ ,  $\epsilon = 1.5 \times 10^{-2}$  とし、シングル・スペクトルに対しては、 $B_N + B_c = 165$  とし、アンチコンプトン・スペクトルに対しては、 $B_N + B_c = 85$ ,  $B_N = 53$  として求めた。

第 8 表は、 $^{137}\text{Cs}$  のような単一エネルギー  $\gamma$  放射性核種や  $^{144}\text{Ce}$  のようにマルチ  $\gamma$  放射性核種でも同一の  $\gamma$  カスケードに他のエネルギーの  $\gamma$  線の放出を判わない  $\gamma$  線に注目した場合、アンチコンプトン・スペクトルにおけるバックグラウンドの低下に伴い、それらの核種の検出感度が向上することを示している。この反面、マルチ  $\gamma$  線効果が顕著に作用する  $^{60}\text{Co}$  の場合には、検出効率の低下に伴う検出感度の減少が明らかになっている。

バックグラウンドが一切存在しないと仮定した場合の  $^{137}\text{Cs}$  の検出限界壊変率はこのスペクトロメータの場合 1 dpm であるので、第 8 表の結果は、 $^{137}\text{Cs}$  に対する検出感度がバックグラウンドの寄与によって、シングル・スペクトロメータで約 1/9 に、アンチコンプトン・スペクトロメータで約 1/6 に低下したことを示している。

$^{144}\text{Ce}$  については、その  $\gamma$  線放出率が比較的小さいこと、および低エネルギー領域でバックグラウンドが増加すること、などの理由でその検出感度はバックグラウンドが存在しない場合に比べて、1/18 (シングル) および 1/13 (アンチ) に低下している。

検出感度の低下をもたらすバックグラウンドにおいては、目的核種による汚染が先ず考えられるが、 $^{137}\text{Cs}$  および  $^{60}\text{Co}$  について第 8 表に示されているように、これによる感度の低下は  $^{137}\text{Cs}$  の場合で約 9%,  $^{60}\text{Co}$  の場合で約 16% となる。したがって、第 4 表に示されている程度の汚染は、感度の低下に重大な影響を与えていないと考えられる。

また、試料から放出される  $\gamma$  線によるバックグラウンドの寄与を除去し、スペクトロメータの自然バックグラウンドの寄与だけを考えた場合の検出限界壊変率と汚染以外の全てのバックグラウンドを考慮し

た場合のそれとを比較すると、第8表から、試料に起因するバックグラウンドによって、 $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}$ ではそれぞれ25%, 10%および17%感度が低下していることがわかる。この原因としては、 $^{144}\text{Ce}$ にあっては、試料中の $^{40}\text{K}$ の影響も多少あるが、ウラニウムおよびトリウム系列に属する核種の強い影響が、 $^{60}\text{Co}$ にあっては特に $^{40}\text{K}$ の影響が強いと考えられる。

以上のことから、検出感度の向上にはスペクトロメータ自身のバックグラウンドの低減化が最も重要なことが明らかである。ここで用いたスペクトロメータでは、検出器構造材料や遮蔽材料に低バックグラウンドのものを選んで用いてはいない、遮蔽材料に壊変系列に属する天然放射性核種を多く含む鉛を用いている。アンチコンプトン検出器に $^{40}\text{K}$ を比較的多く含有するNaI(Tl)結晶を用いている、などの点から比較的自然バックグラウンドが多く、これが検出感度の限界に大きな影響を与えてい。

検出器構造材料や遮蔽物質に特に留意して低バックグラウンド化を計り、 $^{40}\text{K}$ を殆んど含まないプラスチック蛍光体をアンチコンプトン検出器として用いたD. C. Camp<sup>1)</sup>らによるスペクトロメータでは、ここで用いたスペクトロメータに比べて、100 keV, 200 keV, 600 keVおよび1000 keVのエネルギーにおいてそれぞれ、1/6, 1/18, 1/22および1/30低いバックグラウンド計数率を示し、その結果 $^{137}\text{Cs}$ に対して約2 dpmの検出限界壊変率を得ている。この検出感度はここで用いたスペクトロメータの約3倍である（ただし、Ge(Li)検出器の相対効率は15%で、ここで用いたものより1.5倍高い）。

ここで用いたアンチコンプトン $\gamma$ 線スペクトロメータで250 gの土壤中の $^{137}\text{Cs}$ を1000分間計測して分析する場合、その検出限界の比放射能は0.010 pCi/gとなる。また、10%の精度で測定できる壊変率および比放射能はそれぞれ、41.2 dpmおよび0.074 pCi/gとなる。 $^{60}\text{Co}$ および $^{144}\text{Ce}$ に対する10%の精度において測定可能な比放射能はそれぞれ、0.24 pCi/gおよび0.82 pCi/gとなる。

## 7 結 論

相対効率10%のGe(Li)検出器と8 in. dia. × 8 in. long のアニュラス型NaI(Tl)結晶と3 in. dia. × 3 in. long のプラグNaI(Tl)結晶より成るアンチコンプトン検出器を用いたアンチコンプトン型 $\gamma$ 線スペクトロメータの特性を測定した結果、自然コンプトン・バックグラウンドはシングル・スペクトロメータの場合の約50%に低減することができた。また、 $^{137}\text{Cs}$ のような単一エネルギー $\gamma$ 線源のアンチコンプトン・スペクトルは、エネルギー領域によって異なるが、シングル・スペクトルの20%~40%に減少するため、大幅なピーク/コンプトン比の改善がもたらされ、この種核種またはこれに類する核種の検出に対するアンチコンプトン型スペクトロメータの有用性が示された。

特に、土壤や種々の植物などの試料中に含まれる $^{40}\text{K}$  $\gamma$ 線のコンプトン・バックグラウンドがその大部分を占める800 keV~1200 keV領域においては、アンチコンプトン方式によるコンプトン抑制効果が、ピーク検出感度向上に大きく寄与すると思われる。

一方、 $^{60}\text{Co}$ のように、同一 $\gamma$ カスケードに他のエネルギーの $\gamma$ 線の放出を伴うマルチ $\gamma$ 放射性核種においては、コンプトン・スペクトルの大幅な低減化（ $^{60}\text{Co}$ ではシングル・スペクトルの場合の

た場合のそれを比較すると、第8表から、試料に起因するバックグラウンドによって、 $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}$ ではそれぞれ25%, 10%および17%感度が低下していることがわかる。この原因としては、 $^{144}\text{Ce}$ にあっては、試料中の $^{40}\text{K}$ の影響も多少あるが、ウラニウムおよびトリウム系列に属する核種の強い影響が、 $^{60}\text{Co}$ にあっては特に $^{40}\text{K}$ の影響が強いと考えられる。

以上のことから、検出感度の向上にはスペクトロメータ自身のバックグラウンドの低減化が最も重要なことが明らかである。ここで用いたスペクトロメータでは、検出器構造材料や遮蔽材料に低バックグラウンドのものを選んで用いてはいない、遮蔽材料に壊変系列に属する天然放射性核種を多く含む鉛を用いている。アンチコンプトン検出器に $^{40}\text{K}$ を比較的多く含有するNaI(Tl)結晶を用いている、などの点から比較的自然バックグラウンドが多く、これが検出感度の限界に大きな影響を与えてい。

検出器構造材料や遮蔽物質に特に留意して低バックグラウンド化を計り、 $^{40}\text{K}$ を殆んど含まないプラスチック蛍光体をアンチコンプトン検出器として用いたD. C. Camp<sup>1)</sup>らによるスペクトロメータでは、ここで用いたスペクトロメータに比べて、100 keV, 200 keV, 600 keVおよび1000 keVのエネルギーにおいてそれぞれ、1/6, 1/18, 1/22および1/30低いバックグラウンド計数率を示し、その結果 $^{137}\text{Cs}$ に対して約2 dpmの検出限界壊変率を得ている。この検出感度はここで用いたスペクトロメータの約3倍である（ただし、Ge(Li)検出器の相対効率は15%で、ここで用いたものより1.5倍高い）。

ここで用いたアンチコンプトン $\gamma$ 線スペクトロメータで250 gの土壤中の $^{137}\text{Cs}$ を1000分間計測して分析する場合、その検出限界の比放射能は0.010 pCi/gとなる。また、10%の精度で測定できる壊変率および比放射能はそれぞれ、41.2 dpmおよび0.074 pCi/gとなる。 $^{60}\text{Co}$ および $^{144}\text{Ce}$ に対する10%の精度において測定可能な比放射能はそれぞれ、0.24 pCi/gおよび0.82 pCi/gとなる。

## 7 結 論

相対効率10%のGe(Li)検出器と8 in. dia. × 8 in. longのアニュラス型NaI(Tl)結晶と3 in. dia. × 3 in. longのプラグNaI(Tl)結晶より成るアンチコンプトン検出器を用いたアンチコンプトン型 $\gamma$ 線スペクトロメータの特性を測定した結果、自然コンプトン・バックグラウンドはシングル・スペクトロメータの場合の約50%に低減することができた。また、 $^{137}\text{Cs}$ のような単一エネルギー $\gamma$ 線源のアンチコンプトン・スペクトルは、エネルギー領域によって異なるが、シングル・スペクトルの20%~40%に減少するため、大幅なピーク/コンプトン比の改善がもたらされ、この種核種またはこれに類する核種の検出に対するアンチコンプトン型スペクトロメータの有用性が示された。

特に、土壤や種々の植物などの試料中に含まれる $^{40}\text{K}$  $\gamma$ 線のコンプトン・バックグラウンドがその大部分を占める800 keV~1200 keV領域においては、アンチコンプトン方式によるコンプトン抑制効果が、ピーク検出感度向上に大きく寄与すると思われる。

一方、 $^{60}\text{Co}$ のように、同一カスケードに他のエネルギーの $\gamma$ 線の放出を伴うマルチ $\gamma$ 放射性核種においては、コンプトン・スペクトルの大幅な低減化（ $^{60}\text{Co}$ ではシングル・スペクトルの場合の

約20%)が計られ、他の核種に対する検出感度の向上には寄与するが、その核種自体の検出感度向上には、検出効率が低下するため、アンチコンプトン方式の有効性は示されていない。しかし、マルチ $\gamma$ 放射性核種の場合でも、線源をアンチコンプトン検出器外に置いた場合には、検出効率の低下を殆んど伴わないので、コンプトン・スペクトルのみを大幅に低下( $^{60}\text{Co}$ の場合には、あるエネルギー領域でシングル・スペクトルの約20%)させることができる。このため、比較的強い線源で複雑なスペクトルが予想される試料、例えば照射済燃料などの測定にはコンプトン抑制型スペクトロメータはあらゆる核種に対して有効であり、スペクトル中の微弱ピークの検出に特に貢献すると考えられる。

本スペクトロメータの検出限界の比放射能としては、土壤250g中に含まれた $^{137}\text{Cs}$ を1000分間計測し、50%誤差を仮定した場合、10 fCi/gが、10%誤差においては74 fCi/g、が得られている。このことは、10日間の測定においては10%誤差で、5 fCi/gの比放射能測定の可能性を示唆している。

スペクトロメータの検出感度に関与している因子としては、検出効率、エネルギー分解能およびバックグラウンドなどがその主なものである。検出効率については、現在の技術水準においては、ここで用いたものより3倍程度高いものが入手可能である。しかし、エネルギー分解能については、ここで用いたものより大幅な改善は期待できない。したがって、本スペクトロメータの感度向上には、より高検出効率の検出器を用いることとバックグラウンドの低減化が考えられる。

本スペクトロメータの場合、バックグラウンドの大部分はスペクトロメータ自身の自然バックグラウンドである。例えば、150g程度の土壤試料中に含まれる天然放射性核種からのバックグラウンドは250 keV以下のエネルギー領域では非常に少なくなる。このため、検出効率の問題を除けば、本スペクトロメータの感度向上にはスペクトロメータ自体の自然バックグラウンドの低減化が最も必要となる。

適当な遮蔽材料を用いれば、自然バックグラウンドを現在の値の1/5~1/10程度に減少させ、 $^{137}\text{Cs}$ による汚染を無視できるようにすることも可能と考えられる。この場合、 $^{137}\text{Cs}$ に対する比放射能の検出限界は4~5 fCi/gとなり、現在より検出感度を2~3倍向上させることが期待できる。

## 謝　　辞

本スペクトロメータの試作研究に対する援助と適切な助言を賜ったRI・原子炉研修所次長川口千代二博士に心から感謝致します。

また、パルス波高分布の解析にあたり、全面的な御協力を戴いたRI・原子炉研修所白石忠男氏(現在、保健物理安全管理部)に深く感謝致します。

約20%)が計られ、他の核種に対する検出感度の向上には寄与するが、その核種自体の検出感度向上には、検出効率が低下するため、アンチコンプトン方式の有効性は示されていない。しかし、マルチ $\gamma$ 放射性核種の場合でも、線源をアンチコンプトン検出器外に置いた場合には、検出効率の低下を殆んど伴わないので、コンプトン・スペクトルのみを大幅に低下( $^{60}\text{Co}$ の場合には、あるエネルギー領域でシングル・スペクトルの約20%)させることができる。このため、比較的強い線源で複雑なスペクトルが予想される試料、例えば照射済燃料などの測定にはコンプトン抑制型スペクトロメータはあらゆる核種に対して有効であり、スペクトル中の微弱ピークの検出に特に貢献すると考えられる。

本スペクトロメータの検出限界の比放射能としては、土壤250g中に含まれた $^{137}\text{Cs}$ を1000分間計測し、50%誤差を仮定した場合、10 fCi/gが、10%誤差においては74 fCi/g、が得られている。このことは、10日間の測定においては10%誤差で、5 fCi/gの比放射能測定の可能性を示唆している。

スペクトロメータの検出感度に関与している因子としては、検出効率、エネルギー分解能およびバックグラウンドなどがその主なものである。検出効率については、現在の技術水準においては、ここで用いたものより3倍程度高いものが入手可能である。しかし、エネルギー分解能については、ここで用いたものより大幅な改善は期待できない。したがって、本スペクトロメータの感度向上には、より高検出効率の検出器を用いることとバックグラウンドの低減化が考えられる。

本スペクトロメータの場合、バックグラウンドの大部分はスペクトロメータ自身の自然バックグラウンドである。例えば、150g程度の土壤試料中に含まれる天然放射性核種からのバックグラウンドは250 keV以下のエネルギー領域では非常に少なくなる。このため、検出効率の問題を除けば、本スペクトロメータの感度向上にはスペクトロメータ自体の自然バックグラウンドの低減化が最も必要となる。

適当な遮蔽材料を用いれば、自然バックグラウンドを現在の値の1/5~1/10程度に減少させ、 $^{137}\text{Cs}$ による汚染を無視できるようにすることも可能と考えられる。この場合、 $^{137}\text{Cs}$ に対する比放射能の検出限界は4~5 fCi/gとなり、現在より検出感度を2~3倍向上させることが期待できる。

