

JAERI-Tech
2000-034



JP0050351



廃棄物非破壊分析装置の性能評価試験

2000年3月

前田行市・小笠原賢亮・西沢市王

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

廃棄物非破壊分析装置の性能評価試験

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター安全試験部

前田 行市 · 小笠原 賢亮 · 西沢 市王

(2000年2月28日受理)

α 固体廃棄物中に含まれるプルトニウム量を把握するために廃棄物非破壊分析装置を燃料サイクル安全工学研究施設（NUCEF）に設置した。本装置は、パッシブガンマ線計測法により比較的低密度のカートンボックス、45ℓスチール缶及び200ℓスチール缶中の放射性同位元素を定量するものである。現実に廃棄される廃棄物は、その内容物が異なり、かつ、プルトニウムが偏在していることが想定されるため、廃棄物密度や線源の偏在を考慮して、廃棄物と検出器の位置、コリメータ開度を設定した。測定体系の設定後、検出限界を評価したところ、20分の測定により約8MBq のプルトニウムを10%の精度で定量でき、十分実用に耐えることが確認された。

Efficiency Evaluation Test of Waste Non-Destructive Analysis Device

Kouichi MAEDA, Kensuke OGASAWARA and Ichio NISIZAWA

Department of Safety Research Technical Support
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 28, 2000)

A device for non-destructive analysis of plutonium in alpha solid waste has been installed in NUCEF; Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility. The device has been designed to determine the amount of radio-isotopes in carton-boxes, 45 ℥ steel cans and 200 ℥ steel cans containing relatively low density waste. Considering the waste density and the heterogeneity of radio-sources, the proper distance between the detector and the waste, and the open degree of the collimator have been settled, because real waste may contain several kinds of material and the heterogeneity of radio-activity. It has been confirmed from the evaluation of the detect limit that plutonium of about 8MBq can be determined with the accuracy of 10% and the device may be proper for the practical application.

Keywords : NUCEF , Non-Destructive Analysis , α Solid Waste , Passive Gamma Rays Measuring Method , Plutonium , Carton Box , 45 ℥ Steel Can , 200 ℥ Steel Can

目 次

1.はじめに -----	1
2.試験 -----	2
2.1 試験の目的 -----	2
2.2 廃棄物NDA装置の概要-----	2
2.3 試験の概要-----	5
2.3.1 試験方法-----	5
2.3.2 測定方法-----	8
2.3.3 設定方法 -----	10
3.試験結果 -----	27
3.1 線減弱係数の設定 -----	27
3.2 測定体系の設定 -----	27
3.2.1 カートンボックス及び45ℓ缶 -----	27
3.2.2 200ℓ缶 -----	32
3.3 測定体系の評価 -----	36
3.3.1 測定器の特性 -----	36
3.3.2 測定体系の評価 -----	38
4.まとめ -----	73
謝辞 -----	74
参考文献 -----	74
添付資料-1 プログラム -----	75
添付資料-2 一次直線回帰式の評価 -----	79
添付資料-3 MVP入力データ-----	81

Contents

1. Introduction -----	1
2. Measurement -----	2
2.1 Purpose of Measurement -----	2
2.2 Outline of Waste NDA Device -----	2
2.3 Measurement Procedure -----	5
2.3.1 Test Method -----	5
2.3.2 Measurement Method -----	8
2.3.3 Setting Method -----	10
3. Result of Measurement Data -----	27
3.1 Setting of Linear Regression between Density and Linear Attenuation Coefficient ---	27
3.2 Setting of Measurement System -----	27
3.2.1 Carton Box and 45 ℥ Steel Can -----	27
3.2.2 200 ℥ Steel Can -----	32
3.3 Evaluation-----	36
3.3.1 Ge Detector Characteristic -----	36
3.3.2 Evaluation of Measurement System -----	38
4. Conclusion -----	73
Acknowledgment -----	74
References -----	74
Appendix- 1 Program -----	75
Appendix- 2 Evaluation of Linear Regression -----	79
Appendix- 3 MVP Input Data -----	81

1. はじめに

燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF : Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility) では、使用済燃料を用いた再処理試験、ウラン溶液を用いた臨界実験が行われており、また、プルトニウム溶液を用いた臨界実験の準備が進んでいる。これに伴い、 α 廃棄物が発生する。この α 廃棄物は、液体廃棄物においては減容・濃縮後貯槽に貯蔵し、固体廃棄物は容器に収納後保管することとしている。この α 固体廃棄物については、保管する前に廃棄物中の放射性物質の量を確認する必要がある。

現在NUCEFに設置してある廃棄物非破壊分析装置（以下、「廃棄物NDA装置」と言う）は、発生する α 固体廃棄物について容器毎に含有するプルトニウム量を確認するために設けられたものである。この廃棄物NDA装置は、ターンテーブル上に α 固体廃棄物容器を装着した上でゲルマニウム（Ge）検出器でガンマ線を検出し、廃棄物中のプルトニウム量を定量するパッシブガンマ線分析法の装置である。

廃棄物NDA装置を実用に供するため、廃棄物内容物別の密度－線減弱係数及び廃棄物容器毎に廃棄物－検出器間距離の設定、コリメータ開度の設定と検量線の設定を行い、装置の測定体系を決定した。また、測定体系の妥当性を評価し、検出限界を求めることによって実用性の確認を行った。本報告は、これらの廃棄物NDA装置の測定体系を決定するための試験結果をまとめたものである。

2. 試験

2.1 試験の目的

α 固体廃棄物は、放射能レベル区分で [A-1] 区分と [B-2] 区分に分類して管理することを放射線障害予防規定等で定めている。分類基準は、 α 核種の含有量として、1 容器当たり [A-1] 区分では 3.7 kBq 以上 3.7 MBq 未満、[B-2] 区分では、3.7 MBq 以上と区分している。また、[B-2] 区分であっても、1 容器当たりプルトニウム量が 1 g 未満でなければならないと定められている。この基準に従い、廃棄物 NDA 装置を使用して [A-1] 区分と [B-2] 区分に分別された廃棄物の 1 容器当たりのプルトニウム量を測定し、固体廃棄物管理を実施する。廃棄物 NDA 装置での検出限界以下である [A-1] 区分の廃棄物は、廃棄物拵出し元のデータで管理を実施する。本装置の実用化に先立って、模擬廃棄物（可燃及び難燃物）を想定して ^{60}Co 密封線源とプルトニウム密封線源を用いて測定体系を策定する。

2.2 廃棄物 NDA 装置の概要

(1) ハードウェアの概要

廃棄物 NDA 装置（写真-1 参照）は、以下の構成となっている。

- ① GMX型 Ge 検出器
上下及び左右コリメータ付
- ② メインアンプ、高圧電源及び ADC
- ③ マルチチャンネルアナライザ
- ④ 廃棄物 NDA 装置本体
ターンテーブル、回転及び上下方向動駆動部
- ⑤ シャッタ付透過線源 (^{133}Ba 密封線源 3.51 MBq 1995/6/28)
- ⑥ ターンテーブル上下軸速度 : 1 ~ 200 mm/分
- ⑦ ターンテーブル回転軸速度 : 0 ~ 10 rpm
- ⑧ 廃棄物 NDA 装置コントローラ
 - ・ ターンテーブル上下動制御
 - ・ ターンテーブル回転制御
 - ・ 吸収補正用透過線源のシャッタ開閉制御
 - ・ 原点、減速及び上限センサー制御
- ⑨ 制御用コンピュータ
廃棄物 NDA 装置コントローラと RS-232C で接続及びマルチチャンネルアナライザと GP-IB で接続

(2) 測定の概要

廃棄物中の放射能量を分析する方法は、次の 2 種類に大別できる。

- ・ アクティブ分析法 中性子又は、高エネルギーガンマ線等を廃棄物に照射して核反応を誘発させ発生する放射線を測定して放射能量を定量する。
- ・ パッシブ分析法 廃棄物中の放射性同位体から放出されるガンマ線又は、中性子線を廃棄物の外側から計測して放射能量を定量する。

現在、放射性廃棄物中の放射能測定においては、上記に大別した分析法のうち、パッシブガンマ線分析法が広く使用されているが、この分析法は、廃棄物容器内容物の密度分布が均一なこと及び放射能分布が均一であるという条件の基で行われているのが現状である。今回導入した廃棄物NDA装置は、透過線源を併用してパッシブガンマ線で分析することにより、廃棄物内容物と放射能量が不均一な状態でも精度良く放射能量が測定できる測定装置である。また、雑多な固体廃棄物中の主として可燃性及び難燃性の比較的低密度廃棄物の分析に適しており、標準線源を使用して相対測定を実施する。放射能量が不均一に混在している廃棄物の分析では、内容物によるガンマ線遮へい効果が一様でないため、検出されるガンマ線計数値が放射能量に比例しない。これを補正するために、内容物の自己遮へい効果を下記の①と②を組み合わせて測定し、廃棄物中の放射能量を③で定量する。この分析法では、1種類の透過線源のガンマ線エネルギーを使用するため、廃棄物中の放射能量算出は1核種のみとなる。

① ^{239}Pu (414 keV) の線減弱係数の決定

本試験で、密度の異なる模擬廃棄物を使用して、 ^{239}Pu (414 keV) の線減弱係数を求め一次直線回帰式を決定する。

② ^{239}Pu 検量線の決定

内容物の不均一差の補正を実施するために、廃棄物（容器）を回転及び上下方向駆動させながら、ガンマ線を測定する。また、放射能の偏在によるガンマ線計数値の変動を防止するために、検出器前面に左右及び上下のコリメータを設置して計数値変動を回避する。ただし、200ℓ缶は、高さがあるので、高さ方向をいくつかに分割して測定を実施するため、上下コリメータ開度を調節し、最適開度に設定する。カートンボックス（紙バケツ）や45ℓ缶では、200ℓ缶の高さの半分以下なのでガンマ線計数値の変動が無いものとして、上下コリメータ開度を全開とする。この測定体系を基にして、空の廃棄物容器毎にプルトニウム量が異なる密封線源を使用してプルトニウム重量当たりのガンマ線量を測定する。測定した計数は、バックグラウンドを差し引いた正味計数を使用して、一次直線回帰式にあてはめ、検量線を決定する。

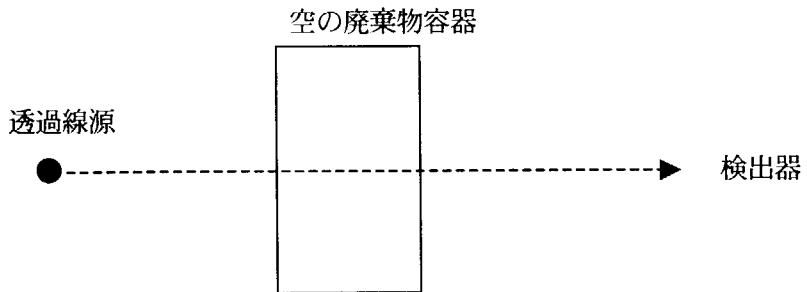
③ 実廃棄物の ^{239}Pu 重量算出

実廃棄物の重量W [g] と廃棄物容器容量V [cm³] とすると、①項で設定した密度－線減弱係数一次直線回帰式（a、b：一次直線回帰式係数）から線減弱係数 μ_a を下式で求める。

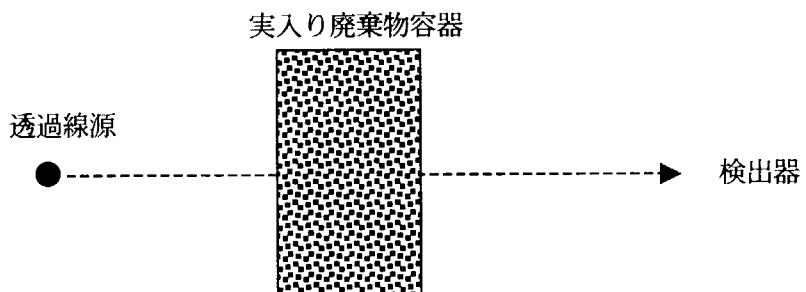
$$\mu_a = a \times (W/V) + b \quad [2.2-1]$$

内容物によるガンマ線遮へい効果を補正するため、透過線源 ^{133}Ba （356 keV）を用いて廃棄物の自己遮へい効果を補正する。補正方法は、次の手順で実施する。

i) 空の廃棄物容器を用いて吸収補正スペクトルを測定する。



ii) 廃棄物が入った廃棄物容器について ^{239}Pu （414 keV）と同時に透過線源からのガンマ線を測定する。



上記の i) 及び ii) で測定された計測値を以下の手順で計算し、補正係数を求める。

(a) ^{133}Ba の線減弱係数 (μ_t) の算出

$$\mu_t = - \{ \ln (I / I_0) \} / r_d \quad [2.2-2]$$

I : 実入り廃棄物容器測定での ^{133}Ba （356 keV）の計数率 (c p s)

I_0 : 空の廃棄物容器測定での ^{133}Ba （356 keV）の計数率 (c p s)

r_d : 廃棄物容器の直径 (cm)

(b) ^{239}Pu （414 keV）のエネルギーに対する吸収補正係数 (Ta) の算出

$$Ta = (I / I_0)^{(\mu_a / \mu_t)} \quad [2.2-3]$$

μ_t : ^{133}Ba の線減弱係数 ((a) で求めた値)

μ_a : ^{239}Pu (414 keV) の線減弱係数 (式 2.2-1 から算出)

(c) 自己遮へい効果 (吸収補正係数: CF) の算出⁽¹⁾

$$CF = - \{ 1n (Ta^K) \} / (1 - Ta^K) \quad [2.2-4]$$

Ta : 吸収補正係数 b) で求めた値

K : 補正因子 (K = 0.823)

(d) 実廃棄物の計測により ^{239}Pu [414 keV] の計数率 [I_{pu} cps] から式 2.2-4 を使用して CF を計算し、遮へい効果が無い計数率 (II_{pu}) に変換する。

$$II_{\text{pu}} = CF \times I_{\text{pu}}$$

変換した計数率 (II_{pu}) から②項で設定した検量線一次直線回帰式 (A, B : 一次直線回帰式係数) を用いて ^{239}Pu 重量を求める。

$$^{239}\text{Pu} \text{ 重量} = A \times (II_{\text{pu}}) + B \quad [2.2-5]$$

本装置では、全て計算機処理される。全体の処理フローを図 2.2-1 に示す。

本装置の計算機でプルトニウム量評価を実施する場合、計算結果は廃棄物容器 1 個毎のプリントアウトのみであり、管理上煩雑となる。添付資料-1 に示した Basic プログラムを使用してプルトニウム量を算出しファイル化して固体廃棄物管理に利用する。

