

JAERI - M

85-190

高エネルギーガンマ線に対する
ゲルマニウム検出器のピーク検出効率測定

1985年11月

片桐 政樹

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 Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 印刷 いばらき印刷株式会社

高エネルギーガンマ線に対する
ゲルマニウム検出器のピーク検出効率測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
片 桐 政 樹

(1985 年 10 月 24 日 受 理)

4 種類 (p, γ) 反応と 1 種類 (n, γ) 反応を用いて 12 MeV までのガンマ線を発生させ、Two-line-method を用いてゲルマニウム検出器の高エネルギーガンマ線に対するピーク検出効率の測定を行った。(p, γ) 反応による検出効率と (n, γ) 反応による検出効率を比較した結果、良く一致することを確認した。この結果、(n, γ) 反応をもちいる方法は、容易に中性子線源によって高エネルギーガンマ線を発生することができるため、高エネルギーガンマ線に対するピーク検出効率を測定する方法として有効であることがわかった。

また、測定した検出効率を用いて、6.13 MeV の高エネルギーガンマ線を放出するガンマ線線源の校正及び ^{56}Co 線源のインテンシティの測定を行った。

Absolute peak detection efficiencies of a Ge(Li) detector
for high gamma-ray energies

Masaki KATAGIRI

Department of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 24, 1985)

Absolute peak detection efficiencies of a Ge(Li) detector for gamma-rays of 3.5 MeV to 12 MeV were measured using four (p, γ) reactions and a (n, γ) reaction. Two-line-method was used to obtain peak detection efficiencies. The efficiencies with the both cases are agreed very well. Utilization of (n, γ) reaction is, therefore, effective for measuring these efficiencies, because high energy gamma-rays can be generated easily by using a neutron source.

These results were applied to calibration of a gamma-ray standard source, emitting 6.13 MeV gamma-rays, and of intensities of ^{56}Co standard gamma-ray source.

Keyword : Detection Efficiency, Germanium Detector, Nuclear Reaction,
High Energy Gamma-ray, Two-line-method, Calibration

目 次

1. まえがき	1
2. 検出効率の測定方法	2
3. 測定装置の構成	3
4. 高エネルギーガンマ線発生装置の構成	4
5. ガンマ線ピーク検出効率の測定	6
5.1 (p, γ) 反応を使用したピーク検出効率の測定	6
5.2 (n, γ) 反応を使用したピーク検出効率の測定	7
6. 応用測定	15
6.1 (α, γ) 反応を用いた 6 MeV ガンマ線発生線源の較正	15
6.2 ^{56}Co 線源の インテンシティ測定	15
7. 測定結果の評価	18
8. まとめ	20
謝 辞	20
参考文献	20

Contents

1. Introduction	1
2. Measuring method of peak detection efficiencies	2
3. Construction of measuring equipments	3
4. Construction of high energy gamma-ray generating sources	4
5. Measurements of gamma-ray peak detection efficiencies	6
5.1 Measurements of gamma-ray peak detection efficiencies using (p, γ) reactions	6
5.2 Measurement of gamma-ray peak detection efficiencies using a (n, γ) reaction	7
6. Applied measurements	15
6.1 Calibration of a 6 MeV gamma-ray source	15
6.2 Measurement of intensities of a Co-56 gamma-ray source	15
7. Considerations of measuring results	18
8. Conclusions	20
Acknowledgments	20
References	20

1. ま え が き

ゲルマニウム検出器はそのエネルギー分解能の良い特徴を生かして、種々のガンマ線スペクトロスコーピーに巾広く使用されている。最近、バンデグラフやライナック等の加速器による核反応を使用した測定試験や原子炉における熱中性子捕獲反応を使用した測定試験の際、核反応によって発生する3 MeV以上の高エネルギーガンマ線の定量分析にゲルマニウム検出器が使用されるようになった。定量分析を行うには、ゲルマニウム検出器のピーク検出効率をあらかじめ校正しておく必要があるが、通常低エネルギー領域(0.1~3 MeV)の校正に良く使用されているラジオアイソトープ(RI)ガンマ線標準線源の中には、3 MeV以上のガンマ線を発生するものとして⁶⁶Ga等の半減期が短い核種があるのみで実用的に使用できるものはない。

校正に必要な高エネルギーガンマ線を発生させる方法として(p, γ)反応及び(n, γ)反応等の核反応を用いた方法があり、発生した高エネルギーガンマ線を用いてピーク検出効率を求めることが可能である。

このため、ピーク検出効率の測定に適している核反応として、4種類の(p, γ)反応と1種類の(n, γ)を用い、12 MeVまでの高エネルギーガンマ線を発生させてゲルマニウム検出器のピーク検出効率の測定を行い、両者の結果を比較した。

また、測定したピーク検出効率を用いて、6.13 MeVの高エネルギーガンマ線を放出する¹²C(α , γ)¹⁶Oガンマ線線源の校正及び⁵⁶Co線源の校正・評価を行った。

2. 検出効率の測定方法

核反応によって発生する高エネルギーガンマ線を用いて、ゲルマニウム検出器のピーク検出効率を求める方法としては Two-line method を使用した。この方法においては、使用する核反応として、標準線源等を用いて精度良くピーク検出効率を求めることができる低エネルギー領域と測定する高エネルギー領域との2つの領域にガンマ線を放出する核反応で、かつ、放出されるガンマ線のインテンシティがすでに良く知られているものを選択する。発生したガンマ線を測定し、スペクトル解析によって得た低エネルギー側及び高エネルギー側の2つのピーク計数率の比 (N_h/N_l)、ガンマ線のインテンシティの比 (B_h/B_l) 及びあらかじめ求めておいた低エネルギー側ガンマ線ピークの検出効率 (E_l) をもとに高エネルギー側のピークの検出効率 (E_h) を

$$E_h = (N_h / N_l) \cdot E_l / (B_h / B_l)$$

によって求める。

ピーク検出効率の測定に使用した (p, γ) 反応は、 $^{23}\text{Na} (p, \gamma)$ ^{24}Mg , $^{39}\text{K} (p, \gamma)$ ^{40}Ca , $^{14}\text{N} (p, \gamma)$ ^{15}O , $^{27}\text{Al} (p, \gamma)$ ^{28}Si の4種類である。また、(p, γ) 反応による測定結果と比較するため、中性子捕獲反応である $^{35}\text{Cl} (n, \gamma)$ ^{36}Cl を使用してガンマ線ピーク検出効率の測定を行った。

3. 測定装置の構成

測定に使用したゲルマニウム検出器は原研において製作した 54 cm^3 同軸型 Ge(Li) 検出器であり、検出素子の大きさは、直径 4.1 cm、長さ 3.8 cm である。

本検出器の 3.5 MeV までのガンマ線に対するピーク検出効率¹⁾は、 ^{57}Co 、 ^{133}Ba 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{88}Y 及び ^{56}Co の 8 種類のガンマ線標準線源を用いて測定した。基本性能としては、1.33 MeV ガンマ線に対する線源-検出器間距離 25 cm の場合の絶対ピーク検出効率²⁾が 1.0×10^{-4} であり、半値巾エネルギー分解能は 2.2 KeV であった。