## 謝　　辞

本スペクトロメータの試作研究に対する援助と適切な助言を賜ったRI・原子炉研修所次長川口千代二博士に心から感謝致します。

また、パルス波高分布の解析にあたり、全面的な御協力を戴いたRI・原子炉研修所白石忠男氏(現在、保健物理安全管理部)に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) D.C.Camp,C.Gatrousis and L.A.Maynard,Nucl.Instr. and Meth.,117,189(1974)
- 2) M.Michijima and H.Miyake,J.Nucl.Sci. and Technol.,9(8),445(1962)
- 3) W.H.Zimmer,ARH-SA-101(1971)
- 4) P.L.Phelps,IEEE Trans.Nucl.Sci.,NS-15(3),376(1968)
- 5) F.R.Markwell,W.E.Bolch,C.E.Roessler and W.H.Ellis,IEEE Trans.Nucl.Sci.,  
NS-20(1), 54(1973)
- 6) S.R.Lewis and N.H.Shafrir,Nucl.Instr. and Meth.,93,317(1971)
- 7) J.A.Cooper and R.W.Perkins,Nucl.Instr. and Meth.,99,125(1971)
- 8) J.A.Cooper and R.W.Perkins,BNWL-SA-3527(1971)
- 9) R.D.Cooper,D.M.Linekin,G.L.Brownell et al.,Am.Nucl.Soc.Trans.10,10(1967)
- 10) J.A.Cooper,BNWL-1285(1970)
- 11) J.A.Cooper,BNWL-SA-3575(1970)
- 12) J.A.Cooper,BNWL-SA-2876(1969)
- 13) F.P.Brauer,J.H.Kaye,J.E.Fager,W.A.Mitzlaff and H.G.Rieck,Nucl.Instr. and  
Meth., 102,223(1972)
- 14) R.L.Currie,R.McPherson and G.H.Morrison,NBS 312,Vol.II,1062(1969)
- 15) M.Heske,EUR 4831e(1972)
- 16) W.Michaelis and H.Küpfer,Nucl.Instr. and Meth.,56,181(1967)
- 17) R.L.Auble,D.E.Beery,G.Berzins,L.M.Beyer,R.C.Etherton and W.H.Kelly,Nucl.  
Instr. and Meth.,51,61(1967)
- 18) D.C.Camp,UCRL-71825
- 19) Y.Sever and J.Lippert,Nucl.Instr. and Meth.,33,347(1965)
- 20) K.L.Smith,L.D.Philipp and N.C.Hoitink,IEEE Trans.Nucl.Sci.,NS-15(3),  
486(1968)
- 21) P.Suominen and J.Kantele,Nucl.Instr. and Meth.,58,229(1968)
- 22) A.R.Sayres and J.A.Baicker,IEEE Trans.Nucl.Sci.,NS-15(3),393(1968)

- 23) J.M.Palms,R.E.Wood and O.H.Puckett,IEEE Trans.Nucl.Sci.,NS-15(3),397(1968)
- 24) R.N.Larsen and M.G.Strauss,IEEE Trans.Nucl.Sci.,NS-17(3),254(1970)
- 25) G.Alberti,L.Isabella,A.Oriani and A.Zambra,Nucl.Instr.and Meth.,95,413(1971)
- 26) R.L.Heath,IDO-16880-1,AEC R & D Report Physics TID-4500(31st.Ed.,1964)
- 27) Publication of International Electrotechnical Commission 430(1973)
- 28) H.Baba,T.Sekine,S.Baba and H.Okashita,JAERI-1227(1973)
- 29) P.O.Strom,J.L.Mackin,D.MacDonald and P.E.Zigman,Science,128,417(1958)
- 30) J.A.Cooper,Nucl.Instr. and Meth.,82,273(1970)
- 31) G.V.Walford,D.T.W.Aliage-Kelly and E.B.Gilboy,IEEE Trans.Nucl.Sci.,NS-19(1),127(1972)
- 32) G.V.Walford and W.B.Gilboy,ERDA Conf-720805-P1,135(1972)

第1表 Ge(Li)検出器の仕様

検出器型式	7229, 冷却器: 7600S, S/N: 674 (Canberra社)
検出器形状	真の同軸型
Ge結晶寸法	42mm dia. × 46mm long (341g)
p - 層直径	8mm
窓面有感面積	12.7 cm <sup>2</sup> (有感面: 入射窓面より 8 mm)
n - 層厚	1.0 mm
F W H M	2 keV (1332 keV)
25cm効率	10% (1332 keV, 3" × 3" NaIに対しても)
エンドキャップ部	ステンレス鋼 (63mm dia. × 375mm long) 先端部 (窓面より 75 mm): 0.2 mm

第2表 NaI(Tl)検出系の仕様

	アニュラス型NaI(Tl)	プラグ用NaI(Tl)
型式	32NBWS32/2BX (Harshaw社)	12A12N (堀場製作所)
結晶寸法	8 in. dia. × 8 in. long 貫通孔直径: 5.2 mm	3 in. dia. × 3 in. long
結晶容器	ステンレス鋼 (3~8mm厚) 貫通孔部: 0.8 mm 厚の アルミニウム	アルミニウム ~0.4 mm 厚
光電子増倍管	RCA8053 × 6本	RCA8054

第3表 アニュラス型NaI(Tl)検出器に装着された各光電子増倍管の感度

光電子増倍管番号	結晶番号*	パルス波高 (チャネル数)	パルス波高 (相対値)
1	1	214	0.80
2	1	36	0.14
3	1	140	0.53
4	2	196	0.74
5	2	69	0.26
6	2	266	1.00

\*結晶番号1は光学的に遮蔽されて2分割された結晶の一方を、2は他方を表わす。

第4表 自然バックグラウンドのスペクトル中に確認された  
主要なピークの1000分あたりの計数率

エネルギー [keV]	核種	シングル・スペクトルの ピーク面積 [c/1000分]	アンチコンプトン・スペクトル のピーク面積 [c/1000分]
92.3	$^{234}\text{Th}$	219.2 ± 9.03	213.3 ± 6.68
186.10	$^{226}\text{Ra}$	161.1 ± 11.19	124.2 ± 11.39
238.83	$^{212}\text{Pb}$	260.6 ± 7.79	282.0 ± 5.19
295.2	$^{214}\text{Pb}$	59.4 ± 22.0	33.6 ± 31.2
352.0	$^{214}\text{Pb}$	70.2 ± 18.0	76.4 ± 12.7
511.00	消滅 $\gamma$ 線	394.1 ± 3.51	325.4 ± 3.21
583.14	$^{208}\text{Tl}$	95.5 ± 9.84	60.6 ± 10.9
609.3	$^{214}\text{Bi}$	78.9 ± 11.7	59.9 ± 12.3
661.64	$^{137}\text{Cs}$	22.8 ± 3.16	23.5 ± 2.17
727.17	$^{212}\text{Bi}$	22.0 ± 3.02	18.7 ± 2.61
911.1	$^{228}\text{Ac}$	56.8 ± 11.8	52.6 ± 9.31
964.6	$^{228}\text{Ac}$	13.9 ± 3.52	15.6 ± 3.25
968.9	$^{228}\text{Ac}$	33.6 ± 17.6	31.5 ± 16.8
1120.4	$^{214}\text{Bi}$	29.5 ± 19.5	22.2 ± 18.5
1173.21	$^{60}\text{Co}$	28.5 ± 20.1	19.5 ± 19.2
1238.3	$^{214}\text{Bi}$	18.7 ± 26.9	
1332.48	$^{60}\text{Co}$	34.2 ± 14.3	18.1 ± 19.6
1460.85	$^{40}\text{K}$	547.1 ± 18.1	560.7 ± 17.4

注) 誤差は標準偏差[%]で表わされている。

第5表 松葉中の人工 $\gamma$ 放射性核種に対するピーク面積と比放射能

核種	$\gamma$ 線エネルギー [keV]	シングル・スペクトル のピーク面積*	アンチコンプトン・ スペクトルのピーク 面積*	比放射能** [pCi/g]
$^{144}\text{Ce}$	133.53	$1861 \pm 4.71$	$1809 \pm 3.76$	$0.48 \pm 8.5$
$^{144}\text{Pr}$	696.43		$83 \pm 22.40$	
$^{125}\text{Sb}$	427.9	$328 \pm 15.3$	$182 \pm 17.1$	$0.046 \pm 1.7$
	463.4	$86 \pm 41$	$129 \pm 20.1$	$0.033 \pm 4.2$
	600.6	$140 \pm 21.1$	$81 \pm 28$	$0.039 \pm 2.2$
	606.7	$68 \pm 5.6$		$0.066 \pm 5.6$
	635.9	$67 \pm 4.0$	$66 \pm 28$	$0.032 \pm 4.1$
$^{106}\text{Rh}$	621.8	$77 \pm 3.6$		$^{106}\text{Ru}: 0.058 \pm 37$
$^{137}\text{Cs}$	661.64	$996 \pm 4.51$	$969 \pm 3.86$	$0.063 \pm 8.4$
$^{95}\text{Zn}$	756.72	$66 \pm 3.3$	$30 \pm 4.7$	$0.052 \pm 3.4$
$^{95}\text{Nb}$	765.79	$223 \pm 13.3$	$191 \pm 11.9$	
$^{60}\text{Co}$	1173.21		$41 \pm 3.3$	バックグラウンド
	1332.48	$39 \pm 4.2$	$24 \pm 4.9$	

\* 有効計数時間: 80 k秒(22.2時間), 誤差: 標準偏差[%]

\*\* 生の松葉に対するシングル・スペクトルから求めた試料採取時点での比放射能, 誤差: 標準偏差[%]

第6表 二枚貝中の人工 $\gamma$ 放射性核種に対するピーク面積と比放射能\*

核種	$\gamma$ 線エネルギー [keV]	シングル・スペクトル のピーク面積*	アンチコンプトン・スペ クトルのピーク面積*	比放射能** [pCi/g]
$^{144}\text{Ce}$	133.53		$157 \pm 28.0$	$0.016 \pm 29$
$^{137}\text{Cs}$	661.64	$117 \pm 27.4$	$101 \pm 18.7$	$3.5 \pm 38$
$^{60}\text{Co}$	1173.21	$175 \pm 13.9$	$67 \pm 22$	$0.0083 \pm 19$
	1332.48	$166 \pm 11.56$	$53 \pm 24$	$0.0088 \pm 18$
$^7\text{Be}$			$54 \pm 3.4$	$0.014 \pm 35$

\* 有効計数時間: 80 k秒(22.2時間), 誤差: 標準偏差[%]

\*\* 生の二枚貝に対する比放射能, シングル・スペクトルで確認されているものはその面積から比放射能を  
求めた。誤差: 標準偏差[%]

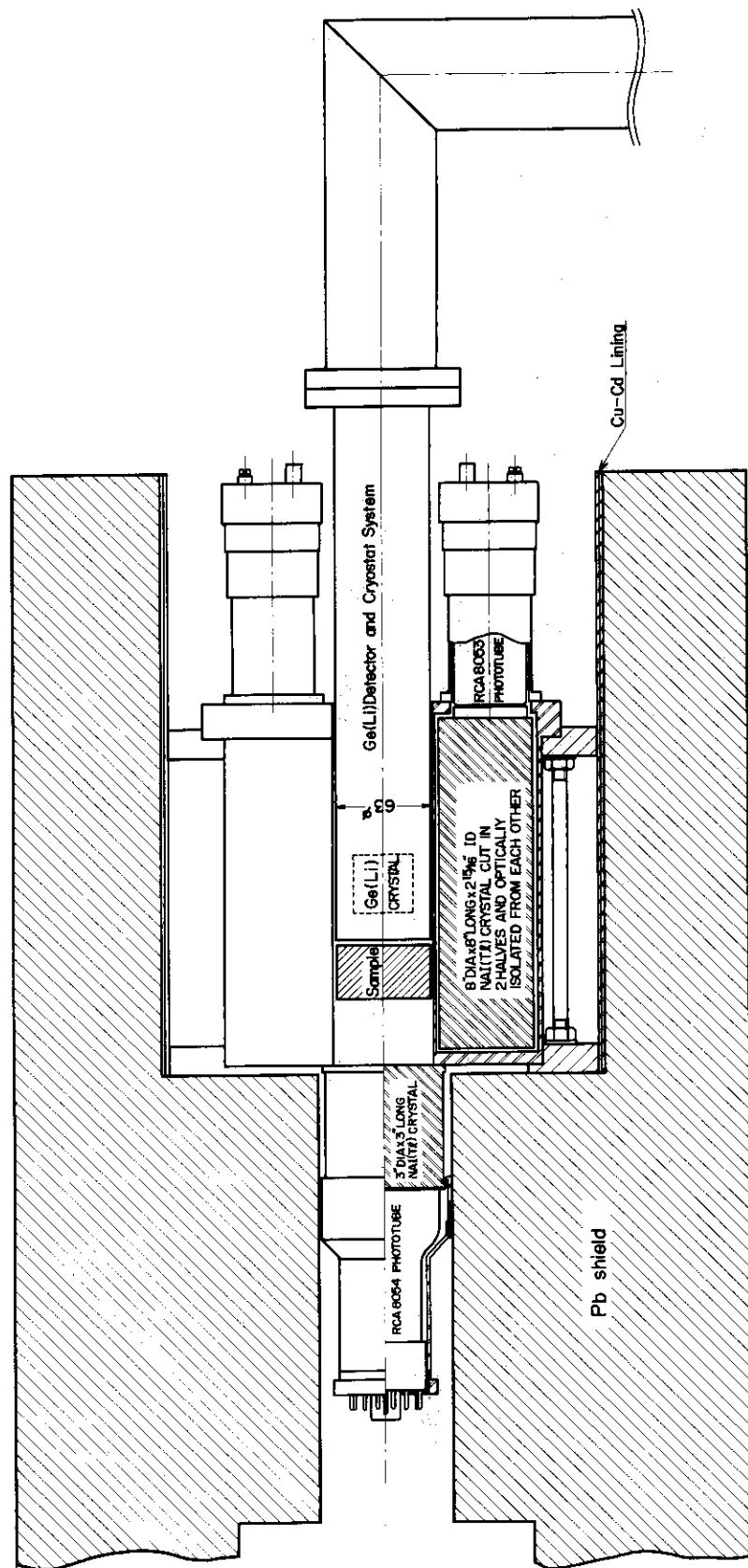
第7表 土壤中の人工 $\gamma$ 放射性核種に対するピーク面積と比放射能

核種	$\gamma$ 親エネルギー [keV]	シングル・スペクトル のピーク面積*	アンチコンプトン・ スペクトルのピーク 面積*	比放射能 [pCi/g]
$^{144}\text{Ce}$	133.53	2929±4.62	3088±3.44	7.6±8.4
$^{144}\text{Pr}$	696.43	110±27.1	101±20.0	6.8±2.8
$^{125}\text{Sb}$	427.9	1215±7.07	1109±5.09	2.3±1.0
	463.4	485±15.9	440±13.2	2.8±1.7
	600.6	572±8.60	455±9.58	2.4±1.1
	606.7	144±37.0	163±27.0	2.2±3.8
	635.9	258±18.0	314±13.3	1.8±1.9
$^{106}\text{Rh}$	621.8	566±9.03	95±3.6	4.6±1.1
	1050.1	40±41		3.9±4.2
$^{137}\text{Cs}$	661.64	31190±0.59	31427±0.58	31.4±7.1
$^{95}\text{Zr}$	724.18	52±39	51±39	0.12±4.0
	756.72		35±42	
$^{95}\text{Nb}$	765.79	264±11.4	208±11.1	0.27±1.3
$^{60}\text{Co}$	1173.21	121±16.9	57±24	0.13±2.6
	1332.48	80±21	49±27	0.06±5.3
$^7\text{Be}$	477.59	334±20.3	314±13.3	1.7±2.1