2.3 試験の概要

2.3.1 試験方法

(1) 線減弱係数の設定

密度の異なる模擬廃棄物を数種類用意して、プルトニウム密封線源を使用し、密度と線減弱係数の関係を一次直線回帰式で設定する。試験手順は、以下の順で実施する。

- ① プルトニウム密封線源を廃棄物容器内に設置し、廃棄物がない状態で測定する。
- ② 密度の異なる廃棄物毎にプルトニウム密封線源を設置して測定する。
- ③ 廃棄物の密度と線減弱係数の関係を一次直線回帰式で設定する。
- ④ 一次直線回帰式の評価

- (2) 廃棄物容器毎の測定体系の設定
 - (a) カートンボックス及び 45 ℥ 缶

カートンボックス（写真－2参照）は、 $28\text{ cm}\phi \times 34.5\text{ cm}$ の大きさである。45ℓ缶（写真－2参照）は、 $34\text{ cm}\phi \times 50\text{ cm}$ の大きさであり、カートンボックスを黄色廃棄物容器に入れ、45ℓ缶に収納し、蓋を封缶する。45ℓ缶の収納レイアウトを図2.3-1に示す。45ℓ缶は、[B-2]区分の廃棄物を対象としている。本装置で測定する場合、カートンボックス入り黄色廃棄物容器を測定して、45ℓ缶に収納する。黄色廃棄物容器は、 $30\text{ cm}\phi \times 40\text{ cm}$ であり、カートンボックスと大きさはほぼ同等である。従って、廃棄物の上下方向を細かく分けて測定はしない。本装置では、廃棄物容器を一定の高さ（廃棄物容器の半分の高さ）まで上昇させ、その高さで廃棄物容器を回転（10 rpm）させてデータ収集を行うスライス測定を実施する。以下に示す測定手順で測定体系を設定する。

- ① 検出器－廃棄物間距離の設定
- ② 左右コリメータ開度の設定
- ③ 検量線の設定
- ④ 一次直線回帰式の評価
- ⑤ 測定体系確立後に、検出限界の設定
- ⑥ プルトニウム密封線源数種類を使用し、上下方向に線源位置を変更して測定精度に及ぼす影響を確認

(b) 200ℓ缶

200ℓ缶（写真－2参照）は、 $56.7\text{ cm}\phi \times 89\text{ cm}$ であり、カートンボックスまたは45ℓ缶の高さよりもはるかに高い。このため、上記に示したスライス測定とドラム缶を一定の速度で回転させながら上昇させ、この上昇時間だけデータ収集を行うスパイラル測定のどちらかを選択するために両測定方法の体系を設定し、測定精度の確認を実施してから測定方法を決定する。測定方法の決定のため、以下の測定手順で体系を設定する。

- ① 検出器－廃棄物間距離の設定（スライス測定体系）
- ② 左右コリメータ開度（スライス測定体系）及び上下コリメータ開度（スライス測定体系とスパイラル測定体系）の設定
- ③ 検量線の設定（スパイラル測定とスライス測定）
- ④ 一次直線回帰式の評価
- ⑤ 検出限界の設定
- ⑥ 測定時間の設定（スパイラル測定とスライス測定）
- ⑦ プルトニウム密封線源数種類を使用し、上下方向に線源位置を変更して測定精度に及ぼす影響を確認

(3) 模擬廃棄物の想定

廃棄物収納容器毎の模擬廃棄物を以下の要領で想定する。

(a) カートンボックス

これまでに発生した β ・ γ 固体廃棄物の内容物を参照し、以下のように模擬廃棄物を設定する。

(1) 赤カートンボックス

赤カートンボックスは、可燃の固体廃棄物を廃棄する容器である。模擬廃棄物は、単体及び[濡ウエス+布手袋]の混合廃棄物を設定する

- ・紙 : 模擬廃棄物[1] ウエス (粗く入れた廃棄物 : 密度粗)
- ・紙 : 模擬廃棄物[2] ウエス (密に入れた廃棄物 : 密度密)
- ・布 : 模擬廃棄物[3] 手袋
- ・濡ウエス+布手袋 : 模擬廃棄物[4]

(2) 白カートンボックス

白カートンボックスは、不燃の固体廃棄物を廃棄する容器である。本装置は、第2.2節(2)に示したように不燃の固体廃棄物のうち比較的低密度廃棄物を測定対象とする。実廃棄物では、グローブ、ゴム、Oリング、平バンド、塩化ビニール等の廃棄物を単独又は、混合して白カートンボックスに収納して廃棄する。模擬廃棄物は、グローブ単体の廃棄物とする。

- ・グローブ : 模擬廃棄物[5]

(b) 45ℓ缶

45ℓ缶は、カートンボックスの模擬廃棄物と同様な廃棄物とする。

(c) 200ℓ缶

平成10年12月現在の α 廃棄物は、可燃1缶及び不燃6缶発生している。それぞれの廃棄物の内容物及び廃棄物重量を以下に示す。これらの廃棄物は、ポリエチレン内容器に入れて、200ℓ缶に収納する。

- ・可燃 : ポリエチレン、紙、布手、酢ビ、ゴム手、木片 = 1缶 [56 kg]
- ・不燃 : セメント固化物、ガラス、油かたまる君固化物 = 1缶 [106 kg]
- 塩化ビニール = 1缶 [48 kg]
- ガラス = 1缶 [49 kg]
- ガラス、セメント = 2缶 [169 kg, 61 kg]
- ステンレス = 1缶 [42 kg]

上記に示したように、多種多様の廃棄物が存在するが、ここでは、本装置で測定する模擬廃棄物を可燃廃棄物とし、[ウエス+布手袋]の混合物とする。

2.3.2 測定方法

(1) 密封線源

① ^{60}Co 密封線源

468.9 kBq (1995/6/21 現在) の ^{60}Co 密封点線源を使用

② プルトニウム密封線源

本試験で使用するプルトニウム密封線源は、酸化プルトニウムを酸化ビスマスで固めたペレット状の線源をSUSキャップセルで覆ったものである。この線源の大きさは、 $\phi 17.4\text{ mm} \times \text{高 } 19.2\text{ mm}$ の円柱であり、使用したプルトニウム量及び同位体重量比を以下に示す。プルトニウム密封線源の概略図を図2.3-2に示す。

プルトニウム密封線源中のプルトニウム重量

密封線源	1mg-Pu	5mg-Pu	10mg-Pu	20mg-Pu (5個)			
プルトニウム重量[mg]	1.1158	4.8007	10.9433	20.2352	20.4456	19.1602	19.974

プルトニウム同位体組成

プルトニウム同位体	238	239	240	241	242
重量比[%]	0.1218	75.7691	21.7412	1.6421	0.7258

本装置で計測される α 廃棄物は、第1.1節で述べたように[A-1]区分の廃棄物であり、プルトニウム量が37 kBq以上37 MBq未満である。上記に示した重量比を使用して放射能量の計算結果を表2.3-1に示す。上限値37 MBqは、ほぼ20 mg-Pu密封線源に相当する。

試験を実施するにあたり、線源を容器内に正確に配置するため、ガンマ線の減衰効果に影響を及ぼさない段ボールを使用する。kartonボックスでは、縦17 cm×横18.5 cm×高14 cmの段ボール箱をkartonボックス内に置いて線源位置を確定する。線源位置は、中心を基準に最外周まで2 cm単位で分割する。また、200ℓ缶では、kartonボックスの場合と同様に段ボールで線源位置を確定し、中心から最外周まで5 cm単位で分割する。kartonボックスと200ℓ缶の線源位置を図2.3-3に示す。

(2) 密度-線減弱係数

第2.3.1節①項で設定した5種類の模擬廃棄物を巾22 cm×横23 cm×高30.5 cmの段ボール箱に収納し、プルトニウム密封線源を使用して線減弱係数を設定する。測定概略図を図2.3-4に示す。

(3) 廃棄物-検出器間距離

廃棄物収納物は、ターンテーブルで固定されているので検出器を移動して廃棄物-検出器間距離を設定する。

(1) カートンボックス

最低距離が50cmなので、この距離から10cm単位で距離を長くし70cmまで3点実施する。廃棄物は、廃棄物なし、布手袋（廃棄物密度小）及びグローブ（廃棄物密度大）の3種類で実施する。

(2) 200ℓ缶

最大距離が100cmなので、この距離から10cm単位で距離を短くし80cmまで3点実施する。

(4) コリメータ開度

(a) カートンボックス

上下コリメータの開度は、廃棄物収納物の高さ方向（カートンボックス：34.5cm、45ℓ缶用内容器である黄色廃棄物容器：40cm高）全体をカバーするために、全開（11.8cm）とする。左右コリメータの開度については、全開（12cm）から徐々に狭めて最適値を求める。なお、左右コリメータの開度決定に際しては、廃棄物を布手袋として開度を決める。測定概略図を図2.3-5に示す。

(b) 200ℓ缶

(1) 左右コリメータ開度

最初に上下コリメータ開度を全開とし、200ℓ缶の中心からポリエチレン内容器内側侧面まで線源を移動して、左右コリメータ開度を全開から徐々に狭めて計数率測定を行い、最適開度を決定する。廃棄物は、可燃廃棄物（ウエス+布手袋）で実施する。

(2) 上下コリメータ開度

i) スライス測定

左右コリメータ開度を決定した時点で、スライスの分割数により、上下コリメータ開度が決定される。分割数は、1分割から3分割までの3つとする。分割別の測定概略図を図2.3-6に示す。廃棄物は、可燃廃棄物（ウエス+布手袋）を使用する。

ii) スパイラル測定

設定した左右コリメータ開度を使用して、上下コリメータ開度を1cmから1cm単位で開放する。廃棄物は、可燃廃棄物（ウエス+布手袋）を使用する。

(5) 検量線

空の廃棄物容器（廃棄物は収納しない）を使用し、廃棄物容器中央にプルトニウム密封線源を配置して、計測することにより検量線を作成する。

(6) 測定精度に及ぼす影響の確認

カートンボックスと45ℓ缶は、布手袋とグローブの模擬廃棄物とし、また、200ℓ缶は、[ウエス+布手袋] の模擬廃棄物を使用し、プルトニウム線源を分散して配置し、線源の

偏在による測定精度に及ぼす影響を確認する。

2. 3. 3 設定方法

(1) 密度－線減弱係数

廃棄物中の放射能の γ 線エネルギー線減弱係数は、実廃棄物の内容物を正確に把握することが困難なため、測定では求められない因子である。従って、線減弱係数は、実廃棄物を模擬した模擬廃棄物試験体を用いて、式2.2-2を使用し、密度別の線減弱係数を求める。本測定では、図2.3-3に示す段ボール箱に模擬廃棄物を収納して測定を実施する。式2.2-2の r_d は22cmを使用する。密度と線減弱係数の関係を一次直線回帰式で設定する。設定した回帰式は、添付資料-2⁽²⁾に基づいて評価する。

(2) 廃棄物－検出器間距離

廃棄物－検出器間距離については、廃棄物中心での計数と最外周方向に線源を移動した時のそれぞれの位置での計数との相対変化を以下の式で求め、この値が10%以下となるように設定する。

$$\text{相対比 (\%)} = \left[\frac{B}{A} - 1 \right] \times 100 \quad [2.3-1]$$

ただし

A : 中心の線源計数（平均値）

B : 線源位置の計数（平均値）

なお、求めた相対比 (%) の標準偏差は、以下の式で求める。

$$\text{標準偏差} = \left[\frac{B}{A} \right] \sqrt{\left[\frac{\sigma_A}{A} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_B}{B} \right]^2} \quad [2.3-2]$$

ただし

σ_A : 中心の線源計数誤差

σ_B : 線源位置の計数誤差

(3) コリメータ開度

① カートンボックス

コリメータ開度については、廃棄物中の線源偏在に伴う計数率の誤差を少なくすることを考慮して、廃棄物中心位置での線源強度と最外周近傍の線源位置での測定強度がほぼ同じとなるように開度幅を決定する。相対比及び標準偏差は、上記で示した式2.3-1及び式2.3-2

の計算式で決定する。

② 200ℓ缶

左右コリメータ開度に関して、上記に示した式2.3-1及び式2.3-2を使用し、廃棄物中心位置での線源強度と最外周近傍の線源位置での測定強度がほぼ同じとなるように開度幅を決定する。上下コリメータ開度幅は、 ^{60}Co 密封線源を使用し、上記に示した相対比と標準偏差により設定する。その後、プルトニウム密封線源をばらばらに配置して、計算された ^{239}Pu 量と挿入した ^{239}Pu 量の比率から最適な開度を決定する。

(4) 検量線

プルトニウム密封線源を使用し、検量線を一次直線回帰式で設定する。プルトニウム密封線源は、円柱形状をしており、自己遮へいにより減衰効果があるので、この減衰効果を計算コード「連続エネルギーモンテカルロコード：MVP」で評価する。この減衰効果を検量線の一次直線回帰式に反映する。設定した回帰式は、添付資料-2⁽²⁾に基づいて評価する。

(5) 測定精度に及ぼす影響の確認

廃棄物容器内に線源をばらばらにおいて測定し、この測定データから検量線一次回帰式を使用して、プルトニウム量を算出する。計算値と線源量を比較して測定精度を評価する。

表2.3-1 重量比別の放射能量

プルトニウム 質量数	半減期[日]	同位体組成別の単位重量当たり の放射能量[MBq/mg]		比率[%]	比率別の単位重量当たり の放射能量[MBq/mg]	1mg-Pu密封線源の 同位体別重量[mg]		同位体別の 放射能量[MBq]
		6.44E+02	7.84E-01			1.36E-03	1.07E-03	
238	3.15E+04	6.44E+02	0.1	7.84E-01	1.36E-03	1.36E-03	1.07E-03	
239	8.91E+06	2.27E+00	75.8	1.72E+00	8.45E-01	8.45E-01	1.45E+00	
240	2.41E+06	8.36E+00	21.7	1.82E+00	2.43E-01	2.43E-01	4.41E-01	
241	2.07E+08	9.69E-02	1.6	1.59E-03	1.83E-02	1.83E-02	2.91E-05	
242	1.38E+08	1.44E-01	0.7	1.05E-03	8.10E-03	8.10E-03	8.49E-06	
				100.0	合計	1.12E+00	1.90E+00	
NUCEFに輸送されるMOX燃料の放射能量								
プルトニウム 質量数	半減期[日]	同位体組成別の単位重量当たり の放射能量[MBq/mg]		比率[%]	比率別の単位重量当たり の放射能量[MBq/mg]	1mg-Puに換算した 同位体別重量[mg]		同位体別の 放射能量[MBq]
		6.44E+02	8.07E+00			1.40E-02	1.13E-01	
238	3.15E+04	6.44E+02	1.3	8.07E+00	1.40E-02	1.40E-02	1.13E-01	
239	8.91E+06	2.27E+00	63.2	1.43E+00	7.05E-01	7.05E-01	1.01E+00	
240	2.41E+06	8.36E+00	24.5	2.04E+00	2.73E-01	2.73E-01	5.58E-01	
241	2.07E+08	9.69E-02	6.3	6.07E-03	6.99E-02	6.99E-02	4.24E-04	
242	1.38E+08	1.44E-01	4.4	6.29E-03	4.86E-02	4.86E-02	3.06E-04	
				99.5	合計	1.11E+00	1.68E+00	
						2.20E+01	3.75E+01	

