

JAERI-Tech

2005-050



JP0550503



放射性廃棄物から製作される溶融固化体の
放射能迅速評価のための逆同時および
同時 γ 線スペクトロメトリーの検討

2005年9月

原賀 智子・亀尾 裕・星 亜紀子
米澤 伸四郎・中島 幹雄

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

本レポートは、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。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

放射性廃棄物から製作される溶融固化体の放射能迅速評価のための
逆同時および同時 γ 線スペクトロメトリーの検討

日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部
原賀 智子・亀尾 裕・星 亜紀子・米澤 伸四郎*・中島 幹雄

(2005年8月4日受理)

日本原子力研究所から発生する低レベル放射性雑固体廃棄物をプラズマ溶融して製作される溶融固化体の簡易・迅速な放射能評価法として、 γ 線放出核種の非破壊測定法を検討した。Ge検出器のみを使用する通常の γ 線スペクトロメトリーで問題となる共存核種のコンプトン散乱に起因するバックグラウンド計数を低減させ、目的核種を選択的に測定するため、Ge検出器とBGO検出器を用いる、1) 逆同時 γ 線スペクトロメトリー、2) 同時 γ 線スペクトロメトリーを検討した。廃棄物中に多く含まれる ^{60}Co の存在下で、単一の γ 線を放出する ^{137}Cs の測定に対しては逆同時 γ 線スペクトロメトリーを、複数のカスケード γ 線を放出する ^{152}Eu の測定に対しては同時 γ 線スペクトロメトリーを適用した結果、 ^{137}Cs の検出限界値は約1/6に低減され、 ^{152}Eu の検出限界値は1/1.5に低減された。本法は放射能評価の迅速化に有効であることがわかった。

Study on Coincidence and Anti-coincidence Gamma-ray Spectrometry
for the Rapid Radioactivity Evaluation of Solidified Products
Prepared from Radioactive Wastes

Tomoko HARAGA, Yutaka KAMEO, Akiko HOSHI,
Chushiro YONEZAWA* and Mikio NAKASHIMA

Department of Decommissioning and Waste Management
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 4, 2005)

Non-destructive gamma-ray spectrometry has been examined as a simple and rapid radioactivity measurement technique for the solidified products prepared by plasma melting for low level radioactive miscellaneous wastes generated from nuclear facilities in the Tokai establishment of JAERI. The Compton background resulting from the coexisting radionuclides pose a problem in the usual gamma-ray spectrometry which uses only a Ge detector. In order to reduce the background count and to measure the interested nuclide selectively, the coincidence and the anti-coincidence gamma-ray spectrometry using the Ge-BGO detector system were examined. As a result of applying the anti-coincidence gamma-ray spectrometry to a single gamma-ray emitter ^{137}Cs and the coincidence gamma-ray spectrometry to multiple gamma-ray emitter ^{152}Eu under existence of ^{60}Co that is mostly contained in radioactive waste, the detection limits of ^{137}Cs and ^{152}Eu in the sample, which contained ^{60}Co , were reduced by a factor of about 6 and 1.5, respectively. It was confirmed that the present methods are useful for the gamma-activity measurement of solidified products of radioactive wastes.

Keywords: Gamma-ray, Coincidence, Anti-coincidence, Compton Suppression, Radioactivity Evaluation, Plasma Melting, Solidified Product, Miscellaneous Waste

* On loan to International Atomic Energy Agency (IAEA)

目次

1. はじめに	1
2. 実験	2
2.1 γ 線スペクトロメーター	2
2.2 試料調製および測定	3
2.2.1 スラッグ試料の調製	3
2.2.2 測定方法	3
2.2.3 標準溶液の校正	3
3. 結果および考察	4
3.1 逆同時測定法についての検討	4
3.1.1 スペクトロメーターの調整	4
3.1.2 代表的な放射性核種の γ 線スペクトル測定	5
3.1.3 ^{60}Co を含む試料中の ^{137}Cs の定量	5
3.2 同時測定法についての検討	6
3.2.1 スペクトロメーターの調整	6
3.2.2 代表的な放射性核種の γ 線スペクトル測定	7
3.2.3 ^{60}Co を含む試料中の ^{152}Eu の定量	7
4. まとめ	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental.....	2
2.1 Gamma-ray Spectrometer.....	2
2.2 Sample Preparation and Measurement	3
2.2.1 Preparation of the Slag Samples.....	3
2.2.2 Measurement	3
2.2.3 Calibration of the Standard Solutions.....	3
3. Results and Discussion	4
3.1 Examinations for Anti-coincidence Gamma-ray Spectrometry.....	4
3.1.1 Adjustment of the Spectrometer	4
3.1.2 Gamma-ray Spectra of Typical Radioactive Nuclides.....	5
3.1.3 Determination of ^{137}Cs in ^{60}Co Contained Slag Sample.....	5
3.2 Examinations for Coincidence Gamma-ray Spectrometry	6
3.2.1 Adjustment of the Spectrometer	6
3.2.2 Gamma-ray Spectra of Typical Radioactive Nuclides.....	7
3.2.3 Determination of ^{152}Eu in ^{60}Co Contained Slag Sample	7
4. Conclusions	8
References	8

図目次

Fig.1 The simplified decay schemes of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{152}Eu	16
Fig.2 Cross-sectional view of the Ge-BGO detector system.....	17
Fig.3 Block diagram of the gamma-ray spectrometer	18
Fig.4 Preparation of the samples	19
Fig.5 Simultaneity of timing signals from Ge detector and BGO detector	20
Fig.6 Examination of the differential and integral times of BGO detector signals for timing signals of the Constant-Fraction Discriminator.....	21
Fig.7 Examination of the differential and integral times of Ge detector signals for timing signals of the Constant-Fraction Discriminator.....	22
Fig.8 The optimum delay time of Ge detector signals for the Compton suppression mode	23
Fig.9 Gamma-ray spectra of ^{60}Co in single and anti-coincidence modes	24
Fig.10 Gamma-ray spectra of ^{137}Cs in single and anti-coincidence modes.....	25
Fig.11 Gamma-ray spectra of ^{152}Eu in single and anti-coincidence modes.....	26
Fig.12 Gamma-ray background spectra in single and anti-coincidence modes	27
Fig.13 Gamma-ray spectra of ^{137}Cs in single and anti-coincidence modes.....	28
Fig.14 Comparison of gamma-ray spectra between single and anti-coincidence modes for various composition's samples	29
Fig.15 Optimization of coincidence time	30
Fig.16 Optimization of coincidence time	30
Fig.17 Gamma-ray spectrum of ^{60}Co in coincidence mode	31
Fig.18 Gamma-ray spectrum of ^{137}Cs in coincidence mode	32
Fig.19 Gamma-ray spectrum of ^{152}Eu in coincidence mode	33
Fig.20 Gamma-ray spectra of ^{152}Eu in single and coincidence modes.....	34
Fig.21 Gamma-ray spectra of ^{152}Eu in single and coincidence modes.....	35

表目次

Table1 Nuclear data of the important radionuclides for disposal in safety	10
Table2 Specification of the detectors.....	11
Table3 Radioactivities of the slag samples.....	12
Table4 Detection limits of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{152}Eu in the anti-coincidence measurement.....	13
Table5 Detection limits of ^{137}Cs in the presence of ^{60}Co (2.5 kBq) by the anti-coincidence measurement.....	14
Table6 Detection limits of ^{152}Eu in the presence of ^{60}Co (2.5 kBq) by the coincidence measurement.....	15

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究所（原研）東海研究所における放射性廃棄物の保管量は、200リットルのドラム缶換算で約13万4千本にのほり（平成16年度末）、保管場所の制限などから、処分に対して早急な対策が求められている。原研では、所内で発生する低レベル放射性廃棄物のうちコンクリートやレンガ、焼却灰などの雑固体廃棄物をプラズマ加熱により熔融し、減容するとともにガラス状の安定で均一な熔融固化体に成形してから廃棄体として処分することを計画している¹⁾。平成15年2月には、雑固体熔融固化処理を行う減容処理施設が完成した。

廃棄体の埋設処分に当たっては、廃棄体の放射能評価が必要であり、原子力発電所から発生した低レベル放射性廃棄物の場合には、ドラム缶に充填した廃棄物から放出される γ 線をゲルマニウム半導体検出器（Ge検出器）により外部から非破壊測定し、代表的な核種（ ^{60}Co 、 ^{137}Cs ）をキー核種とするスケーリングファクター法*が採用されている。一方、減容処理施設で製作される熔融固化体の場合には、熔融処理によって均一な固化体が得られるため、溶湯の一部を採取して放射能評価を行う予定である。しかし、原研内で使用される可能性のある核種は、短半減期のものを合わせると2000核種を超えるため、原研では現在、半減期や発生量、生体に対する影響などを考慮し、処分安全評価上重要となる核種（重要核種）を選定し、長半減期の α 、 β 、 γ 、X線放出核種など、30核種程度に絞りこんでいる²⁻³⁾（Table1）。これら重要核種の全てを化学分離して測定するには、膨大な時間と労力を要するため、簡易的で迅速な放射能評価手法を開発する必要がある。このうち、 α あるいは β 線放出核種については、放射化学分離を併用した α 線スペクトロメトリー、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）、液体シンチレーション計数法等の破壊測定法の適用は避けられないが、 γ ・X線放出核種については、Ge検出器を用いた γ 線スペクトロメトリー、低エネルギーGeまたはSi（Li）検出器を用いたX線スペクトロメトリー等の非破壊測定が可能である。

評価対象となる γ 線放出核種には、 ^{60}Co や ^{137}Cs をはじめ、 ^{94}Nb 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{133}Ba 、 152 、 ^{154}Eu 、 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ が挙げられている。これらのうち、 ^{60}Co は他の核種の主要な γ 線よりも高エネルギーの γ 線を放出するため、廃棄物中に ^{60}Co が多量に存在する場合には、Ge検出器だけによる通常の γ 線測定法では、 ^{60}Co の γ 線のコンプトン散乱に起因するバックグラウンド計数（コンプトン連続計数）により、他の核種の検出限界が高くなる。これは、 ^{60}Co に比べて測定対象核種が極めて微量の場合には特に問題となる。

他の核種の検出限界に影響をおよぼすコンプトン連続計数は、Ge検出器を大形のシンチレーション検出器で囲み、Ge検出器からのコンプトン散乱線をシンチレーション検出器で検出し、その信号によってGe検出器からの γ 線検出信号を逆同時計数することによって低減することができる⁴⁾。 ^{60}Co はFig.1の壊変図³⁾に示すように、1173 keVと1332 keVの γ 線をカスケード状に放出する。1332 keVレベルの寿命（ 7.13×10^{-13} 秒）は、Ge検出器の時間分解能 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ 秒に比べて十分に小さいため、2本の γ 線が同時に入射したものと見なされ、逆同時測定ではそれらの全エネルギー吸

*スケーリングファクター法：代表サンプルの核種分析により、外部からの非破壊測定が難しい核種（難測定核種）と代表的な核種（キー核種）との相関関係を求め、これをもとに個々の廃棄体に対するキー核種の測定データから、廃棄体中の難測定核種の放射能濃度を推定する方法。

収ピークの計数値も減少する。一方、 ^{137}Cs のような単一 γ 線ピークの計数値は逆同時測定によって減少しないため、 ^{60}Co に起因するバックグラウンド計数の影響を受けずに選択的に計数することができる。これに対して、 ^{60}Co や ^{152}Eu 等のように γ 線をカスケード状に放出する核種に対しては、各 γ 線の時間相関性を利用し、Ge検出器とシンチレーション検出器の信号を同時計数することにより、これらの核種を選択的に計数することができる。このようなことから、種々の γ 線放出核種が混在する熔融固化体試料について、その中に含まれる個々の γ 線放出核種をできるだけ低い検出限界で非破壊測定するため、Ge検出器と高エネルギー γ 線に対して検出効率のすぐれたBGO検出器 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$:ゲルマニウム酸ビスマス) を使用した逆同時および同時 γ 線測定法の検討を行った。

本報告書では、Ge-BGO検出器を使用した逆同時および同時 γ 線スペクトロメトリーによる、放射性廃棄物中に含まれる ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu 等の γ 線放出核種に対する非破壊測定法の検討結果を報告する。逆同時測定法により ^{60}Co 存在下における ^{137}Cs の検出限界を、そして、同時測定法により ^{60}Co 存在下における ^{152}Eu の検出限界を評価した。

2. 実験

2.1 γ 線スペクトロメーター

(1) 検出器ユニット：測定に使用した検出器ユニットの断面図を Fig.2 に、また各検出器の仕様を Table2 に示す⁵⁾。本検出器ユニットは、Ge 検出器とその結晶部を囲むように配置した BGO 検出器から構成される。BGO 検出器の結晶部は光学的に 8 個に分離されており、各結晶には光電子増倍管 (PM) が取り付けられ、信号処理回路に接続される。

(2) 逆同時 γ 線スペクトロメーター：Ge-BGO検出器を使用した逆同時 γ 線スペクトロメーターのブロック図を Fig.3 に示す。スペクトロメーターは、高圧電源 (HV:ORTEC 659型)、増幅器 (AMP:ORTEC 673型)、タイミングフィルタ増幅器 (TFA:ORTEC 474型)、コンスタントフラクシオンディスクリミネータ (CFD:ORTEC 583型)、シングルチャンネル波高分析器付き時間波高変換器 (TAC/SCA:ORTEC 567型)、ゲート付き遅延発生器 (GDG:ORTEC 416A型)、アナログデジタル変換器 (ADC:ORTEC 1850型)、マルチチャンネル波高分析器 (MCA:SEIKO EG & G MCA7800型) などから構成されている。ADCのゲートをOFFにした場合、Ge検出器からの信号は、そのままADCでデジタル化され、MCAに蓄積されるので、通常の γ 線スペクトル (シングルモード γ 線スペクトル) が得られる。一方、ゲートをAntiにした場合には、逆同時モード γ 線スペクトルが得られる。Ge検出器およびBGO検出器からの信号は、プリアンプで増幅後、TFAにより増幅整形され、CFDでタイミング信号に変換される。Ge検出器およびBGO検出器からのタイミング信号はそれぞれTAC/SCAに入力され、両検出器の同時信号が生成される。この同時信号はGDGによって遅延時間とパルス幅が調整され、Ge検出器からのリニアパルスを逆同時計数するためのゲート信号として使用される。