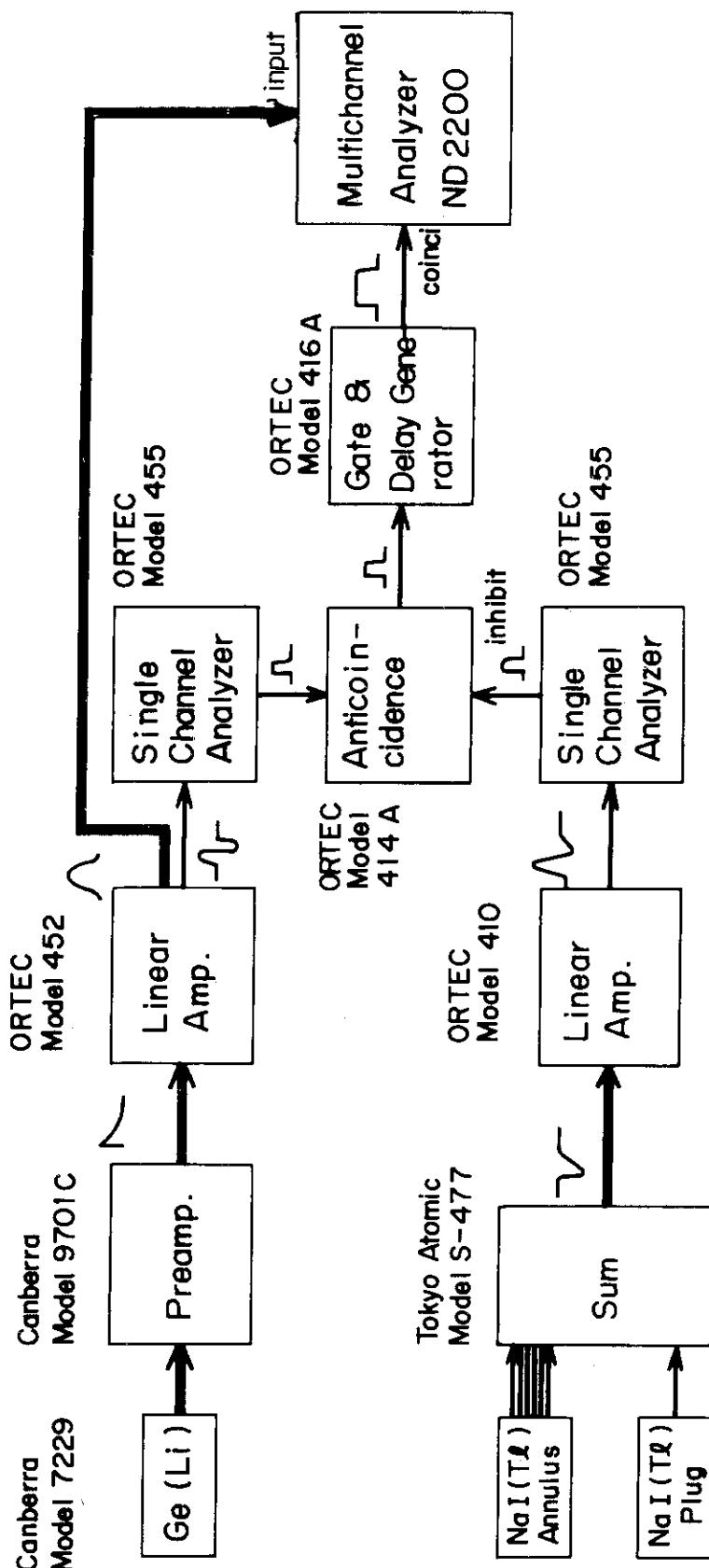
\* 有効計数時間: 80 k秒(22.2時間), 誤差: 標準偏差[%]

第8表 土壤中の $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  および  $^{60}\text{Co}$  の検出限界壊変率(計数時間: 1000分)

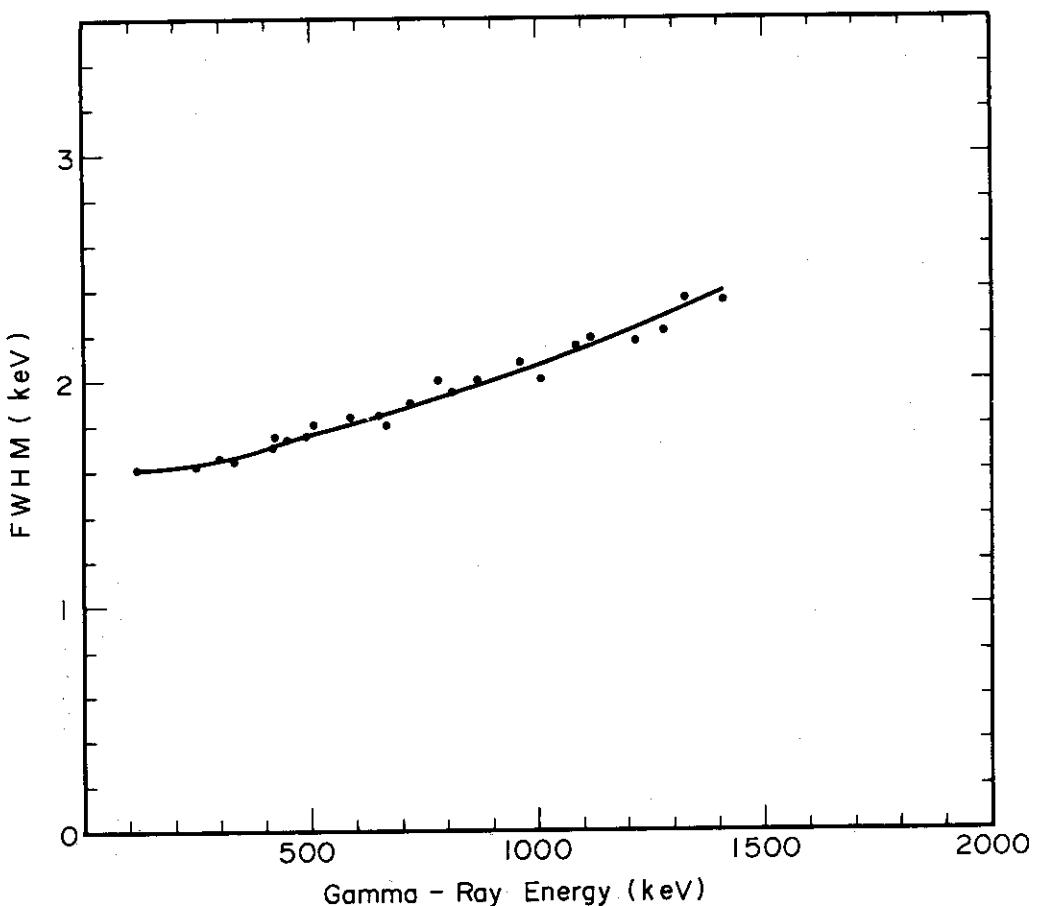
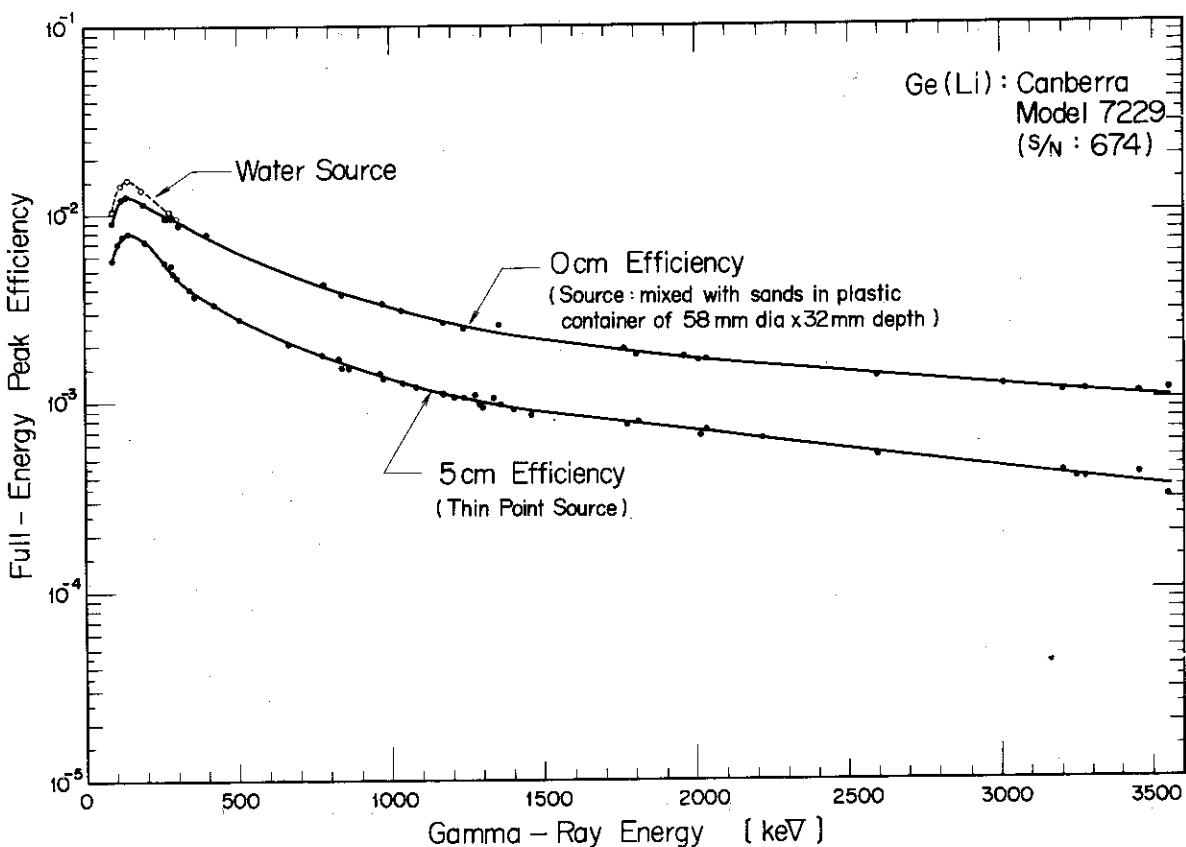
核種	シングル・スペクトル メータ	アンチコンプトン・スペクトロメータ		
			目的核種による汚染 がない場合	自然バックグラウンド だけの場合
$^{137}\text{Cs}$	8.8 dpm	5.8 dpm	5.3 dpm	4.8 dpm
$^{144}\text{Ce}$	46.1 dpm	33.5 dpm	33.5 dpm	26.7 dpm
$^{60}\text{Co}$	11.4 dpm	17.1 dpm	14.7 dpm	12.6 dpm