また、測定に使用した電子回路のブロック図を Fig. 3.1 に示す。検出器のバイアス電圧として 2500 V を印加し、スペクトロスコピーアンプのパルス整形定数は $2 \mu\text{sec}$ で使用した。波高分析装置には、4096 チャンネルの変換性能を持つ ND-50/50 を使用した。得られたガンマ線スペクトルの解析は波高分析装置に付属した小型計算機 PDP-8/L を用い、スペクトル解析プログラムを用いてピークエネルギー及びピーク計数率を求めた。

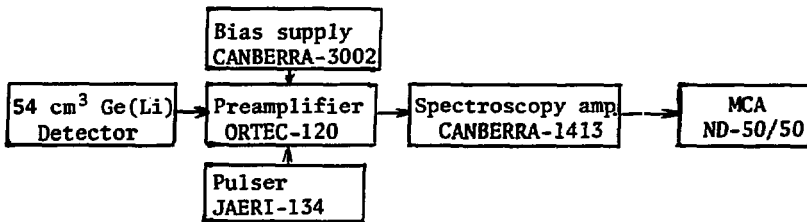


Fig. 3.1 Schematic block diagram of electronics used in this experiment

4. 高エネルギーガンマ線発生装置の構成

(p, γ) 反応を用いて高エネルギーガンマ線を発生させるために必要なプロトンを加速する装置として原研の 2 MeV バンデグラフ装置を使用した。

プロトンを照射しガンマ線を発生するターゲットは、0.1 mm 厚のタンタル板に NaCl, Al 及び KCl をそれぞれ 50 $\mu\text{g}/\text{cm}$ の厚さに蒸着して作製した。また、窒素 (N) については、ボロンナイトライド (BN) の微粉を 0.1 mm 厚タンタル板に均一に塗布して作製した。

ターゲットを保持するホルダーの構造図を Fig. 4.1 に示す。2 MeV バンデグラフ装置によって加速されたプロトンビームを直径 8 mm の円形のスリットによって絞った後、直径 9 mm のターゲットに照射した。照射したプロトンビームの平均電流は 1 μA から 3 μA であり、照射量はカレントインテグレータによって求めた。

また、(p, γ) 反応によって高エネルギーガンマ線を得るには正確なプロトンの加速エネルギーを得る必要があるため、2 MeV バンデグラフを使用する前にプロトンレゾナンスを用いて加速エネルギーの較正を行った。用いた核反応は、 $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ の 1318-KeV の共鳴エネルギー断面積ピークである。測定結果を Fig. 4.2 に示す。この結果、加速エネルギーと実際のエネルギーとは 4 KeV の差があることがわかり以後の測定試験にこの較正值を用いてプロトン加速エネルギーを決めた。

一方、検証・評価に用いた熱中性子による (n, γ) 中性子捕獲反応によって高エネルギーガンマ線を発生する装置の構成図を Fig. 4.3 に示す。中性子源としては、Am-Be 10 mCi 線源を用い、高速中性子を熱中性子化するために 10 cm \times 10 cm のグラファイトブロックの中に収めて使用した。ターゲットとしては、NaCl を直径 6 cm、長さ 2 cm のプラスチックの容器に入れて用い、このグラファイトブロックに密着させ、周囲を図に示すように 40 cm \times 40 cm のボロン入りパラフィンブロックで覆って測定を行った。

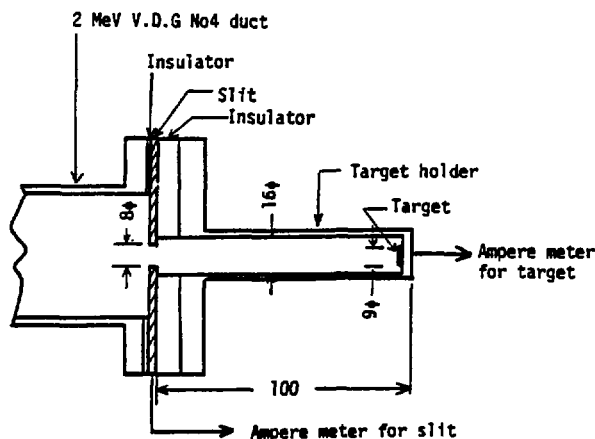


Fig. 4.1 Dimension of Target holder

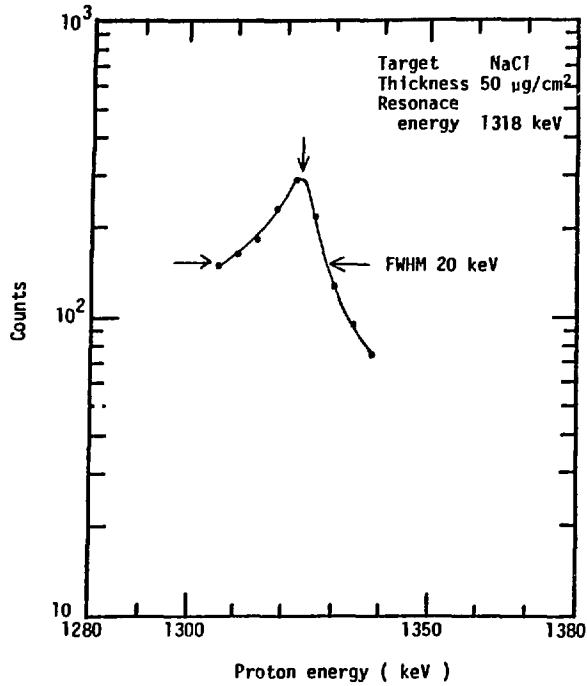


Fig. 4.2 Measured excitation function in the region of the 1318 keV (p,γ) resonance in ^{28}Si

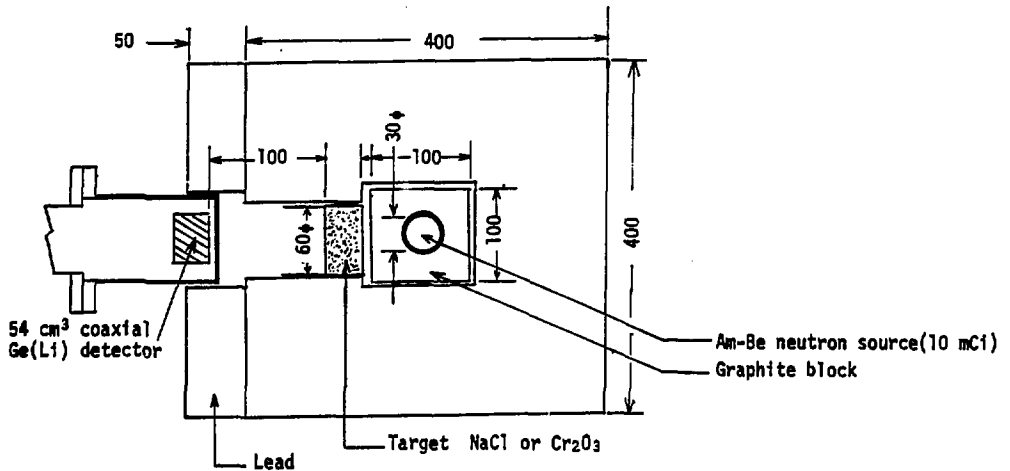


Fig. 4.3 High energy gamma-ray source using an Am-Be neutron source for the peak detection Efficiency of 54 cm³ coaxial Ge(Li) detector.