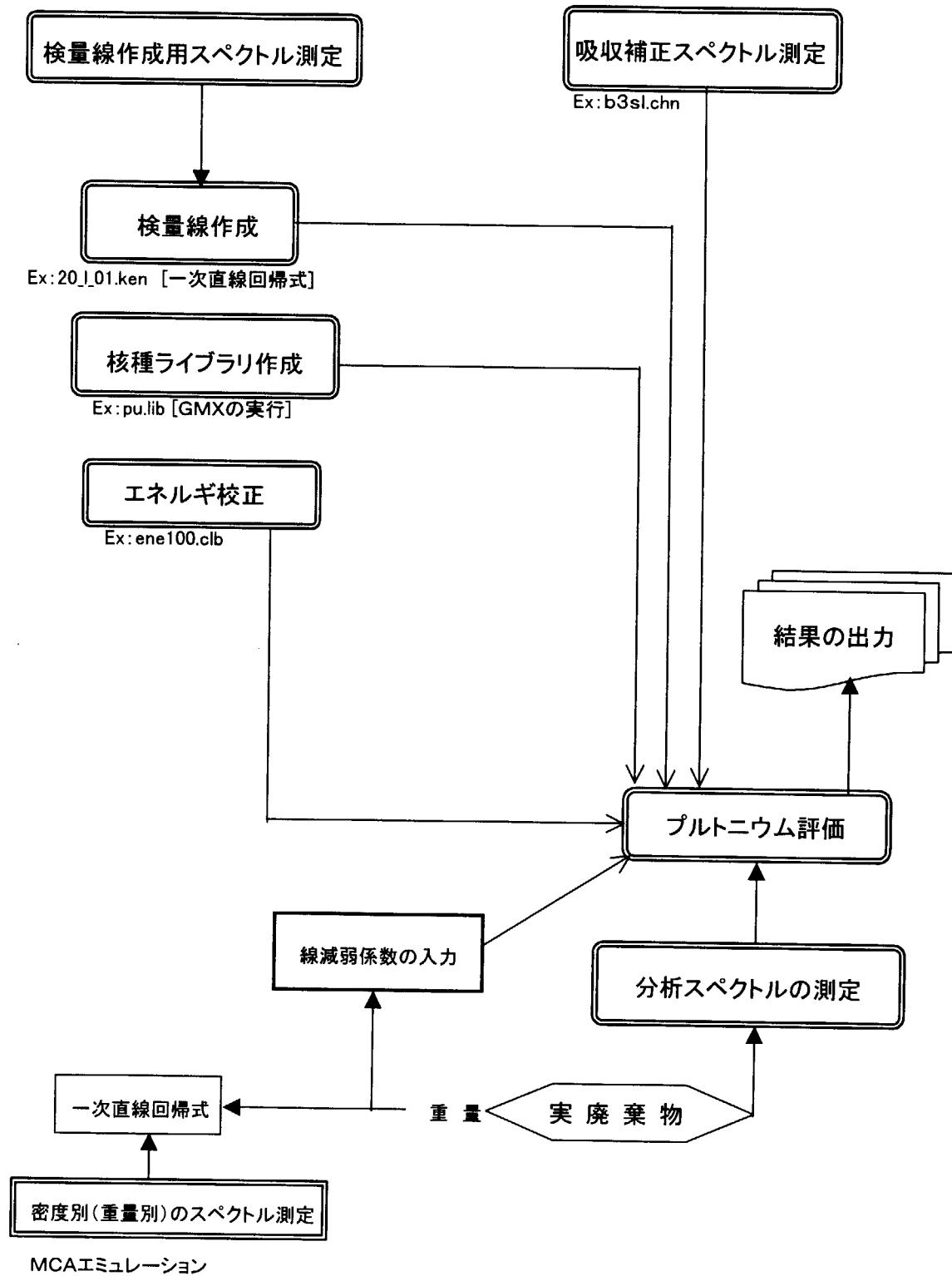


図2. 2-1 「廃棄物NDA装置」データ処理フロー

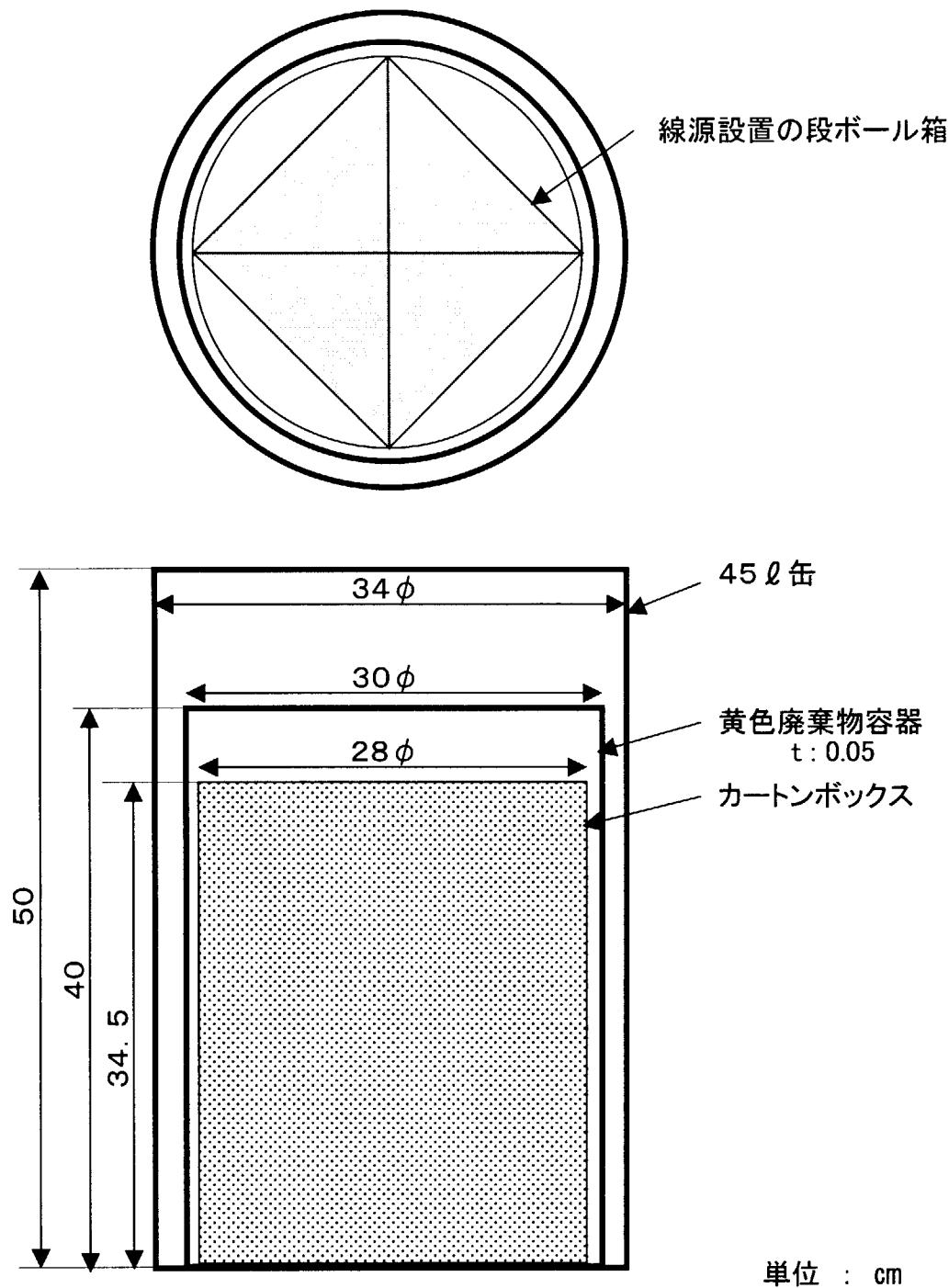
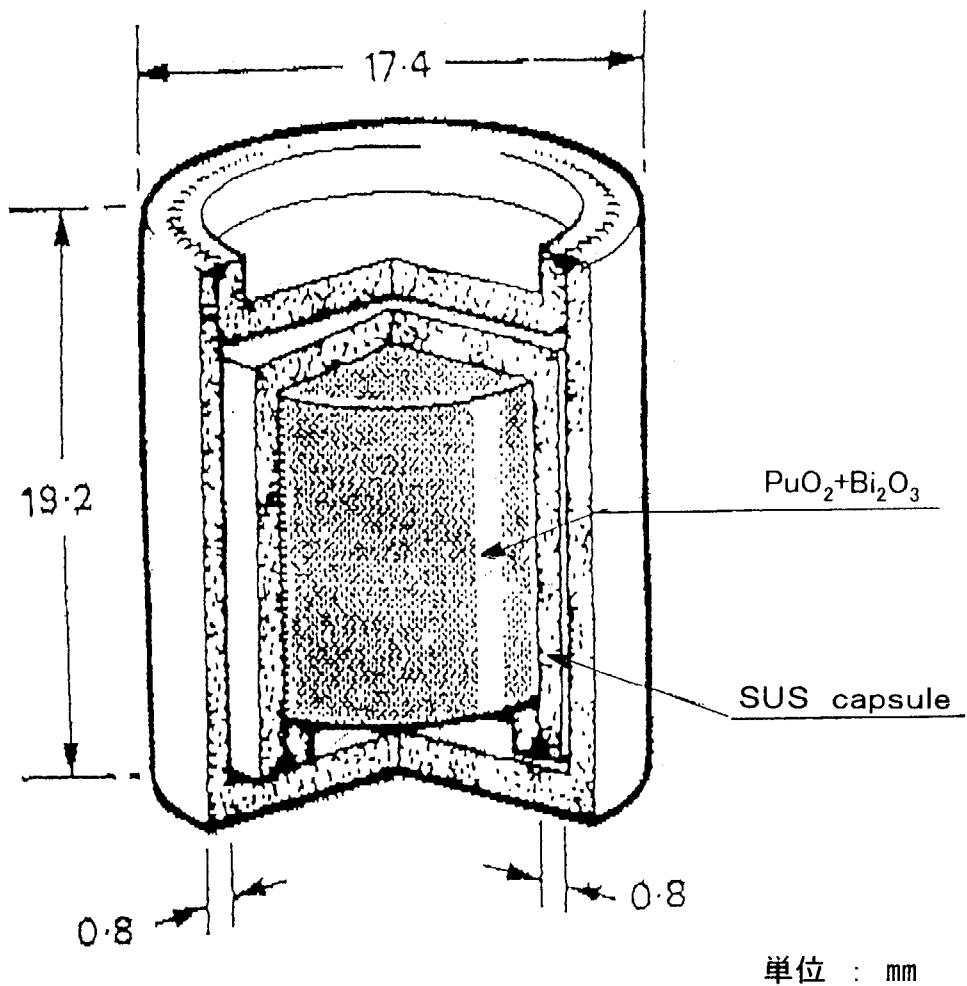


図2. 3-1 収納レイアウト

(カートンボックス、45ℓ缶)



単位 : mm

図2.3-2 Pu密封線源の概略図

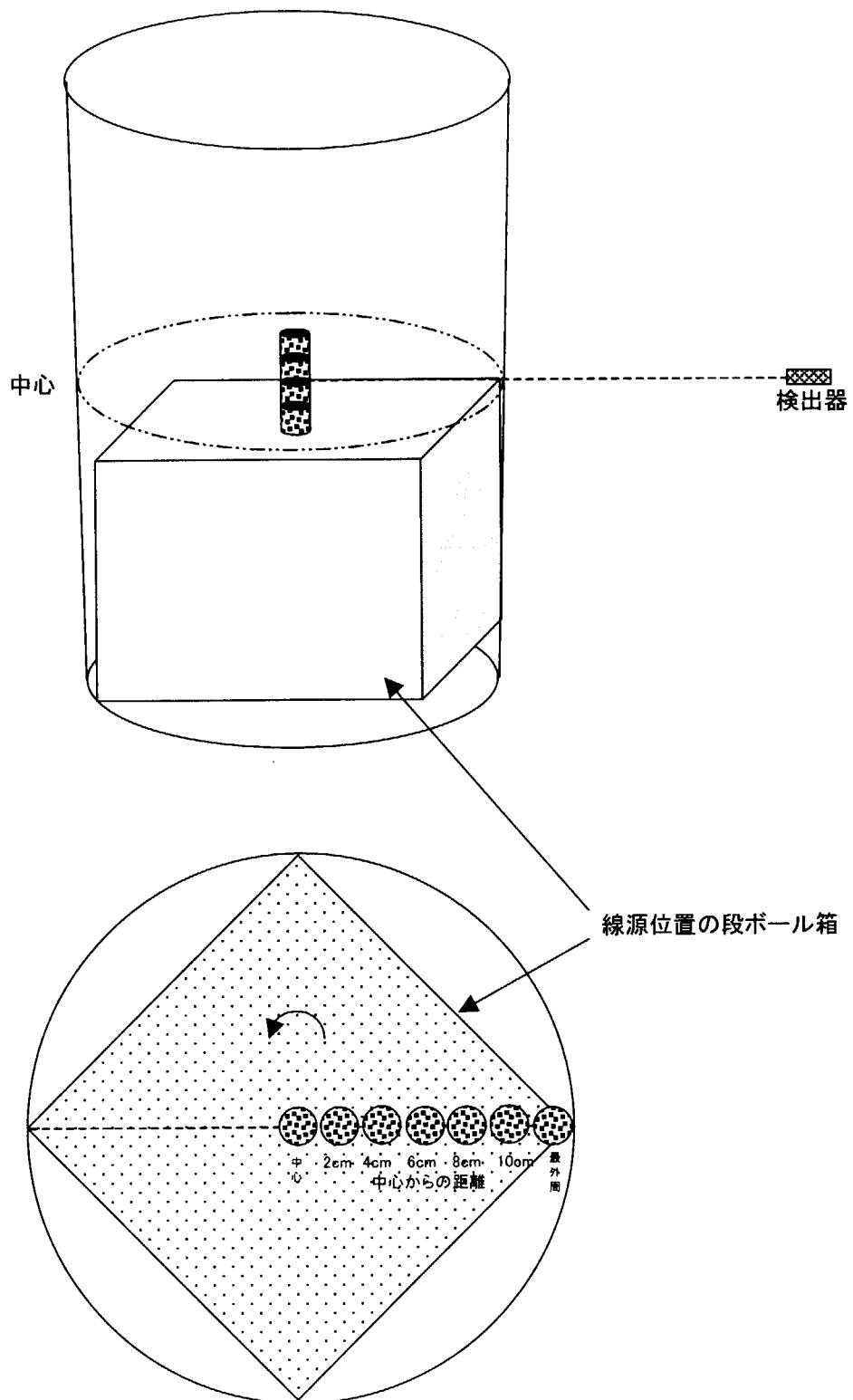


図2. 3-3 測定に伴う線源位置 (1/2)
(カートンボックス、45ℓ缶)