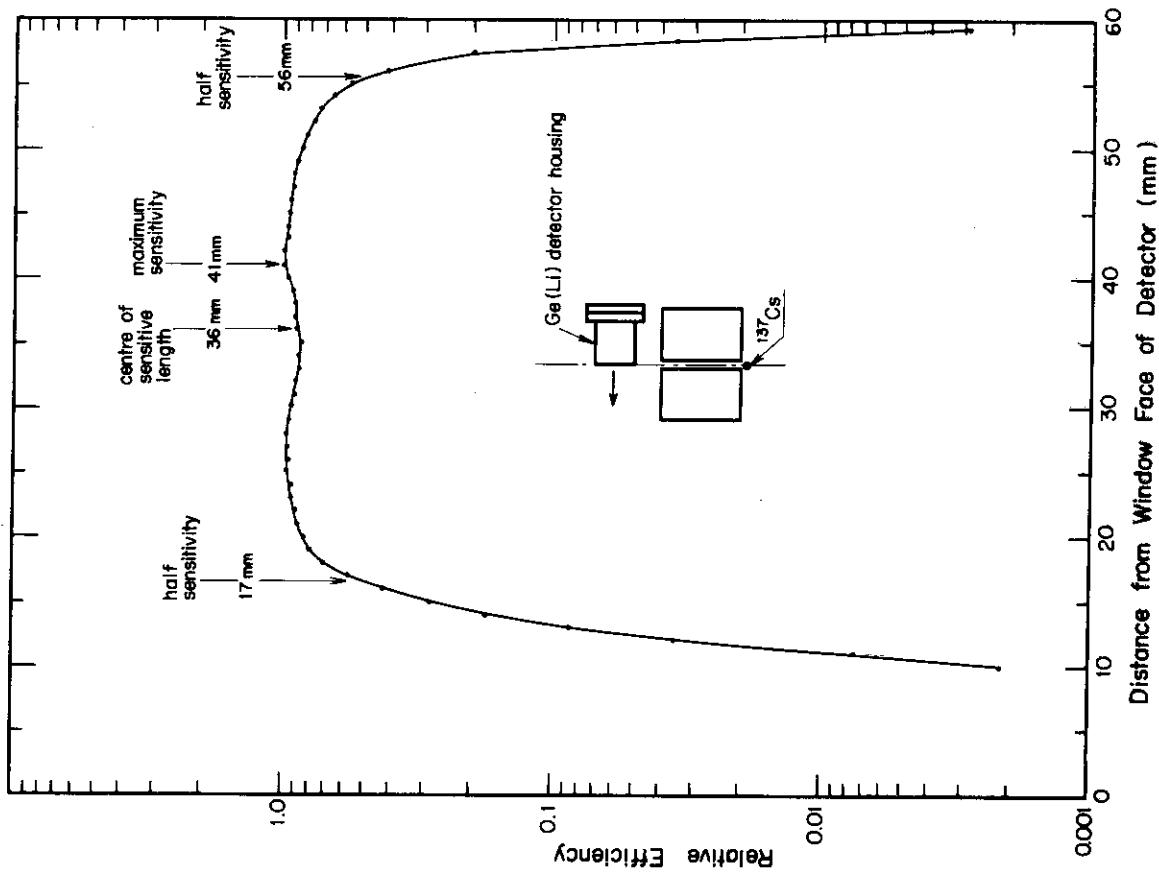


第1図 Ge(Li)およびNaI(Tl)検出器の配置図

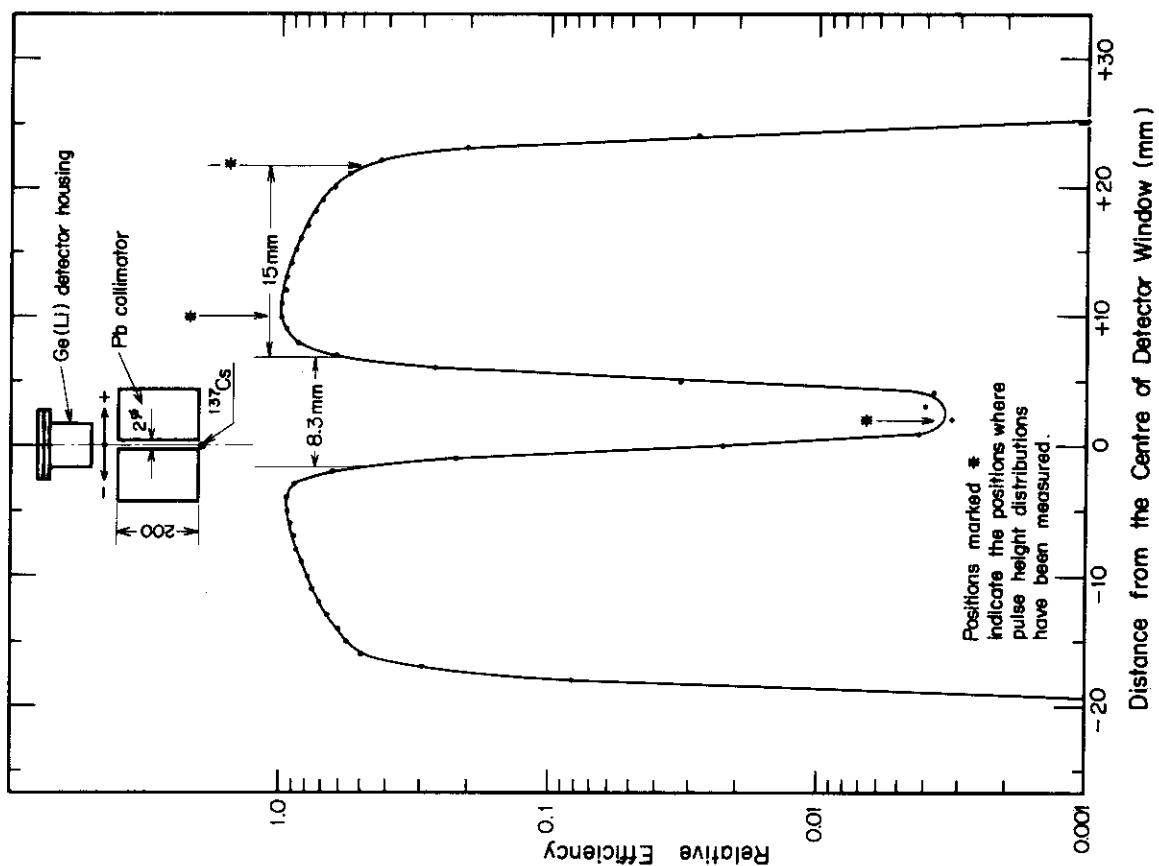


第2図 アンチコントン型γ線スペクトロメータ回路部の  
ロックダイヤグラム

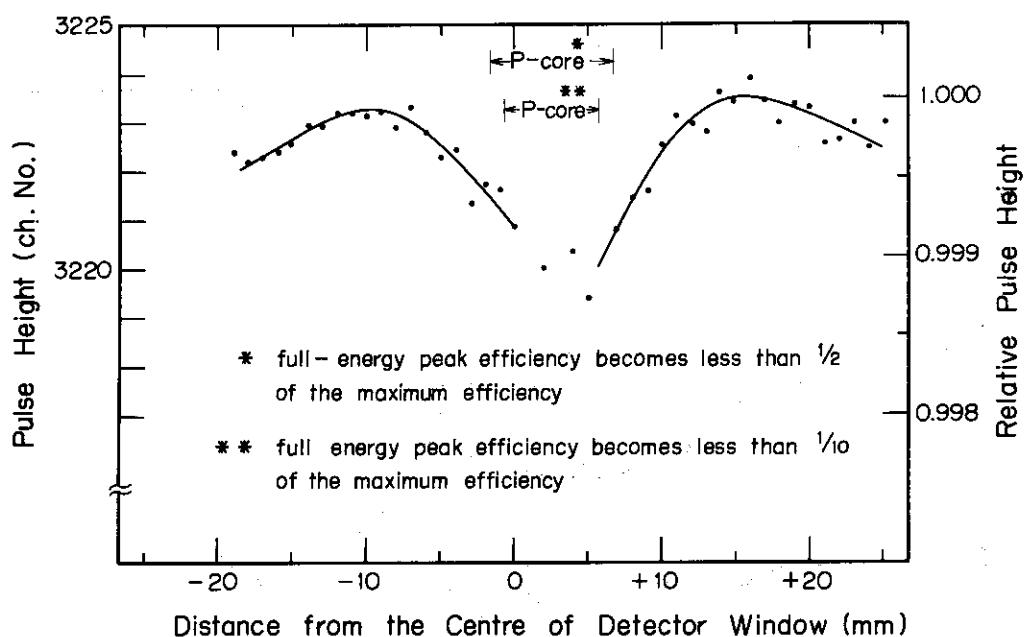
第3図 Ge(Li)検出器のFWHMの $\gamma$ 線エネルギー依存性第4図 Ge(Li)検出器の絶対全エネルギー吸収ピーク効率の $\gamma$ 線エネルギー依存性



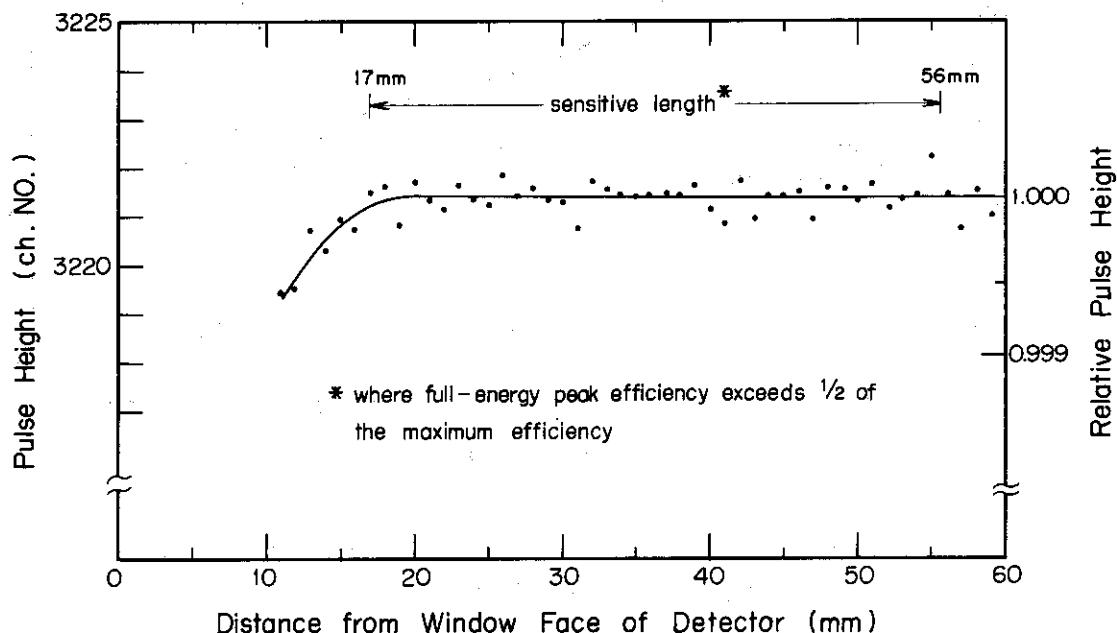
第6図 Ge(Li)結晶の軸方向に集束γ線を走査させたときの各位置における全エネルギー吸収ピークの総対的計数率(相対効率)〔線源： $^{137}\text{Cs}$ ，集束γ線：2 mm dia。〕



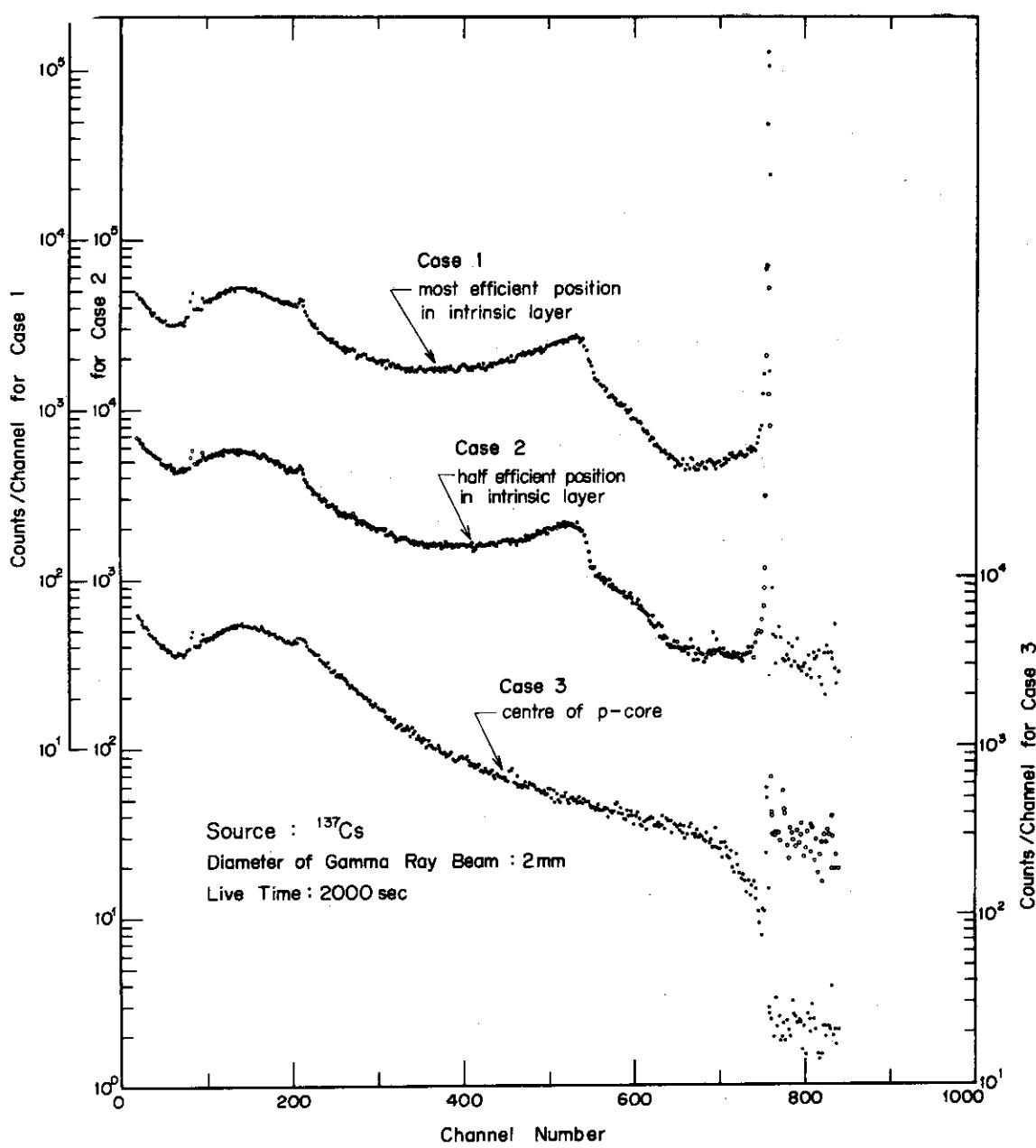
第5図 Ge(Li)結晶の半径方向に集束γ線を走査させたときの各位置における全エネルギー吸収ピークの総対的計数率(相対効率)〔線源： $^{137}\text{Cs}$ ，集束γ線：2 mm dia。〕



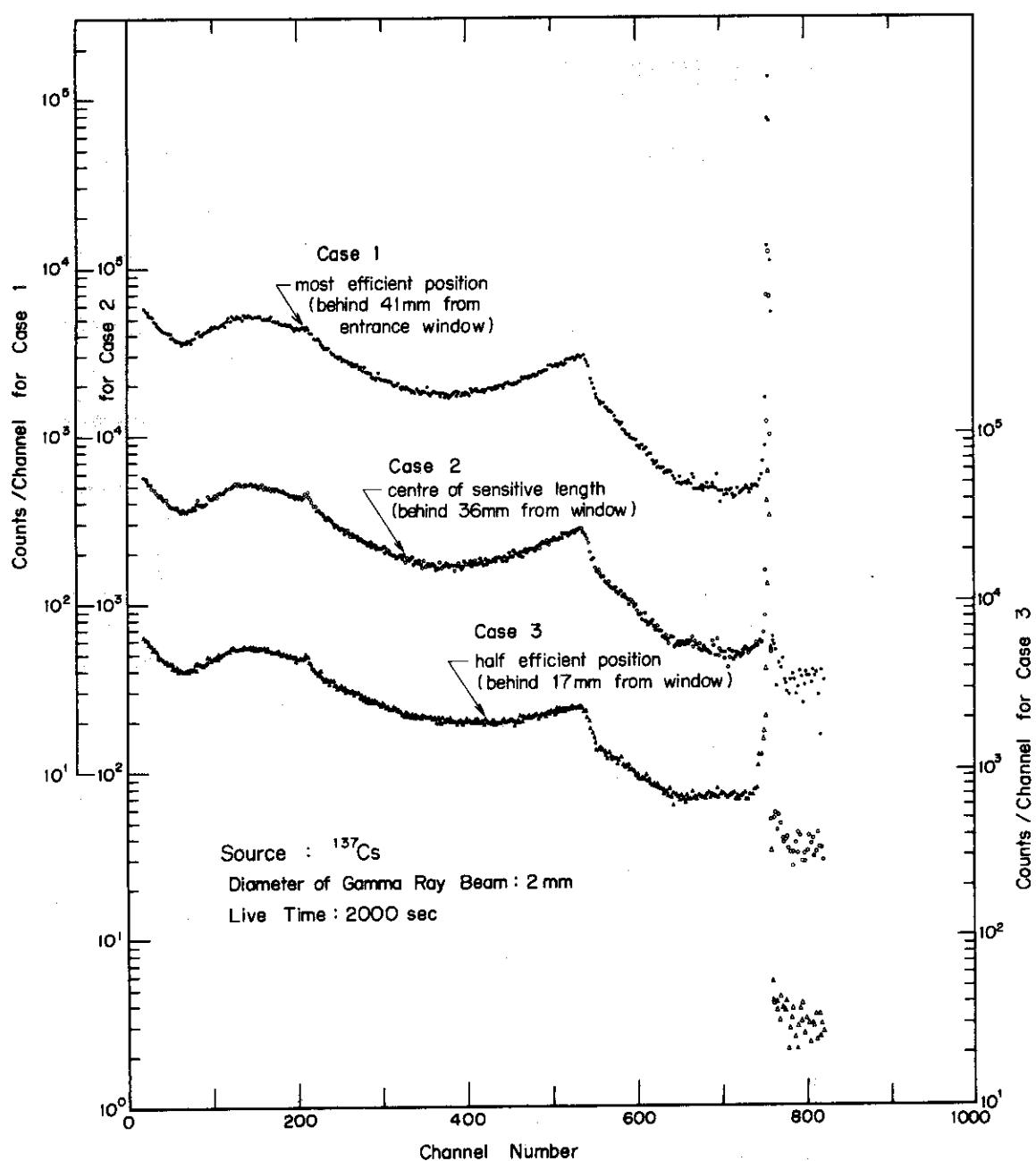
第7図 Ge(Li)結晶の半径方向におけるパルス波高の位置依存性〔線源： $^{137}\text{Cs}$ , 2048チャネル・デジタル・シフト, 集束 $\gamma$ 線：2 mm dia.〕