(3) 同時 γ 線スペクトロメーター：同時測定では、Fig.3に示すようにマルチパラメーターマルチチャンネル波高分析器 (Multiparameter MCA:Laboratory equipment製 LN-9000型) を使用した。本システムはアナログデジタル変換器 (ADC 4801A)、リストアダプタ (LIST ADP)、リストコントローラ (LIST Controller)、リストメモリ (LIST Memory) から構成される。Ge検出器およびBGO検

出器からの信号は、ADCでデジタル化され、リストアダプタでタイミング調整が行われる。その後、リストコントローラで設定された時間内に同時計数されたデータのみがリストメモリへ収集されるので、2つの検出器で同時に計数された信号のみがパーソナルコンピュータ（PC）へ転送される。LN-9000では、2つのADCをGe検出器（X軸）およびBGO検出器（Y軸）に割り当て、0～4000 keVまでを1024チャンネルに表示し（1チャンネル約4 keV相当）、計数値の高低を色別で表すことができる。本報告では、同一の検出器ユニットを用いて、信号を分岐させることにより、シングルモード、逆同時モード、同時モードの3種類の測定を同時に行えるようにした。

2.2 試料調製および測定

2.2.1 スラグ試料の調製

試料調製方法の概要をFig.4に示す。模擬雑固体廃棄物として、コンクリート（88wt%）と酸化第一鉄（FeO、12wt%）をアルミナ製ルツボ内で窒素プラズマにより熔融して製作した熔融固化体（スラグ）⁶⁾を使用した。スラグを粒径50 μ m以下の大きさに粉碎し、その1 gをポリエチレン製容器（直径10 mm×長さ70 mm）に取り、それぞれに⁶⁰Co、¹³⁷Csおよび¹⁵²Euの標準溶液を一定量ずつ添加した。乾燥後脱脂綿を詰め、スラグを容器の先端部分に固定した。このようにして作製した測定試料の放射能濃度をTable3に示す。試料番号1～3は、⁶⁰Co、¹³⁷Csおよび¹⁵²Euの校正用標準試料として用いた。また、試料番号4～8は、一定放射エネルギーの⁶⁰Co（約2.5 kBq）に対し、¹³⁷Csもしくは¹⁵²Euの放射エネルギーを変化させたものである。一日に測定する試料数から測定時間を5000秒とし、この測定時間内に10000カウント程度の計数値を確保するために、また γ 線信号のパイルアップを避けるために、本報告で使用したスペクトロメーターでは、試料の放射エネルギーの上限を2.5 kBqに設定した。実試料において放射エネルギーが多い場合には、試料量の調整によって γ 線パルスのパイルアップを回避する予定である。

2.2.2 測定方法

測定時の試料位置は、Fig.2に示すように、コンプトンバックグラウンドが最も低減されるBGO検出器の内側とした。試料とGe検出器の間には、 β 線吸収用のアクリル板（5 mm厚）を置き、試料-Ge検出器間距離を5 mmとした。本報告では、熔融固化体の均質性を利用し、製作した熔融固化体の一部を採取して測定用試料としているため、ドラム缶を外部から測定する方法と比較すると、試料は少量であり試料-検出器間距離が短い。また、本報告は熔融固化体の放射能測定を迅速に行うことを目的としているため、一日あたりの測定試料数などを考慮し、一試料の測定時間を5000秒とした。

2.2.3 標準溶液の校正

線源調製に使用した⁶⁰Co、¹³⁷Csおよび¹⁵²Euの標準溶液（放射能濃度400～600 Bq/mg）は、その一定量（50～100 mg）を1 cm×1 cmのろ紙に染みこませ、ポリエチレン袋に封入し、これをあらかじめ標準線源（²⁴Na、⁷⁵Se、¹⁰⁹Cd、²⁴¹Am、²²⁶Ra）で検出効率を校正したGe検出器で放射能測定をし、その放射エネルギーを校正した。測定はカスケード γ 線の真の同時計数効果や線源の幾何学的形状の影響が無視できる試料-検出器間距離25 cmで行った。また、溶液の採取・希釈等の際には、

全て重量を0.01 mgまで測定した。

3. 結果および考察

3.1 逆同時測定法についての検討

3.1.1 スペクトロメーターの調整

溶融固化体試料に対する本測定法の適用性を検討するため、模擬廃棄物から調製したスラグ試料を用いて、適切な信号処理のためにスペクトロメーターの調整を行った。2.1 γ 線スペクトロメーターの項 (Fig.3) で説明したように、ADCのゲートをOFFにした場合、Ge検出器による通常のシングルモード γ 線スペクトルが得られる。一方、逆同時測定では両検出器からの信号は増幅後、TFAによって整形され、CFDでタイミング信号に変換される。その後、Ge検出器からの信号はスタート信号として、BGO検出器からの信号はストップ信号としてTAC/SCAに入り、同時計数の時間幅を設定するためのゲート信号を発生する。ADCのゲートをAntiにすることにより、このゲート信号が発生している時間内は計数されないため、逆同時モード γ 線スペクトルが得られる。適切な逆同時測定を行うためには、TFAの時定数を調節することにより出力波形を整形し、またCFDに接続されているDelay回路の遅延時間を調節することにより出力波形を整形して、タイミング信号を調整する必要がある。校正用に作製した ^{60}Co を2.5 kBq含む試料 (Table3 試料番号1) を用いて、以下の手順によりスペクトロメーターの調整を行った。

まず、TFAの時定数を調節して出力波形を整形した。それぞれ4段階に切り替え可能な積分時間 (Integral time: τ_i) および微分時間 (Differential time: τ_d) を個々に変化させ、両検出器からTAC/SCAに同時に到着する信号の分布を示している時間分布スペクトル (Fig.5) の計数値 (Coincidence Counts:C.C.) をできるだけ高く、半値幅 (FWHM) をできるだけ小さくするよう調節した。時間分布スペクトルの計数値が高く、半値幅が小さいということは、散乱線などのバックグラウンドの要因となるGeとBGOの両検出器に同時に入射した信号が効率良く検出されていることを表しており、逆同時測定におけるバックグラウンドの低減効果が期待される。

最初に、Ge検出器側の τ_i および τ_d を固定し、BGO検出器側の τ_i および τ_d を変化させた。その結果をFig.6に示す。最適値はBGO $\tau_i=20$ ns、 $\tau_d=50$ nsであった。次に、先ほど決定したBGO検出器側の τ_i および τ_d を固定し、Ge検出器側の τ_i および τ_d を変化させた。その結果をFig.7に示す。図から推測される最適値はGe $\tau_i=20$ ns、 $\tau_d=100$ nsであるが、時間分布スペクトルの対称性が悪かったためこの値を除き、Ge $\tau_i=50$ ns、 $\tau_d=100$ nsに設定した。

次に、CFDに接続されているDelay回路の遅延時間を調節して出力波形を整形した。TFAの場合と同様に、時間分布スペクトルを最適化することにより評価した。BGO検出器側の遅延時間 (Delay time) を20 nsに固定し、Ge検出器側の遅延時間を変化させた、その結果をFig.8に示す。40~44 ns程度が適当であるとわかった。その後も色々な組み合わせを試した結果、適切な組み合わせが数点あることがわかったが、回路を接続するケーブルの都合上、50 Ω のケーブル3 mに相当する16 nsを基準として、BGO Delay=16 ns (3 mケーブル) とGe Delay=36 nsを使用することにした。

以降の実験においてはここで調整した値、BGO検出器側は $\tau_i=20$ ns、 $\tau_d=50$ ns、Delay=16 ns、Ge検出器側は $\tau_i=50$ ns、 $\tau_d=100$ ns、Delay=36 nsを使用した。このとき、時間分布スペクトルの半値幅および1/10値幅はそれぞれ32.4 nsおよび87.6 nsであった。本報告では米沢らによる報告⁷⁾

と同じスペクトロメーターを使用しているが、以前に報告されている半値幅 (83.0 ns) および1/10 値幅 (210 ns) と比較して、大幅に改善されたのは、CFDの遅延時間等を詳細に検討した結果である。

3.1.2 代表的な放射性核種の γ 線スペクトル測定

逆同時測定では、Ge検出器からの信号は、それを取り囲んだBGO検出器で同時に信号が検出されると電子ゲートが閉となり、結果的にコンプトン散乱によるパルスは計数されないので、コンプトン連続計数が選択的に除去されたスペクトルを得ることができる。代表的な γ 線放出核種の ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{152}Eu および γ 線バックグラウンドについて、逆同時モードおよび通常のGe検出器のみによるシングルモード γ 線スペクトルをFig.9~12に示す。図中には種々のエネルギー領域におけるコンプトンサプレッション効果を表すサプレッション係数を示している。ここで、サプレッション係数 (S.F.) は、次式によって表される。

$$\text{S.F.} = \frac{\text{シングルモード}\gamma\text{線スペクトルの計数率}}{\text{逆同時モード}\gamma\text{線スペクトルの計数率}}$$

シングル測定と比較して逆同時測定では、コンプトン連続計数が1/3~1/53に除去されている。また、カスケード γ 線放出核種である ^{60}Co および ^{152}Eu の全エネルギー吸収ピークの計数値は、シングル測定と比較して約15~17%まで減少したが、単一 γ 線放出核種である ^{137}Cs の全エネルギー吸収ピークにおける計数値の減少は1%以下であった。

次に、これらのスペクトルからそれぞれの核種が単独に存在する場合での5000秒測定における検出限界値を算出した。その結果をTable4に示す。検出限界値の算出にはCurrieによる方法⁸⁾とバックグラウンド計数値の 3σ とする方法⁹⁾を用いた。Currieの検出限界値 (DL) は、 γ 線スペクトロメーターで一般的に使用されている方法で、次式によって求められる。

$$\text{DL} = 2.71 + 3.29\sqrt{B(1+n/2m)}$$

ここで、Bはピーク領域のベースライン計数値、mはバックグラウンド領域のチャンネル数およびnはピーク領域のチャンネル数を表す。バックグラウンド計数値の 3σ とする方法は、旧科学技術庁編の放射能測定法シリーズ⁹⁾に掲載されている方法で、ピーク面積の計数誤差の3倍を検出下限値とする方法である。この方法は国内の γ 線スペクトル解析ソフトに一般的に採用されている。 ^{137}Cs の検出限界値は、Currieによる方法および 3σ による方法のどちらを用いても、逆同時測定ではシングル測定と比較して検出限界値が約1/2に改善された。一方、カスケード γ 線放出核種である ^{60}Co および ^{152}Eu の場合、逆同時測定ではピーク計数値が減少するため、検出限界は改善されなかった。

3.1.3 ^{60}Co を含む試料中の ^{137}Cs の定量

Fig.9に示した ^{60}Co のみ2.5 kBq含む試料の逆同時モードおよびシングルモード γ 線スペクトルによると、シングル測定と比較して逆同時測定では、コンプトン連続計数が大幅に低減された。その効果はコンプトン端 (コンプトン連続計数の最も高い部分) 付近で最大となり1/53に改善された。また、 ^{137}Cs のピーク領域の661 keV付近においても1/43に改善された。試料-Ge検出器間距

離を十分にとり、コリメートされた γ 線を測定した場合には、逆同時測定におけるコンプトン連続計数の低減効果は最大でも1/10程度^{7), 10)}であったが、本測定では、試料をBGO検出器内部に挿入し、試料-Ge検出器間距離を短くすることにより、 ^{60}Co のカスケード γ 線を両検出器で検出する効率が向上し、逆同時回路によりコンプトン連続計数が大幅に低減されたと考えられる。

^{60}Co を含む試料中での ^{137}Cs の測定に対する逆同時測定法の有効性が示唆されたため、 ^{60}Co と ^{137}Cs を含む試料について、 γ 線スペクトルを測定した。 ^{60}Co を2.5 kBqおよび ^{137}Cs を1.1 Bq含む試料 (Table3 試料番号6) の逆同時モードおよびシングルモード γ 線スペクトルをFig.13に示す。シングル測定a)ではピークを確認することができないが、逆同時測定b)ではピークを確認することができた。 ^{137}Cs のピーク領域について詳しく評価するため、 ^{60}Co 濃度をほぼ一定 (約2.5 kBq) にし、測定時間5000秒で、 ^{137}Cs 濃度を変化させた場合の ^{137}Cs のピークを観察した。661 keV γ 線のピークをガウス関数にフィッティングした結果をFig.14に示す。 ^{137}Cs が4.6 Bq (試料番号5) のときには、シングル測定a)および逆同時測定d)ともにピークを確認することができた。しかし、 ^{137}Cs が1.1 Bq (試料番号6) のときには、逆同時測定e)ではピークを確認することができたが、シングル測定b)では計数率の変動が大きく明瞭なピークは確認できなかった。 ^{137}Cs を含まない試料 (試料番号1) のとき、シングル測定c)と比較して逆同時測定f)では、バックグラウンド計数が減少していることを観察できる。 ^{60}Co が2.5 kBq混在する試料において、測定時間5000秒および50000秒で ^{137}Cs の検出限界値を求めた結果をTable5に示す。測定時間5000秒で ^{137}Cs の検出限界値は、シングル測定と比較して逆同時測定では約1/6に低減することができた。これは、 $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ 比にすると 2.8×10^{-4} まで測定可能であることを示している。また、同じ検出限界値を得るための測定時間に換算すると、約1/32に短縮されたことになり、放射能測定の迅速化に有効である。

試料中の ^{60}Co の量が多いほど、シングル測定と比較して逆同時測定による ^{137}Cs の検出限界の改善が期待されるが、 γ 線パルスのパイルアップを避けるため、本報告で使用したスペクトロメーターでは、放射能の上限を2.5 kBqとした。実試料においては、検出限界の改善効果が最大になるように試料量を調整する予定である。

3.2 同時測定法についての検討

3.2.1 スペクトロメーターの調整

同時測定においても逆同時測定と同一の検出器ユニットを使用した。スペクトロメーターのブロック図はFig.3に示したとおりである。検出器からの信号はADCでデジタル化され、リストアダプタでタイミング調整のための遅延時間と同時計数のためのウィンドウ幅が設定される。その後、リストコントローラで設定されたコインシデンスタイムの範囲内のデータがリストメモリへ収集され、PCへ転送される。このようにして、GeとBGOの両検出器で同時に計数された信号のみを蓄積していくことができるが、適切な同時測定を行うためには、リストアダプタでのタイミング調整とウィンドウ幅の調整、およびリストコントローラでのコインシデンスタイムの調整が重要である。

まず、 γ 線が入射してからのGe検出器とBGO検出器での応答時間が異なるため、リストアダプタのDelayを調節して、適切な遅延時間を設定する必要がある。オシロスコープを使用してタイミング調整を行い、Ge検出器側Delay :0.1 μs 、BGO検出器側Delay :4.6 μs と決定した。