5. ガンマ線ピーク検出効率の測定

Two-line method によって、高エネルギーガンマ線に対するピーク検出効率を求める際に問題になることは、プロトンビームの入射方向によって低エネルギー側ガンマ線と高エネルギー側ガンマ線とのインテンシティに角度依存性が生ずることである。このため、核反応の角度分布の影響を最も少なくするため、ガンマ線の検出器への入射角度をプロトンビームに対して55度に設定して測定を行った。

また、(n, γ) 反応については、入射方向に依存しないため、 θ 度方向に設定して測定を行った。ターゲットからゲルマニウム検出器の前面までの距離はいずれの測定試験の場合も10 cmとした。

5.1 (p, γ) 反応を使用したピーク検出効率の測定

最初に、 $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Si}$ 反応を使用してゲルマニウム検出器のピーク検出効率の測定を行った。測定に用いたプロトン共鳴エネルギーは Table 5.1 に示すように、1020 KeV, 1318 KeV, 1395 KeV 及び 1417 KeV の4種類であった。これらの共鳴エネルギーの断面積は大きくかつ発生する低エネルギー側ガンマ線及び高エネルギー側ガンマ線のインテンシティも良く知られている。また、各反応によって発生する低エネルギーガンマ線と高エネルギーガンマ線とのインテンシティの比を Table 5.1 に示す。これらの反応によって発生する高エネルギーガンマ線を使用して、3.5 MeV から 12 MeV のガンマ線に対するゲルマニウム検出器のピーク検出効率を測定した。

プロトン共鳴エネルギーが1020 KeV, 1318 KeV, 1395 KeV 及び 1417 KeV について測定したガンマ線スペクトル図を Fig. 5.1, Fig. 5.2, Fig. 5.3 及び Fig. 5.4 に示す。測定時間は4000秒から6400秒であった。

また、各エネルギーの間を補完するために $^{39}\text{K}(p, \gamma)^{40}\text{Ca}$ 反応については1344 KeVの共鳴エネルギーで、 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ については、1060 KeVの共鳴エネルギーで及び $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ については、767 KeV と 1317 KeV の2つの共鳴エネルギーで、高エネルギーガンマ線を発生してガンマ線スペクトルを測定した。各反応によって測定されたガンマ線スペクトル図を Fig. 5.5, Fig. 5.6, Fig. 5.7 及び Fig. 5.8 に示す。

これらの核反応によって測定されたガンマ線スペクトルを解析し、Two-line method を用いてフルピーク検出効率を求めた。また、1.8 MeV 以上のガンマ線については、シングルエスケープ及びダブルエスケープピークについても検出効率を求めた。54 cm³ Ge(Li) 検出器の高エネルギーガンマ線に対するフルピーク検出効率を Table 5.2 に示す。フルピーク検出効率について低エネルギー側も含めてプロットした図を Fig. 5.9 に示す。さらに、シングルエスケープピーク検出効率及びダブルエスケープピーク検出効率についてプロットした図を Fig. 5.10 に示す。

5.2 (n, γ) 反応を使用したピーク検出効率の測定

(p, γ) 反応を用いて測定したピーク検出効率を検証・評価するため、(n, γ) 反応を用いて測定を行った。使用した反応は $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 反応であり、前章で述べた装置によってガンマ線を発生させ高エネルギーガンマ線に対するピーク検出効率を測定した。測定時間 60000 秒で求めたガンマ線スペクトル図を Fig. 5.11 に示す。ピーク検出率は、Table 5.3 に示す各ガンマ線エネルギーに対するインテンシティをもとに、1751 KeV 及び 1759 KeV のガンマ線を低エネルギー側ピークとして Two-line method を用いて求めた。測定したフルピーク検出効率を Table 5.4 に示す。4 MeV から 9 MeV までの 5 本のガンマ線ピークについて求めることができた。

Table 5.1 (p, γ) reactions used for calibration in this experiment

Reaction	Photon energy	γ -ray 1	γ -ray 2	Intensity ratio (γ -2/ γ -1)
$^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$	$E_p=1020$ KeV	4237 KeV	8434 KeV	1.33 ①)
	$E_p=1318$ KeV	1369 KeV	11588 KeV	0.98 2)
	$E_p=1395$ KeV	3866 KeV	7795 KeV	1.01 2)
	$E_p=1417$ KeV	2754 KeV	8928 KeV	0.99 2)
$^{39}\text{K}(p, \gamma)^{40}\text{Ca}$	$E_p=1344$ KeV	3905 KeV	5738 KeV	1.00 ①)
$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$	$E_p=1060$ KeV	3046 KeV	5240 KeV	1.05 2)
$^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$	$E_p=767$ KeV	2837 KeV	7706 KeV	0.99 ①)

Table 5.2 Peak detection efficiency of 54cm³ Ge(Li) detector measured using four (p, γ) reactions

Gamma-ray Energy	Peak detection Efficiency	Error	Fitting value
5240 KeV	1.08x10 ⁻⁴	2.2x10 ⁻⁵	1.17x10 ⁻⁵
5738 KeV	9.98x10 ⁻⁵	3.0x10 ⁻⁵	1.01x10 ⁻⁵
7706 KeV	5.13x10 ⁻⁵	7.3x10 ⁻⁶	5.51x10 ⁻⁶
7795 KeV	5.46x10 ⁻⁵	5.5x10 ⁻⁶	5.36x10 ⁻⁵
8434 KeV	4.75x10 ⁻⁵	4.0x10 ⁻⁶	4.41x10 ⁻⁵
8982 KeV	3.72x10 ⁻⁵	1.7x10 ⁻⁶	3.79x10 ⁻⁶
11588 KeV	1.57x10 ⁻⁵	1.3x10 ⁻⁶	1.68x10 ⁻⁵

Table 5.3 Energy and relative intensities of γ -rays from ³⁵Cl(n, γ)³⁶Cl reaction

Photon Energy (KeV)	Intensity ³⁾ (γ / 100 captures)
1951	18.7
1959	12.1
4979	3.62
5715	5.35
7413	10.2
7790	8.43
8579	2.79

Table 5.4 Peak detection efficiency of 54cm³ Ge(Li) detector measured using ³⁵Cl(n, γ)³⁶Cl reaction

Gamma-ray Energy	Peak detection Efficiency	Error	Fitting value
4979 KeV	1.18x10 ⁻⁴	8.9x10 ⁻⁶	1.23x10 ⁻⁴
5715 KeV	1.05x10 ⁻⁴	7.4x10 ⁻⁶	9.92x10 ⁻⁵
7413 KeV	6.80x10 ⁻⁵	3.6x10 ⁻⁶	6.10x10 ⁻⁵
7790 KeV	5.28x10 ⁻⁵	4.0x10 ⁻⁶	5.47x10 ⁻⁵
8579 KeV	4.16x10 ⁻⁵	5.6x10 ⁻⁶	4.36x10 ⁻⁵