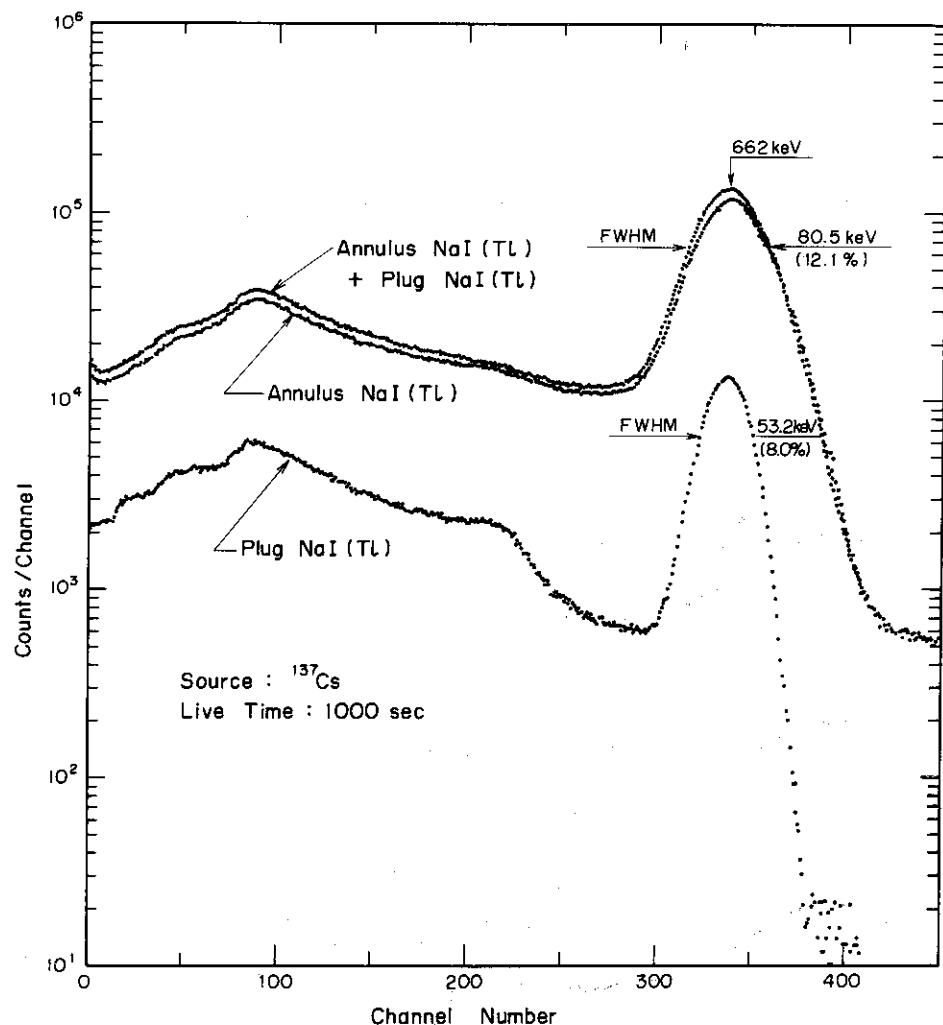
第8図 Ge(Li)結晶の軸方向におけるパルス波高の位置依存性  
〔線源： $^{137}\text{Cs}$ , 2048チャネル・デジタル・シフト, 集束 $\gamma$ 線：2 mm dia.〕



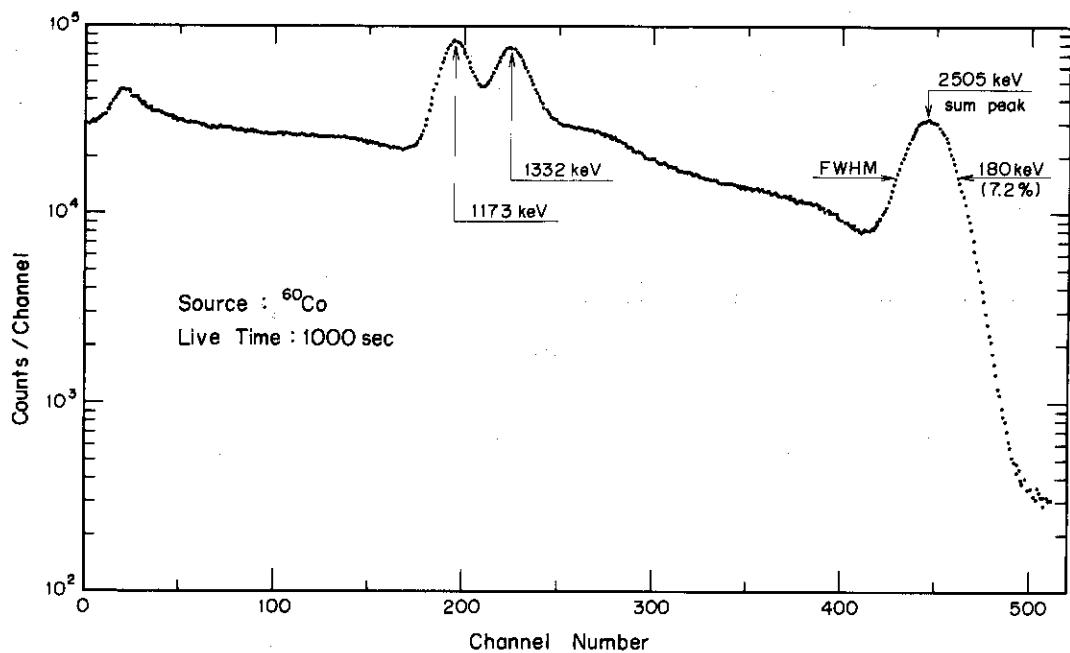
第9図 Ge (Li) 結晶の半径方向の各位置におけるパルス波高分布〔線源： $^{137}\text{Cs}$ , 集束γ線：2 mm dia.〕



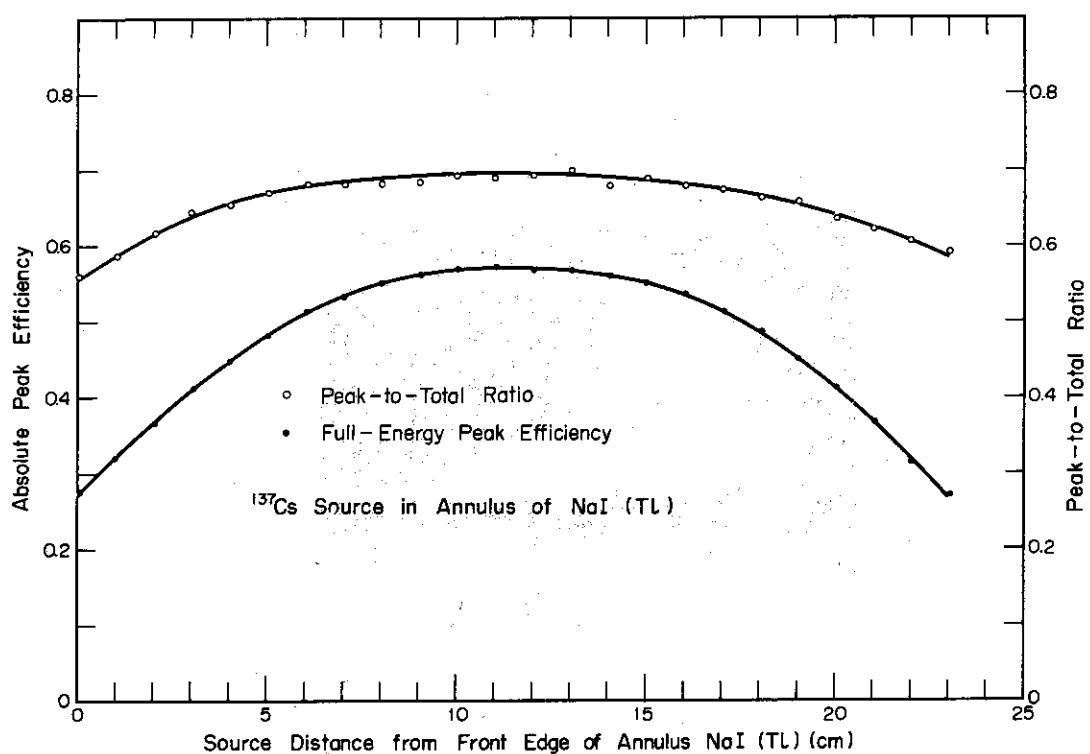
第10図 Ge (Li) 結晶の軸方向の各位置におけるパルス波高分布  
〔線源： $^{137}\text{Cs}$ , 集束γ線：2 mm dia.〕



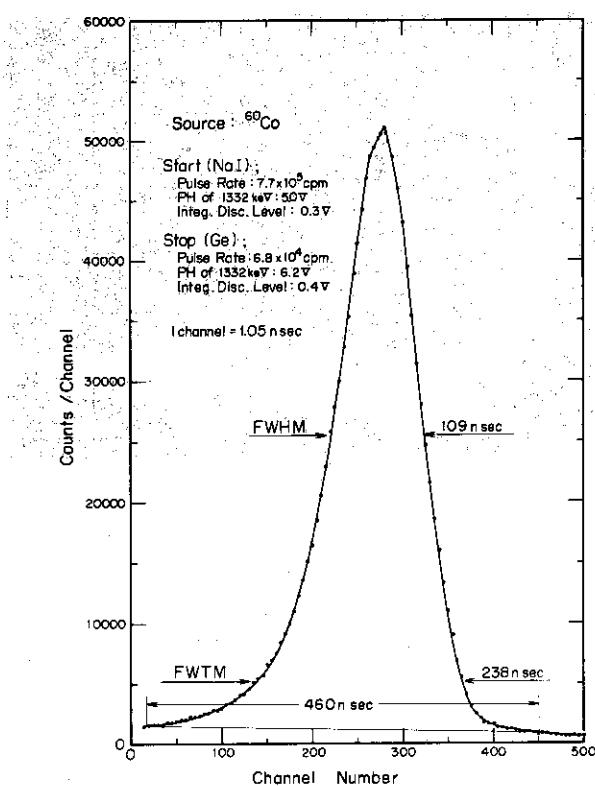
第11図 アニュラス型およびプラグNaI(Tl)検出器の $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線源に対するパルス波高分布



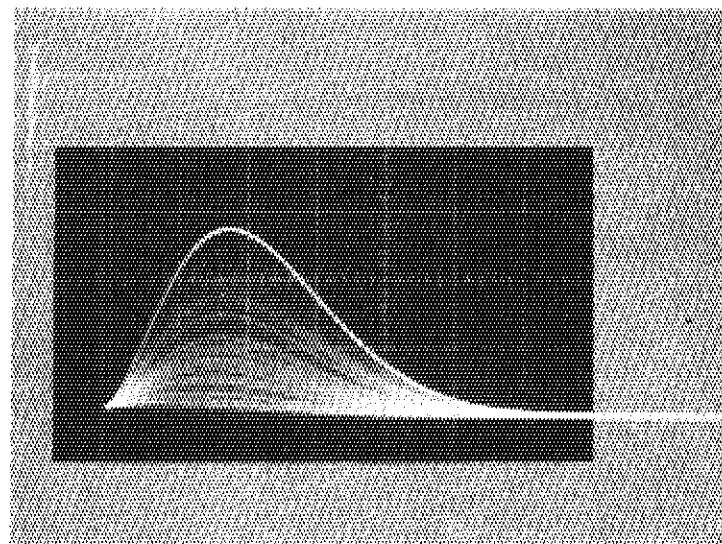
第12図 アニュラス型およびプラグNaI(Tl)検出器をともに用いた場合の $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線に対するパルス波高分布



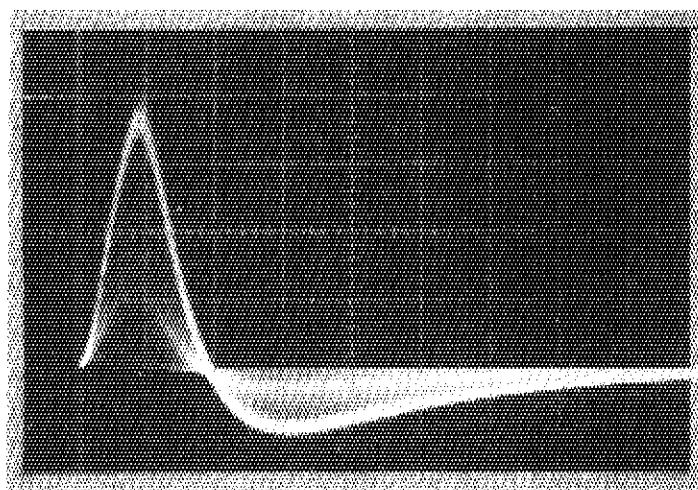
第13図 アニュラス型NaI(Tl)検出器の軸上に $^{137}\text{Cs}$ 点線源を  
移動させて測定した 661 keV  $\gamma$ 線に対する全エネルギー  
吸収ピーク効率およびピーク・トゥ・トータル比