次に、同時計数のための時間幅を設定するために、リストアダプタのウィンドウ幅およびリストコントローラのコインシデンスタイムの調整を行った。ウィンドウ幅およびコインシデンスタイムは、短すぎると本来同時計数すべき信号を計数できない可能性があるが、長すぎると偶発的同時計数が増加してしまうので、適切な値に調整する必要がある。ウィンドウ幅およびコインシデンスタイムをともに変化させたときの ^{152}Eu の主なピークのネット計数値の変化をFig.15およびFig.16に示す。ウィンドウ幅およびコインシデンスタイムはできるだけ短く、ネット計数値は高くなる条件を探したところ、Ge検出器側およびBGO検出器側ともにウィンドウ幅 $1.0\mu\text{s}$ およびコインシデンスタイム $1.0\mu\text{s}$ が適当であることがわかった。

3.2.2 代表的な放射性核種の γ 線スペクトル測定

同時測定では、Ge検出器とBGO検出器の両方で計数されたときのみ、データがメモリに収集される。バックグラウンド成分には、カスケード状に放出される γ 線が無いので、同時計数しないため計数値が低下し、その結果カスケード状に放出される γ 線のピークのみが強調されたスペクトルを得ることができる。代表的な放射性核種として、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs および ^{152}Eu の同時モード γ 線スペクトルをFig.17~19に示す。

Fig.17に示した ^{60}Co のスペクトルは、a)はGe検出器により得られた γ 線スペクトル、b)はBGO検出器により得られた γ 線スペクトルであり、a)のスペクトルと比較するとb)はエネルギー分解能が低い。c)はX軸をGe検出器のエネルギー、Y軸をBGO検出器のエネルギーとし、高さ方向に計数値を示している。白い部分が計数値の高いことを表しており、BGO検出器のエネルギー分解能が低いので、ピークが幅広であるが、BGO検出器のエネルギー 1173 keV に対しては、Ge検出器のエネルギー 1332 keV と交差する点にピークが現れている。このように、カスケード状に放出される γ 線のピークが強調されたスペクトルを得ることができる。 ^{60}Co と対照的に、Fig.18に示した ^{137}Cs は単一の γ 線を放出する核種であるので、コンプトン散乱に起因するバックグラウンド計数がわずかに観察されるのみである。Fig.19に示した ^{152}Eu は複数のカスケード γ 線を放出するため、スペクトルは複雑である。主なピークとして、 121 、 344 、 778 、 1112 、 1408 keV などが挙げられるが、これらのうち相関のある 344 および 778 keV のピークを解析に用いた。

3.2.3 ^{60}Co を含む試料中の ^{152}Eu の定量

^{152}Eu の定量を行う前に、同時測定におけるバックグラウンド低減効果を評価するため、 ^{152}Eu のみ 2.4 kBq 含む試料 (Table3 試料番号3) に対してシングルモードおよび同時モード γ 線スペクトルを測定した。その結果をFig.20に示す。a)はGe検出器によるシングルモード γ 線スペクトルである。b)はGe検出器による同時モード γ 線スペクトルであり、 344 keV のピークが強調されている。これは、BGO検出器で検出される γ 線のエネルギー範囲を目的のピークと相関のある 778 keV のピーク付近 ($704\text{--}956\text{ keV}$: 約60チャンネル相当) に限定し、同時測定を行った結果である。同様に、c)も同時モード γ 線スペクトルであり、BGO検出器で検出される γ 線のエネルギー範囲を 344 keV 付近 ($288\text{--}416\text{ keV}$) に限定したことにより、 778 keV のピークが強調されている。

次に、 ^{60}Co を 2.4 kBq および ^{152}Eu を 60 Bq 含む試料 (試料番号7) の同時モードおよびシングルモード γ 線スペクトルをFig.21に示す。同時測定b)では、コンプトン連続計数が大幅に低減されてお

り、 ^{152}Eu のピークが強調されたスペクトルを得ることができた。同時測定による検出限界の評価をTable6に示す。344 keVの γ 線のピークに注目した場合、測定時間5000秒において、シングル測定と比較して、同時測定では、検出限界値が約1/1.5に低減された。これは、 $^{152}\text{Eu} / ^{60}\text{Co}$ 比にする 2.5×10^{-3} まで測定可能であることを示している。また、同じ検出限界値を得るための測定時間に換算すると、約1/2に短縮されたことになり、放射能測定の迅速化に有効である。一方、778 keVのピークに注目した場合、測定時間5000秒において、シングル測定と比較して、同時測定では、検出限界値が約1/4に低減された。同時測定法を適用することによるこのような検出限界の改善効果は、処分安全評価上重要なその他のカスケード γ 線放出核種についても期待できる。特に、 ^{94}Nb から放出される γ 線のエネルギーは702 keVおよび871 keVであり、 ^{60}Co のコンプトン端（コンプトン連続計数の最も高い部分）に近いので、同時測定法を適用することによるバックグラウンド計数の低減が期待される。

4. まとめ

本報告では、廃棄物中に ^{60}Co が相対的に多く含まれる場合を想定し、Ge検出器とBGO検出器を用いた逆同時および同時 γ 線スペクトロメトリーによる非破壊測定法を溶融固化体の放射能評価に適用することを検討した。単一 γ 線放出核種である ^{137}Cs に対して、逆同時測定法を適用することにより、 ^{60}Co を約2.5 kBq含む試料に対して、測定時間5000秒で検出限界値は約1/6に低減された。 $^{137}\text{Cs} / ^{60}\text{Co}$ 比にする 2.8×10^{-4} まで測定可能であることを示しており、逆同時測定法の有効性を確認できた。また、カスケード γ 線放出核種である ^{152}Eu に対しては、同時測定法を適用することにより、 ^{60}Co を約2.5 kBq含む試料に対して、測定時間5000秒で γ 線のS/N比は2.7倍に向上し、検出限界値は約1/1.5に低減された。このとき $^{152}\text{Eu} / ^{60}\text{Co}$ 比にする 2.5×10^{-3} まで測定可能であった。このような検出限界の改善効果は、処分安全評価上重要なその他のカスケード γ 線放出核種についても期待できる。

参考文献

- 1) H. Higuchi, M. Sato, N. Nakashio, M. Okoshi and M. Tanaka : IAEA-CN-87/51P, "Advanced volume reduction program for LLW at JAERI", (2001).
- 2) 坂井章浩, 吉森道郎, 阿部昌義 : JAERI-Tech 2000-012, "研究所等廃棄物の埋設処分における安全評価上重要核種の選定(その1)-主要放射性廃棄物発生施設別の核種組成比の評価-" (2000).
- 3) Idaho National Engineering & Environmental Laboratory (INEEL) : "GAMMA-RAY SPECTRUM CATALOGUE-Ge and Si Detector Spectra Fourth Edition", (1998).
- 4) G. Gilmore and J. D. Hemingway (著), 米沢仲四郎, 松江秀明, 宮本ユタカ, 鈴木大輔, 安田健一郎, 伊奈川潤, 齋藤陽子 (訳) : "実用ガンマ線測定ハンドブック", 日刊工業新聞社, 東京, p282 (2002).
- 5) C. Yonezawa, H. Matsue and M. Yukawa : J. Radioanal. Nucl. Chem., 255, 105 (2003).
- 6) M. Nakashima, T. Fukui, N. Nakashio, M. Isobe, A. Ohtake, T. Wakui and T. Hirabayashi : J. Nucl. Sci. Technol., 39, 687 (2002).
- 7) C. Yonezawa, A.K.H.Wood, M. Hoshi, Y. Ito and E. Tachikawa : Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res.

- A, 329, 207 (1993).
- 8) L.A.Currie : Anal. Chem., 40, 586 (1968).
- 9) 科学技術庁 : “ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー (放射能測定法シリーズ7) (平成2年改訂)”, 財団法人 日本分析センター, 千葉, p179 (1990).
- 10) M. Tsutsumi, T. Oishi, N. Kinouchi, R. Sakamoto and M. Yoshida : J. Nucl. Sci. Technol., 39, 957 (2002).

Table 1 Nuclear data of the important radionuclides for disposal in safety²⁻³⁾

Nuclide	Half-life	Decay mode	Main radiation	Energy (keV)
³ H	12.33 y	β^-	β	18.6
¹⁴ C	5730 y	β^-	β	156
³⁶ Cl	3.01×10^5 y	β^- , EC	β	709
⁴¹ Ca	1.03×10^5 y	EC	X	3.3
⁶⁰ Co	5.271 y	β^-	γ	1173, 1333
⁵⁹ Ni	7.6×10^4 y	EC, β^-	X	6.9
⁶³ Ni	100.1 y	β^-	β	66.9
⁷⁹ Se	$< 6.5 \times 10^4$ y	β^-	β	151
⁹⁰ Sr	28.74 y	β^-	β	546
⁹⁴ Nb	2.03×10^4 y	β^-	γ	703, 871
⁹⁹ Tc	2.111×10^5 y	β^-	β	294
^{108m} Ag	418 y	EC, IT	γ	434, 614, 722
¹²⁹ I	1.57×10^7 y	β^-	γ (¹³⁰ I)	536, 669, 739
¹³³ Ba	10.52 y	EC	γ	81, 303, 356
¹³⁷ Cs	30.04 y	β^-	γ	662
¹⁵² Eu	13.54 y	EC, β^-	γ	122, 344, 1408
¹⁵⁴ Eu	8.593 y	β^-	γ	123, 723, 1274
^{166m} Ho	1200 y	β^-	γ	184, 712, 810
²³⁷ Np	2.14×10^6 y	α	α	4771, 4788
²³⁸ Pu	87.7 y	α	α	5456, 5499
²³⁹ Pu	2.411×10^4 y	α	α	5144, 5157
²⁴⁰ Pu	6564 y	α	α	5124, 5168
²⁴² Pu	3.733×10^5 y	α	α	4856, 4901
²⁴¹ Am	432.2 y	α	α	5443, 5486
^{242m} Am	141 y	α	α	5206, 5544
²⁴³ Am	7370 y	α	α	5233, 5275
²⁴⁴ Cm	18.10 y	α	α	5763, 5805

Table 2 Specification of the detectors

	Ge detector	BGO detector
Supplier	ORTEC	BICRON
Model	GMX-20180-PLUS-S	6HW7.68BGO/(8)1.5-X
Crystal size	51.7 mm Φ x 52.7 mm	Axial part: 39.0 mm thick x 175 mm Nose part: 20 mm thick
Photomultiplier	-	HAMAMATSU 2060 38 mm Φ , 8 tubes
Energy resolution (FWHM)	1.67 keV (1332 keV)	19.1% (662 keV)
Relative efficiency	25.5%	-

Table 3 Radioactivities of the slag samples

Sample No.	Radioactivity (Bq·g ⁻¹)		
	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu
1	2.55±0.01 E+03	-	-
2	-	2.44±0.01 E+03	-
3	-	-	2.38±0.02 E+03
4	2.30±0.01 E+03	4.56±0.02 E+01	-
5	2.28±0.01 E+03	4.54±0.02 E+00	-
6	2.50±0.01 E+03	1.05±0.01 E+00	-
7	2.54±0.01 E+03	-	6.08±0.04 E+01
8	2.50±0.01 E+03	-	5.43±0.04 E+00

Table 4 Detection limits of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{152}Eu
in the anti-coincidence measurement.

E_{γ} (keV)	mode	Detection limits (Bq)	
		Currie's definition	3σ
^{60}Co	Single	9.18E-01	4.55E-01
	Anti	3.52E+00	1.69E+00
^{137}Cs	Single	6.47E-01	3.48E-01
	Anti	2.95E-01	1.50E-01
^{152}Eu	Single	9.37E-01	5.21E-01
	Anti	3.66E+00	2.10E+00
344	Single	1.68E+00	9.34E-01
	Anti	1.76E+00	9.70E-01

Measurement time: 5000 s

Table 5 Detection limits of ^{137}Cs in the presence of ^{60}Co (2.5 kBq) by the anti-coincidence measurement.

E_γ (keV)	Live Time mode	Live Time (s)	Detection limits (Bq)	
			Currie's definition	3σ
661	Single	5,000	3.92E+00	2.11E+00
	Anti	5,000	6.98E-01	3.46E-01
	Single	50,000	1.25E+00	6.75E-01
	Anti	50,000	2.23E-01	1.13E-01

Table 6 Detection limits of ^{152}Eu in the presence of ^{60}Co (2.5 kBq) by the coincidence measurement.