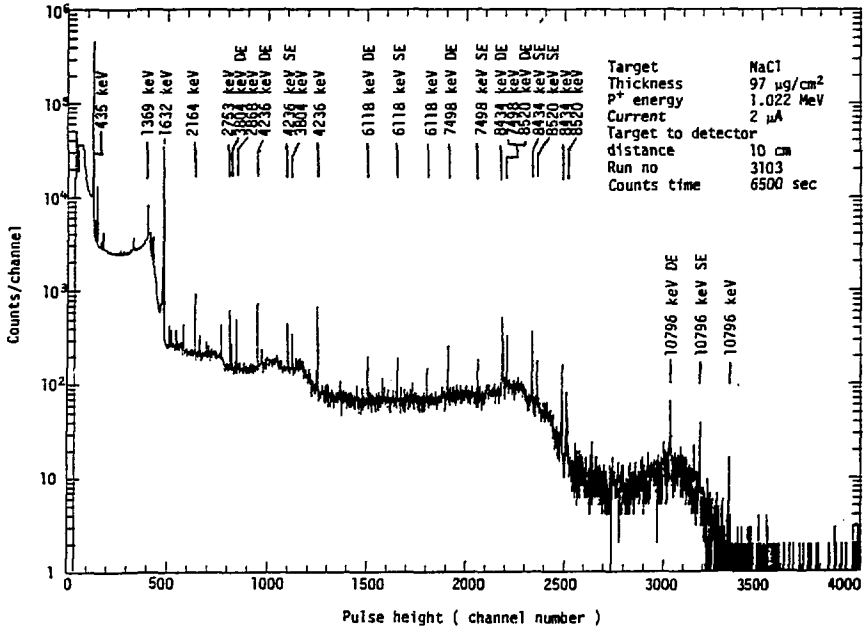


Fig. 5.1 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ at a bombarding energy of 1.022 MeV

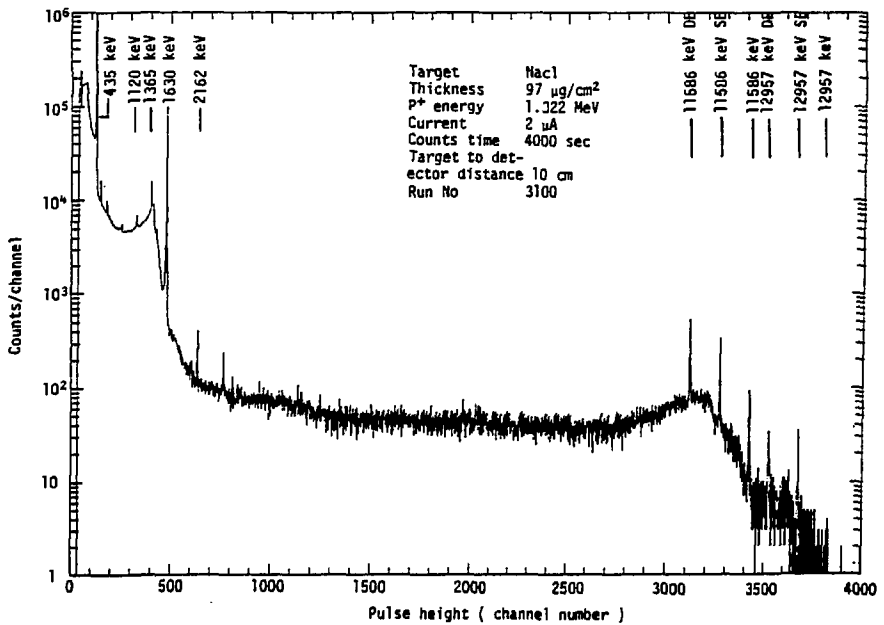


Fig. 5.2 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ at a bombarding energy of 1.322 MeV

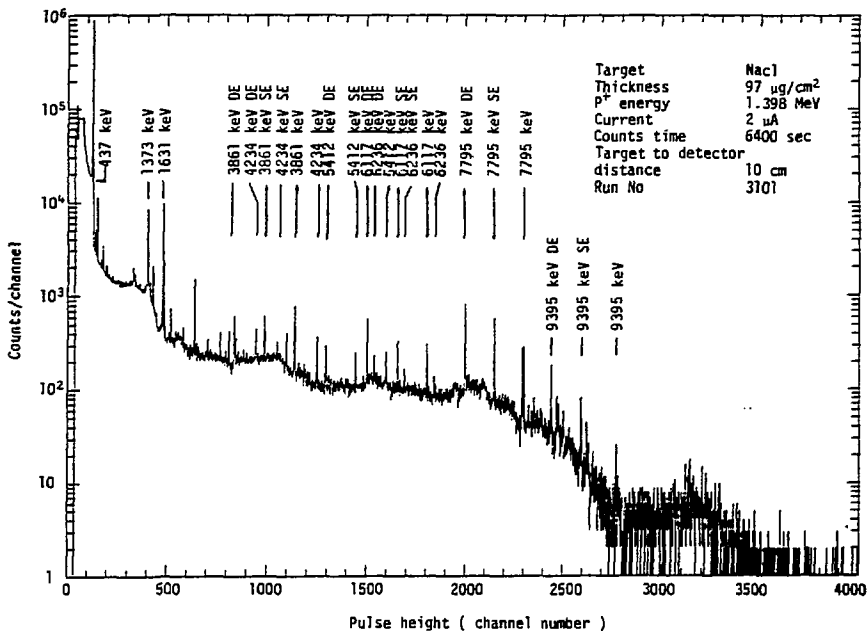


Fig. 5.3 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ at a bombarding energy 1.398 MeV

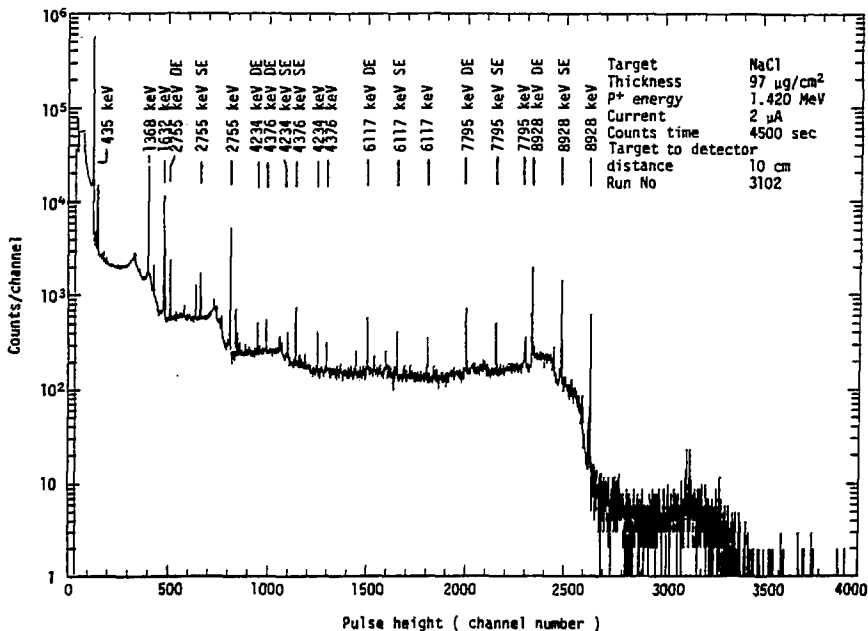


Fig. 5.4 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ at a bombarding energy of 1.420 MeV