第14図 Ge(Li)-NaI(Tl)検出器系の時間分布

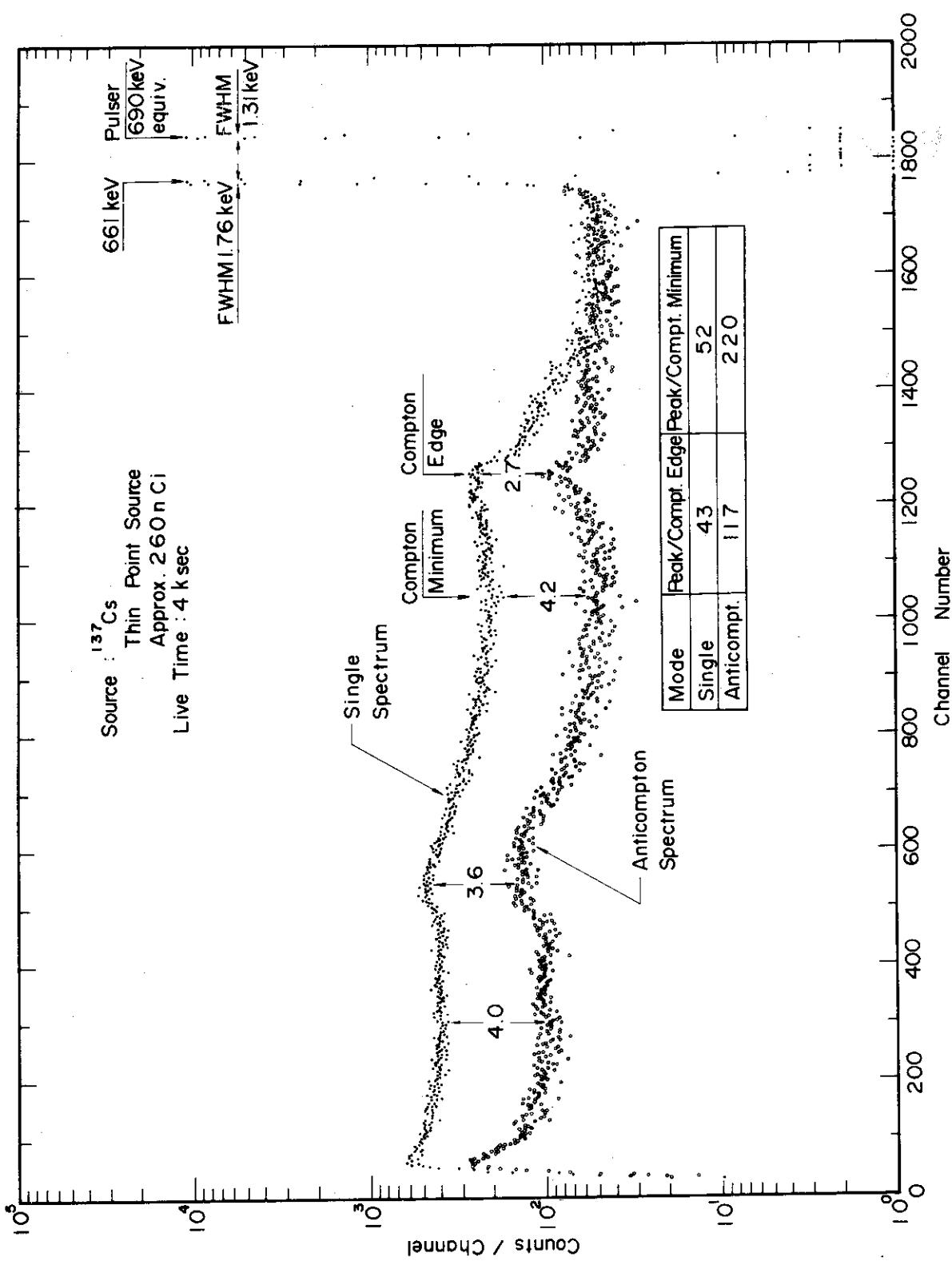


a : Ge (Li) 検出器系       $2\text{V/div}$   
 $2\mu\text{sec/div}$

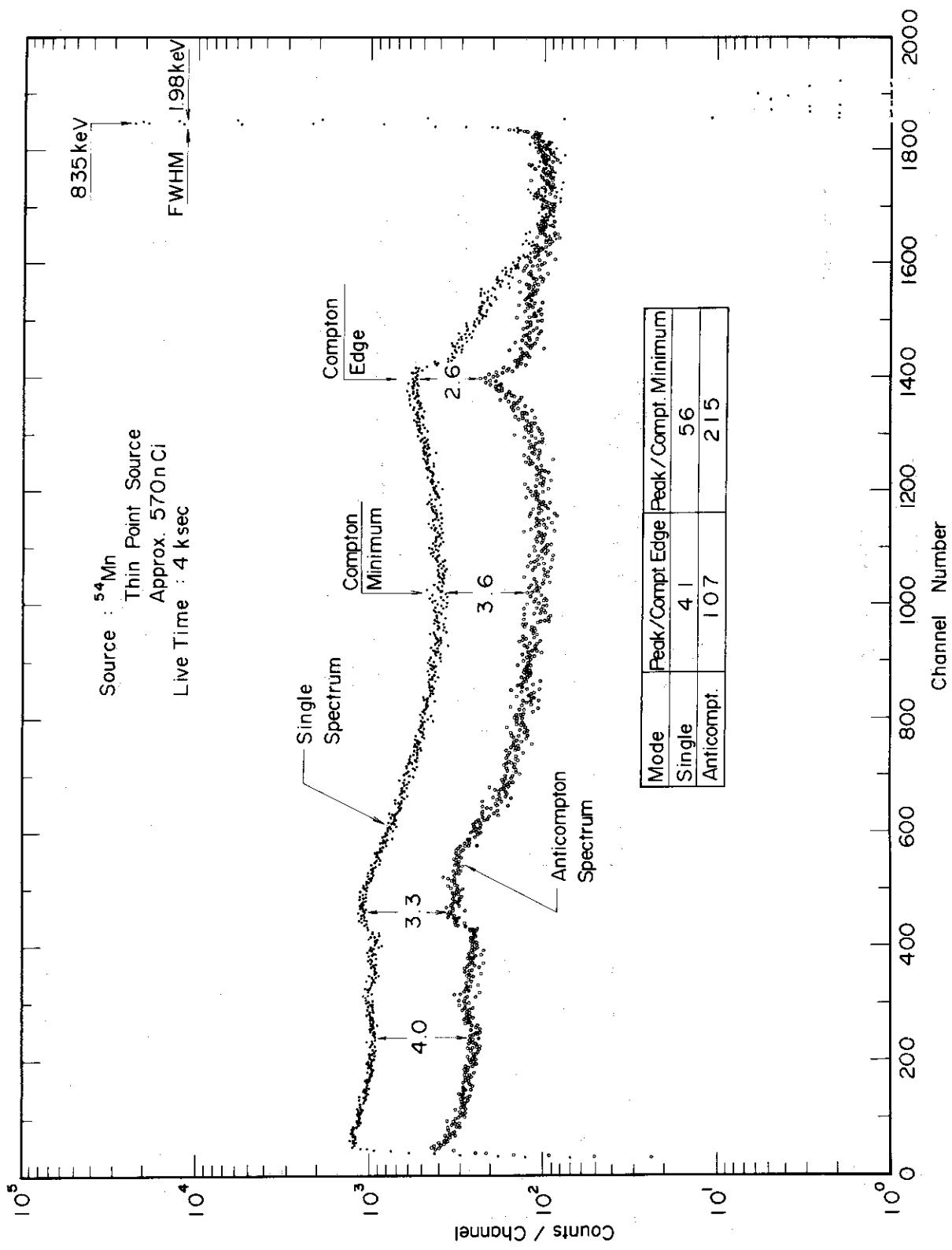


b : NaI(Tl) 検出器系       $1\text{V/div}$   
 $1\mu\text{sec/div}$

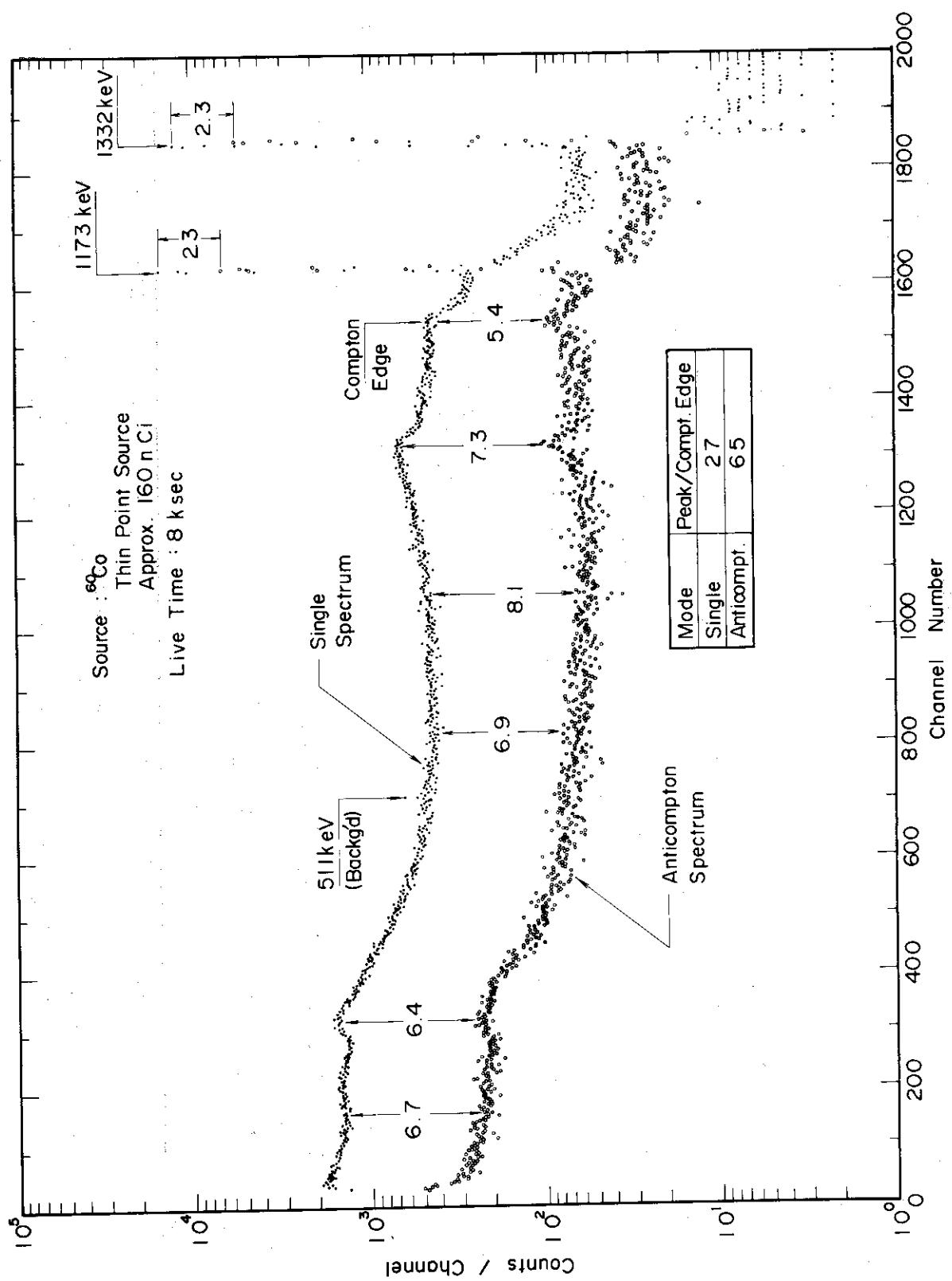
第15図 Ge(Li) およびNaI(Tl) 検出器系それぞれの比例  
增幅器出力パルス波形



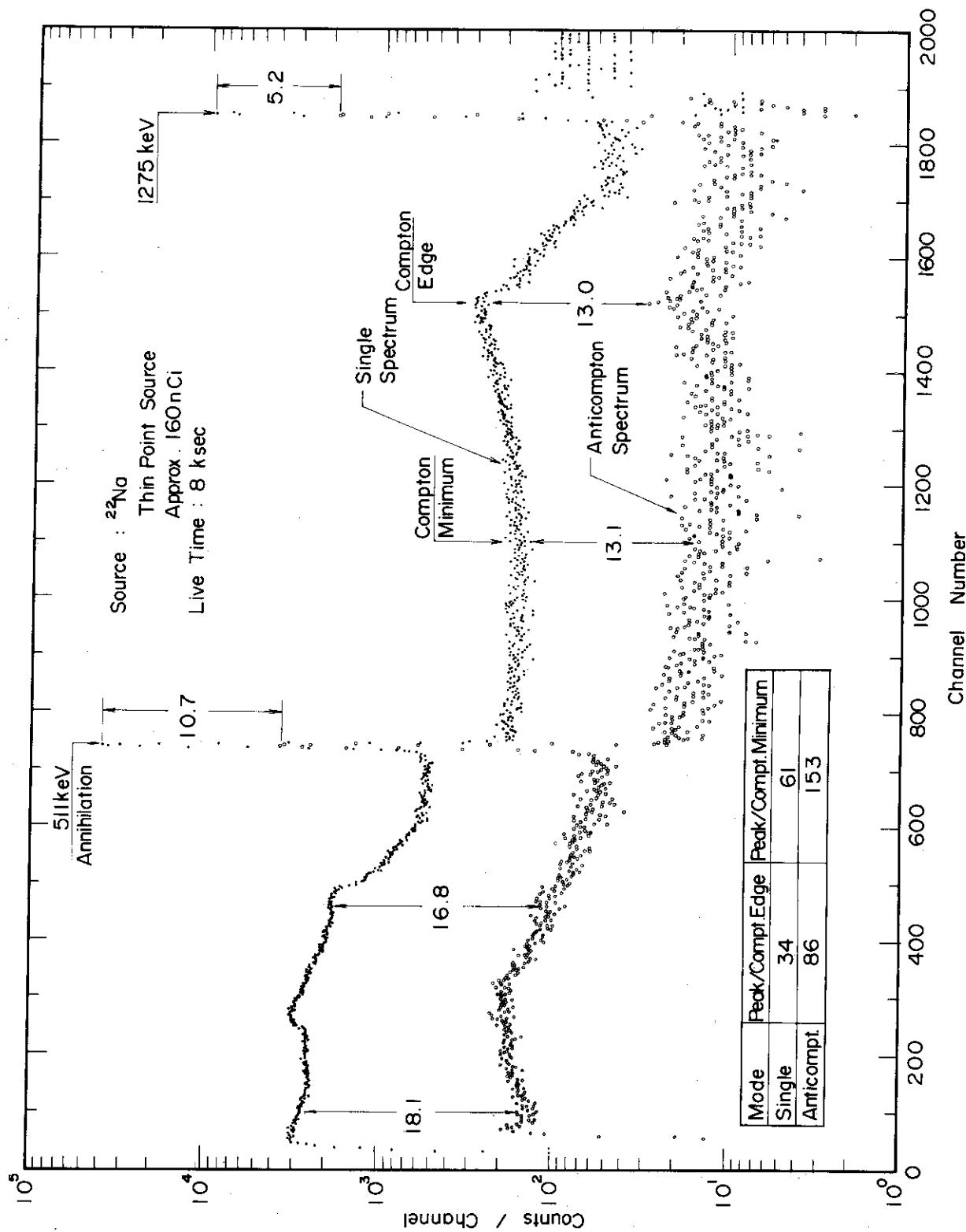
第16図  $^{137}\text{Cs}$  線源を用いた場合のシングル・スペクトルとアンチコントン・スペクトルの比較  
(線源: 薄い点線源, 線源位置: アンチコントンNaI(Tl)検出器の内部)



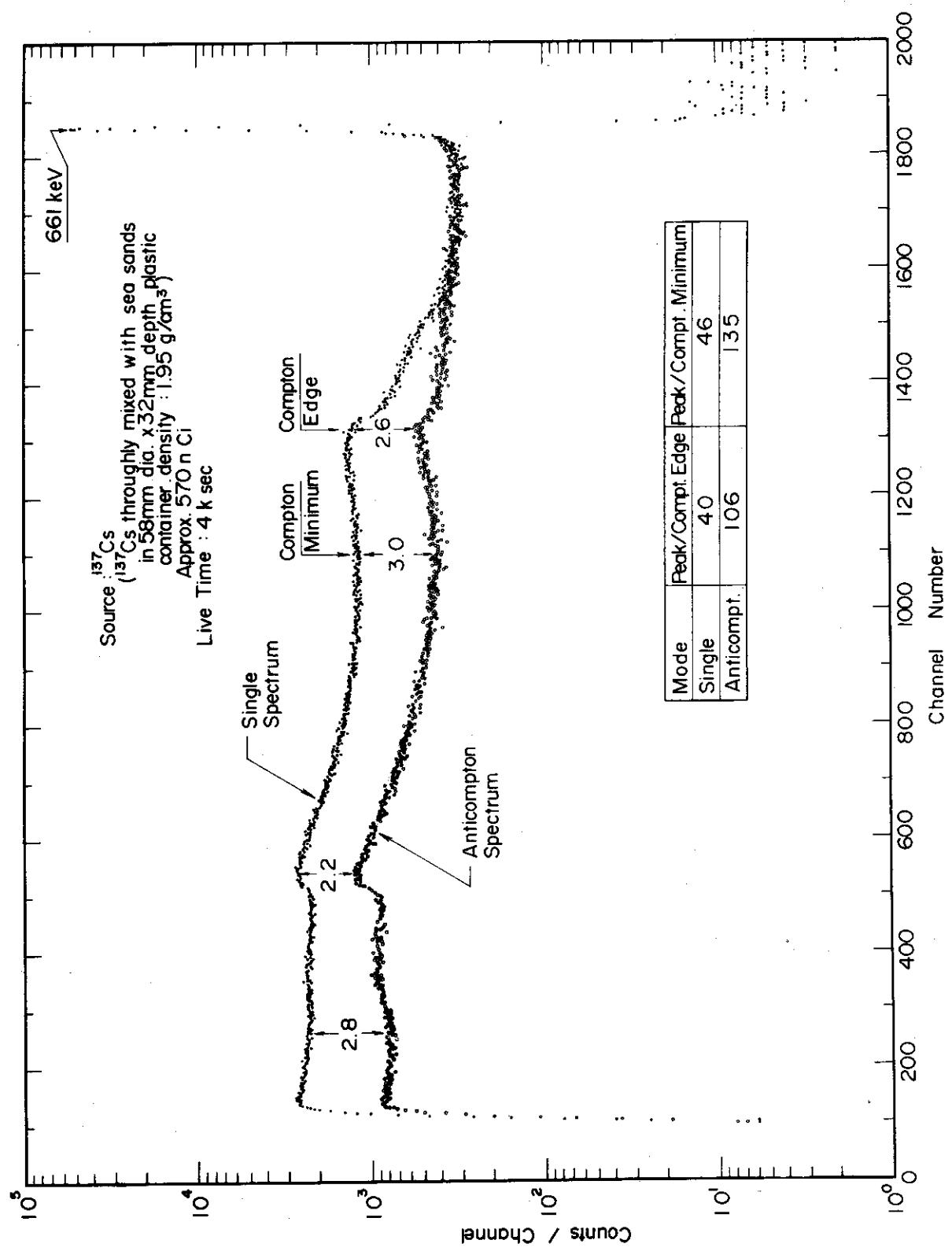
第17図  $^{54}\text{Mn}$  線源を用いた場合のシングル・スペクトルとアンチコンプトン・スペクトルの比較  
(線源: 薄い点線源, 線源位置: アンチコンプトン NaI(Tl) 検出器の内部)