E_γ (keV)	Mode	Detection limits (Bq)	
		Currie's definition	3σ
344	Single	8.74E+00	5.03E+00
	Coincidence	5.97E+00	4.30E+00
778	Single	4.08E+01	2.20E+01
	Coincidence	1.05E+01	7.31E+00

Measurement time: 5000 s

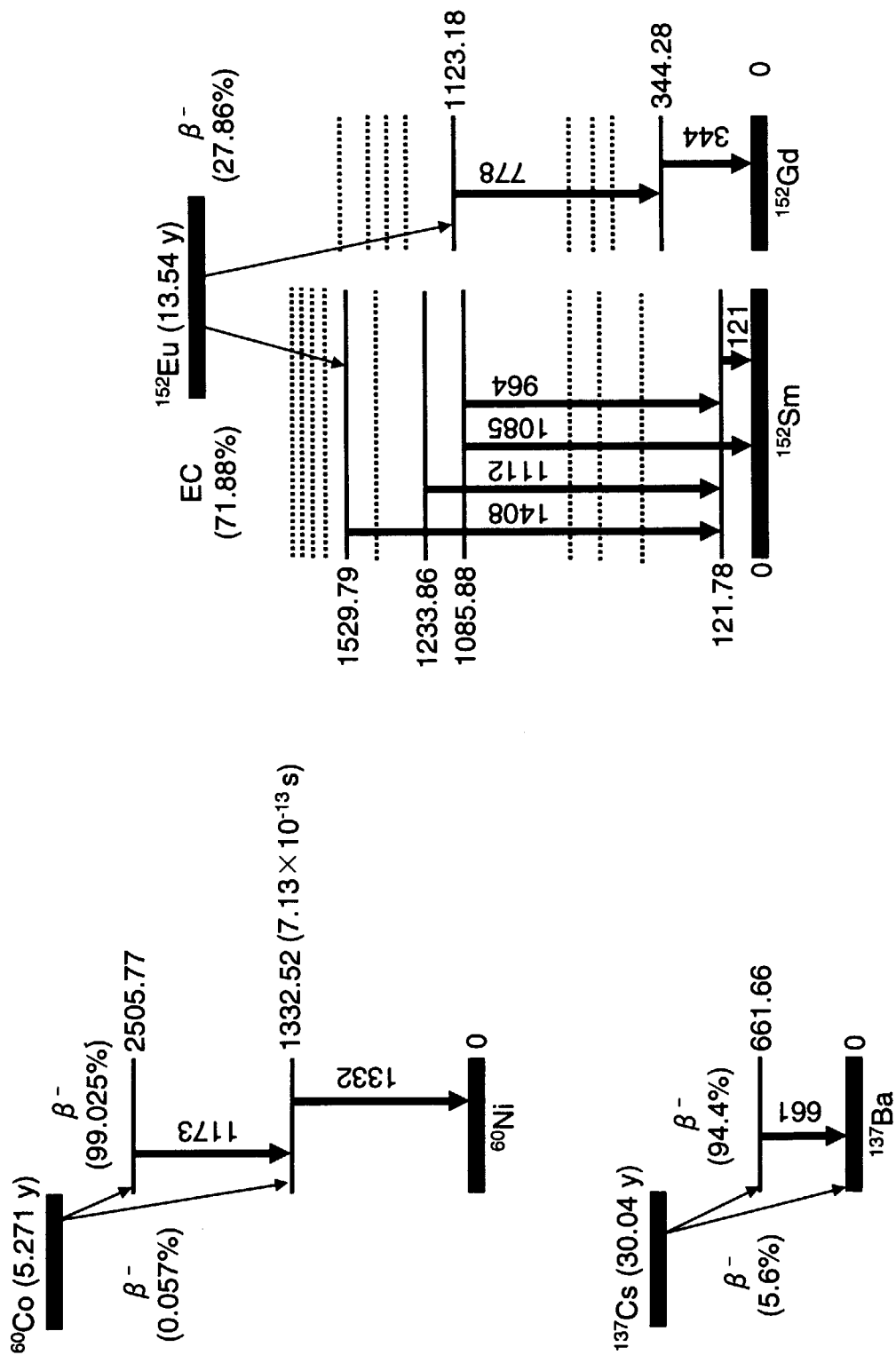


Fig.1 The simplified decay schemes of ^{60}Co , ^{137}Cs and $^{152}\text{Eu}^{3)}$

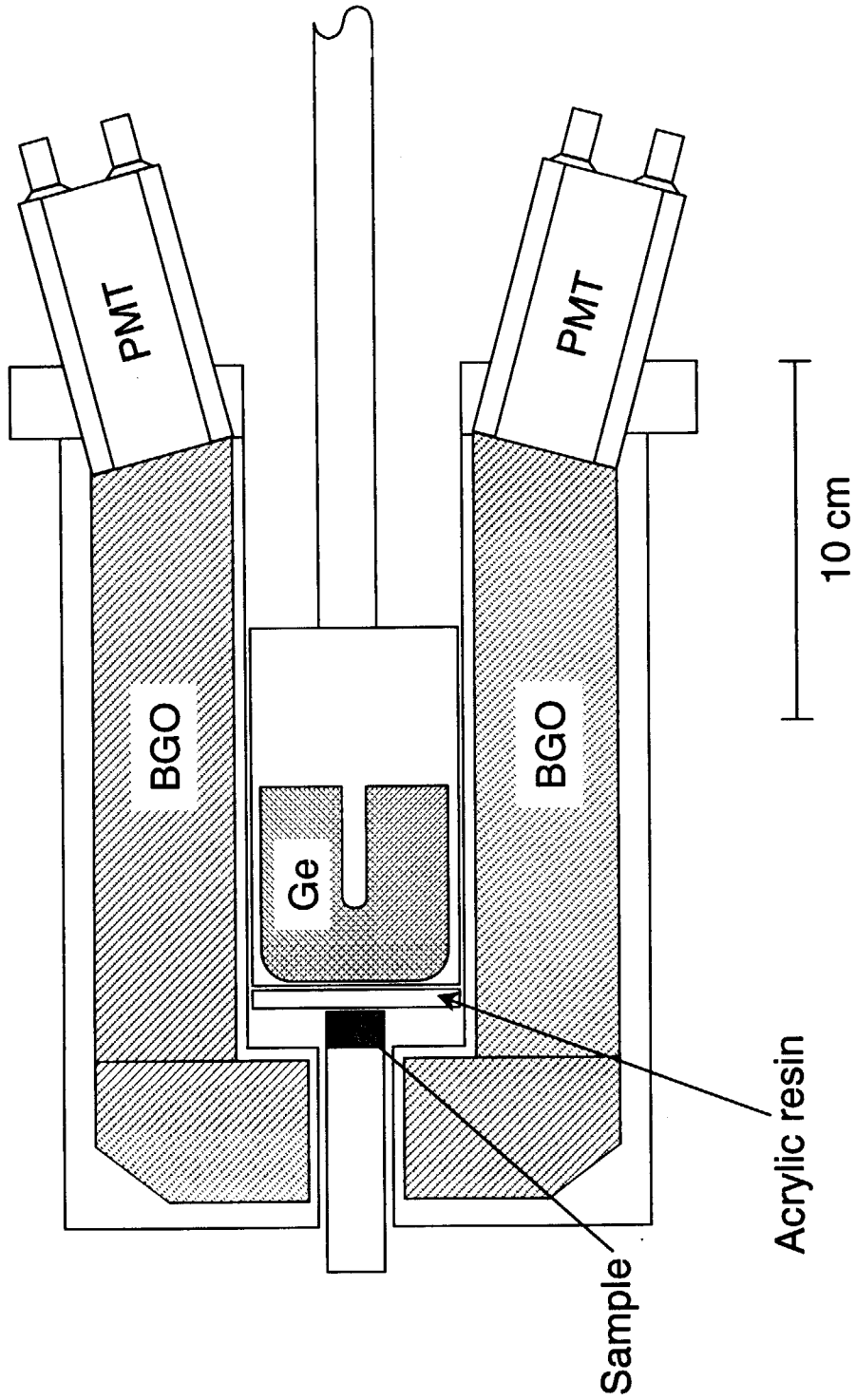


Fig.2 Cross-sectional view of the Ge-BGO detector system

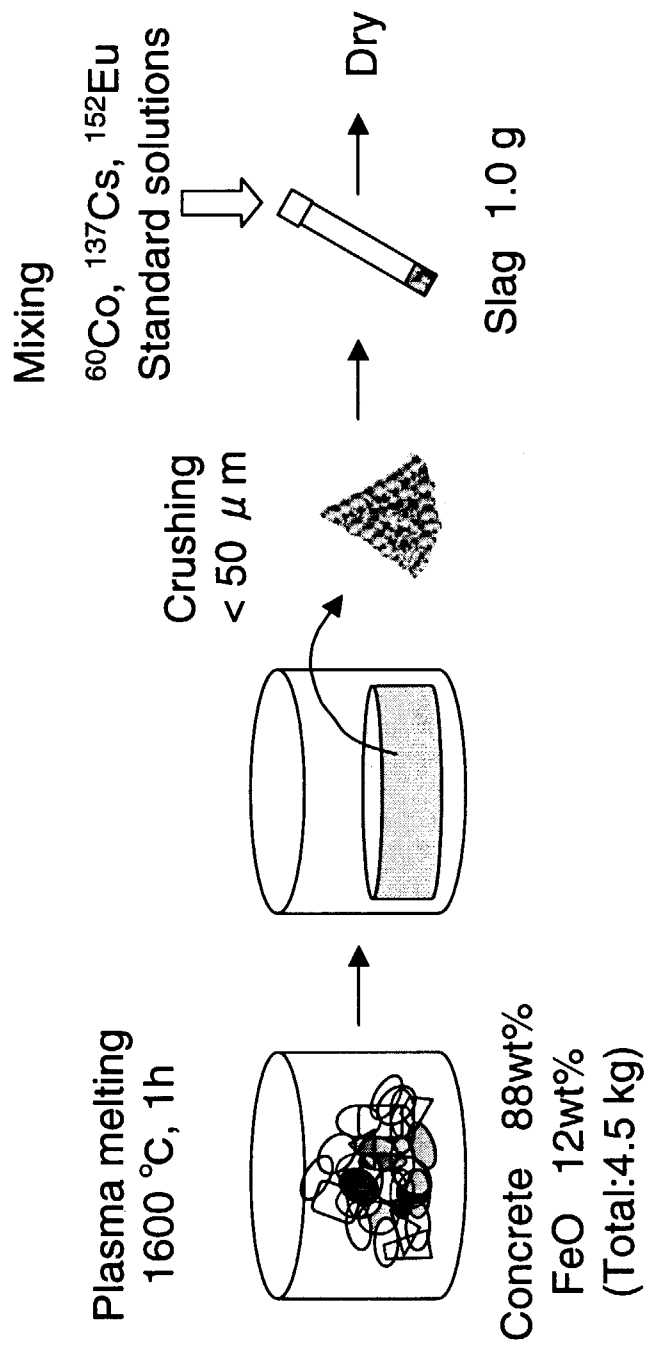


Fig.4 Preparation of the samples

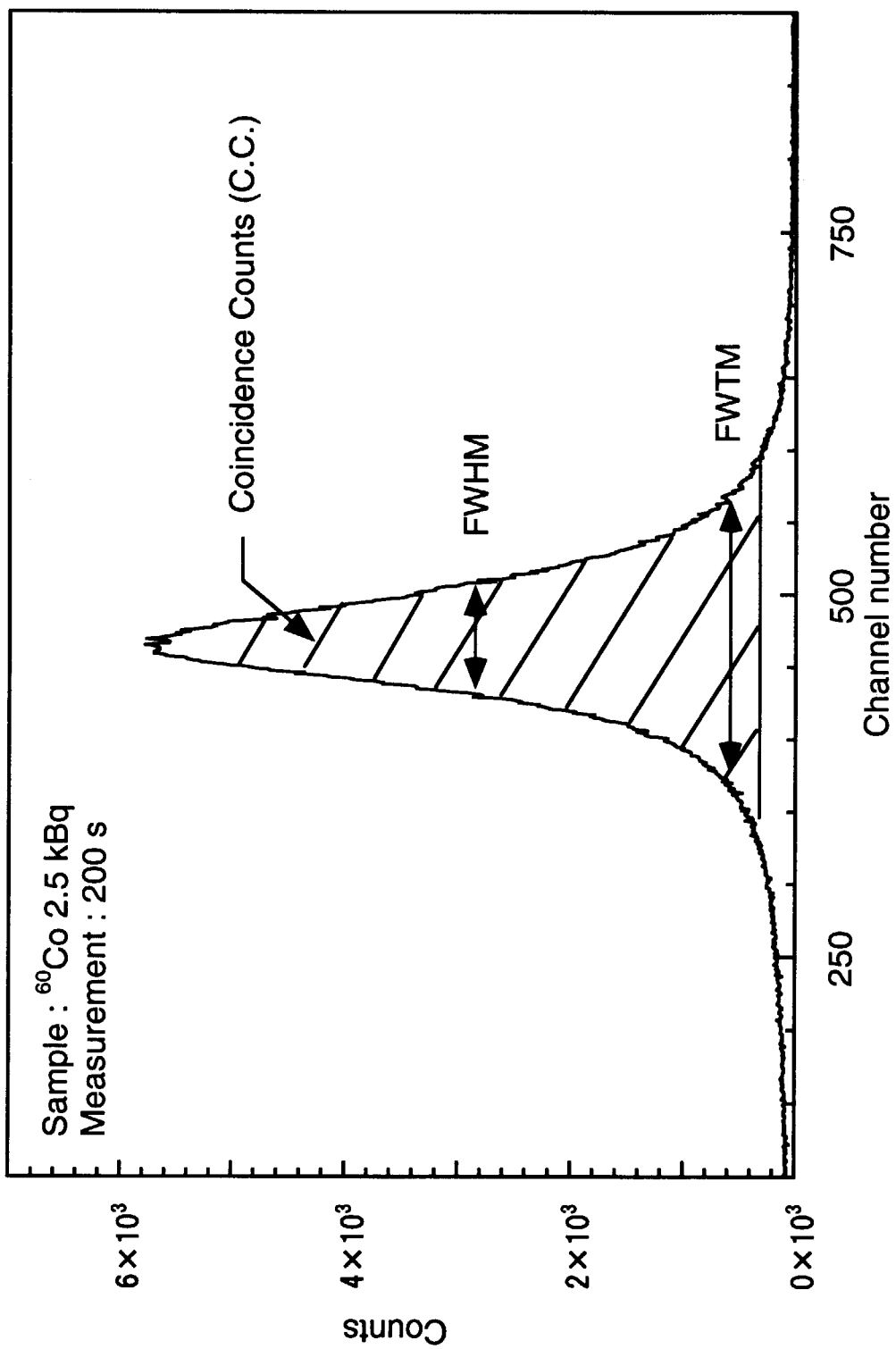


Fig.5 Simultaneity of timing signals from Ge detector and BGO detector

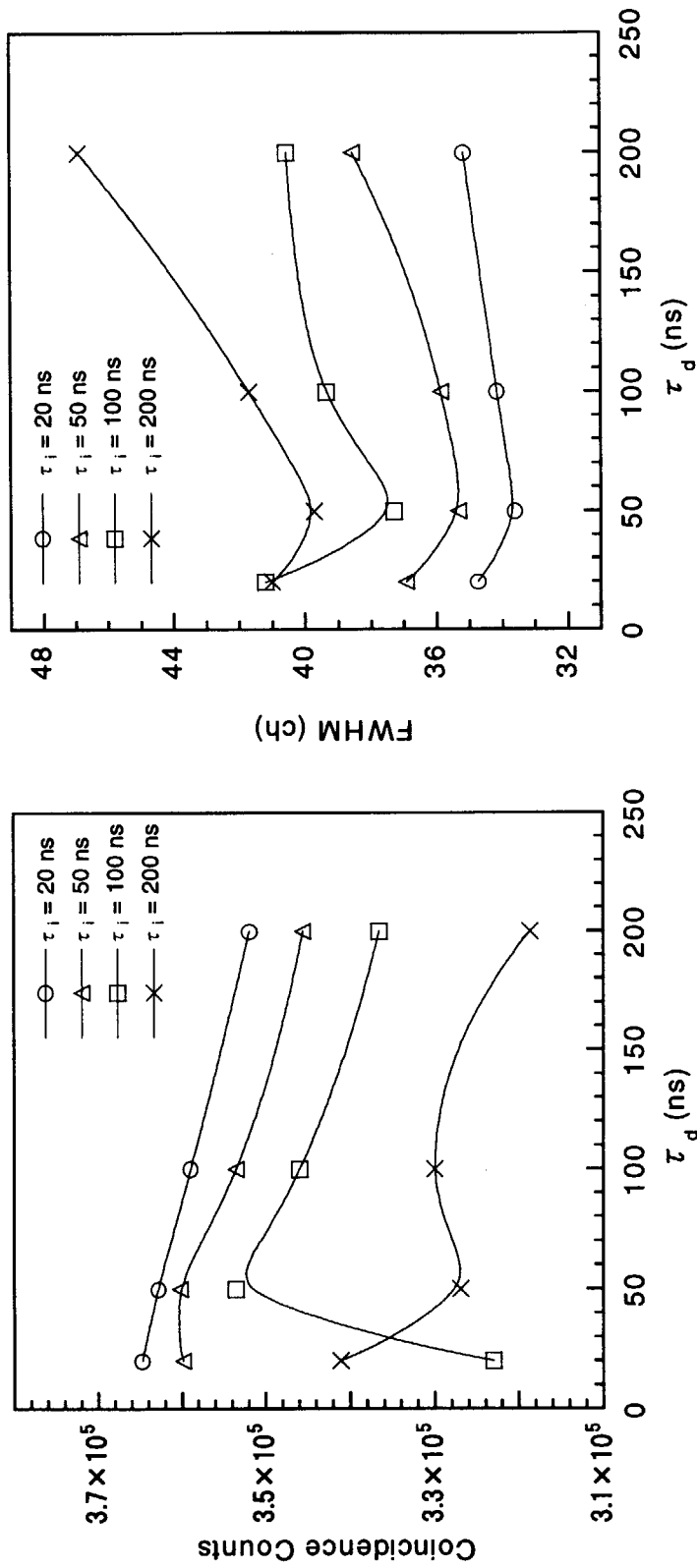


Fig.6 Examination of the differential and integral times of BGO detector signals for timing signals of the

Constant-Fraction Discriminator

Set up of Ge detector signals are as follows, CFD delay = 32 ns, TFA $\tau_i = 100$ ns, $\tau_d = 100$ ns and

BGO: CFD delay = 20 ns.