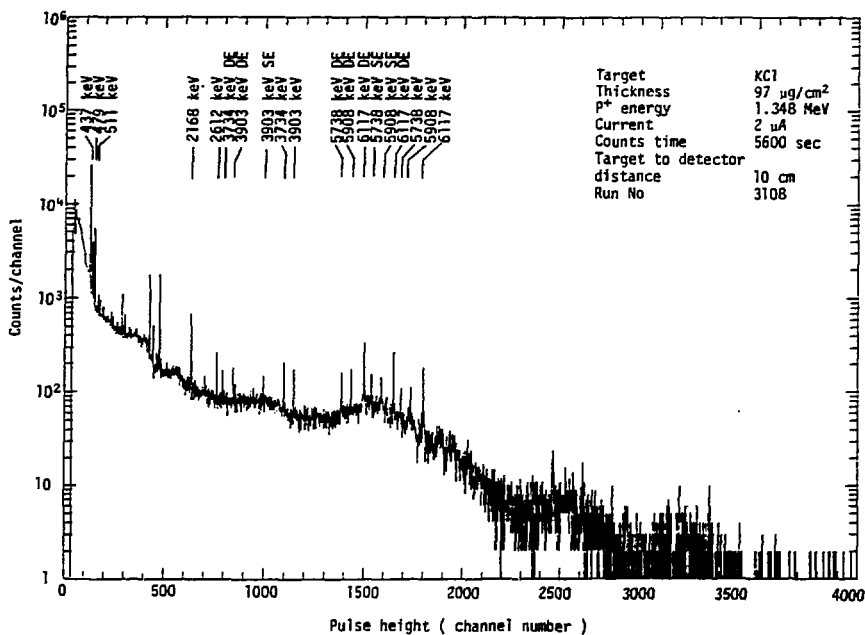


Fig. 5.5 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{39}\text{K}(p,\gamma)^{40}\text{Ca}$ at a bombarding energy of 1.348 MeV

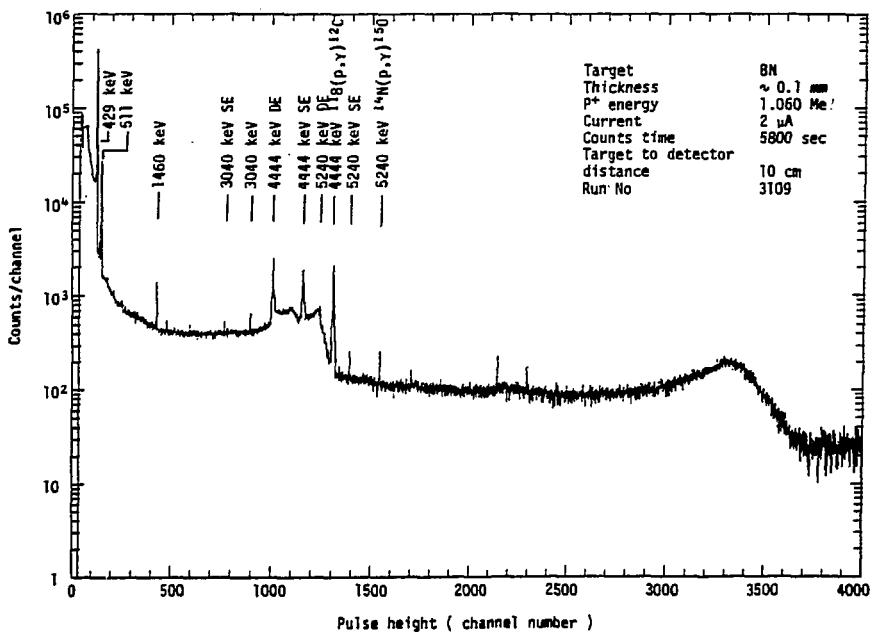


Fig. 5.6 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{11}\text{B}(p,\gamma)^{12}\text{C}$ and the reaction $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ at a bombarding energy of 1060 keV

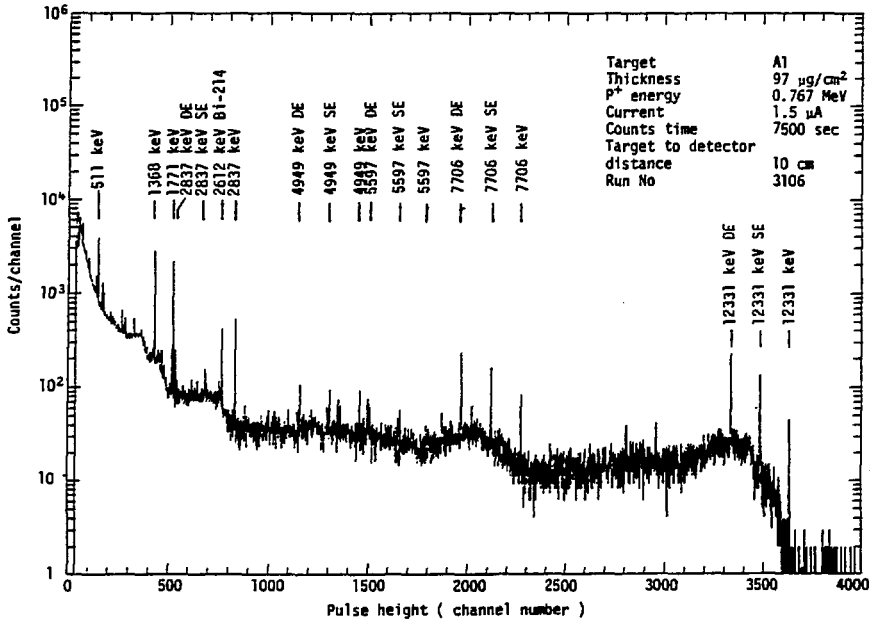


Fig. 5.7 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ at a bombarding energy of 0.767 MeV