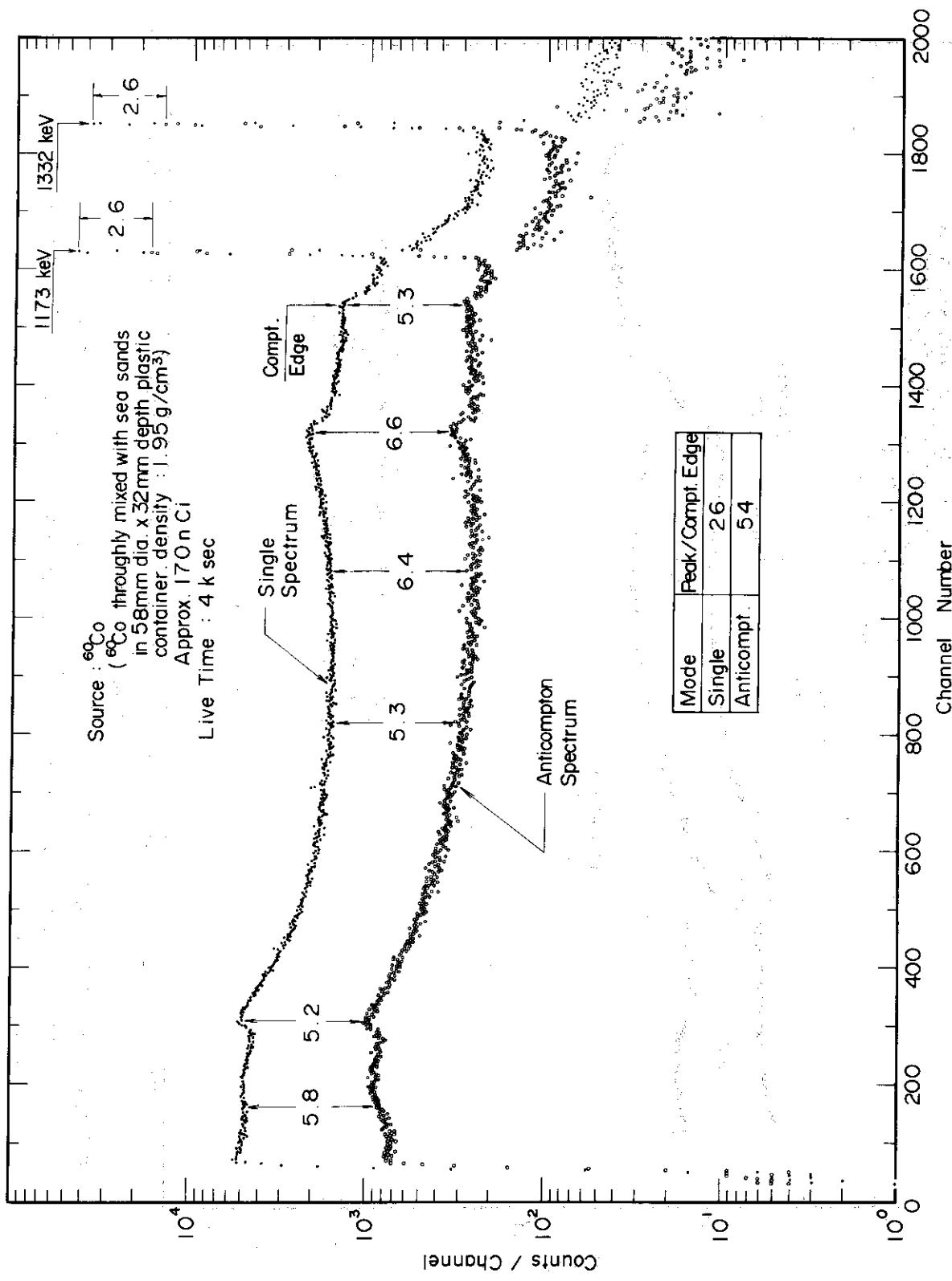
第18図  $^{60}\text{Co}$  線源を用いた場合のシングル・スペクトルとアンチコントラスト・スペクトルの比較  
(線源: 薄い点線源, 線源位置: アンチコントラスト  $\text{Na I}(\text{TI})$  検出器の内部)



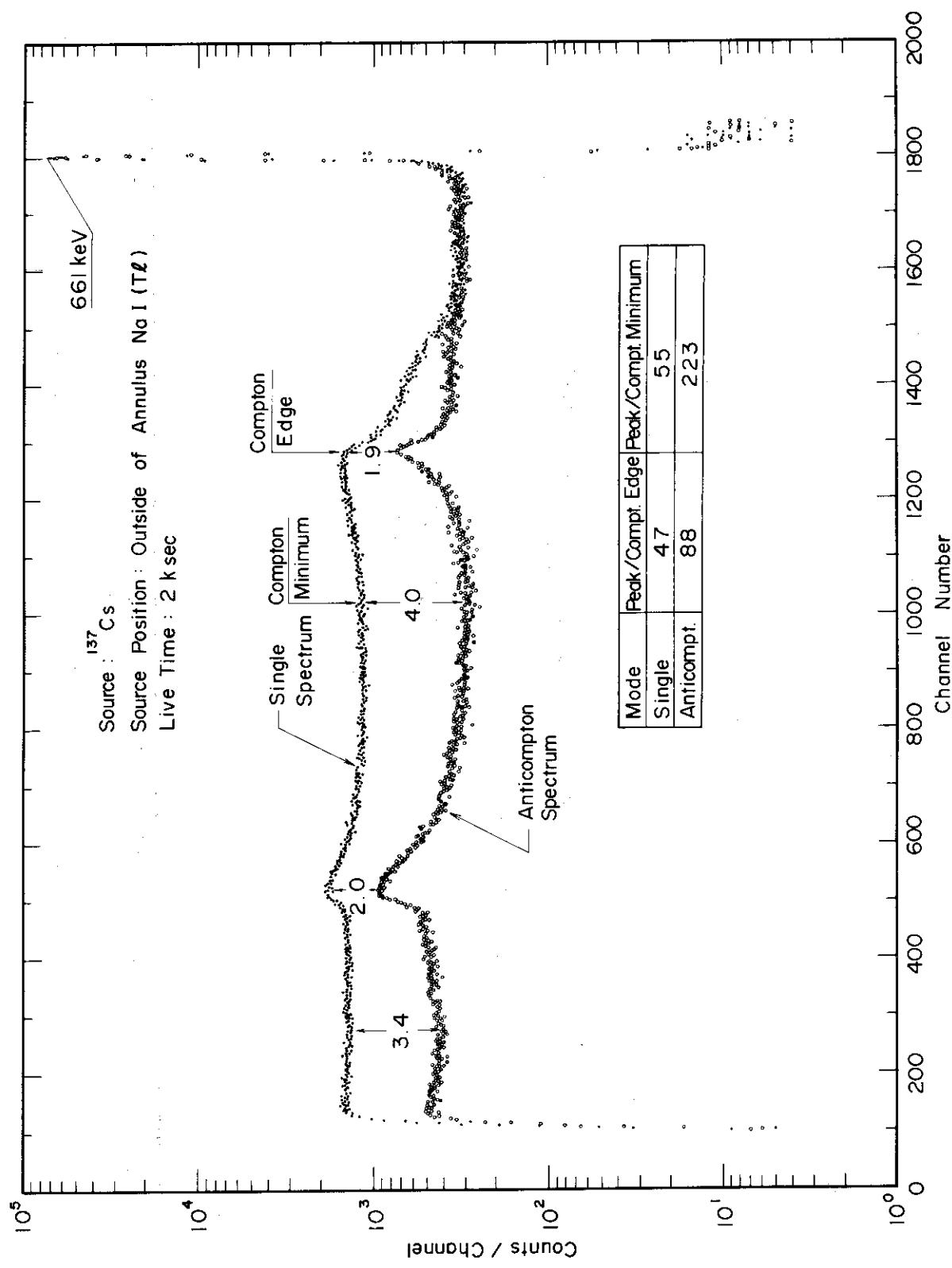
第19図  $^{22}\text{Na}$  線源を用いた場合のシングル・スペクトルとアンチコントン・スペクトルの比較  
(線源: 薄い点線源, 線源位置: アンチコントン $\text{Na I}(\text{Tl})$ 検出器の内部)



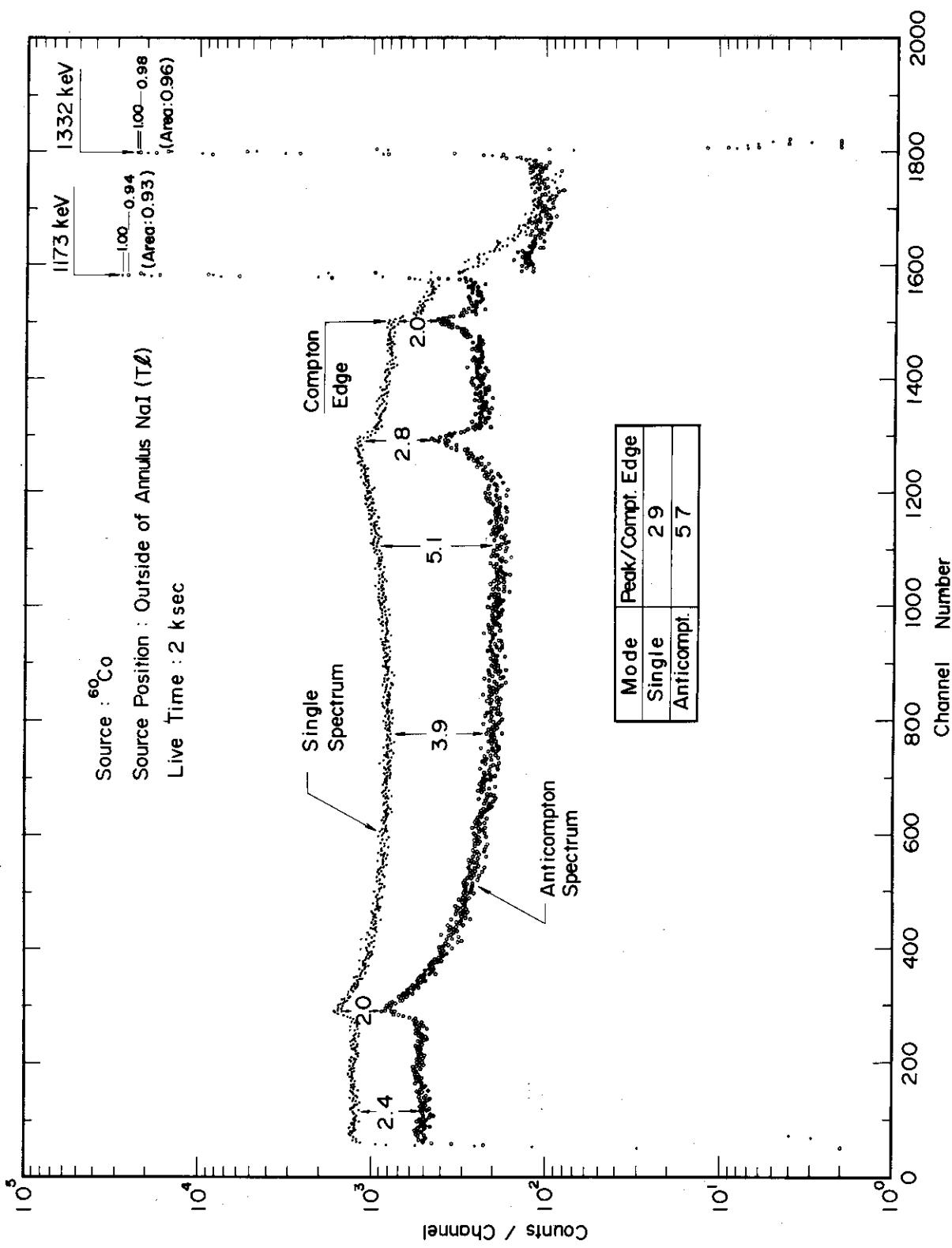
第20図  $^{137}\text{Cs}$  体積線源を用いた場合のシングル・スペクトルとアンチコンプトン・スペクトルの比較  
(線源: 5.8 mm dia.  $\times$  32mm thick (海岸砂), 線源距離: アンチコンプトン Na I (Tl))  
検出器の内部)