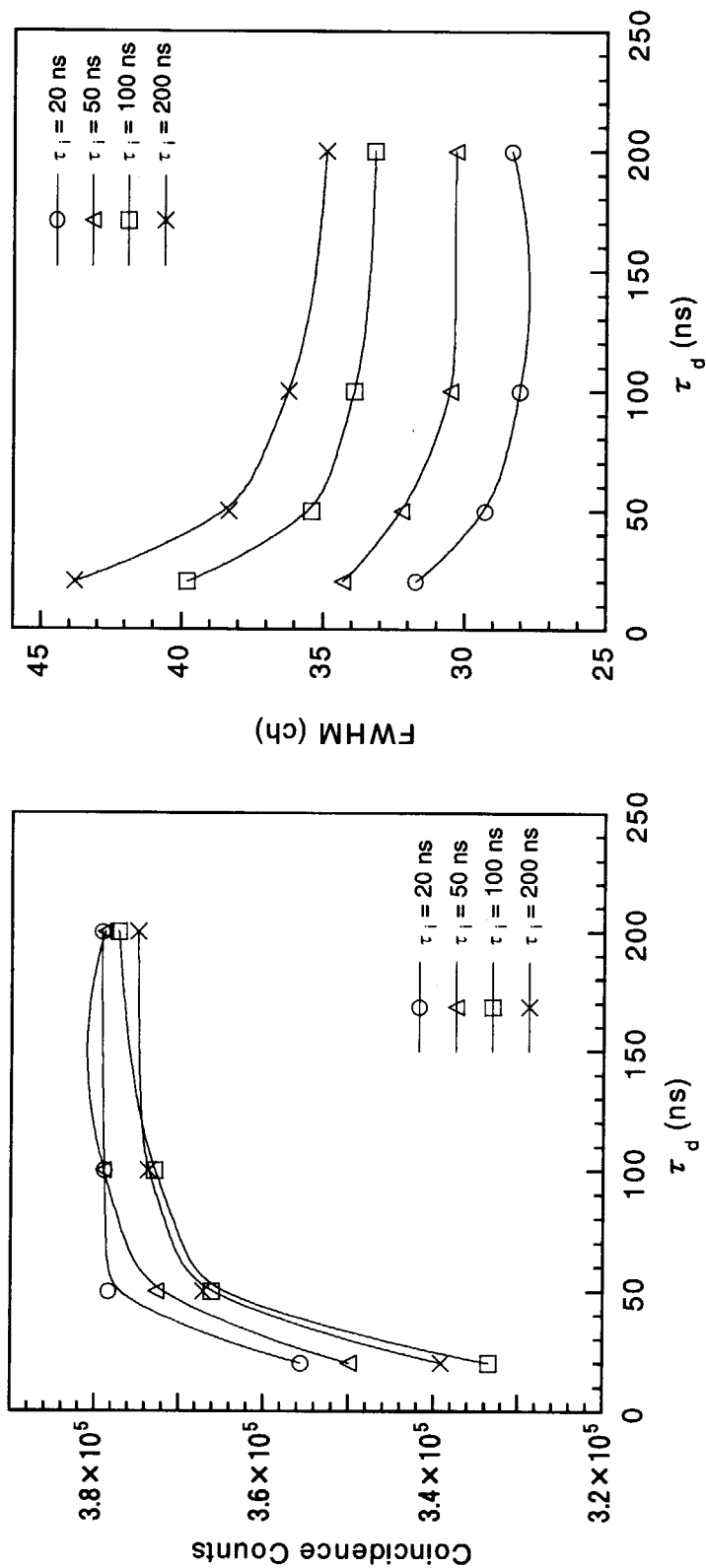


Fig.7 Examination of the differential and integral times of Ge detector signals for timing signals of the Constant-Fraction Discriminator
 Set up of BGO detector signals are as follows, CFD delay = 20 ns, TFA $\tau_i = 20$ ns, $\tau_d = 50$ ns and Ge: CFD delay = 32 ns.

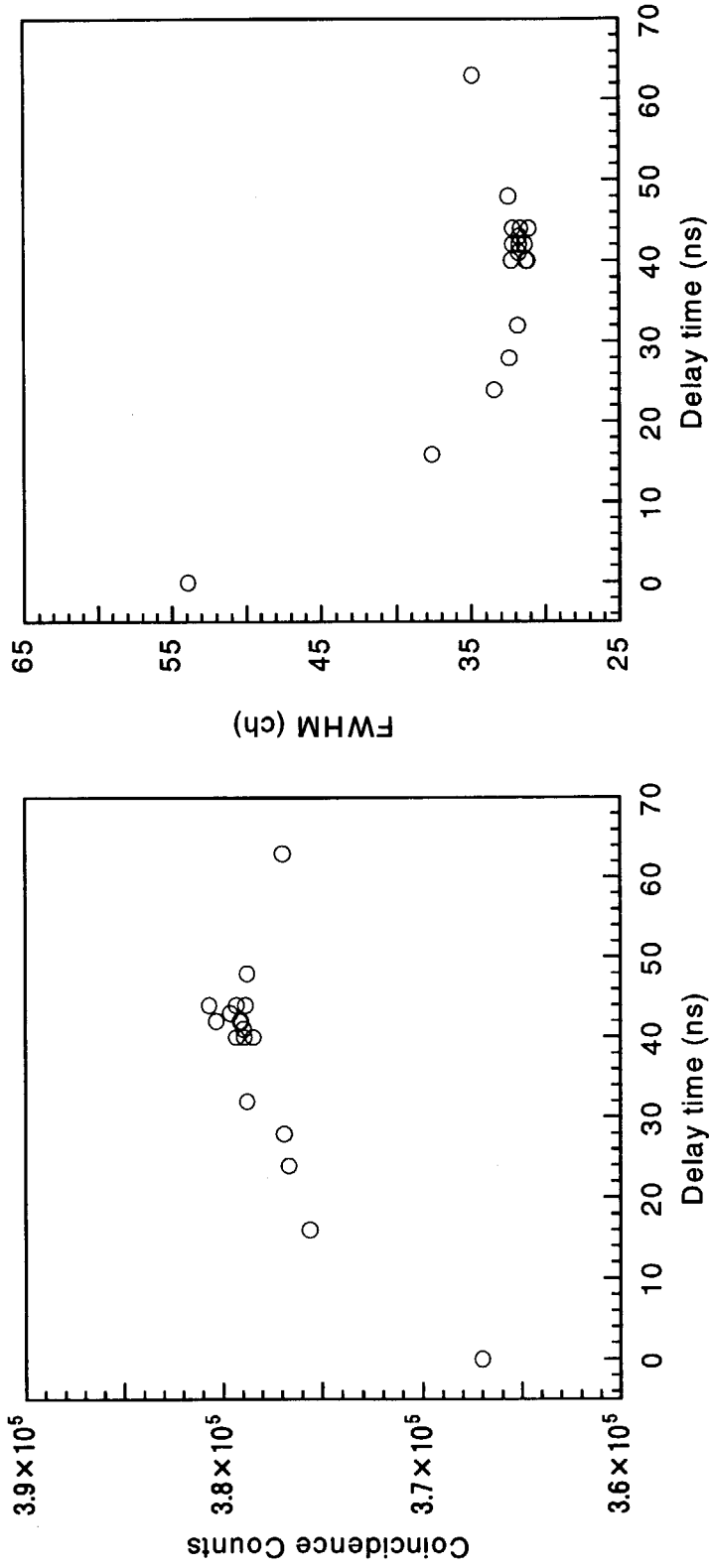


Fig.8 The optimum delay time of Ge detector signals for the Compton suppression mode
Set up of BGO detector CFD delay time is 20 ns.

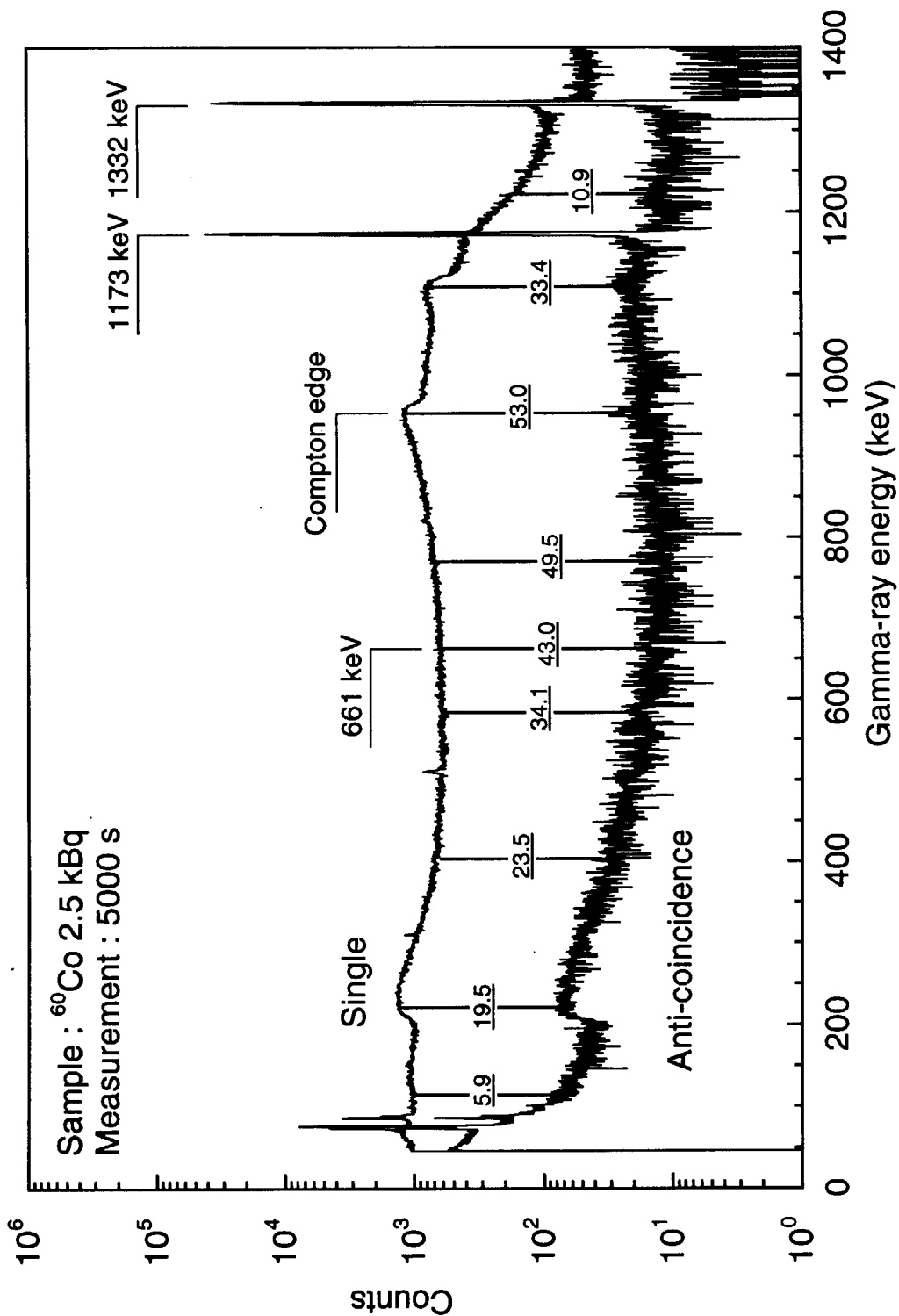


Fig.9 Gamma-ray spectra of ^{60}Co in single and anti-coincidence modes
 The values with underlines express Compton suppression factors.