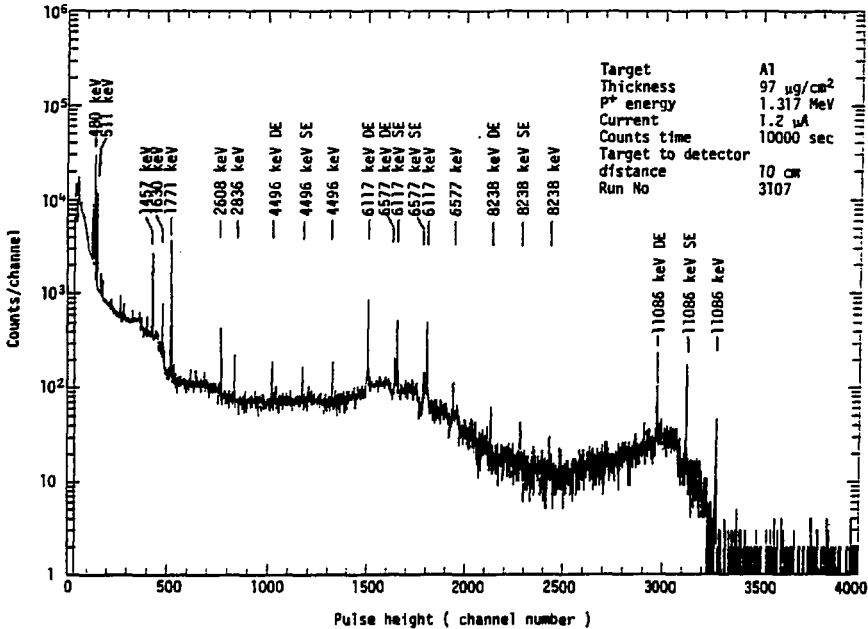


Fig. 5.8 Gamma-ray spectrum resulting from the reaction $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ at a bombarding energy of 1.317 MeV

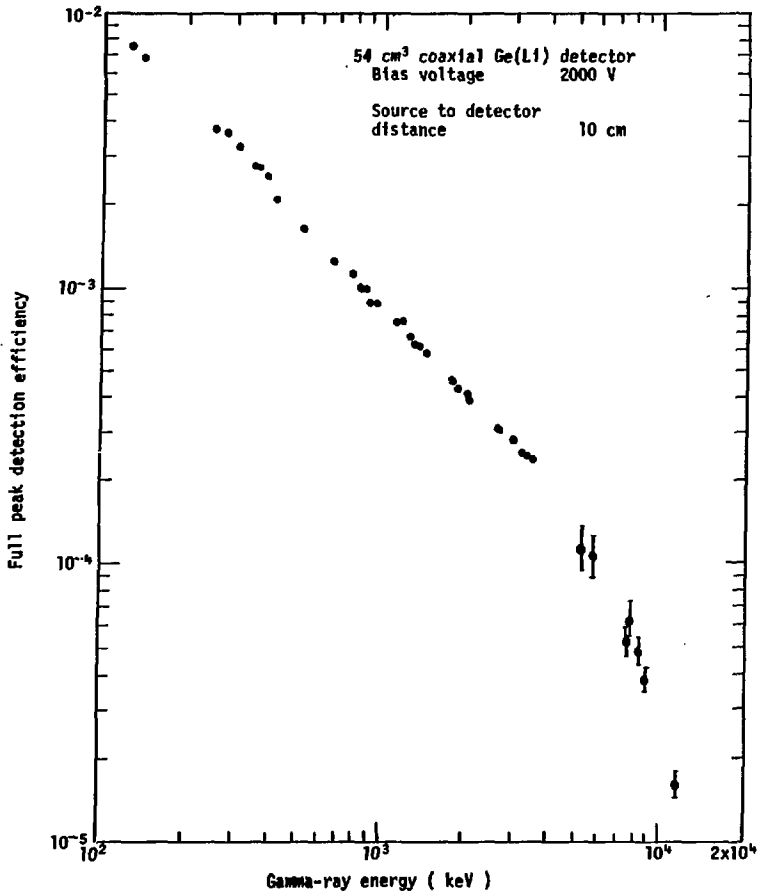


Fig. 5.9 Full peak detection efficiency (Log-Log plot) of 54 cm³ coaxial Ge(Li) detector measured at source to detector distance 10 cm.

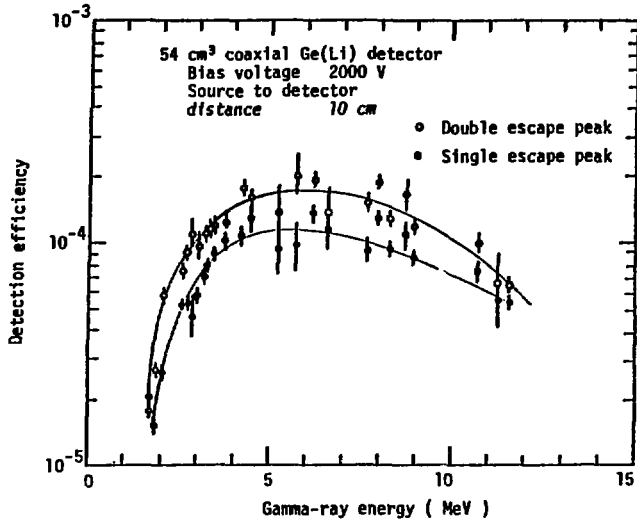


Fig. 5.10 Single escape peak and double escape peak detection efficiency of a 54 cm³ Ge(Li) detector measured at source to detector distance 10 cm

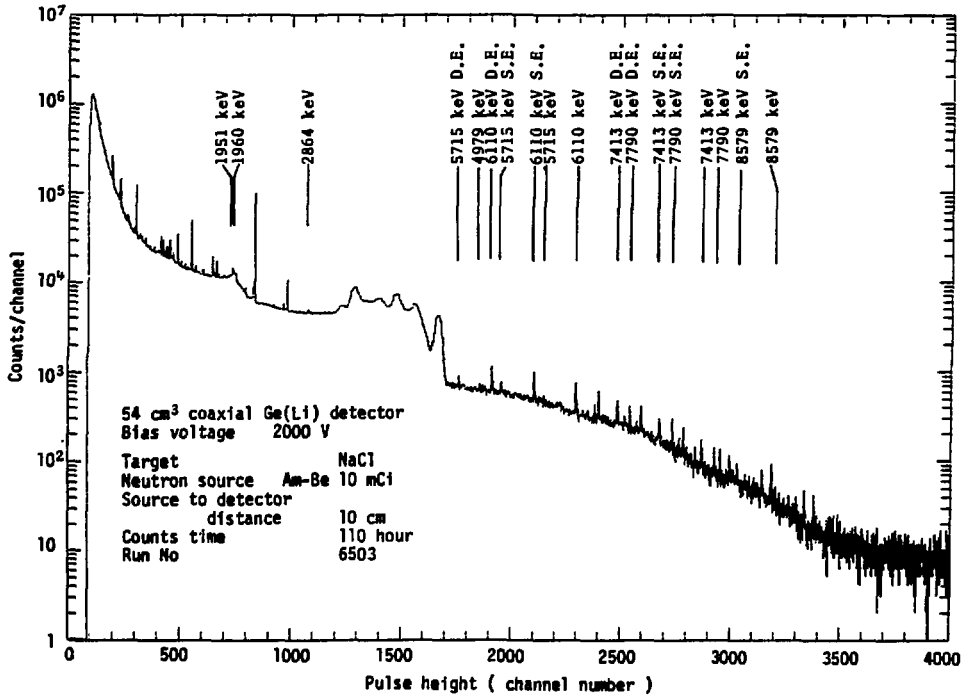


Fig. 5.11 Gamma-ray spectrum of 54 cm³ Ge(Li) detector resulting from the reaction ³⁵Cl(n, γ)³⁶Cl