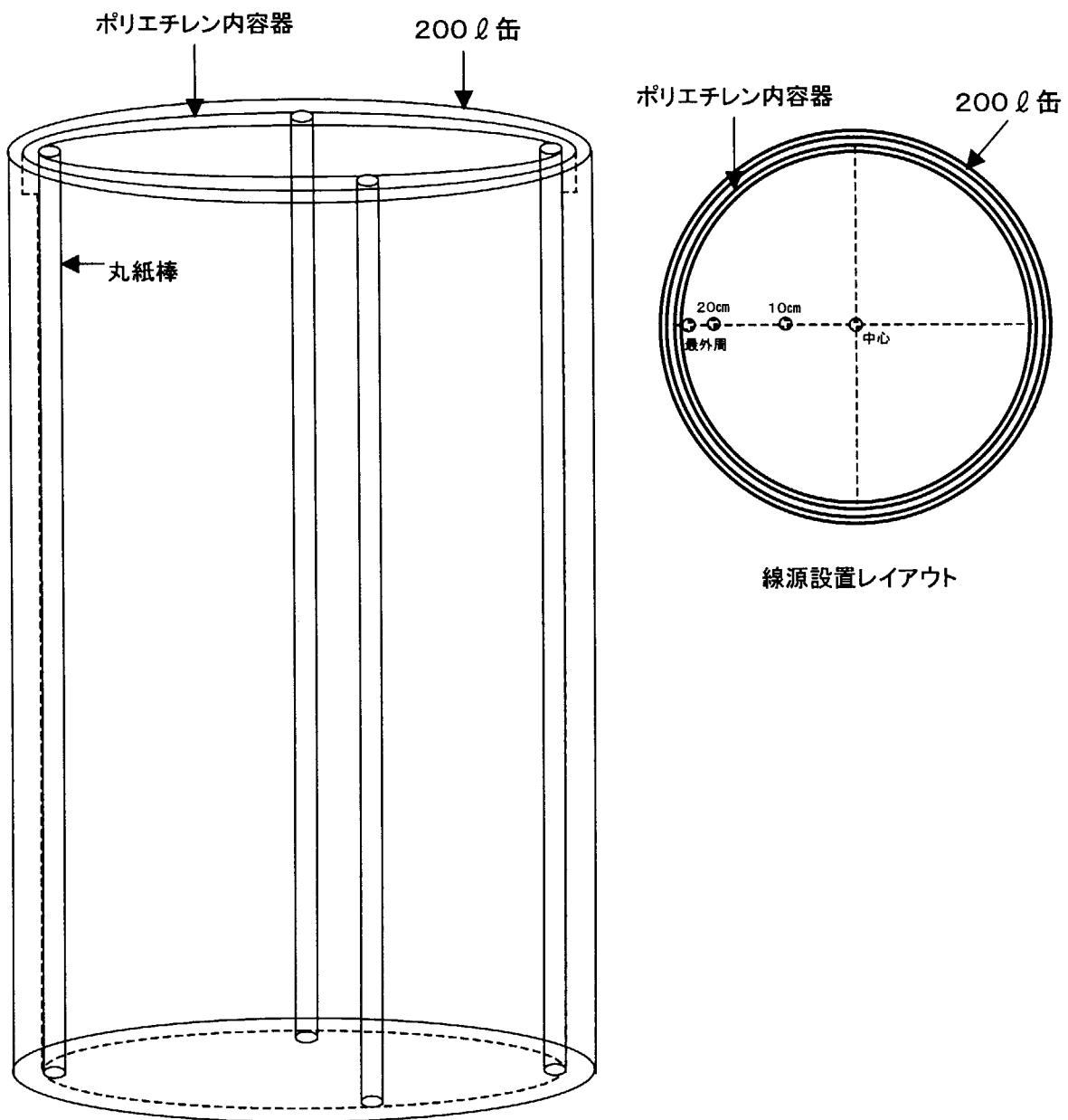


図2. 3-3 測定に伴う線源位置 (2/2)
(200 ℥ 缶)

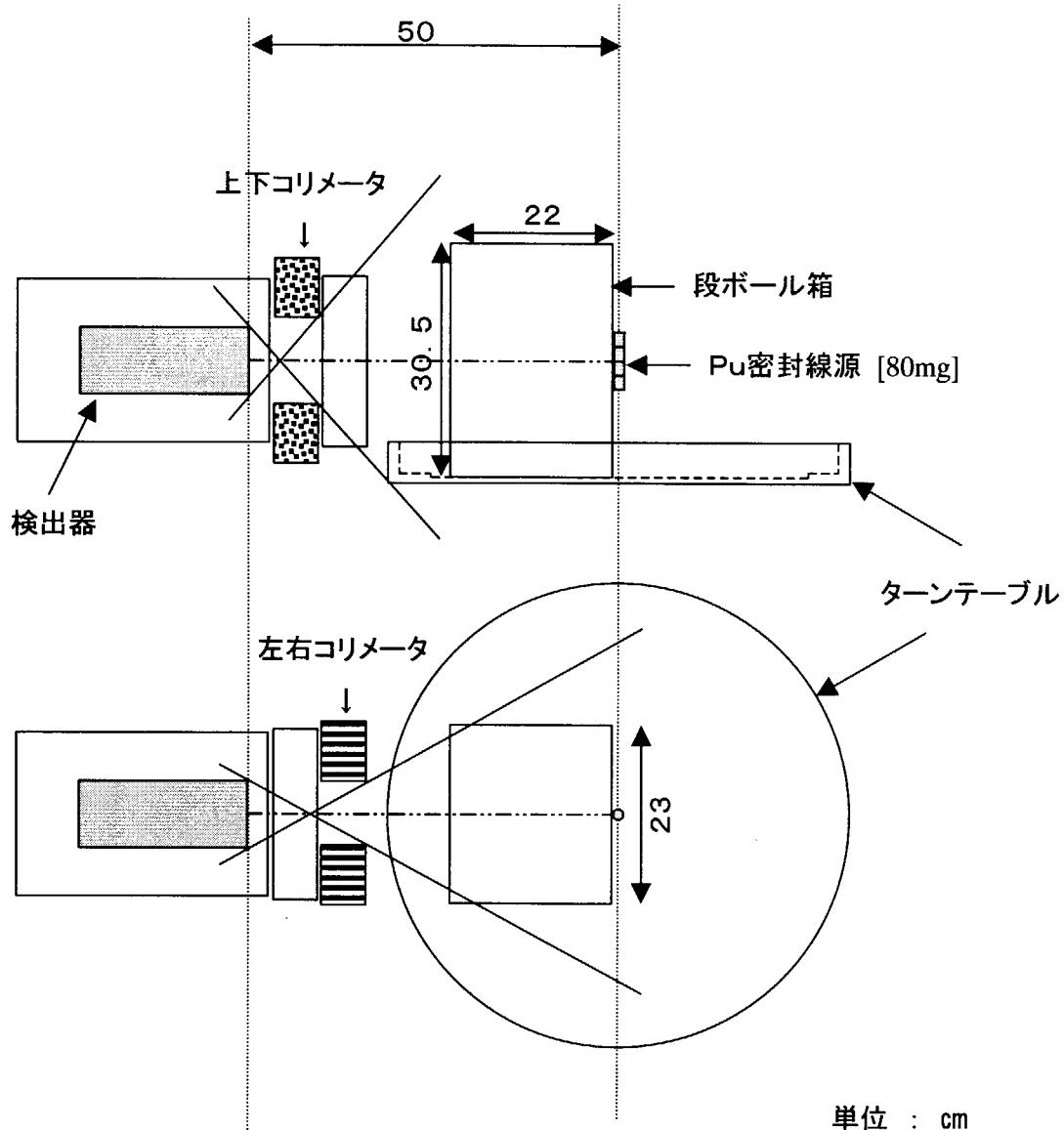


図2. 3-4 線源、模擬廃棄物及び検出器の関係

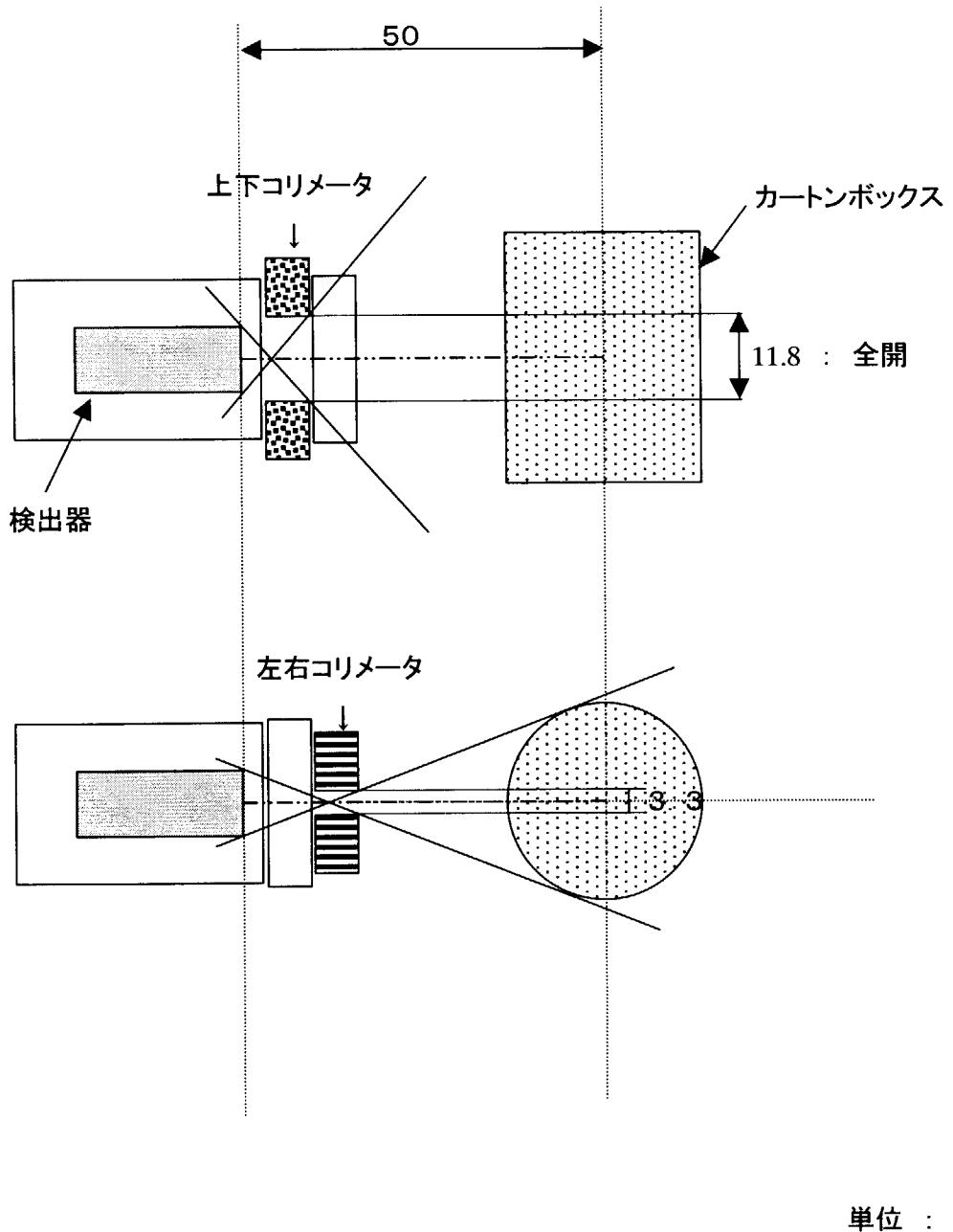


図2. 3-5 評価上のコリメータ開度(カートンボックス)

(検出器一廃棄物間距離 50cm)

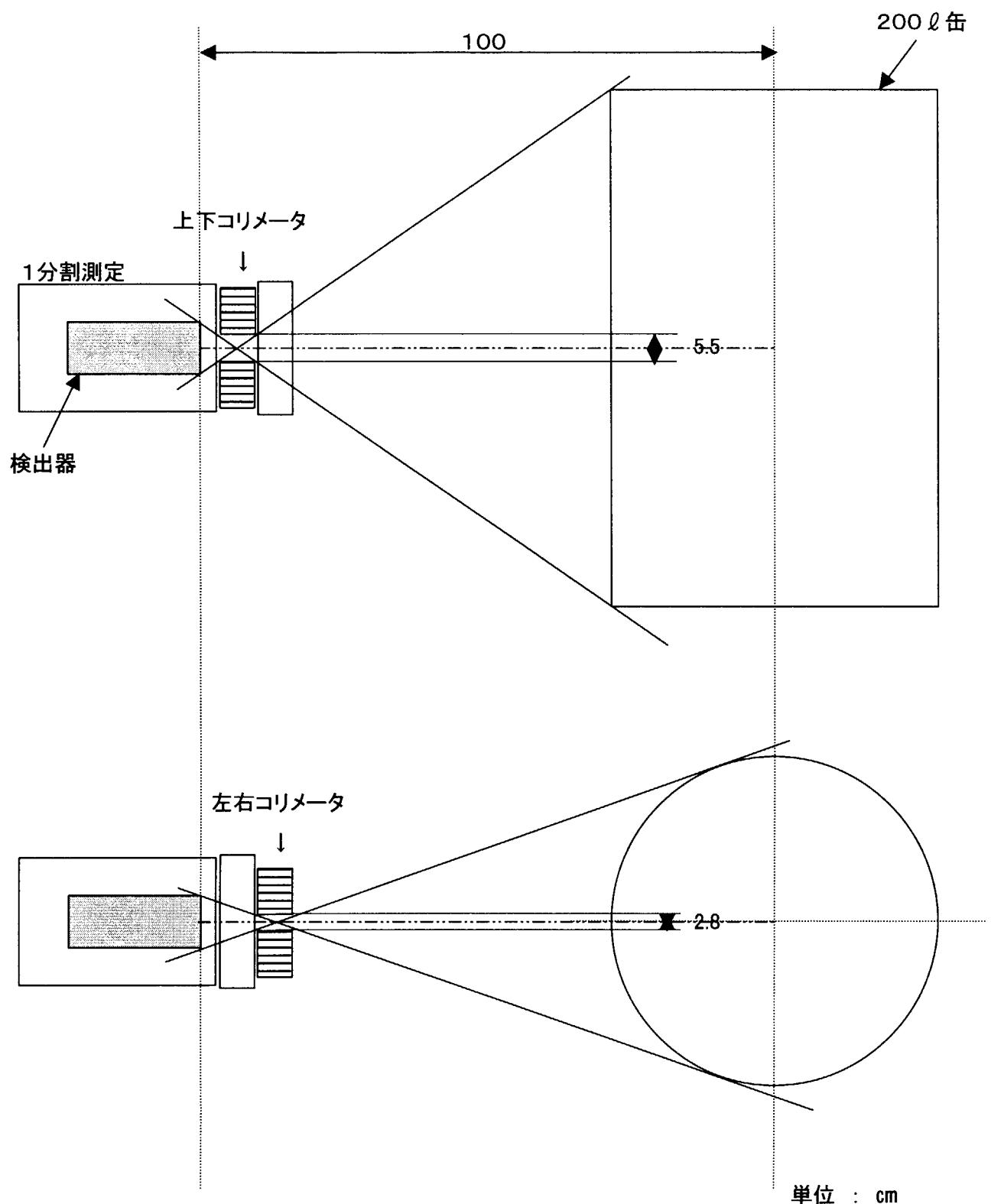


図2. 3-6 評価上のコリメータ開度(200 ℓ 缶) (1/2)

