

## 研究施設等廃棄物の埋設処分に係る 共通的な非破壊外部測定装置の基本システムの検討

Study on the Basic System of the Common Non-destructive Radioactivity Measuring  
Equipment for Disposal of Radioactive Wastes Generated from Research,  
Industrial and Medical Facilities

出雲 沙理 林 宏一 仲田 久和 天澤 弘也  
本山 光志 坂井 章浩

Sari IZUMO, Hirokazu HAYASHI, Hisakazu NAKATA, Hiroya AMAZAWA  
Mitsushi MOTOYAMA and Akihiro SAKAI

核燃料・バックエンド研究開発部門  
埋設事業センター

Radioactive Wastes Disposal Project Center  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

研究施設等廃棄物の埋設処分に係る共通的な非破壊外部測定装置の基本システムの検討

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門  
埋設事業センター

出雲 沙理、林 宏一<sup>+</sup>、仲田 久和、天澤 弘也、本山 光志<sup>\*</sup>、坂井 章浩

(2018年12月28日受理)

日本原子力研究開発機構では、研究施設等廃棄物の浅地中埋設処分（コンクリートピット及びトレンチ埋設処分）事業を計画しており、その埋設処分対象廃棄物の放射能濃度分布は大きな幅をもつ特徴がある。埋設処分施設は、廃止措置の開始以後において、埋設した総放射性物質に起因して発生すると想定して評価した一般公衆への線量が、原子炉等規制法で定められた線量以下となる設計とする必要がある。

このため、個々の埋設処分対象廃棄物の放射エネルギーが、埋設する総物量の観点から過度に保守的な評価とならないことが重要となり、特に数量が多く放射能濃度が極めて低いトレンチ埋設処分対象廃棄体については、その放射能濃度の評価の下限値をクリアランスレベル程度で評価することが望まれる。また、これまでに実施した試験研究炉での予備的な放射能濃度の評価方法の検討結果等から、Co-60、Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m、Eu-152、Eu-154等の $\gamma$ 線放出核種については、容器（200Lドラム缶、フレキシブルコンテナ、又は鋼製角型容器）の外部から直接 $\gamma$ 線を測定（以下、「非破壊外部測定」という。）し廃棄体中の放射能濃度を決定することが必要である。

本報では、これらの核種及び放射能濃度の下限値に係る測定条件をもとにモデル計算等により非破壊外部測定装置の成立性を検討し、最も非破壊外部測定が難しい鋼製角型容器においても上述した $\gamma$ 線放出核種の放射能濃度をクリアランスレベル以下まで測定可能な見通しを得るとともに、その結果に基づき当該装置に必要な性能と基本システムについて整理した。

---

本報は、日揮株式会社が国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に基づくものである。

旧本部事務所：〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

+ 敦賀廃止措置実証部門

\* 日揮株式会社

Study on the Basic System of the Common Non-destructive Radioactivity Measuring Equipment for  
Disposal of Radioactive Wastes Generated from Research, Industrial and Medical Facilities

Sari IZUMO, Hirokazu HAYASHI<sup>+</sup>, Hisakazu NAKATA,  
Hiroya AMAZAWA, Mitsushi MOTOYAMA\* and Akihiro SAKAI

Radioactive Wastes Disposal Project Center,  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development,  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 28, 2018)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) plans the near surface disposal of low-level radioactive waste arising from research, industrial, and medical facilities. The radioactivity concentration of the waste to be disposed of has a wide distribution. Taking into account the total activity of the waste buried, the disposal facility should be designed so that effects to members of the public, which is considered to occur due to radioactive substances originated from the waste after closure, are likely to be sufficiently below the dose criteria specified by the Nuclear Regulation Law.

Thus, it is important not to evaluate the radioactivity of each waste in unduly conservative ways so as to dispose of the total amount of the waste that is originally planned. Accordingly, the detection limit is required to be as low as the clearance level for the very low level radioactive waste planned to be disposed of trench-type. In addition, the waste contains several gamma emitters such as Co-60, Cs-137, Nb-94, Ag-108m, Ho-166m, Eu-152, and Eu-154 according to a preliminary study relating to a research reactor. The radioactivity concentrations of each nuclide need to be determined with non-destructive assay methods capable of measuring gamma-ray outside the containers: 200 liter drum, flexible container and box type container.

In this report, the feasibility of a non-destructive assay method is studied by model calculations. Hence, it is confirmed that the detection limit less than the clearance level can be achieved as regards the box type metal container that is difficult to measure. This report summarizes the basic requirements for the measuring equipment.

Keywords: Non-destructive Assay, Box Type Container, Near Surface Disposal, Low-level Radioactive Waste

---

This work was based on the study performed by JGC Corporation under contract with the JAEA.

<sup>+</sup> Sector of Tsuruga Decommissioning Demonstration

\* JGC Corporation

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 測定対象物等の検討.....	2
2.1 測定対象物の廃棄体.....	2
2.2 測定核種と目標検出限界値.....	4
3. 既存の非破壊外部測定装置の事例調査.....	5
3.1 放射性廃棄物に関する非破壊外部測定装置の事例.....	5
3.2 クリアランスレベルの確認に関する非破壊外部測定装置の事例.....	7
4. 研究施設等廃棄物の廃棄体を対象とした非破壊外部測定法の検討.....	8
4.1 非破壊外部測定時の遮蔽条件の検討.....	8
4.1.1 遮蔽に係る計算条件.....	8
4.1.2 計算結果.....	9
4.2 点線源及び体積線源を想定した場合の測定誤差の検討.....	10
4.2.1 点線源の離隔距離の評価.....	10
4.2.2 複数個の点線源を分布のある線源とした場合の測定誤差.....	11
4.3 複数の $\gamma$ 核種がある場合の散乱線の影響の検討.....	12
4.4 検出限界値の検討.....	14
4.4.1 Co-60 のみが存在する場合の検出限界値.....	14
4.4.2 Co-60 が一定量存在する場合における Cs-137 の検出限界値.....	15
5. 非破壊外部測定装置の基本システムの検討と今後の課題.....	17
6. まとめ.....	19
謝辞.....	20
参考文献.....	20

Table of Contents

1. Introduction .....	1
2. Consideration of measuring objects .....	2
2.1 Measuring objects .....	2
2.2 Target nuclides and detection limit.....	4
3. Example of existing non-destructive radioactivity measuring equipment .....	5
3.1 Non-destructive radioactivity measuring equipment for LLW .....	5
3.2 Non-destructive radioactivity measuring equipment for clearance .....	7
4. Study of non-destructive assay for LLW generated by research, industrial, and medical facilities .....	8
4.1 Study of shielding condition for non-destructive assay.....	8
4.1.1 Calculation condition .....	8
4.1.2 Calculation result.....	9
4.2 Consideration of recognition of radiation sources.....	10
4.2.1 Evaluation of separation distance.....	10
4.2.2 Error assessment associated with recognition of some point radiation sources as a volume radiation source.....	11
4.3 Study of scattering radiation effect of mixed gamma emitters.....	12
4.4 Consideration of detection limit .....	14
4.4.1 Detection limit of Co-60.....	14
4.4.2 Detection limit of Cs-137 under constant condition of Co-60 radioactivity .....	15
5. Study of basic system of non-destructive radioactivity measuring equipment .....	17
6. Summary .....	19
Acknowledgement.....	20
References.....	20

図表リスト

表 2.1	非破壊外部測定の実験条件	21
表 4.1	非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算条件一覧	21
表 4.2	測定が困難な容器形状、内容物及び密度の条件の選定結果	22
表 4.3	自己遮蔽の影響により最も測定困難な条件に係る線量当量率の計算結果	22
表 4.4	2つの点線源の識別に係る離隔距離の評価の計算条件	23
表 4.5	角型容器内の2つの点線源の識別に係る離隔距離の評価結果	23
表 4.6	研究施設等廃棄物の非破壊外部測定のためのクリアランスレベル測定装置の特徴	24
図 4.1 (1)	非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算モデル (200L ドラム缶)	24
図 4.1 (2)	非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算モデル (角型容器)	25
図 4.1 (3)	非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算モデル (フレコン)	25
図 4.2 (1)	離隔距離の説明—角型容器表面の線量当量率の分布から容器内部にある2つの点線源があることが確認できない場合の例—	26
図 4.2 (2)	離隔距離の説明—角型容器表面の線量当量率の分布から容器内部にある2つの点線源が確認できる場合の例—	27
図 4.3 (1)	角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の2つの点線源を確認する評価に用いた計算モデル—密度 2.5g/cm <sup>3</sup> 、上面からの測定条件—	28
図 4.3 (2)	角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の2つの点線源を確認する評価に用いた計算モデル—密度 0.5g/cm <sup>3</sup> 、上面からの測定条件—	29
図 4.4 (1)	角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の2つの点線源を確認する評価結果—密度 2.5g/cm <sup>3</sup> 、上面からの測定の結果—	30
図 4.4 (2)	角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の2つの点線源を確認する評価結果—密度 0.5g/cm <sup>3</sup> 、上面からの測定の結果—	31
図 4.5	離隔距離のある複数の点線源を分布のある線源とした場合の測定誤差に係る評価モデルと評価結果 (密度 2.5g/cm <sup>3</sup> の角型容器)	32
図 4.6 (1)	複数のγ核種がある場合の散乱線の影響の評価モデル (200L ドラム缶)	33
図 4.6 (2)	複数のγ核種がある場合の散乱線の影響の評価モデル (角型容器)	33
図 4.6 (3)	複数のγ核種がある場合の散乱線の影響の評価モデル (フレコン)	34
図 4.7 (1)	200L ドラム缶内に複数のγ核種がある場合の散乱線の影響—密度 4.0g/cm <sup>3</sup> 、Co-60 を 1Bq とした時の結果—	35
図 4.7 (2)	角型容器内に複数のγ核種がある場合の散乱線の影響—各核種 1Bq の時の容器表面の計数率—	36
図 4.7 (3)	フレコン内に複数のγ核種がある場合の散乱線の影響—各核種 1Bq の時の容器表面の計数率—	37
図 4.8	参考としたクリアランスレベル測定装置の模擬測定対象物の概念図	38

図 5.1	研究施設等廃棄物を対象とした非破壊外部測定装置の概念図（外観） .....	38
図 5.2	研究施設等廃棄物を対象とした非破壊外部測定装置の概念図（構成及び寸法） .....	39



## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）では、国立研究開発法人日本原子力機構法に基づき、原子力機構及び国内の研究施設等から発生する低レベル放射性廃棄物（以下、「研究施設等廃棄物」という。）の浅地中埋設処分の実施に向けた検討を進めている。

研究施設等廃棄物は、試験研究用原子炉、照射後試験施設、核燃料物質の使用施設、製錬施設、再処理施設、加工施設、再処理施設、放射性同位元素の使用施設等から発生し、その放射能濃度は、トレンチ処分が可能な廃棄物と、コンクリートピット等の人工構築物を備えたピット処分が可能な廃棄物が大半である。これらの廃棄物の性状は、施設の運転・保守・解体によって発生した配管等の金属部材、建屋躯体コンクリートが多い特徴がある。

このような廃棄物を埋設処分するには、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下、「原子炉等規制法」という。）で定められた技術基準に適合している必要がある<sup>1)</sup>。当該技術基準では、埋設処分対象廃棄物は、200Lドラム缶等に収納後、モルタル等で空隙を充填する等の飛散防止措置をした廃棄体とし、容器単位で、廃棄体に含まれる放射性核種毎の放射能濃度が事業許可申請書に記載した最大放射能濃度を超えないことを評価するとともに、埋設処分場における総放射エネルギーを超えないようにする必要がある。

このため、各廃棄体に含まれる核種毎の放射能濃度について、過度に保守的な評価を行った場合、これに伴い埋設対象廃棄物の総放射エネルギーの評価値も増大することから、結果として埋設可能な総物量が減る可能性がある。トレンチ埋設処分対象廃棄体は総物量が比較的多い一方、各廃棄体の放射能濃度は放射化学分析においても検出限界値となるものが多く<sup>2)</sup>、これらについては保守的な評価をせざるを得ないため、その放射能濃度の検出下限値を放射性物質としての規制を除外できる放射能濃度区分値であるクリアランスレベル程度で評価することが望まれる。

また、研究施設等廃棄物の主要な $\gamma$ 線放出核種（以下、「 $\gamma$ 核種」という。）である Co-60、Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m、Eu-152、Eu-154 等については、200Lドラム缶、フレキシブルコンテナ（以下、「フレコン」という。）、鋼製角型容器（以下、「角型容器」という。）といった容器の外部から直接 $\gamma$ 線を測定（以下、「非破壊外部測定」という。）し決定することが想定されている。

そこで本報では、これらの $\gamma$ 核種を対象として、容器の大きさや厚みから自己遮蔽の影響により非破壊外部測定が最も難しいと思われる角型容器を中心に、金属やコンクリートを収納した場合にクリアランスレベル程度の放射能濃度を測定できる非破壊外部測定装置についてモデル計算により成立性を検討した。また、本結果に基づき当該装置に必要な性能と基本システムについて整理した。

本報は、研究施設等廃棄物を対象とした非破壊外部測定法の基本的な測定装置の設計に活用するとともに、過度に保守的とならないように放射能濃度を測定し、合理的な浅地中埋設処分に役立てることを目的とする。

## 2. 測定対象物等の検討

非破壊外部測定装置の測定対象となる研究施設等廃棄物の廃棄体の特徴と、測定対象とする核種を以下に述べる。

### 2.1 測定対象物の廃棄体

研究施設等廃棄物の廃棄体の性状は、主に金属類、プラスチック等の雑固体、コンクリート類、廃液等を固型化したものとなる。

このうち、金属類、雑固体は、200L ドラム缶に収納後、モルタル等で空隙を充填し、充填固化体とする。金属類のうち大型のものは、角型容器に収納後、モルタル又は砂質土で空隙を充填する。廃液等はセメントとともに練り混ぜ 200L ドラム缶に固型化し、均質固化体とする。コンクリート類は、塊状にしフレコンに収納し、コンクリート等廃棄物とする。

これらの廃棄体等について、容器外部からの $\gamma$ 線の測定の観点からの特徴を以下に述べる。

#### (1) 充填固化体（200L ドラム缶に収納）

200L ドラム缶は、直径約 570mm、高さ約 835mm であり、板厚は、約 1.6mm である<sup>3)</sup>。材質は普通鋼である。200L ドラム缶には、さまざまな形状や大きさに解体された金属廃棄物や、高圧圧縮した圧縮体を収納する。当該廃棄物には、廃液等の付着・浸透による表面汚染の金属、雑固体や、放射化によって廃棄物内部まで汚染された金属、雑固体が含まれる。このため、200L ドラム缶内の放射能分布は均一でない場合がある。

廃棄物を容器に収納した時の嵩密度(以下、「密度」という。)は、高圧圧縮体では 3.8~4.7g/cm<sup>3</sup> 程度<sup>3)</sup>であり比較的大きいものがあるが、金属及び雑固体を直接容器に収納し、容器内の廃棄物間の空隙が大きい場合では、密度は 0.9 g/cm<sup>3</sup>程度<sup>a</sup>となる。

本報では、各モデル計算において密度の影響を検討するため、高低 2 種類の密度を設定した。設定においては、保管している廃棄物の密度分布と将来作製する充填固化体の想定される密度を考慮し、計算条件の密度を 1.0g/cm<sup>3</sup> 及び 4.0g/cm<sup>3</sup> とした。

なお、容器内の密度分布の幅は、容器内に金属類と空隙があるため比較的大きいと想定される。容器内の空隙をモルタルで充填すると密度は増加し、非破壊外部測定においては自己遮蔽による影響がより大きくなると想定される。

廃棄体に含まれ、非破壊外部測定の対象となる主な $\gamma$ 核種は、Co-60、Cs-137、Nb-94、Eu-152、Eu-154、Ag-108m、Ho-166m である。試験研究炉である動力試験炉 JPDR から発生した金属廃棄物の例では、これらの核種のうち、Co-60、Cs-137 及び Ag-108m については放射能濃度の分布幅が大きい、Nb-94、Ho-166m は 10<sup>-3</sup>~10<sup>0</sup>Bq/g 程度であり、Eu-152、Eu-154 は 10<sup>-2</sup>~10<sup>1</sup>Bq/g 程度の結果が得られている<sup>2)</sup>。