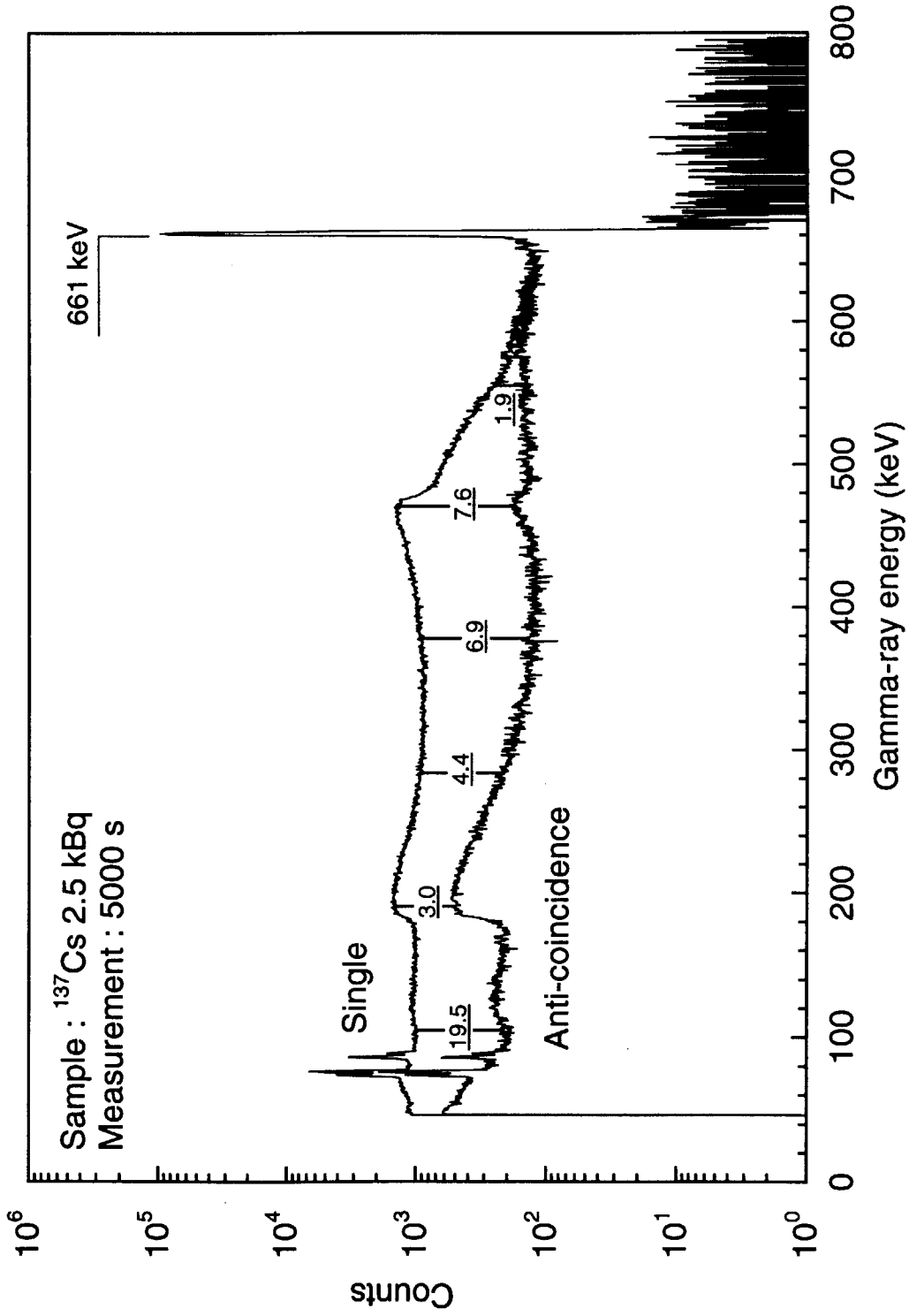


Fig.10 Gamma-ray spectra of ^{137}Cs in single and anti-coincidence modes
The values with underlines express Compton suppression factors.

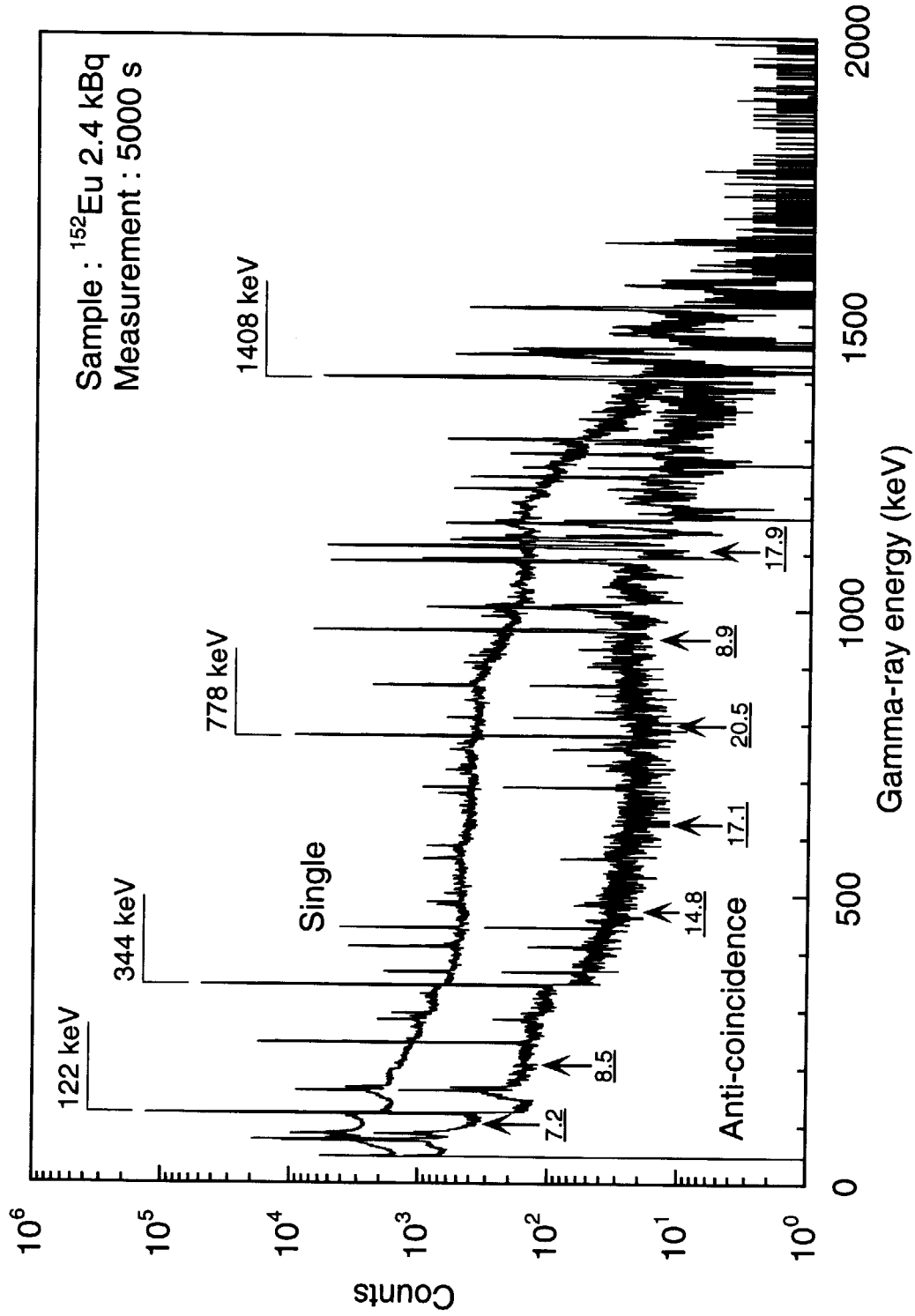


Fig.11 Gamma-ray spectra of ^{152}Eu in single and anti-coincidence modes
 The values with underlines express Compton suppression factors.

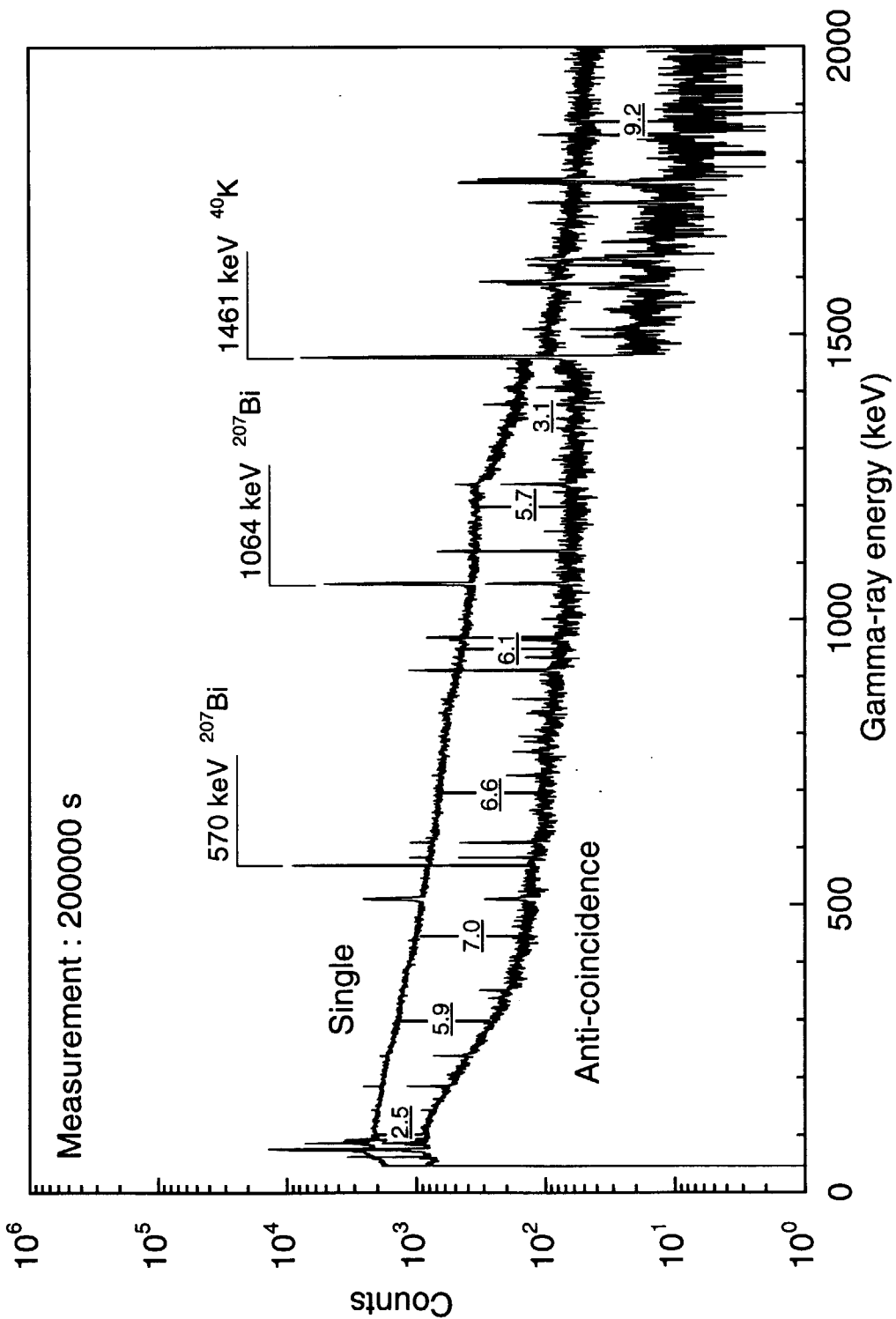


Fig.12 Gamma-ray background spectra in single and anti-coincidence modes
The values with underlines express Compton suppression factors.

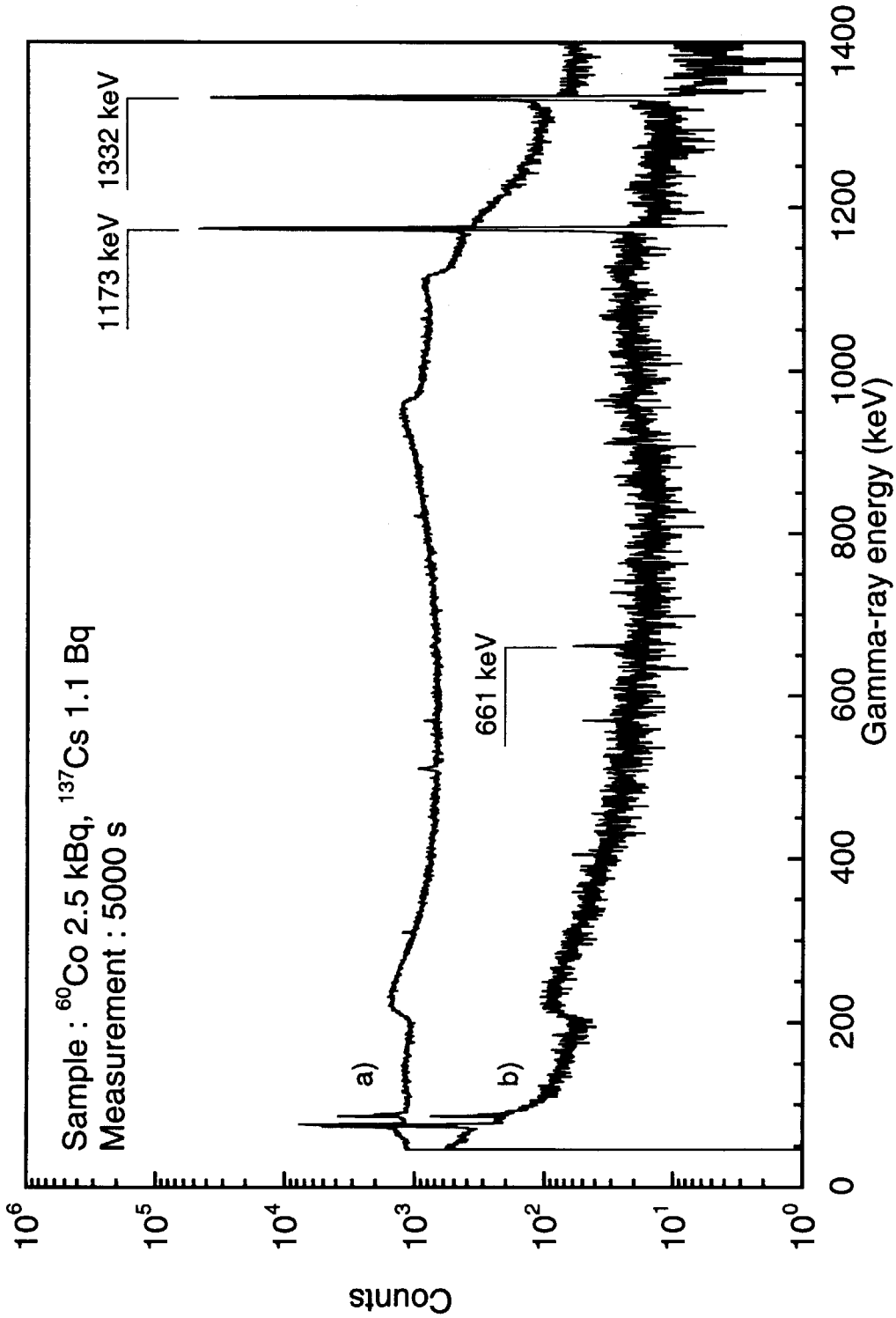


Fig.13 Gamma-ray spectra of ^{137}Cs in single and anti-coincidence modes
This sample contains ^{60}Co 2.5 kBq and ^{137}Cs 1.1 Bq, was measured for 5000 seconds. a) single mode and b) anti-coincidence mode.