(検出器—廃棄物間距離 100cm)

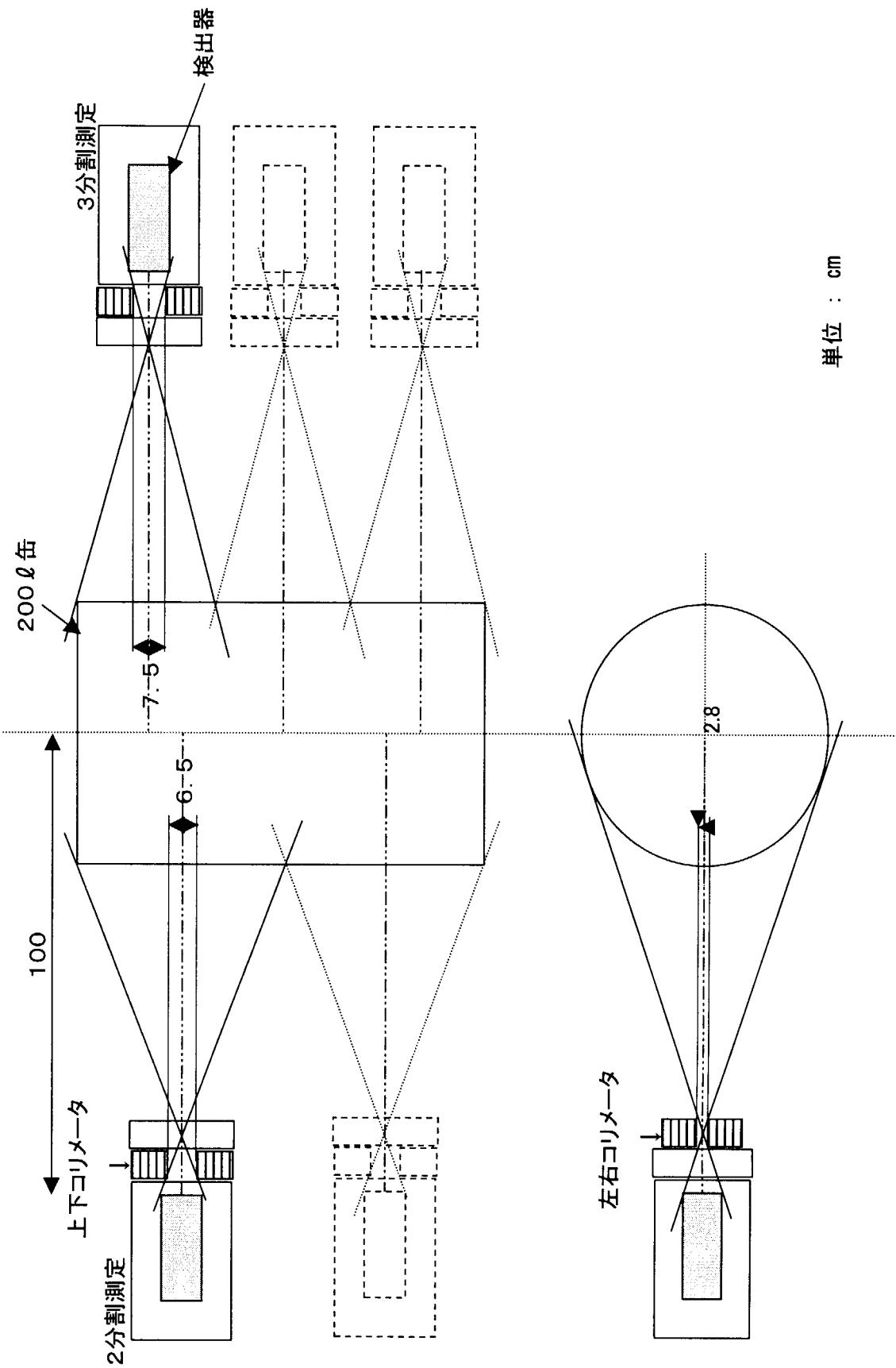
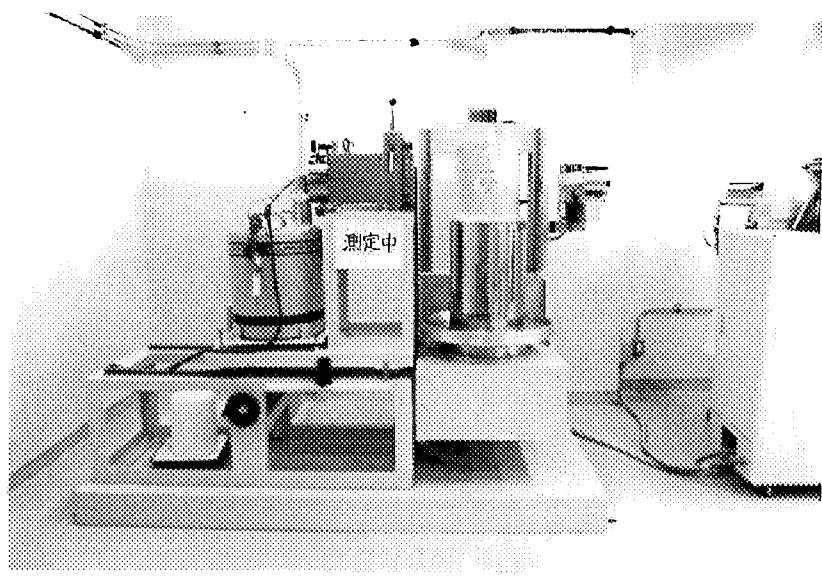


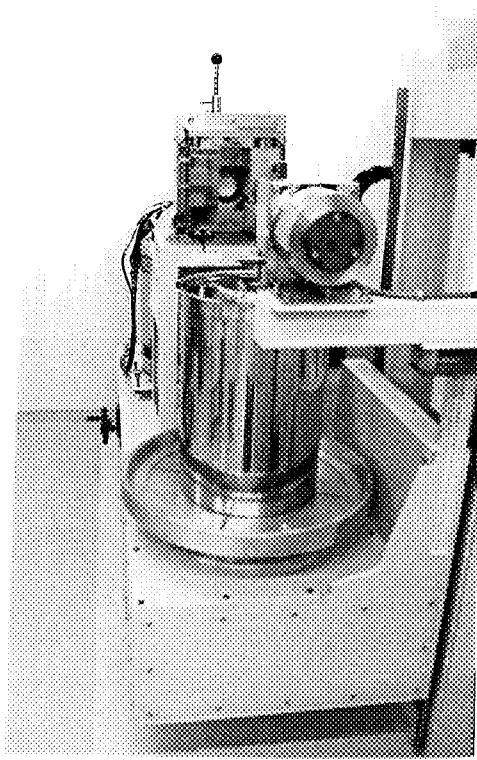
図2. 3-6 評価上のコリメータ開度(200 l 缶)(2/2)

(検出器-廃棄物間距離 100cm)

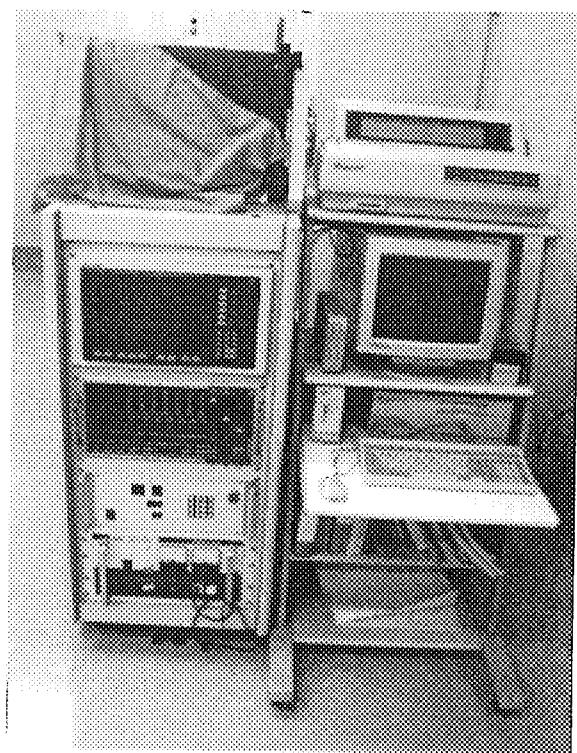
This is a blank page.



装置全体図



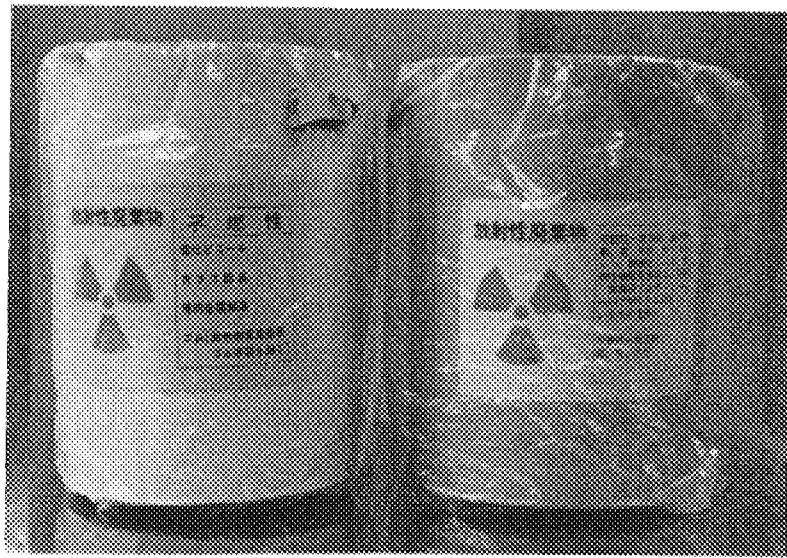
測定器及びコリメータ全体図



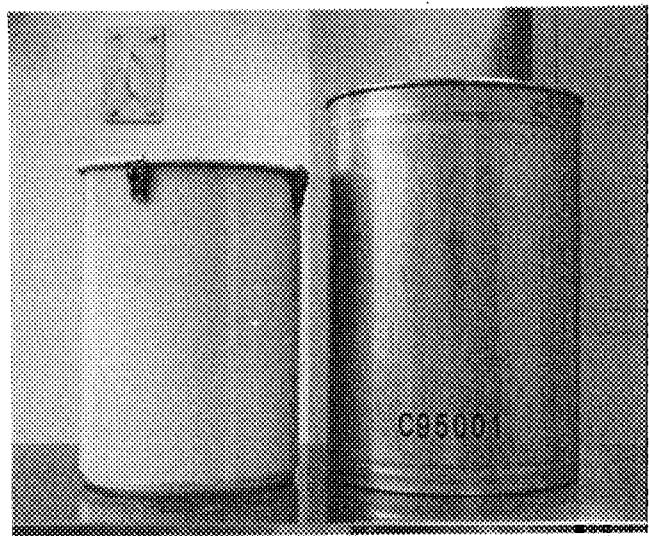
制御用コンピュータとコントローラ

写真-1 廃棄物 NDA 装置全体図

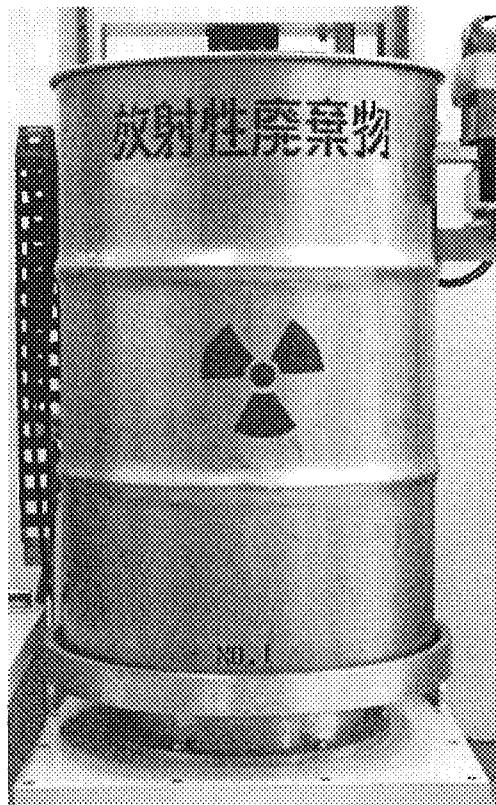
This is a blank page.



白カートンボックスと赤カートンボックス



黄色廃棄物容器と45ℓ缶



200ℓ缶

写真-2 廃棄物容器

This is a blank page.

