

JAERI - M

90-069

コンクリート廃材等区分管理用測定装置とその性能

1990年4月

間邊 巍・川崎 克也・南 賢太郎

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

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。
入手の問合せは、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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

コンクリート廃材等区分管理用測定装置とその性能

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

間邊 巍・川崎 克也・南 賢太郎

(1990年3月7日受理)

原子炉解体時には多量の放射性固体廃棄物が発生し、これらの廃棄物に対して、その放射能レベルに応じた合理的な処分をする必要がある。

コンクリート廃材等区分管理用測定装置はその中でも多くを占めるとされる極低レベルの廃棄物の区分と確認を、 γ 線スペクトル分析法により効率的に行うために開発された。装置は廃棄物の走査機構、2台のGe半導体検出器と多重波高分析器、および小型計算機システムからなり、3種類の容器に収容したコンクリートなどの廃棄物の放射能を、放射性核種別に自動測定する。

この装置の検出効率校正定数は、容器別に γ 線エネルギーと廃材等のみかけの密度を関数として決定される。セメントを母材とする標準供試体を用いて、定数の検証を行った結果、廃材等の密度と放射性物質が容器内に均一に分布する時、主な放射性核種に対する測定精度は±10%以内であった。 ^{60}Co に対する検出下限放射能濃度は、廃棄物を200ℓのドラム缶に収容して600秒計測した時、廃棄物の密度に依存することなく $7.5 \times 10^{-3} \text{ Bq/g}$ で、測定処理能力は1時間あたりで約1,000 kgである。

本研究は、原子炉解体技術開発（特別会計による科学技術庁からの58～61年度受託研究）の一部として行ったものである。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

Extremely Low Level Waste γ -Scanner and its Characters

Iwao MANABE, Katsuya KAWASAKI and Kentaro MINAMI

Department of Health Physics
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 7, 1990)

It is necessary in reactor dismantling that a large amount of radioactive solid waste arising should be reasonably treated and disposed according to the radioactive level of them.

An extremely low level waste γ -scanner has been developed for the purpose of efficiently classifying and confirming the extremely low level radioactive solid waste by γ -ray spectrometry. The system which consists of a scanning mechanism of waste container, a couple of HPGe detectors and multichannel analyzers, and a minicomputer system, can measure automatically radioactivity for each nuclide in the wastes such as concrete in the three types of container.

Detection efficiency calibration factors of this system are to be decided for each container by functions of γ -ray energy and effective density of waste in the container. A verification test with radioactive standard containers showed that the calibration factors gave a precision within 10-percent for typical radionuclides in the homogeneous specimen.

The minimum detectable limit of radioactivity concentration of this system is about 7.5×10^{-3} Bq/g for ^{60}Co in 200 l drum container in measuring time of 600 seconds regardless of their density. This system can classify about 1,000kg of the waste an hour.

Keywords: γ -ray Spectrometry, Radioactive Measurement, Minicomputer, Automatic System, Minimum Detectable Limit, Calibration, Detection Efficiency, Low Level Radioactive Waste, Extremely Low Level Waste, Reactor Dismantling

This work was performed by JAERI in 1983 ~1986 under contract with the Science and Technology Agency of Japan.

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 1. 序 論 | 1 |
| 2. システム設計 | 2 |
| 2.1 測定対象核種 | 2 |
| 2.2 測定容器 | 2 |
| 2.3 放射能分析法 | 2 |
| 2.4 測定機構 | 3 |
| 2.5 検出下限放射能 | 3 |
| 3. 装置とその機能 | 8 |
| 3.1 装置の概要 | 8 |
| 3.2 機構部の機能 | 8 |
| 3.2.1 測定物走査機構 | 8 |
| 3.2.2 重量計 | 9 |
| 3.2.3 厚さ計 | 9 |
| 3.2.4 放射能分布カウンタ | 9 |
| 3.2.5 Ge 半導体検出器の架台と遮蔽体 | 10 |
| 3.2.6 γ 線スペクトル測定部 | 10 |
| 3.2.7 データ解析処理部 | 10 |
| 3.3 廃材等の放射能測定と区分判定プログラム | 10 |
| 3.3.1 測 定 | 11 |
| 3.3.2 廃材等の密度の算定 | 11 |
| 3.3.3 γ 線スペクトルの解析 | 11 |
| 3.3.4 平均放射能濃度の算定 | 12 |
| 3.3.5 検出下限放射能濃度の計算 | 13 |
| 3.3.6 区分判定 | 13 |
| 3.3.7 測定結果の出力とファイリング | 13 |
| 4. 性能試験 | 32 |
| 4.1 厚さ計の測定範囲 | 32 |
| 4.2 Ge 半導体検出器の入射角度別感度 | 32 |
| 4.3 廃材等の検出効率 | 32 |
| 4.3.1 入射窓別の検出効率 | 33 |
| 4.3.2 容器と検出器との距離に対する検出効率 | 33 |
| 4.3.3 密度変化に対する検出効率 | 33 |
| 4.3.4 検出効率関数の検証 | 33 |
| 4.3.5 偏在する放射能に対する誤差 | 33 |

| | |
|---------------------|----|
| 4.3.6 バックグラウンドスペクトル | 34 |
| 4.3.7 検出下限放射能濃度 | 34 |
| 5. 結論 | 45 |
| 謝辞 | 46 |
| 参考文献 | 46 |

Contents

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Introduction | 1 |
| 2. | System design | 2 |
| 2.1 | Nuclides to be measured | 2 |
| 2.2 | Containers for measurement | 2 |
| 2.3 | Analysis method for radioactivity | 2 |
| 2.4 | Measuring mechanism | 3 |
| 2.5 | Minimum detectable limit of radioactivity | 3 |
| 3. | System and its functions | 8 |
| 3.1 | System outline | 8 |
| 3.2 | Function of mechanism | 8 |
| 3.2.1 | Scanning mechanism | 8 |
| 3.2.2 | Weighing instrument | 9 |
| 3.2.3 | Thickness counter | 9 |
| 3.2.4 | Radioactivity distribution counter | 9 |
| 3.2.5 | Base of Ge semiconductor detector and shield | 10 |
| 3.2.6 | Measuring instrument of γ -ray spectrum | 10 |
| 3.2.7 | Data analyzing and processing system | 10 |
| 3.3 | Programs for classification judgement of solid waste | 10 |
| 3.3.1 | Measurement | 11 |
| 3.3.2 | Calculation of density of solid waste in container | 11 |
| 3.3.3 | Analysis of γ -ray spectrum | 11 |
| 3.3.4 | Calculation of mean radioactivity concentration | 12 |
| 3.3.5 | Calculation of minimum detectable limit of radioactivity concentration | 13 |
| 3.3.6 | Classification judgement | 13 |
| 3.3.7 | Output and filing of measurement results | 13 |
| 4. | Performance test | 32 |
| 4.1 | Measurement limit of thickness counter | 32 |
| 4.2 | Directional sensitivity of Ge detector | 32 |
| 4.3 | Detection efficiency for solid waste | 32 |
| 4.3.1 | Detection efficiency for various entrance windows | 33 |
| 4.3.2 | Relationship between detection efficiency and distance from center of container to detector | 33 |
| 4.3.3 | Relationship between detection efficiency and variation of density of solid waste | 33 |

| | |
|---|----|
| 4.3.4 Verification of detection efficiency curve | 33 |
| 4.3.5 Discrepancy for partial radioactivity in waste container | 33 |
| 4.3.6 Background spectrum | 34 |
| 4.3.7 Minimum detectable limit of radioactive concentration ... | 34 |
| 5. Conclusions | 45 |
| Acknowledgements | 46 |
| References | 46 |

1. 序論

原子炉の解体撤去に伴って大量の放射性廃棄物が発生する。その大部分は放射能レベルが極めて低い、いわゆる極低レベル放射性固体廃棄物である。この原子炉解体廃棄物を含む極低レベル廃棄物を、合理的に処理処分するための具体的な方策が原子力安全委員会で検討されている。これまでの答申によると、極低レベル放射性固体廃棄物はその放射能レベルに応じた区分を行い、段階的な措置を講じる方針が示唆されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

日本原子力研究所が動力試験炉（JPDR）の解体撤去に当り試算した結果では、放射性廃棄物の主要物質はコンクリートと線材等の金属で、その発生量はそれぞれ2,100トン、1,800トン、この内 3.7×10^{-1} Bq/g($1 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/g}$)または 3.7×10^{-1} Bq/cm²($1 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/cm}^2$)以下の廃棄物は1,700トン、1,500トンと推定している。110万kW級の軽水型発電炉では合計で50万トンを超えるとしている⁵⁾。

将来に実施されるであろう商業用発電炉の廃止措置に伴って、発生する大量の放射性廃棄物を合理的に処理処分するために、大部分を占める極低レベル固体廃棄物の区分確認を、能率的に行う測定装置を開発する必要性がある。コンクリート廃材等区分管理用測定装置は、この目的に沿って製作されたもので、JPDRの解体実地試験に供用し、商用発電炉の解体撤去に必要となる知見を得る。

装置は廃棄物の走査機構、2台のGe半導体検出器と多重波高分析器、および小型計算機システムからなり、3種類の容器に収容したコンクリートなどの廃棄物の放射能を、核種別に自動測定する。本報告はこの装置の構成と性能について述べる。

これまでに、本装置に類する測定器として実用化された例として、カナダのE.C.Davey, G.W.Csullogらによる低レベルの放射性固体廃棄物を直接測定する半自動化モニタの例や⁶⁾、米国のLos Alamos国立研究所が中心となって開発したTRU廃棄物中の核燃料物質を測定するシステムが報告されている⁷⁾。前者は3.7Bq/gを区分レベルとしており、後者はTRU廃棄物中の核燃料物質の測定を目的としたもので、いずれも極低レベルの廃棄物を測定するものではない。

2. システム設計

2.1 測定対象核種

解体する原子炉施設に残留する放射性物質に関する評価結果によると、支配的な放射性物質は放射化生成物で、 γ 線を放出する重要な核種は ^{60}Co 、 ^{54}Mn の他に ^{94}Nb 、 ^{151}Sm 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 ^{166m}Ho などである⁵⁾。

JPDRの放射線管理区域内のサンプリング試料の測定結果では、コンクリート廃材等に含有する放射性核種は、 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu の4核種が主であった。これらの核種の諸特性をTable 2-1に示す⁸⁾。

本装置は汎用性を考慮し、これらの核種を測定対象とする。

2.2 測定容器

解体した廃棄物の形状、材質、密度、重量などは、その解体場所、工法により異なり、多種多様である。迅速な測定には、ハンドリング等の作業効率を上げ、更に評価手順を単純化する必要がある。本装置では3種類の標準容器を定め、廃材等の状態に応じて適宜選択使用する。標準容器はJIS規格の100ℓと200ℓのドラム缶、およびブロック状のコンクリート片を想定した容量が50ℓで、各辺が300mm×300mm×500mmの直方体容器である。充填密度は、コンクリートの場合、最大が2.35g/cm³で、粒状であれば1g/cm³～1.5g/cm³と予想される。

2.3 放射能分析法

本装置は次に示す要求を考慮し、検出器には高純度Ge半導体検出器を採用し、 γ 線スペクトル分析を行う。

- 1) 高検出感度の測定を行う。
- 2) ^{134}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu などの、互いに近接する γ 線エネルギーで、かつ多数の γ 線を放出する核種の分離測定をする。
- 3) 複数の放射性核種別の放射能を的確かつ迅速に求める。

各測定容器に対する γ 線検出効率は、軽元素の質量吸収係数が物質により大きく変わらないことをもとに、容器内の見かけ密度および γ 線エネルギーで決定し、一定の測定精度を保つ方式とする。

2.4 測定機構

雑固体廃棄物中に放射性物質が不均一に分布する可能性がある。測定容器中に偏在する放射能の分布を決定し、これに対応した検出効率を求めた上で放射能を算定することは、装置の大型化、複雑化を招き、作業能率上も得策でない。本装置では、偏在する放射能を仮想的に均一化するために、測定容器を旋回しながら測定する方法を採用した。この場合、測定位置情報を得ることにより放射能の分布も知る。

2.5 検出下限放射能

本装置の検出下限放射能の目標値は、200 l ドラム缶を用いた時、 ^{60}Co に対し、 $3.7 \times 10^{-2} \text{Bq/g}$ ($1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/g}$) に設定した。この目標を達成すべく、設計に当り簡単な実験と計算を試みた。Ge半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメータのある核種に対する検出下限放射能濃度 $D_L \text{ Bq/g}$ は次式により与えられる。

$$D_L = \frac{1}{E_f(E) \cdot I_g \cdot W} \left[\frac{P}{2} - \left\{ \frac{P}{t} + \sqrt{\left(\frac{P}{t} \right)^2 + 8 \frac{Nb}{t}} \right\} \right] \quad \cdots (2.1)$$

ここで、 $E_f(E)$ ： γ 線エネルギー E に於ける全吸収ピーク検出効率

I_g ：当該放射性核種として着目する γ 線の一崩壊当りの放出比

W ：測定する廃棄物の重量 [g]

P ：全吸収ピークの正味計数率にたいする標準偏差の倍数

t ：測定時間 [s]

Nb ：全吸収ピークのバックグラウンド計数率 [s^{-1}]

(2.1)式に示すように、検出下限放射能を決定する要因は1)検出効率、2)バックグラウンド計数率、3)測定時間、4)廃棄物量である。概ね検出効率とバックグラウンド計数率で装置の仕様が、測定時間と廃棄物量で処理能力が決定される。

先ず、検出器の全吸収ピーク検出効率を求めるに当り、2台のGe半導体検出器の γ 線固有感度を測定した。相対効率が23%と27%の高純度Ge半導体検出器を用い、エンドキャップの軸上に検出器の窓面より500mmの点に80keVから1.33MeVにわたる7核種の点状線源を置き、全吸収ピークの計数値より固有の全吸収ピーク検出効率を求めた。この結果をFig. 2-1に示す。次に、検出器の中心点に於ける γ 線の粒子束密度をQAD-CGコードを用いて計算した⁹⁾。計算条件として、廃棄物は放射能濃度が $3.7 \times 10^4 \text{ Bq/g}$ であるコンクリートで、200 l ドラム缶に密度 2.27 g/cm^3 で充填されているものとした。計算点はドラム缶の1/2の高さで、側面より直角に100mm、160mm、190mmの位置である。計算に当たってはドラム缶の側面より100mmの位置に口径が直径80mm、50mm×10mm角、50mm×50mm角、80mm×50mm角の入射窓を持つ厚さ50mmの鉛遮蔽体を置くものとした。各測定条件に於ける γ 線粒子束密度の計算結果をFig. 2-2に示す。

200ℓ ドラム缶に対するγ線の全吸収ピーク検出効率はFig. 2-1とFig. 2-2の結果から、次式を用いて推定した。

$$E_f(E) = \frac{E_i(E) \cdot \phi g(E) \cdot S}{A \cdot V \cdot \rho} \quad (2.2)$$

ここで、 $E_f(E)$: γ線エネルギーEに於ける全吸収ピーク検出効率

$E_i(E)$: " 固有の検出効率

$\phi g(E)$: " γ 線粒子束密度 [s^{-1}/cm^2]

S : 検出器の実効断面積 [cm^2]

A : 廃棄物中の放射能濃度 [Bq/g]

V : 容器の体積 [cm^3]

ρ : 廃棄物の容器中での密度 [g/cm^3]

ドラム缶の側面より100mmの点に直径80mmの入射窓を置き、130mmの点に検出器の実効中心がある時の1.33MeVに対する全吸収ピーク検出効率は 2.8×10^{-5} となる。

先に示すGe半導体検出器で、直径80mmの入射窓を持つ、厚さ50mmの鉛遮蔽体を用いて、鉄筋コンクリート建屋内のバックグラウンドスペクトルを測定した。バックグラウンドスペクトルの測定結果と(2.2)式の算出結果より ^{60}Co に対する検出下限放射能濃度を(2.1)式により試算した。測定時間が600秒、P=3とした時、 ^{60}Co に対し 1×10^{-2} Bq/g ($3 \times 10^{-7} \mu Ci/g$) を得た。

Table 2-1 Table of Major Radionuclide Data for the Classification
of Extremely Low Level Radioactive Waste in Reactor
Dismantling

| Nucldes | ^{60}Co | ^{134}Cs | ^{152}Eu | ^{154}Eu |
|--|--|--|---|---|
| Half Life[Year] | 5.2791 | 2.0625 | 13.2 | 8.5 |
| Production Mode | $^{59}\text{Co}(n, \gamma)$ | $^{133}\text{Cs}(n, \gamma)$ | $^{151}\text{Eu}(n, \gamma)$ | $^{153}\text{Eu}(n, \gamma)$ |
| Decay Mode (Emission Rate) [%] | β^- (100) EC(3×10^{-4}) | β^- (99.9+) EC(3x10 ⁻⁴) | β^- (27.0) β^+ (0.019) EC(73.0) | β^- (99.98) EC(0.02) |
| γ -ray Energy[MeV] (Intensity) [%] | 1.17321 (100) 1.33247 (100) 0.56929 (15.43) 0.60466 (97.56) 0.79576 (85.44) 0.80184 (8.73) 1.03850 (1.00) 1.16786 (1.81) 1.36513 (3.04) 1.11207 (13.42) 1.21289 (1.433) 1.40803 (20.76) | 0.47535 (1.465) 0.56326 (8.38) 0.34427 (27.2) 0.41109 (2.25) 0.44440 (2.88) 0.7789 (12.74) 0.86739 (4.102) 0.9640 (14.36) 1.08580 (10.11) 1.2466 (0.70) 1.27439 (35.5) 1.59648 (1.67) | 0.12178 (30.7) 0.24467 (7.73) 0.59174 (4.83) 0.69241 (1.69) 0.7230 (19.7) 0.75687 (4.33) 0.87319 (11.5) 0.99632 (10.3) 1.00476 (17.36) 1.2466 (0.70) 1.27439 (35.5) 1.59648 (1.67) | 0.12314 (40.47) 0.24804 (6.60) 0.60466 (97.56) 0.79576 (85.44) 0.80184 (8.73) 1.03850 (1.00) 1.16786 (1.81) 1.36513 (3.04) 1.11207 (13.42) 1.21289 (1.433) 1.40803 (20.76) |