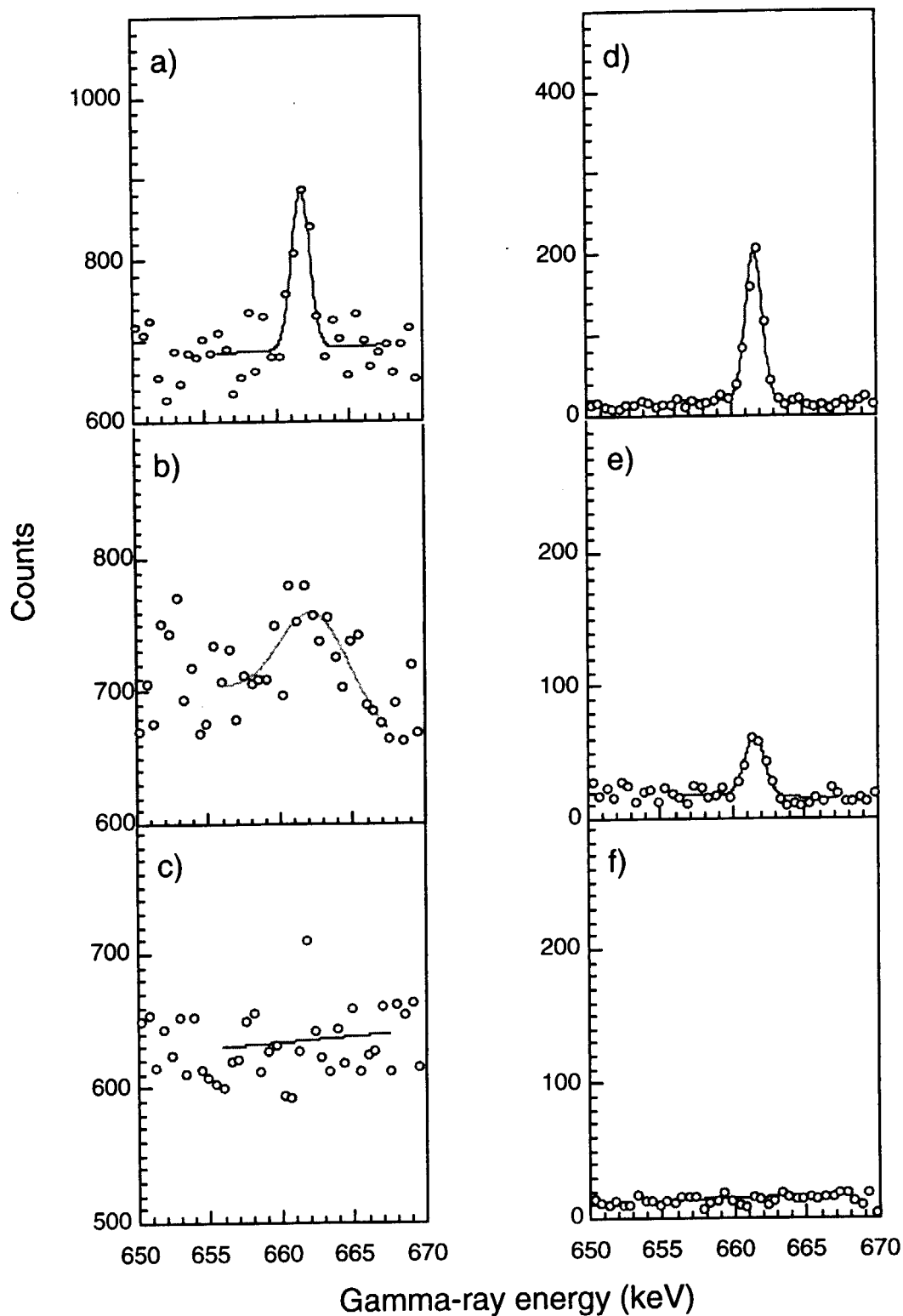


Fig.14 Comparison of gamma-ray spectra between single and anti-coincidence modes for various composition's samples
 All samples contain ^{60}Co 2.5 kBq and were measured for 5000 seconds. Sample a) and d) contain ^{137}Cs 4.6 Bq, sample b) and e) contain ^{137}Cs 1.1 Bq, and sample c) and f) contain no ^{137}Cs , respectively.
 Measurement modes: a)-c) single mode, d)-f) anti-coincidence mode.

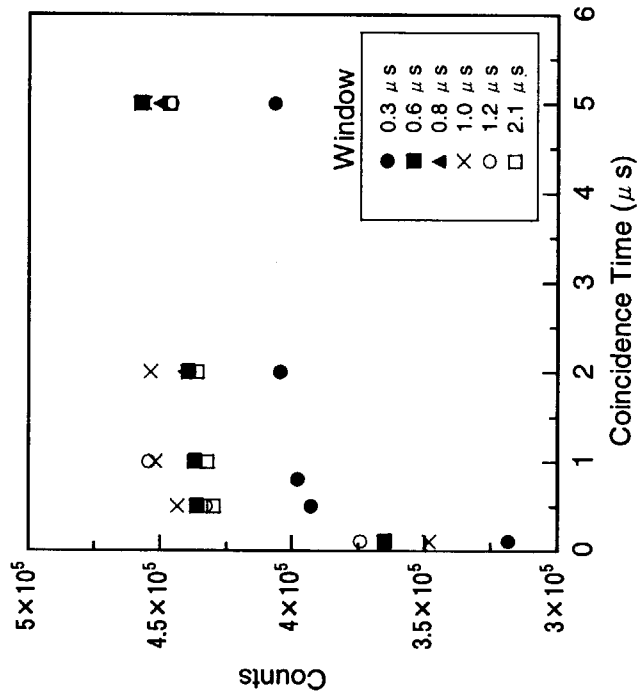


Fig.16 Optimization of coincidence time
 Net counts of ¹⁵²Eu (344 keV) were done a plot
 when the coincidence time of LIST control and the
 window of LIST adaptor were changed.

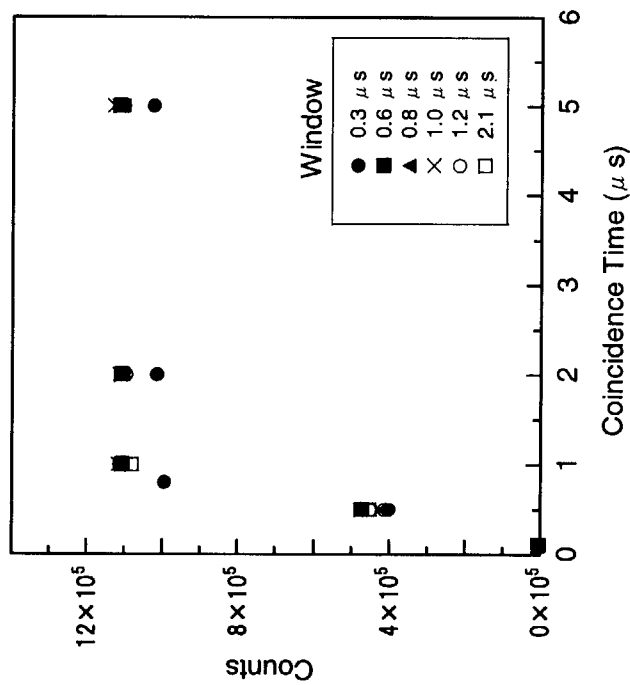


Fig.15 Optimization of coincidence time
 Net counts of ¹⁵²Eu (121 keV) were done a plot
 when the coincidence time of LIST control and the
 window of LIST adaptor were changed.

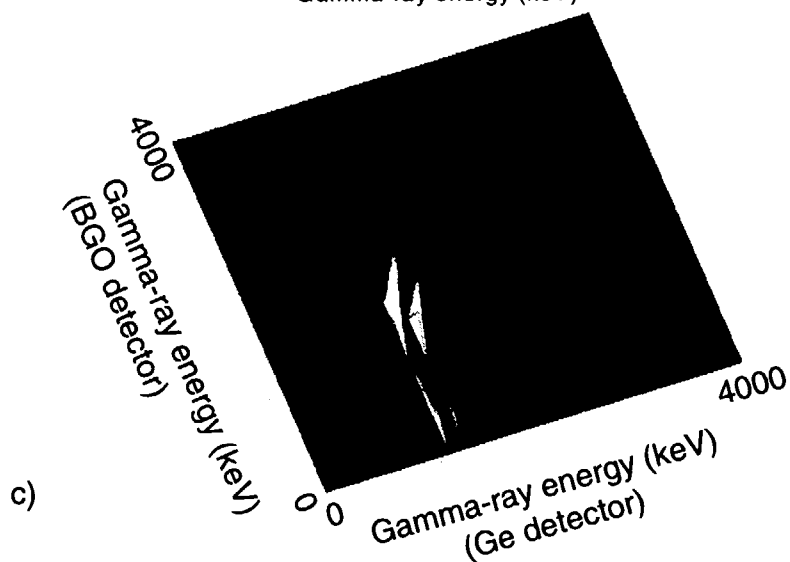
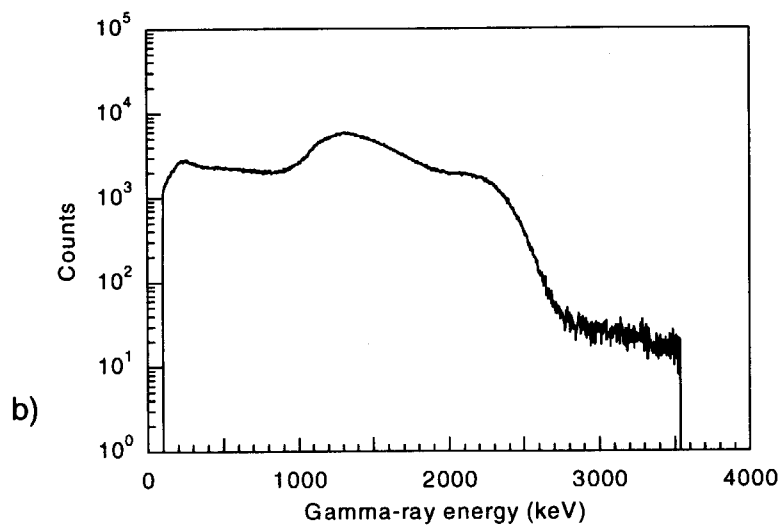
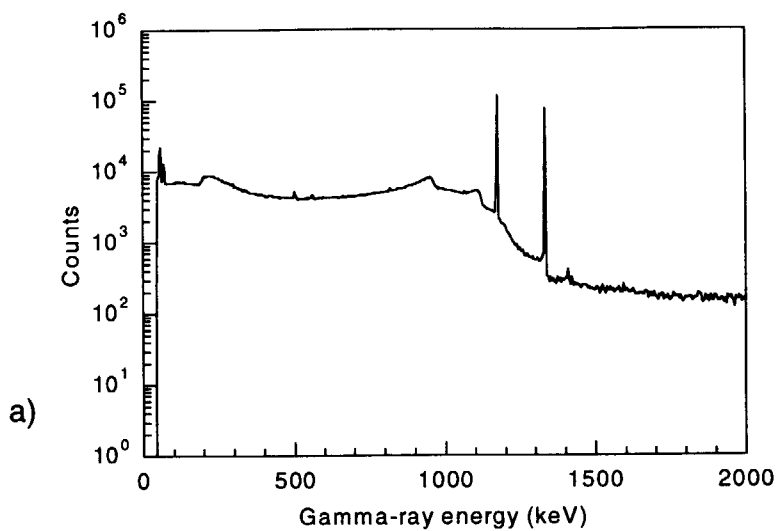


Fig.17 Gamma-ray spectrum of ⁶⁰Co in coincidence mode

This sample contains ⁶⁰Co 2.5 kBq and was measured for 5000 seconds.

a) Gamma-ray spectrum by Ge detector, b) BGO detector and c) Gamma-ray spectrum displayed in two dimensions.

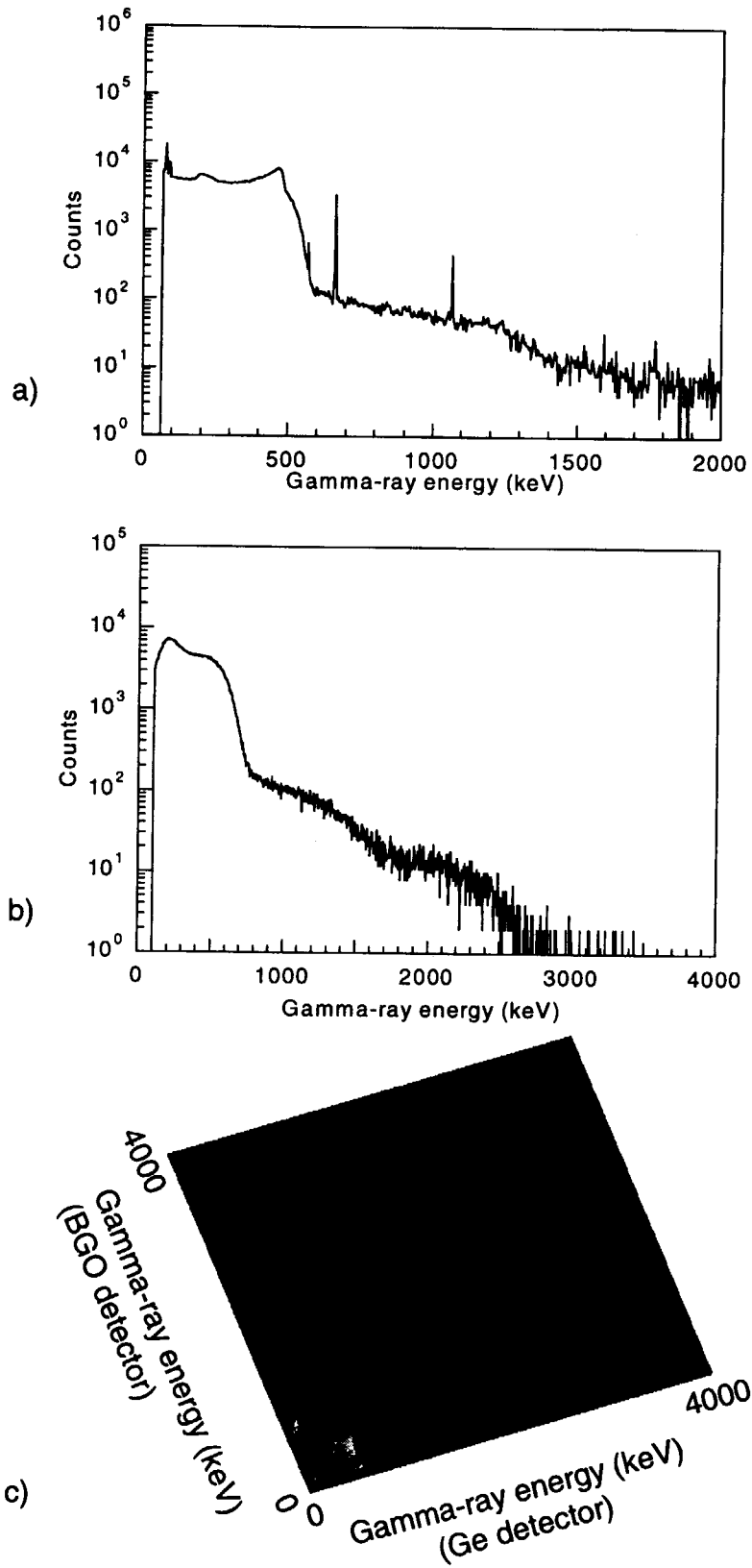


Fig.18 Gamma-ray spectrum of ^{137}Cs in coincidence mode

This sample contains ^{137}Cs 2.5 kBq and was measured for 5000 seconds.

a) Gamma-ray spectrum by Ge detector, b) BGO detector and c) Gamma-ray spectrum displayed in two dimensions.