#### (2) 均質固化体（200L ドラム缶に収納）

均質固化体は、液体状の放射性廃棄物をセメントやアスファルト等の固型化材とともに均質

<sup>a</sup> 原子力機構の内部調査結果に基づく。

に練り混ぜていることから、200L ドラム缶内の放射能分布は均一である。

液体状の放射性廃棄物を均質にセメントやアスファルトと練り混ぜ、まだ固まらない状態で、容器に充填するため、容器内の固化体の密度の分布も均一と想定される。セメントで固化した容器の密度は  $1.8\sim 2.3\text{ g/cm}^3$  程度<sup>4)</sup>である。

従って、均質固化体の密度は、同じく 200L ドラム缶に収納される充填固化体の密度分布内にある。このため、本報では均質固化体としての密度は設定せず、充填固化体で設定した高低 2 種類の値を 200L ドラム缶に係る廃棄体の密度として検討する。

廃棄体に含まれ、非破壊外部測定の対象となる主な $\gamma$ 核種は、Co-60、Cs-137、Eu-154 である。固化処理前の液体状の放射性廃棄物の放射能濃度は、原子力機構の原子力科学研究所で作製されたアスファルト固化体の例では、Co-60 が  $10^0\sim 10^2\text{ Bq/ml}$ 、Cs-137 が  $10^3\sim 10^4\text{ Bq/ml}$ 、Eu-154 が  $10^0\sim 10^2\text{ Bq/ml}$  程度である<sup>5)</sup>。

### (3) 充填固化体（角型容器に収納）

概念設計で設定した主要な角型容器は、 $1,030\text{mm}\times 1,030\text{mm}\times 1,131\text{mm}$  を想定しており、板厚は 6mm である。材質は、炭素鋼である。容積は約  $1\text{m}^3$  と大きく、板厚も厚いため、200L ドラム缶を使用した充填固化体よりも非破壊外部測定時の自己遮蔽が大きいと想定される。当該容器に収納する廃棄物の汚染形態は表面汚染の金属類や雑固体、放射化によって廃棄物内部まで汚染された金属類や雑固体であり、容器内の放射能分布は均一でないとして想定される。また、廃棄物を容器に収納した時の密度は、 $0.2\sim 2.8\text{ g/cm}^3$  程度<sup>b)</sup>である。

本報では、各モデル計算において密度の影響を検討するため、高低 2 種類の密度を設定した。設定においては、200L ドラム缶に係る廃棄体と同様の考え方により、計算条件の密度を  $0.5\text{g/cm}^3$  及び  $2.5\text{g/cm}^3$  とした。

容器内には金属類と空隙があるため、物理的な密度分布は比較的大きいと想定される。

なお、容器内の空隙はモルタル又は砂質土で充填する。

廃棄体に含まれる、非破壊外部測定の対象となる主な $\gamma$ 核種とその放射能濃度は、200L ドラム缶に収納した充填固化体と同じと想定される。

### (4) コンクリート等廃棄物

フレコンは、直径  $1,050\text{mm}$ 、高さ  $1,060\text{mm}$  である。材質はポリエチレン製である。容積は約  $1\text{m}^3$  であり、200L ドラム缶より大きい、フレコンにコンクリート塊を収納した時の密度は  $0.5\sim 1.3\text{g/cm}^3$  程度<sup>6)</sup>である。

本報では、各モデル計算において密度の影響を検討するため、高低 2 種類の密度を設定した。設定においては、上記実績の廃棄物の密度分布と将来作成するコンクリート等廃棄物の想定される密度を考慮し、計算条件の密度を  $0.2\text{g/cm}^3$  又は  $1.7\text{g/cm}^3$  として検討を行う。

なお、主に収納する物は、解体に伴って発生したコンクリート塊であり、廃液等の付着・浸透、放射化によって廃棄物内部まで汚染されたコンクリートが含まれる。このため、容器内の放射能分布は均一でない場合がある。容器内にはコンクリート塊と空隙があるため、物理的な

<sup>b)</sup> 原子力機構の内部調査結果に基づく。

密度分布はあるが、塊状として収納するため密度分布は比較的小さいと想定される。

廃棄体に含まれる、非破壊外部測定の対象となる主な $\gamma$ 核種とその放射能濃度は、200Lドラム缶に収納した充填固化体と同じと想定される。

## 2.2 測定核種と目標検出限界値

測定核種は、研究施設等廃棄物の浅地中埋設処分における安全評価上の重要核種として予備的に選定された核種のうち、廃棄体の外部から非破壊で測定が可能な、Co-60、Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m、Eu-152、Eu-154の7核種とした<sup>7)</sup>。

本報で検討する非破壊外部測定装置の目標とする検出限界については、以下のように設定した。

トレンチ埋設処分相当の研究施設等廃棄物は、放射能濃度が低いものが多く、当該廃棄物のサンプルを採取し、放射化学分析を行った結果、上記測定核種が検出限界以下となる場合がある<sup>2)</sup>。このような廃棄物では、一般に放射化学分析よりも感度が低い非破壊外部測定により廃棄体を測定しても、検出限界以下となると推測される。この場合、検出限界値を用いて当該廃棄体の放射能濃度とするため、検出限界値をできるだけ低くすることが、埋設しようとする廃棄物の放射能濃度を合理的に設定するために重要となる。そこで、本報で検討する非破壊外部測定装置の目標とする検出限界は、放射性物質としての規制を除外できる放射能濃度区分値として規定されているクリアランスレベル（原子炉等規制法 試験研究の用に供する原子炉等に係る放射能濃度についての確認等に関する規則 第2条別表参照）程度とした。その結果、本報の対象核種を踏まえて0.1Bq/gとした。

以上より、本報で検討する非破壊外部測定の測定条件を表2.1に示す。

### 3. 既存の非破壊外部測定装置の事例調査

測定対象物の特徴を考慮した非破壊外部測定装置を検討するため、国内外の低レベル放射性廃棄物やクリアランス対象物を対象にした非破壊外部測定装置の例を以下の観点から整理した。

- ・放射性廃棄物の種類や性状（発生施設、廃棄物の性状等）
- ・測定する放射性核種
- ・測定法（測定体系、測定誤差）

#### 3.1 放射性廃棄物に関する非破壊外部測定装置の事例

(1) 充填固化体（200L ドラム缶）を対象とした測定<sup>8)</sup>

1) 放射性廃棄物の種類や性状（発生施設、廃棄物の性状等）

原子力発電所で発生した運転廃棄物について、ピット埋設処分を対象とした充填固化体の非破壊外部測定が行われている。充填固化体は、物理的な密度が比較的大きい金属類や雑固体がランダムに 200L ドラム缶に収納されているため、密度分布に偏りがある。容器内の廃棄物間の空隙には、モルタルを充填している。同廃棄物は炉水等の液体状の放射性廃棄物と金属等が接触したことによる付着浸透汚染であり、廃棄体内の放射能濃度も分布がある。

2) 測定する放射性核種

上記充填固化体で測定対象としている $\gamma$ 核種は、Co-60 及び Cs-137 である。

3) 測定法（測定体系、測定誤差）

測定法の例としては、主に以下の形式がある。

- ・スペクトル補正方式

Ge 半導体検出器を用いてコリメータを介して、充填固化体表面から $\gamma$ 線スペクトルの測定を行う。測定は、充填固化体内の物理的な密度分布及び放射能濃度分布を平均化するために、容器を昇降ないし回転させながら行う。測定されたコンプトン散乱領域の計数率と、測定核種のピーク $\gamma$ 線計数率の比から減衰補正を行う。放射エネルギーの定量は、着目するピーク計数率と放射エネルギーの関係を標準線源より求めて行う。

- ・グロス $\gamma$ 測定方式

Ge 半導体検出器を用いてコリメータを介して、充填固化体表面から $\gamma$ 線スペクトルの測定を行う。測定は、充填固化体内の物理的な密度分布及び放射能濃度分布を平均化するために、容器を昇降ないし回転させながら行う。さらに、プラスチックシンチレーション検出器でグロス $\gamma$ 計数率の測定も同時に行う。 $\gamma$ 線スペクトルの測定結果から核種組成比を評価し、グロス $\gamma$ 計数率を按分することにより、核種毎の放射エネルギーを定量する。

これらの測定法の測定誤差を評価するためシミュレーション計算がされている。シミュレーション計算では、200L ドラム缶内に分布する放射能濃度の偏在の保守的な設定として点線

源が 200L ドラム缶内にランダムに 10 個存在すると想定している。同時に、200L ドラム缶内の廃棄物の形状、密度、配置等も様々な組み合わせを設定して、200L ドラム缶表面の計数値の統計誤差を計算している。シミュレーション計算の条件を模擬した充填固化体の中に線源を配置して実測を行い、シミュレーション計算の結果と模擬廃棄体の実測値の比が 1.0～1.2 程度の範囲で一致することが確認されている。

なお、スペクトル補正方式は、コリメータを介していることから計数値が小さく、放射能濃度が低い場合はグロス $\gamma$ 測定方式に比較して測定誤差が大きくなる傾向にある。

## (2) 角型容器を対象とした測定<sup>9)</sup>

### 1) 放射性廃棄物の種類や性状（発生施設、廃棄物の性状等）

核燃料物質の使用施設で発生したウラン廃棄物が収納されたコンテナの非破壊外部測定が行われている。コンテナは、1,280mm×1,280mm×1,056mm であり、肉厚は側面及び上面が 4.5mm、底面が 6mm である。容器内には、物理的密度が比較的大きい金属類の他、塩ビ等の雑固体がランダムに収納されている。同廃棄物は、ウランと金属等が接触したことによる付着浸透汚染であり、廃棄体内の放射能濃度も分布がある。

### 2) 測定する放射性核種

測定対象としている核種は、Pa-234m、Bi-214、Pb-211 等の $\gamma$ 線を放出するウランの子孫核種である。

### 3) 測定法（測定体系、測定誤差）

測定法としては、主に以下の形式がある。

#### ・パッシブ $\gamma$ 法

Ge 半導体検出器とコリメータを介した NaI(Tl)検出器で、 $\gamma$ 線ピーク計数率及び全 $\gamma$ 線計数率の測定を行う。測定は、コンテナを仮想的にメッシュ状に区分して、メッシュ毎に Ge 半導体検出器と NaI(Tl)検出器を相対する位置に検出器を設置して行う。これにより、コンテナのメッシュ毎の計数率から線源の放射エネルギーを評価することができる。個々のメッシュの評価では、エネルギーの異なる 2 本の $\gamma$ 線のピーク計数率の比を用いて減衰補正を行い、ピーク計数率から線源を算出する方法や、ピークが検出されない場合はコンテナの密度を用いて減衰補正を行い全計数率から線源を算出する方法がある。

この測定法の測定誤差を評価するための検証試験では、コンテナ内に鉄、塩ビ、水等を配置した模擬廃棄物を作製し、その中に放射エネルギーが既知の線源を複数配置している。既知の放射エネルギーに対して、模擬コンテナの実測値は $\pm 50\%$ で評価できた。実際に放射性廃棄物が収納されたコンテナを測定した結果、放射能濃度 (U-238 放射能(Bq)/廃棄物重量(g)) は、0.1Bq/g～100Bq/g であった。

### 3.2 クリアランスレベルの確認に関する非破壊外部測定装置の事例

#### 1) 放射性廃棄物の種類や性状（発生施設、廃棄物の性状等）

原子力発電所の廃止措置で発生した金属類を対象とした、クリアランスレベル確認のための測定装置がある。測定対象物の性状は、配管、板材等である。同廃棄物は炉水等の液体状の放射性廃棄物と金属等が接触したことによる付着浸透汚染や、放射化による汚染があり、測定対象物内に放射能濃度の分布がある。

#### 2) 測定する放射性核種

測定する放射性核種は、Co-60 である。

#### 3) 測定法（測定体系、測定誤差）

測定法としては、主に以下の形式がある。

- ・対象物を数 kg 程度の測定単位で放射能濃度の評価を行う形式<sup>10)</sup>

板状のプラスチックシンチレーション検出器の直上に測定対象物を置くとともに、測定対象物の形状についてレーザーを用いた 3 次元形状計測を行う。形状計測をした対象物の形状データと検出器の位置関係、線源強度を考慮した 3 次元モンテカルロ計算を行い、検出効率 (cpm/Bq) を算出する。測定体系の中で最も検出効率の低く測定しにくい位置に局所的な汚染があるとしても±30%の精度で測定できる。

- ・対象物をカゴ状の容器に収納し 1,000kg 程度の測定単位で放射能濃度の評価を行う形式<sup>c)</sup>

カゴ状の容器内の測定対象物は、その側面及び上下面に配置された、大型の板状のプラスチックシンチレーション検出器で測定される。これらは 5~10cm 程度の鉛遮蔽体で覆われている。カゴ状の容器の容積は約 1m<sup>3</sup>であり、1,000kg の測定対象物に対し約 200~300Bq が検出限界である。

カゴ状の容器内の測定対象物の放射能分布は均一であるとして評価されるため、測定に際しては、測定対象物に大きな放射能濃度の分布がないことや、測定対象物の種類、材質、充填率、密度を管理する必要がある。なお、点線源とする場合（均一な汚染の分布と設定できない）は過度に保守的な値が測定されることが想定される。

<sup>c)</sup> 原子力機構の独自調査に基づく。

#### 4. 研究施設等廃棄物の廃棄体を対象とした非破壊外部測定法の検討

2章における測定対象物の検討の結果から、測定対象物は200Lドラム缶、角型容器、フレコンを使用した廃棄体等となる。大きな容積に対して測定を行うため、容器及び廃棄物による自己遮蔽・吸収が大きくなることや、内部の放射能汚染の偏在を考慮する必要がある。また、測定対象とする $\gamma$ 核種が複数あることから、その核種組成の同定も必要である。目標とする検出限界値は全核種0.1Bq/gである。これらの研究施設等廃棄物の特徴を考慮すると、3章の非破壊外部測定装置の事例にある、以下の装置が参考となる。

- ①自然放射線による影響（バックグラウンド）の低減のために、測定対象物全体を遮蔽物で覆い、測定対象物の側面及び上下面に設置されたプラスチックシンチレーション検出器を用いて、1m<sup>3</sup>程度の単位でクリアランスレベルの確認をする測定装置
- ②コンテナにウラン廃棄物を収納した状態で、NaI(Tl)検出器に加え、Ge半導体検出器を用いることで複数の $\gamma$ 核種についてメッシュ毎に放射エネルギーを評価する測定装置

これらの測定方式を参考とし、本報では、1m<sup>3</sup>程度の容器に対して今回目標とするクリアランスレベルの測定実績がある①の測定装置で全 $\gamma$ 計数率を測定し、複数の $\gamma$ 核種の組成比は②の測定装置のようにGe半導体検出器で同定する方法を検討することとした。そこで、以下について簡易な計算を用いてこの装置の成立性を検討した。

- ・バックグラウンドの低減のために測定対象物全体を遮蔽物で覆うことの必要性（4.1節）
- ・角型容器内をメッシュ毎に分割し線源を点線源や体積線源と仮定した場合の測定誤差の評価（4.2節）
- ・複数の $\gamma$ 核種が容器内に共存する状態での核種同定の可能性（4.3節）
- ・上記検討を踏まえた検出限界値の検討（4.4節）

##### 4.1 非破壊外部測定時の遮蔽条件の検討

2.2節で述べた目標とする検出限界値を満足するために、非破壊外部測定に要求される遮蔽条件を検討した。廃棄体等の容器内部を目標検出限界値である0.1Bq/gの均一な体積線源としたときの総放射エネルギーが、仮に廃棄体等の中心に点線源として存在した場合の容器表面における線量当量率を評価した。この線量当量率から、廃棄物の自己遮蔽により最も測定困難な条件（測定核種、容器形状、内容物及び密度）を検討した。また、最も測定困難な条件で評価した線量当量率と、自然界のバックグラウンドの線量当量率と比較し、非破壊外部測定における遮蔽の必要性について検討した。

##### 4.1.1 遮蔽に係る計算条件

廃棄体等の容器中心に点線源を置いた場合の廃棄体等の表面から1cm位置における線量当量率を評価する計算条件を以下に示す。

- ・計算コード：QAD-CGGP2R



- ・測定核種 : Co-60、Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m、Eu-152、Eu-154
- ・容器の種類 : 200L ドラム缶、角型容器、フレコン
- ・内容物と密度 : 200L ドラム缶 (内容物 : 鉄、密度 : 4.0、1.0 g/cm<sup>3</sup>)  
                   角型容器 (内容物 : 鉄、密度 : 2.5、0.5 g/cm<sup>3</sup>)  
                   フレコン (内容物 : コンクリート、密度 : 1.7、0.2g/cm<sup>3</sup>)
- ・点線源の放射エネルギー : 放射エネルギーは容器内の放射能濃度が 0.1Bq/g で均一であると仮定し、下記式を用いて算出した。  
                   放射エネルギー (Bq) = 容器内の体積 (cm<sup>3</sup>) × 密度 (g/cm<sup>3</sup>) × 放射能濃度 0.1 (Bq/g)
- ・計算体系 : 線源位置及び評価位置を示した計算モデルを図 4.1 に示す。