6. 応用測定

測定した高エネルギーガンマ線に対するゲルマニウム検出器のピーク検出効率を用いて、6.13 MeVの高エネルギーガンマ線を放出する $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ ガンマ線線源の校正を行うと共に ^{56}Co 線源のインテンシティ測定を行った。

6.1 (α, γ) 反応を用いた 6 MeV ガンマ線発生線源の校正

^{244}Cm 線源から放出されるアルファ線と炭素との核反応 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ を用いて、6.13 MeVガンマ線を放出する線源があり、この線源のガンマ線放出率を測定した。線源とゲルマニウム検出器との距離を10 cmとし、測定時間60000秒で測定したガンマ線スペクトルをFig. 6.1に示す。本スペクトルを解析し、前章で求めたフルピーク検出効率、シングルエスケープピーク検出効率及びダブルエスケープ検出効率をもとに各ピークの解析から6.13 MeVガンマ線の放出率を求めた。測定結果をTable 6.1に示す。それぞれのピークの測定結果を平均した値は1724 photon/secであり、各測定結果とも統計誤差以内でこの値に一致した。

6.2 ^{56}Co 線源のインテンシティ測定

2 MeV から 3.5 MeV までのガンマ線の校正用線源として使用されている ^{56}Co 線源は、この範囲をカバーするRI線源が他にほとんどないことから広く利用されており、これまでに色々な研究者によってそのインテンシティが求められてきた。しかし、3 MeV 以上になると絶対値を定める方法がないため、外挿することによって求めた例が多い。

このため、本測定によって求めた12 MeVまでの検出効率を用いて ^{56}Co ガンマ線線源のインテンシティを求めた。10 μCi の ^{56}Co 線源を用いて、線源と検出器との距離を10 cmとして測定し、解析結果を他の研究者による測定結果と比較してTable 6.2に示す。

Table 6.1 High energy gamma-ray source using ^{244}Cm and Carbon

	Counting rate (cps)	Detection efficiency	Disintegration
Full energy peak	0.1545 cps	9.00E-5	1717 photon/sec
Single escape peak	0.1966 cps	1.13E-4	1740 photon/sec
Double escape peak	0.2914 cps	1.70E-4	1714 photon/sec
Average			1724 photon/sec

Table 6.2 Relative intensity of gamma-rays more than 2015 keV following ^{56}Co decay

Energy (keV)	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5	This work
2015	2.98	2.98	3.1	2.60	3.05	3.05
2035	7.77	7.77	7.8	7.00	7.8	7.8
2559	17.12	17.51	17.3	16.77	16.8	16.48
3010	0.94	0.99	1.0	1.55	0.99	1.08
3202	3.15	3.36	3.2	3.15	3.03	3.13
3254	7.59	8.12	8.2	7.70	7.4	7.65
3273	1.69	1.81	1.9	1.71	1.73	1.84
3451	0.88	0.96	1.0	0.94	0.86	0.93
3549	0.18	0.20	0.20	0.20	0.177	0.19

Reference:

- 1 ; J Kern, Gamma-ray standards in charged particle-induced radiative capture (Int. Atomic Energy Agency, Vienna 1974)
- 2 ; GRAHAM J. MCCALLUM and GRAEME E. COOTE, Systematic errors in transition intensities of ^{56}Co and ^{66}Ga , N.I.M. 124(1975) p 309
- 3 ; S.G. Boydell, Ph.Dr theses, University of Melbourne (1974)
- 4 ; B.P. SINGH and H.C. EVAVS, Relative efficiency of Ge(Li) gamma-ray detectors from 0.5 to 12 MeV, N.I.M. 97 (1971) P 475-482
- 5 ; Catalogue of ^{56}Co in Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants

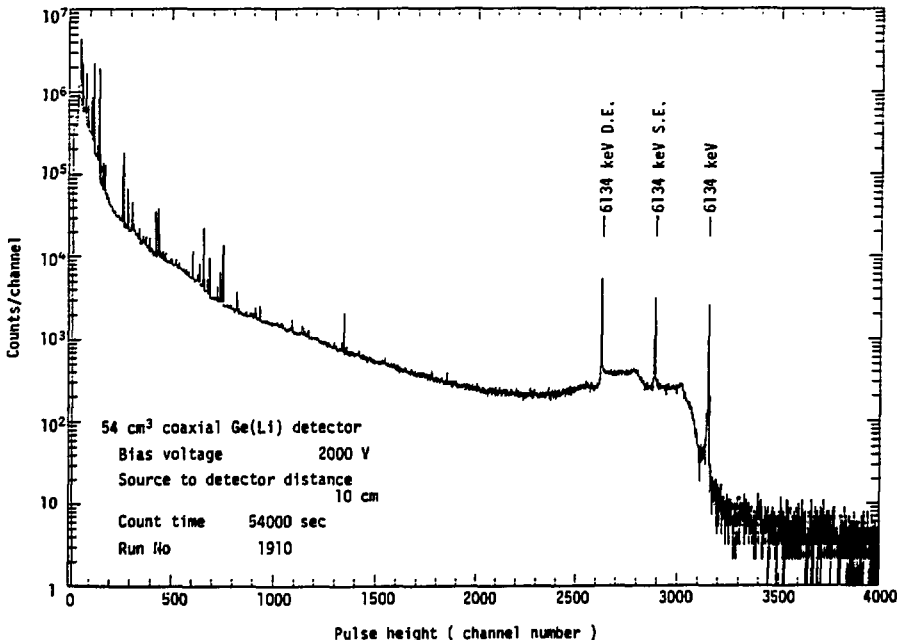


Fig. 6.1 Gamma-ray spectrum of 54 cm³ coaxial Ge(Li) detector from the high energy gamma-ray source using the reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$. Alpha-ray source is ^{244}Cm .