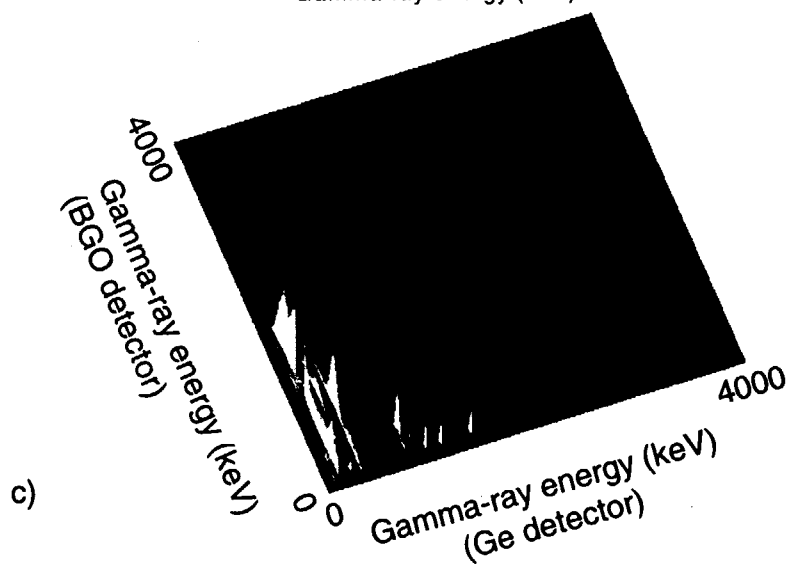
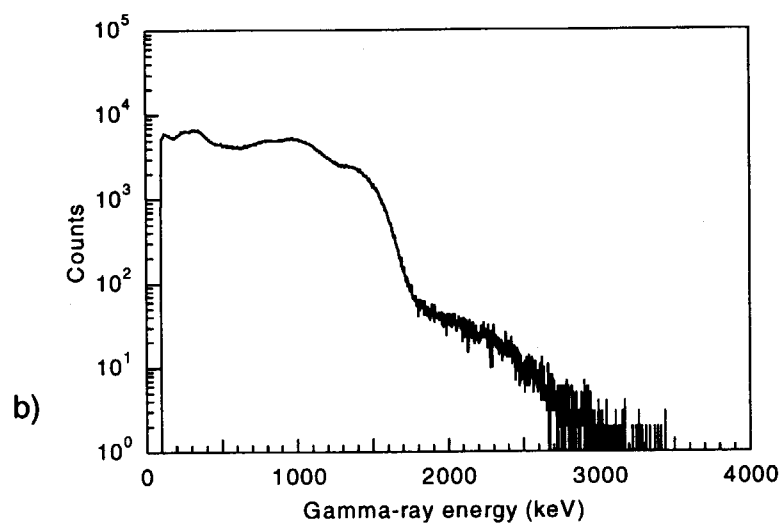
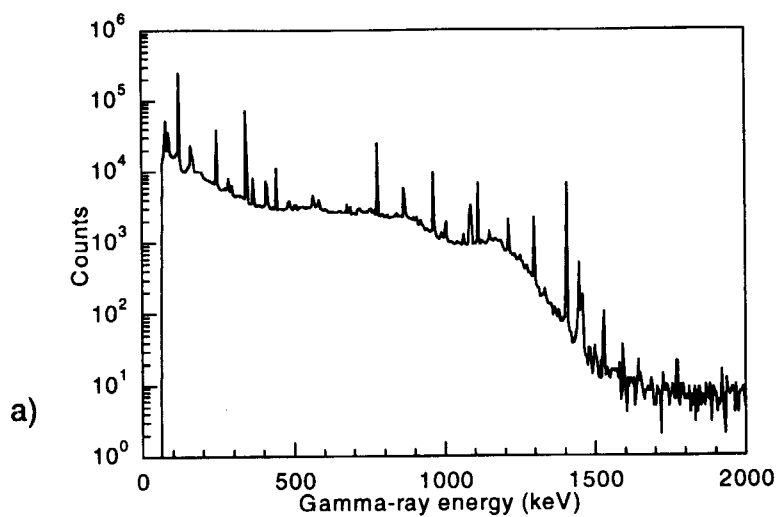


Fig.19 Gamma-ray spectrum of ¹⁵²Eu in coincidence mode

This sample contains ¹⁵²Eu 2.4 kBq and was measured for 5000 seconds.

a) Gamma-ray spectrum by Ge detector, b) BGO detector and c) Gamma-ray spectrum displayed in two dimensions.

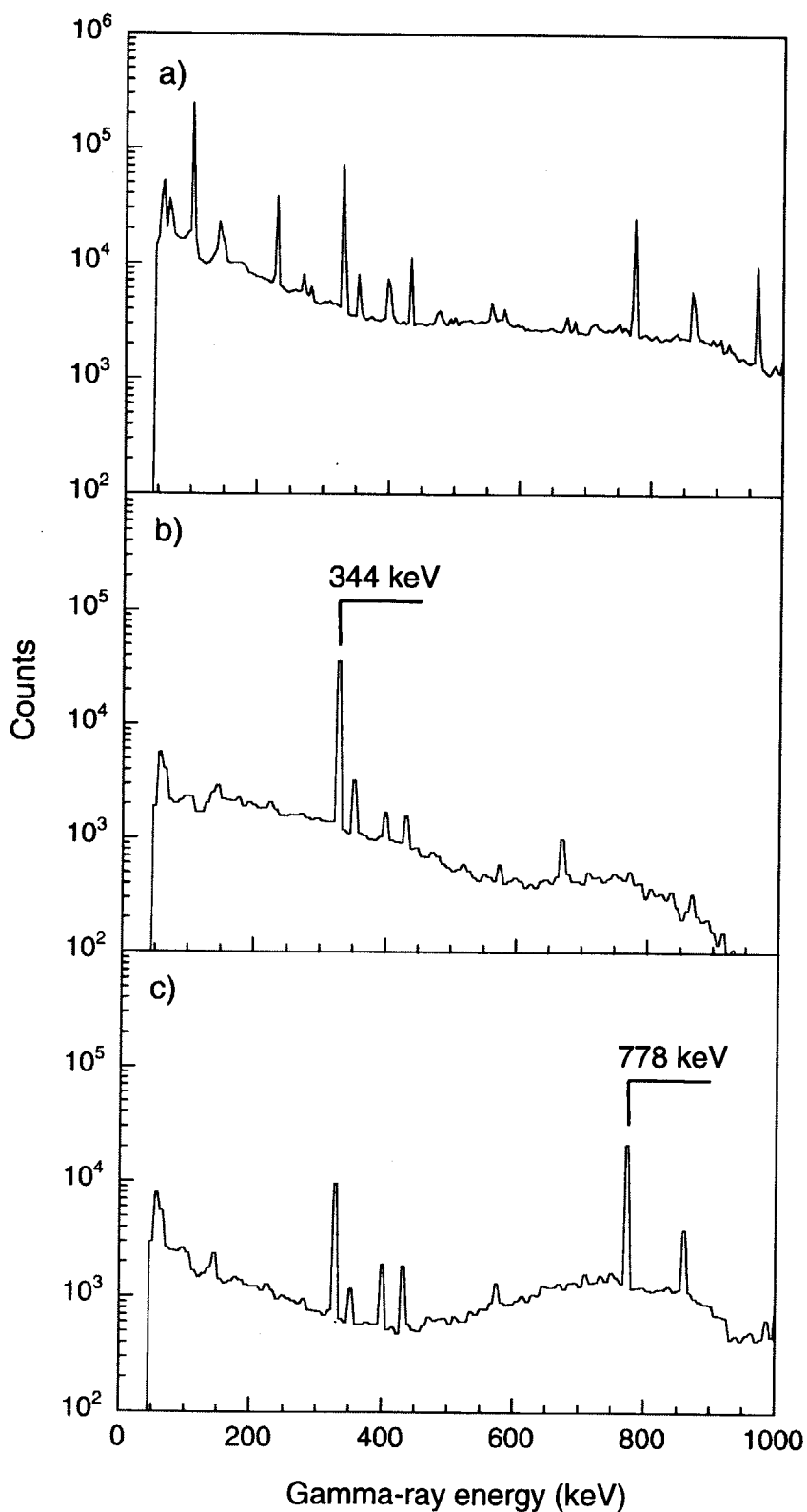


Fig.20 Gamma-ray spectra of ^{152}Eu in single and coincidence modes

This sample contains ^{152}Eu 2.4 kBq and was measured for 5000 seconds.

a) single mode, b) coincidence mode: BGO energy range 704-956 keV and c) coincidence mode: BGO energy range 288-416 keV.

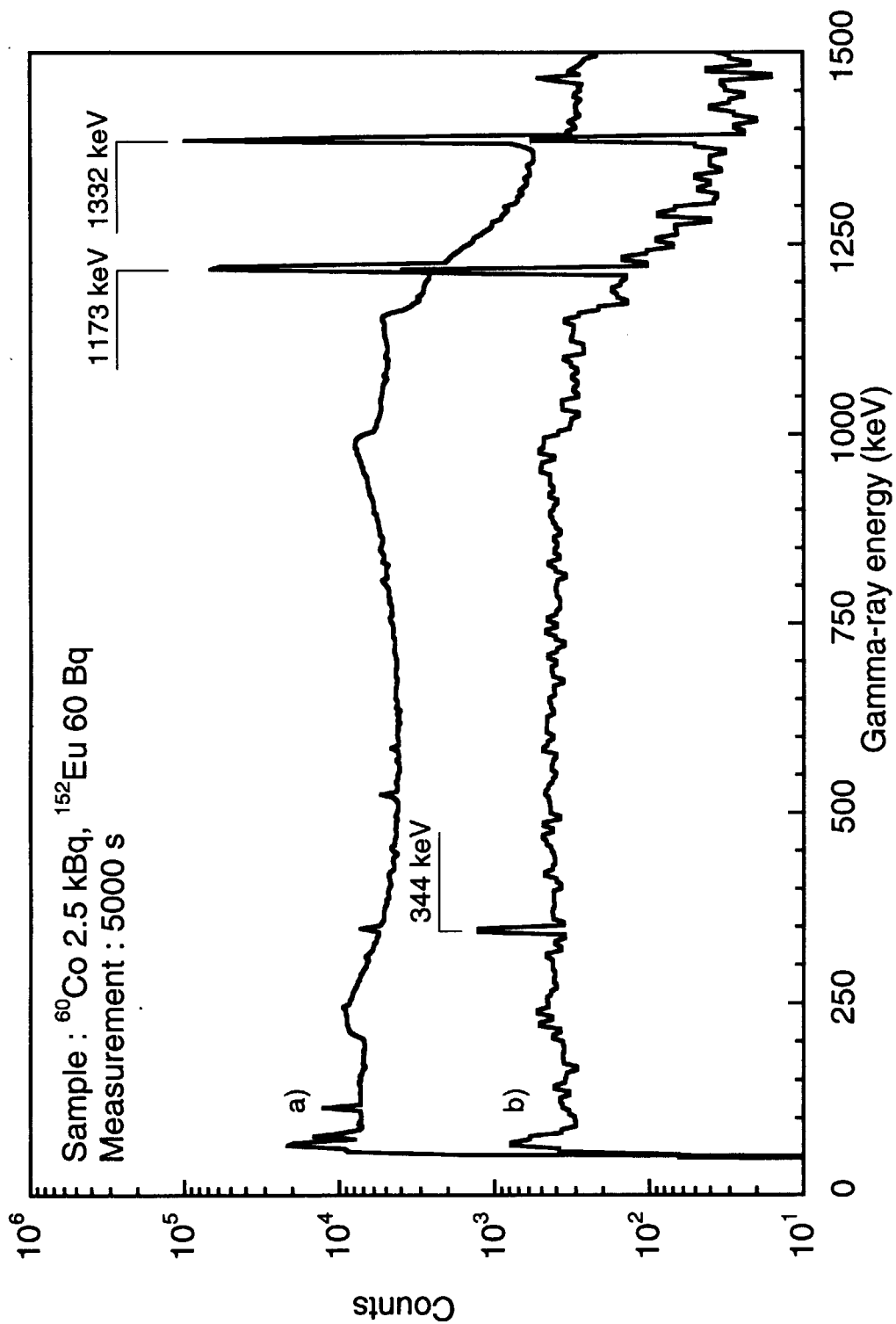


Fig.21 Gamma-ray spectra of ^{152}Eu in single and coincidence modes
 This sample contains ^{60}Co 2.5 kBq and ^{152}Eu 60 Bq, was measured for 5000 seconds.
 a) single mode and b) coincidence mode: BGO energy range 704-956 keV.

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 b=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E.C.閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘 度 1 Pa·s (=10 P) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁹	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15°C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

放射性廃棄物から製作される溶融固化体の放射能迅速評価のための逆同時および同時 γ 線スペクトロメトリーの検討



古紙配合率100%再生紙を使用しています