上記の計算条件は、容器の種類は 3 種類、密度は容器の種類毎に 2 種類、測定核種が 7 種類ある。これらの計算条件を全て組み合わせると計算ケースが多くなるため、測定核種を Co-60 とした場合において、測定が困難な容器形状、内容物及び密度の条件を選定した。次に、選定した条件において、7 種類の測定核種別の線量当量率を評価し、自己遮蔽の影響で最も測定困難な条件を選定した。計算条件の一覧を表 4.1 に示す。

#### 4.1.2 計算結果

##### (1) 測定が困難な容器形状、内容物及び密度の条件

測定核種を Co-60 とした場合において、200L ドラム缶、角型容器、フレコンの 3 種類の容器を対象に、密度毎に容器表面から 1cm 位置の線量当量率を評価した。評価結果を表 4.2 に示す。この結果、評価した条件の中では角型容器で内容物が密度 2.5g/cm<sup>3</sup> の鉄のケースが最も線量当量率が低く、測定困難な条件となった。

##### (2) 最も測定困難な条件 (測定核種、容器形状、内容物及び密度)

測定が困難な容器形状、内容物及び密度の条件 (角型容器、鉄の密度 : 2.5g/cm<sup>3</sup>) において、測定核種を Co-60、Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m、Eu-152、Eu-154 として、容器表面から 1cm 位置の線量当量率を評価した。評価結果を表 4.3 に示す。評価の結果、以下のとおりとなった。

- ・測定核種は、Cs-137、Ag-108m、Ho-166m、Nb-94、Eu-152、Eu-154、Co-60 の順に線量当量率が大きくなる。

これらの結果、評価対象とした測定核種の中で Cs-137 が最も線量当量率が低くなった。従って、自己遮蔽の影響で最も測定困難な条件は、角型容器で、内容物が密度 2.5g/cm<sup>3</sup> の鉄で、測定核種が Cs-137 のケースとなった。このため、非破壊外部測定の検出限界値としては、計算結果における  $1.3 \times 10^{-4} \mu \text{Sv/h}$  の線量当量率相当の測定性能が必要である。

### (3) 自然界のバックグラウンドの線量当量率との比較

表 4.3 に示した、最も測定困難な条件に係る線量当量率の計算結果と、自然界のバックグラウンドの線量当量率である  $5.0 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ <sup>11)</sup> とを比較すると、いずれの測定核種も  $5.0 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$  より低くなる。この結果から、自然界のバックグラウンドの中では、目標検出限界値の  $0.1\text{Bq/g}$  を満足できないことが分かる。このため、今回検討している非破壊外部測定装置にはバックグラウンドを低減させる遮蔽体が必要である。

## 4.2 点線源及び体積線源を想定した場合の測定誤差の検討

研究施設等廃棄物の汚染は均一な汚染だけに限らず偏在することが考えられる。汚染が偏在する場合、もし非破壊外部測定装置に線源位置を認識する機能がなければ、最も放射能の測定が困難な位置に点線源があると仮定して放射エネルギーを評価しなければならない可能性がある。また、線源位置を認識する機能がある場合においても、線源が複数個あった場合は正確な線源の形状として認識できない可能性がある。このため、線源位置の認識性によりどの程度の誤差が生じるか検討した。

### 4.2.1 点線源の離隔距離の評価

非破壊外部測定では、廃棄体の外側へ放出された放射線を測定することから、廃棄体内に線源が複数個存在する場合、隣り合う線源からの放射線が合わさり 1 個の線源と認識される可能性がある。このため、容器内に 2 個の点線源を置き、容器表面から  $1\text{cm}$  位置の線量当量率を評価した場合の点線源が 2 個であると認識できる離隔距離について検討を行った。

#### (1) 評価条件

離隔距離は、容器内に隣り合う 2 個の点線源の線源位置を容器表面（測定位置）から段階的に深くした際に、測定位置における 2 個の点線源からの線量当量率の合計値の分布に 2 つの山が確認できれば点線源が 2 個であると認識できるものとして評価した。線量当量率の合計値の分布に 2 つの山が確認できない場合は、2 個の点線源の位置の離隔距離を段階的に大きくした。離隔距離の定義を図 4.2 に示す。離隔距離の評価の計算条件を以下に、計算条件の一覧を表 4.4 に示す。

- ・ 計算コード：QAD-CGGP2R
- ・ 測定核種：Co-60
- ・ 容器の種類：角型容器
- ・ 内容物と密度：角型容器（内容物：鉄、密度： $2.5$ 、 $0.5 \text{g/cm}^3$ ）
- ・ 点線源の放射エネルギー：放射エネルギーは容器内の質量が全て放射能濃度  $0.1\text{Bq/g}$  であると仮定し、下記式を用いて算出した。

$$\text{放射エネルギー (Bq)} = \text{容器内の体積 (cm}^3\text{)} \times \text{密度 (g/cm}^3\text{)} \times \text{放射能濃度 } 0.1 \text{ (Bq/g)} \\ \div \text{線源数 } 2 \text{ (個)}$$

- ・ 計算体系：線源位置と評価位置を示した計算モデルを図 4.3 に示す。

## (2) 評価結果

離隔距離の評価の結果の概要を以下に示す。また、離隔距離の評価結果を図 4.4 及び表 4.5 に示す。

- ・線源の位置が容器表面（測定位置）から深くなるほど、2つの点線源を識別するために必要となる離隔距離は大きくなる。
- ・内容物の密度が低い方が、2つの点線源を識別するために必要となる離隔距離は大きくなる。
- ・離隔距離は内容物の密度によって変動することから、密度に偏りがある場合には線源位置の特定は困難と考えられる。

この結果から、内容物の密度が  $0.5\text{g/cm}^3$  の場合、2つの点線源が容器上面から約  $0.6\text{cm}$  の深さにあると、約  $25\text{cm}$  以上の離隔距離があれば容器表面に計数率の分布が測定できることが分かる。また、内容物の密度が  $2.5\text{g/cm}^3$  の場合、2つの点線源が容器上面から約  $23\text{cm}$  の深さにあると、約  $38\text{cm}$  以上の離隔距離があれば容器表面に計数率の分布が測定できることが分かる。このため、角型容器内部の汚染の偏在を評価する際には、 $1\text{m}\times 1\text{m}\times 1\text{m}$  の各辺を2つ又は3つのメッシュに分割して計数率が得られるようにすることが想定される。

また、今回の結果より、密度  $0.5\text{g/cm}^3$  の場合、容器上面から約  $12\text{cm}$  の深さに2つの点線源があると、約  $25\text{cm}$  以上の離隔距離があっても識別することは難しいことが、密度  $2.5\text{g/cm}^3$  の場合、容器上面から約  $34\text{cm}$  の深さに2つの点線源があると、約  $38\text{cm}$  以上の離隔距離があっても識別することは難しいことが、それぞれ分かる。これら点線源の位置の特定が困難な場合は、点線源として評価した結果に係数を乗じたり、線源形状に分布を仮定する等の保守的な評価を行う必要がある。

なお、離隔距離は密度に依存することから、できるだけ角型容器には、物理的な密度の偏在がないように廃棄物を分別し、収納を行う必要があると想定される。

### 4.2.2 複数個の点線源を分布のある線源とした場合の測定誤差

4.2.1 項で述べたとおり、2個の点線源では、容器表面から所定の深さ、離隔距離がないと、線源の個数、位置は特定することはできない。このため、測定対象物内の汚染の分布を実際に把握することは難しく、実際は測定対象となるメッシュ中の線源の分布、位置、数等を仮定して、当該メッシュ中の放射エネルギーを評価することになる。具体的には、測定するメッシュ内に1個（又は複数）の点線源が存在するか、分布がある線源（面状線源や線状線源）が存在すると仮定する。これらの線源の分布の仕方によっては、評価される放射エネルギーは異なる。その際の誤差について、下記に示す3つの具体的な例をモデルに対し評価を行った。

具体例 1：2個の点線源を1個の線状線源として評価する場合

具体例 2：4個の点線源を2個の線状線源として評価する場合

具体例 3：4個の点線源を1個の面状線源として評価する場合

## (1) 誤差の評価方法

誤差は、以下の評価方法で算出した。

- ①点線源とした場合の線量当量率の平均値を A とする。
- ②分布がある線源とした場合の線量当量率の平均値を B とする。
- ③A/B を誤差とする。

この誤差は、点線源を分布がある線源と評価した場合に、A/B 倍大きく放射能濃度が評価されることを意味している。

## (2) 評価条件

複数個の点線源が同一の放射エネルギーの分布がある線源とした場合の誤差の計算条件を以下に示す。

- ・ 計算コード：QAD-CGGP2R
- ・ 測定核種：Co-60
- ・ 容器の種類：角型容器
- ・ 内容物と密度：角型容器（内容物は鉄、密度は 2.5 g/cm<sup>3</sup>）
- ・ 点線源と分布がある線源の放射エネルギー：放射エネルギーは容器内の質量が全て放射能濃度 0.1Bq/g であると仮定し、下記式を用いて算出した。

放射エネルギー (Bq)

$$= \text{容器内の体積 (cm}^3\text{)} \times \text{密度 (g/cm}^3\text{)} \times \text{放射能濃度 0.1 (Bq/g)} \div \text{線源数 (個)}$$

- ・ 計算体系：線源位置と評価位置を示した計算モデルを図 4.5 に示す。

## (3) 評価結果

評価結果を図 4.5 に示す。今回の評価モデルの例では、2 個又は 4 個の点線源を分布がある線源とした場合の測定誤差は、個々の点線源の位置を特定して放射エネルギーを評価する場合と比べて 1.3 倍程度であった。ただし、この測定誤差を見積もるにあたっては、容器内の他のメッシュに存在する線源の影響、内容物の物理的な密度の偏在を考慮していないため、今後検討する必要がある。

## 4.3 複数のγ核種がある場合の散乱線の影響の検討

研究施設等廃棄物の多くは、複数のγ核種が混在している。容器内に複数のγ核種が混在している場合、ある測定核種の検出限界値は、より高エネルギーのγ線を放出する核種の散乱線等がバックグラウンドとなるため、1つの核種だけが存在する場合よりも高くなる。このため、複数のγ核種が混在する場合において、他の核種の散乱線を考慮しても測定核種の同定が可能となる放射エネルギーについて検討した。

検討方法として、まず 200L ドラム缶で、複数のγ核種が同じ位置（表面から 15cm 程度内側、又は容器中心）に点線源として存在した場合に、Co-60 の散乱線に対する他のγ核種の同定の可能性について、簡単のためγ線フラックスで評価した。次に、角型容器及びフレコンについて、複数のγ核種が容器中心に点線源として存在した場合及び容器全体に均一に分布した場合にお

る各核種の同定の可能性について、Ge 半導体検出器をモデル設定することにより計数率で評価した。

評価の計算条件を以下に示す。

#### (1) 評価条件

- ・ 計算コード : MCNP5
- ・ 測定核種 : Co-60、Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m
- ・ 容器の種類 : 200L ドラム缶、角型容器、フレコン
- ・ 内容物と密度 : 200L ドラム缶 (内容物 : 鉄、密度 : 平均 4.0 g/cm<sup>3</sup>)  
                   角型容器 (内容物 : 鉄、密度 : 2.5、0.5 g/cm<sup>3</sup>)  
                   フレコン (内容物 : コンクリート、密度 : 1.7、0.2 g/cm<sup>3</sup>)
- ・ 計算体系 : 線源位置と評価位置を示した計算モデルを図 4.6 に示す。  
                   また、計算のヒストリー数は 10 億とし、誤差が大きい場合のみ 40 億とした。

#### (2) 評価結果

同伴する核種の散乱線による影響の評価の結果を以下に示す。

なお、図 4.7 では単一核種ごとの評価結果を同一グラフ上に載せているが、実際には同伴する全ての核種の散乱線の合計がバックグラウンドとなるため、各核種のピークはより検出しづらくなる。

##### 1) 200L ドラム缶

図 4.7 (1) 上図に、200L ドラム缶表面から 15cm 程度内側に Co-60 が 1Bq あるとし、同じ位置に Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m の  $\gamma$  核種がある場合の容器表面の  $\gamma$  線フラックス評価結果を示す。また図 4.7 (1) 下図に、200L ドラム缶の中心に Co-60 が 1Bq あるとし、同じく中心に Cs-137、Nb-94、Ag-108m、Ho-166m の  $\gamma$  核種がある場合の容器表面の  $\gamma$  線フラックス評価結果を示す。

本評価で、200L ドラム缶表面から 15cm 内側に Co-60 が 1Bq ある場合、Co-60 による散乱線のエネルギー領域のフラックスと、Cs-137 等のピークのフラックスが同程度となる放射エネルギーの比を求めると、

$$\begin{aligned} & \text{Co-60} : \text{Cs-137} : \text{Nb-94} : \text{Ag-108m} : \text{Ho-166m} \\ & = 1.0 : 0.3 : 0.1 : 0.2 : 0.2 \end{aligned}$$

程度であった。

一方、200L ドラム缶中心に Co-60 が 1Bq ある場合、Co-60 による散乱線のエネルギー領域のフラックスと、Cs-137 等のピークのフラックスが同程度となる放射エネルギーの比を求めると、

$$\begin{aligned} & \text{Co-60} : \text{Cs-137} : \text{Nb-94} : \text{Ag-108m} : \text{Ho-166m} \\ & = 1.0 : 1.9 : 0.5 : 1.2 : 1.0 \end{aligned}$$

程度であった。

従って、200L ドラム缶表面に近い位置にある Cs-137 等は、Co-60 の放射エネルギーよりも 1 桁低

い放射エネルギーでも同定が可能であるが、200L ドラム缶中心にある Cs-137 や Ag-108m は、Co-60 の放射エネルギーよりも少ないと同定できない可能性がある。

これにより、角型容器とフレコンについては容器中心に線源がある場合について評価した。

## 2) 角型容器

図 4.7 (2) に、角型容器中心に複数の  $\gamma$  核種がそれぞれ 1Bq ある場合、及び角型容器内に均一に複数の  $\gamma$  核種が 1Bq 分布する場合の容器表面の計数率を示す。

図 4.7 (2) 左上図より、角型容器中心に複数の  $\gamma$  核種がある場合、容器内の密度が高くなると、Co-60 に対する Cs-137、Ag-108m、Nb-94、Ho-166m の放射エネルギーが同程度かそれ以下では、これら核種の同定ができない可能性があることが分かる。

## 3) フレコン

図 4.7 (3) に、フレコン中心に複数の  $\gamma$  核種がそれぞれ 1Bq ある場合、及びフレコン内に均一に複数の  $\gamma$  核種が 1Bq 分布する場合の容器表面の計数率を示す。

図 4.7 (3) 左上図より、フレコン中心に複数の  $\gamma$  核種がある場合、容器内の密度が高くなると、Co-60 に対する Cs-137、Ag-108m、Nb-94、Ho-166m の放射エネルギーが同程度かそれ以下では、これら核種の同定ができない可能性があることが分かる。

この結果から、核種同定の可否は内容物の密度によることが示された。このため、内容物の密度を適切に管理するとともに、可能な限り線源に近い場所から  $\gamma$  線を測定することが重要である。

## 4.4 検出限界値の検討

2 章で調査した、測定対象物をカゴ状の容器に収納し 1,000kg 程度の単位でクリアランスレベルを確認する装置を参考として、これまでに本章で評価した数値と、同装置における測定データの結果を元に、検出限界値の評価を以下のように試みた。当該装置の特徴を表 4.6 に示す。

### 4.4.1 Co-60 のみが存在する場合の検出限界値

検出限界値の算出には実際の遮蔽体を備えた装置内におけるバックグラウンド及び試料の測定データが必要となるため、上記測定装置におけるこれらの全  $\gamma$  測定結果を用いた。バックグラウンドは 5cm 厚の鉛遮蔽内を空の状態、試料は図 4.8 に示す測定対象物の中心に Co-60 の点線源を置いて、それぞれ測定した。測定対象物は、約 1m<sup>3</sup> の角型の金属の型枠に、金属板を一定の間隔で収納したもので、総重量は 442.5kg、即ち密度が約 0.5g/cm<sup>3</sup> の体系である。