3. 試験結果

3. 1 線減弱係数の設定

廃棄物中の放射能のガンマ線エネルギー線減弱係数は、実廃棄物の内容物を正確に把握することが困難なため、測定では求められない因子である。従って、線減弱係数は、実廃棄物を模擬した模擬廃棄物試験体を用いて、以下の要領で求める。

(1) 試験条件

- ① コリメータ開度 : 上下コリメータ及び左右コリメータ全開、
- ② 廃棄物－検出器間距離 : 50 cm
- ③ 線源 : 80 mg-Pu (20 mg-プルトニウム密封線源4個を縦に配置)
- ④ 測定時間 : 3600秒(密度小) 及び600秒(密度大)
- ⑤ 測定頻度 : 1回

(2) 測定要領

模擬廃棄物を透過した一次ガンマ線光子数を求めるために、密度の異なる廃棄物を以下に示す5種類とした。段ボール箱に収納したそれぞれの模擬廃棄物の状態を写真-3に示す。

- ① ウエス(粗) : 0.0424 g/cm³
- ② ウエス(密) : 0.111 g/cm³
- ③ 布手袋 : 0.158 g/cm³
- ④ 濡れウエス+布手袋 : 0.264 g/cm³
- ⑤ グローブ : 0.384 g/cm³

(3) 試験結果

模擬廃棄物を収納した段ボール箱の外側中心位置(模擬廃棄物の外側位置)に80 mgのPu線源を設置して、それぞれの模擬廃棄物を透過した一次ガンマ線光子数を計測して密度別の線減弱係数を求めた。測定データ及び線減弱係数の関係と密度－線減弱係数の関係を図3.1-1に示す。この図から計数率は、密度とよい比例関係にあり、かつ模擬廃棄物の内容物に大きく依存しないことが判る。このことから廃棄物全体重量から密度を求めることにより、実廃棄物の線減弱係数を求めることができる。

3. 2 測定体系の設定

3. 2. 1 カートンボックス及び45 l 缶

(1) 廃棄物－検出器間距離の設定

線源位置と廃棄物密度の違いと共に廃棄物－検出器間距離によっても、計数率相対比が変化する。このため、⁶⁰Co密封線源とプルトニウム密封線源を使用して、図2.3-3(1/2)

に示した位置に以下に示す線源を置いて測定を実施した。

^{60}Co 密封線源 : 1332.48 keV のピーク計数
 プルトニウム密封線源 : ^{239}Pu 414 keV のピーク計数

(a) 試験条件

試験の初期段階での測定条件は、以下のように設定した。

1) 廃棄物NDA装置

- i) コリメータ開度 : 上下及び左右とも全開
- ii) 測定 : カートンボックス中心位置に測定器を移動して、スライス測定。線源位置を均一化するためにカートンボックスを回転する。(回転速度: 10 rpm)

2) ^{60}Co 密封線源

- i) 測定時間 : 300秒～600秒(距離と廃棄物形態により設定)
- ii) 測定頻度 : 4回または5回

3) プルトニウム密封線源

- i) 線源 : 80 mg-Pu (20 mg-Pu 密封線源4個を縦に配置)
- ii) 測定時間 : 25分(1500秒)
- iii) 測定頻度 : 1回

4) 廃棄物条件

- i) 密度ゼロ : 廃棄物が無い状態
- ii) 密度小 : 布手袋をカートンボックス全体に入れた廃棄物(0.151 g/cm^3)
- iii) 密度大 : グローブをカートンボックス全体に入れた廃棄物(0.274 g/cm^3)

(b) 試験結果

各廃棄物-検出器間距離での計数率相対比をそれぞれの廃棄物毎に上段に ^{60}Co 密封線源、下段にプルトニウム密封線源として、図3.2-1～図3.2-3に示す。また、相対比と標準偏差については、表3.2-1及び表3.2-2に示す。これらから、以下の結果が得られる。

- i) ^{60}Co 密封線源では、以下のことが得られた。
 - a) 密度ゼロ(廃棄物無し)；
廃棄物-検出器間距離が50cmと60cmの場合の相対比を比較すると線源が外側近傍にある時は中心にある時よりも12%程度高くなった。
 - b) 密度小(廃棄物は布手袋)；
廃棄物-検出器間距離50cmの相対比について外側近傍にある線源と中心にある

線源を比較すると12%程度高くなる。距離60cm及び70cmでは、±10%以内の相対比となった。

c) 密度大（廃棄物はグローブ）；

それぞれの廃棄物－検出器間距離において、相対比は線源位置が中心から4cm以上離れると+10%以上となり、外側近傍では+40%となった。

- ii) プルトニウム密封線源では、測定が1回であり、また、測定時間が短かったことから、廃棄物－検出器間距離が計数率に及ぼす影響を明確に把握することができなかった。しかし、廃棄物－検出器間距離50cmの場合、どの密度でも相対比が±15%以内となった。

以上の結果を表にまとめると、以下のように表現できる。プルトニウム密封線源は、参考値として示した。

線源	密度分布	廃棄物－検出器間距離		
		50cm	60cm	70cm
⁶⁰ Co 密封線源	密度ゼロ	△	△	○
	密度小	△	○	○
	密度大	×	×	×
プルトニウム 密封線源	密度ゼロ	○	○	△
	密度小	△	○	△
	密度大	△	×	×

○：中心との相対比が±10%以内のもの

△：中心との相対比が±15%以内のもの

×：中心との相対比が20%を超えるもの

廃棄物密度の大きなカートンボックスの場合、⁶⁰Co線源による計数率は大きな誤差を生じ、いずれも相対比が大きくなり過大評価となる。ただし、プルトニウム線源の結果では、廃棄物－検出器間距離50cmの場合、±15%以内に入っている。このため、総合的に判断して、廃棄物－検出器間距離を50cmと設定することとした。

(2) コリメータ開度の設定

廃棄物－検出器間距離の設定と同様に、⁶⁰Co密封線源とプルトニウム密封線源の2種類の線源を使用して、左右のコリメータ開度を設定するため、以下の測定条件で計数率の相対比較を実施した。

(a) 試験条件

1) 廃棄物NDA装置

i) コリメータ開度 : 上下コリメータ全開

ii) 測定 : カートンボックスの上下中心位置に測定器を移動して、

スライス測定。線源位置を均一化するためにカートンボックスを回転する。(回転速度: 10 rpm)

- iii) 廃棄物-検出器間距離 : 50 cm
- 2) ^{60}Co 密封線源
 - i) 測定時間 : 400 秒
 - ii) 測定頻度 : 5 回
 - iii) 廃棄物 : 布手袋
- 3) プルトニウム密封線源
 - i) 線源 : 100 mg-Pu (20 mg-Pu 密封線源 5 個を縦に配置)
 - ii) 測定時間 : 7200 秒 (2 時間)
 - iii) 測定頻度 : 1 回
 - iv) 廃棄物 : 布手袋及びグローブ

(b) 試験手順

- 1) ^{60}Co 密封線源
 - i) 布手袋をカートンボックスに入れて線源位置を中心から最外周側へ 4 cm 間隔で移動して測定
 - ii) 左右のコリメータを全開から 2 cm 間隔で 6 cm 開まで 4 点測定
 - iii) 相対比を計算して、プルトニウム密封線源でのコリメータ開度の範囲を決める
- 2) プルトニウム密封線源
 - i) 布手袋をカートンボックスに入れて、線源位置を中心から最外周側へ 2 cm 間隔で線源を移動して測定
 - ii) 左右コリメータ開度については、 ^{60}Co 密封線源で評価した際に相対比が ± 10 % 以内になった開度について測定
 - iii) 相対比を計算して、コリメータ開度を決める
 - iv) iii) で決定したコリメータ開度を使用して、廃棄物をグローブに変えて測定

(c) 試験結果

相対比と標準偏差に関するデータについては、 ^{60}Co 密封線源を表 3. 2-3 に、プルトニウム密封線源を表 3. 2-4 に示す。また、コリメータ開度による計数率の変化を図 3. 2-4 に示す。これらの試験結果から次のことが得られた。

- i) ^{60}Co 密封線源を使用して、左右コリメータ開度を変化させた場合、全開 (開度 12 cm) と開度 6 cm では、線源が 8 cm 以上のある場所にあると相対比が極端に悪くなる。従って、開度 8 cm ~ 開度 9 cm の間に設定すれば、比較的均一な相対比となる。
- ii) プルトニウム密封線源を使用した場合、コリメータ開度 8 cm では、中心から 8 cm 以上線源が離れると、相対比が低くなる。また、コリメータ開度 9 cm では、相対比が中心から離れるとともに上昇し、中心から 8 cm の位置で最大となり、最外周で 10 % 強の強

さとなった。

- iii) ii)の結果から、8 cmを起点として、2 mm単位でコリメータ開度を広げ、中心と最外周の相対比がほぼ同じ値になった時点で測定を終了し、結果として、8.2 cmがこの条件に合ったので8.2 cmを左右のコリメータ開度とした。
- iv) iii)のコリメータ開度で、廃棄物をグローブに変えて測定した。線源を移動しても、計数率は中心での値とほぼ同じとなった。

(3) モンテカルロ計算コード [MVP] による線源補正

1) カートンボックス

計数データと計算値を比較し、プルトニウム線源自体の自己遮へい効果を評価するために、 γ 線強度モンテカルロ計算を実施した。このモンテカルロ計算は、日本原子力研究所大型計算機 [VPP500] を使用し、計算コード「連続エネルギーモンテカルロコード：MVP」で解析を実施した。

i) MVPコードの入力パラメータ

入力データは、廃棄物NDA装置とカートンボックス及び使用した密封線源の配列を考慮して作成した。添付資料-3に、密封線源1個の場合の入力データファイルを示す。

ii) MVP評価結果から検量線への反映方法

プルトニウム密封線源は、SUS カプセルに覆われて、酸化ビスマスで固定されている線源であり、実廃棄物に入っている線源構成と異なる。このため、SUS カプセルで評価された評価値（以下、「カプセル評価値」と言う）と SUS カプセルと酸化ビスマス領域を無くした状態（ボイド状態）での評価値（以下、「ボイド評価値」と言う）を計算し、カプセル評価値とボイド評価値との比を求める。つづいて、下述の検量線作成時のプルトニウム量にこの比率を乗じて実廃棄物用の検量線とする。計算結果は、表3. 2-7に示した。この計算したプルトニウム量から、次項に示す検量線を作成した。

2) 45ℓ缶

廃棄物NDA装置、黄色廃棄物容器及びカートンボックスとプルトニウム密封線源を模擬して、カートンボックスの場合と同様に γ 線強度モンテカルロ計算を実施した。

i) MVPコードの入力パラメータ

入力データは、廃棄物NDA装置、黄色廃棄物容器、カートンボックス及び使用した密封線源の配列を考慮して作成した。添付資料-3に、密封線源1個の場合の入力データファイルを示す。

ii) MVP評価結果値から検量線への反映方法

カートンボックスと同様に、カプセル評価値とボイド評価値との比率を計算して、検量線で使用するプルトニウム量にこの比率を乗じて裸の状態でのプルトニウム量を算出し、表3. 2-8に示した。

(4) 検量線

カートンボックスの中央にプルトニウム密封線源を配置し、以下の測定条件で検量線の作成を実施した。また、45ℓ缶の場合には、カートンボックスを黄色廃棄物容器に挿入して、カートンボックスと同一の測定条件を使用した。

(a) 試験条件

- i) 線源 : 5 mg、10 mg、20 mg、40 mg、80 mg及び100 mg-Pu の6種類（40 mg以上は、20 mg密封線源を縦に配置）
- ii) 廃棄物－検出器間距離 : 50 cm
- iii) 上下コリメータ開度 : 全開
- iv) 左右コリメータ開度 : 8.2 cm開
- v) 測定 : カートンボックス中心をスライスで測定（回転速度：10 rpm）
- vi) 測定時間 : プルトニウムの量により異なる（2時間～3時間）

(b) 検量線の作成

表3.2-5と表3.2-6で計算したプルトニウム量を使用して、カートンボックスと45ℓ缶の検量線を図3.2-5及び図3.2-6に作成した。また、検量線の一次直線回帰式については、それぞれの図中に示した。

3.2.2 200ℓ缶

(1) 廃棄物－検出器間距離の設定

カートンボックスで実施した密度の違いを考慮した廃棄物－検出器間距離の設定では、廃棄物が多種多様であり、密度を3種類（廃棄物無し、布手袋及びグローブ）に分類し、また、使用線源を2種類（ ^{60}Co 密封線源とプルトニウム密封線源）で実施した。結果として、密度及び密封線源の違いによる効果は、小さいと考えられるため、200ℓ缶では、廃棄物無し及び線源は ^{60}Co 密封線源のみを使用した。廃棄物と検出器間距離を以下の要領で設定した。

- i) 線源 : ^{60}Co 密封線源
- ii) コリメータ開度 : 上下及び水平とも全開
- iii) 測定 : 200ℓ缶中心をスライスで測定（回転速度：10 rpm）
- iv) 測定時間 : 10分（600秒）
- v) 測定頻度 : 5回
- vi) 廃棄物－検出器間距離 : 80 cm、90 cm及び100 cm

相対比と標準偏差を表3.2-7及び図3.2-7に示す。廃棄物－検出器間距離90 cmと80 cmでは、80 cmの相対比の方が90 cmよりも悪くなると予想されていたが、結果は、80 cmはむしろ良好な相対比を示し、100 cmとほぼ同じとなった。この理由として、左右コリメータは全開（12 cm）であるが、距離80 cmでは、コリメータの効果によって相対比の変動が

抑制されたものと考えられる。このため左右コリメータを外して、90cm及び80cmの測定を再度実施してみたが、90cmではコリメータの影響は小さいと判断できるが、80cmでは、最外周に線源が近づくと相対比が18%以上の値となり悪くなることがわかった。実際に200ℓ缶測定では、コリメータを外して測定はしないので、80cmは使用しないこととする。また、90cmは、コリメータを外した80cmと同様に最外周に線源が近づくと相対比が12%以上の値となり悪くなる。従って、廃棄物一検出器間距離を100cmとする。

(2) コリメータ開度の設定

(a) 左右コリメータ開度

1) 試験条件

以下の測定条件で最適コリメータ開度を調べた。

- i) 線源 : ^{60}Co 密封線源
- ii) 上下コリメータ開度 : 全開
- iii) 廃棄物一検出器間距離 : 100cm
- iv) 廃棄物 : ウエス+布手袋
- v) 測定 : 200ℓ缶中心をスライスで測定 (回転速度: 10 rpm)
- vi) 測定時間 : 10分 (600秒)
- vii) 測定頻度 : 5回

2) 試験手順

- i) [ウエス+布手袋]の廃棄物を200ℓ缶に入れて、線源位置を中心から最外周側へ10cm間隔(4点)で移動して測定
- ii) 左右コリメータ開度を全開から10cm、8cm及び6cmの4点測定
- iii) 測定データを相対比に換算

3) 試験結果

左右コリメータ開度設定に係る相対比と標準偏差を表3. 2-8及び図3. 2-8に示す。試験結果から次のことが得られた。

- i) 開度全開と6cmでは、線源位置が最外周に移動すると、中心と比べて約20%以上の違いが生じる。中でも、開度6cmでは、線源位置が10cm以降最外周に近づくに従って、極端に相対比が悪くなる傾向を示した。
- ii) 開度10cmでは、最外周に置いた線源と中心と比べて約10%高い値となった。
- iii) 開度8cmでは、線源位置を移動しても、相対比は大きく変化しなかった。