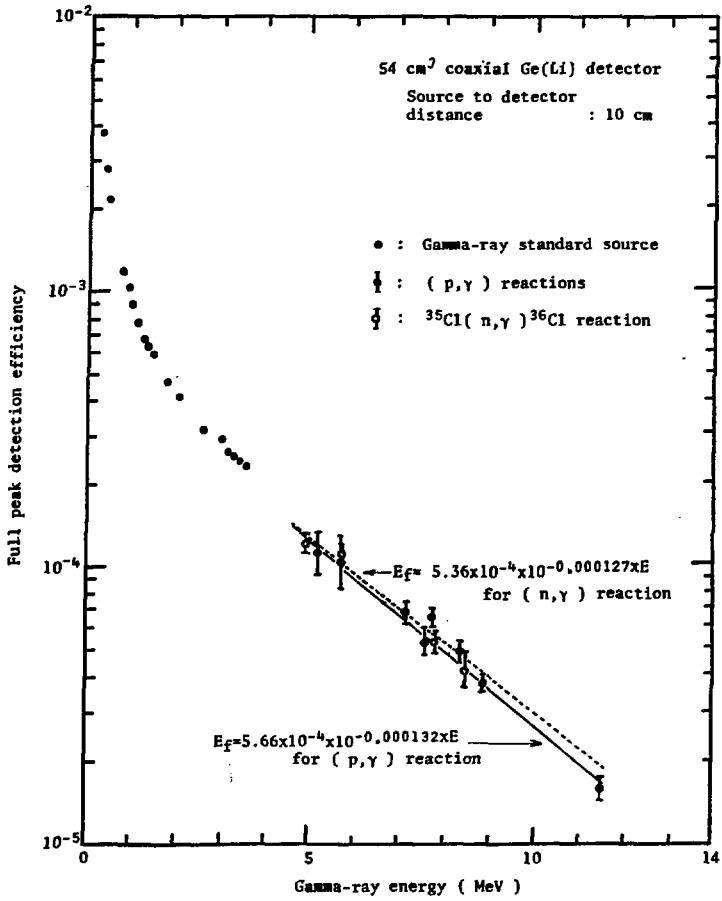


Fig. 6.2 Full peak detection efficiency of 54 cm³ Ge(Li) coaxial detector measured at source to detector distance 10 cm using gamma-ray standard sources, (p,γ) reactions and ³⁵Cl(n,γ)³⁶Cl reaction.

7. 測定結果の評価

ガンマ線エネルギーに対するフルピーク検出効率の変化を調べると、一般に、200 KeV から 2.5 MeV まで Fig. 5.9 に示したように Log-Log でプロットした場合はほぼ直線、すなわち検出効率を E_f 、ガンマ線エネルギーを E とした場合

$$E_f = b \cdot E^{-a}$$

の式の関係式で表わせる。

これに対して、4 MeV から 12 MeV のガンマ線の場合、ガンマ線エネルギーが高くなるに従い急激にピーク検出率が小さくなり Log-Log の関係を示さなくなっている。

4 種類の (p, r) 反応を用いて求めた 12 MeV までの高エネルギーガンマ線に対するゲルマニウム検出器のピーク検出効率と $^{35}\text{Cl}(n, r)^{36}\text{Cl}$ 反応によって求めたピーク検出効率とを同じ図面に Linear-Log (Semilog) でプロットした図を Fig. 7.1 に示す。

4 MeV から 12 MeV の範囲について着目すると、ほぼ直線となっており検出効率 E_f は

$$E_f = b \cdot 10^{-a \cdot E}$$

の関係式で表わすことができる。この関係式をもとに、 (p, r) 反応の測定結果について最小 2 乗法を用いてフィッティングを行った結果、

$$E_f = 5.66 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-(0.000132 \cdot E)}$$

の関係を得た。また、 (n, r) 反応についても、測定結果について最小 2 乗法を用いてフィッティングを行った結果、

$$E_f = 5.36 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-(0.000127 \cdot E)}$$

の関係を得た。これらの関係式を Fig. 7.1 図に書き加えて示す。2 つの核反応によって得られ測定結果は統計誤差内ではほぼ一致しており、かつこの関係式で表わせることがわかった。

一方、2.5 MeV から 4 MeV のガンマ線エネルギーの範囲においてフルピーク検出率は、低エネルギー側から高エネルギー側への変曲点となっており、多少膨らんだ傾向を示している。このガンマ線エネルギー範囲においては、ゲルマニウム検出器内のピークとなる吸収効果として光電効果以外に電子対生成効果が大きな割合をしめてきており、この電子対生成効果に着目し、Fig. 5.10 に示すシングルエスケープピーク及びダブルエスケープピークの検出効率との傾向を比較すると電子対生成効果の増加の割合にくらべて、シングルエスケープピーク及びダブルエスケープピークの検出率が増加していない。これは、電子対生成効果によって生成した 2 つの 511 KeV のガンマ線が検出器内において吸収されフルピークとなっている割合が大きいためと考えられ、上記の膨らむ原因と推定できる。

また、フルピークの他に同時に測定されるシングルエスケープピーク及びダブルエスケープピ

ークの検出効率の測定結果を検討すると、5 MeV 前後においてフルピークはシングルエスケープピーク及びダブルエスケープピークの検出効率よりも小さくなっており、測定対象によっては後者のピーク検出効率を用いて定量したほうが精度良く求めることができる場合があることがわかった。

本測定によって求めた検出効率を用いて、6.13 MeVの高エネルギーガンマ線を放出する(α , γ)ガンマ線線源の校正を行った結果については、フルピーク、シングルエスケープピーク及びダブルエスケープピークの検出効率の各測定結果が統計誤差内で一致しておりシングルエスケープピーク及びダブルエスケープピークの検出効率を用いても精度良く校正できることがわかった。

^{56}Co 線源のインテンシテイは、上述したように、このガンマ線エネルギー範囲が検出効率の変曲点にあたるため、精度良く決定することは難しいが4 MeV以上のガンマ線に対する検出効率を用いて内挿して求めた結果、最近の他の研究者による測定結果とほぼ一致した結果が得られた。これにより、この領域のガンマ線を精度良く校正する高いエネルギーの検出効率を求めておくことが重要であることがわかった。

8. ま と め

4種類の(p, γ)反応を用いて12 MeVまでのガンマ線を発生させることによってゲルマニウム検出器の高エネルギーガンマ線に対するピーク検出効率の測定を行った。ピーク検出効率を求める方法としてはTwo-line methodを使用した。この測定結果を(n, γ)反応による測定結果と比較し、良く一致することを確認した。(n, γ)反応は中性子線源をもちいて容易に高エネルギーガンマ線を発生することができるため、簡単に高エネルギーガンマ線に対するピーク検出効率を測定する方法として有効である。また、測定したピーク検出効率を用いて、6.13 MeVの高エネルギーガンマ線を放出するガンマ線線源の校正及び ^{56}Co 線源のインテンシティの測定を行い精度良い結果を得ることができた。

謝 辞

本測定実験を行うに当たり、2 MeVバンデグラフの運転の際にご助力いただいた物理部加速器管理室小林千明氏及び神田将氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

1. 片桐, 波高分析装置ND-50/50のデータ処理(1), JAERI-M 6989, 1977
2. Graham J. McCallum and Graham E. Coote, Systematic error in transition intensities of Co-56 and Ga-66, N.I.M. 124 (1975) p.309-311
3. M.L. Stelts and R.E. Chrien, Energies and intensities of thermal neutron capture γ -rays from Cl, Al and Fe relative to N, N.I.M. 155 (1978) p.253-260
4. J. Kern, Gamma-ray standards in charged particle-induced radiative capture, Int. Atomic Energy Agency, Vienna 1974
5. S.G. Boydell, Ph. Dr theses, University of Melborune (1974)
6. B.P. Singh and H.C. Evans, Relative efficiency of Ge(Li) gamma-ray detectors from 0.5 to 12 MeV, N.I.M. 97 (1971) p.475-482
7. Catalogue of Co-56 in Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants