

JAERI-M
4560

Ge(Li)スペクトロメーターの非直線性と検出
効率の測定

1971年8月

東條 隆夫・近藤 真・白石 忠男

瀬崎 勝二・東海林 功・織田 勇

橋本 一志・伊東 一義

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

G e (L i) スペクトロメーターの非直線性と検出効率の測定

日本原子力研究所原子炉研修所

東條隆夫・近藤 真・白石忠男

瀬崎勝二^{*}・東海林功^{**}・織田 勇^{***}

橋本一志^{*}・伊東一義^{**}

(1 9 7 1 年 8 月受理)

要旨 γ 線エネルギーの高精度な測定と広いエネルギー範囲にわたる γ 線スペクトルの測定による核種の定量を可能にすることを目的として、2048チャンネル波高分析器を用いた G e (L i) スペクトロメーターの微分(差動)非直線性および絶対全吸収ピーク効率の γ 線エネルギー依存性が測定された。

増巾 - 波高分析器系の非直線性の測定には ^{56}Co の 3548 keV を上限とする 12 核種からの 38 種のエネルギーの γ 線を用いる方法と水銀バルサーを用いる方法の 2 つの測定法が使用され、その結果が比較された。

参考のため、標準のスペクトロメーターの比例増巾器を他の 3 種の比例増巾器に置換した場合の非直線性や高精度バルサーを用いて測定した波高分析器の非直線性も示されている。これらの結果はデータをフィットして得られた直線からの測定値の偏差の形で表わされている。

絶対検出効率は線源距離 5 cm の場合について 3548 keV を上限とするエネルギー範囲で γ 線エネルギーの関数として求め、この結果は ^{60}Co の 1332.48 keV γ 線の効率を 1.0 とした相対全吸収ピーク効率とともに示されている。この測定における 1332.48 keV γ 線に対する絶対検出効率として、 2.3×10^{-4} が得られた。

さらに付録として、G e (L i) スペクトロメーターのエネルギー較正に有用な種々な核種の γ 線エネルギーのリストが示されている。

/

Measurements of Nonlinearity and Detection
Efficiency of a Ge(Li) Spectrometer

Takao Tojo, Makoto Kondo, Tadao Shiraishi,
Katsuji Sezaki*, Isao Shoji**, Isamu Oda***,
Kazuyuki Hashimoto* and Kazuyoshi Itoh**

Nuclear Engineering School of JAERI

(Received Aug. 1971)

Abstract For the precise measurement of gamma-ray energies and the assay of radioactive nuclides by means of gamma-ray spectrometry, the differential nonlinearity of a Ge(Li) spectrometer with a 2048-channel analyzer and the absolute full-energy peak efficiency of the Ge(Li) detector were determined.

In the measurement of the nonlinearity of a standard amplifier-analyzer system, two methods were used. One is the so-called gamma-ray method, using the gamma-rays of 38 different energies emitted from 12 nuclides, up to 3548 keV of ^{56}Co ; and other is the mercury-relay pulser method.

The nonlinearities of other spectrometer systems in which only the standard-system linear amplifier was replaced by other amplifier of 3 different types, and also that of the analyzer were measured by the pulser method.

The results are shown as the deviations from linearity obtained by linear fitting of the data.

In all the measurements, the nonlinearities were less than 0.1 percent. Absolute full-energy peak efficiencies were determined for the different gamma-ray energies, with the source distance of 5 cm, using the same gamma-ray sources as for nonlinearity measurements. The absolute full-energy peak efficiency of 2.3×10^{-4} was obtained for the 1332.48 keV of ^{60}Co .

These results are shown together with the relative full-energy peak efficiencies normalized to the gamma-rays of 1332.48 keV. "The gamma-ray energies of useful sources for the energy calibration of a Ge(Li) spectrometer" are listed in the Appendix.

From *JAERI, **Hokkaido University, ***Ministry of Transportation, ^{*}Hokkaido Electric Power Corp. and ^{**}Kyushu Industry University (Students of 23rd General Course of the School)

目 次

1. 序 論	1
2. 測定方法	2
3. 実 験	4
3.1 Ge(Li)スペクトロメーターの非直線性の測定	4
3.1.1 パルサーを用いた非直線性の測定	5
3.1.2 γ 線源を用いた非直線性の測定	9
3.2 Ge(Li)検出器の効率の測定	14
4. 結 論	18
付録 “Ge(Li)スペクトロメーターのエネルギー較正に有用な γ 線源とそのエネルギー”	19
文献	32

1. 序論

優れたエネルギー分解能を有するGe(Li)スペクトロメーターの特長を有効に生かした測定精度の高い γ 線エネルギーを求めるためには、スペクトロメーターの非直線性を十分な精度であらかじめ測定しておく必要がある。この非直線性の測定例としては、D.P.Donnelly¹⁾らによる ^{60}Co の1332 keVを上限とするエネルギー範囲で8種の線源と水銀リレー発振回路を用いて測定した結果やR.J.Gehrke²⁾らによる ^{56}Co の3548 keVを上限とするエネルギー範囲で3種の線源を用いた測定結果などがすでに報告されている。

一方、Ge(Li)スペクトロメーターの特長を生かした複雑な γ 線スペクトルからの核種の定量や γ 線の分岐比の測定などのためには、 γ 線エネルギーの関数としてのGe(Li)の検出効率がわかつていなければならぬ。G.Aubin³⁾らは同軸および平板型Ge(Li)に対する全吸収ピーク効率の γ 線エネルギー依存性をモンテカルロ法を用いて計算した。しかし、効率を計算によって求める場合には、幾何的条件を正確に定めておく必要があるが、Ⅰ)測定の幾何的条件は多様に変化する、Ⅱ)Ge(Li)の有感体積や形状が個々の検出器で大巾に異なったり、液体窒素で冷却するためのマウント方法も個々で異なるため、NaI(Tl)蛍光体のように一般性のある幾何的条件は定まり難い、さらに、Ⅲ)計算を行なうためには、トラッピングや電場の乱れによってもたらされる損失に関する未知の因子を仮定しなければならない、などの問題点がある。このような理論計算法によるGe(Li)の効率決定法の困難性の故に、効率の決定には多種のエネルギーの γ 線を用い、個々の測定条件に即して実験的に測定する方法が一般的に用いられている。

効率を実験的に求めた例としては、種々の有感体積のGe(Li)について求めたG.V.Walford⁴⁾らの測定、20~100 keVの低エネルギー領域における効率を ^{109}Cd や ^{137}Cs などの特性X線を用いて求めたD.P.Donnelly⁵⁾らの測定、多種の γ 線を放出する ^{75}Se 、 ^{152}Eu 、および ^{56}Co 線源を用いて中程度のエネルギー領域の効率をそれぞれ求めたT.S.Nagpal⁶⁾ら、P.Mukherjee⁷⁾ら、およびP.H.Barker⁸⁾らの測定、放射平衡に達したRa線源を用いて簡便に測定したG.Walford⁹⁾らおよびG.Wallace¹⁰⁾の結果が報告されている。

さらに、スペクトロメーターの非直線性を同時に測定するため、 ^{56}Co や ^{75}Se など多数の γ 線を放出する複数の線源を用いてより高い精度で測定したR.J.Gehrke²⁾らによる結果や、効率測定のエネルギー範囲を10~11 MeVにまで広げるため、 γ 線源のほか中性子捕獲 γ 線^{11,12)}や陽子による核反応で放出される高エネルギー γ 線¹³⁾を用いdouble escape peak efficiencyをも含めて測定された結果なども報告されている。

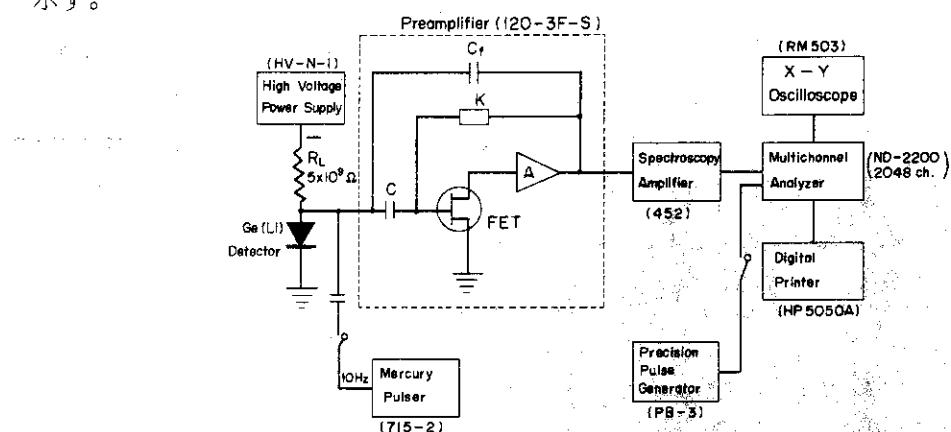
以上に示した例からも明らかかなように、Ge(Li)スペクトロメーターの特性については多くの報告がなされている。我々はより高精度の γ 線エネルギーの測定と核種の定量を行なうための利用技術と技術的知見を得ることを目的として、日常使用しているスペクトロメーターの特性測定を行なうことを意図した。

このスペクトロメーターの効率や検出器の有感寸法などの基礎的測定はすでに報告¹⁴⁾され

ている。しかし、前報よりも広いエネルギー範囲にわたっての効率測定や、今後当分の間変更が加えられることがないと考えられる段階に至ったスペクトロメーターの非直線性の測定を新たに加えた今回の一連の実験は利用技術上必要なデータをさらに充実させ、利用範囲をさらに拡大するものと考えられる。

2. 測 定 方 法

一連の測定に使用した回路の構成を第1図に示し、以下に検出器および主要な機器の仕様を示す。



第1図 測定のブロックダイヤグラム

A. Ge(Li) 検出器 (Elron Electronic Industry 社製)

型式：EGL/1/2C型（同軸型、ダイオード番号 219/03）

有感面積： 6.33 cm^2

有感厚さ：10.25 mm

有感長さ：5.4 cm

入射窓： $300 \mu\text{m}$ (Al)

最大使用電圧： -2000 V ,

漏洩電流： $7 \times 10^{-10} \text{ A}$ 以下 (-2000 V において)

エネルギー分解能 (FWHM)： 3.3 keV (1.33 MeV 光子, -1250 V , 1.6 または $3.3 \mu\text{sec}$ 時定数において)

検出器容量： 58 pF

B. 前置増巾器 (ORTEC 社製, 120-3F-S型)

Integral Nonlinearity $\leq 0.05\%$

Temperature Stability $\leq 0.005\%/\text{°C}$, 0 to 50°C

Input Open-Loop Gain > 20000

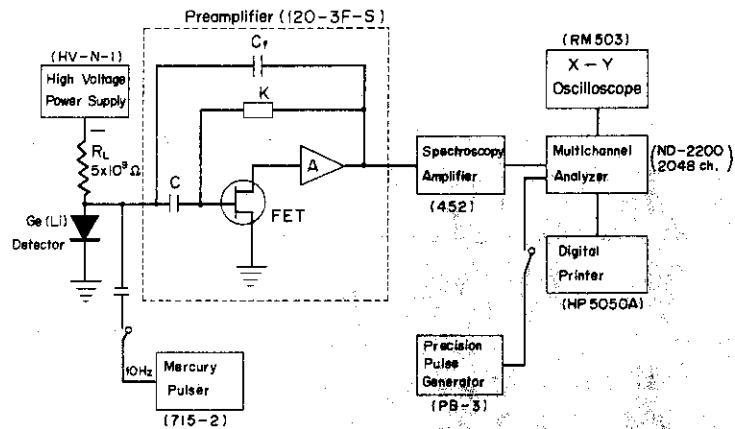
Equivalent Input Noise 800 eV at 0 pF , $+20 \text{ eV/pF}$ (Ge)

Conversion Gain 170 mV/MeV , $3 \times 10^{12} \text{ V/coulomb}$

ている。しかし、前報よりも広いエネルギー範囲にわたっての効率測定や、今後当分の間変更が加えられることがないと考えられる段階に至ったスペクトロメーターの非直線性の測定を新たに加えた今回の一連の実験は利用技術上必要なデータをさらに充実させ、利用範囲をさらに拡大するものと考えられる。

2. 測 定 方 法

一連の測定に使用した回路の構成を第1図に示し、以下に検出器および主要な機器の仕様を示す。



第1図 測定のブロックダイヤグラム

A. Ge(Li) 検出器 (Elron Electronic Industry 社製)

型式：EGL/1/20型（同軸型、ダイオード番号 219/03）

有感面積： 6.33 cm^2

有感厚さ：10.25 mm

有感長さ：5.4 cm

入射窓： $300 \mu\text{m}$ (Al)

最大使用電圧： -2000 V ,

漏洩電流： $7 \times 10^{-10} \text{ A}$ 以下 (-2000 V において)

エネルギー分解能 (FWHM)： 3.3 keV (1.33 MeV 光子, -1250 V , 1.6 または $3.3 \mu\text{sec}$ 時定数において)

検出器容量： 58 pF

B. 前置増幅器 (ORTEC 社製, 120-3F-S型)

Integral Nonlinearity $\leq 0.05\%$

Temperature Stability $\leq 0.005\%/\text{°C}$, 0 to 50°C

Input Open-Loop Gain > 20000

Equivalent Input Noise 800 eV at 0 pF , $+20 \text{ eV/pF}$ (Ge)

Conversion Gain 1.70 mV/MeV , $3 \times 10^{12} \text{ V/coulomb}$

Output Typical Rise Time 20 nsec at 0 pF
 25 nsec at 20 pF
 35 nsec at 50 pF

Output Exponential Decay Time Constant 50 μ sec

C. 比例増巾器 (ORTEC社製, 452型 Spectroscopy Amplifier)

Integral Nonlinearity <0.05%

Temperature Stability Gain 0.005%/ $^{\circ}$ C, 0 to 50 $^{\circ}$ C
 DC Level <0.1mV/ $^{\circ}$ C, 0 to 50 $^{\circ}$ C

Shaping Filter 0.25, 0.5, 1, 2, 3, or 6 μ sec

D. 多重波高分析器 (Nucler Data社製, ND2200, ADC S/N 67-362)

チャンネル容量 : 2048

Integral Linearity : < \pm 0.75% over top of full scale

Differential Linearity : <0.75% deviation from mean channel width
 over top 99% of full scale

Conversion Time : 8 + 0.02N μ sec

Diditing Rate : 50MHz

E. Precision Pulse Generator (Berkeley Nucleonic社製, PB-3型)

Stability : \pm 10 ppm/ $^{\circ}$ C of full scale (20 μ V/ $^{\circ}$ C)

Integral Linearity : \pm 0.005% (50 ppm)

Differential Linearity : \pm 0.05%

Amplitude : 0 to 10V

Repetition Rate : 1 Hz to 100 kHz

F. Mercury Pulser (Tokyo Atomic社製, 715-2型)

Stability : \pm 20 ppm/ $^{\circ}$ C

Integral Linearity : \pm 0.005%

Differential Linearity : \pm 0.05%

Amplitude : 0 to 10V

Repetition Rate : AC or 10Hz

(本器はスペクトロメーター較正用にJohn Fluke社60A/C ポテンショメーター
 2個使用して試作したものであり、詳細な特性には不明な点が残されてはいるが、上
 記の仕様がほぼ満たされているものと考えられる。) *

G. その他、高圧電源装置としてはHV-N-1型 (Elron Electronic Industry社, デ
 ィジタル・プリンターとしては5050A (Hewlett Packard社)およびX-Yオッショス
 コープとしてはRM503 (Tektronix社)が用いられた。

なお、一連の測定は22 \pm 1 $^{\circ}$ Cに室温が調節された場所において行なわれ、測定前後のドリ
 フトなどに対する検討は適時行なわれた。

* 電圧レシオ : (0.00001ステップ) 0.00000 ~ 1.0000

標準入力抵抗 : 1 k Ω , 標準抵抗誤差 : \pm 0.05% (フルスケール)

分解能 : 0.0002%より良い; 標準直線性 : \pm 0.0025%, 周波数レンジ : DC ~ 100kHz

3. 実験

3.1 Ge(Li)スペクトロメーターの非直線性の測定

第1図に示したGe(Li)スペクトロメーターの非直線性は、各種 γ 線源または水銀パルス発生器を用いる2つの方法によって測定された。

γ 線源による非直線性の測定にあたっては、多重波高分析器のフルスケール内に多種のエネルギーのガンマ線によるピークをエネルギー的にできるだけ片寄らないように測定する配慮が必要である。このため、 γ 線源としては ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{137}Cs , ^{203}Hg および ^{241}Am などの一般的な線源のほか、Nagpal⁶⁾らによって報告された ^{75}Se , Barker⁸⁾やGehrke²⁾らによって報告された ^{56}Co などが使用された。

これらの線源はGe(Li)検出器窓面より50mm前方の検出器軸上に窓面に平行に置いて測定された。

測定したエネルギー範囲は ^{56}Co の~3550keVの γ 線によるピークがフルスケールのごく近傍に測定されるように設定した。

一方、水銀パルス発生器の出力は ^{60}Co の1332.483±0.046keV¹⁵⁾を基準にして、±0.1チャンネルの範囲内で規格化して用いられた。

非直線性の測定を精度よく行なうためにはチャンネル内でのピークの位置を正確に求める必要がある。ピークの位置を決定する方法として、Ⅰ) ピーク(ヒストグラム)の面積を2等分するmedianを求める方法、Ⅱ) ピークを形成する曲線の勾配がゼロになる位置(centroid)を求める方法、Ⅲ) ピークをガウス分布にフィットし、平均値を示す点をピークの位置とする方法(the mean of gaussian fit), Ⅳ) 適当なピークの高さの点におけるピーク巾の中点からピークの位置を求める方法、などが一般的に用いられている。

上にあげた最初から3つまでの方法では、特にある方法が優れた結果をもたらすことはないとDonnelly¹⁾らは結論している。これらの3つの方法の中では、centroidを求める方法が最も一般的に行なわれているようである。^{1, 2, 16)}

しかし、ここでは全吸収ピークの形状をパラボラと仮定してその位置を簡便に求める方法¹⁷⁾が便宜上用いられた。

測定精度の高い γ 線エネルギー値を求めるためには、スペクトロメーター系の総合的な非直線性を考慮に入れた γ 線エネルギーとパルス波高の関数を知る必要がある。このためには、R.Gunnink¹⁸⁾らやG.Walford⁹⁾らによって報告されているよ γ 線エネルギーとパルス波高(チャンネル数)の関数を多項式にフィットする方法が用いられている。しかし、ここではスペクトロメーターの非直線性(differential nonlinearity)の程度とその傾向を明確に表わすため、 γ 線エネルギーとそれを等価なパルサー出力を用いて測定した γ 線エネルギーとチャンネル数のデータを直線にフィットし、その直線からの測定値の偏差をチャンネル数の関数として求める方法^{1, 2)}を用いた。したがってこの場合、偏差を補正定数として直線フィットから得た値に用いることによって、非直線性を考慮に入れた γ 線エネルギー値が得られることになる。この方法は簡便な実用的方法であり、複雑な非直線性の傾向を示す場合でも

比較的その補正を容易に行なえる。

3.1.1 パルサー用いた非直線性の測定

測定に用いた機器の構成を第1図に示す。

同図に示したスペクトロメーターとしての非直線性を測定するために水銀パルサーの出力を前置増巾器入力部に供給する方法と増巾系の寄与を除いた多重波高分析器の非直線性を測定するためプレシジョン・パルサー出力を直接分析器に供給する方法の2種の測定が行なわれた。

第2図にパルサーによる増巾一波高分析系および分析系のみの非直線性の測定結果を示す。この測定においては、先行パルスの影響を少なくするために、水銀パルサーは10Hz、プレシジョン・パルサーは100Hzで使用された。

第2図に示されている結果は各々の場合について得られた結果を直線にフィットさせ、得られた直線の値からの測定値の偏差を示したものである。

同図に示されている増巾ー分析系の非直線性の傾向はGehrke²⁾らによる4096チャンネル波高分析器を用いた結果と同様な傾向を示している。しかし、フルスケールの10~90%の波高範囲における最大の偏差は第2図では2.3チャンネルとなり、Gehrkeらが用いたスペクトロメーターの0.8チャンネルに比べて直線性がかなり乏しいという結果が得られている。

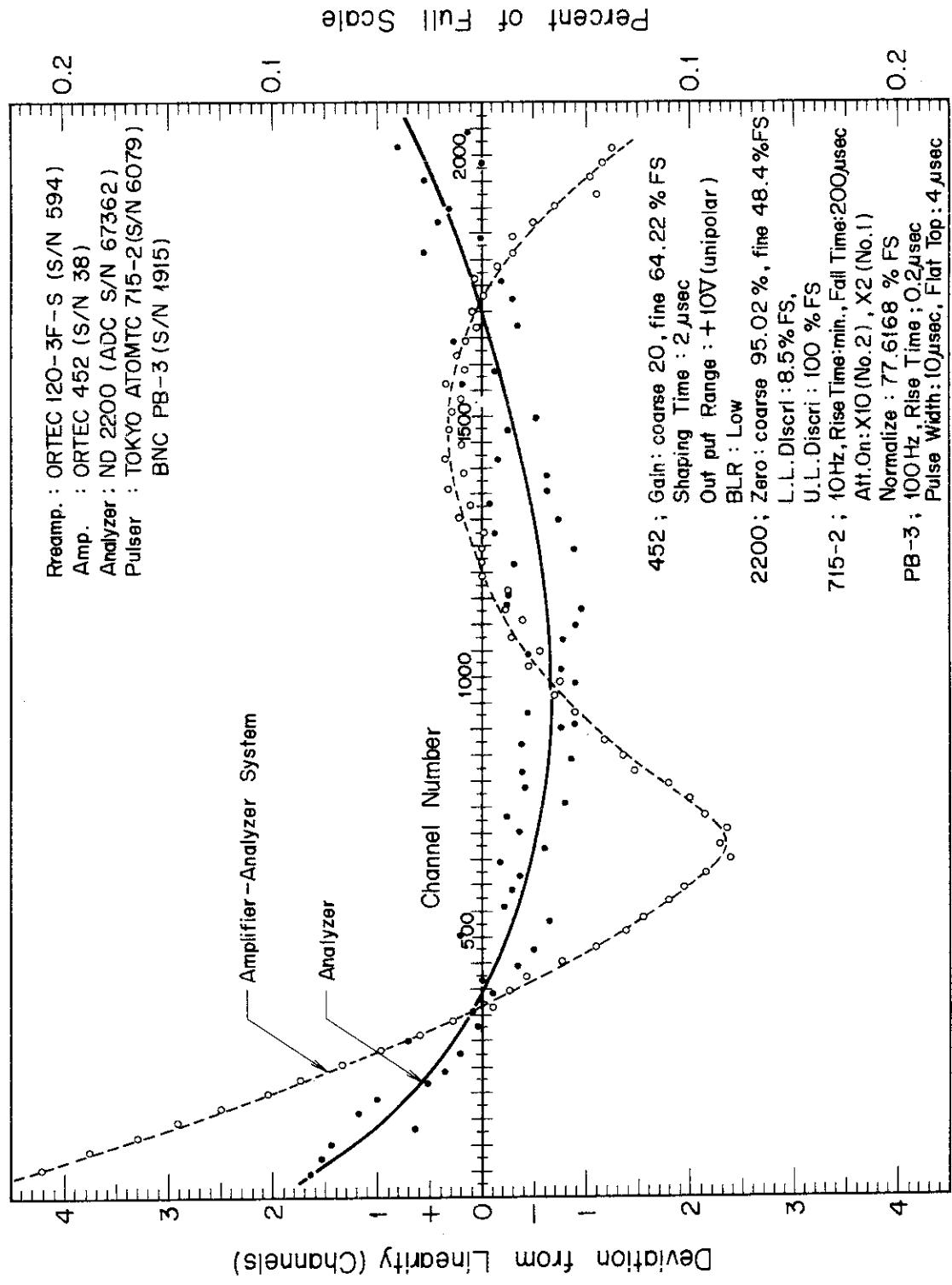
このような非直線性に対する波高分析器の寄与は第2図に示されているように約0.5チャンネル(フルスケールの0.025%)と無視できない程度存在している。しかし、波高分析器の非直線性にはパルサーの非直線性が含まれ、これが測定された非直線性と同程度あることがパルサーの定格から推定されるため、第2図の波高分析器の非直線性は分析器自身のものと判断することは困難である。

この分析器の非直線性の測定は、パルサー出力の波高分布がチャンネル巾(フルスケールの0.05%)に比べてかなり狭い分布(amplitude jitter; 0.001%)を示しているので、パルサー出力を調節することにより、2つのチャンネルに計数が記録されるようにして行なわれた。

以上の測定においては、測定中の増巾系、波高分析器およびパルサーの不安定性が影響を与える。しかし、以上の測定の前後の同一条件下における測定結果は±0.1チャンネル以内でよく一致し、その安定性^{*}や再現性は十分確認されているので、回路の不安定性が非直線性の測定結果におよぼす影響はかなり小さいと判断される。

波高分析系の非直線性の測定結果が測定系の十分な安定性にもかかわらず第2図にみられるように大きなばらつきを示している。この原因としては、パルサーや分析器の differential nonlinearity(平均チャンネル巾の±0.75%)よりもむしろ、波高分布が極端に非対称になるこのような場合のピーク位置決定に用いた今回的方法に問題があると考えられる。したがって、このような測定においては2つのチャンネルに同等の計数が記録されるようにしてそのピーク位置を明確にすることが測定方法として最も重要であると考えられる。第2図に示した

* 15時間以上ウォーミングアップを行なった後からの15時間にわたる測定の結果、PB-3とND2200よりなる分析系の安定性は±1×10⁻⁵以下、715-2, 120-3 F-S, 452およびND2200よりなるスペクトロメーターの安定性は±9×10⁻⁵が得られた。



第2図 水銀ペルサ-を用いた増巾-波高分析系および波高分析系のみの
非直線性 (different nonlinearity)

測定系のうち主増巾器のみを他の機種に代え、増巾器-分析系の非直線性を測定した結果を参考のため第3図に示す。

使用した増巾器は、156型スペクトロスコピー・アンプ (JAERI), 410型マルチモード・アンプ (ORTEC), MPS-1224型低雑音増巾器 (大阪電波) である。さらに452型アンプの unipolar 出力についての測定は第2図に示した通りであるが、比較のため bipolar 出力についての測定も行ない、この結果を第3図に併せて示した。

これらの増巾器の主な使用条件は第3図中に示された通りであるが、測定にあたってそれらの利得は ± 0.5 チャンネルの範囲内で第2図に示した測定における利得と一致させて用いられた。

第3図から明らかなように、用いた全ての増巾器はほぼ同様にマイナス側にくほんだパラボラ的な傾向を有する非直線性をもち、第2図の場合より全体として優れた直線性を有している。とくに、452型アンプについて第2図 (unipolar) と第3図 (bipolar) とを比較すれば、結果としてむしろ bipolar のパルスを用いた方が直線性がすぐれ、非直線性の変化も単純であることが示されている。さらに、第2図の波高分析器の非直線性と第3図の452(bipolar) の非直線性とは傾向とその程度においてほとんど同じであることが注目される。

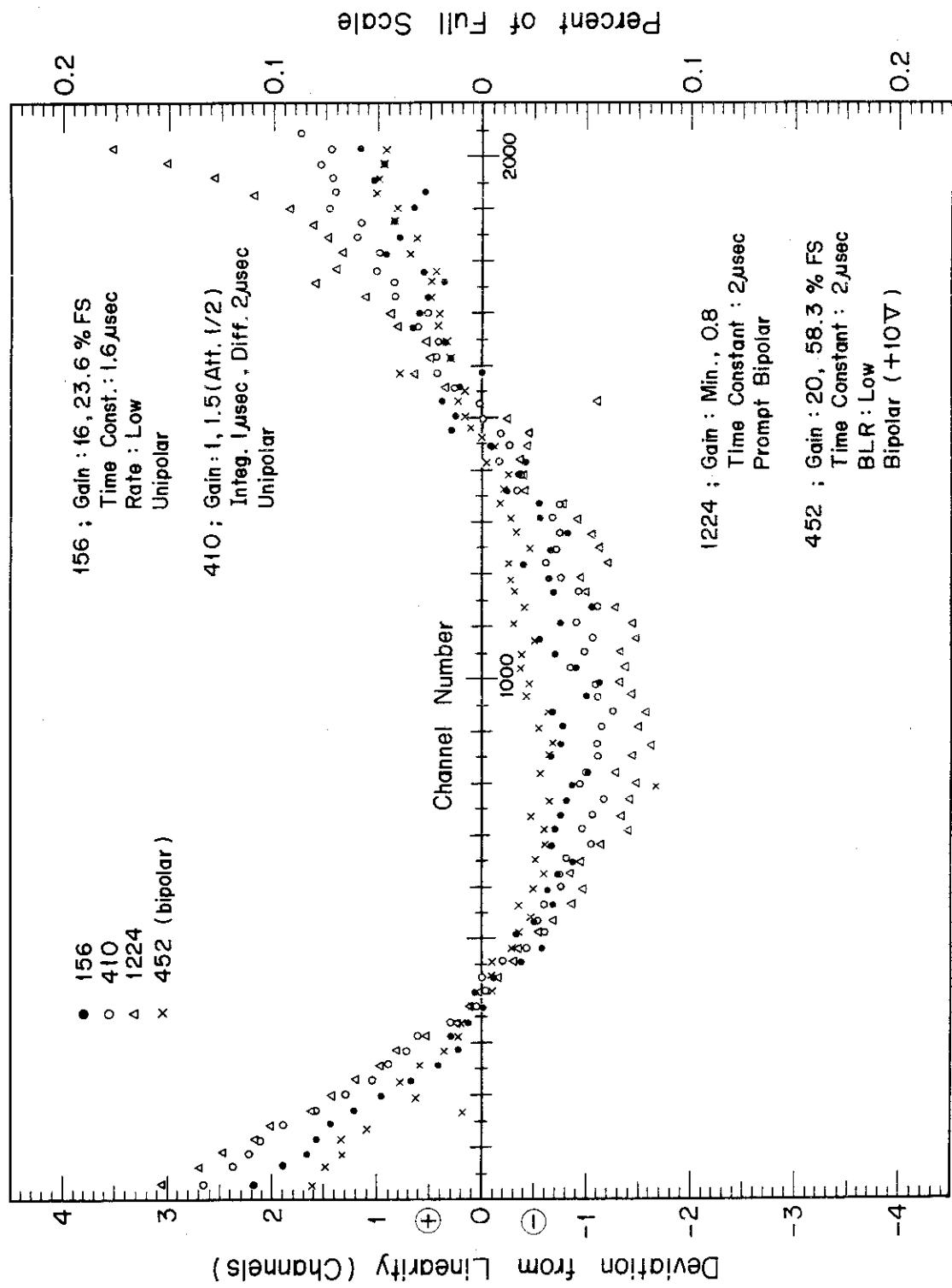
一方、スペクトロメーターとしての重要な特性としては直線性のほかにエネルギー分解能があるが、この点について第3図に示した非直線性の測定の場合より増巾度を約2.5倍増加し、波高分析器を2048チャンネル・ディジタル・ゼロ・シフトして測定 (1 ch. ≈ 0.4 keV) した結果を第1表に示す。

第1表の結果から、452型スペクトロスコピー・アンプの unipolar での FWHM は bipolar での FWHM より 1.4 keV 狹い 3.2 keV となっている。このような、直線性とエネルギー分解能に関する背反的な関係が得られたので、このスペクトロメーターの利用にあたっては、計数率効果などその他の特性も考慮し、使用目的に合致した使用法に留意しなければならない。

第1表 種々な主増巾器を用いて得られたエネルギー分解能 (FWHM)*
(^{60}Co の 1332 keV の γ 線に対して)

Amplifier	452 (unipolar)	452 (bipolar)	156	410	1224 (bipolar)
FWHM (keV)	3.2	4.6	3.4	4.6	3.7

* IAEA標準線源 (直径: 20 mm, 95.6 μCi) を検出器軸上の前方 50 mm に置いて測定した。



第3図 種々な主増幅器を用いた増巾一波高分析系の水銀バブルサーによる
非直線性

3.1.2 γ 線源を用いた非直線性の測定

^{241}Am の 59.5 68 keV のごとく低い光子エネルギーから ^{56}Co の 354 8.3 keV にいたる比較的広いエネルギー範囲にわたって、12核種の γ 線源から放出される38種のエネルギーの γ 線を用いてスペクトロメーターの非直線性の測定を行なった。第2表に用いた核種と γ 線エネルギーおよび後の測定の際に必要になる γ 線の放出割合とともに示す。

機器の設定条件は第2図に示したパルサーによる測定の場合と全く同じであり (^{60}Co 133 2.4 8.3 keV : 75.2 8.5 チャンネル, ^{56}Co 354 8.3 keV : 201 5.4 6 チャンネル), 直線からフィットした結果から得たチャンネルあたりのエネルギーは 1.761 keV である。

第4および第5図に低エネルギー領域での測定に大きな寄与をした ^{75}Se , 高エネルギー領域で同様な役割をした ^{56}Co の γ 線パルス波高分布をそれぞれ参考のために示す。^{*}他の線源についての波高分布は文献14)に記載されている。

γ 線源を用いて測定したスペクトロメーターの非直線性の測定結果を第6図に示す。同図にはパルサーによって得られた結果も比較のため点線で示されている。

第6図において実線で示されているのは、パルサーを使用して得た直線からの γ 線による測定値の偏差である。また、1点鎖線で示したもののは γ 線を用いて得られた結果を直線にフィットさせ、その直線からの測定値の偏差を示したものである。

γ 線エネルギーに対応するピーク位置の決定は、コンプトン・スペクトルの影響を差し引いて得られた対称なピークについて行なわれた。したがって、ピーク位置の誤差には統計誤差のほか、コンプトン・スペクトルの評価に関する誤差も関係している。しかしピーク位置の誤差は、各々のピークによって異なるが、平均的には±0.1 チャンネル程度と考えられる。

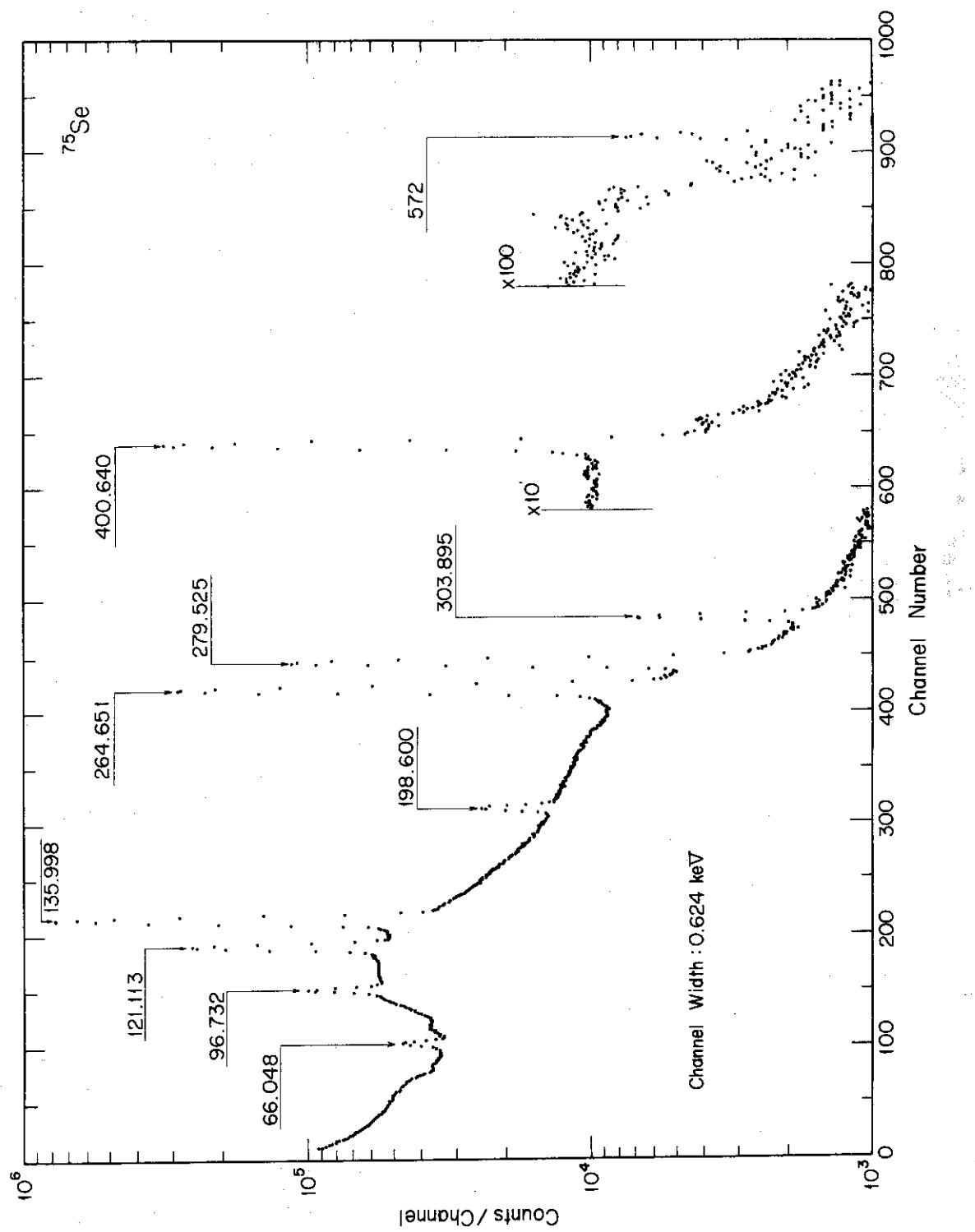
一方、 γ 線を用いた場合とパルサーを用いた場合について得られた直線を表わす式を第3表に示す。

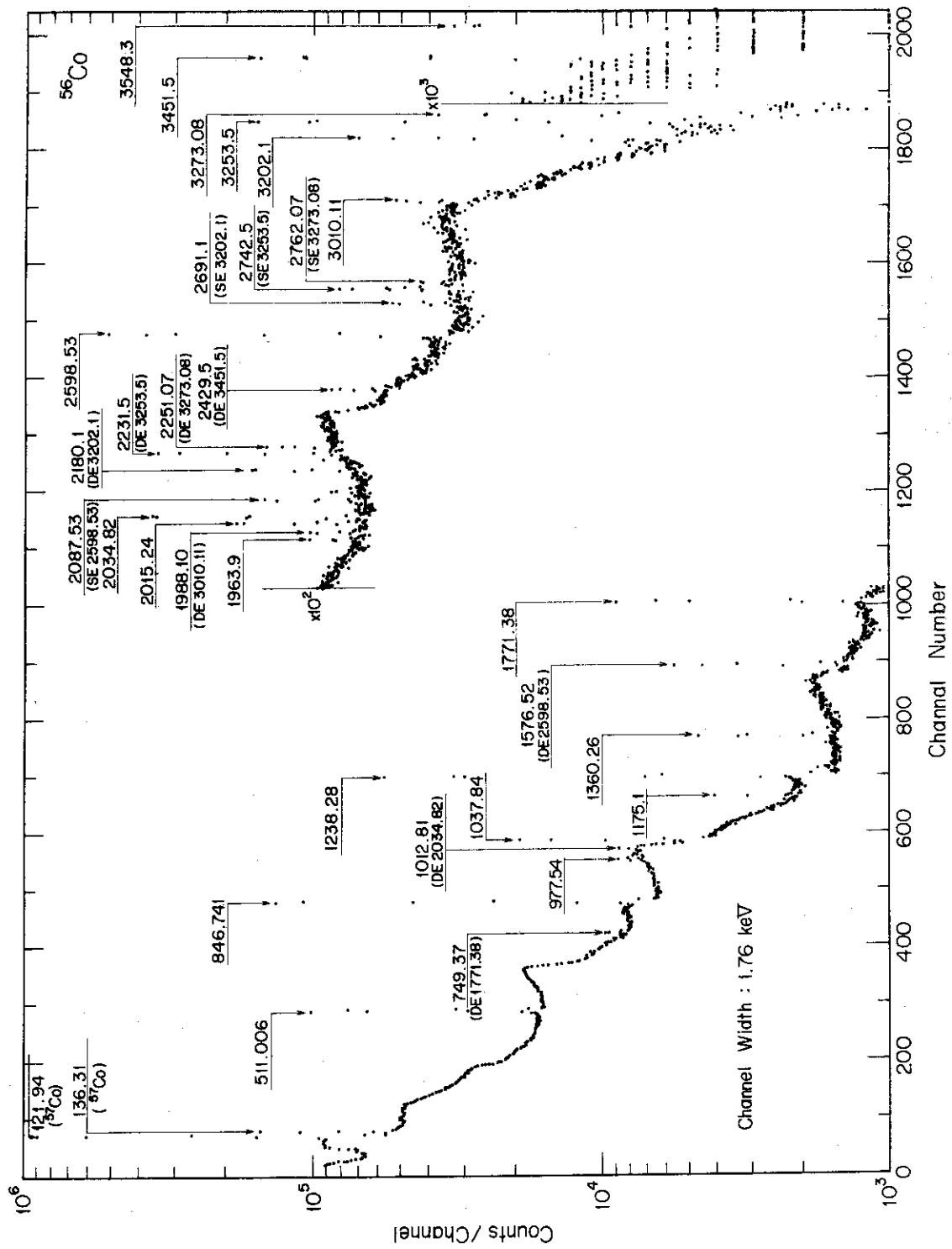
同表に示した標準偏差は第6図から明らかなごとく、直線でフィットし得ない系統的な変化を示す場合について直線からの偏差を標準偏差の形で求めたものであるが、非直線性の程度を評価する目安としての意味は有している。

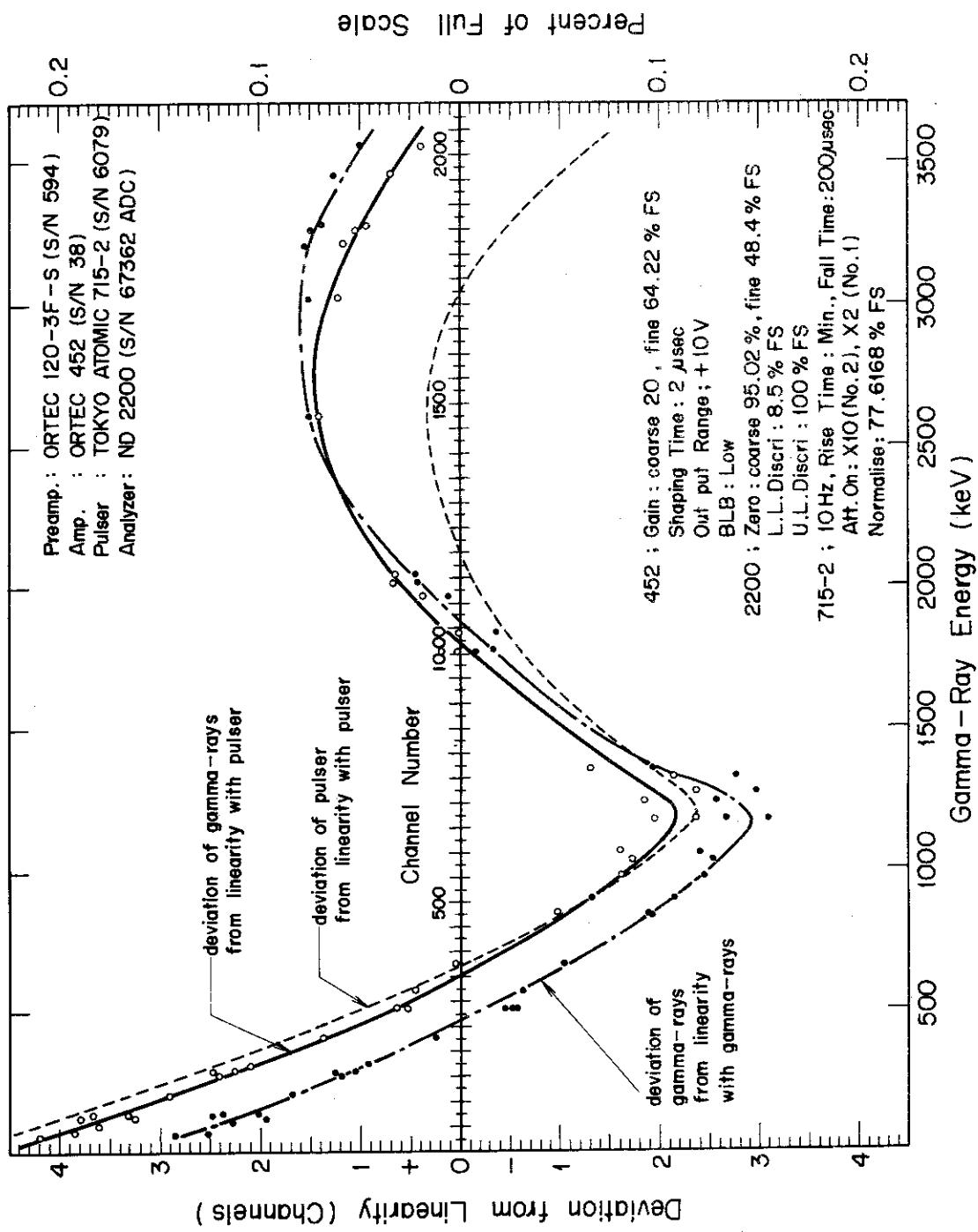
第6図から明らかなように、パルサーで得られた直線からの γ 線エネルギーの実測値の偏差は低チャンネル領域では±0.3 チャンネル程度で比較的よく一致しているが、高チャンネル側では最大 1.2 チャンネルと大きな不一致がみられる。また、 γ 線源とパルサーの測定値からそれぞれ独自に求めた結果もチャンネル領域によって異なるが、最大 1.5 チャンネルの不一致がみられる。このような結果をもたらす原因としては、パルサーの非直線がその主な原因と考えられ、測定中のドリフト (~0.1 チャンネル) や γ 線エネルギーの精度はこの場合あまり影響を与えていないと考えられる。さらに、パルサー出力波形が検出器出力波形を完全に模擬し得ない点もこの種の差異を生む原因として考える必要があると思われる。

したがって、標準の γ 線エネルギーでパルサーをいかに精確に較正しても、広いチャンネル領域で使用すると第6図に示した結果から±2.0 チャンネル (フルスケールの 0.1 %) 程度の

* 第4図中に示された ^{75}Se の γ 線エネルギーは文献20)から、第5図中の ^{56}Co の γ 線エネルギーは文献2)を主として用い、文献8)で補足した。ただし、 ^{75}Se については後に示す効率の測定の際に用いた測定条件で得られたものである。

第4図 ^{75}Se の γ 線 パルス波高分布

第5図 56_{Co} の γ 線 パルス波高分布



第6図 各種γ線エネルギーを用いて測定した増巾一波高分析系の非直線性

第2表 非直線性測定に用いた核種と γ 線エネルギー

核種	γ 線エネルギー (keV)	放出率	文献	備考
$^{241}\text{Am}^*$	5 9.5 6 8 ± 0.0 1 7	a) 3 5.9 ± 0.6	(19)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$
^{75}Se	6 6.0 4 8 ± 0.0 2 5 9 6.7 3 2 ± 0.0 0 7 1 2 1.1 1 3 ± 0.0 1 0 1 3 5.9 9 8 ± 0.0 1 0 1 9 8.6 6 0 ± 0.0 2 0 2 6 4.6 5 1 ± 0.0 1 5 2 7 9.5 2 5 ± 0.0 1 2 3 0 3.8 5 9 ± 0.0 2 0 4 0 0.6 4 0 ± 0.0 1 5	b) 1.7 7 ± 0.2 0 5.6 0 ± 0.5 0 2 8.1 9 ± 1.4 0 9 8.2 5 ± 4.6 2.4 3 ± 0.1 2 1 0 0 4 3.2 2 ± 2.2 2.3 1 ± 0.1 2 1 9.5 6 ± 1.2	(20)	
$^{57}\text{Ce}^*$	1 2 1.9 7 ± 0.0 3 1 3 6.3 3 ± 0.0 3	a) 8 5.0 ± 1.7 1 1.4 ± 1.3	(21)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$
$^{203}\text{Hg}^*$	2 7 9.1 9 1 ± 0.0 0 8	a) 8 1.5 5 ± 0.1 5	(22)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$
$^{22}\text{Na}^*$	5 1 1.0 0 6 ± 0.0 0 2 1 2 7 4.5 5 ± 0.0 4	a) 1 8 1.1 ± 0.2 9 9.9 5 ± 0.0 2	(22)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$
$^{88}\text{Y}^*$	5 1 1.0 0 6 ± 0.0 0 2 8 9 8.0 4 ± 0.0 4 1 8 3 6.1 3 ± 0.0 4	a) 0.4 0 ± 0.0 2 9 1.4 ± 0.7 9 9.4 ± 0.1	(22)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$
^{56}Co	8 4 6.7 4 1 ± 0.0 2 5 1 0 7 3.8 4 ± 0.0 5 1 1 7 5.1 ± 0.1 1 2 3 8.2 8 ± 0.0 6 1 3 6 0.2 6 ± 0.0 4 1 7 7 1.3 8 ± 0.1 5 2 0 1 5.2 4 ± 0.1 2 2 0 3 4.8 2 ± 0.1 0 2 5 9 8.5 3 ± 0.0 6 3 2 0 2.1 ± 0.2 3 2 5 3.5 ± 0.2 3 2 7 3.0 8 ± 0.1 0 3 4 5 1.5 ± 0.3 3 5 4 8.3 ± 0.4	1 0 0 1 2.9 ± 0.5 2 2.6 ± 0.2 3 6 7.8 ± 1.5 4 1.6 ± 0.2 1 1 6.5 ± 0.8 2 9.9 ± 0.2 0 8.2 ± 0.6 1 8.0 ± 0.9 3 2.0 ± 0.3 5 7.7 ± 0.9 1.7 1 ± 0.2 5 0.9 3 ± 0.2 0 0.2 0 ± 0.1 0	(2)	
^{207}Bi	5 6 9.6 2 ± 0.0 6 1 0 6 3.4 4 ± 0.0 9	c) 1 0 0 7 8.4 ± 0.3 5	(22)	
$^{137}\text{Cs}^*$	6 6 1.6 3 5 ± 0.0 7 6	a) 8 5.1 ± 0.4	(22)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$
$^{54}\text{Mn}^*$	8 3 4.8 4 0 ± 0.0 5 0	a) 1 0 0 0 0	(22)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$
$^{60}\text{Co}^*$	1 1 7 3.2 2 6 ± 0.0 4 1 3 3 2.4 8 3 ± 0.0 4 6	a) 9 9.8 7 ± 0.0 5 9 9.9 9 9 ± 0.0 0 1	(15)	$r \cdot s / 100 \text{ disinteg.}$

* IAEA標準線源(No.159)

a) 文献21)から引用, b) 文献2)から引用, c) 文献1)から引用

第3表 γ 線源およびパルサーを用いて得られた測定値
をそれぞれ直線にフィットして得られた式

	式	標準偏差 (keV)	標準偏差 (チャンネル)
γ 線源	$E = 1.758473N_{ch} + 4.852055$	2.61	1.48
パルサー*	$E = 1.760197N_{ch} + 2.446488$	3.19	1.81

E : keV, N_{ch} : チャンネル数

* 452Amp.を bipolar で使用した場合;

$$E = 1.763262N_{ch} - 1.071974 [\pm 1.10 \text{ keV} (0.63 \text{ チャンネル})]$$

誤差が生じることになる。

このため、スペクトロメーターを規格化されたパルサーで較正した場合はその有効波高範囲を較正に用いた基準 γ 線エネルギーの近くに限定して使用することが必要である。

このような使用法によれば、第6図に示した非直線性を表わす曲線の誤差は実測値のばらつきの程度から ± 0.2 チャンネル程度であると推定されるため、標準 γ 線エネルギーの誤差を除き、0.01%程度の測定精度が非直線性の補正によって可能になると考えられる。

3.2 Ge(Li)検出器の効率の測定

核種の定量を行なうためには、光子エネルギーの関数としての検出器の効率を知っておく必要がある。

ここで用いたGe(Li)スペクトロメーターについての検出効率の γ 線エネルギー依存性は既報¹⁴のごとく、特定の幾何学的条件下でIAEA標準線源を用いて測定した絶対全吸収ピーク効率 (absolute full-energy peak efficiency) や放射平衡に達しているRa線源を用いた方法による相対全吸収ピーク効率 (relative full-energy peak efficiency) の形ですでに得られている。しかし、そこで行なった絶対全吸収ピーク効率の測定では⁸⁸Yの2734 keVが γ 線エネルギーの上限であり、相対全吸収ピーク効率の場合には²¹⁴Biの2445 keVがその上限であった。

したがって、より高いエネルギーの γ 線を測定する定量の際には大きな誤差を生ずる外挿法を用いざるを得ないことになる。また、高エネルギーと同時に低エネルギーの γ 線が放出され、それに注目して定量する方法を用いた場合でもコンプトン・スペクトルの影響で統計精度が悪くなるという問題が残される。このような適用エネルギー範囲の狭さに起因する問題を解決するために、その制限の緩和を計り、低エネルギー領域での測定点をより多くすることに重点をおいた全体的な測定点の増加による精度の向上を意図した実験を試みた。ここでの測定では既報の測定で用いた線源のほか⁷⁵Se および⁵⁶Co を用いた結果、エネルギー範囲の上限は従来のものより約800 keV増加した3548 keV (⁵⁶Co) にまで拡大された。

今回の測定に用いられた幾何学的条件は直径20mmのIAEA標準線源を用いて得られた結果を絶対効率に較正する点をも含めて既報のものと全く同じ条件が採用され、線源は検出器軸上の検出器窓面より50mm前方に、互いの面を平行にして置かれた。また、コンプトン・スペ

クトルの寄与を少なくするため、線源は複合されることなく、各々独立に測定された。

以上のような測定条件において、線源から放出された光子あたりの絶対全吸収ピーク効率(Counts per sec of full-energy peak / gamma·sec⁻¹)の形で表わされた検出効率の光子エネルギー依存性を第7図に示す。

同図には参考のため、⁶⁰Co の 1332.48 keV の効率を 1.0 としたときの相対全吸収ピーク効率も示されている。

同図に示した測定において、標準線源を用いたものについては直接絶対効率の形で求める方法がとられた。しかし、正確に定量されていない線源の場合には、まず第2表に示した各核種の種々なエネルギーの光子とそれらに対応する光子放出割合からそれぞれの核種に対する相対全吸収ピーク効率を求め、その後それらを標準線源によって得た結果を用いて絶対効率に規格化する方法がとられた。

一方、低エネルギー光子に対する線源の自己吸収が無視できない場合には、実験的に求めた係数を用いて補正が施された。

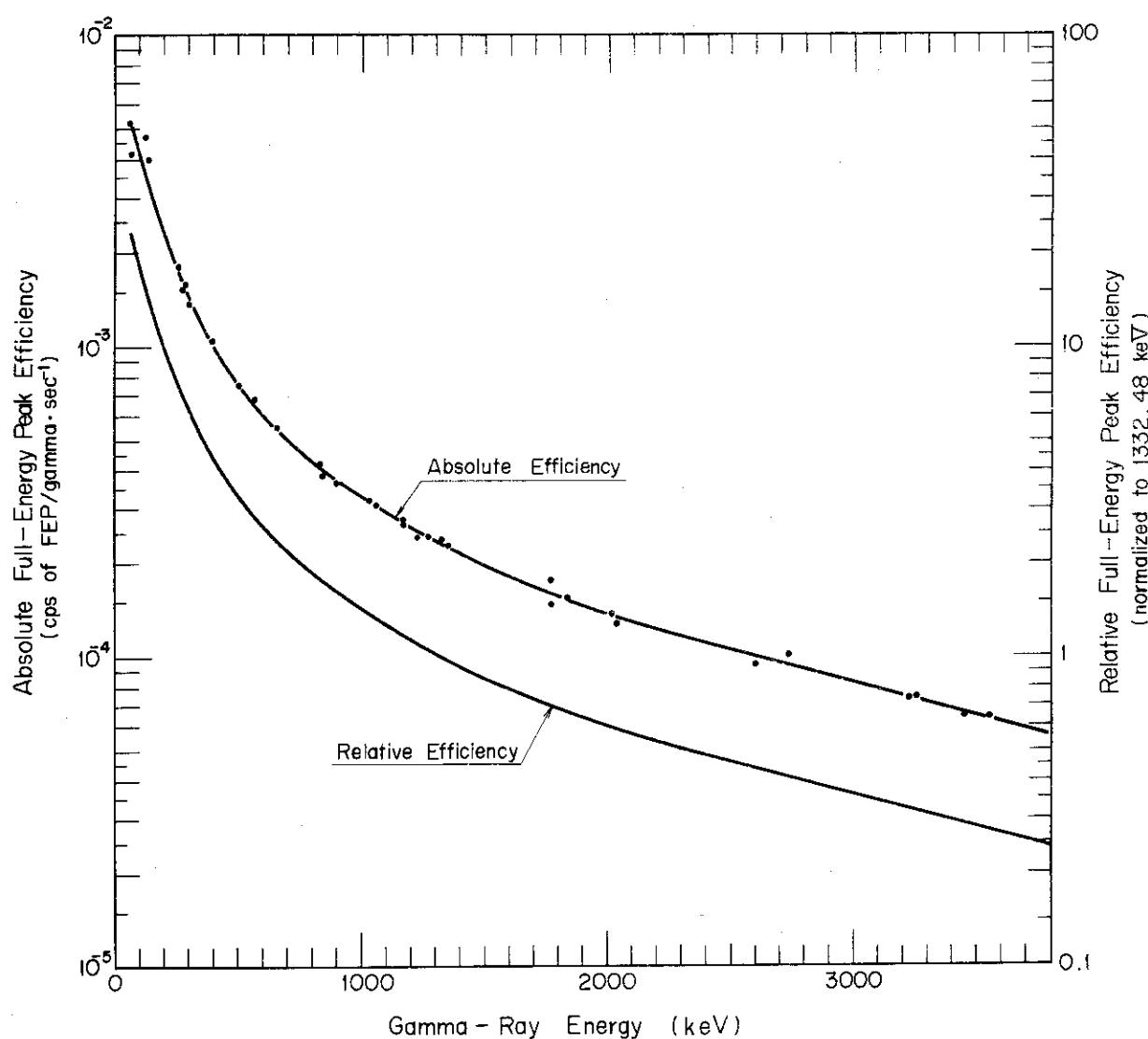
第7図から明らかなように、2000 keV 以上のエネルギー領域における対数目盛上に表示された検出効率はエネルギーの増加にともない、直線的にゆるやかな勾配をもって減少している。さらに、測定された低エネルギー領域では、Ge(Li) または検出器窓などの吸収効果による効率の低下は認められていない。

同図に示した結果に寄与する主たる誤差の因子としては、Ⅰ) 統計誤差、Ⅱ) 全吸収ピークの計数値を求める際に行なうコンプトン・スペクトルの評価による誤差、Ⅲ) 光子放出割合の定数の誤差、Ⅳ) 標準線源の検定誤差、などが考えられる。Ⅰ) とⅡ) の誤差については、⁵⁶Co のように多種のエネルギーの光子を放出する核種の低エネルギー光子に対して特に大きくなり、高エネルギー光子ではⅡ) は小さくなるが、検出効率の減少にともないⅠ) が大きくなる一般的傾向がみられる。したがって、測定精度は用いた核種、すなわち放出γ線の種類やその放出割合と精度、あるいは核種を単独または複合して使用するなどの測定方法、などに影響される。このように、検出効率の精度は光子エネルギーに関して一様な傾向をもつとは限らない。ここでの測定では、Ⅰ) ~Ⅲ) までの誤差が大部分を占め、標準線源の誤差(約1%)の寄与は少ない。

第7図に示した絶対全吸収ピーク効率の誤差として、500 keVまでのエネルギー領域では21%，それ以上の領域では4%が得られている。また、同図に示した結果は既報の結果と⁶⁰Co の 1332.48 keV γ線についてみれば、±0.6%の範囲内によく一致している。

一方、Ge(Li)の検出効率を表示するために、線源-検出器間距離 2.5 cm において線源から放出された⁶⁰Co の 1332.48 keV 光子あたりの全吸収ピークの計数率(cps/gamma·sec⁻¹)で表わした絶対検出効率(2.5 cm efficiency)あるいは、この効率を同一条件下における 3" dia. × 3" hgt. の NaI(Tl) 蛍光体の絶対検出効率に対して相対的に表わした相対検出効率が一般的に用いられている。

これらの効率は直径 2.0 mm を有する⁶⁰Co (IAEA 標準線源) を用いて測定された。この測定において線源-検出器間距離は Ge(Li) や NaI(Tl) 結晶の表面を起点として定められた。また、NaI(Tl) の計数率を求めるためにはそのエネルギー分解能の悪さに起因する



第7図 $\text{Ge}(\text{Li})$ の絶対全吸収ピーク効率 (counts per sec of full-energy peak/gamma·sec⁻¹) および ^{60}Co の 1332.48 keV を 1.0 としたときの相対全吸収ピーク効率 [絶対全吸収ピーク効率; 直径 20 mm の線源を検出器より 50 mm の検出器軸上に置いた場合]

1773 keV γ 線の干渉をさけるため、1332 keV ピークの中心より高パルス波高側の計数値を積分し、その結果を2倍する方法がとられた。

この測定の結果、絶対検出効率として、 2.44×10^{-5} が得られた。^{*} この効率は $3'' \times 3''$ NaI(Tl) に対して Heath が計算によって求めた絶対検出効率²³⁾, 1.2×10^{-3} を用いれば、2.03%の相対検出効率に相当する。

ここで測定した相対検出効率としては、1.86%が得られた。このように小さな値が得られた理由として、ここで測定した $3'' \times 3''$ NaI(Tl) の絶対検出効率が 1.31×10^{-3} となり、一般的に考えられている実測値、 $(0.7 \sim 1.0) \times 10^{-3}$ よりかなり大きくなつた点があげられる。一方、 $(0.7 \sim 1.0) \times 10^{-3}$ の実測値を用いれば、ここで得た絶対効率は、2.4~3.5%の相対検出効率に相当することになる。

^{*} 直径が約4mmの点状に近い線源を用いて測定した結果はこの値と±1.3%の範囲内で一致し、25cm efficiency ではここで用いた程度の線源寸法はあまり測定結果に影響を与えていないと考えられる。

4. 結論

今回行なった実験から、使用したスペクトロメーターの differential nonlinearity は波高分析器のフルスケールの 10~90% の範囲においてすら最大約 0.1% もあるが、これに対する波高分析器の寄与は 0.025% 以下と小さいことが確認された。さらに、非直線性の程度はパルス波高に対してゆるやかな変化を示すので、注意ぶかく測定された differential nonlinearity を考慮に入れて測定値を補正すれば 0.01% 程度の測定精度を得ることはそれ程困難ではないと考えられる。しかし、パルサーを併用してスペクトロメーターを較正する場合は、被エネルギー測定 γ 線に近接した基準 γ 線エネルギーでパルサーを規格化し、狭いエネルギー範囲に限定して適用する配慮が必要である。一方、第 2~3 図に示した非直線性の傾向は同一回路によって構成されてもその設定条件、とくに波高分析器の設定条件によって異なった様相を示すとの Donnelly¹⁾ らによる指摘がある。すなわち、Donnelly らは、パルスの極性のみならず波高分析器の sensitivity control と low level discriminator の設定条件が互いに関係し合い、分析可能範囲の下限から上の数百チャンネル（フルスケールの約 30~40%）の範囲にわたる非直線性に影響を与えることを確認した。彼らによれば、sensitivity limit を超えたある波高範囲のパルスを discriminator がカットするよう low level discriminator を設定すれば、第 3 図に示したようにパラボラ的な非直線性の傾向を示し、sensitivity limit を超えたパルスを全て分析できるよう low level discriminator を設定すれば第 2 図に示したように平均値のまわりを振動するような傾向を示すことが認められている。この結論に従えば、ここで得られた非直線性は使用したスペクトロメーター、とくに増巾系のもつ一般的特性ではなく、単に特定の使用条件下での特性を示すに過ぎないことになる。しかし、ここで用いたスペクトロメーターの場合、第 2 図の結果は low level discriminator で小さな入力パルスをカットしている状態で得られたものであり、Donnelly らの結果を直接適用し得るとは即断し得ない。ここでは low level discriminator の非直線性におよぼす効果は系統的に測定されていないので今後の検討が必要である。

以上のような設定条件の与える影響を考慮に入れ、種々な γ 線エネルギー測定に適応し得る測定条件下での非直線性を明確にし、きめの細い利用技術上のデータを得ることが今後の課題と考えられる。

検出効率の点については、500 keV 以上の γ 線エネルギー領域では実用的に使用し得る程度の精度で効率が求められている。しかし、それより低いエネルギー領域における精度はかなり悪いので、精度向上のために今後検討を加える必要があると考えられる。検出効率の適用エネルギー範囲をさらに拡大するため、中性子捕獲 γ 線を利用する方法は現在検討がはじめられている段階である。

一方、Ge(Li) の検出効率を 3" × 3" NaI(Tl) の効率に対して相対的に表わす方法は NaI(Tl) の効率自体が大きなばらつきを示しているので、一般性のある効率の表示方法とはなり難いと考えられる。この意味では、標準線源を用いて実測した絶体検出効率を用いるのが望ましいと考えられる。

4. 結論

今回行なった実験から、使用したスペクトロメーターの differential nonlinearity は波高分析器のフルスケールの 10~90% の範囲においてすら最大約 0.1 %もあるが、これに対する波高分析器の寄与は 0.025% 以下と小さいことが確認された。さらに、非直線性の程度はパルス波高に対してゆるやかな変化を示すので、注意ぶかく測定された differential nonlinearity を考慮に入れて測定値を補正すれば 0.01% 程度の測定精度を得ることはそれ程困難ではないと考えられる。しかし、パルサーを併用してスペクトロメーターを較正する場合は、被エネルギー測定 γ 線に近接した基準 γ 線エネルギーでパルサーを規格化し、狭いエネルギー範囲に限定して適用する配慮が必要である。一方、第 2~3 図に示した非直線性の傾向は同一回路によって構成されてもその設定条件、とくに波高分析器の設定条件によって異なる様相を示すとの Donnelly¹⁾ らによる指摘がある。すなわち、Donnelly らは、パルスの極性のみならず波高分析器の sensitivity control と low level discriminator の設定条件が互いに関係し合い、分析可能範囲の下限から上の数百チャンネル（フルスケールの約 30~40%）の範囲にわたる非直線性に影響を与えることを確認した。彼らによれば、sensitivity limit を超えたある波高範囲のパルスを discriminator がカットするよう low level discriminator を設定すれば、第 3 図に示したようにパラボラ的な非直線性の傾向を示し、sensitivity limit を超えたパルスを全て分析できるように low level discriminator を設定すれば第 2 図に示したように平均値のまわりを振動するような傾向を示すことが認められている。この結論に従えば、ここで得られた非直線性は使用したスペクトロメーター、とくに増幅系のもつ一般的な特性ではなく、単に特定の使用条件下での特性を示すに過ぎないことになる。しかし、ここで用いたスペクトロメーターの場合、第 2 図の結果は low level discriminator で小さな入力パルスをカットしている状態で得られたものであり、Donnelly らの結果を直接適用し得るとは即断し得ない。ここでは low level discriminator の非直線性における効果は系統的に測定されていないので今後の検討が必要である。

以上のような設定条件の与える影響を考慮に入れ、種々な γ 線エネルギー測定に適応し得る測定条件下での非直線性を明確にし、きめの細い利用技術上のデータを得ることが今後の課題と考えられる。

検出効率の点については、500 keV 以上の γ 線エネルギー領域では実用的に使用し得る程度の精度で効率が求められている。しかし、それより低いエネルギー領域における精度はかなり悪いので、精度向上のために今後検討を加える必要があると考えられる。検出効率の適用エネルギー範囲をさらに拡大するため、中性子捕獲 γ 線を利用する方法は現在検討がはじめられている段階である。

一方、Ge(Li) の検出効率を $3'' \times 3''$ NaI(Tl) の効率に対して相対的に表わす方法は NaI(Tl) の効率自体が大きなばらつきを示しているので、一般性のある効率の表示方法とはなり難いと考えられる。この意味では、標準線源を用いて実測した絶体検出効率を用いるのが望ましいと考えられる。

付 錄

Ge(Li)スペクトロメーターのエネルギー較正に有用な γ 線源とそのエネルギー
シンチレーション・スペクトロメーターのエネルギー較正に従来より使用されている一般的
な γ 線源のほか、Ge(Li)検出器の高エネルギー分解能の故にこの目的のために使用される
ことが多くなった γ 線源とそのエネルギーを最近の報告から集め、それらを以下に示す。
これらの核種は原子番号の順に、同一核種にあっては質量数の順に並べられている。
なお、末尾には高エネルギー領域のエネルギー較正や検出効率の決定のために有用な中性子
捕獲 γ 線のエネルギーと γ 線放出割合の表も併せて示されている。

I. γ 線 源

核種	γ 線エネルギー(keV)	γ 線放出割合	文 献	備 考
^7Be	477.57 \pm 0.05		24	
^{22}Na	1274.52 \pm 0.07		24	
	1274.51 \pm 0.10		25	
	1274.55 \pm 0.04		16	
	1274.55 \pm 0.04	100* (100**) ^{22, *27, **28}		
	511.006 \pm 0.002	177.6* (179.5 \pm 1**) ²⁶		
^{24}Na	1368.58 \pm 0.11	100.0*	16, *12	
	2754.04 \pm 0.11	99.9		
	1368.526 \pm 0.044		22	
	2753.92 \pm 0.12			
^{46}Sc	889.18 \pm 0.10		25, 29	25, 29 の平均値
	1120.41 \pm 0.10		24, 25, 29	24, 25, 29 の平均値
^{51}Cr	3200.7 \pm 0.05		24	
	3200.85 \pm 0.006		30	
	3201.1 \pm 0.04		16	
	3200.80 \pm 0.013		22	
^{54}Mn	834.840 \pm 0.050		31	
	834.84 \pm 0.07		24	
	834.81 \pm 0.04		16	
	834.81 \pm 0.03		22	

⁵⁶Co の γ 線エネルギーと γ 線放出割合⁸⁾

γ 線エネルギー (keV)	Barker ⁸⁾	Petterson ³²⁾	Auble ³³⁾	Dolan ³⁴⁾	Schoneberg ³⁵⁾	Huguet ³⁶⁾	平均
846.76 ± 0.09	100	100	100	100	100	100	100
1037.99 ± 0.09	13.7 ± 0.8	14.1 ± 1.5	12.8 ± 0.9	12.5 ± 0.5	14.0 ± 2.0	14.5 ± 1.5	13.02 ± 0.35
1238.38 ± 0.10	72.1 ± 5.0	66.8 ± 4.0	69.9 ± 3.5	71.2 ± 2.6	66.3 ± 6.0	70.5 ± 7.0	69.9 ± 1.6
1360.42 ± 0.12	4.80 ± 0.3	4.0 ± 0.8	4.5 ± 0.3	3.8 ± 0.3	3.8 ± 0.4	4.5 ± 0.7	4.3 ± 0.3
1771.74 ± 0.12	16.9 ± 1.0	16.2 ± 1.4	16.1 ± 0.8	15.0 ± 1.3	13.5 ± 1.4	12.5 ± 1.3	15.6 ± 0.7
2015.45 ± 0.20	2.93 ± 0.3	4.1 ± 1.2	2.7 ± 0.2	3.8 ± 0.7	3.5 ± 0.4	3.7 ± 0.6	2.98 ± 0.2
2034.98 ± 0.15	7.37 ± 0.5	9.2 ± 1.7	7.4 ± 0.6	7.8 ± 1.0	6.5 ± 0.8	8.3 ± 1.5	7.4 ± 0.3
2598.88 ± 0.15	15.0 ± 1.3	17.4 ± 1.5	17.3 ± 0.9	16.0 ± 2.7	17.4 ± 1.7	20.0 ± 20	17.1 ± 0.6
3202.42 ± 0.25	2.9 ± 0.3	3.2 ± 0.5	3.4 ± 0.2	2.9 ± 1.1	3.4 ± 0.4	3.8 ± 0.45	3.31 ± 0.14
3253.99 ± 0.25	6.6 ± 0.6	8.5 ± 0.6	7.8 ± 0.4	5.8 ± 2.2	8.3 ± 0.8	9.2 ± 0.9	7.86 ± 0.36
3452.25 ± 0.30	0.63 ± 0.15	0.95 ± 0.15	0.87 ± 0.09	0.7 ± 0.3	0.7 ± 0.1	1.1 ± 0.2	0.81 ± 0.06
3547.98 ± 0.40	0.11 ± 0.05	-	0.15 ± 0.03	0.2 ± 0.1	0.21 ± 0.03	0.16 ± 0.03	0.165 ± 0.02

⁵⁶Co の γ 線エネルギーと γ 線放出割合²⁾

Gehrke et al. ²⁾	Gunnink et al. ¹⁸⁾	Sher and Pate ³⁷⁾	Aubin et al. ²⁷⁾	Auble et al. ³⁸⁾
γ 線エネルギー (keV)	γ 線放 出割合	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放 出割合	γ 線エネルギー (keV)
846.741 ± 0.025	100	846.782 ± 0.060	846.6 ± 0.5 100	846.6 ± 0.5 100
1037.84 ± 0.05	12.9 ± 0.5	1037.851 ± 0.060	1037.6 ± 0.5 12.1 ± 0.8	1038 ± 0.35
1175.1 ± 0.1	2.26 ± 0.23	1175.085 ± 0.070	1175.3 ± 0.5 2.2 ± 0.1	1175 ± 0.13
1238.28 ± 0.06	67.8 ± 1.5	1238.290 ± 0.040	1238.0 ± 0.3 70.2 ± 2.5	1238 ± 1.40
1360.26 ± 0.04	4.16 ± 0.21	1360.219 ± 0.040	1359.8 ± 0.5 4.2 ± 0.4	1360 ± 0.12
1771.38 ± 0.15	16.5 ± 0.8	1771.33 ± 0.06	1771.4 ± 0.5 16.7 ± 1.0	1772 ± 0.40
2015.24 ± 0.12	2.99 ± 0.20	2015.33 ± 0.07	2015.3 ± 0.5 2.9 ± 0.4	2015 ± 0.14
2034.82 ± 0.10	8.2 ± 0.6	2034.90 ± 0.06	2034.9 ± 0.5 7.7 ± 0.5	2035 ± 0.21
2598.53 ± 0.06	18.0 ± 0.9	2598.52 ± 0.05	2598.4 ± 0.5 17.0 ± 0.6	2599 ± 0.44
3202.1 ± 0.2	3.20 ± 0.35	3202.18 ± 0.07*	3202.3 ± 0.5 2.8 ± 0.4	3202 ± 0.14
3253.5 ± 0.2	7.7 ± 0.9	3253.61 ± 0.06*	3253.6 ± 0.5 7.3 ± 0.5	3254 ± 0.21
3273.08 ± 0.10	1.71 ± 0.25	3273.16 ± 0.07*	3273.16 ± 0.5 1.5 ± 0.4	3273 ± 0.73
3451.5 ± 0.3	0.93 ± 0.20	3451.29 ± 0.10*	3451.3 ± 0.5 0.83 ± 0.1	3451 ± 0.07
3548.3 ± 0.4	0.20 ± 0.10		3548.2 ± 0.5 0.15 ± 0.5	3547.6 ± 2.0 6

* これらのエネルギー値はダブル・エスケープ・ピークの測定値に $2 m_e C^2$ を加えて得た。

^{57}Co の γ 線エネルギーと γ 線放出割合 ⁷⁷⁾

78)	γ 線エネルギー (keV)		γ 線放出割合			
	Konijn et al. ⁷⁷⁾	Greenwood et al. ²⁰⁾	相対値		絶対値 (%/disinteg.)	
14.408 ± 0.005			⁷⁹⁾ 10^5	$11410 \pm 500^{77)}$ 10^5	$9.7 \pm 0.4^{77})$ 85.2 ± 0.4	$9.5 \pm 0.3^{21})$ 85.0 ± 1.7
122.07 ± 0.03	122.06 ± 0.02	122.061 ± 0.010				
136.43 ± 0.05	136.47 ± 0.03	136.471 ± 0.010	12000 ± 100	13000 ± 400	11.1 ± 0.3	11.4 ± 1.3
230.4 ± 0.5	230.4 ± 0.6		0.2 ± 0.2	0.5 ± 0.5	0.0004 ± 0.0004	
339.7 ± 0.3	339.68 ± 0.28		2.9 ± 0.3	4.5 ± 0.4	0.0038 ± 0.0003	
352.5 ± 0.3	352.23 ± 0.27		2.0 ± 0.2	3.7 ± 0.4	0.0032 ± 0.0003	
366.8 ± 0.4	367.0 ± 0.5		0.7 ± 0.1	1.5 ± 0.4	0.0013 ± 0.0003	
570.1 ± 0.3	570.04 ± 0.28		16.0 ± 1.0	19.4 ± 11	0.0165 ± 0.0009	
692.1 ± 0.2	692.44 ± 0.06		18.8 ± 5	18.3 ± 11	0.156 ± 0.009	
706.6 ± 0.3	706.46 ± 0.34		5.5 ± 0.6	6.2 ± 0.6	0.0053 ± 0.0005	

核種	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	文献	備考
^{58}Co	810.46 ± 0.10		39	
	1674.9 ± 0.3			
^{60}Co	1173.226 ± 0.040		15	
	1332.483 ± 0.046			
	1173.25 ± 0.08		40	
	1332.54 ± 0.10			
	1332.505 ± 0.025		18	
	1173.23 ± 0.04		22	
	1332.49 ± 0.04			
	1173.22 ± 0.04		16	
^{65}Zn	1115.44 ± 0.10		24, 25	24 と 25 の平均値
^{75}Se	66.183 ± 0.1	$0.92 \pm 0.05^*$	6	* % per disintegration
	96.682 ± 0.1	3.26 ± 0.10		
	120.997 ± 0.1	17.1 ± 0.51		
	135.907 ± 0.1	56.4 ± 1.69		
	198.431 ± 0.1	1.67 ± 0.08		
	264.258 ± 0.1	60.0		
	279.169 ± 0.1	25.1 ± 0.76		
	303.653 ± 0.1	1.32 ± 0.07		
	400.488 ± 0.1	11.7 ± 0.35		

⁷⁶Se の γ 線工ネルギーと γ 線放出割合²⁾

JAERI-M 4560

γ 線工ネルギー (keV)	γ 線放出割合 (%)	D. E. Raeside et al. ⁴¹⁾	E. P. Grigoriev, A. V. Zolotavin ⁴²⁾	W. F. Edwards, C. J. Callagher, Jr. ⁴³⁾	S. Hontzeas, T. Paradellio ⁴⁴⁾
		γ 線工ネルギー - γ 線放出割合 (keV)	γ 線工ネルギー - γ 線放出割合 (keV)	γ 線工ネルギー - γ 線放出割合 (keV)	γ 線工ネルギー - γ 線放出割合 (keV)
6.6048 ± 0.025	1.77 ± 0.20	65.98 ± 0.10	1.40 ± 0.4	6.65 ± 0.5	1.53 ± 0.15
9.6732 ± 0.007	5.60 ± 0.50	9.671 ± 0.07	4.83 ± 0.96	9.66 ± 0.5	5.5 ± 0.3
12.1113 ± 0.010	28.19 ± 1.40	12.110 ± 0.07	29.2 ± 2.9	12.12 ± 1.0	27.9 ± 4.3
13.5998 ± 0.010	98.25 ± 4.6	13.601 ± 0.05	96.0 ± 9.6	13.60 ± 0.8	9.6 ± 5
19.8.600 ± 0.020	24.3 ± 0.12	19.871 ± 0.09	2.25 ± 0.23	19.95 ± 1.2	2.6 ± 0.2
26.4.651 ± 0.015	1.00	26.468 ± 0.06	100	26.50 ± 1.0	100
27.9.525 ± 0.012	43.22 ± 2.2	279.53 ± 0.06	41.3 ± 4.1	28.00 ± 1.0	4.1 ± 2.5
30.3.895 ± 0.020	2.31 ± 0.12	303.99 ± 0.08	2.06 ± 0.21	3.045 ± 1.3	2.5 ± 0.3
40.0.640 ± 0.015	195.6 ± 1.2	400.75 ± 0.06	19.2 ± 1.9	40.12 ± 2.0	2.23 ± 2.3

^{82}Br の γ 線エネルギーと γ 線放出割合²⁾

Gehrke et al. ²⁾		Meridith and Meyer ⁴⁵⁾		Liukkonen et al. ⁴⁶⁾	
γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合
921.83 ± 0.008	0.82 ± 0.10	921.90 ± 0.016	0.897 ± 0.026	92.2 ± 0.5	0.70 ± 0.15
221.466 ± 0.015	256 ± 0.15	221.411 ± 0.025	272 ± 0.008	221.5 ± 0.3	2.3 ± 0.3
273.475 ± 0.025	0.91 ± 0.07	273.419 ± 0.032	1.003 ± 0.05	273.5 ± 0.3	0.85 ± 0.10
554.331 ± 0.020	84.61 ± 4.3	554.322 ± 0.015	84.8 ± 0.2	554.2 ± 0.2	85 ± 4
619.086 ± 0.015	51.47 ± 2.5	619.054 ± 0.021	51.6 ± 0.4	619.3 ± 0.4	52 ± 2
698.347 ± 0.020	33.30 ± 1.7	698.320 ± 0.019	34.3 ± 0.9	698.2 ± 0.4	33.5 ± 1.5
776.494 ± 0.025	100	776.489 ± 0.035	100	776.3 ± 0.3	100
827.808 ± 0.025	29.05 ± 1.5	827.812 ± 0.025	28.7 ± 0.9	827.6 ± 0.4	31 ± 2
1043.954 ± 0.035	32.36 ± 1.6	1043.981 ± 0.031	32.8 ± 0.5	1043.8 ± 0.4	34 ± 2
1317.433 ± 0.025*	32.02 ± 1.6	1317.473 ± 0.047	32.2 ± 0.6	1317.1 ± 0.4	32 ± 3
1474.841 ± 0.035*	19.94 ± 1.0	1474.82 ± 0.08	19.9 ± 0.2	1474.4 ± 0.4	20 ± 2
1650.27 ± 0.060	0.90 ± 0.08	1650.29	0.947 ± 0.008	1649.8 ± 0.8	1.1 ± 0.3

* Energies obtained from cascade.

核種	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	文 献	備 考
^{88}Y	898.01 ± 0.07		24	
	898.04 ± 0.04	100* (94**)	22, *27	
	1836.13 ± 0.04	106.5* (100**)	**47	
	1836.127 ± 0.050		18	
	897.99 ± 0.04		16	
	1836.03 ± 0.11			
	898.04 ± 0.04		22	
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	1836.13 ± 0.04			
	657.61 ± 0.15		39	
	677.36 ± 0.20			
	686.80 ± 0.25			
	706.28 ± 0.25			
	743.99 ± 0.25			
	763.77 ± 0.20			
	817.87 ± 0.30		39	
	884.46 ± 0.25			
	937.2 ± 0.3			

核種	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	文献	備考
^{110m}Ag (続き)	1383.8 \pm 0.4		39	
	1475.5 \pm 0.4			
	1504.6 \pm 0.5			
	1561.8 \pm 0.4			
^{109}Cd	22.1 \pm 0.1 *			*結合エネルギーからの計算値
	25.0 \pm 0.1 *			
	87.7 \pm 0.2 **		** 48	
^{123}Sb	1691.022 \pm 0.040		18	
^{131}I	80164 \pm 0.008			
	284.311 \pm 0.010		39	
	364.491 \pm 0.015			
	636.90 \pm 0.23			
	722.91 \pm 0.05			
	364.491 \pm 0.015		18	
^{137}Cs	661.595 \pm 0.076		49	
	661.632 \pm 0.076		49	
	661.615 \pm 0.030		18	
	661.64 \pm 0.04		16	
	661.635 \pm 0.076		22	
^{133}Ba	160.58 *	1.21 ***	* 50	
	223.15 *	0.803	** 51	
	276.33 **	11.61	*** 27	
	320.85 **	29.75		
	356.03 **	100		
	383.90 **	14.18		

 ^{133}Ba の γ 線エネルギーと γ 線放出割合 ⁸⁰⁾

γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	
	相対値	絶対値*
30.89 \pm 0.18 K α_1	129.0 \pm 9.0	66.7 \pm 8.7
35.29 \pm 0.18 K β_1	33.9 \pm 2.3	17.5 \pm 2.3
53.42 \pm 0.25	3.78 \pm 0.09	1.96 \pm 0.22
81.15 \pm 0.26	64.7 \pm 4.2	33.5 \pm 4.3
160.58 \pm 0.27	12.1 \pm 0.05	0.626 \pm 0.074
223.21 \pm 0.45	0.803 \pm 0.042	0.416 \pm 0.051
276.50 \pm 0.32	11.61 \pm 0.17	6.01 \pm 0.67
303.00 \pm 0.63	29.75 \pm 0.29	15.39 \pm 0.17
356.32 \pm 0.48	100	51.7 \pm 5.7
384.13 \pm 0.42	14.18 \pm 0.26	7.34 \pm 0.82

* Photons/100 disintegr.

核種	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	文献	備考
^{140}La	328.752 \pm 0.030		18	* ダブルエスケープ・ ピーク (DE) ** DE + $2m_0 c^2$ で算出
	487.032 \pm 0.030			
	574.188 \pm 0.040 *			
	1596.200 \pm 0.040 **			
^{139}Ce	165.84 \pm 0.03		39	
	165.85 \pm 0.05			
	165.856 \pm 0.008			
			24	
			52	

 ^{152}Eu の γ 線エネルギーと γ 線放出割合 ⁷⁾

γ 線エネルギー (keV) ⁸¹⁾	γ 線放出割合(相対値)				
	Dzhelepov ⁵³⁾	Nathan ⁵⁴⁾	Mukherjee ⁵⁵⁾	Adopted ^{*7)}	Nuclear Data ⁵⁶⁾
121.77	32 \pm 2	—	42 \pm 4	32	32†
244.66	8 \pm 1	—	11 \pm 1	8	8
344.32	28 \pm 1	25 \pm 2	26 \pm 3	26	24
411.23	2.2 \pm 0.2	2.0 \pm 0.5	—	2	2
444.23	4.0 \pm 0.4	4.3 \pm 0.5	—	3	4.5
779.5	12.0 \pm 0.6	13.2 \pm 1.0	14 \pm 2	13	13
964.8	13.6 \pm 0.6	14.4 \pm 1.3	16 \pm 2	14	14
1086.6	10.0 \pm 0.4	11.1 \pm 1.8	} 26 \pm 3	11	11
1112.7	12.6 \pm 0.6	12.4 \pm 1.8		14	15
1409.4	20	20	20	20	20

* Estimated error is 10%

† Calculated from the relative c_{ek} intensity ratios of the 122 and 344 keV lines and theoretical σ_k

核種	γ線エネルギー (keV)	γ線放出割合	文献	備考
¹⁶⁵ Dy	94.692±0.003		57	
	115.092±0.010			
	119.490±0.005			
	259.533±0.011			
	279.759±0.020			
	361.676±0.030			
	405.392±0.037			
	456.080±0.050			
	479.525±0.057			
	545.848±0.070			
	565.77 ±0.15			
	620.585±0.088			
	633.425±0.058			
	660.038±0.086			
	715.31 ±0.11			
¹⁶⁹ Yb	54.1 (K _α)		58	
	61.3 (K _β)			
	63.1			
	93.6			
	109.8			
	118.2			
	130.5			
	177.2			
	198.0			
	261.0			
	307.7			
^{180m} Hf	215.25 ±0.13*	100**	*59	
	332.5 ±0.3	116±0.9%	**12	
	443.8 ±0.6	102±1.5%		
¹⁹² Ir	295.938±0.009		15	
	308.429±0.010			
	316.486±0.010			
	468.053±0.014			
	588.557±0.017			
	604.385±0.017			
	612.435±0.017			

核種	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出割合	文献	備考
^{192}Ir	205.782 \pm 0.014		39	数種のデータの平均値
	468.060 \pm 0.010		31	
	295.938 \pm 0.010		18	
	308.440 \pm 0.010			
	316.490 \pm 0.010			
	612.430 \pm 0.02			
^{198}Au	411.795 \pm 0.009		60	
^{203}Hg	70.833 \pm 0.001		39	数種のデータの平均値
	72.873 \pm 0.001			
	82.5 \pm 0.2			
	84.9 \pm 0.1			
	279.17 \pm 0.02			
	279.191 \pm 0.008		22	
	279.18 \pm 0.02		61	
	279.21 \pm 0.04		16	
^{208}Tl	583.139 \pm 0.023 *	100 **	* 15	
	2614.47 \pm 0.10	117.4	** 27	
	583.19 \pm 0.11		16	
	2614.53 \pm 0.11			
	2614.708 \pm 0.050		18	

 ^{207}Bi の γ 線エネルギーと γ 線放出割合

γ 線エネルギー (keV)	γ 線 放 出 割 合				
	Donnelly et al. ¹⁾	Alberger et al. ⁶⁴⁾	Lieshout et al. ⁶⁵⁾	Raeside et al. ⁶⁶⁾	Aubin et al. ²⁷⁾
569.63 \pm 0.08 ³⁹⁾	100	100	100	100	100
1063.58 \pm 0.06 ³⁹⁾	78.4 \pm 2.4	78	77 \pm 3	78.3 \pm 2.4	78.4
1769.71 \pm 0.13 ⁶²⁾	7.07 \pm 0.35	8	9 \pm 1	7.27 \pm 0.44	7.07
569.62 \pm 0.06 ⁶²⁾ , 569.70 \pm 0.04 ¹⁶⁾					
1063.63 \pm 0.07 ⁶³⁾ , 1063.59 \pm 0.04 ¹⁶⁾					

^{226}Ra (放射平衡) の γ 線エネルギーと γ 線放出割合¹⁰⁾

γ 線エネルギー (keV)	γ 線 放 出 割 合			
	Dzhelapov et al. ⁶⁷⁾	Robert ⁶⁸⁾	Wallace et al. ¹⁰⁾	γ 放出核種
185.7	8.48 (0.040*)	—	9.91 ± 0.31	^{226}Ra
241.92	22.26 (0.105)	17.16 ± 0.64	19.33 ± 0.30	^{214}Pb
295.22	40.0 (0.189)	43.1 ± 1.0	47.84 ± 0.91	^{214}Pb
351.99	80.0 (0.377)	85.4 ± 2.6	87.2 ± 1.9	^{214}Pb
609.37	100 (0.471)	100.0 ± 2.0	100	^{214}Bi
768.7	11.22 (0.053)	—	9.90 ± 0.21	"
934.8	7.00 (0.033)	7.94 ± 0.57	6.26 ± 0.18	"
1120.4	35.2 (0.166)	35.9 ± 1.8	31.90 ± 0.73	"
1238.3	12.72 (0.060)	13.3 ± 1.3	12.77 ± 0.12	"
1378.2	10.02 (0.048)	8.98 ± 0.51	8.70 ± 0.48 **	"
1385			1.29 ± 0.30 **	"
1728.3	5.09 (0.024)	7.44 ± 0.38	6.94 ± 0.20	"
1764.4	34.6 (0.163)	39.2 ± 1.5	35.34 ± 0.10	"
2117.0	2.97 (0.014)	24.3 ± 0.51	2.76 ± 0.13	"
2204.2	11.01 (0.052)	14.10 ± 0.15	11.22 ± 0.47	"
2446	3.39 (0.016)	4.10 ± 0.15	3.32 ± 0.06	"

* % of gamma-rays per disintegration

** 10.00 ± 0.41 (両者の和)

核種	γ 線エネルギー (keV)	γ 線 放 出 割 合	文 献	備 考
^{241}Am	11.887 ± 0.004		69	
	13.9 ± 0.1*			* 結合エネルギーから算出
	17.8 ± 0.1*			
	20.8 ± 0.1*			
	26.348 ± 0.010		70	
	59.543 ± 0.015		70	
	59.568 ± 0.017		71	

消滅輻射のエネルギー

エネルギー (keV)	文献
511.006 ± 0.002	72
511.006 ± 0.002	22
511.006 ± 0.002	1963 Intern. Standard
510.99 ± 0.04	16

II. 中性子捕獲 γ 線I) ${}^6\text{Li}(n, \gamma){}^7\text{Li}$ 反応における γ 線エネルギーと γ 線強度⁷³⁾

E_γ (keV)	E_R (keV)	$E_\gamma + E_R$ (keV)	I_γ
724.7 ± 2	4.0	725.1 ± 2	61 ± 3
676.9 ± 2	3.5	676.3	39 ± 2
		463.0	< 2
		415.2	< 2
		262.1	< 6

I_γ : γ 線強度
(photons/100 captures)

 E_γ : 測定した γ 線エネルギー E_R : 原子核の反応によるエネルギー損失II) ${}^{10}\text{B}(n, \gamma){}^{11}\text{B}$ 反応における γ 線エネルギーと γ 線強度⁷³⁾

E_γ (keV)	E_R (keV)	$E_\gamma + E_R$ (keV)	I_γ
1144.7 ± 2	6.3	1145.3 ± 2	6 ± 1
891.6 ± 2	3.8	892.0 ± 2	15 ± 2
700.6 ± 2	2.4	700.8	54 ± 3
673.9 ± 2	2.1	674.1 ± 2	19 ± 1
		503.0	< 2
471.1 ± 2	1.0	471.2	25 ± 1
444.4 ± 2	1.0	444.5 ± 2	65 ± 3
253.4 ± 2	0.3	253.4	15 ± 2
229.5 ± 2	0.3	229.6	10 ± 3
		214.0	< 3

III) $^{12}\text{C}(\text{n}, \gamma)^{13}\text{C}$ 反応における γ 線エネルギーと γ 線強度⁷³⁾

$E_{\gamma}^{74)}$ (keV)	E_R (keV)	$E_{\gamma} + E_R$ (keV)	I_{γ}
4945	1.0	4946	66±3
		3848	<0.2
3684	0.55	3685	34±2
		3090	<0.6
1262	0.07	1262	34±2

 I_{γ} : photons/100 capturesIV) $^{14}\text{N}(\text{n}, \gamma)^{15}\text{N}$ 反応における γ 線エネルギーと γ 線強度⁷³⁾

E_{γ} (keV)		E_R (keV)	$E_{\gamma} + E_R$ (keV)	I_{γ}	
Thomas et al. ⁷³⁾	Greenwood et al. ⁷⁵⁾			Thomas et al. ⁷³⁾	Motz et al. ⁷⁶⁾
10830±2	10829.7	4.2	10834±2	13.3±2.0	14
9151±2		3.0	9154±2	1.7±0.2	1.4
9047±4		2.9	9050±4	0.2±0.03	0.5
8570±4		2.6	8573±4	0.2±0.03	
8311±2		2.5	8313±2	4.4±0.4	4
7299±1		1.9	7301±1	1.0±0.5	9
6323±1	6322.0	1.4	6324±1	18.8±0.9	18
5562±1	5562.6	1.1	5563	1.03±0.5	11
5534±1	5533.5	1.1	5535	18.8±0.9	21
5298±1	5298.3	1.0	5299±1	21.4±1.1	21
5270±1	5269.6	1.0	5271±1	3.06±1.5	32
4509±1	4509.2	0.7	4510	1.66±0.8	16
3883±2		0.5	3883	0.8±0.1	
3855±2		0.5	3855	1.0±0.1	0.5
3678±1	3678.1	0.5	3678	15.9±0.8	<23
3532±1	3532.3	0.4	3532	9.9±0.5	9
2830±2		0.3	2830	2.0±0.2	15
2521±2	2518.0	0.2	2521	6.1±0.3	6
1997±2		0.1	1997	4.6±0.2	4
1989±2		0.1	1989	1.5±0.3	
1885±1	1884.9	0.1	1885	19.7±1.0	21
1857±2		0.1	1857	0.8±0.2	
1679±2		0.1	1679	9.2±0.5	12

 I_{γ} : photons/100 captures

V) $^{53}\text{Cr}(n,\gamma)^{54}\text{Cr}$ 反応における γ 線エネルギーと γ 線強度¹²⁾

γ 線エネルギー (keV)	γ 線強度 (相対値)
835	100
1783	1.19 ± 0.7
2239	1.28 ± 0.7
3720	4.0 ± 0.3
4847	1.9 ± 0.2
4872	1.0 ± 0.2
5999	5.5 ± 0.6
6642*	1.28 ± 1.3
7100	1.05 ± 1.1
8883	6.4 ± 7

* 通常のクロミウムを標的に使用すると、 ^{53}Cr の 5.61 MeV γ 線の全吸収ピークが ^{54}Cr の 6.642 MeV のダブル・エスクープ・ピークに重複する点に注意が必要である。

文 献

1. D.P. Donnelly, H.W. Baer, J.J. Reidy and M.L. Wiedenbeck, Nucl. Instr. and Meth., 57, 219 (1967)
2. R.J. Gehrke, J.E. Cline and R.L. Heath, Nucl. Instr. and Meth., 91, 349 (1971)
3. G. Aubin, J. Barrette, G. Lamoureux and S. Monaro, Nucl. Instr. and Meth., 76, 85 (1969)
4. G.V. Walford and C.E. Doust, Nucl. Instr. and Meth., 67, 272 (1969)
5. D.P. Donnelly and M.L. Wiedenbeck, Nucl. Instr. and Meth., 64, 26 (1968)
6. T.S. Nagpal and R.E. Gaucher, Nucl. Instr. and Meth., 89, 311 (1970)
7. P. Mukherjee and A.K. Sengupta, Nucl. Instr. and Meth., 68, 165 (1969)
8. P.H. Barker and R.D. Connor, Nucl. Instr. and Meth., 57, 147 (1967)
9. G. Walford and C.E. Doust, Nucl. Instr. and Meth., 62, 353 (1968)
10. G. Wallace and G.E. Coote, Nucl. Instr. and Meth., 74, 353 (1969)
11. J. Kopecký, W. Ratyński and E. Warming, Nucl. Instr. and Meth., 50, 333 (1967)
12. W.R. Kane and M.A. Mariscotti, Nucl. Instr. and Meth., 56, 189 (1967)
13. F.C. Young, A.S. Figuera and G. Pfeuffer, Nucl. Instr. and Meth., 92, 71 (1971)
14. 東条隆夫, 近藤 真, 稚田正美, 白石忠男,
JAERI-M レポート No. 4461 (1971)
15. G. Murray, R.L. Graham and J.S. Geiger, Nucl. Phys., 63, 353 (1965)
16. M.G. Strauss, F.R. Lenkszus and J.J. Eichholz, Nucl. Instr. and Meth., 76, 285 (1969)
17. F.A. Valente, "A Manual of Experiments in Reactor Physics", The Macmillan Company, New York, p.39 (1963)
18. R. Gunnink, R.A. Meyer, J.B. Niday and R.D. Anderson, Nucl. Instr. and Meth., 65, 26 (1968)
19. P.P. Day, Nucl. Phys., 26, 649 (1961)
20. R.C. Greenwood, R.G. Helmer and R.J. Gehrke, Nucl. Instr. and Meth., 77, 141 (1970)
21. Recommended Nuclear Data IAEA Vienna (1970)
22. R. Brenner, Rev. Sci. Instr., 40, 1011 (1969)
23. R.L. Heath: IDO-16880-1, AEC R & D Report Physics TID-4500 (31st Ed., 1964)
24. W.W. Black and R.L. Heath, Nucl. Phys., A90, 650 (1967)
25. A.V. Ramayya, J.H. Hamilton, S.M. Brakmavar and J.J. Pinajian, Phys. Letters, 24B, 49 (1967)

26. E.R. Cohen and J.W.M. DuMond, Rev. Mod. Phys., 37, 537 (1965)
27. G. Aubin, J. Barrette, M. Barrette and S. Monaro, Nucl. Instr. and Meth., 76, 93 (1969)
28. G.J. Emery and W.R. Kane, Phys. Rev., 118, 755 (1960)
29. J.J. Reidy and M.L. Wiedenbeck, Nucl. Phys., 70, 518 (1965)
30. J.J. Reidy, Private Communication
31. J.B. Marion, University of Maryland Technical Report 656 August 1967
(ORO-2098-58)
32. H. Pettersson, O. Bergman and C. Gergman, Ark. Fys. 29, 423 (1965)
33. R.L. Auble, W.C. McHarris and W.H. Kelly, Nucl. Phys. A91, 225 (1967)
34. K.W. Dolan, D.K. McDaniels and D.O. Wells, Phys. Rev. 168, 1151 (1966)
35. R. Schoenberg, M. Schumacher and A. Flammersfeld, Z. Physik, 192, 305 (1966)
36. M. Huguet, H. Forrest and C. Ythier, C.R. 263B, 1342 (1966)
37. A.H. Sher and B.D. Mate, Nucl. Phys., A112, 85 (1968)
38. R.L. Auble, D.K. McDaniels and D.O. Welis, Phys. Rev., 148, 1151 (1966)
39. J.B. Marion, Gamma-Ray Calibration Standards, University of Maryland
Technical Report 653 (1957)
40. J.J. Reidy and M.L. Wiedenbeck, Bull. Am. Phys. Soc., 10, 1131 (1965)
41. D.E. Raeside, M.A. Ludington, J.J. Reidy and M.L. Wiedenbeck, Nucl. Phys.,
A130, 677 (1969)
42. E.P. Grigoriev and A.V. Zolotavin, Nucl. Phys., 14, 443 (1960)
43. W.F. Edwards and G.J. Gallagher, Jr., Nucl. Phys., 26, 649 (1961)
44. T. Paradellio and S. Hontzeas, Nucl. Phys., A131, 378 (1969)
45. G.F. Meredith and R.A. Meyer, Nucl. Phys., A142, 513 (1970)
46. E. Liukkonen, J. Hattula and A. Anttila, Nucl. Phys. A138, 163 (1969)
47. R.W. Peelle, ORNL-3016 (1960)
48. J. Moreau, J. Phys. Radium, 15, 380 (1954)
49. R.L. Graham, G.T. Ewan and J.S. Geiger, Nucl. Instr. and Meth., 9, 245 (1960)
50. H.J. Hennecke, J.C. Manthuruthil, O. Bergman and C.R. Codhern, Phys. Rev.,
159, 955 (1967)
51. J. Barrette and S. Monaro, Nucl. Instr. and Meth., 63, 235 (1968)
52. H.W. Baer, Private Communication
53. B.S. Dzhelepov et al., J. Nucl. Phys., 3, 785 (1966); Soviet J. Nucl. Phys.,
3, 577 (1966)
54. O. Nathan and S. Hultberg, Nucl. Phys., 10, 118 (1959)
55. P.N. Mukherjee et al., Physica, 26, 179 (1960)
56. Nuclear Data Sheets (1959-1965) 1471
57. M.A. Ludington and D.E. Raeside, Nucl. Instr. and Meth., 94, 195 (1971)

58. Nuclear Data Sheets, N.R.C., Washington 6-1-67 (July 1964)
59. W.F. Edwards and F. Boehm, Phys. Rev., 121, 1499 (1961)
60. G. Murray, R.L. Graham and J.S. Geiger, Nucl. Phys., 45, 177 (1963)
61. C.J. Herrlandar and R.L. Graham, Nucl. Phys., 58, 544 (1964)
62. F.P. Brady, N.F. Peek and R.A. Warner, Nucl. Phys., 66, 365 (1965)
63. W.W. Black and R.L. Heath, Nucl. Phys., 58, 544 (1964)
64. D.E. Albarger and A.W. Sunyar, Phys. Rev., 99, 695 (1955)
65. R. Van Lieshout, A.H. Wapstra, R.A. Ricci and R.K. Grgis in "Alpha, Beta- and Gamma-ray Spectroscopy" (ed. K. Siegbahn; North-Holland Publ. Amsterdam, 1965, p.504)
66. D.E. Raeside and M. Ludington, Private Communication
67. B.S. Dzhelepev and N.N. Zhukovsky, Nucl. Phys., 2, 250 (1958)
68. M. Robert, CEA-R-3692 (1968)
69. J.A. Bearden and A.F. Burr, Atomic Energy Levels, USAEC Report NYO-2543-1 (1965)
70. T. Yamazaki and J.M. Hollander, Nucl. Phys., 84, 505 (1966)
71. P.P. Day, Phys. Rev., 97, 689 (1955)
72. E.R. Cohen and J.W.M. DuMond, Rev. Mod. Phys., 37, 537 (1965)
73. G.E. Thomas, D.E. Blatchley and L.M. Bollinger, Nucl. Instr. and Meth., 56 325 (1967)
74. W.V. Prestwich, R.E. Coté and G.E. Thomas, Phys. Rev., (Sept. 1967)
75. R.C. Greenwood et al., ANL-7282 (1966)
76. H.T. Motz, R.E. Carter and W.D. Barfield, "Pile Neutron Research in Physics", Proc. Symp., Vienna, Oct., 1960 (IAEA, Vienna, 1962) 225
77. J. Konijn and E.W.A. Lingeman, Nucl. Instr. and Meth., 94, 389 (1971)
78. Nucl. Data Sheets, 2, sect. B. 3-4, 126 (1970)
79. J.M. Mathiesen and J.P. Hurley, Nucl. Phys., 72, 475 (1965)
80. A. Notea and Y. Gurfinkel, Nucl. Instr. and Meth., 57, 173 (1967)
81. B.V. Bobykin, K.M. Novik-Izvest. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. 21, 1556 (1957)