従って、左右コリメータ開度は、8cmとする。

(b) 上下コリメータ開度

上下コリメータ開度の設定では、前述のように測定領域の分割方法によって、開度が異なる。最初に、 ^{60}Co 密封線源を使用してコリメータ開度幅を設定する。次に、プルトニウム密封線源を使用して分割別のコリメータ開度を決定する。プルトニウム密封線源は、今回入手できなかったので、本図書では ^{60}Co 密封線源について、以下の測定条件により、コリメータ開度幅を設定する。

1) 試験条件

- i) 線源 : ^{60}Co 密封線源
- ii) 左右コリメータ開度 : 8 cm
- iii) 廃棄物－検出器間距離 : 100 cm
- iv) 廃棄物 : ウエス+布手袋
- v) 測定 : 200 ℥缶分割中心をスライスで測定 (回転速度: 10 rpm)
- vi) 測定時間 : 10分(600秒)
- vii) 測定頻度 : 5回
- viii) 線源設置場所 : スライス; 分割の上部と下部
スパイラル; 1) ii項参照

2) ^{60}Co 密封線源での開度幅の設定

i) スライス測定での上下コリメータ開度

上下コリメータ開度の設定における相対比は、200 ℥缶の中心位置での計数値(表3.2-9参照)を基準とし、図3.2-9(1分割)、図3.2-10(2分割)及び図3.2-11(3分割)に示した位置に線源を配置して測定した。以下に分割別の結果を示す。

Ⓐ 1分割 : 相対比と標準偏差を表3.2-9及び図3.2-12に示す。試験の結果、相対比は、以下のとおりであった。

- ・全開 (11.8 cm) : -20%
- ・9 cm : -40%
- ・7 cm : -60%

Ⓑ 2分割 : 相対比と標準偏差を表3.2-9及び図3.2-13に示す。試験の結果、相対比は、以下のとおりであった。

- ・5 cm : -40%
- ・4 cm : -50%
- ・3 cm : -60%

Ⓒ 3分割 : 相対比と標準偏差を表3.2-9及び図3.2-14に示す。試験の結果、相対比は、以下のとおりであった。

- ・5 cm : -20%

- 4 cm : -30%
- 3 cm : -50%
- 2 cm : -60%

1分割の場合、廃棄物の線源が上部又は、下部に集中してあった時、全開で約20%の相対比に収まる。また、コリメータ開度を狭めていくと相対比は、極端に悪くなる。従って、上下コリメータ開度は、全開で実施する。

2分割及び3分割の場合、2分割を例にすると、200ℓ缶の高さ方向を2つに分割しそれぞれの分割中心位置に200ℓ缶が移動して2回測定される。この2つの測定データからプルトニウム量が計算され合計値が出力される。このことから、プルトニウム密封線源が入手できた時点で、プルトニウム線源をばらばらに配置して2分割と3分割の上下コリメータ開度を設定する。

ii) スパイラル測定の上下コリメータ開度

スパイラル測定は、ターンテーブルを最下部にしてから任意の速度で200ℓ缶を上昇させて最上部でターンテーブルを停止（測定では、自動停止する）させてこの間に測定された計測値から廃棄物量を計算されるシステムとなっている。検出器中心位置と200ℓ缶との位置関係を図3. 2-15に示す。図でわかるように、最下部の位置では、200ℓ缶上部との差が4.6cm下に設定されている。また、最上部では、200ℓ缶底面から2.6cm高い位置で停止するように設定されている。この条件を基に、以下のように廃棄物の線源位置が極端な場合を想定し、上下コリメータ開度幅を設定した。

- ターンテーブルが最下部の場合 : 200ℓ缶上部に線源を設置
- ターンテーブルが最上部の場合 : 200ℓ缶下部に線源を設置

上部に線源を置いた場合の結果を表3. 2-10及び図3. 2-16に示し、下部に線源を置いた場合の結果を表3. 2-11及び図3. 2-17に示す。200ℓ缶中心位置に線源があった場合を想定すると、測定されない状態から測定を開始して測定されない状態で終了することが理想であるが、ターンテーブルの最下部位置では、コリメータ開度1cmでも、約-85%の相対比となり、データを採取した状態で計測を開始することになる。また、最上部では、最下部と同様に、コリメータ開度1cmで約-90%の相対比となり、データを採取して終了する。コリメータ開度をさらに広げていくとデータ採取が大きくなり、コリメータ開度6cm以上ではほぼ同じ相対比となることがわかった。この結果から200ℓ缶上部に線源が集中してあった場合、または、200ℓ缶下部に線源が集中してあった場合のどちらとも、過大評価の結果となることがわかる。 ^{60}Co 密封線源では、ここまで評価しかできないが、プルトニウム密封線源が入手できしだい以下の試験を実施してスパイラル測定の上下コリ

メータ開度を設定する。

- a) スパイラル測定範囲を数種類設定し、それぞれ検量線を作成する。
- b) スパイラル測定範囲毎に、上下コリメータ開度を1cmから開き相対比を求める。
- c) 線源位置での測定精度を考慮して、スパイラル測定範囲と上下コリメータ開度を決定する。

(3) 検量線

200ℓ缶の中央にプルトニウム密封線源を配置し、ライス測定とスパイラル測定の検量線作成を実施する予定であるが、プルトニウム密封線源が入手できしだい実施する。

3.3 測定体系の評価

3.3.1 測定器の特性

(1) 相対ピーク効率の算定

Ge検出器の場合、検出器毎の形状や有感部容積が異なり、NaI検出器のように、共通のピーク効率を使用することはできない。従って、本装置のGe検出器について既知のプルトニウム線源を使用して、実験的に次のように相対ピーク効率を評価した。相対ピーク効率(ε)は、検量線で使用したプルトニウム量(^{239}Pu のBq数)と計数率(^{239}Pu の414keV:cps)を使用し、次式により求めることができる。

$$\varepsilon = \frac{n}{A \times a} \quad [3.3-1]$$

n : ^{239}Pu の414keVのピーク計数率 [cps]

a : ^{239}Pu からの414 keV γ 線の放出確率 (1.506×10^{-5})

A : 放射能量 [Bq]

プルトニウム量100mgを使用してピーク計数率を測定し、第2.3節(3)項に示した ^{239}Pu 量の比率から式3.3-1を用いて、相対ピーク効率を計算した。その結果を以下に示す。

質量数	半減期 [日]	放射能量 [MBq/mg]	比率 [%]	比率に対する放射能量	^{239}Pu 重量 [mg]	放射能量 [MBq]	ピーク計数率 [cps]	相対ピーク効率
239	8.91E+06	2.2705	75.7691	1.72E+00	66.43	114.27	0.427	2.48E-04

(2) 検出限界

正味計数率 n_m 、グロス計数率 n_s 、バックグラウンド計数率 n_b 、測定時間 t_s 及びバックグラウンド測定時間 t_b とすると、

$$n_m = n_s - n_b \pm \sigma$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_s}{t_s} + \frac{n_b}{t_b}} = \sqrt{\frac{n_m}{t_s} + n_b \left[\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right]}$$

[3. 3-2]

検出限界計数率 n_n は、下式で求める。

$$n_n - k\sigma \geq 0 \quad [3. 3-3]$$

ただし、 k は、信頼区間幅の値を示す。

式 3. 3-2 を式 3. 3-3 に代入して検出限界計数率を以下の式で求める。

$$n_n \geq \frac{k}{2} \left\{ \frac{k}{t_s} + \sqrt{\left[\frac{k}{t_s} \right]^2 + 4 n_b \left[\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right]} \right\} \quad [3. 3-4]$$

通常、式 3. 3-3 では、 3σ を考えるため、 $k=3$ とし、試料とバックグラウンドを同時間測定した場合の検出限界計数率から検出限界 [MBq] を式 3. 3-5 で求める。その結果を表 3. 3-1 に示す。また、 ^{239}Pu 検出限界重量は、NUCEF で使用予定のプルトニウム同位体組成から得られた単位重量当たりの ^{239}Pu 放射能量 [1.43 MBq/mg] (表 2. 3-1 参照) から計算する。

$$B = \frac{n_n}{\varepsilon \times a} \quad [3. 3-5]$$

B : 検出限界 [Bq]

n_n : 検出限界計数率 [cps]

ε : 相対ピーク効率 (2.48×10^{-4})

検出限界と測定時間の関係を図 3. 3-1 に示す。例えば、実廃棄物を 20 分計測した場合、検出限界が 7.70 MBq となり、[A-1] 区分と [B-2] 区分が 3.7 MBq で区切られていることを考慮すると、これらの区分判別は十分に可能である。また、[A-1] 区分の放射能量 (3.7 kBq 以上 3.7 MBq 未満) については、24 時間測定で 0.72 MBq の検出ができるが、1 つの廃棄物を長時間測定することは困難と考えられるため、本装置の利用には限界がある。また、実際の廃棄物容器を測定する場合、実在する放射能量に応じて廃棄物容器の測定時間を任意に設定する必要がある。

(3) γ 線検出効率の算定

本装置に設置してあるGe検出器の γ 線検出効率は、3インチ×3インチの円柱形NaI結晶の絶対全エネルギーピーク効率と比較した相対全エネルギーピーク効率で計算される。この相対全エネルギーピーク効率は、 ^{60}Co 線源を使用して、1332.48 keV のピーク計数から3インチ×3インチNaI結晶の絶対効率 [1.2×10^{-3}] で割って本装置のGe検出器の γ 線検出効率（相対効率）を以下の式3.3-6から算出する。

$$\gamma\text{線検出効率} (\%) = \frac{\text{ピーク計数率}}{1.2 \times 10^{-3} \times \text{放射能量}} \times 100$$

[3.3-6]

① 1995/6/21 468.9 kBq の密封線源 ^{60}Co を使用して500秒測定した結果、計数率は 26.1 cps であった。

② 1998/12/8 の放射能量

$$= 468.9 \times \left[\frac{1}{2} \right]^{\frac{3.4658}{5.263}} = 297.1 \text{ [kBq]}$$

上記の2つの値を式3.3-6に代入する。

$$= \frac{26.1}{1.2 \times 297.1 \times 10^3} \times 10^5 = 7.3 [\%]$$

本装置の γ 線検出効率は、7.3%となる。

3.3.2 測定体系の評価

廃棄物の形態として、カートンボックス及び45ℓ缶の場合を取り、設定した測定体系の妥当性を評価した。

(1) カートンボックス

カートンボックスに対する廃棄物NDA装置の設定値及び一次直線回帰式（図3.1-1と図3.2-5参照）は、以下の通りである。

- i) 廃棄物-検出器間距離 : 50 cm
- ii) コリメータ開度 : 左右コリメータ：8.2 cm
上下コリメータ：全開
- iii) 密度-線減弱係数の一次直線回帰式 : $y = 0.1525 x - 0.0006$
- iv) 検量線一次直線回帰式 : $y = 156.23 x - 1.266$

この設定を基にして、回帰式の評価及び測定精度の確認を以下に示す。

① 一次直線回帰式の評価

添付資料-2を基にして、密度一線減弱係数及びカートンボックス検量線の一次直線回帰式からそれぞれの平方和及び決定係数を計算しその結果を以下に示す。

評価項	密度一線減弱係数	カートンボックス検量線
実測値の偏差平方和	0.00170	3328.5383
推定値の偏差平方和	0.00168	3322.5133
残差平方和	0.0000218	6.1108
決定係数	0.988	0.998

決定係数 R^2 を用いて回帰式の「説明力」を評価することができる。決定係数は、 $[0.0 \leq R^2 \leq 1.0]$ の範囲であり、残差平方和が小さいほど R^2 は 1.0 に近づく。 $R^2 = 1.0$ は、実測値の変動が推定変数と完全に一致し、残差平方和がゼロの時に起こる。上記に示した決定係数を評価すると、それぞれの値は、1.0 に近い値であり、実測値の変動と推定変数とがほぼ等しいことがわかる。言いかえれば、設定した回帰式から求められた値（線減弱係数と ^{239}Pu 量）は信頼性が高い値と言える。ただし、実際の廃棄物中の Pu 量を評価する場合には、廃棄物重量を測定し回帰式を使用して線減弱係数を求めた上で、検量線回帰式から ^{239}Pu 量を計算するため、それぞれの決定係数の相乗効果が起こることが考えられる。従って、個々の決定係数よりも低い値となることが考えられる。

② 測定精度の確認

測定精度の確認は、線源を図3.3-2に示した位置に3個のプルトニウム密封線源を置いて測定器設定値の妥当性を確認した。

- i) 測定器の設定 : 設定した測定器でスライス測定
- ii) 線源 : プルトニウム密封線源 10 mg (1個)、20 mg (2個)
合計 ^{239}Pu 重量は、32.45 mgである。
- iii) 模擬廃棄物 : 布手袋 (重量 2.42 kg 密度 0.1223 g/cm³)
グローブ (重量 6.84 kg 密度 0.3465 g/cm³)
- iv) 測定時間 : 30分
- v) 測定頻度 : 5回

図3.3-2に示した各線源位置毎の測定値、平均値と標準偏差を表3.3-2に示す。測定に使用したプルトニウム密封線源の ^{239}Pu 重量は、上記に示したように 32.45 mg である。この重量と測定データ平均値の ^{239}Pu 重量を比較すると、模擬廃棄物が布手袋の場合では、線源位置(2)(カートンボックス中心位置)で密封線源に近いデータが得られたが、総合的に判断すると約 10 % 過小評価となる。一方、模擬廃棄物内容物がグローブの場合では、

どの線源位置でも密封線源よりも測定データの方が約10%高い値を示した。このことから、線源位置及び廃棄物の違いによる影響により±10%の変動はあるが、実用上許容される範囲のものであると判断できる。

(2) 45ℓ缶

45ℓ缶を測定する場合の条件設定に当たっては、カートンボックスの場合と同じ設定値(上記(1) i) ~ iii)の値)を使用した。使用した検量線の一次直線回帰式(図3.2-6参照)は以下のとおりである。

検量線一次直線回帰式

$$: \quad y = 170.202 \times + 0.649333$$

① 一次直線回帰式の評価

添付資料-2を基にして、45ℓ缶の検量線一次直線回帰式からそれぞれの平方和及び決定係数を計算しその結果を以下に示す。

評価項	45ℓ 缶検量線
実測値の偏差平方和	3416.8946
推定値の偏差平方和	3414.2483
残差平方和	12.7970
決定係数	0.999

上記に示した決定係数を評価すると、値は、1.0に近い値であり、実測値の変動と推定変数とがほぼ等しいことがわかる。言いかえれば、設定した回帰式から求められた値は信頼性の高い値となる。