測定対象物当たりの検出限界計数率は、国内の原子炉施設に係る放射能測定指針である「発電用軽水型原子炉施設における放射性物質の測定に関する指針」(昭和 53 年 9 月 29 日、原子力委員会) に基づく次の式から評価した。

$$n_D = \frac{3}{2} \left\{ \frac{3}{t_T} + \sqrt{\left(\frac{3}{t_T}\right)^2 + 4 \left[ n_B \left( \frac{1}{t_T} + \frac{1}{t_B} \right) \right]} \right\}$$

$n_D$  = 検出限界計数率

$n_B$  = バックグラウンド計数率  $n_B = 2,400$  cps

(プラスチックシンチレーション検出器 16 個分: 上下各 4 個、各側面 2 個)

$t_B$  = バックグラウンド測定時間  $t_B = 180$  s

$t_T$  = 試料の測定時間  $t_T = 60$  s

検出限界放射能への換算に係る Co-60 の検出効率、試料の測定結果から 0.1cps/Bq 程度と設定した。

上記の検出限界計数率及び検出効率による評価の結果、測定対象物当たりの Co-60 の検出限界放射能は 220Bq であり、概ね 250Bq となった。ここで、4.2.2 項の評価結果を踏まえ、当該線源の形状が点線源か面状線源か区別がつかない場合の測定誤差を 1.3 とすると、検出限界放射能は概ね 325Bq となる。これを測定対象物の重量である 442.5kg で除すると、検出限界値は 0.001Bq/g 程度となる。これは、今回検討している非破壊外部測定装置の目標とする検出限界値である 0.1Bq/g より 2 桁低い値である。

#### 4.4.2 Co-60 が一定量存在する場合における Cs-137 の検出限界値

次に、同様の測定体系内で、Co-60 が 250Bq 存在した場合に、4.1.2 項の検討結果より最も測定が難しいと想定される Cs-137 の検出限界値について、以下のように検討した。

Co-60 が 250Bq 存在する場合のバックグラウンド計数率を、4.4.1 項の結果を用いて 2,400cps と仮定した。また、Cs-137 の検出効率は、4.1.1 項の評価結果を踏まえ、以下のように仮定した。

4.1.1 項では、角型容器内が目標検出限界値である 0.1Bq/g の均一な体積線源があるとしたときの総放射能量が、仮に廃棄体等の中心に点線源として存在した場合の容器表面における線量当量率を評価した。この結果、容器内の密度を 0.5g/cm<sup>3</sup> としたときの Co-60 の線量当量率は、 $3.8 \times 10^{-2} \mu$  Sv/h であった。同様の体系で、Cs-137 の線量当量率を評価した結果、 $8.5 \times 10^{-3} \mu$  Sv/h であった。両値は同じ放射能量で、同じ幾何効率で評価された値である。また、線量当量率は検出器の効率に比例すると考えられるため、両値の比をとることで、Cs-137 の検出効率を 0.02cps/Bq とした。

検出限界計数率に係る 4.4.1 項の計算式及び上述の検出効率による評価の結果、バックグラウンド計数率が 2,400cps の時の Cs-137 の検出限界放射能は、おおむね 1,000Bq となる。これは Co-60 が 250Bq 存在する場合も同じである。ここで、4.2.2 項の評価結果を踏まえ、当該線源の形状が点線源か面状線源か区別がつかない場合の測定誤差を 1.3 とすると、検出限界放射能は 1,300Bq となる。これを測定対象物の重量である 442.5kg で除すると、検出限界値は 0.003Bq/g 程度となる。これは、今回検討している非破壊外部測定装置の目標とする検出限界値である 0.1Bq/g より十分に低い値である。

以上の結果から、参考とした測定体系を用いることにより複数の $\gamma$ 核種が共存する場合であっても、それぞれの核種に対して目標とする  $0.1\text{Bq/g}$  を達成できる可能性がある。ただし、本検討では、密度  $0.5\text{g/cm}^3$  の均一な媒体を想定していることから、今後、密度を高めた場合及び密度が偏在する場合についても検討する必要がある。



## 5. 非破壊外部測定装置の基本システムの検討と今後の課題

4 章までの検討結果に基づき、研究施設等廃棄物を対象とした非破壊外部測定の測定システムの要件を検討し、当該装置を具体化した。基本的には、約  $1\text{m}^3$  の測定対象物中のクリアランスレベルを確認できる既存の装置に核種同定を行う機能を追加する必要がある。当該測定システムの要件を以下に示す。また、当該装置の概念図を図 5.1 及び図 5.2 に示す。

- ・ 検出器及び測定対象物は、自然界のバックグラウンドの影響を避けるため、鉛の遮蔽体の中に入れる。
- ・ 検出器として、プラスチックシンチレータを用いる。プラスチックシンチレータは、測定対象となる廃棄体の全面 ( $4\pi$ ) に配置し、また、複数個所に設置 (例えば 1 面に 6 個ずつ) することで、測定対象物内の線源の位置情報を把握する。
- ・ 検出器として、Ge 半導体検出器を、鉛遮蔽体内の測定対象物の側面に配置する。これにより、 $\gamma$  核種の核種組成比を把握し、上記の全  $\gamma$  計数率を  $\gamma$  核種別の放射エネルギーとして算出する。
- ・ 上記の Ge 半導体検出器は、上記プラスチックシンチレーション検出器で特定された線源位置をできるだけ目指して測定できるようにするため、検出器の位置は、上下、左右には稼働できるようにする。
- ・ 測定装置内の大きさは、約  $1\text{m}^3$  の角型容器が収納できるようにする。
- ・ 測定対象は、装置外にてフォークリフトで測定対象をセットし、自動で測定装置内に送るシステムとする。

これらの非破壊外部測定装置の設計を今後進める上での課題は以下のとおり。

### (1) プラスチックシンチレーション検出器の枚数、遮蔽厚さの検討

図 5.1 及び図 5.2 に示す装置概念図では、プラスチックシンチレーション検出器の枚数を 1 面に 6 枚とし、全面に配置すると仮定したが、一般に検出器の枚数が増加するとバックグラウンドが増加する。従って、バックグラウンドを低下させ、目標とする検出限界値を達成するためには、検出器数に応じた適切な遮蔽体厚みを設定する必要がある。

また、遮蔽体内に容積が大きく、密度の大きい測定対象物を収納すると、測定対象物の自己遮蔽によって、遮蔽体内のバックグラウンドが変動する。これにより達成可能な検出限界値が影響を受ける。

これらを考慮して、今後計算及び標準線源を用いた検証試験を行う必要がある。

### (2) 散乱線の影響、密度の偏在の影響の検討

本検討では、線源の数、分布が特定できない場合、4.2.2 項の具体例では角型容器中心部にある線源の測定誤差は約 1.3 倍 (30%) との評価結果となった。しかし、測定対象とした中心部のメッシュ以外に存在する線源からの直接線及び散乱線の影響を評価していないため、今後考慮する必要がある。また、容器内に収納する廃棄物の密度が偏在している場合は、さらに誤差が

大きくなる。この誤差を抑制するためには、密度が偏在しないよう廃棄物を収納するといった作業面での対応も行うことが想定される。今後これらを考慮して、計算及び標準線源を用いた検証試験を行う必要がある。

なお、一般に容器内に廃棄物を収納した際には、廃棄物同士の間及び容器と廃棄物の間に存在する空隙は、廃棄体の物理的な安定性の観点からモルタル等によって充填される予定であるが、これによって密度が上昇すると外部からの測定は困難になると考えられる。実際の測定では、モルタル充填を行う前に行うことが適切である。

### (3) 核種組成に関する考慮

本検討の結果から、複数の $\gamma$ 核種が容器中心にある場合、コンプトン散乱領域のエネルギー領域にピークをもつ Cs-137 等のピーク計数率は低下し、Co-60 のピーク対コンプトン比も低下するため、Cs-137 等の検出限界値が上昇する傾向である。一方で、容器表面近くに複数の $\gamma$ 核種がある場合、コンプトン散乱領域のエネルギー領域にピークをもつ Cs-137 等のピーク計数率は比較的低下せず、Co-60 のピーク対コンプトン比も大きくなるため、Cs-137 等の検出限界値は下がる傾向にある。

このため、明確にピークが検出されない場合、コンプトン散乱領域の計数率によって Cs-137 等の放射能濃度（検出限界値）を評価するため、放射能を過大評価することとなる。その際、容器中心に Cs-137 等の線源があると仮定すると最も過大評価される傾向にある。

## 6. まとめ

本報では、放射能濃度が極めて低く、非破壊外部測定が必要な複数の $\gamma$ 核種が混在する研究施設等廃棄物の特徴を考慮し、これまでに実績のあるいくつかの非破壊外部測定法の事例調査とモデル計算の結果を元に、研究施設等廃棄物に適用できる非破壊外部測定法の要件検討を行った。その結果、既存のクリアランスレベル測定装置に、核種同定を行う機能を追加することで、今回検討した200Lドラム缶、フレキシブルコンテナ、及び鋼製角型容器に収納した研究施設等廃棄物の非破壊外部測定において、目標とする検出限界値等の性能を達成できる可能性があることを確認した。

ただし、本検討は、解析や公開されたデータに基づいて実施したものであることから、今後、試験機を導入し標準線源を用いた測定データを取得し、本検討で得られた解析結果の確認、及びより多様な条件での測定の成立性の確認を行うことにより、信頼性を高めていくことが重要となる。

謝 辞

本試験を行うに際して、研究施設等廃棄物の埋設処分に向けた共通的な非破壊外部測定装置の基本システムの検討にご協力頂いた日揮株式会社の本山光志氏、加賀谷大輔氏、齋川昴太氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原子力規制庁, 廃棄物確認に関する運用要領 (平成 26 年 3 月), 2014.
- 2) 辻 智之他, JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討(2), JAEA-Technology 2015-009, 2015, 46p.
- 3) 須藤 智之他, 高圧圧縮充填固化体の空げき率評価, JAEA-Technology 2010-041, 2011, 38p.
- 4) 服部 洋司良他, 原研東海研究所における海洋処分用均一セメントパッケージの製作と品質管理, JAERI-M 8929, 1980, 44p.
- 5) 辻 智之他, 研究施設等から発生する均質・均一固化体に対する放射能濃度評価方法の検討, JAEA-Technology 2011-028, 2011, 66p.
- 6) 日本原子力研究所東海研究所, 廃棄物埋設事業確認申請書 (非固化型化コンクリート等廃棄物用) -第 6 区画第 2 段-, 1996.
- 7) 坂井 章浩他, 研究施設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 3) - RI・研究所等廃棄物に係る主要放射性廃棄物発生施設毎の重要核種の予備評価 -, JAEA-Technology 2010-021, 2010, 152p.
- 8) 酒井 利明他, 充填固化体の放射能評価について, 原子力バックエンド研究 Vol.5, No.1, 1998, pp.81-89.
- 9) 鈴木 敏他, パッシブガンマ法によるコンテナ等廃棄物中ウラン量の測定技術開発 (技術報告 - 検証報告書 -), JAEA-Technology 2010-035, 2010, 134p.
- 10) 服部 隆利他, 金属廃棄物中の放射能レベルの区分評価技術の開発 - レーザーを用いた 3 次元形状計測と 3 次元モンテカルロ計算による  $\gamma$  線計測の校正手法 -, 電力中央研究所研究報告 T00016, 2001, 32p.
- 11) 下 道國他, 日本の自然放射線による線量, Isotope News No.706, 2013, pp.23-32.

表 2.1 非破壊外部測定の実験条件

項目	条件
対象容器	200L ドラム缶、角型容器、フレコン
廃棄物性状	金属、圧縮金属、コンクリート
測定核種	Co-60、Nb-94、Cs-137、Ag-108m、Ho-166m、Eu-152、Eu-154
測定核種の目標検出限界	0.1Bq/g*1

\*1 : Ho-166m はクリアランスレベルが規定されていないため、他の 6 核種と同様に 0.1Bq/g と設定した。

表 4.1 非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算条件一覧

項目	測定核種	容器の種類	内容物	容器内の 体積 (cm <sup>3</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	点線源の 放射エネルギー (Bq)
測定が困難な容器形状、 内容物及び密度の 条件の選定	Co-60	200L ドラム缶	鉄	2.1×10 <sup>5</sup>	4.0	8.4×10 <sup>4</sup>
					1.0	2.1×10 <sup>4</sup>
		角型容器	鉄	1.2×10 <sup>6</sup>	2.5	2.9×10 <sup>5</sup>
					0.5	5.8×10 <sup>4</sup>
		フレコン	コンクリート	9.2×10 <sup>5</sup>	1.7	1.6×10 <sup>5</sup>
					0.2	1.8×10 <sup>4</sup>
最も測定困難な条件の 選定	Co-60	角型容器	鉄	1.2×10 <sup>6</sup>	2.5	2.9×10 <sup>5</sup>
	Nb-94					
	Cs-137					
	Ag-108m					
	Ho-166m					
	Eu-152					
	Eu-154					

表 4.2 測定が困難な容器形状、内容物及び密度の条件の選定結果

計算条件*1			線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	備考
容器の種類	内容物	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )		
200L ドラム缶	鉄	4.0	$6.6 \times 10^{-3}$	-
		1.0	$4.5 \times 10^{-2}$	-
角型容器	鉄	2.5	$3.2 \times 10^{-3}$	本条件が最も自己遮蔽の影響が大きい。
		0.5	$3.8 \times 10^{-2}$	-
フレコン	コンクリート	1.7	$9.8 \times 10^{-3}$	-
		0.2	$2.1 \times 10^{-2}$	-

\*1：測定核種は Co-60

表 4.3 自己遮蔽の影響により最も測定困難な条件に係る線量当量率の計算結果

計算条件*1	線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	備考
測定核種		
Co-60	$3.2 \times 10^{-3}$	-
Nb-94	$7.6 \times 10^{-4}$	-
Cs-137	$1.3 \times 10^{-4}$	最も測定困難な条件。非破壊外部測定に必要な測定性能の目安。
Ag-108m	$4.0 \times 10^{-4}$	-
Ho-166m	$6.6 \times 10^{-4}$	-
Eu-152	$9.6 \times 10^{-4}$	-
Eu-154	$1.1 \times 10^{-3}$	-

\*1：容器の種類は角型容器、内容物は密度  $2.5\text{g/cm}^3$  の鉄

表 4.4 2つの点線源の識別に係る離隔距離の評価の計算条件

測定核種	容器の種類	内容物	容器内の体積 (cm <sup>3</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	線源数	点線源の放射能量 (Bq)
Co-60	角型容器	鉄	1.2×10 <sup>6</sup>	2.5	2	1.5×10 <sup>5</sup>
				0.5	2	2.9×10 <sup>4</sup>

表 4.5 角型容器内の2つの点線源の識別に係る離隔距離の評価結果

密度	測定位置	2つの点線源の計算モデル図中の位置		容器表面からの線源の位置 (深さ)		2つの点線源の離隔距離		参照図番	
				マスの数	距離 (cm)	マスの数	距離 (cm)	計算モデル	評価結果
2.5	上面からの測定	1-1	1-2	0	0.6	2	25	図 4.3 (1)	図 4.4 (1)
		2-1	2-2	1	12	2	25		
		3-1	3-2	2	23	3	38		
		4-1	4-2	3	34	3	38		
0.5	上面からの測定	1-1	1-2	0	0.6	2	25	図 4.3 (2)	図 4.4 (2)
		2-1	2-2	1	12	2	25		
		3-1	3-2	2	23	3	38		
		4-1	4-2	3	34	4	51		

表 4.6 研究施設等廃棄物の非破壊外部測定のための参考としたクリアランスレベル測定装置の特徴

検出限界	約 200Bq (Co-60)
測定時間	180sec
測定領域	1.8m×1.5m×2.2m (厚さ 5cm の鉛遮蔽を含む)
鉛遮蔽体配置	測定領域を全て覆っている。
鉛遮蔽厚さ	5cm
検出器種類	プラスチックシンチレータ
検出器配置	4π 方向に計 16 個
測定対象物重量	1,000kg

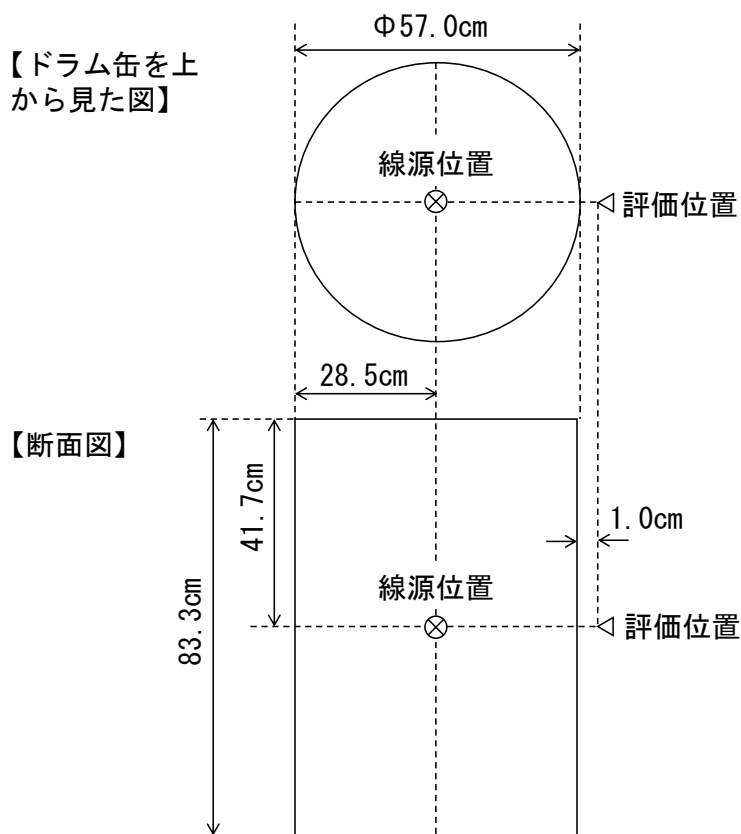


図 4.1 (1) 非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算モデル (200L ドラム缶)



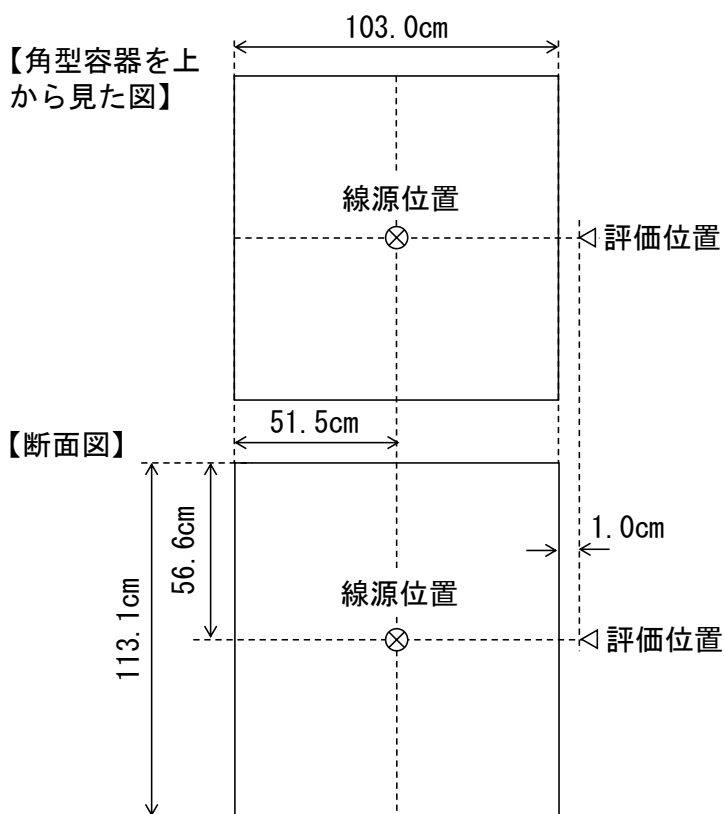


図 4.1 (2) 非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算モデル (角型容器)

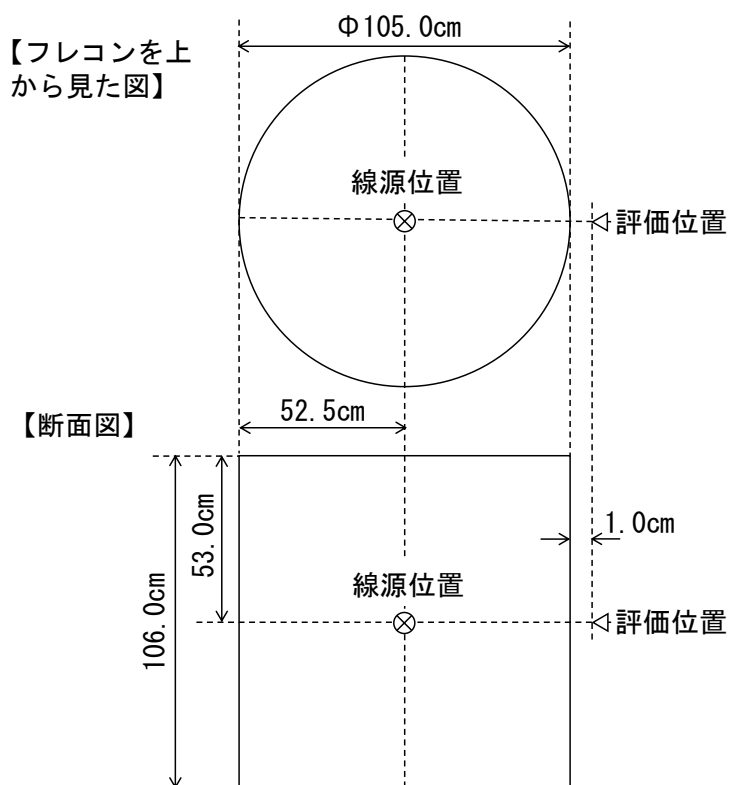
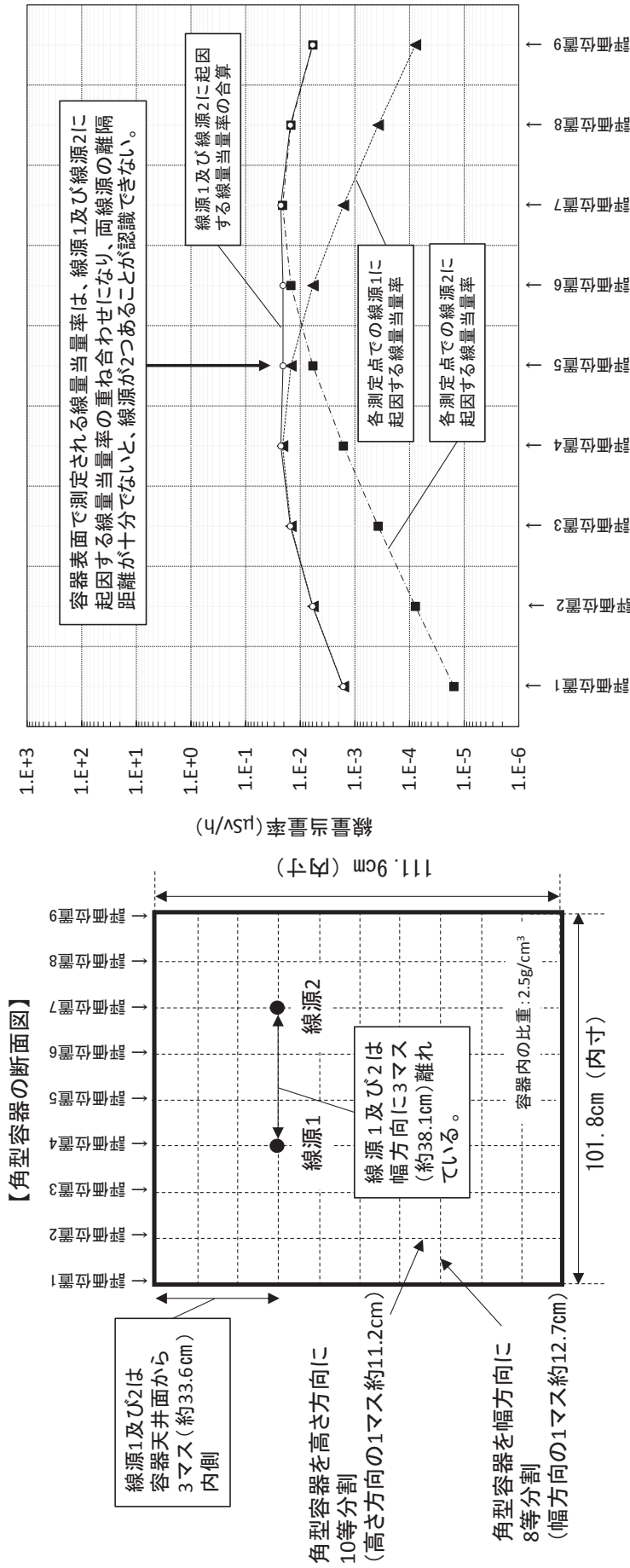
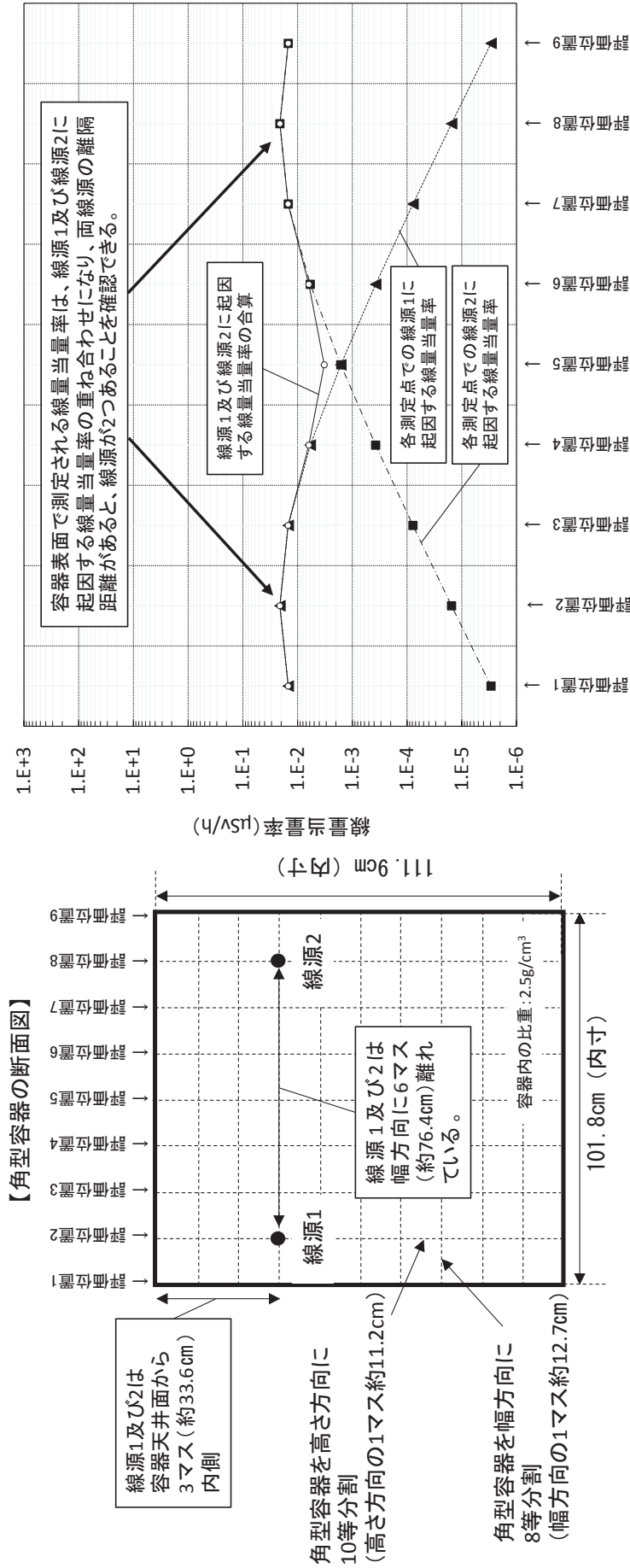


図 4.1 (3) 非破壊外部測定装置の遮蔽条件の検討の計算モデル (フレコン)



角型容器天井面の表面で測定される線量当量率の分布

図 4.2 (1) 分離距離の説明  
— 角型容器表面の線量当量率の分布から容器内部にある2つの点線源があることが確認できない場合の例 —



線源1: 点線源、Co-60、約150kBq  
線源2: 点線源、Co-60、約150kBq

図 4.2 (2) 分離距離の説明

— 角型容器表面の線量当量率の分布から容器内部にある2つの点線源が確認できる場合の例 —

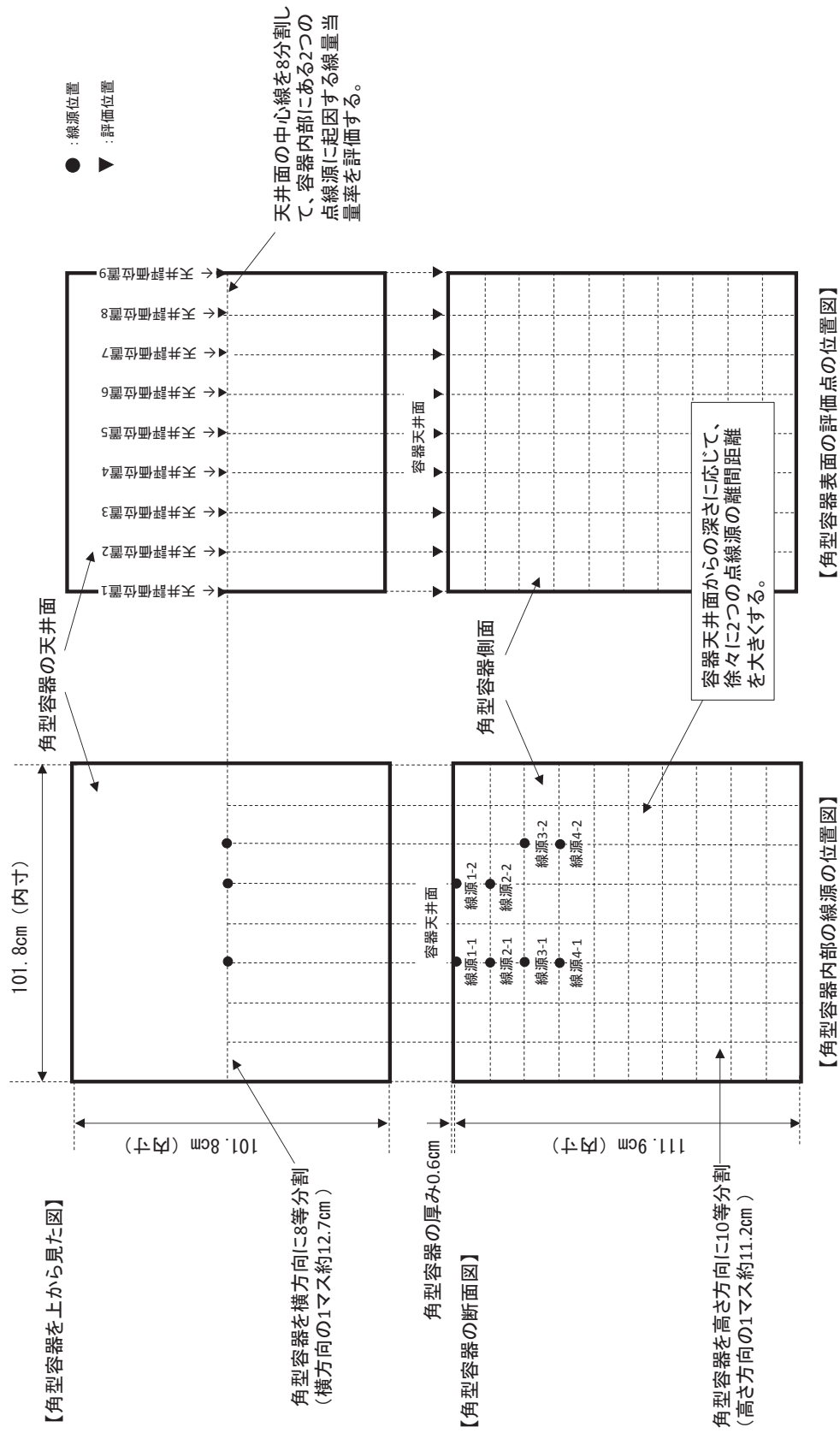


図 4.3 (1) 角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の 2 つの点線源を確認する評価に用いた計算モデル  
 - 密度 2.5g/cm<sup>3</sup>、上面からの測定の条件 -

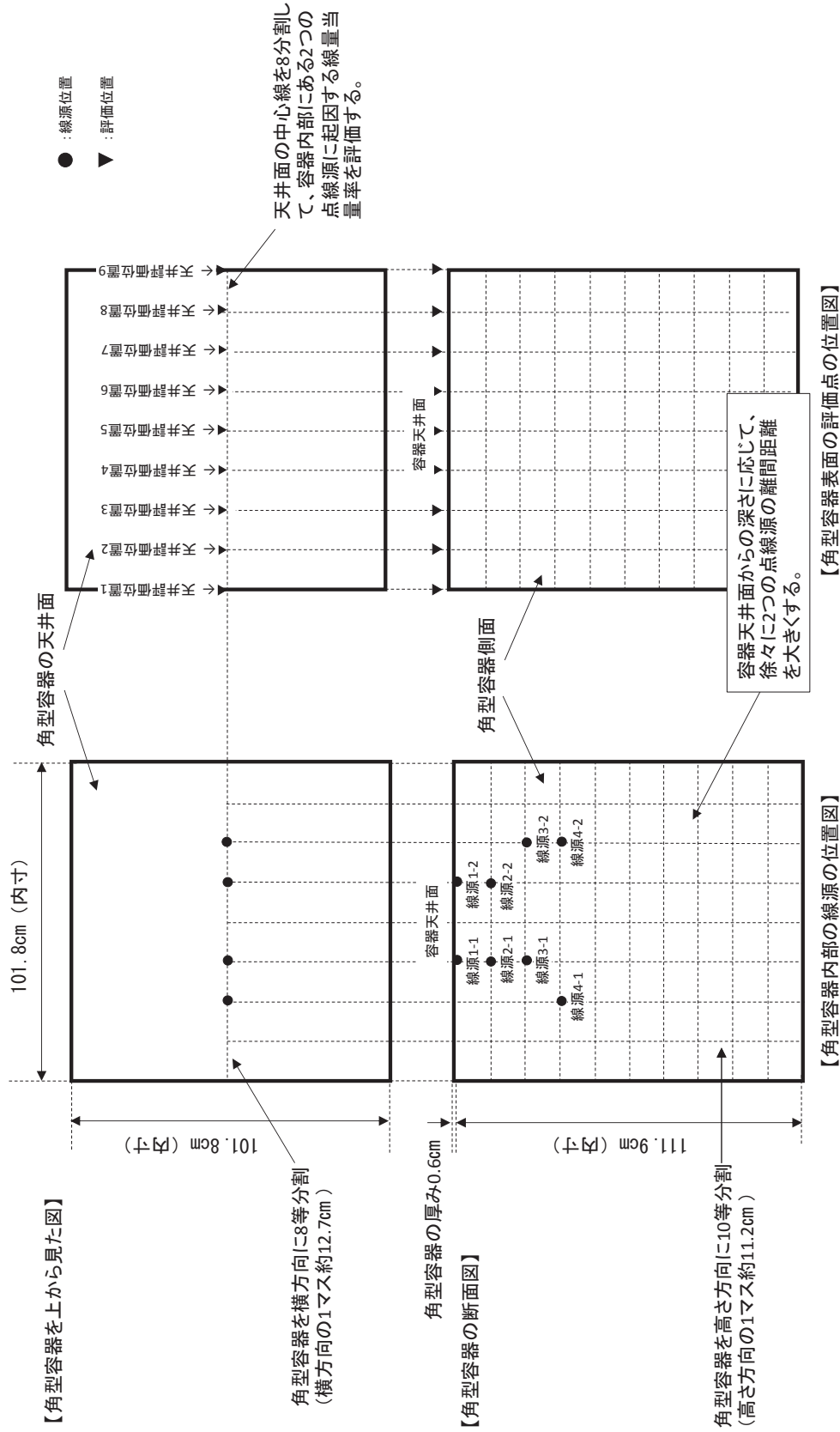
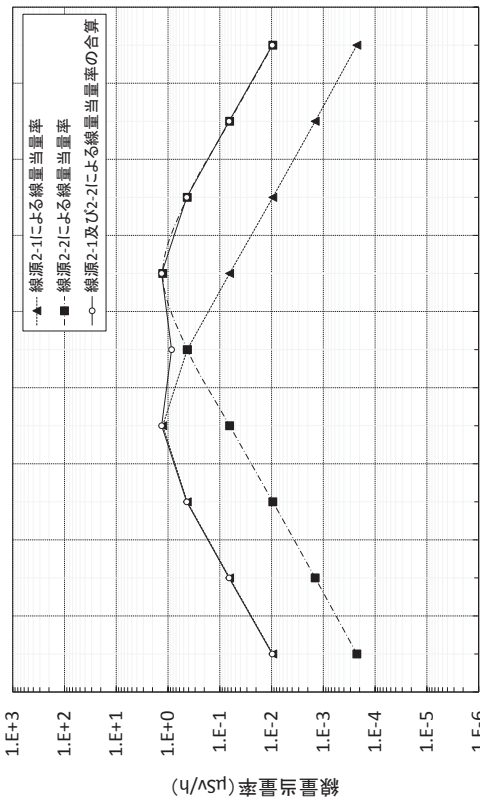
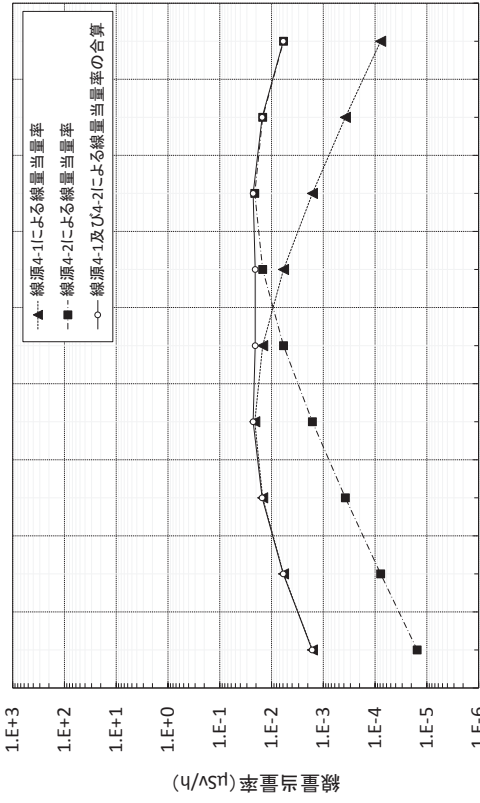


図 4.3 (2) 角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の2つの点線源を確認する評価に用いた計算モデル

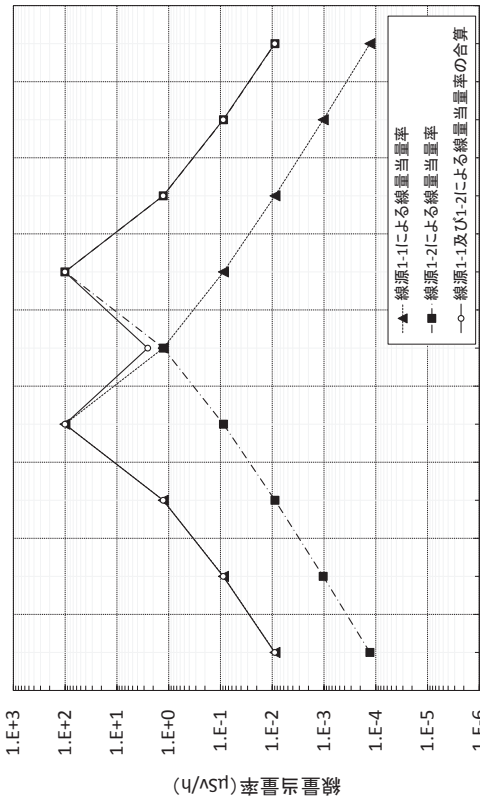
— 密度 0.5g/cm<sup>3</sup>、上面からの測定の場合 —



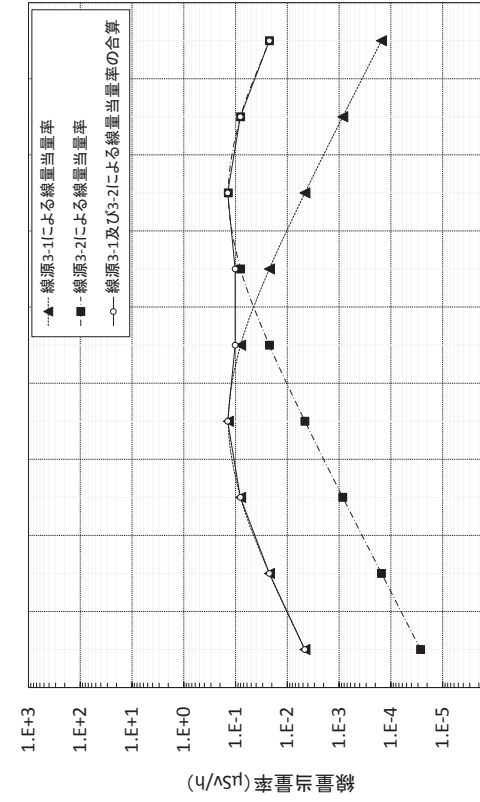
天井面からの深さ 12cm、2つの点線源の距離距離 25cm



天井面からの深さ 34cm、2つの点線源の距離距離 38cm



天井面からの深さ 0.6cm、2つの点線源の距離距離 25cm



天井面からの深さ 23cm、2つの点線源の距離距離 38cm

図 4.4 (1) 角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の2つの点線源を確認する評価結果

—密度 2.5g/cm<sup>3</sup>、上面からの測定の結果—

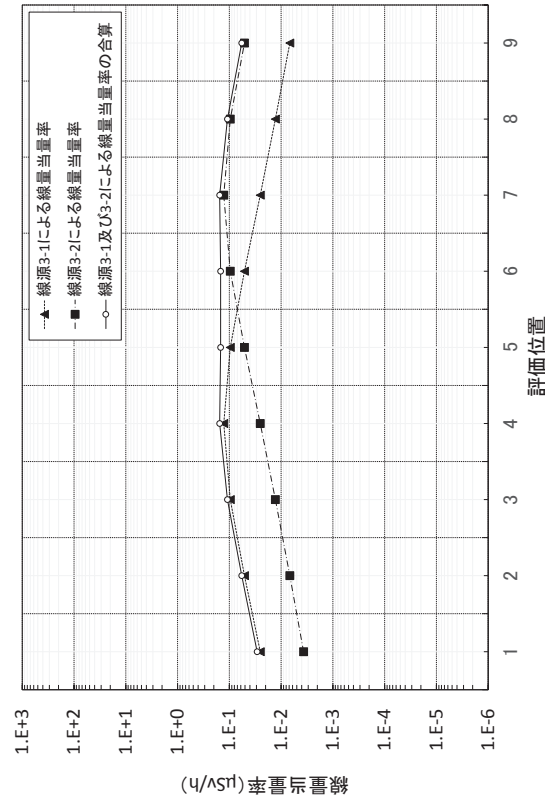
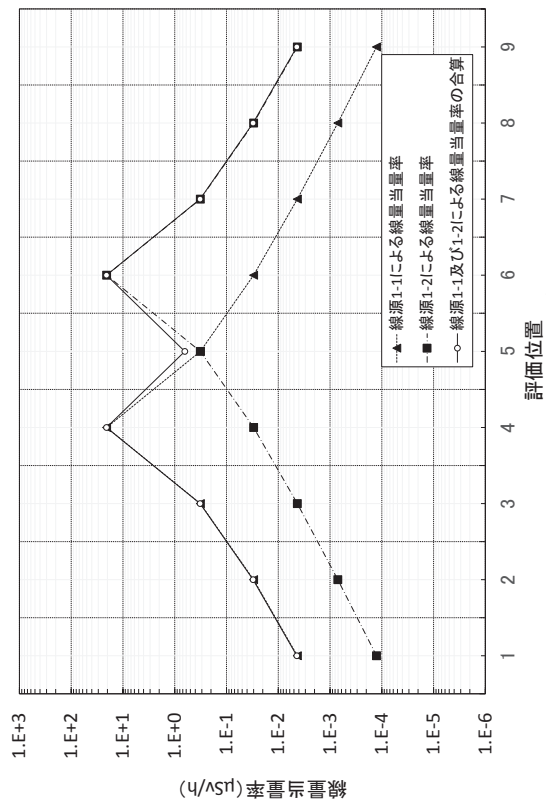
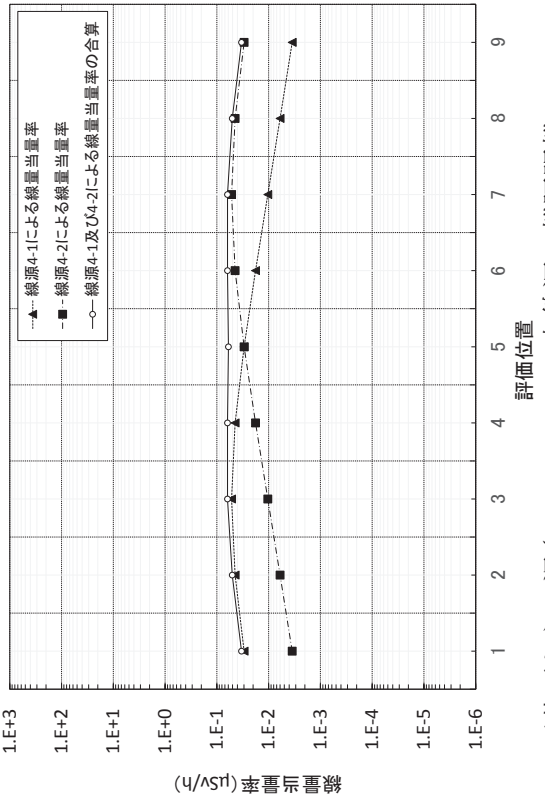
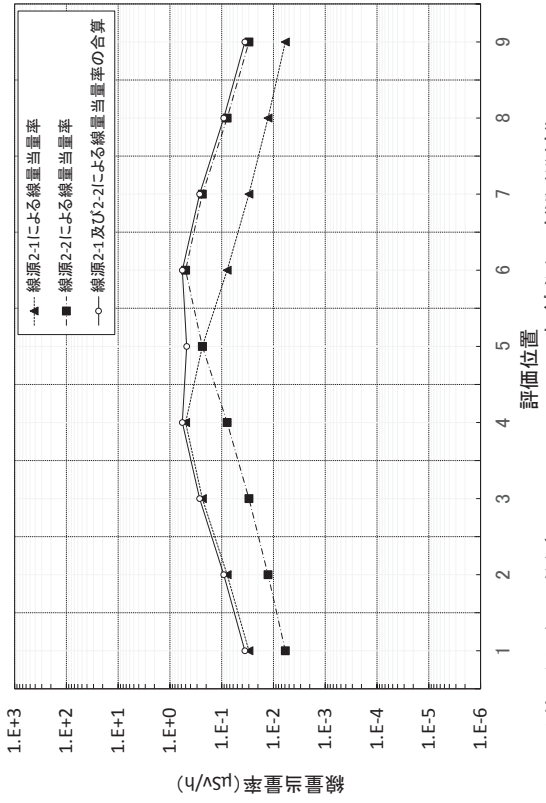


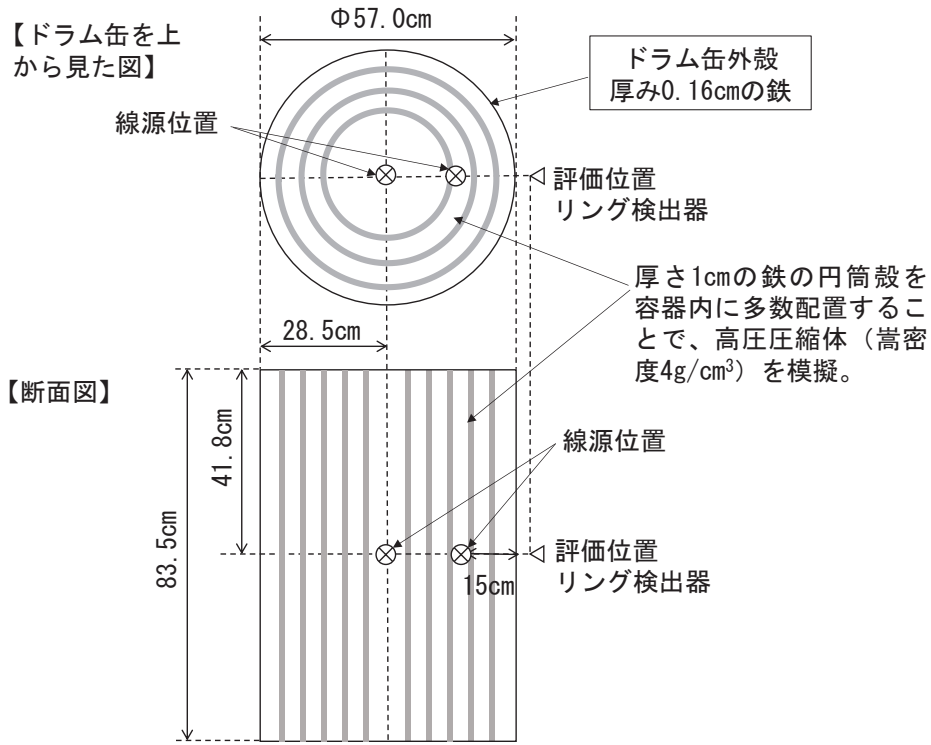
図 4.4 (2) 角型容器天井の線量当量率分布から容器内部の2つの点線源を確認する評価結果

—密度 0.5g/cm<sup>3</sup>、上面からの測定の結果—

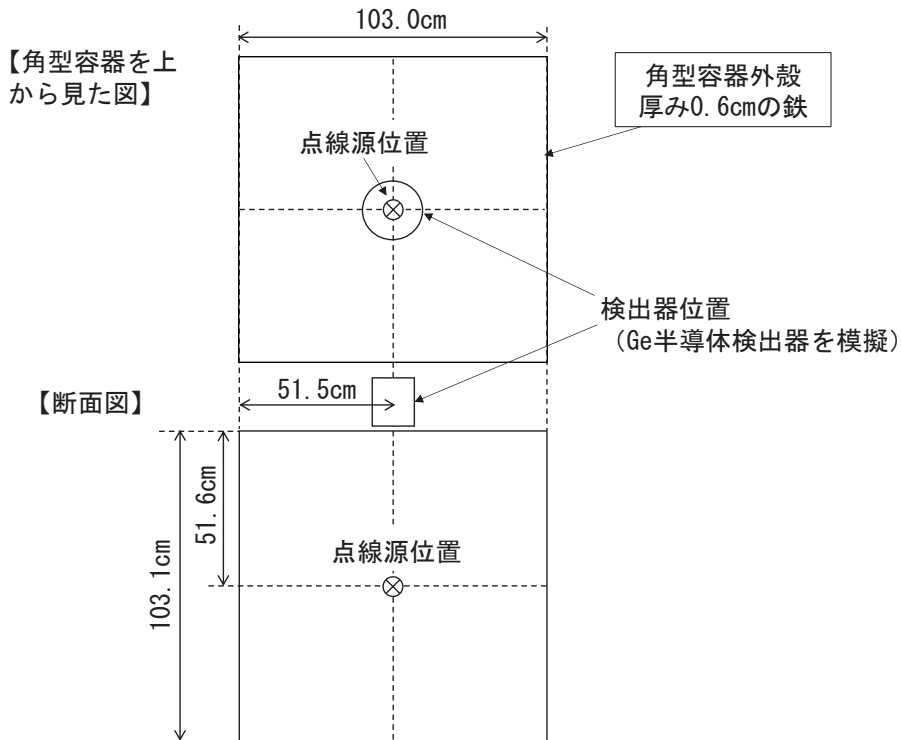
評価モデル	線源位置と評価位置	①点線源モデル 【角型容器の断面図】 ●:点線源位置 ▼:側面評価位置	①点線源モデル 【角型容器の断面図】 ●:点線源位置 ▼:側面評価位置	②面状線源モデル ■:面線源位置 ▼:側面評価位置
放射能量	総量: $2.9 \times 10^5$ (Bq)	①点線源モデル 【角型容器の断面図】 ●:点線源位置 ▼:側面評価位置	①点線源モデル 【角型容器の断面図】 ●:点線源位置 ▼:側面評価位置	②面状線源モデル ■:面線源位置 ▼:側面評価位置
線量当量率	①点線源モデル : 総量を2つの点線源で等分 ②線状線源モデル : 総量を4つの点線源で等分	①点線源モデル 【角型容器の断面図】 ●:点線源位置 ▼:側面評価位置	①点線源モデル 【角型容器の断面図】 ●:点線源位置 ▼:側面評価位置	②面状線源モデル ■:面線源位置 ▼:側面評価位置
評価結果	・側面評価位置1'~11'の算術平均値 ①点線源モデル : $1.3 \times 10^3$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ②線状線源モデル : $1.3 \times 10^3$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ・①と②の比 1.0倍	・側面評価位置1'~11'の平均値 ①点線源モデル : $3.9 \times 10^3$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ②線状線源モデル : $3.0 \times 10^3$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ・①と②の比 1.3倍	・側面評価位置1'~11'の平均値 ①点線源モデル : $4.0 \times 10^3$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ②面状線源モデル : $3.1 \times 10^3$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ・①と②の比 1.3倍	①点線源モデル : 総量を4つの点線源で等分 ②面状線源モデル : 総量を9つの点線源で等分

図 4.5 離隔距離のある複数の点線源を分布のある線源とした場合の測定誤差に係る評価モデルと評価結果 (密度  $2.5\text{g/cm}^3$  の角型容器)



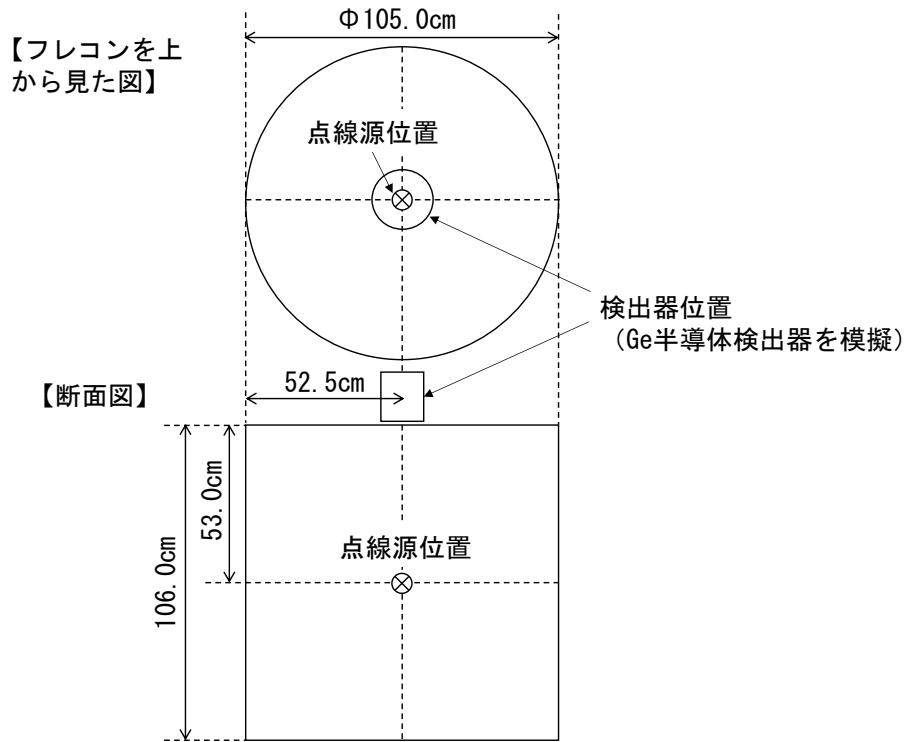


※1 1Bq 点線源が容器中心にある場合と、1Bq 容器表面から 15cm 程度内側にある場合を評価  
 図 4.6 (1) 複数の  $\gamma$  核種がある場合の散乱線の影響の評価モデル (200L ドラム缶)



※1 1Bq 点線源が容器中心にある場合と、1Bq 容器内に均一に分布した場合を評価  
 ※2 容器内の密度は、0.5g/cm<sup>3</sup> の場合と 2.5g/cm<sup>3</sup> の場合を評価

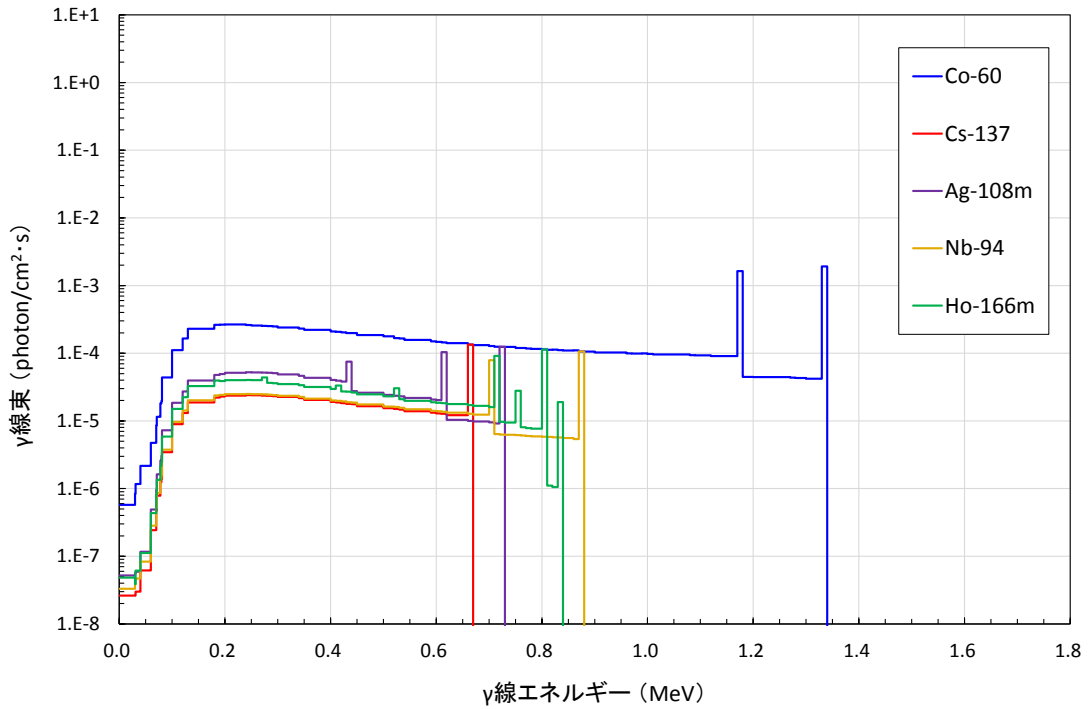
図 4.6 (2) 複数の  $\gamma$  核種がある場合の散乱線の影響の評価モデル (角型容器)



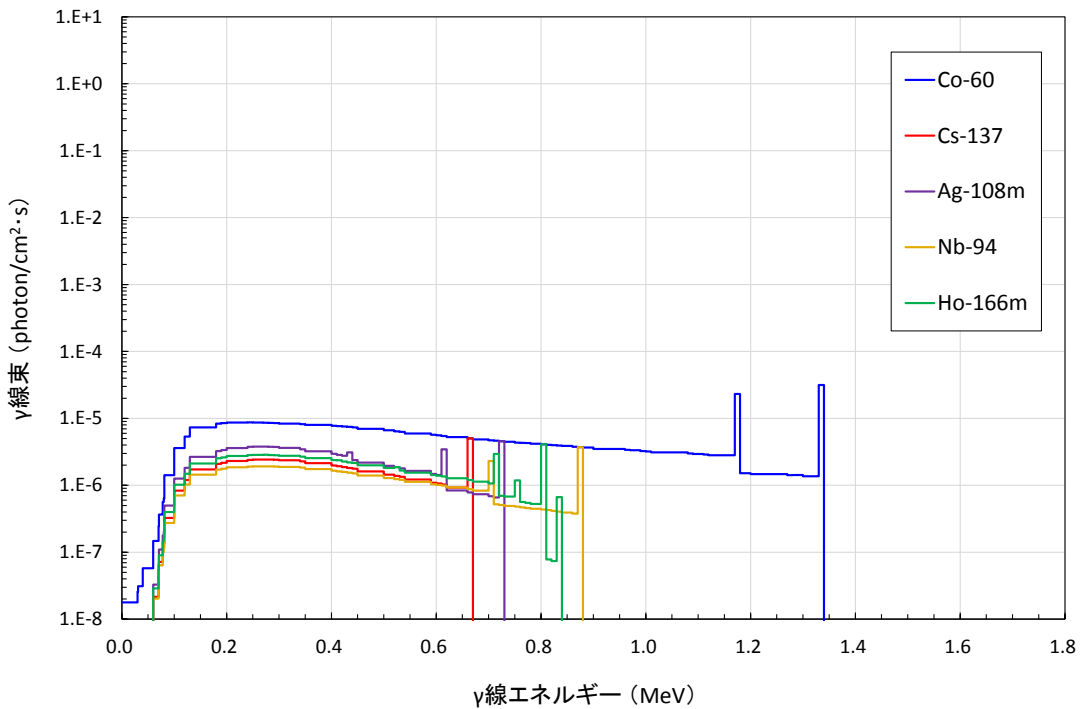
※1 1Bq 点線源が容器中心にある場合と、1Bq 容器内に均一に分布した場合を評価

※2 容器内の密度は、0.2g/cm<sup>3</sup>の場合と 1.7g/cm<sup>3</sup>の場合を評価

図 4.6 (3) 複数の  $\gamma$  核種がある場合の散乱線の影響の評価モデル (フレコン)



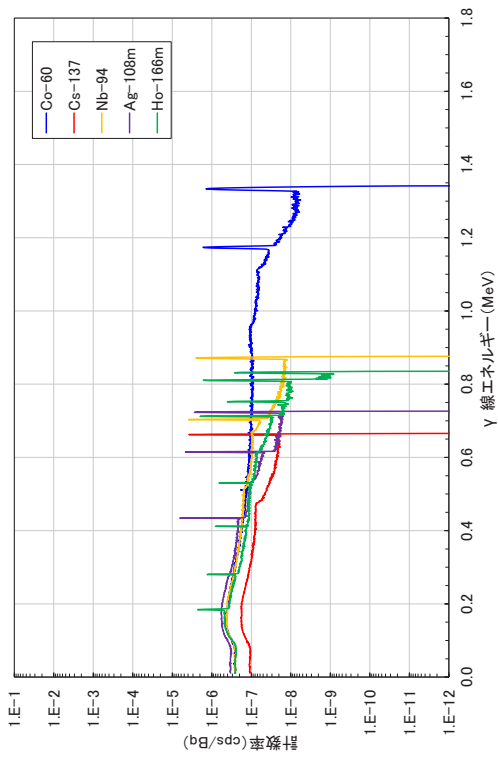
-200L ドラム缶表面から 15cm 内側に複数の  $\gamma$  核種が存在する場合の容器表面の  $\gamma$  線フラックス-



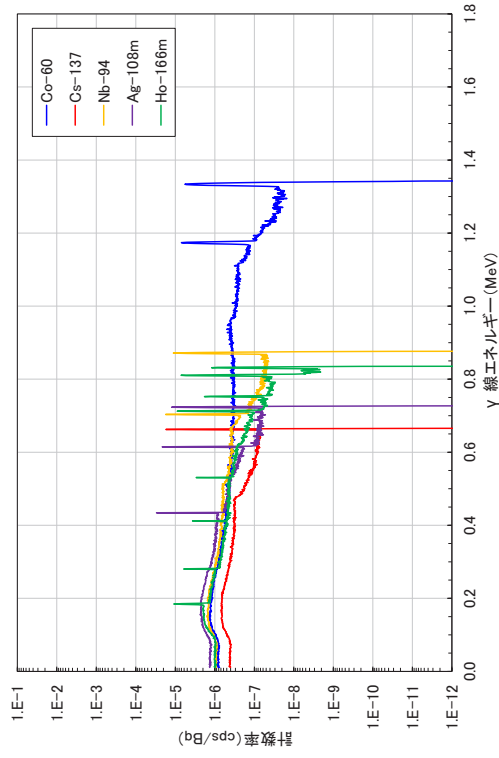
-200L ドラム缶中心に複数の  $\gamma$  核種が存在する場合の容器表面の  $\gamma$  線フラックス-

※1 Co-60 は 1Bq とし、その他の核種はピーク計数率が Co-60 の散乱線の計数率と同程度となるよう放射エネルギーを調整して  $\gamma$  線フラックスを計算した。