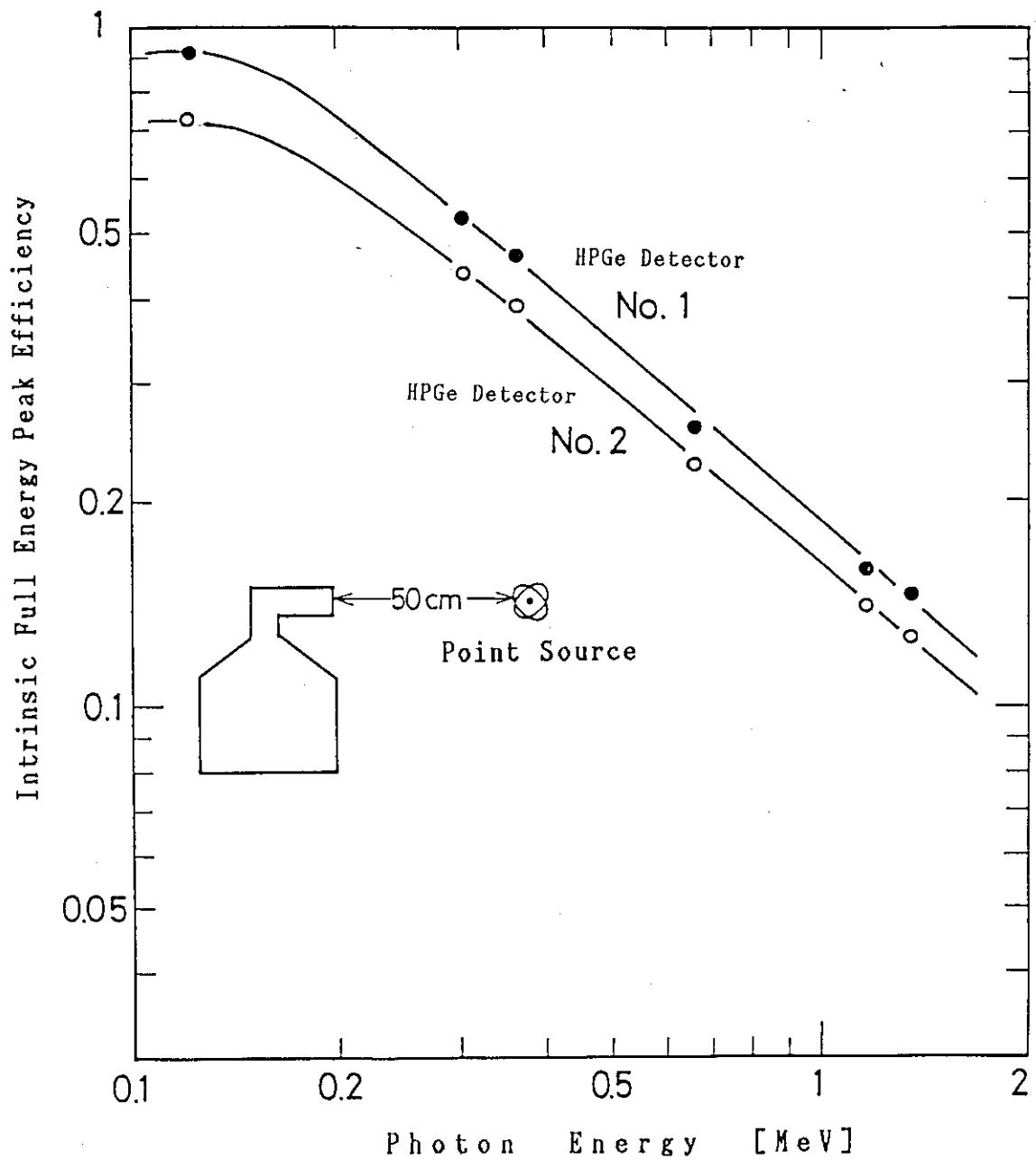


Fig. 2-1. Intrinsic Efficiency of High Purity Ge Detector for
Extremely Low Level Waste γ -Scanner

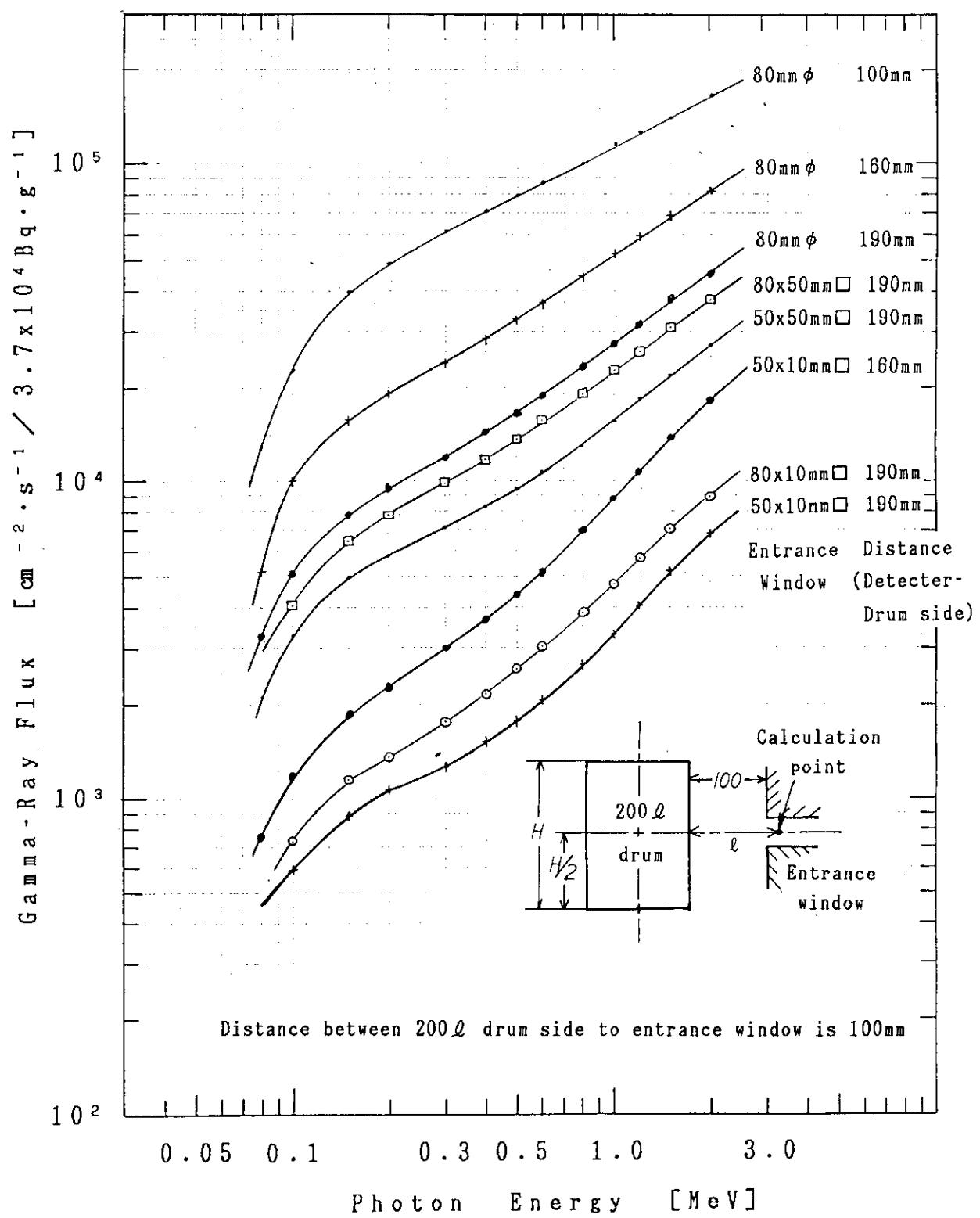


Fig. 2-2 Calculated Results of Gamma-Ray Flux from Homogeneous Radionuclides in 200ℓ Drum

3. 装置とその機能

3.1 装置の概要

装置は測定物架台、 γ 線スペクトル測定部およびデータ解析処理部に大別される。測定物架台は測定物に回転と昇降の動作を与える測定物走査機構、測定物の重量計、厚さ計で構成する。 γ 線スペクトル測定部は2台の高純度Ge半導体検出器、遮蔽体、增幅器、高圧電源、多重波高分析器、放射能分布カウンタで構成する。データ解析処理部は小型計算機システムから成り、16ビットの中央処理装置、512kバイトの主記憶装置、磁気ディスクとフロッピーディスクの補助記憶装置、入出力装置としてグラフィックディスプレー、キーボード、プリンタ、デジタルプロッタがある。プログラムには測定物架台の制御、データ収集、 γ 線スペクトル解析、放射能定性・定量、区分判定等の機能がある。

装置の全外観をPhoto. 3-1(a), (b)に、構成をFig. 3-1に各々示す。各部の機器仕様の一覧をTable 3-1(a), (b), (c)に示す。

3.2 機構部の機能

3.2.1 測定物走査機構

本機構は、長さ4,050mm、間隔900mmのレール上の走行台車に、昇降スタンド、昇降台、旋回テーブルを有する。各部は解体作業の進捗に応じて、移動が可能なよう、分解組立が容易になっている。通常の測定動作では、200ℓのドラム缶に収容した測定物を旋回テーブルに積載し、対向するGe半導体検出器の中心位置まで走行後、容器中の平均的な放射能を求めるために、上昇と回転の動作を加える。廃材等を収容する容器の最大寸法は直径750mm、高さ1,000mm（容量約600ℓ）で、許容重量は500kgである。測定物の上昇速度は測定時間と対応し、一回の上昇動作における測定時間を次に示す。長時間の測定を行うときは上昇動作を繰り返す。

| | | | |
|------|-----------|------|--------|
| 上昇速度 | 40 cm/min | 測定時間 | 約 140秒 |
| " | 20 cm/min | " | 約 270秒 |
| " | 10 cm/min | " | 約 540秒 |
| " | 5 cm/min | " | 約1000秒 |

回転速度は1、2、5、10rpmの4段可変とした。昇降と回転の速度制御は周波数変換方式である。本機構の運転法は装置内の操作盤による手動運転と、小型計算機システムによる遠隔自動運転がある。測定物走査機構上の測定物の軌跡と各行程での所要時間をFig. 3-2に示す。測定時間を270秒とした時の測定に係る所要時間は600秒である。

3.2.2 重量計

測定物の単位重量当たりの放射能を求め、かつ、廃材等の容器収容率に応じた補正を行うために、測定物の重量を放射能測定に先立って測定する。重量の検出素子は小型のロードセルで、秤量範囲は20kgから1000kgである。出力信号はアナログからデジタルに変換された後に、データ解析処理部の小型計算機システムに転送される。

測定物の重量測定は連続して10回行い、この平均を総重量とし、事前に登録されている容器重量を差引き、正味重量を求める。

3.2.3 厚さ計

γ 線の吸収特性を利用して、廃材等の容器底面からの高さと、真の厚さを測定する。 γ 線源には 3.5×10^6 Bqの ^{137}Cs を用いた。計測部は直径25mm、高さ75mmのNaI(Tl)シンチレーション検出器と、直線増幅器、シングルチャンネルアナライザ、タイマ・スケーラで構成する。当線源がGe半導体検出器に影響を与えるように、線源と検出器の取付軸を測定容器を中心に偏角させるとともに遮蔽体とコリメータを用いた。線源と検出器の遮蔽体には厚さ100mmの鉛で、線源のコリメータの径は10mm、検出器の窓径は25mmである。線源と検出器面との距離は1,450mmである。

廃材等が収容されていない状態での厚さ計の計数率 $N_i \text{ s}^{-1}$ を、バックグラウンド測定モードにより求めておく。次に、測定物を上方向に移動させ、100mm毎の計数データを収集し、その計数率を $N_0 \text{ s}^{-1}$ とする。ある位置における廃材等の実効的な厚さは次式により算出する。

$$d_i = -\frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{N_i}{N_0} \right) \quad (3.1)$$

ここで μ は廃材等の線吸収係数である。計数データは測定容器の上部より9点収集する($i=1 \sim 9$)。廃棄物の容器底面からの高さは以下の順に計算を行って決定する。 d_7 と d_8 の平均値を仮の厚さとする。測定点 d_i と前後の d_{i+1} と d_{i-1} の3点を2次曲線で近似し、1次微係数を求める。これを $i=2$ から8まで順次計算し、1次微係数が負になる i の時の $i+1$ 点の接線と、仮の厚さの1/10との交点を廃材等の高さ点Hとする。

廃材等の厚さDは高さを求めた点の計数データを除外し、各々の厚さを求めて平均する。測定物の高さは最低を300mmとし、適合する高さや、厚さが得られないときは、容器毎に前もって登録された値を用いる。測定結果の例をFig. 3-3に示す。

3.2.4 放射能分布カウンタ

測定容器中の放射能分布を把握するため、Ge半導体検出器の出力信号を多重波高分析器の入力部で分岐し、シングルチャンネルアナライザでエネルギー弁別後、スケーラで計数する。測定は測定容器の高さ方向100mm毎と、周囲方向の45度毎に区分して、2台のGe半導体検出器の指定エネルギー領域の計数を積算する。Ge半導体検出器は対称に置かれているので、片側の計数値は180度ずらした位置に合算している。

砂を充填した200 l ドラム缶中に点状線源を置いたときの測定結果のプリンタとプロット出力例をFig. 3-4とFig. 3-5に示す。

3.2.5 Ge半導体検出器の架台と遮蔽体

Ge半導体検出器、測定物架台と測定容器との幾何学的関係をFig. 3-6に示す。架台はGe半導体検出器の測定位置を、測定容器の大きさに応じて調整するために設けた。調整範囲は前後方向で、両検出器間の最短距離は700mm、最長距離は1,050mmである。上下方向には中間ベースを取り外すことにより450mm低くできる。

遮蔽体はGe半導体検出器のヘッド部を厚さ100mmの鉛で囲む構造とし、移動が容易な分割式である。入射窓は各種のものが交換できる構造とし、材質は鉛で厚さが50mm、窓の寸法は直径80mmの円型と、80mmx80mmと50mmx50mmの角型、80mmx10mmと50mmx10mmのスリット型の計5種を製作した。測定目的に応じてこれらを適宜選択して用いる。

3.2.6 ギ線スペクトル測定部

検出部は、エネルギー分解能が良く、管理が容易な高純度型Ge半導体検出器である。2台の検出器は横向形式で、対称に置いて使用する。両検出器の1.33MeVのギ線に対する相対効率はそれぞれ23%、27%で、エネルギー分解能はともに2.0 KeV以下である。

多重波高分析器はNIM規格のモジュール型で、直線増幅器、アナログトゥデジタルコンバータ(ADC)、プロセスマモリ、ディスプレーコントローラのユニットから構成し、一式を1台のビン電源に収納した。ADCのクロック周波数は50MHz、利得は最大4096チャンネルである。プロセスマモリのチャンネル数は4096、チャンネル当りの計数容量は 10^6 -1カウントである。増幅器の利得はチャンネル当り0.5 KeVになるよう設定し、測定エネルギー範囲は0.1～2MeVである。

3.2.7 データ解析処理部

小型電子計算機は、米国ヒューレット・パッカード社の1000シリーズmicro 27で、語長は16ビット、主記憶素子容量は512キロバイトである。補助記憶装置には9メガバイトと32メガバイトの固定式磁気ディスクが各1台と270キロバイトのフロッピーディスクを用いる。装置への動作指令は14インチのカラーグラフィックディスプレーとキーボードによる会話形式で行う。ギ線スペクトルのピーク解析結果や、放射能の定性・定量結果はカラーグラフィックディスプレー、プリンタ、デジタルプロッタに図表化して出力される。多重波高分析器、中央処理装置、補助記憶装置は1台のシステムラックに納め、移動を容易にした。

3.3 廃材等の放射能測定と区分判定プログラム

本プログラムの構成は次の通りである。

- ① 廃材等およびバックグラウンドの測定とデータ解析
 - ② 測定結果のファイリングと管理
 - ③ 自動測定シーケンスプログラムと解析用の初期値や、定数等の登録と更新
 - ④ 検出器、各機構部の自動診断
- ①は本装置のリアルタイムの主プログラムで、②から④は①をサポートする会話形式のバッチ処理である。プログラム言語はFORTRAN77である。

3.3.1 測定

廃材等の区分確認とバックグラウンドを測定するプログラムの流れをFig. 3-7に示す。区分判定に至るまでの測定手順は、測定物走査機構の走行台車の走行、廃材等の重量測定、測定容器を上昇・回転中に、 γ 線スペクトロメータ、厚さ計、放射能分布カウンタの各種データの収集、測定終了後に測定容器の積載位置までの復帰、 γ 線スペクトル解析、密度補正、単位重量当たりの放射能濃度の算定と区分判定である。マルチプログラム機能を使い、各処理を可能な限り並列に進め、所要時間を短縮した。本装置が設置された周辺のバックグラウンドは解体工事の進捗状況により変動すると予想される。従って、測定前には、廃材等と同質媒体のバックグラウンド供試体を測定し、バックグラウンドデータとして登録しておく。

測定作業の能率向上と簡便化は本装置の不可欠な要素である。自動シーケンス測定プログラムは、測定物走査機構の制御から区分判定に至る一連の動作を操作員の介入なしで進めるもので、廃材等の種類、測定容器種類、測定物走査機構の動作モード、測定条件、出力データの種類等を事前に登録ができる。登録できる測定モードは5種類である。この設定例の一覧をTable 3-2 とFig. 3-8 に示す。

3.3.2 廃材等の密度の算定

見かけの密度 ρ_{ap} は次式により求める。

$$\rho_{ap} = 4 \cdot \frac{W}{\pi D^2 H} \quad [g/cm^3] \quad (3.2)$$

ここで、W：廃材等の重量 [g]

D：容器の直径（登録値） [cm]

H：容器中の廃材等の高さ [cm]

実効密度 ρ_{ef} は次式により求める。

$$\rho_{ef} = 4 \cdot \frac{W}{\pi d^2 H} \quad [g/cm^3] \quad (3.3)$$

ここで、d：廃材等の厚さ [cm]

3.3.3 γ 線スペクトルの解析

γ 線スペクトル解析は検出器系毎に平滑化、ピーク探索、多重ピークの分離、エネルギー校正、放射性物質の定性の順に行う。平滑化は5チャンネルの計数値を

使用し、次式に示す多項式最小自乗法フィルタ法¹⁰⁾を用いる。

$$N(i) = [-3\{n(i-2)+n(i+2)\} + 12\{n(i-1)+n(i+1)\} + 17n(i)] / 35 \quad \dots \quad (3.4)$$

ここで $N(i)$ は i チャンネルの平滑化データで、 $n(i)$ は計数値である。ピーク探索ではスペクトル中の有意なピークを検出し、ピーク中心チャンネル、ピーク面積および誤差、バックグラウンド、半値幅を求める。多重ピークの分離ではピーク探索で検出されたピークをガウス関数で、ベースラインを2次式で最小自乗法フィッティングする。ピークの最大多重度は7である。ピーク探索、多重ピークの分離手法は科学技術庁編”ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法”¹¹⁾によった。

エネルギー校正は多重波高分析器のチャンネル(X)と γ 線エネルギー(E)との関係を2次式で、 γ 線エネルギーの平方根とピークの半値幅との関係は1次式の最小自乗法で求める方法をとった。

放射能の定性では、校正した光電ピークエネルギーをもとにアイソトープテーブルを検索し、核種を決定する。アイソトープテーブルは γ 線エネルギー順に核種名、半減期、一崩壊当りの γ 線放出比などの情報を持つ。登録した放射性核種は天然放射性核種、長半減期の核分裂生成物及び中性子との核反応生成物質を中心で、登録した γ 線数は300である。

3.3.4 平均放射能濃度の算定

廃材等の放射能は2台のGe半導体検出器の物理的性能がそれぞれ異なっているため、各検出器系のピーク計数値を合算した後に次式により求める。

$$A_m(n) = \frac{N(n)}{Ig(n) \cdot \varepsilon(E, \rho_{ef}) \cdot W \cdot t} \quad \dots \quad (3.5)$$

ここで、 $A_m(n)$ ：核種 n の平均放射能濃度 [Bq/g]

$N(n)$ ：“光電ピークの合算正味計数値

$Ig(n)$ ：“着目する γ 線の一崩壊当りの放出比

$\varepsilon(E, \rho_{ef})$ ：合算した検出効率関数

E ：光電ピークの γ 線エネルギー [keV]

t ：計測時間 [s]

検出器系毎の検出効率関数は以下の式で表す。

$$\varepsilon(E, \rho_{ef}) = Ef_0 \cdot \left(\frac{\rho_{ef}}{3.0} \right)^{\{C_3+C_4 \cdot E+C_5 \cdot E^2\}} \cdot \frac{Ef_x(E)}{Ef_s(E)} \quad \dots \quad (3.6)$$

ここで、 $E > 300\text{keV}$ の時 $\log(Ef_0) = C_{01} + C_{11} \cdot \log E + C_{21} \cdot \log(E)^2$

$E < 300\text{keV}$ の時 $\log(Ef_0) = C_{02} + C_{12} \cdot \log E + C_{22} \cdot \log(E)^2$

$\rho_{ef} = \rho_m \cdot \mu_{mi}(E) / \mu_{mc}(E)$

μ_m ：廃材等の見かけの密度 [g/cm³]

μ_{mi} ：廃材等の γ 線エネルギー E に対する質量吸収係数 [cm²/g]

μ_{mc} ：コンクリートの γ 線エネルギー E に対する質量吸収係数 [cm²/g]

$C_{01} \sim C_{22}, C_3 \sim C_5$ ：検出器系毎の検出効率係数

$Ef_s(E)$ ：基準となる検出器の固有の光電ピーク検出効率

$Ef_x(E)$ ：測定時の検出器の光電ピーク検出効率

検出効率係数(C01~C5)はGe半導体検出器の固有検出効率と、 γ 線エネルギー毎に測定容器鋼材、入射窓、密度毎の測定容器内の廃材等の γ 線の減衰を補正する点減衰核コード¹²⁾を用いて決定した。検出効率係数をTable 3-3に、計算に用いる質量吸収係数の一覧をTable 3-4に示す¹³⁾。Table 3-2に示す測定条件毎の検出効率関数曲線を式(3.6)から求め、密度と γ 線のエネルギー別にFig. 3-9からFig. 3-13に示す。

3.3.5 検出下限放射能濃度の計算

核種別の検出下限放射能濃度 $D\ell(n)$ Bq/g は、検出器系毎の検出下限計数値 $N\ell(n)$ を合算した後に求める。

$$N\ell(n) = \frac{1}{2} [9 + \sqrt{81 + 36 \{ R + t \cdot Nb + dR^2 + (t \cdot dNb)^2 \}}] \quad \cdots \cdots \quad (3.7)$$

$$D\ell(n) = \frac{N\ell(n)}{lg(n) \cdot \varepsilon(E, \rho_{ef}) \cdot W \cdot t} \quad \cdots \cdots \quad (3.8)$$

$$\text{ここで、 } R = \frac{\ell}{2} \left(\frac{S\ell}{5} + \frac{Sh}{5} \right)$$

$$dR^2 = \left(\frac{\ell}{10} \right)^2 S\ell + \left(\frac{\ell}{10} \right)^2 Sh$$

ℓ : 光電ピークのチャンネル数

$S\ell$: " 低エネルギー側5チャンネルの計数値

Sh : " 高 "

Nb : " ベースライン計数率 [s⁻¹]

dNb : " の標準偏差 [s⁻¹]

$N\ell(n)$: 核種 n の合算された検出下限計数値

3.3.6 区分判定

検出限界値以上の核種の放射能濃度を合計し、この結果と区分境界値との比較を行う。区分境界値を越えた場合には警報を発する等の出力を行う。区分境界値は事前に登録しておく。

3.3.7 測定結果の出力とファイリング

廃材等の測定結果は、廃材等の情報、測定条件などとともに、グラフィックディスプレー、プリンタに測定毎に出力する。プリンタの出力例をFig. 3-14に示す。放射能分布の測定結果はグラフィックディスプレー、プリンタに数値を出し、グラフィックディスプレーとプロッタには放射能分布を三次元図(Fig. 3-5)で表示する。

γ 線スペクトル、放射能、放射能分布、厚さ計の各解析結果は固定ディスクおよびマイクロフロッピーディスクに、唯一無二の測定番号別に保存する。また、この保存データはラインプリンタ等に測定時と同じ様式で必要に応じ出力できる。

保存容量は測定したγ線スペクトルの生データが9メガバイトの固定磁気ディスク装置に50データ、マイクロフロッピーディスクには1枚当たり16データ、解析結果は50測定分である。

Table 3-1a Specifications of Extremely Low Level Waste γ-Scanner

| 機 器 名 | 項 目 | 仕 様 |
|---------------------|---|---|
| 高純度ゲルマニウム半導体検出器 | 型式 相対効率 (1.3 MeVに対し) エネルギー分解能 (同上) ピーク シェイプ (FWTM/FWHM) デュワー槽 | 横向き 20%以上 2.0 keV以下 2.0 以下 30 ℥ |
| スペクトロスコピーアンプリーファイヤー | 入力電圧範囲 利得 積分直線性 出力電圧範囲 | 0 ~ ±10 V 2 ~ 2048 倍 0.005 %以内 0 ~ ±10 V |
| 高圧電源 | 出力電圧 出力電流 電圧安定度 リップルと雑音 | ± 100 ~ 5000 V 0 ~ 400 μA 0.05 % / 8h 以下 5 mV (P-P) 以下 |
| 液体窒素レベルモニタ | センサー 出力信号 | PGT アラーム警告 ロジック信号 リレー接点 |
| 多重波高分析器 | 入力信号 変換利得 A/D変換方式 変換クロック A/D温度安定度 A/D長時間安定度 積分直線性 微分直線性 メモリ方式 メモリサイズ | 0 ~ 8 V 4096 チャンネル ウィルキンソン方式 50 MHz ± 0.01 % / °C 以内 ± 0.01 % / 日 以内 ± 0.05 % 以内 ± 0.5 % 以内 不揮発型 IC 4096 チャンネル |

Table 3-1b Specifications of Extremely Low Level Waste γ -Scanner

| 機 器 名 | 項 目 | 仕 様 |
|----------------------|--|---|
| 多重波高分析器 | 計数容量 ブラウン管 コントロール機能 計算機インターフェース | $10^6 - 1$ カウント／チャンネル 10cm 角形 スキャン, ジャンプ, エクスパンド, ロール, ROI, 積分 NAIG-IB (IEEE-488 準拠) |
| 小型計算機 | 語長 メモリ容量 付属機能 | 16ビット 512 kバイト マルチユーザー マルチプログラム 浮動小数点演算 |
| 固定ディスク装置 | 方式 メモリ容量 | ウェンチエスタ型 9.4 Mバイト |
| フロッピーディスク装置 | シートサイズ メモリ容量 | 3.5 インチ 270 kバイト |
| キーボード付グラフィックディスプレー装置 | 文字種類 画面 画面色 解像度 | 英数字, カナ, 特殊文字等 157 種 14インチ 7 色 1024×780 |
| ラインプリンタ | 印字数 印字速度 文字種類 | 132 字／行 180 字／秒 英数字, カナ, 特殊文字 |
| デジタルプロッタ | ペン速度 用紙 ペン | 50.8 cm/s A3/A4 6 色 |

Table 3-1c Specifications of Extremely Low Level Waste γ -Scanner

| 機 器 名 | 項 目 | 仕 様 |
|-----------|---|--|
| 測定物走査機構 | 回転数 昇降速度 昇降範囲 最大容器寸法 最大荷重 | 1, 2, 5, 10 rpm 5, 10, 20 cm/min 0~95 cm 75(D) x 100(H) cm 500 kg |
| 重量計 | 検出器 秤量範囲 表示器 直線性 | ロードセル 20~1000 kg デジタル3桁 0.2 % |
| 厚さ計 | 放射線源 検出器 遮蔽体 シンクルチャンネルアナライザ 入力電圧 弁別範囲 カウント 計数容量 計数速度 タイマ | ^{137}Cs NaI(Tl) 25(D) x 75(H) mm 鉛 10 cm 0.02~10 V 0.02~10 V 10^6 -1 10 MHz 0.1~10 ksec |
| 放射能分布カウント | シンクルチャンネルアナライザ 入力電圧 弁別範囲 カウント 計数容量 計数速度 | 0.02~10 V 0.02~10 V 10^6 -1 10 MHz |

Table 3-2 List of the Automatic Sequential Measurement Programs

| Program No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| Entrance Window | 80mm ϕ | 80mm ϕ | 80mm ϕ | 80mm ϕ | 50x10mm |
| Detecter Position | 200mm | 200mm | 200mm | 300mm | 200mm |
| Container | Drum 200 l | Drum 100 l | Square 50 l | Drum 200 l | Drum 200 l |
| Name of Detection Efficiency Curve | A | B | C | D | E |

Table 3-3 Table of Constants of Polynomical for Detection Efficiency
Calibration of Extremely Low Level Waste γ -Scanner

| Program Number | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Channel A | C01 | -2.2870×10^0 | -3.5379×10^0 | -4.7282×10^0 | -2.7305×10^0 | 1.8603×10^0 |
| | C11 | -1.8531×10^0 | -9.0239×10^{-1} | -1.7187×10^{-1} | -1.5870×10^0 | -6.0968×10^0 |
| | C21 | 2.5730×10^{-1} | 9.4378×10^{-2} | -8.7860×10^{-3} | 2.0992×10^{-1} | 1.1174×10^0 |
| | C02 | -1.7399×10^1 | -1.5609×10^1 | -1.8572×10^1 | -1.6786×10^1 | -1.8550×10^1 |
| | C12 | 1.0455×10^1 | 9.0693×10^0 | 1.1146×10^1 | 9.9133×10^0 | 1.0392×10^1 |
| | C22 | -2.2487×10^0 | -1.9640×10^0 | -2.3219×10^0 | -2.1421×10^0 | -2.2133×10^0 |
| | C3 | -9.8062×10^{-1} | -9.5529×10^{-1} | -1.0073×10^0 | -9.5948×10^{-1} | -1.0219×10^0 |
| | C4 | 3.5238×10^{-5} | -8.0448×10^{-6} | 1.3792×10^{-4} | -7.1502×10^{-6} | 1.5052×10^{-4} |
| | C5 | -1.4553×10^{-9} | 4.6632×10^{-8} | -3.1763×10^{-9} | 1.9675×10^{-8} | -7.3976×10^{-8} |
| | | | | | | |
| Channel B | C01 | -2.4238×10^0 | -3.6748×10^0 | -4.8650×10^0 | -2.8674×10^0 | 1.8614×10^0 |
| | C11 | -1.8092×10^0 | -8.5844×10^{-1} | -1.2792×10^{-1} | -1.5430×10^0 | -6.1201×10^0 |
| | C21 | 2.5730×10^{-1} | 9.4377×10^{-2} | -8.7861×10^{-3} | 2.0992×10^{-1} | 1.1174×10^0 |
| | C02 | -1.6904×10^1 | -1.5114×10^1 | -1.8077×10^1 | -1.6291×10^1 | -1.9228×10^1 |
| | C12 | 9.9666×10^0 | 8.5805×10^0 | 1.0658×10^1 | 9.4245×10^0 | 1.0940×10^1 |
| | C22 | -2.1365×10^0 | -1.8518×10^0 | -2.2097×10^0 | -2.0299×10^0 | -2.3333×10^0 |
| | C3 | -9.8062×10^{-1} | -9.5529×10^{-1} | -1.0073×10^0 | -9.5948×10^{-1} | -1.0219×10^0 |
| | C4 | 3.5238×10^{-5} | -8.0448×10^{-6} | 1.3792×10^{-4} | -7.1502×10^{-6} | 1.5052×10^{-4} |
| | C5 | -1.4553×10^{-9} | 4.6632×10^{-8} | -3.1763×10^{-9} | 1.9675×10^{-8} | -7.3976×10^{-8} |
| | | | | | | |

Table 3-4 Mass Absorbtion Coefficients of Materials Registered
for Extremely Low Level Waste γ -Scanner

| Energy keV | Iron $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ | Copper $\rho = 8.9 \text{ g/cm}^3$ | Polyethylene $\rho = 0.96 \text{ g/cm}^3$ | Concrete $\rho = 2.3 \text{ g/cm}^3$ |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| 184.41 | 0.1566 | 0.1710 | 0.1440 | 0.1313 |
| 320.08 | 0.1058 | 0.1072 | 0.1191 | 0.1052 |
| 427.86 | 0.0908 | 0.0907 | 0.1061 | 0.0937 |
| 604.73 | 0.0766 | 0.0759 | 0.0918 | 0.0807 |
| 661.64 | 0.0733 | 0.0725 | 0.0882 | 0.0775 |
| 706.67 | 0.0710 | 0.0702 | 0.0857 | 0.0752 |
| 756.79 | 0.0687 | 0.0678 | 0.0830 | 0.0728 |
| 810.76 | 0.0665 | 0.0656 | 0.0804 | 0.0705 |
| 834.83 | 0.0655 | 0.0646 | 0.0793 | 0.0695 |
| 1115.52 | 0.0567 | 0.0557 | 0.0689 | 0.0604 |
| 1274.39 | 0.0530 | 0.0521 | 0.0644 | 0.0564 |
| 1291.56 | 0.0527 | 0.0517 | 0.0640 | 0.0561 |
| 1332.46 | 0.0518 | 0.0509 | 0.0630 | 0.0552 |
| 1408.02 | 0.0504 | 0.0495 | 0.0612 | 0.0536 |
| 1690.94 | 0.0460 | 0.0453 | 0.0556 | 0.0488 |

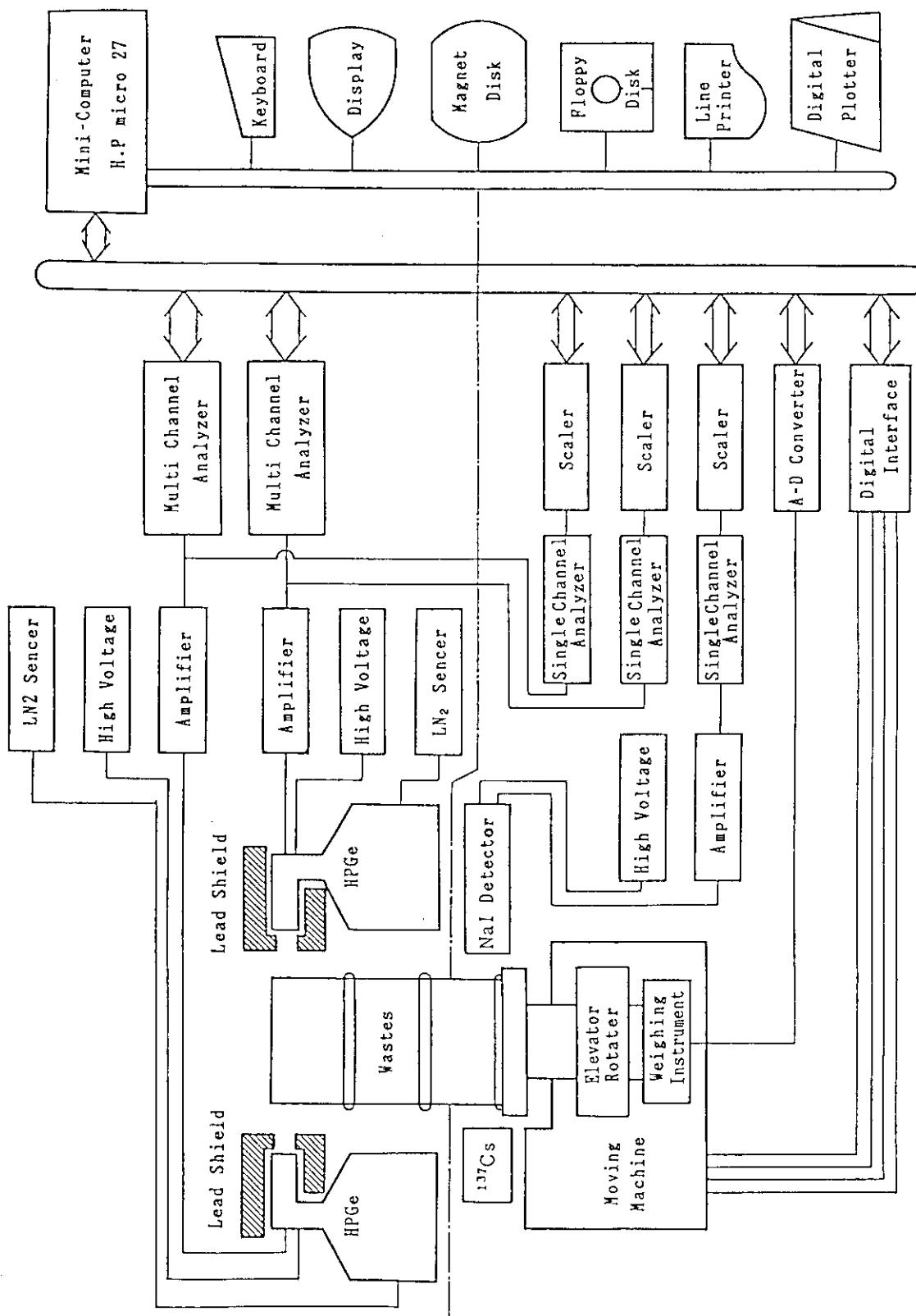


Fig. 3-1 Configuration of Extremely Low Level Waste γ -Scanner

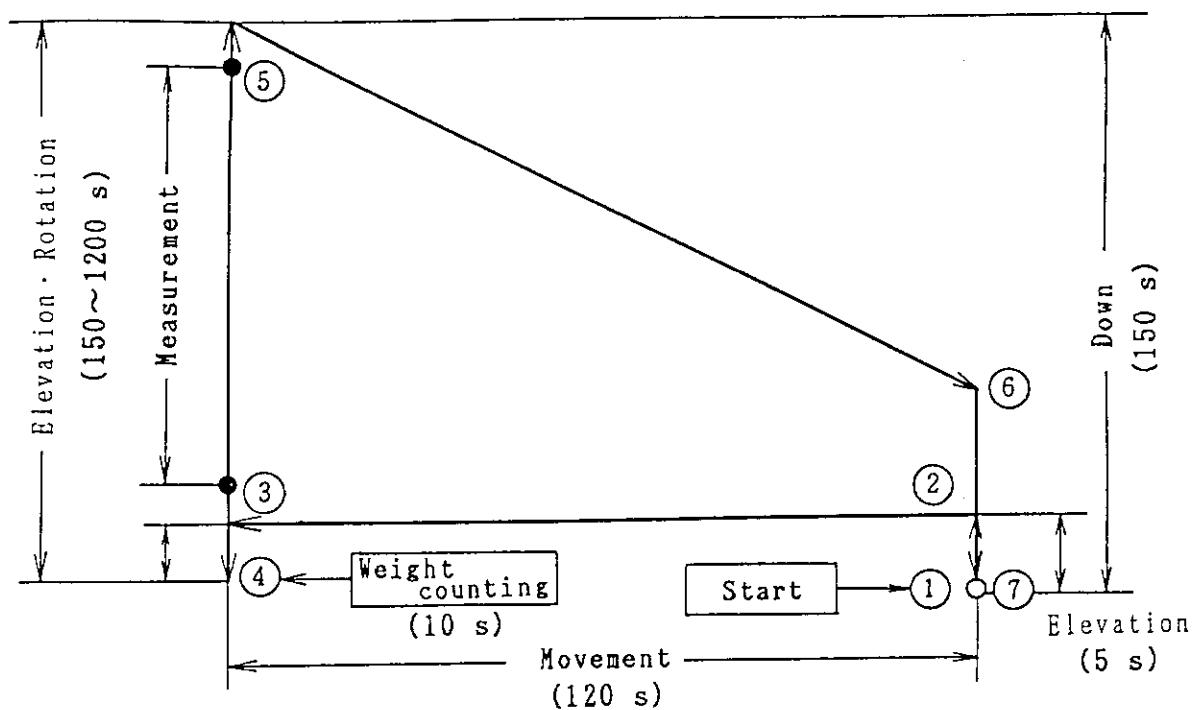


Fig. 3-2 Moving Chart and Required Time of Waste Container by Scanning Mechanism

***** REPORT of DRUM HEIGHT and THICKNESS *****

| ID No. | : | 0710512 | |
|---------------|---------------|-----------------|-------|
| Measured Date | : | 1985-7-10 9:53 | |
| Height (cm) | : | 89.00 | |
| Thickness(cm) | : | 6.51 | |
| <hr/> | | | |
| Height | Thickness(cm) | Count Rate(cps) | Ratio |
| 1 | 2.38 | 10.97 | 1.00 |
| 2 | 14.05 | 1.36 | .12 |
| 3 | 11.97 | 1.97 | .19 |
| 4 | 6.62 | 5.14 | .47 |
| 5 | 3.65 | 8.74 | .80 |
| 6 | 2.78 | 10.21 | .93 |
| 7 | 2.98 | 9.85 | .90 |
| 8 | 3.53 | 8.94 | .81 |
| 9 | 3.52 | 8.95 | .82 |

Fig. 3-3 Print Out of Height and Thickness Counting Data of Waste in Container

***** REPORT of DRUM DISTRIBUTION *****

| ID No. | 0710512 | | | | | | | | |
|---------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Measured Date | 1985-7-10 9:53 | | | | | | | | |
| Angle [deg.] | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 | |
| Height 1 | 28.94 | 23.17 | 24.46 | 40.96 | 70.11 | 84.60 | 64.48 | 35.64 | |
| ch1 | 14.52 | 11.70 | 12.99 | 23.87 | 36.61 | 45.52 | 34.44 | 17.60 | |
| ch2 | 14.32 | 11.47 | 11.47 | 17.09 | 33.50 | 39.08 | 30.04 | 18.04 | |
| 2 | 51.91 | 37.12 | 52.23 | 110.18 | 256.32 | 333.89 | 209.01 | 98.86 | |
| ch1 | 25.38 | 20.48 | 25.74 | 57.20 | 136.06 | 186.92 | 116.97 | 53.78 | |
| ch2 | 26.53 | 16.64 | 26.49 | 52.98 | 120.27 | 146.98 | 92.05 | 45.08 | |
| 3 | 96.67 | 65.34 | 93.41 | 245.12 | 896.15 | 1615.4 | 656.69 | 224.07 | |
| ch1 | 46.71 | 34.45 | 46.42 | 120.18 | 434.10 | 818.94 | 368.15 | 120.49 | |
| ch2 | 49.96 | 30.89 | 46.99 | 124.94 | 462.05 | 796.44 | 288.54 | 103.57 | |
| 4 | 156.96 | 105.28 | 155.82 | 458.26 | 2221.0 | 4468.5 | 1567.9 | 389.27 | |
| ch1 | 77.85 | 53.10 | 77.92 | 229.18 | 1096.7 | 2183.2 | 846.05 | 205.90 | |
| ch2 | 79.01 | 52.18 | 77.89 | 229.08 | 1124.3 | 2285.3 | 721.84 | 182.37 | |
| 5 | 211.62 | 142.79 | 213.62 | 706.03 | 3578.3 | 7649.5 | 2586.9 | 583.39 | |
| ch1 | 107.30 | 70.19 | 105.45 | 355.86 | 1766.8 | 3837.1 | 1371.0 | 306.98 | |
| ch2 | 104.32 | 72.60 | 108.17 | 350.17 | 1811.5 | 3812.4 | 1215.9 | 276.41 | |
| 6 | 250.78 | 167.13 | 245.01 | 839.53 | 4295.5 | 9405.2 | 3222.1 | 680.18 | |
| ch1 | 130.46 | 82.65 | 120.93 | 434.40 | 2117.3 | 4769.1 | 1735.0 | 371.81 | |
| ch2 | 120.32 | 84.48 | 124.08 | 405.13 | 2178.2 | 4636.1 | 1487.0 | 316.37 | |
| 7 | 272.71 | 168.70 | 261.80 | 855.34 | 4495.4 | 9730.8 | 3368.8 | 724.84 | |
| ch1 | 141.95 | 83.79 | 129.63 | 431.12 | 2245.5 | 4932.4 | 1816.3 | 384.01 | |
| ch2 | 130.76 | 84.91 | 132.17 | 424.22 | 2249.9 | 4798.4 | 1552.4 | 340.83 | |
| 8 | 249.66 | 156.96 | 248.57 | 746.42 | 3871.2 | 8657.6 | 3073.0 | 662.65 | |
| ch1 | 132.53 | 76.31 | 121.25 | 383.70 | 1945.9 | 4337.7 | 1655.5 | 356.91 | |
| ch2 | 117.13 | 80.65 | 127.32 | 362.72 | 1925.3 | 4319.9 | 1417.6 | 305.74 | |
| 9 | 201.21 | 132.90 | 196.11 | 540.94 | 2496.7 | 5767.2 | 2072.1 | 481.53 | |
| ch1 | 104.98 | 69.25 | 106.83 | 265.67 | 1286.9 | 2948.3 | 1092.7 | 257.27 | |
| ch2 | 96.23 | 63.65 | 89.28 | 255.26 | 1209.9 | 2818.9 | 979.43 | 224.26 | |

unit : cps

Fig. 3-4 Print Out of Distribution Data of Radioactivity in Waste Container

ID No. : 0710513 DISTRIBUTION OF RADIO ACTIVITIES
Measured Date : 1985-7-10 11:38

JAERI-M 90-069

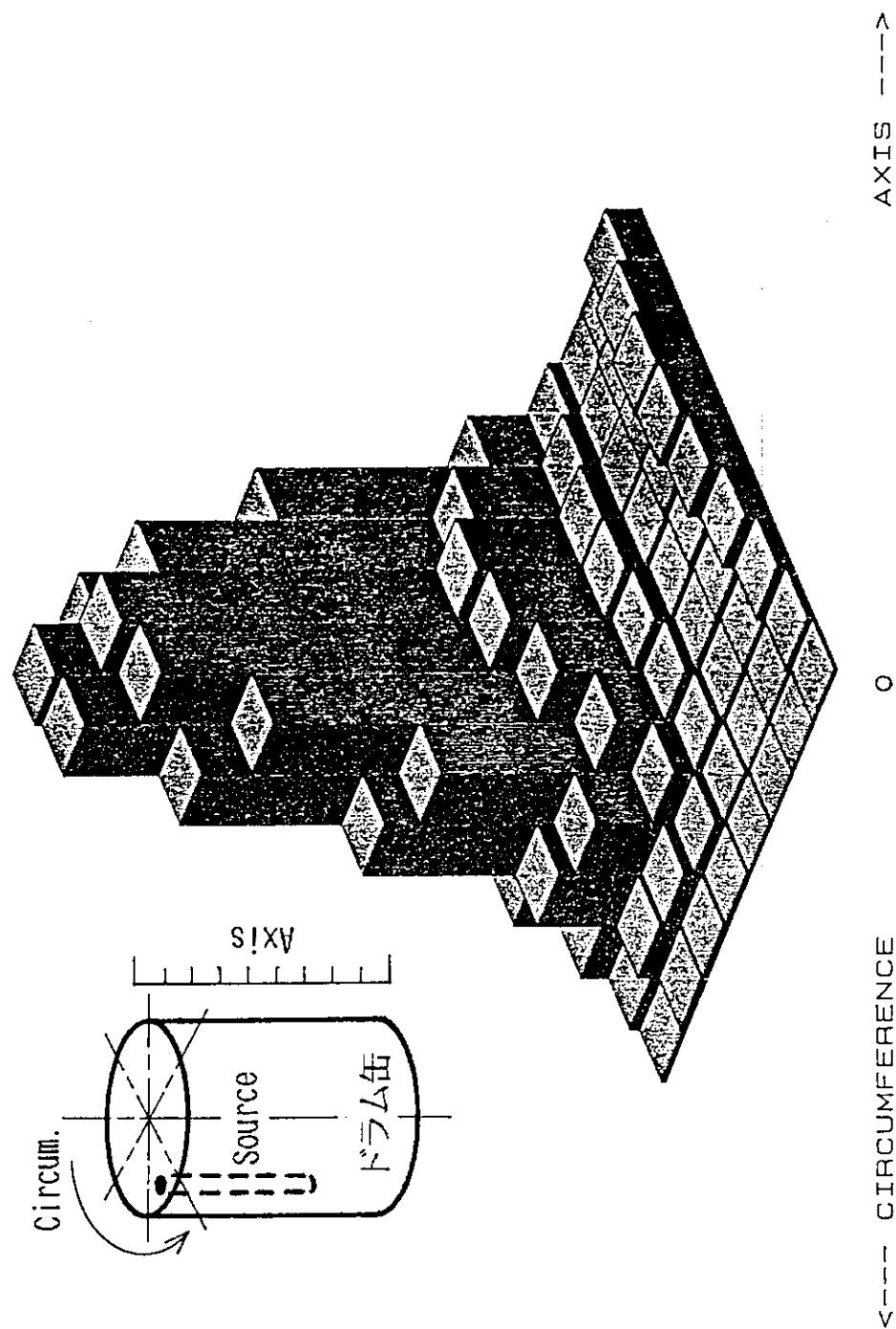


Fig. 3-5 Plot Out of Relative Distribution of Radioactivity in Waste Container

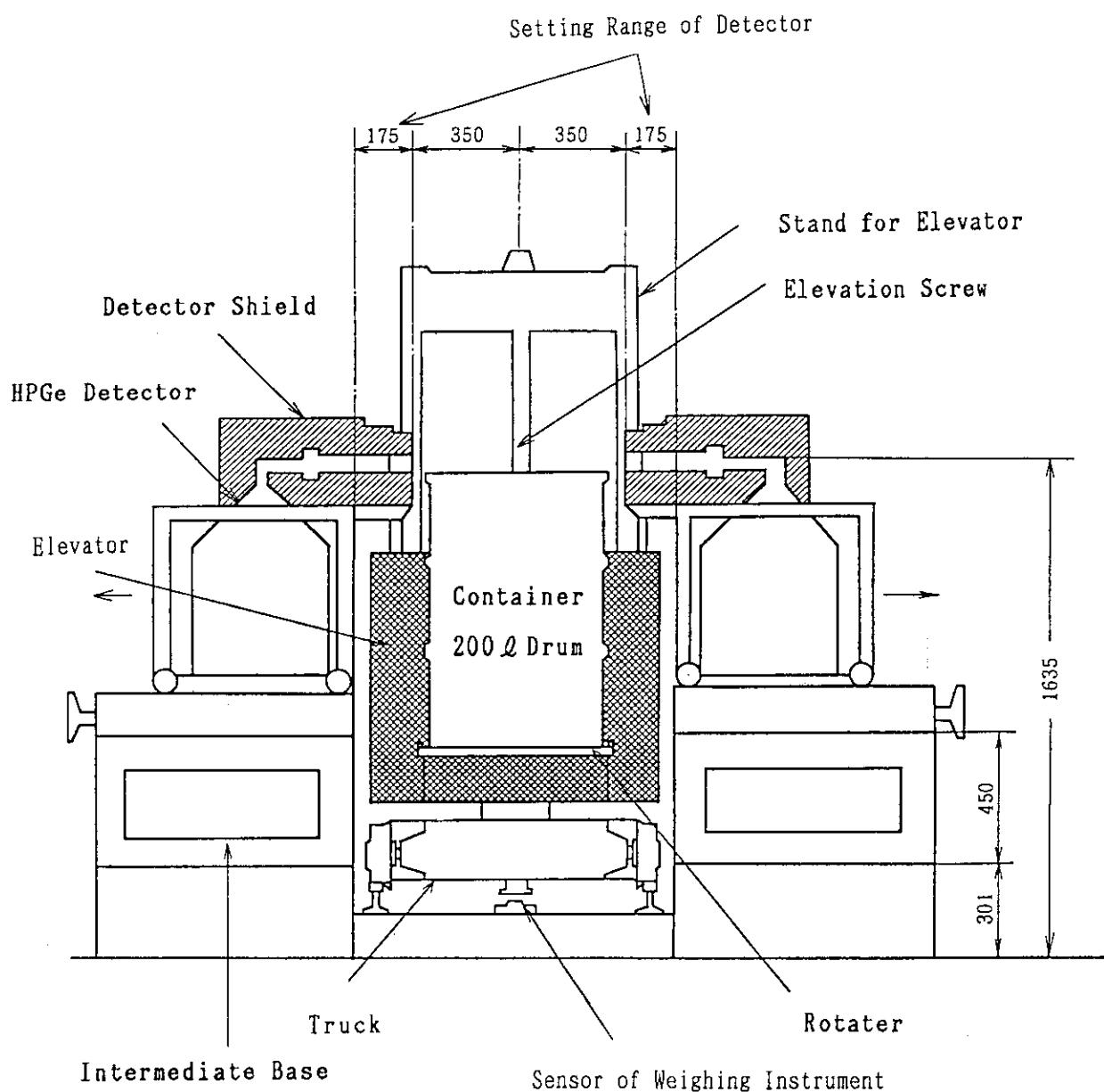


Fig. 3-6 Side View of Detectors and Scanning Mechanism of Extremely Low Level Waste γ -Scanner

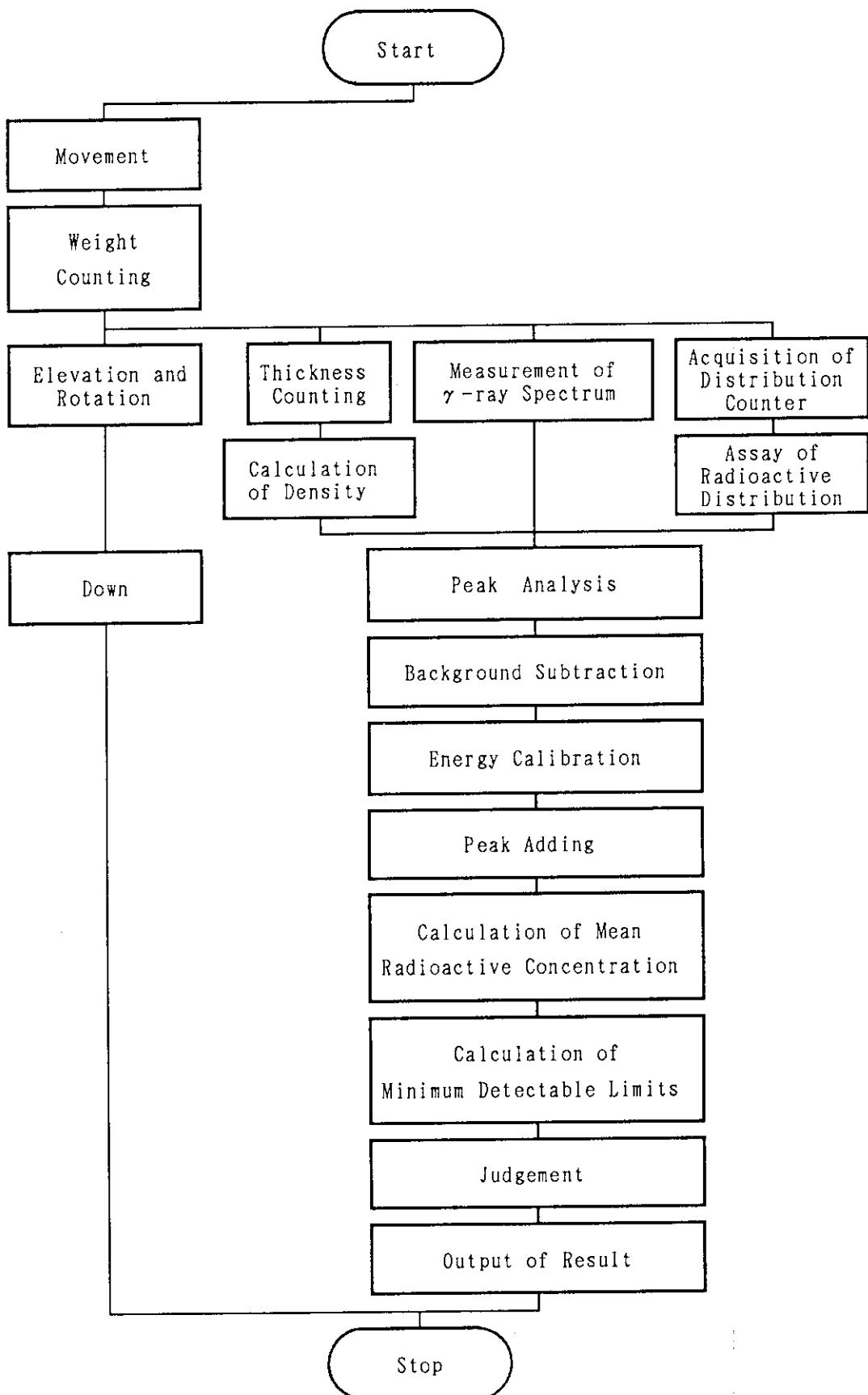


Fig. 3-7 Flow Chart of Radioactivity Measurement of Extremely Low Level Waste γ -Scanner

***** INITIAL CONDITION TABLE *****

| Program No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Date | 1986-1-28 15:43 | 1986-3-13 9:13 | 1986-1-14 15:58 | 1985-6-4 18:14 | 1985-10-2 10:11 |
| Up-Speed(cm/min.) | 5 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| Rotation(rpm) | 10 | 10 | 10 | 1 | 1 |
| Repeat | 3 | 6 | 1 | 1 | 20 |
| Thickness | NO | NO | NO | NO | YES |
| Distribution | NO | YES | NO | YES | YES |
| Collimate(cm) | 8 | 5 | 8 | 4 | 8 |
| Detector Position(cm) | 20 | 10 | 20 | 30 | 20 |
| Drum Type | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Material | CONCRETE | CONCRETE | CONCRETE | CONCRETE | CONCRETE |
| Threshold Level(mCi) | 1000.00 | 1000.00 | 1000.00 | 4.00 | .01 |
| FG Data | FG001 | FG003 | FG001 | FG001 | FG002 |
| Output(LP/PL) | LP | LP | LP | CRT | LP/PL |
| Data File(Disc/FD) | F.Disc | F.Disc | F.Disc | Disc | F.Disc |
| Nuclide Group | | STANDARD | STANDARD | D | EG |
| Comment 1 | HACKGROUND | DISTRIBUTION | RI | | REPEAT |
| Comment 2 | | | | | DRUM, SAND |
| Comment 3 | | | | | FG002 |
| Comment 4 | | | | TEST | |
| Comment 5 | | STANDARD | D | EG | |

Fig. 3-8 Examples of Setting Condition of Automatic Sequential Measurement Programs for Extremely Low Level Waste γ -Scanner

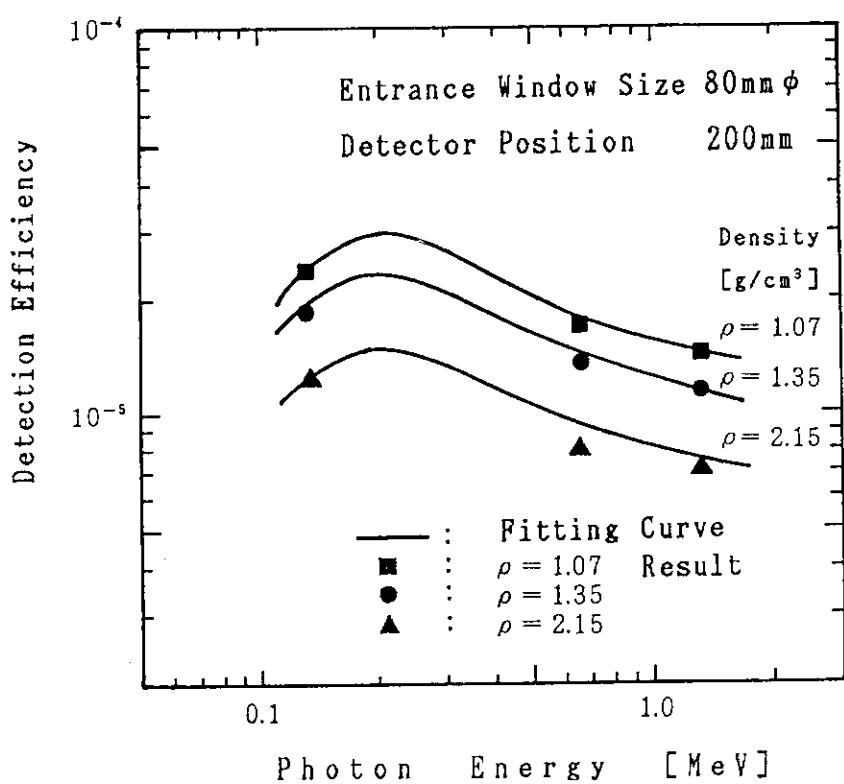


Fig. 3-9 Detection Efficiency Curves A for 200 l Drum Container

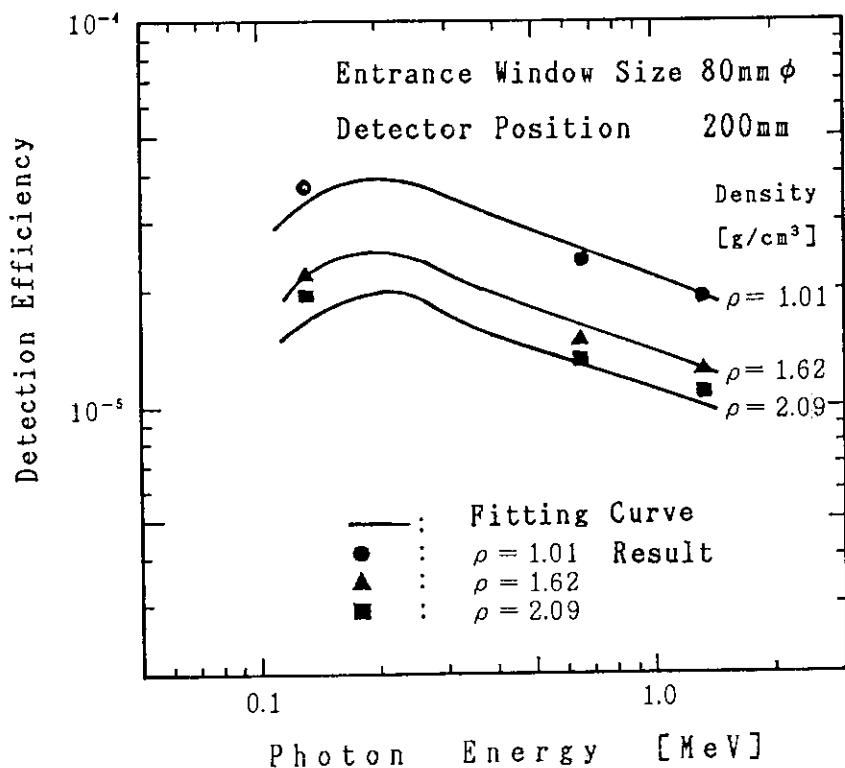


Fig. 3-10 Detection Efficiency Curves B for 100 l Drum Container

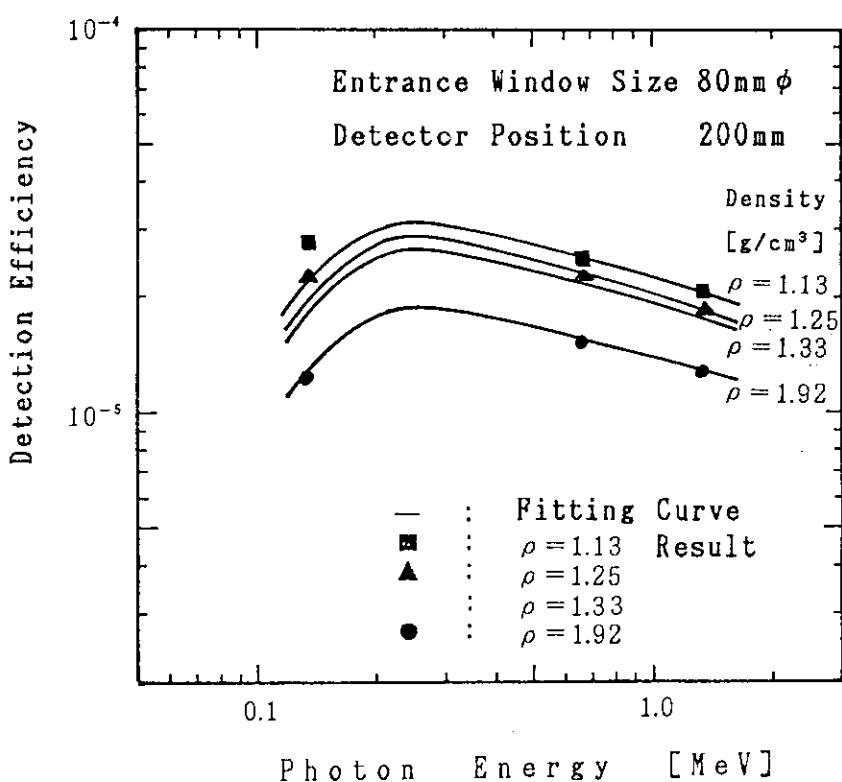


Fig. 3-11 Detection Efficiency Curves C for 50 l Square-Shaped Container

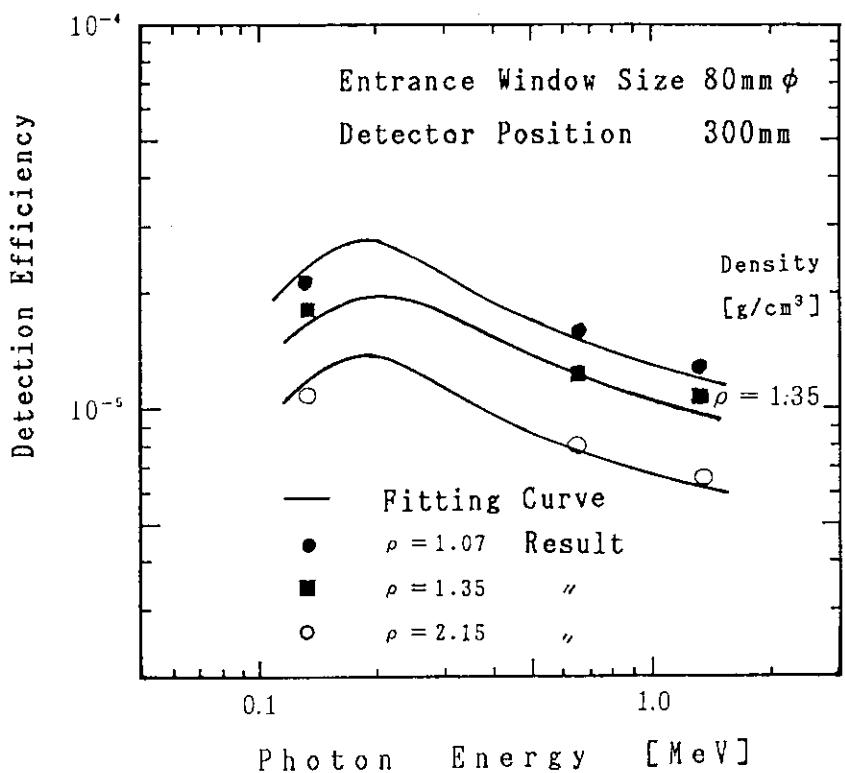


Fig. 3-12 Detection Efficiency Curves D for 200 l Drum Container

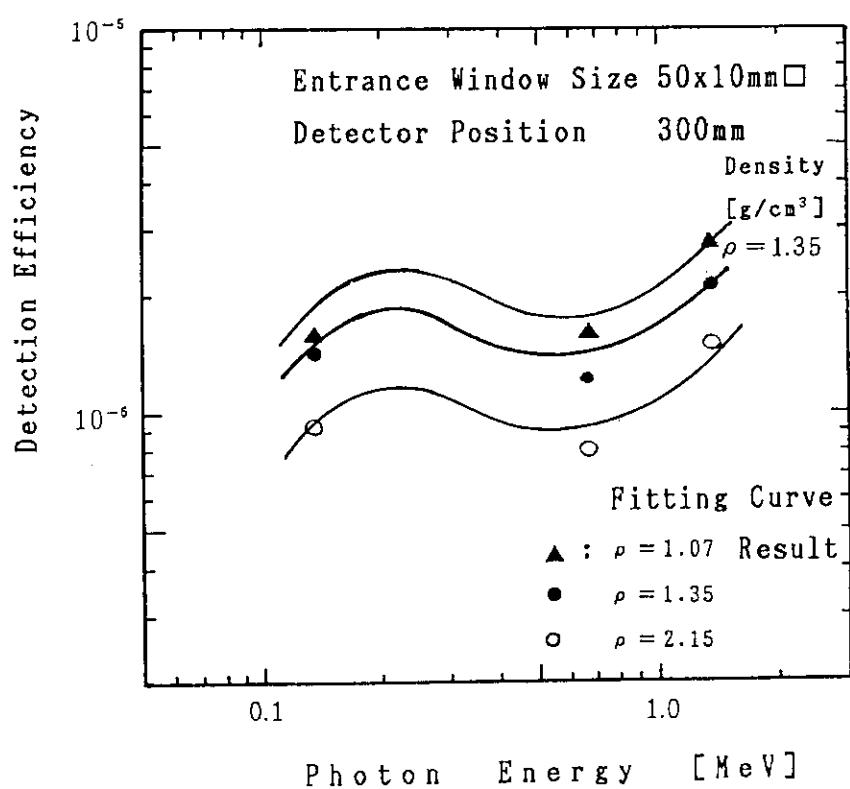


Fig. 3-13 Detection Efficiency Curves E for 200 ℓ Drum Container

** REPORT OF RAD. WASTE ANALYSIS *****

JAERI-M 90-069

| 1. SAMPLING | | | | 2:43 PM FRI., 14 MAR., 1986 | | | |
|-------------|-----------|---------------|-----|-----------------------------|------------|-----------------|-----------|
| ID No. | : 0710512 | Drum Type | : 1 | Material | : CONCRETE | E.Density(kg/l) | : 1.92,47 |
| Weight(kg) | : 274.1 | Density(kg/l) | : 1 | | | | |
| Height(cm) | : 89.0 | Thickness(cm) | : 1 | | | | |

2. MEASURING

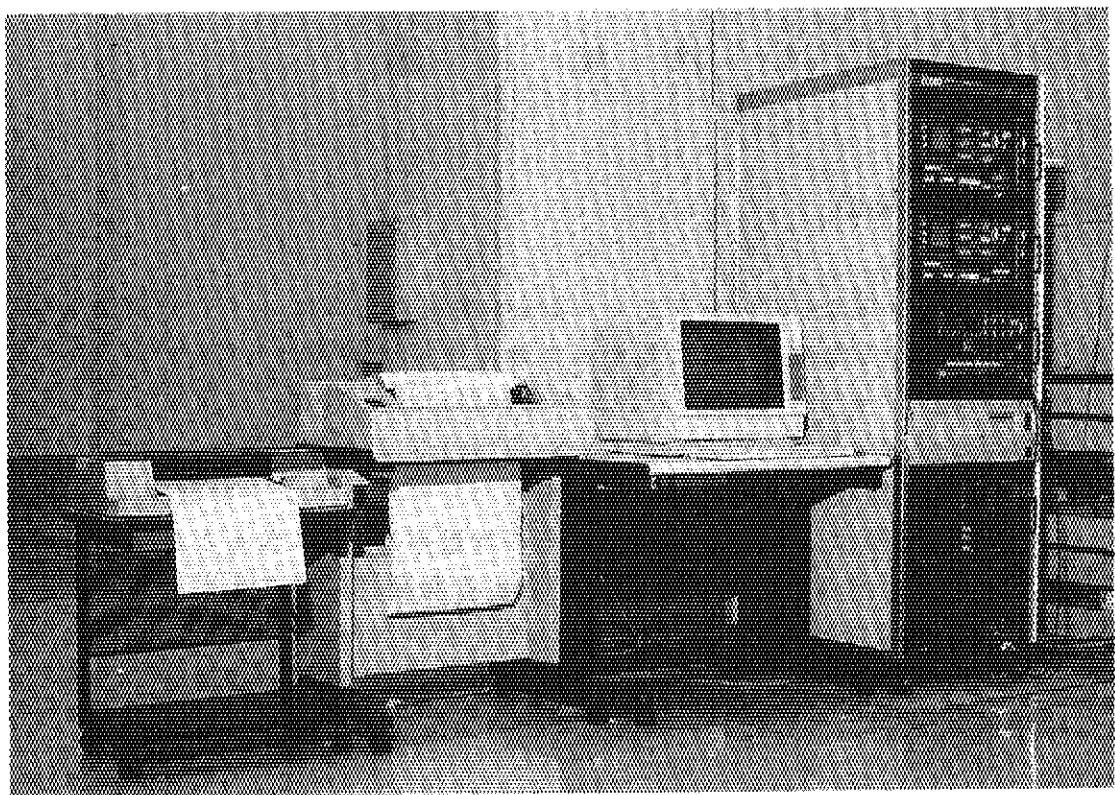
| Measured Date | : 1985- 7-10 | Live Time(sec.) | : 1040. | True Time(sec.) | : 1081. |
|----------------------|--------------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| Up-Speed(cm/min.) | : 5. | Rotation(rpm) | : 5. | Collimator(cm) | : 8. |
| Threshold Level(uCi) | : .05 | | | | |

3. CALIBRATION

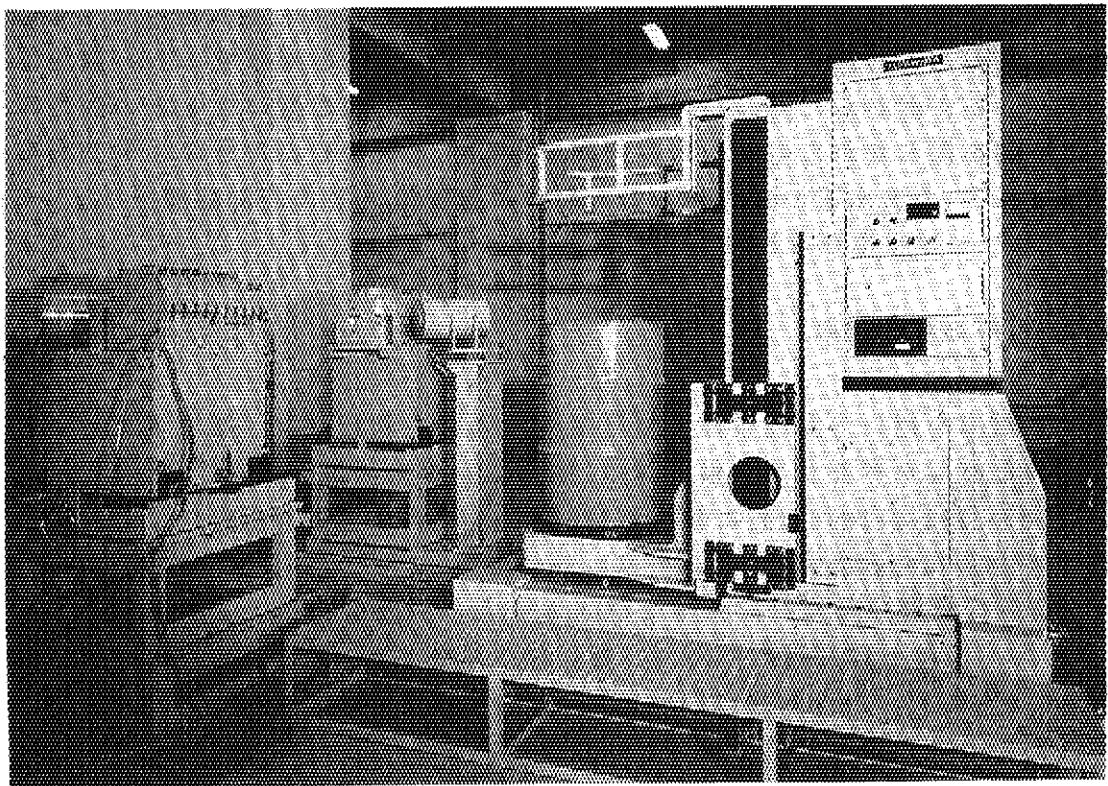
| < Ge Detector No.1 > | | System Performance FWHM=2.32 KeV at 1332KeV | | | | |
|------------------------|--------------|---|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Energy Calibrated Date | : 1985- 6-28 | 13150 | Coefficient 1 | : .49893E+00 | Coefficient 2 | : .35986E-06 |
| < Ge Detector No.2 > | | System Performance FWHM=2.03 KeV at 1332KeV | | | | |
| Energy Calibrated Date | : 1985- 6-28 | 1614 | Coefficient 1 | : .49903E+00 | Coefficient 2 | : .36763E-06 |

| No. | Nuclide | Activity Density | D.L. | Activity | Peak E. | Peak Ch. | Net Peak Area | Eff. |
|-------|---------|--------------------|--------------|---------------------------|---------|----------|---------------|-----------------|
| | | (uCi/kg) | (uCi/kg) | (uCi/Sample) | (keV) | (Ch) | (Counts) | (%) |
| 1 | Cr-51 | .240E-07+-1.13E-06 | .349E-06 | .659E-05+-3.15E-04 | 320.1 | 641.0 | 25.9+- | 123.8 100.00000 |
| 2 | Nn-54 | .643E-00+-9.22E-08 | .200E-07 | .176E-05+-2.53E-05 | 934.0 | 1671.1 | 67.8+- | 97.3 100.00000 |
| 3 | Fe-59 | .115E-07+-8.94E-08 | .274E-07 | .315E-05+-2.45E-05 | 1291.6 | 2583.7 | 52.3+- | 40.7 100.00000 |
| 4 | Co-58 | .265E-07+-9.29E-08 | .279E-07 | .726E-05+-2.55E-05 | 810.8 | 1622.9 | 277.6+- | 97.4 100.00000 |
| 5) | Co-60 | .391E-05+-2.07E-07 | .235E-07 | .107E-02+-5.66E-05 | 1332.5 | 2665.4 | 412.03.0+- | 218.6 100.00000 |
| 6 | Zn-65 | .923E-08+-1.53E-07 | .466E-07 | .253E-05+-4.19E-05 | 1115.5 | 2232.1 | 49.4+- | 81.9 100.00000 |
| 7 | Zr-95 | .266E-08+-1.57E-07 | .479E-07 | .728E-06+-4.31E-05 | 756.8 | 1514.9 | 15.3+- | 90.5 100.00000 |
| 8 | Ag-110m | N.D. | .167E-06 | N.D. | 706.7 | 1414.7 | 0.0+- | 91.2 100.00000 |
| 9 | Sb-124 | N.D. | .104E-07 | N.D. | 1620.9 | 3380.8 | 0.0+- | 15.6 100.00000 |
| 10 | Sb-125 | N.D. | .122E-06 | N.D. | 427.9 | 856.8 | 0.0+- | 128.7 100.00000 |
| 11 | Cs-134 | N.D. | .291E-07 | N.D. | 604.7 | 1210.8 | 0.0+- | 98.4 100.00000 |
| 12) | Cs-137 | .469E-05+-2.67E-07 | .410E-07 | .122E-02+-7.31E-05 | 661.6 | 1324.7 | 42110.0+- | 239.5 100.00000 |
| 13 | Eu-152 | .153E-07+-1.26E-07 | .392E-07 | .412E-05+-3.46E-05 | 1408.0 | 2816.1 | 31.9+- | 26.4 100.00000 |
| 14 | Eu-154 | .166E-08+-1.13E-07 | .351E-07 | .454E-06+-3.10E-05 | 1274.4 | 2549.3 | 6.2+- | 42.3 100.00000 |
| 15 | Ho-166m | .228E-07+-2.18E-07 | .657E-07 | .625E-05+-5.97E-05 | 184.4 | 369.3 | 177.7+- | 169.7 100.00000 |
| Total | | .24E-02 | (uCi/Sample) | less than Threshold Level | | | | |

Fig. 3-14 Radioactivity Analysis Report



(a) Detector Parts and a Scanning Mechanism



(b) Measuring Instruments and a Minicomputer System

Photo. 3-1 The Extremely Low Level Waste γ -Scanner

4. 性能試験

4.1 厚さ計の測定範囲

厚さ計に用いているNaI(Tl)シンチレーション検出器のエネルギー分解能を測定した結果、 ^{137}Cs の662keVの γ 線に対するエネルギー分解能は9.8%であった。シングルチャンネルアライザのウィンドウを662keVの光電ピーク領域に設定した時、測定容器が無いときの ^{137}Cs 線源($3.5 \times 10^6 \text{Bq}$)による計数率は 16.6s^{-1} であった。 ^{137}Cs 線源と測定物が無いときの計数率をバックグラウンド計数率(Nb)とし、 ^{137}Cs の γ 線が廃材等により吸収を受け、その計数率が2Nbになるときの廃材等の厚さを測定限界厚とする。この計数率に相当する廃棄物の厚さを計算により求めた。この結果、普通コンクリート(2.3g/cm^3)では240mm、水(1.0g/cm^3)では530mm、ラワン材(0.5g/cm^3)では1,030mmであった。これ以上の厚さの廃棄物に対しては容器底部からの充填高を測定する。

4.2 Ge半導体検出器の入射角度別感度

3.2.2項に示す入射窓を用いたときのGe半導体検出器の入射角度別の感度を測定した。検出器と入射窓の幾何学的配置は廃材等の測定時と同じである。検出器のエンドキャップ面から1,000mmの軸上に点状の ^{152}Eu 線源を置いたときの計数率を1とし、距離を保ちながら線源を水平方向に軸から偏角させたときの相対計数率を求めた。系統1の検出器の直径80mmの入射窓に対する入射角度別感度をFig. 4-1に示す。系統2の結果も同じ傾向を示した。

4.3 廃材等の検出効率

標準供試体を用いて各種条件における検出効率を測定した。標準供試体は放射能供試体とバックグラウンド供試体の2種類で、標準供試体の容器はJIS-Z-1600M級の200ℓ、JIS-Z-1601 1形に準じた100ℓのオープンドラム缶と50ℓの鋼製直方体容器(内径300Dx300Wx500Hmm 板厚4.5mm)の3種である。容器内の母材はセメントで、密度を調整するために気泡を混入させた。密度は約 1g/cm^3 から 2.1g/cm^3 の範囲で、均一性は±10%以内である。放射能供試体には、 ^{60}Co (1.17MeV、1.33MeV)、 ^{137}Cs (0.662MeV)、 ^{144}Ce (0.134MeV)の3核種が均一に混合されている。使用した放射能供試体とバックグラウンド供試体の一覧をTable 4-1、Table 4-2に示し、各容器の外観をPhoto. 4-1に示す。200ℓドラム缶で密度が 1.35g/cm^3 の放射能供試体の γ 線スペクトル図をFig. 4-2に示す。

4.3.1 入射窓別の検出効率

本測定では、放射能供試体の回転速度を10rpm、上昇速度を5cm/min、放射能供試体の中心軸から検出器窓面までの距離を450mmに設定し、密度が 1.35 g/cm^3 の200ℓドラム缶、密度が 1.6 g/cm^3 の100ℓドラム缶、密度が 1.3 g/cm^3 の50ℓ角型容器の3形状の放射能供試体を用いて、6種の入射窓に対する検出効率を求めた。入射窓は直径が170mm、80mmの円形の2種、横、縦がそれぞれ80mm×50mm、50mm×50mmの角型の2種、80mm×10mm、50×10mmのスリット型の2種を用いた。

検出効率の測定結果をFig. 4-3に示す。検出効率は入射窓の面積が大きいほど高く、供試体の体積が大きい程低くなった。直径が170mmの入射窓を用いた時、200ℓドラム缶供試体に対する 1.33 MeV の検出効率は $1.6 \times 10^{-3}\%$ で、寸法が50mm×10mmのスリット型入射窓では $1.6 \times 10^{-4}\%$ であった。

4.3.2 容器と検出器との距離に対する検出効率

直径80mmの入射窓を用い、放射能供試体の走査条件を4.3.1項と同様にして、Ge半導体検出器の位置を放射能供試体の中心軸に対して直角方向に移動させて検出効率を測定した。200ℓドラム缶の中心から検出器面までの距離を指標にした検出効率の変化をFig. 4-4に示す。この場合の検出効率の変化は25%程度であった。

4.3.3 密度変化に対する検出効率

密度の異なる放射能供試体を用い、各形状毎に検出効率を測定することにより変化の傾向を求めた。計測条件は入射窓を直径80mmとした以外は4.3.1項と同じである。結果をFig. 4-5に示す。密度が 1.0 g/cm^3 から 2.1 g/cm^3 まで変化した場合、検出効率もそれに応じて約1/2に減少した。

4.3.4 検出効率関数の検証

放射能供試体に混入させた3核種のγ線に対する検出効率の測定結果を、密度毎にFig. 3-10からFig. 3-14の図上に記号で示す。実測結果と検出効率関数曲線との差は容器、入射窓、検出器位置の測定条件に対し、γ線エネルギーが 0.5 MeV から 1.5 MeV の範囲では±10%、 0.1 MeV から 1.5 MeV の範囲では±50%内である。

4.3.5 偏在する放射能に対する誤差

本装置の検出効率は放射能が均一に分布するとみなして求めている。不均一に分布する可能性に対処するため、本装置では廃棄物を容器ごと旋回させる方式を採用し、偏在する放射能を見かけ上平均化している。

放射能が偏在する最悪条件は1点に集中する状態である。これを模擬した測定を試みた。200ℓドラム缶に砂を詰め、 ^{60}Co と ^{137}Cs の点状γ線源を高さ方向と半径方向に移動させ、検出効率を測定した。容器の回転速度は5rpm、上昇速度は5cm/minである。結果をFig. 4-6に示す。検出効率が高くなるのはγ線源が容器の外周

部分にある時で、逆に低くなるのは γ 線源が検出器から最も遠くなる、容器の中心下部または上部にある時である。本測定と同じ容器内密度の均一分布に対する検出効率との差は1.3MeVでは±50%、0.66MeVでは+50%から-75%である。

4.3.6 バックグラウンドスペクトル

バックグラウンド供試体の全数についてセメントに含まれている自然放射能の測定を実施した。この測定は、供試体の回転速度を10rpm、上昇速度を5cm/minとし、供試体の中心軸から検出器窓面までの距離は450mmと550mmの2点、入射窓は、円形80mm、および角型50mmx50mm、50mmx10mmの3種について行った。この結果、供試体の密度及び供試体と検出器までの距離が変化しても、バックグラウンド計数率はほぼ一定であった。観測された光電ピークは自然放射能であるウラン系列、トリウム系列、 ^{40}K からの γ 線によるものであった。測定した γ 線スペクトル図をFig. 4-7に、エネルギー別と主なピーク部の計数率をTable 4-3に示す。

バックグラウンド計数率より求めた検出下限計数率は、入射窓を直径80mmの円形のものから角型50mmx10mmのものに変えたとき、300KeV付近で約1/2になり、高エネルギーになるに従って変化は小さく、1.3MeV付近以上では変わらなかった。

4.3.7 検出下限放射能濃度

上記の検出効率とバックグラウンドの試験結果をもとに、主な測定対象である ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu の4核種に対する検出下限放射能濃度を、3種の容器について求めた。廃棄物の測定時間が600秒の時、200lのドラム缶に対する検出下限放射能濃度は密度にあまり依存することなく、 ^{60}Co に対し、 $7.5 \times 10^{-3} \text{Bq/g}$ ($2.0 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/g}$) であり、100lのドラム缶では、密度が 1.6g/cm^3 の時、 ^{60}Co に対し、 $1.1 \times 10^{-2} \text{Bq/g}$ ($3.0 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/g}$) であった。また、50lの直方体容器では同じく、 $1.9 \times 10^{-2} \text{Bq/g}$ ($5.1 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/g}$) であった。3種類の容器に対する密度と測定時間別の検出下限放射能濃度をTable 4-4に示す。

Table 4-1 Specifications of Radioactive Standard Containers Made of
Cement for Detection Efficiency Calibration

| No. | Container | Capacity (ℓ) | Density (g/cm³) | Net Weight (kg) | Net Volume (ℓ) | Total Activity (MBq) | | |
|-----|-----------|-----------------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| | | | | | | ¹⁴⁴ Ce | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co |
| A01 | Drum | 200 | 2.15 | 429 | 199 | 20.4 | 45.4 | 12.5 |
| A02 | " | 100 | 2.09 | 206 | 98.6 | 18.5 | 13.8 | 12.5 |
| A03 | Square | 50 | 1.92 | 98.4 | 51.2 | 7.81 | 5.37 | 4.40 |
| A04 | " | 50 | 1.89 | 97.0 | " | 7.73 | 5.29 | 4.37 |
| A05 | " | 50 | 1.80 | 92.0 | " | 7.33 | 5.00 | 4.14 |
| A06 | " | 50 | 1.78 | 25.5 | 14.3 | 2.04 | 1.37 | 1.11 |
| A07 | Drum | 200 | 1.35 | 279 | 207 | 26.2 | 15.0 | 12.4 |
| A08 | " | 100 | 1.62 | 147 | 90.7 | 24.0 | 16.2 | 11.4 |
| A09 | Square | 50 | 1.26 | 64.6 | 51.2 | 5.81 | 3.52 | 3.55 |
| A10 | " | 50 | 1.24 | 63.7 | " | 5.74 | 3.48 | 3.50 |
| A11 | " | 50 | 1.25 | 63.8 | " | 5.74 | 3.48 | 3.50 |
| A12 | " | 50 | 1.33 | 38.3 | 28.7 | 3.44 | 2.07 | 2.09 |
| A13 | Drum | 200 | 1.07 | 195 | 182 | 25.5 | 15.1 | 10.0 |
| A14 | " | 100 | 1.01 | 91.7 | 90.7 | 30.1 | 11.3 | 9.03 |
| A15 | Square | 50 | 1.13 | 46.4 | 46.1 | 6.11 | 4.66 | 4.07 |
| A16 | " | 50 | 0.957 | 49.0 | 51.2 | 6.44 | 4.92 | 4.33 |
| A17 | " | 50 | 0.942 | 43.4 | 41.0 | 5.70 | 4.40 | 3.81 |

* Activity reference day on Feb. 2, 1986

Table 4-2 Specifications of Non-Radioactive Standard Containers
for Background Measurement

| No. | Container | Nominal Capacity (l) | Density (g/cm³) | Net Weight (kg) | Net Volume (l) |
|-----|-----------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| B01 | Drum | 200 | 2.09 | 432.3 | 207. |
| B02 | " | 100 | 2.05 | 210.7 | 103. |
| B03 | Square | 50 | 2.02 | 103.5 | 51.2 |
| B04 | " | 50 | 2.02 | 103.4 | 51.2 |
| B06 | Drum | 200 | 1.37 | 283.7 | 207. |
| B07 | " | 100 | 1.29 | 132.7 | 103. |
| B08 | Square | 50 | 1.29 | 65.8 | 51.2 |
| B09 | " | 50 | 1.28 | 65.4 | 51.2 |
| B11 | Drum | 200 | 1.01 | 194. | 192. |
| B12 | " | 100 | 0.976 | 94.7 | 97.0 |
| B13 | Square | 50 | 0.975 | 49.9 | 51.2 |
| B14 | " | 50 | 0.984 | 50.4 | 51.2 |

Table 4-3 Count Rates of γ -Ray Spectrum Obtained using
Non-Radioactive Standard Container of 200 ℓ Drum

| Energy Region (keV~keV) | Channel 1 Count rate (s ⁻¹ /keV) | Channel 2 Count rate (s ⁻¹ /keV) | Peak Energy (keV) | Channel 1 Count rate (s ⁻¹) | Channel 2 Count rate (s ⁻¹) |
|----------------------------|---|---|----------------------|---|---|
| 50~99 | 2.87×10^{-2} | 2.37×10^{-2} | 238.6 | 2.79×10^{-2} | 2.25×10^{-2} |
| 100~149 | 2.80×10^{-2} | 2.22×10^{-2} | 295.2 | 2.08×10^{-2} | 1.99×10^{-2} |
| 150~199 | 2.22×10^{-2} | 1.78×10^{-2} | 351.9 | 3.89×10^{-2} | 3.01×10^{-2} |
| 200~249 | 1.92×10^{-2} | 1.34×10^{-2} | 583.2 | 1.60×10^{-2} | 1.57×10^{-2} |
| 250~299 | 1.11×10^{-2} | 9.26×10^{-3} | 609.3 | 3.85×10^{-2} | 3.44×10^{-2} |
| 300~349 | 7.20×10^{-3} | 6.75×10^{-3} | 911.2 | 1.18×10^{-2} | 1.07×10^{-2} |
| 350~399 | 5.80×10^{-3} | 5.58×10^{-3} | 968.9 | 7.27×10^{-3} | 6.28×10^{-3} |
| 400~449 | 4.07×10^{-3} | 4.04×10^{-3} | 1120.4 | 1.10×10^{-2} | 1.11×10^{-2} |
| 450~499 | 3.36×10^{-3} | 3.25×10^{-3} | 1460.7 | 3.95×10^{-2} | 3.08×10^{-2} |
| 500~599 | 2.96×10^{-3} | 2.90×10^{-3} | 1764.0 | 9.31×10^{-3} | 8.35×10^{-3} |
| 600~699 | 2.32×10^{-3} | 2.19×10^{-3} | | | |
| 700~799 | 1.63×10^{-3} | 1.54×10^{-3} | | | |
| 800~899 | 1.32×10^{-3} | 1.30×10^{-3} | | | |
| 900~999 | 1.31×10^{-3} | 1.23×10^{-3} | | | |
| 1000~1099 | 9.19×10^{-4} | 8.67×10^{-4} | | | |
| 1100~1199 | 1.01×10^{-3} | 9.39×10^{-4} | | | |
| 1200~1299 | 8.20×10^{-4} | 7.50×10^{-4} | | | |
| 1300~1399 | 5.22×10^{-4} | 5.46×10^{-4} | | | |
| 1400~1499 | 8.02×10^{-4} | 7.17×10^{-4} | | | |
| 1500~1599 | 3.76×10^{-4} | 3.68×10^{-4} | | | |
| 1600~1699 | 2.53×10^{-4} | 2.61×10^{-4} | | | |
| 1700~1799 | 3.44×10^{-4} | 2.91×10^{-4} | | | |
| 1800~1899 | 1.92×10^{-4} | 1.83×10^{-4} | | | |
| 1900~2000 | 1.63×10^{-4} | 1.67×10^{-4} | | | |

Program No : 1, Counting time : 21,636 s

Table 4-4 Minimum Detectable Limits of Radioactivity Concentration
for Extremely Low Level Waste γ -Scanner

| Container | Nominal Density (g/cm ³) | Nuclides | γ -ray Energy (MeV) | Minimum Detectable Limits (Bq/g) | | |
|----------------|---|-------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | | t=100s | t=300s | t=600s |
| Drum 200 l | 2.1 | ⁶⁰ Co | 1.332 | 2. ₂ $\times 10^{-2}$ | 1. ₃ $\times 10^{-2}$ | 7. ₅ $\times 10^{-3}$ |
| | | ¹³⁴ Cs | 0.604 | 2. ₂ $\times 10^{-2}$ | 1. ₃ $\times 10^{-2}$ | 8. ₂ $\times 10^{-3}$ |
| | | ¹⁵² Eu | 0.344 | 7. ₄ $\times 10^{-2}$ | 4. ₇ $\times 10^{-2}$ | 3. ₈ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹⁵⁴ Eu | 1.274 | 6. ₃ $\times 10^{-2}$ | 3. ₆ $\times 10^{-2}$ | 2. ₁ $\times 10^{-2}$ |
| | 1.3 | ⁶⁰ Co | 1.332 | 2. ₃ $\times 10^{-2}$ | 1. ₃ $\times 10^{-2}$ | 7. ₆ $\times 10^{-3}$ |
| | | ¹³⁴ Cs | 0.604 | 2. ₃ $\times 10^{-2}$ | 1. ₄ $\times 10^{-2}$ | 8. ₇ $\times 10^{-3}$ |
| | | ¹⁵² Eu | 0.344 | 8. ₆ $\times 10^{-2}$ | 5. ₅ $\times 10^{-2}$ | 3. ₆ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹⁵⁴ Eu | 1.274 | 6. ₆ $\times 10^{-2}$ | 3. ₇ $\times 10^{-2}$ | 2. ₂ $\times 10^{-2}$ |
| | 1.0 | ⁶⁰ Co | 1.332 | 2. ₄ $\times 10^{-2}$ | 1. ₃ $\times 10^{-2}$ | 7. ₉ $\times 10^{-3}$ |
| | | ¹³⁴ Cs | 0.604 | 2. ₅ $\times 10^{-2}$ | 1. ₅ $\times 10^{-2}$ | 9. ₅ $\times 10^{-3}$ |
| | | ¹⁵² Eu | 0.344 | 8. ₄ $\times 10^{-2}$ | 5. ₃ $\times 10^{-2}$ | 3. ₅ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹⁵⁴ Eu | 1.274 | 6. ₈ $\times 10^{-2}$ | 3. ₉ $\times 10^{-2}$ | 2. ₃ $\times 10^{-2}$ |
| Drum 100 l | 1.6 | ⁶⁰ Co | 1.332 | 3. ₄ $\times 10^{-2}$ | 1. ₉ $\times 10^{-2}$ | 1. ₁ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹³⁴ Cs | 0.604 | 3. ₄ $\times 10^{-2}$ | 2. ₈ $\times 10^{-2}$ | 1. ₃ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹⁵² Eu | 0.344 | 1. ₂ $\times 10^{-1}$ | 7. ₅ $\times 10^{-2}$ | 4. ₉ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹⁵⁴ Eu | 1.274 | 9. ₃ $\times 10^{-2}$ | 5. ₁ $\times 10^{-2}$ | 2. ₉ $\times 10^{-2}$ |
| | 1.3 | ⁶⁰ Co | 1.332 | 5. ₉ $\times 10^{-2}$ | 3. ₂ $\times 10^{-2}$ | 1. ₉ $\times 10^{-2}$ |
| Square 50 l | 1.3 | ¹³⁴ Cs | 0.604 | 6. ₀ $\times 10^{-2}$ | 3. ₇ $\times 10^{-2}$ | 2. ₃ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹⁵² Eu | 0.344 | 2. ₃ $\times 10^{-1}$ | 1. ₄ $\times 10^{-1}$ | 9. ₂ $\times 10^{-2}$ |
| | | ¹⁵⁴ Eu | 1.274 | 1. ₂ $\times 10^{-1}$ | 6. ₉ $\times 10^{-2}$ | 4. ₃ $\times 10^{-2}$ |

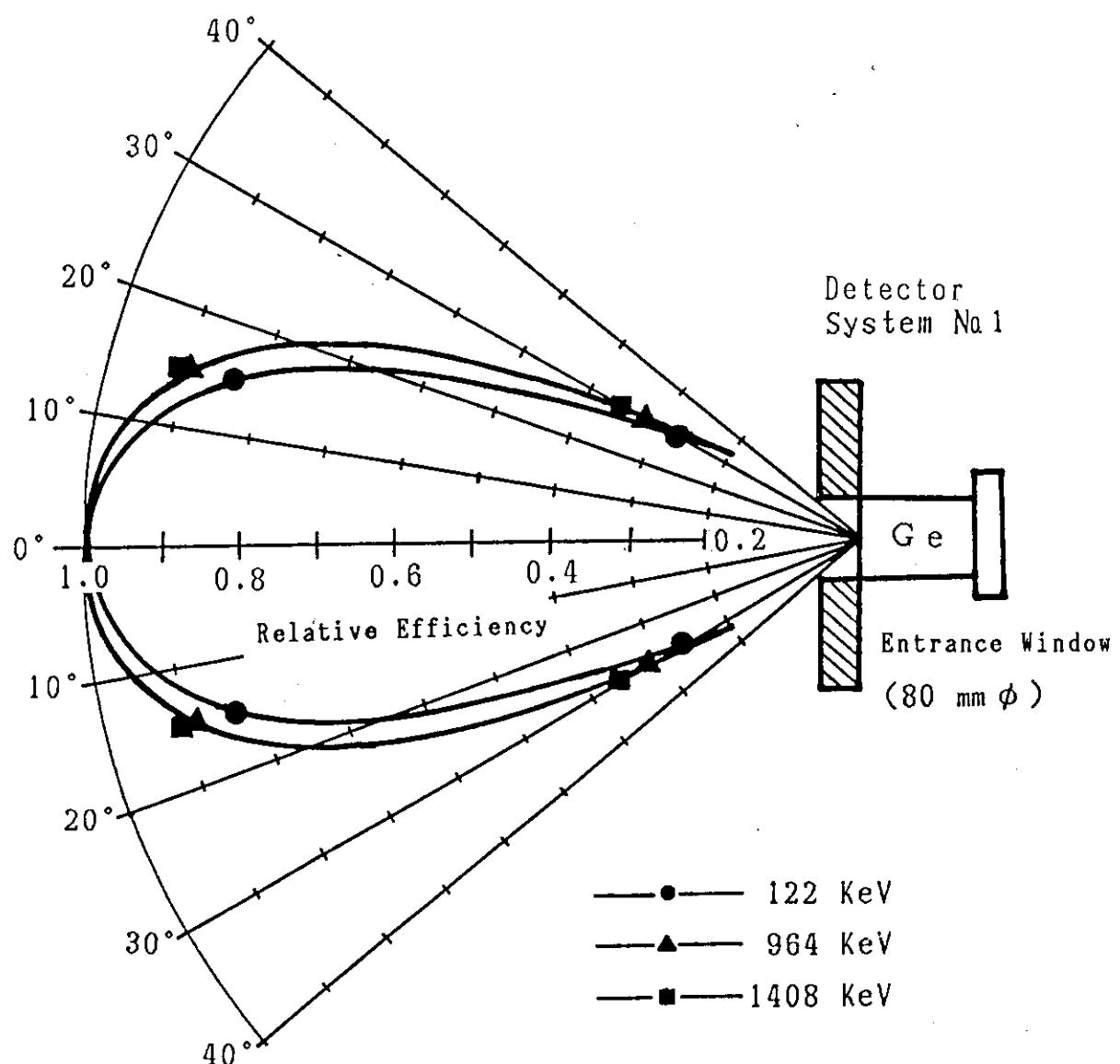


Fig. 4-1 Directional Sensitivity of High Purity Ge Detector

GAMMA RAYS SPECTRA

SAMPLE NAME : Standard
 SAMPLING POINT : *****
 SAMPLED DATE : 1986- 2-18
 LIVE TIME (sec) : 1000 放射能標準供試体 (200 μ , 密度 1.35 g/cm³) №1系統

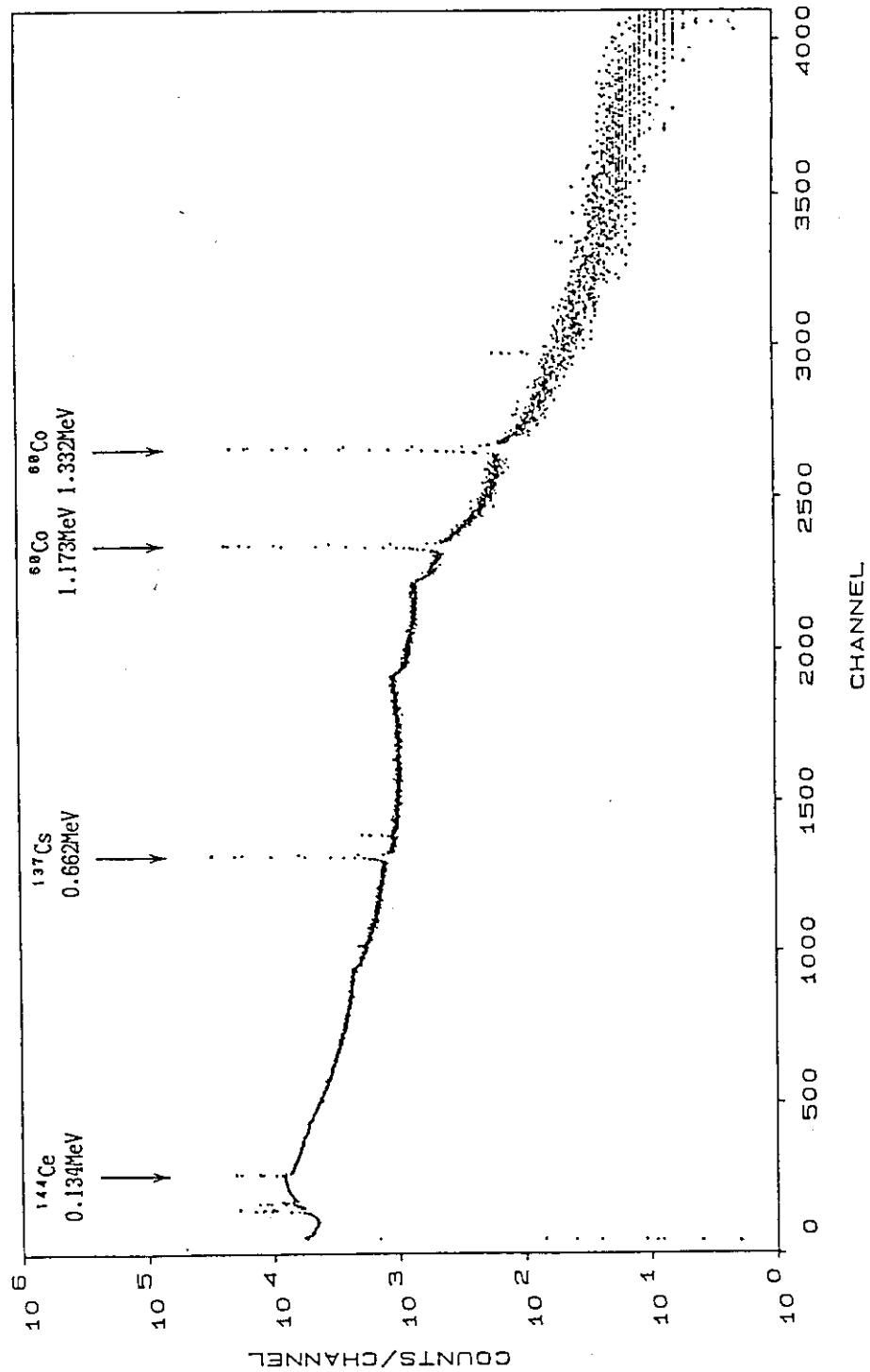


Fig. 4-2 γ -Ray Spectrum Obtained using Radioactive Standard Container of 200 μ Drum

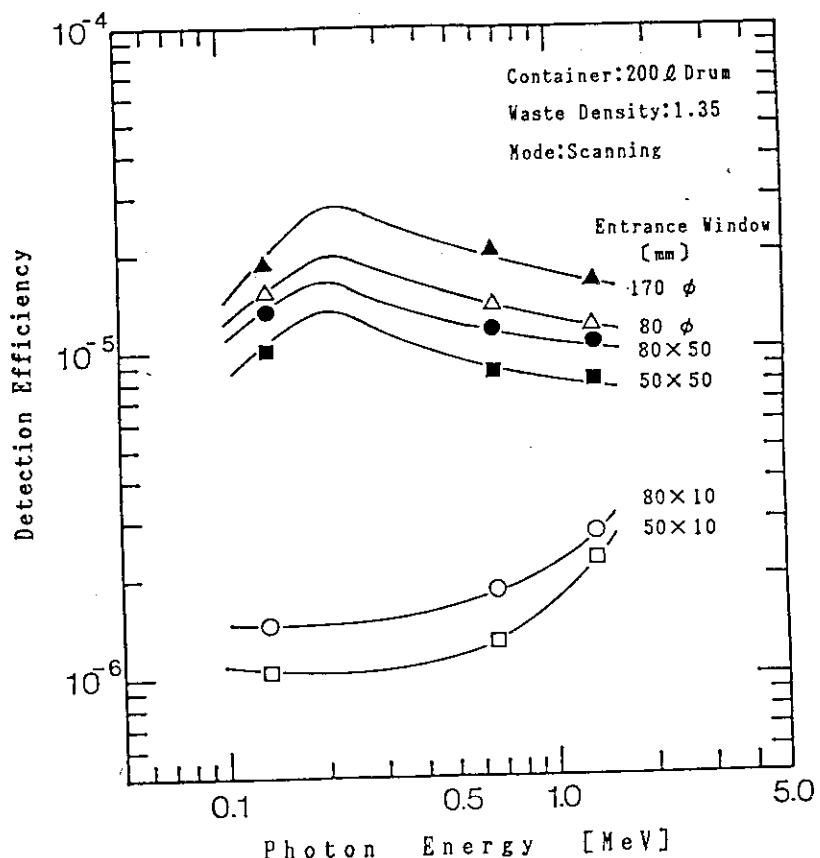


Fig. 4-3 Detection Efficiencies for Various Entrance Windows

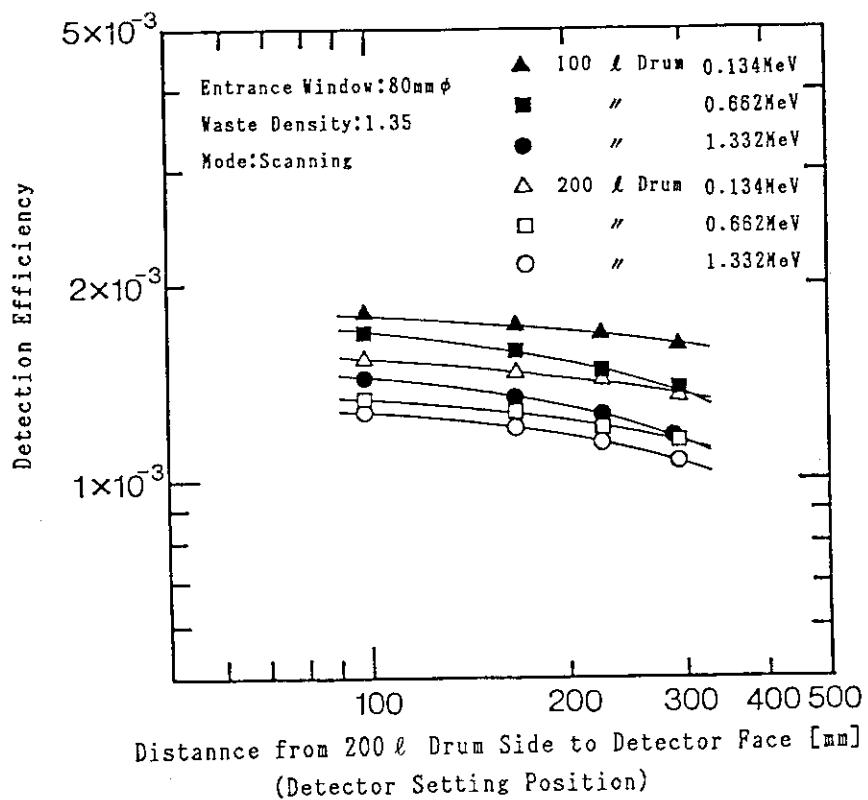


Fig. 4-4 Relationships between Detection Efficiency and Distance between Center of Container to Detector

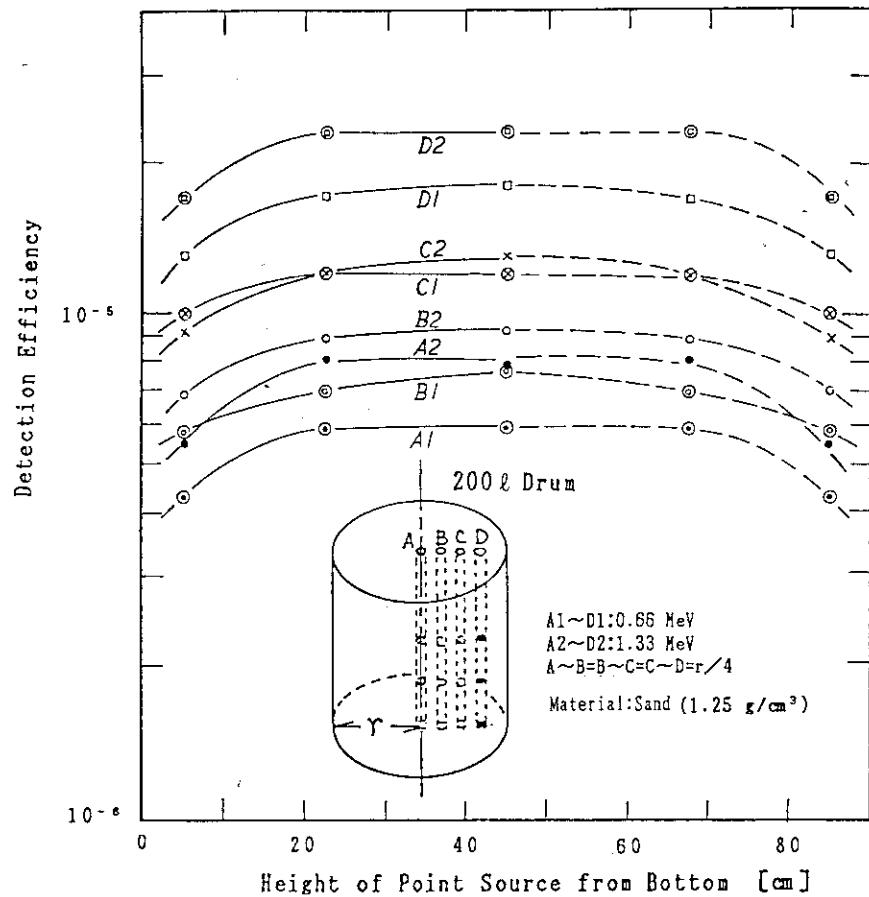


Fig. 4-5 Relationships between Detection Efficiency and Variation of Effective Density of Solid Waste in Container

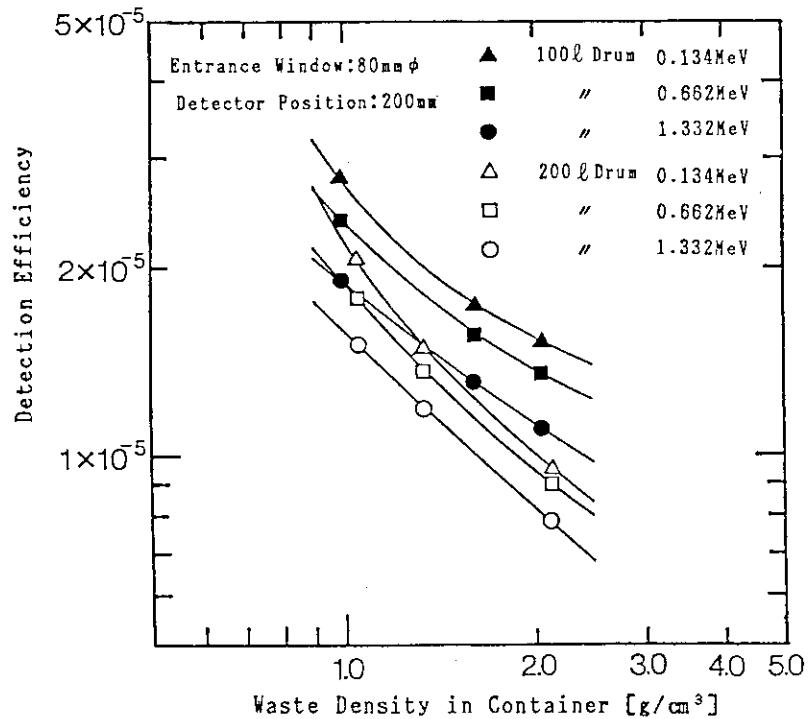


Fig. 4-6 Relationships between Detection Efficiency and Position of Point Source in 200 l Drum Container

GAMMA RAYS SPECTRA

SAMPLE NAME : Background
 SAMPLING POINT : *****
 SAMPLED DATE : 1985-10-2
 LIVE TIME (sec) : 21678

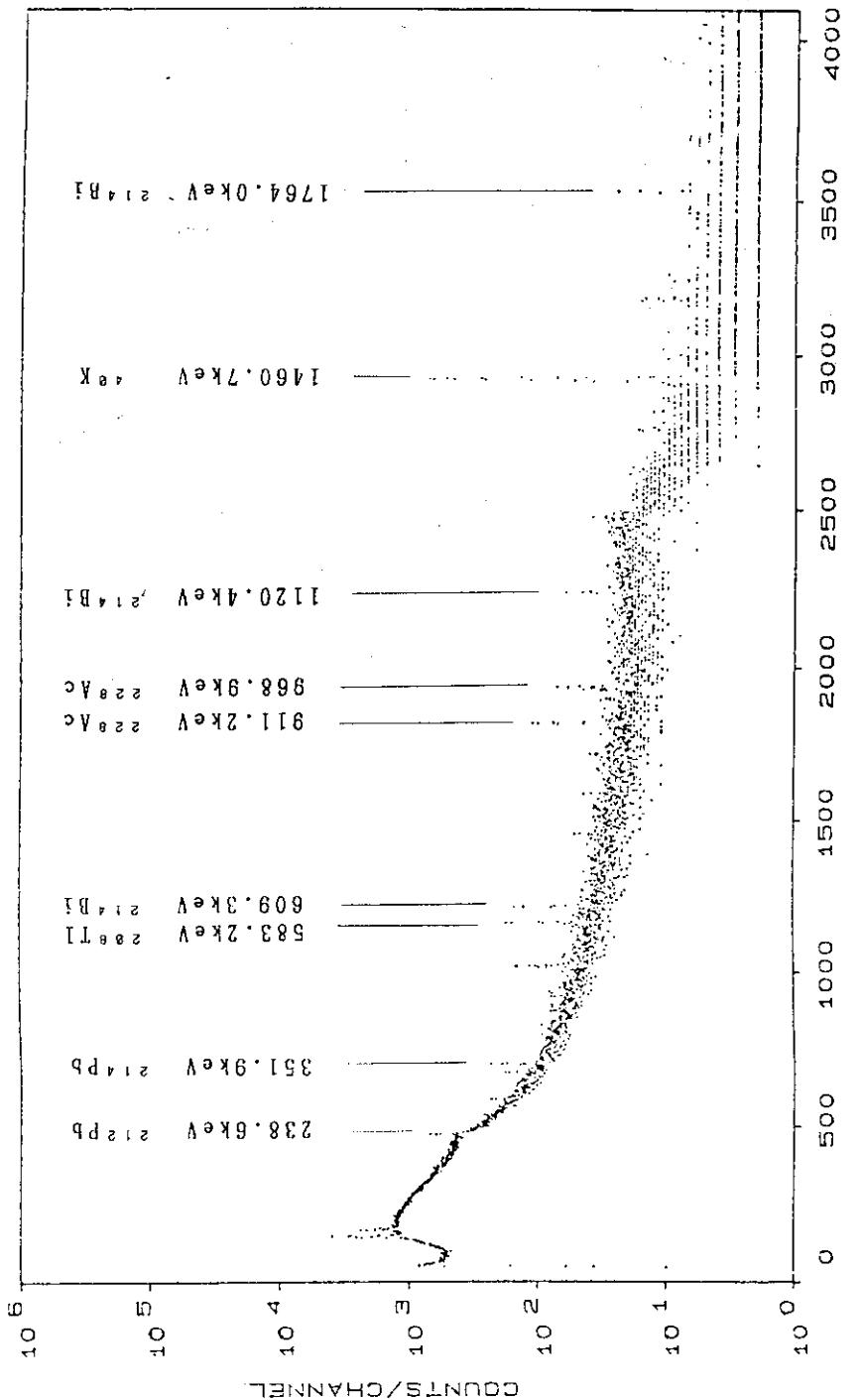


Fig. 4-7 Background Spectrum Obtained using Non-Radioactive Standard Container of 200 l Drum

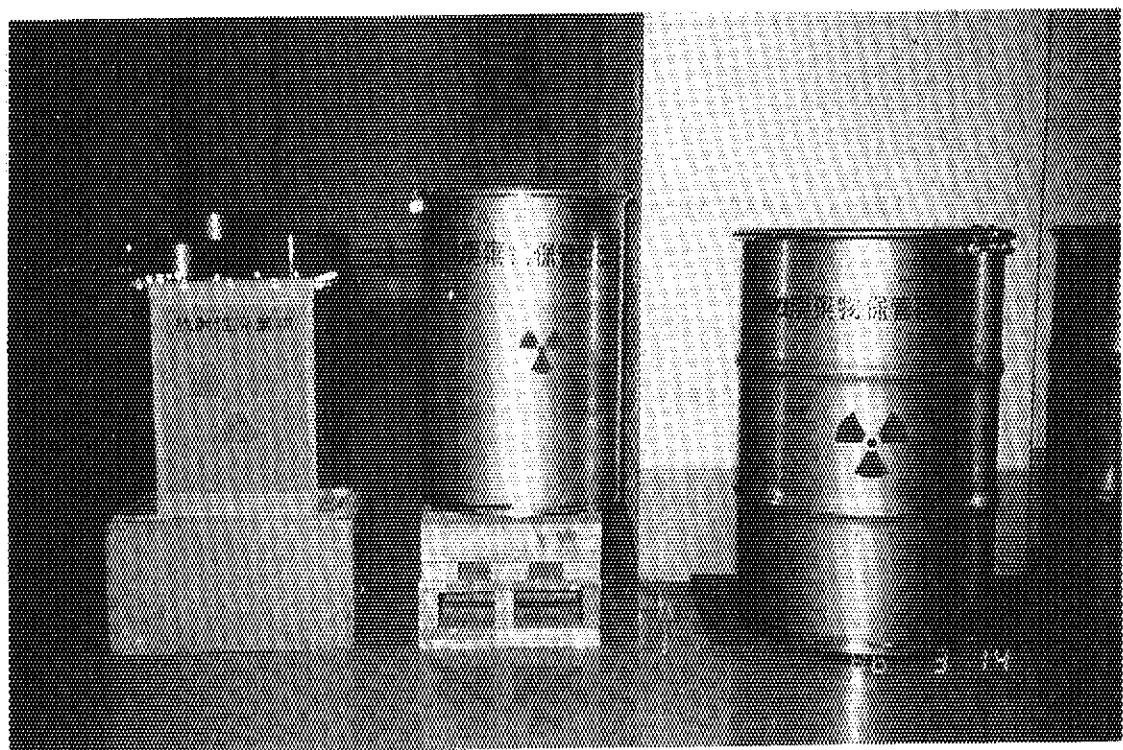


Photo. 4-1 Radioactive Standard Containers for Detection Efficiency
Calibration

5. 結 論

原子炉の解体撤去に伴って大量に発生する極低レベル廃棄物の放射能を、 γ 線スペクトル分析法により測定し、区分境界値に基く廃棄物の区分確認を能率的に行う装置を開発した。

本装置には検出器にエネルギー分解能が優れた高純度Ge半導体検出器を、機構制御と γ 線スペクトル解析等のデータ処理に小型電子計算機を採用したことにより、廃棄物の核種別管理と自動測定が容易に可能である。

種類や形状が定めにくい廃材等を簡便且つ一定の測定精度で測定するために、第一に100ℓ、200ℓドラム缶と、50ℓ角型の3容器を標準と定めた。次に、 γ 線検出効率は、軽元素の質量吸収係数が物質により大きく変わらないことから、容器内の廃材等の見かけ密度を測定し、これを関数として決定する方式をとった。いくつかの測定条件下の γ 線検出効率値は予備実験による計算結果、およびセメントを母材とし、密度が異なる3容器の放射能標準供試体による検証結果とほぼ一致した。放射能測定精度は廃材等の密度と放射能が容器中に均一分布する時、0.5MeVから1.5MeVの γ 線エネルギー領域に対し、±10%以内で、0.1MeVから1.5MeVでは±50%である。測定対象となるエネルギー範囲の質量吸収係数が、セメントと大きく変わらない木材、プラスチック、ビニール類、布、紙、土砂等の廃材への適用が十分可能である。

放射性物質が遍在する場合でも、測定容器を旋回させ、平均化していることにより最大75%内の誤差で評価でき、遍在する部位を三次元図により知ることが出来る。

原子炉解体廃棄物で主となるコンクリート廃材等に含まれる放射性物質は ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu などが主に予想され、0.6MeVから1.4MeVの γ 線エネルギーが測定対象となる。性能試験の結果、これらの核種に対する検出下限放射能濃度は、200ℓドラム缶を使用し、600秒測定の時、 $7.5 \times 10^{-3} \text{Bq/g}$ から $3.6 \times 10^{-2} \text{Bq/g}$ であることがわかった。さらに、本装置では同一容器同一核種に対する検出下限放射能濃度はその収容密度に依存しなかった。

本装置の処理能力は、200ℓドラム缶を使用し、区分レベルを $3 \times 10^{-2} \text{Bq/g}$ と仮定した場合、1時間当たりドラム缶にして4本、重量で約1,000kgである。

本装置はこれから増加するであろう極低レベル固体廃棄物の区分管理にも十分適用できる。

謝 辞

本装置の開発に当り、適切なる御助言を頂きました保健物理部沼宮内彌雄部長、吉田芳和元部長（現、放射線計測協会）、放射線管理第3課松井浩課長、池沢芳夫課長代理、高橋昭雄係長に深く感謝いたします。また、性能試験の遂行に当たっては放射性汚染処理第1課鈴木正樹係長、線量計測課吉田真副主任研究員、放射線管理第3課中村力係長、放射線計測協会澤畠忠広氏に多大なる協力を頂きました。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基本的考え方について，(1985)
- 2) 原子力安全委員会原子炉施設解体安全専門部会：原子炉施設の解体に係る安全確保の基本的考え方，— JPDRの解体に当たって —，(1985)
- 3) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について，(中間報告)，(1986)
- 4) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会：放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方，(1988)
- 5) 宮坂駿一，若山直昭：原子力工業 32, No. 5, 72~79(1986)
- 6) E.C. Davey and G.W. C sullog: Performance Evaluation and Operational Experience with a Semi-automatic Monitor for the Radiological Characterization of Low-level Wastes, AECL-9441, (1987)
- 7) J.T. Caldwell, R.D. Hastings, G.C. Herrera W.E. Kunz and E.R. Shunk : The Los Alamos Second-Generation System for Passive and Active Neutron Assays of Drum-Size Containers, LA-10774-MS, (1986)
- 8) C.M. Lederer and V.S. Shirley; Table of Isotopes(7th Ed.), (1978)
- 9) V.R. Cain: Bechtel Computer Code-NE007, "A Users Manual for QAD-CG", (1977)
- 10) Savitzky A. and Golay M.J.E: Anal. Chem. 36, 1627 (1964)
- 11) 科学技術庁：“ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法”，日本分析センタ (1979)
- 12) 大内新一，出原重臣，山本寛、後藤哲夫，隅田幸生，桜井次郎，和田幹雄：廃棄物パッケージ中放射能測定法の開発(1), 日本国際学会「昭61分科会」要旨集第二分冊, p. 126 (1986)
- 13) J.H. Hubbel : NSRDS-NBS29, (1969)

謝 詞

本装置の開発に当り、適切なる御助言を頂きました保健物理部沼宮内彌雄部長、吉田芳和元部長（現、放射線計測協会）、放射線管理第3課松井浩課長、池沢芳夫課長代理、高橋昭雄係長に深く感謝いたします。また、性能試験の遂行に当たっては放射性汚染処理第1課鈴木正樹係長、線量計測課吉田真副主任研究員、放射線管理第3課中村力係長、放射線計測協会澤畠忠広氏に多大なる協力を頂きました。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基本的考え方について，(1985)
- 2) 原子力安全委員会原子炉施設解体安全専門部会：原子炉施設の解体に係る安全確保の基本的考え方，— JPDRの解体に当たって —，(1985)
- 3) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について，(中間報告)，(1986)
- 4) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会：放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方，(1988)
- 5) 宮坂駿一，若山直昭：原子力工業 32, No. 5, 72~79(1986)
- 6) E.C. Davey and G.W. C sullog: Performance Evaluation and Operational Experience with a Semi-automatic Monitor for the Radiological Characterization of Low-level Wastes, AECL-9441, (1987)
- 7) J.T. Caldwell, R.D. Hastings, G.C. Herrera W.E. Kunz and E.R. Shunk : The Los Alamos Second-Generation System for Passive and Active Neutron Assays of Drum-Size Containers, LA-10774-MS, (1986)
- 8) C.M. Lederer and V.S. Shirley; Table of Isotopes(7th Ed.), (1978)
- 9) V.R. Cain: Bechtel Computer Code-NE007, "A Users Manual for QAD-CG", (1977)
- 10) Savitzky A. and Golay M.J.E: Anal. Chem. 36, 1627 (1964)
- 11) 科学技術庁：“ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法”，日本分析センタ (1979)
- 12) 大内新一，出原重臣，山本寛、後藤哲夫，隅田幸生，桜井次郎，和田幹雄：廃棄物パッケージ中放射能測定法の開発(1), 日本原子力学会「昭61分科会」要旨集第二分冊, p. 126 (1986)
- 13) J.H. Hubbel : NSRDS-NBS29, (1969)