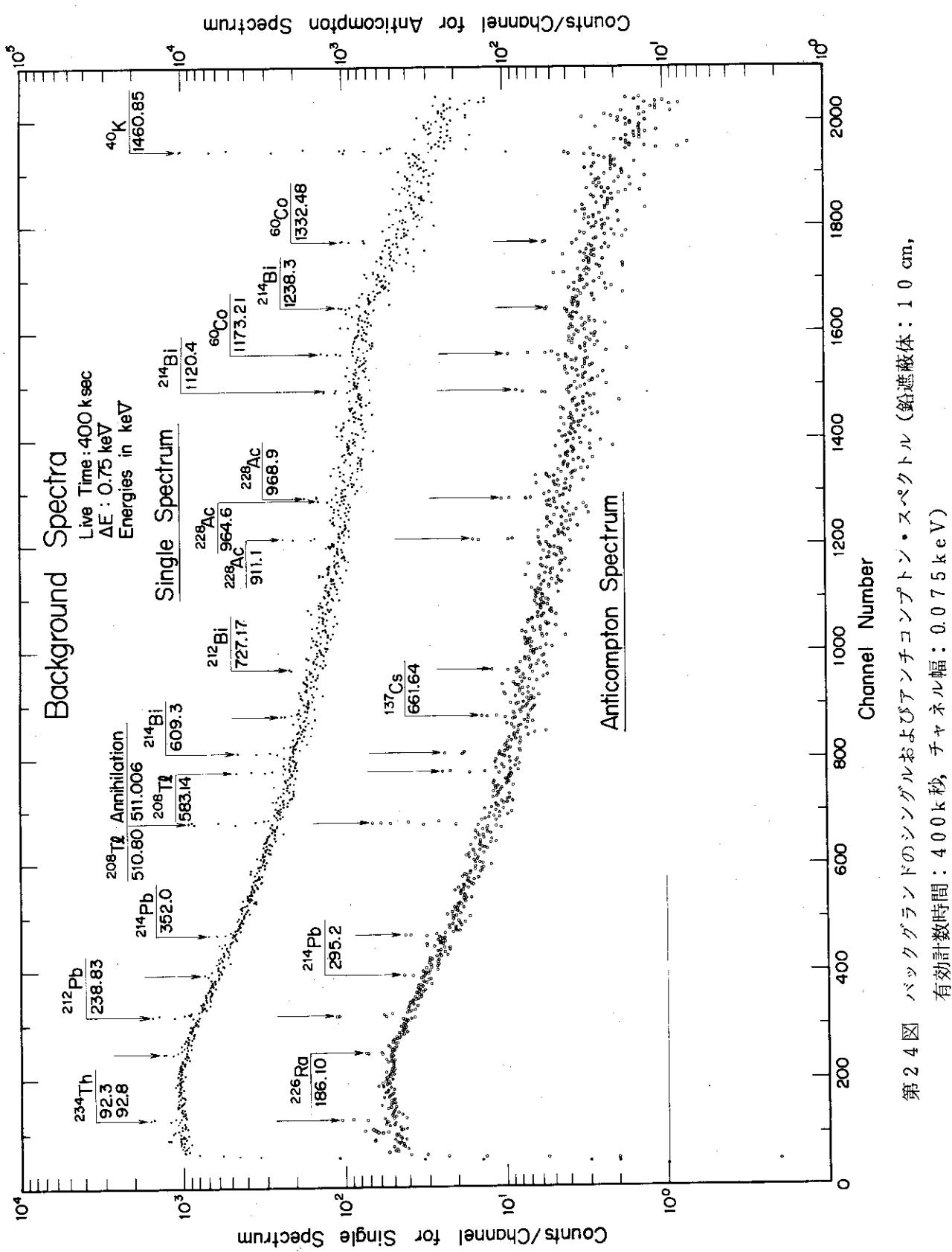
第21図  $^{60}\text{Co}$  体積線源を用いた場合のシングル・スペクトルとアンチコントン・スペクトルの比較 (線源:  
58 mm dia. × 32mm thick (海岸砂), 線源距離: アンチコントンNaI(Tl)検出器の内部)



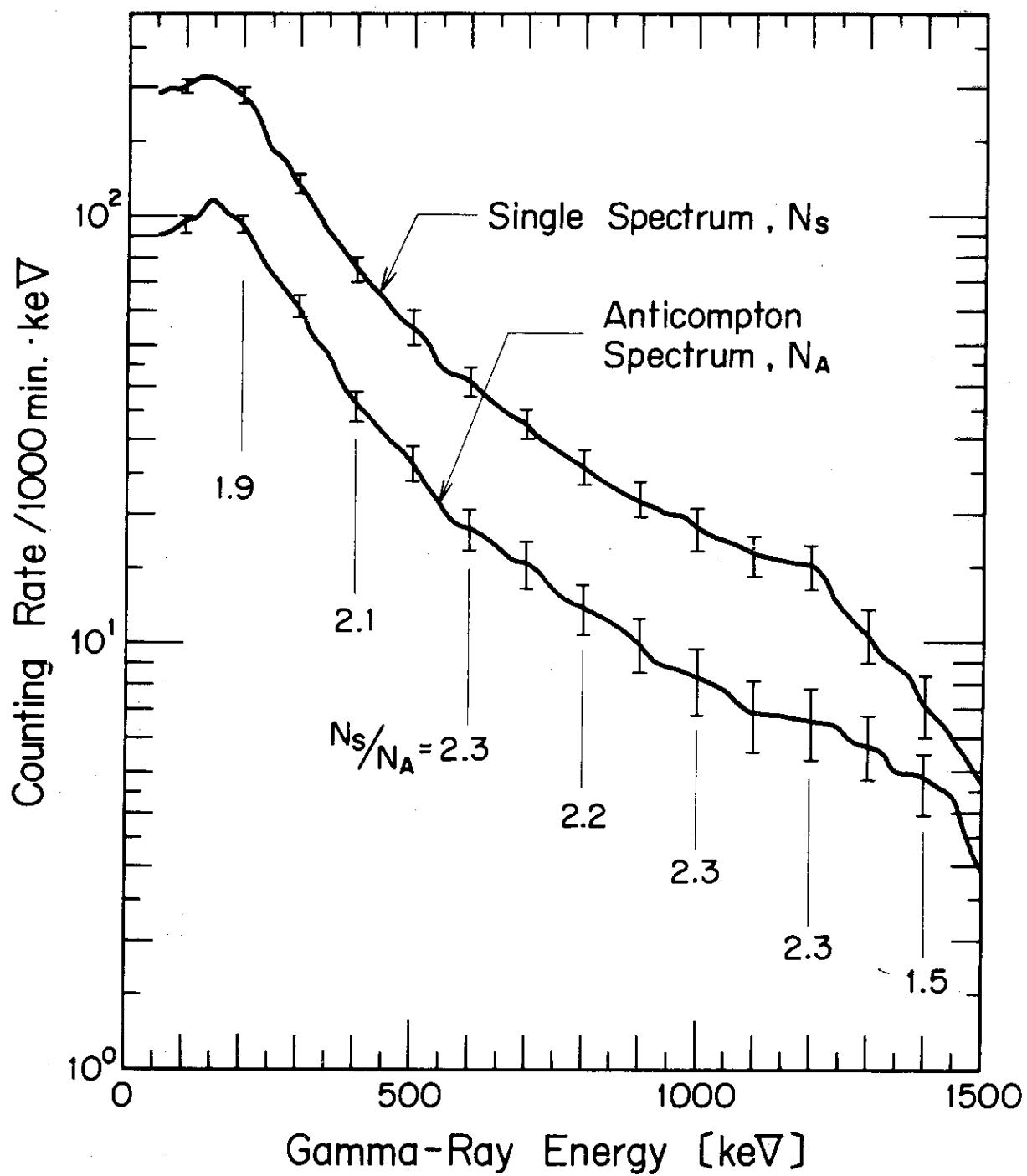
第22図  $^{137}\text{Cs}$  線源をアンチコンプトンNa I (T $\ell$ ) 検出器の外部に置いた場合のシングルおよびアンチコンプトン・スペクトルの比較



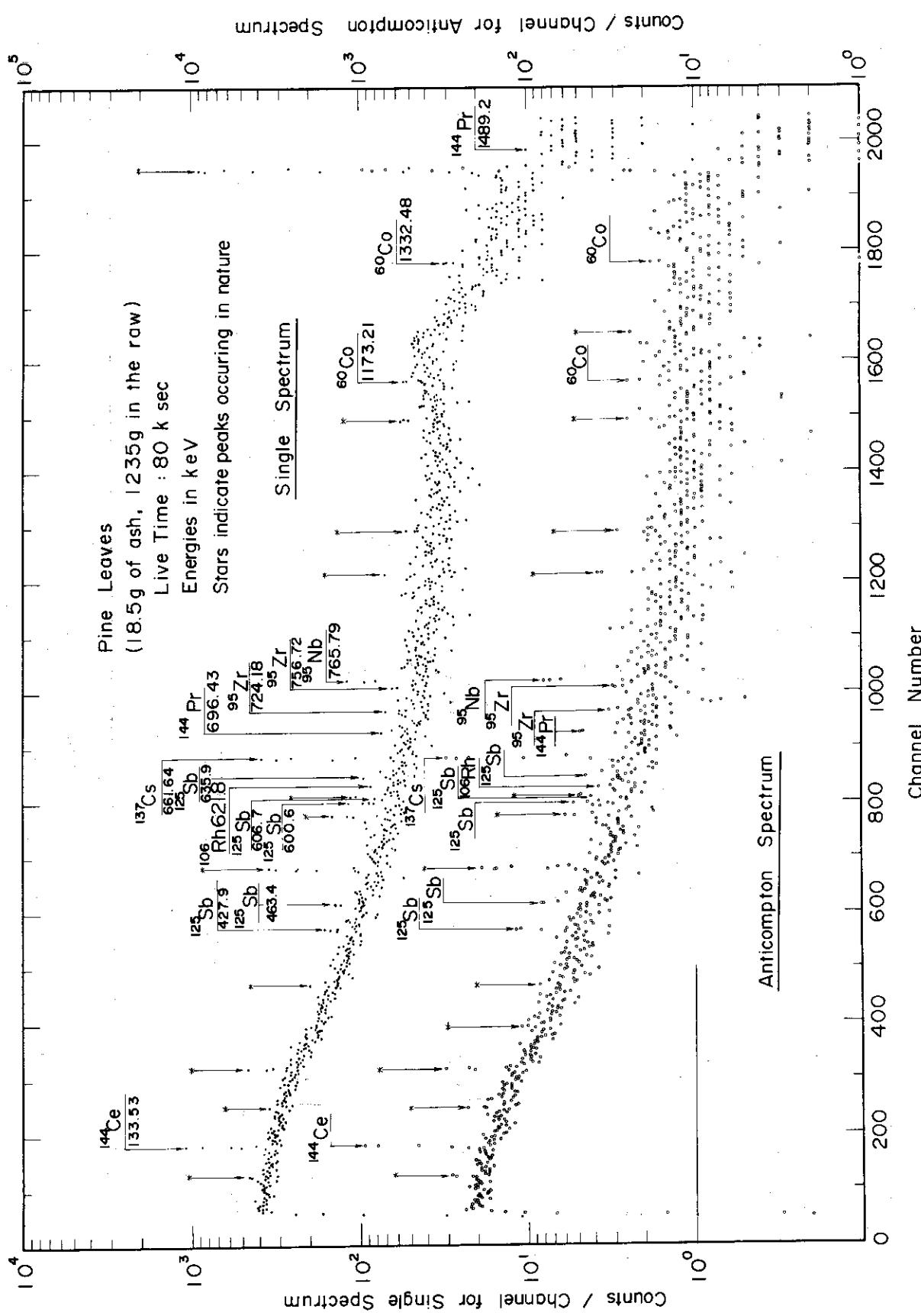
第23図  $^{60}\text{Co}$  線源をアンチコントラップトロンNaI (Tl) 検出器の外部に置いた場合のシングルおよびアンチコントラップトロン・スペクトルの比較



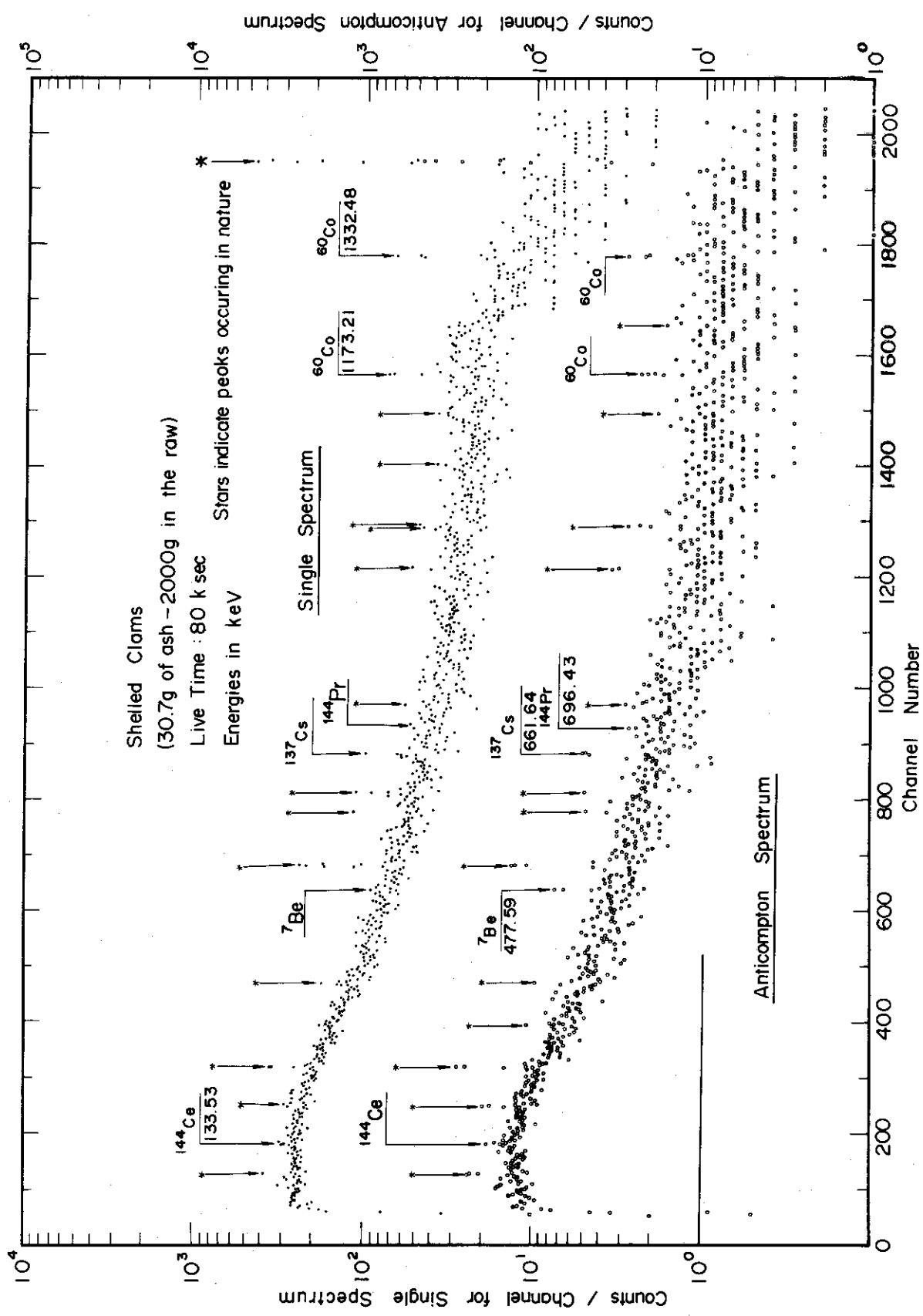
第24図 バックグラウンドのシングルおよびアンチコントン・スペクトル(鉛遮蔽体: 10 cm,  
 有効計数時間: 400 k秒, チャネル幅: 0.075 keV)



第25図 バックグラウンド連続スペクトル部の1000分計測時間、単位keVあたりのバックグラウンド計数率



第26図 松葉試料のシングルおよびアンチコントン・スペクトル[試料灰: 1.85 g  
(採取した松葉: 1.235 g), 有効計数時間: 80 k秒 (2.2時間)]



第27図 二枚貝試料のシングルおよびアンチコントラ・スペクトル〔試料灰：3.07 g  
(採集した生貝肉：2000 g)，有効計数時間：80 k秒 (22.2時間)〕