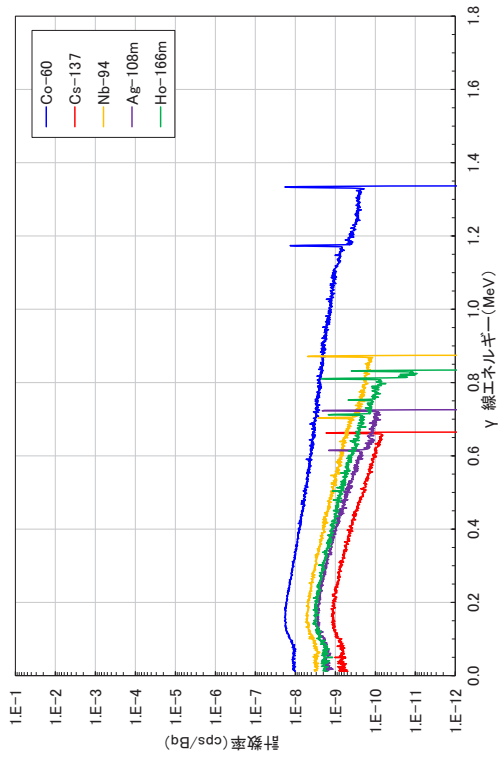
図 4.7 (1) 200L ドラム缶内に複数の  $\gamma$  核種がある場合の散乱線の影響  
—密度 4.0g/cm<sup>3</sup>、Co-60 を 1Bq とした時の結果—



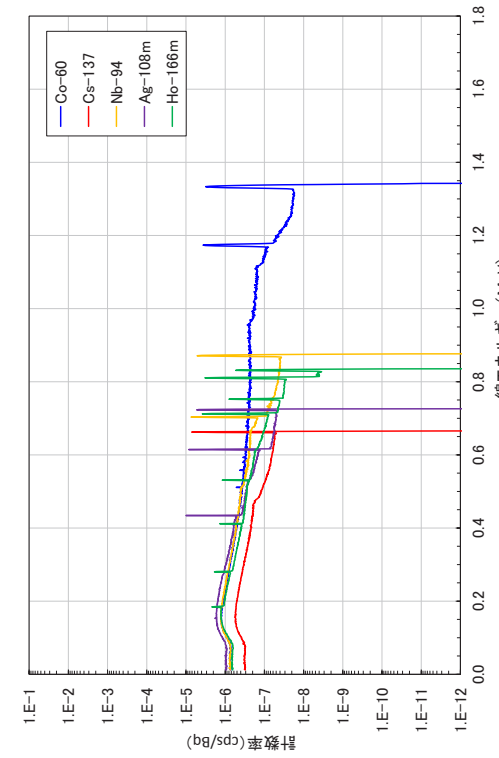
密度  $2.5\text{g/cm}^3$  の角型容器内に均一に  $\gamma$  核種が存在する場合



密度  $0.5\text{g/cm}^3$  の角型容器内に均一に  $\gamma$  核種が存在する場合

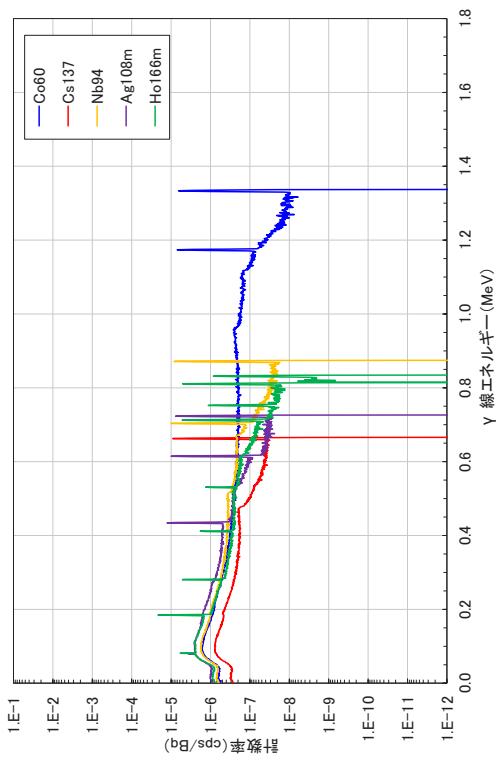


密度  $2.5\text{g/cm}^3$  の角型容器中心に  $\gamma$  核種が存在する場合

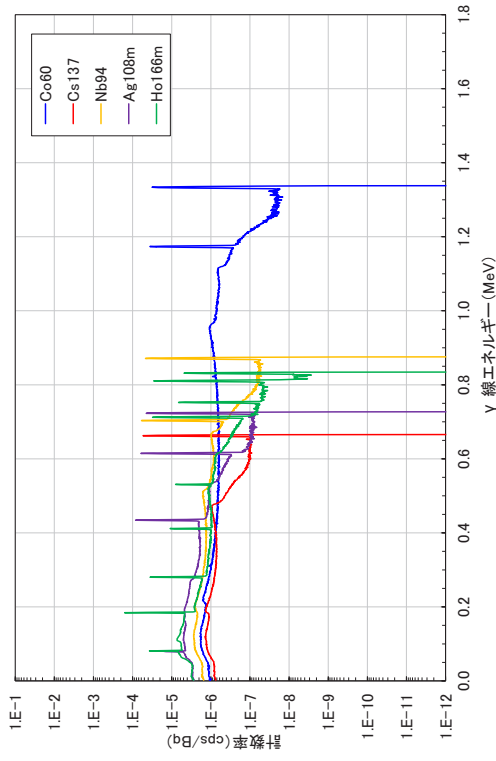


密度  $0.5\text{g/cm}^3$  の角型容器中心に  $\gamma$  核種が存在する場合

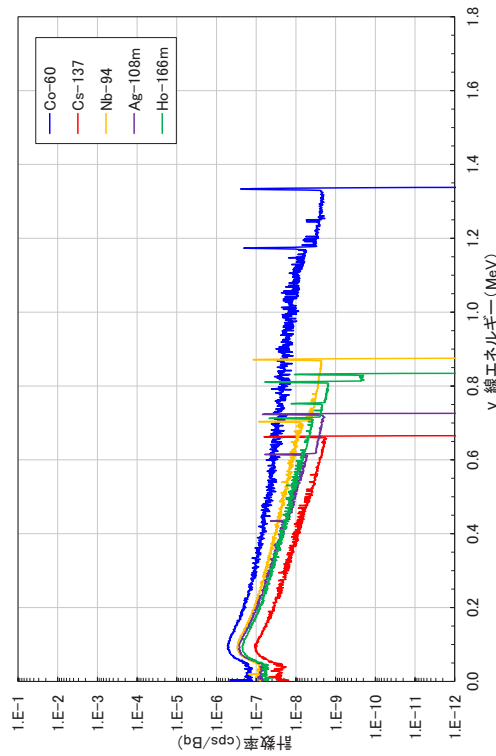
図 4.7 (2) 角型容器内に複数の  $\gamma$  核種がある場合の散乱線の影響—各核種の容器表面の計数率—



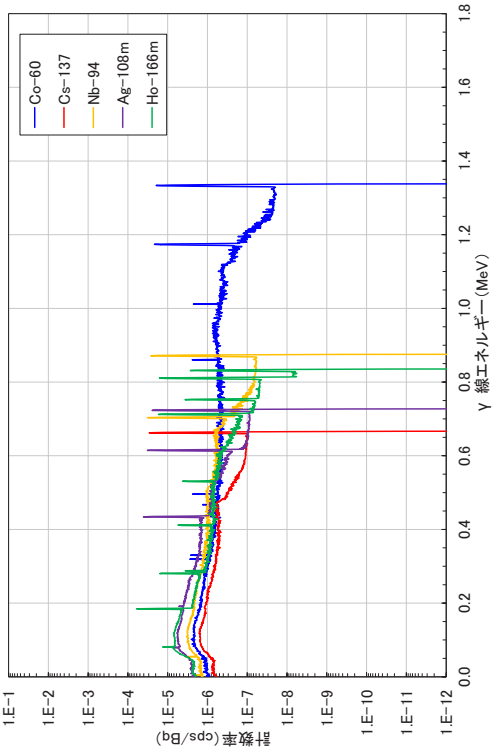
密度  $1.7\text{g/cm}^3$  のフレコン内に均一に  $\gamma$  核種が存在する場合  
(フレコン側面の  $\gamma$  線スペクトル)



密度  $0.2\text{g/cm}^3$  のフレコン内に均一に  $\gamma$  核種が存在する場合  
(フレコン上面の  $\gamma$  線スペクトル)

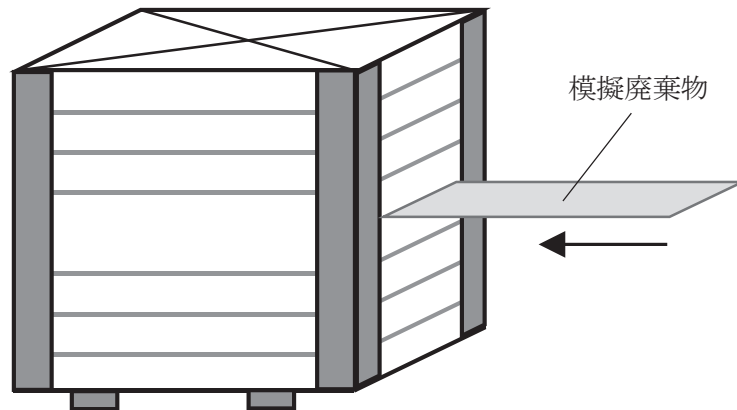


密度  $1.7\text{g/cm}^3$  のフレコン中心に  $\gamma$  核種が存在する場合



密度  $0.2\text{g/cm}^3$  のフレコン中心に  $\gamma$  核種が存在する場合

図 4.7 (3) フレコン内に複数の  $\gamma$  核種がある場合の散乱線の計数率の影響



※1 図中の容器体積は約  $1\text{m}^3$  である。容器には板状の模擬廃棄物が約 60 枚挿入されている。

図 4.8 参考としたクリアランスレベル測定装置の模擬測定対象物の概念図

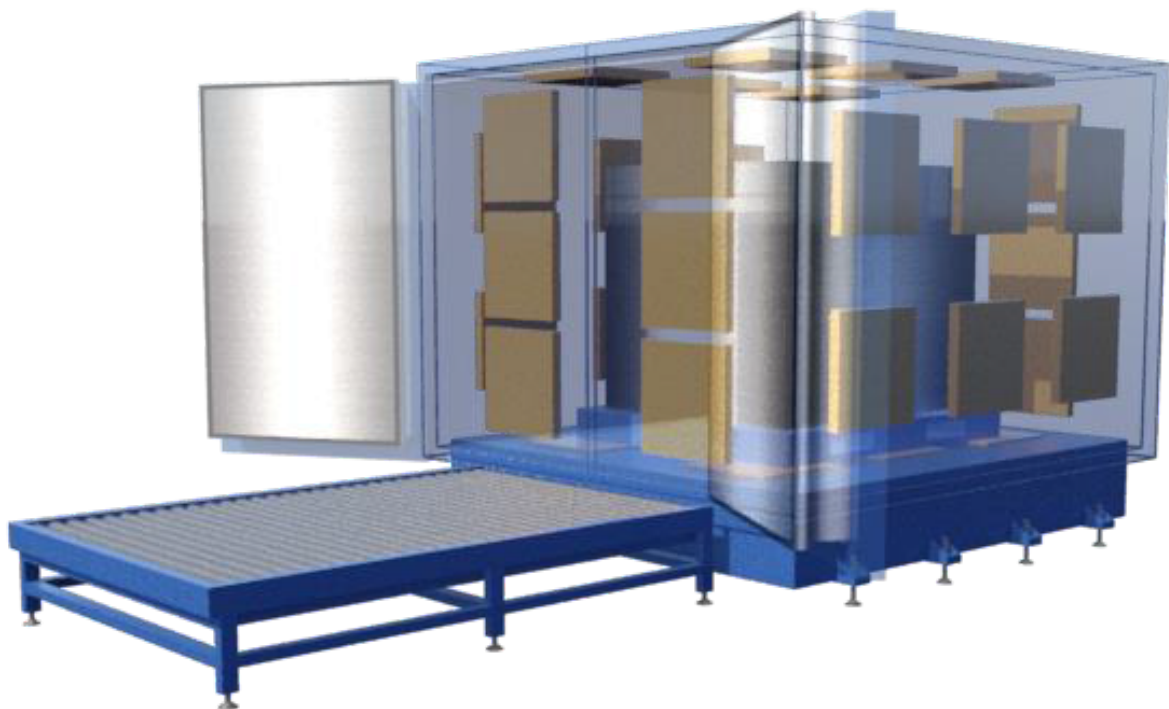


図 5.1 研究施設等廃棄物を対象とした非破壊外部測定装置の概念図（外観）

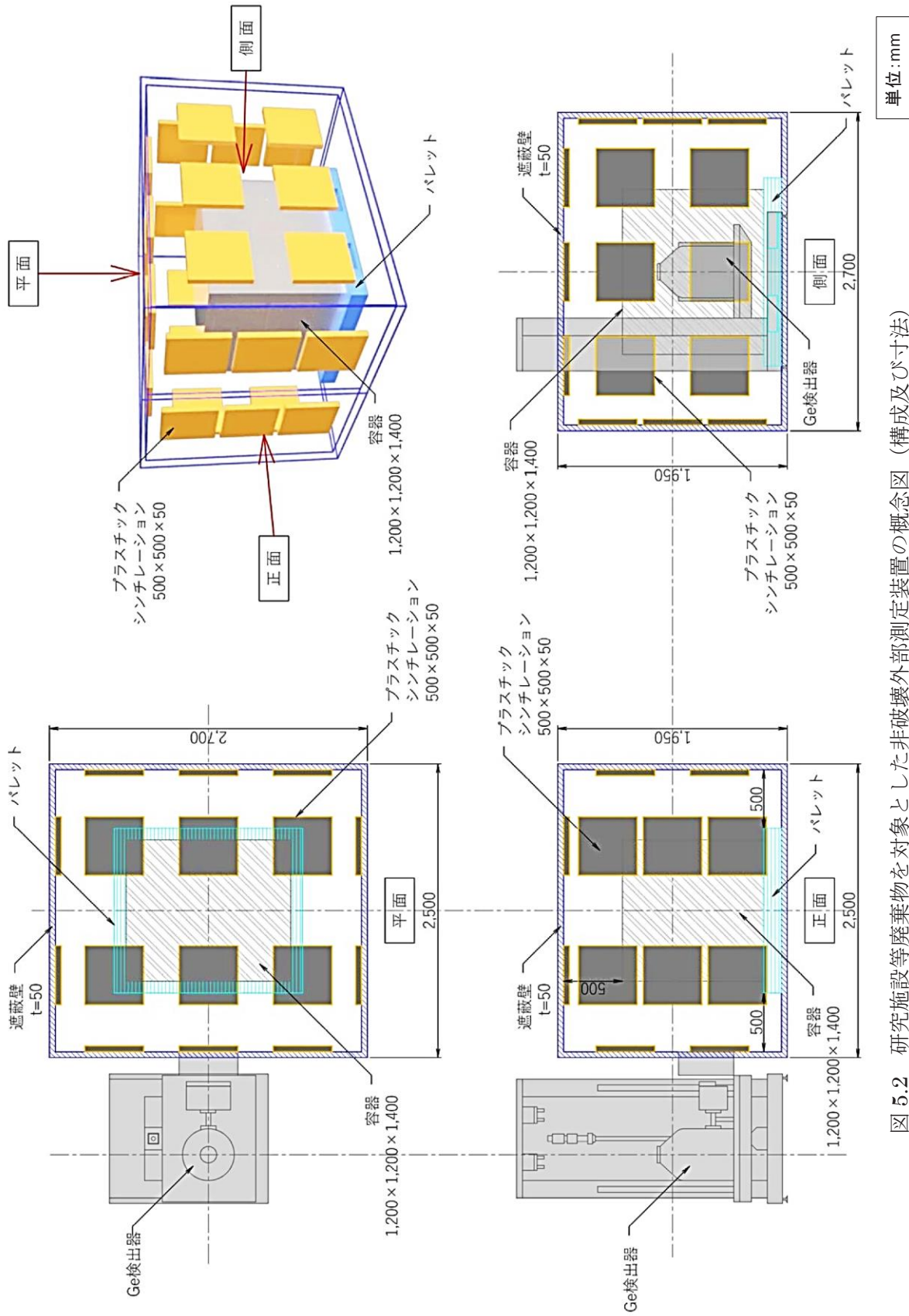


図 5.2 研究施設等廃棄物を対象とした非破壊外部測定装置の概念図 (構成及び寸法)

This is a blank page.



# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間は同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