② 測定精度の確認

45ℓ缶は、第2.3節で示したように、カートンボックスを黄色廃棄物容器に入れ、45ℓ缶に収納し、蓋を封缶する。本装置で測定する形態は、カートンボックスを黄色廃棄物容器に入れた時点での測定する。従って、測定精度の確認は、カートンボックスの測定精度と同様な傾向になると考えられる。

表3.2-1 廃棄物一検出器間距離設定試験での計測データ
(^{60}Co 密封線源)

廃棄物 検出器間距離	線源位置	無し				廃棄物形態				グローブ			
		平均値	計数誤差	相対比	標準偏差	平均値	計数誤差	相対比	標準偏差	平均値	計数誤差	相対比	標準偏差
50cm	中心	8952.60	74.85	0.00	1.18	8801.00	149.00	0.00	2.39	11670.80	107.80	0.00	1.31
	中心から4cm離れた位置	9139.00	62.54	2.08	1.10	8697.00	89.32	-1.18	1.96	12990.20	86.85	11.31	1.27
	中心から8cm離れた位置	9286.60	57.54	3.73	1.08	9034.80	119.53	2.66	2.21	13269.50	164.36	13.70	1.76
	最外周	10094.60	155.70	12.76	1.98	9873.40	87.82	12.18	2.15	14565.50	216.94	24.80	2.19
60cm	中心	7752.50	94.12	0.00	1.72	8055.60	39.63	0.00	0.70	7854.60	36.96	0.00	0.67
	中心から4cm離れた位置	7935.75	102.44	2.36	1.81	8171.40	102.50	1.44	1.37	8469.60	45.95	7.83	0.77
	中心から8cm離れた位置	8186.50	51.37	5.60	1.44	8540.40	51.51	6.02	0.83	9134.20	70.34	16.29	1.05
	最外周	8689.75	174.26	12.09	2.63	8721.00	185.87	8.26	2.37	10049.20	84.59	27.94	1.23
70cm	中心	5844.25	94.27	0.00	2.28	7471.80	110.74	0.00	2.10	7085.20	119.25	0.00	2.38
	中心から4cm離れた位置	5834.00	64.80	-0.18	1.96	7608.40	86.34	1.83	1.90	7803.00	103.83	10.13	2.36
	中心から8cm離れた位置	5920.75	51.74	1.31	1.86	7862.40	88.14	5.23	1.96	8647.60	35.09	22.05	2.11
	最外周	6340.50	105.26	8.49	2.51	8034.60	102.44	7.53	2.10	9229.80	127.06	30.27	2.83

表3.2-2 廃棄物一検出器間距離設定試験での計測データ (プルトニウム密封線源)

検出器間距離 mm	線源位置	無し				布手袋				廃棄物形態 グローブ			
		計数	計数誤差	相対比	標準偏差	計数	計数誤差	相対比	標準偏差	計数	計数誤差	相対比	標準偏差
50cm	中心	494	26	0.00	7.44	411	24	0.00	8.26	381	24	0.00	8.91
	中心から2cm離れた位置	492	27	-0.40	7.57	383	23	-6.81	7.81	355	23	-6.82	8.42
	中心から4cm離れた位置	452	26	-8.50	7.13	435	24	5.84	8.50	394	23	3.41	8.88
	中心から6cm離れた位置	498	26	0.81	7.47	389	24	-5.35	8.04	344	22	-9.71	8.10
	中心から8cm離れた位置	497	27	0.61	7.61	404	24	-1.70	8.19	361	23	-5.25	8.49
	中心から10cm離れた位置	469	26	-5.06	7.26	482	25	17.27	9.16	398	25	4.46	9.29
	最外周	502	27	1.62	7.65	474	25	15.33	9.07	422	26	10.76	9.76
60cm	中心	444	27	0.00	8.60	405	25	0.00	8.73	323	21	0.00	9.19
	中心から2cm離れた位置	471	26	6.08	8.71	423	23	4.44	8.59	302	22	-6.50	9.13
	中心から4cm離れた位置	477	27	7.43	8.93	401	24	-0.99	8.51	347	23	7.43	9.97
	中心から6cm離れた位置	427	26	-3.83	8.28	377	24	-6.91	8.25	359	23	11.15	10.15
	中心から8cm離れた位置	478	27	7.66	8.94	379	24	-6.42	8.28	335	23	3.72	9.81
	中心から10cm離れた位置	477	27	7.43	8.93	387	26	-4.44	8.72	368	23	13.93	10.27
	最外周	455	25	2.48	8.40	432	26	6.67	9.20	381	26	17.96	11.12
70cm	中心	441	25	0.00	8.02	368	24	0.00	9.22	311	22	0.00	10.00
	中心から2cm離れた位置	415	25	-5.90	7.78	377	23	2.45	9.15	308	22	-0.96	9.96
	中心から4cm離れた位置	432	26	-2.04	8.10	363	25	-1.36	9.36	359	23	15.43	11.02
	中心から6cm離れた位置	471	26	6.80	8.45	363	23	-1.36	8.97	354	22	13.83	10.72
	中心から8cm離れた位置	493	26	11.79	8.66	408	26	10.87	10.11	389	24	25.08	11.74
	中心から10cm離れた位置	466	27	5.67	8.57	392	23	6.52	9.34	371	24	19.29	11.44
	最外周	467	27	5.90	8.57	422	26	14.67	10.29	424	24	36.33	12.35

表3.2-3 左右コリメータ開度設定試験での計測データ (^{60}Co 密封線源)

廃棄物形態	左右コリメータ開度	線源位置	平均値	計数誤差	相対比	標準偏差
布手袋	12cm	中心	10120.00	87.44	0.00	1.22
		中心から4cm離れた位置	10395.20	136.67	2.72	1.62
		中心から8cm離れた位置	10862.20	55.52	7.33	1.08
	9cm	最外周	11655.80	72.50	15.18	1.23
		中心	10231.20	80.24	0.00	1.11
		中心から4cm離れた位置	10339.60	114.23	1.38	1.37
	8cm	中心から8cm離れた位置	10806.25	57.12	5.35	1.00
		最外周	10887.20	176.66	7.30	1.92
		中心	10421.80	60.64	0.00	0.82
6cm	中心から4cm離れた位置	10478.60	166.38	0.55	1.70	
		中心から8cm離れた位置	10772.00	84.74	3.36	1.01
		最外周	9406.00	93.21	-9.75	1.04
	中心から8cm離れた位置	10448.80	23.87	0.00	0.32	
		中心から4cm離れた位置	10521.80	160.30	0.70	1.55
		最外周	9828.80	76.84	-5.93	0.77
			6819.80	120.91	-34.73	1.17

表3.2-4 左右コリメータ開度 計測試験での計測データ (プルトニウム密封線源)

廃棄物形態	左右コリメータ開度	線源位置	平均値	計数誤差	相対比	標準偏差
布手袋	9cm	中心	2316	57	0.00	3.48
		中心から2cm離れた位置	2402	58	3.71	3.58
		中心から4cm離れた位置	2499	58	7.90	3.65
		中心から6cm離れた位置	2574	59	11.14	3.74
		中心から8cm離れた位置	2708	60	16.93	3.87
		中心から10cm離れた位置 最外周	2658	59	14.77	3.80
8.2cm	8.2cm	中心	2254	56	0.00	3.51
		中心から2cm離れた位置	2390	58	6.03	3.68
		中心から4cm離れた位置	2413	57	7.05	3.67
		中心から6cm離れた位置	2494	58	10.65	3.77
		中心から8cm離れた位置	2522	58	11.89	3.79
		中心から10cm離れた位置 最外周	2380	57	5.59	3.64
グローブ	8.2cm	中心	3424	69	0.00	2.85
		中心から2cm離れた位置	3248	66	-5.14	2.71
		中心から4cm離れた位置	3384	69	-1.17	2.83
		中心から6cm離れた位置	3370	67	-1.58	2.79
		中心から8cm離れた位置	3441	69	0.50	2.86
		中心から10cm離れた位置 最外周	3510	69	2.51	2.89
布手袋	8cm	中心	2259	58	0.00	3.63
		中心から2cm離れた位置	2315	59	2.48	3.71
		中心から4cm離れた位置	2365	58	4.69	3.72
		中心から6cm離れた位置	2379	59	5.31	3.76
		中心から8cm離れた位置	2358	60	4.38	3.77
		中心から10cm離れた位置 最外周	2220	58	-1.73	3.60
			2121	55	-6.11	3.43

表3. 2-5 MVP計算結果（カートンボックス）

Pu [mg]	^{239}Pu [mg]	カプセル評価値	ボイド評価値	ボイドに対する比率	補正 ^{239}Pu 量
5	3.64	5.70E-04	6.59E-04	86.44	3.14
10	8.29	5.54E-04	6.90E-04	80.24	6.65
20	15.33	5.40E-04	6.38E-04	84.67	12.98
40	30.82	5.63E-04	6.48E-04	86.92	26.79
80	60.48	5.78E-04	6.79E-04	85.13	51.48
100	76.48	5.41E-04	6.23E-04	86.85	66.43

ボイドに対する比率：([カプセル評価値]/[ボイド評価値])*100 単位：%
表3. 2-6 線源毎の計算結果（45ℓ缶）

Pu [mg]	^{239}Pu [mg]	カプセル評価値	ボイド評価値	ボイドに対する比率	補正 ^{239}Pu 量
5	3.64	6.00E-04	6.46E-04	92.88	3.38
10	8.29	5.24E-04	6.33E-04	82.77	6.86
20	15.33	5.92E-04	6.35E-04	93.30	14.31
40	30.82	5.36E-04	6.41E-04	83.66	25.79
80	60.48	5.62E-04	6.37E-04	88.33	53.42
100	76.48	5.67E-04	6.47E-04	87.70	67.07

ボイドに対する比率：([カプセル評価値]/[ボイド評価値])*100 単位%
- 45 -

表3.2-7 廃棄物一検出器間距離設定試験での計測データ (^{60}Co 密封線源)

左右コリメータ	測定器間距離	線源位置	平均値	計数誤差	相対比	標準偏差
有	100cm	中心	3896.20	43.43	0.00	1.58
		中心から10cm離れた位置	3814.60	17.18	-2.09	1.18
		中心から20cm離れた位置	4011.40	85.97	2.96	2.49
	90cm	最外周	4209.40	59.50	8.04	1.94
		中心	4664.20	45.91	0.00	1.39
		中心から10cm離れた位置	4790.20	64.84	2.70	1.72
無	80cm	中心から20cm離れた位置	4915.60	69.72	5.39	1.82
		最外周	5239.00	51.05	12.32	1.56
		中心	6056.40	119.25	0.00	2.78
	90cm	中心から10cm離れた位置	6053.00	74.12	-0.06	2.32
		中心から20cm離れた位置	6285.20	77.12	3.78	2.41
		最外周	6532.80	51.27	7.87	2.29
無	80cm	中心	4810.20	37.97	0.00	1.12
		中心から10cm離れた位置	4962.40	45.82	3.16	1.25
		中心から20cm離れた位置	5173.80	35.53	7.56	1.13
	80cm	最外周	5433.40	135.32	12.96	2.95
		中心	5984.00	62.31	0.00	1.47
		中心から10cm離れた位置	6132.60	101.62	2.48	2.01
	80cm	中心から20cm離れた位置	6263.60	127.37	4.67	2.39
		最外周	7083.20	54.02	18.37	1.53

表3.2-8 左右コリメータ開度設定試験での計測データ

廃棄物形態 + 布手袋	左右コリメータ	線源位置	平均値		計数誤差	相対比	標準偏差
			中心	3362.00			
12cm	中心から10cm離れた位置	中心	3372.00	25.84	0.00	3.42	2.61
		中心から20cm離れた位置	3679.40	69.33	3.27	2.53	3.35
		最外周	4081.80	78.23	9.44	2.63	3.75
	中心から10cm離れた位置	中心	3502.40	26.51	0.00	1.07	1.93
		中心から20cm離れた位置	3441.80	78.18	-1.73	2.35	3.34
		最外周	3639.20	61.69	3.91	2.60	3.75
10cm	中心から10cm離れた位置	中心	3848.60	113.40	9.88	1.07	2.35
		中心から20cm離れた位置	3348.00	56.25	0.00	1.93	3.34
		最外周	3448.00	56.46	0.00	2.38	3.34
	中心から10cm離れた位置	中心	3346.00	30.76	-0.06	1.91	2.42
		中心から20cm離れた位置	3281.80	132.23	-1.98	4.28	3.34
		最外周	3367.20	74.39	0.00	3.12	2.60
8cm	中心から10cm離れた位置	中心	3190.00	47.79	-5.26	2.53	2.60
		中心から20cm離れた位置	2727.80	64.68	-18.99	2.63	2.60
		最外周	2468.40	68.38	-26.69	2.60	2.60

表3.2-9 上下コリメータ開度設定試験での計測データ（スライス測定）

分割数	上下コリメータ	線源位置	平均値	計数誤差	相対比	標準偏差
一	一	廃棄物容器中心の測定データ	4160.67	67.69	—	—
1分割	11.8cm	中心	3373.00	61.42	-18.93	1.98
		中心から10cm離れた位置	3333.20	59.08	-19.89	1.93
		中心から20cm離れた位置	3560.20	57.57	-14.43	1.96
		最外周	3312.20	62.63	-20.39	1.99
	9cm	中心	2527.40	53.62	-39.25	1.62
		中心から10cm離れた位置	2342.80	45.02	-43.69	1.42
		中心から20cm離れた位置	2481.40	12.95	-40.36	1.02
		最外周	2577.20	58.58	-38.06	1.73
	7cm	中心	1580.60	53.88	-62.01	1.43
		中心から10cm離れた位置	1432.20	52.80	-65.58	1.39
		中心から20cm離れた位置	1487.20	45.42	-64.26	1.24
		最外周	1389.80	25.05	-66.60	0.81
2分割	5cm	中心	2564.60	63.43	-38.36	1.82
		中心から10cm離れた位置	2562.00	24.75	-38.42	1.17
		中心から20cm離れた位置	2618.60	60.98	-37.06	1.79
		最外周	2599.60	83.33	-37.52	2.25
	4cm	中心	2174.00	72.58	-47.75	1.94
		中心から10cm離れた位置	2025.40	37.61	-51.32	1.20
		中心から20cm離れた位置	2157.20	63.04	-48.15	1.73
		最外周	2179.00	24.86	-47.63	1.04
	3cm	中心	1540.60	29.07	-62.97	0.92
		中心から10cm離れた位置	1480.00	19.14	-64.43	0.74
		中心から20cm離れた位置	1623.40	57.66	-60.98	1.52
		最外周	1680.80	36.60	-59.60	1.10
3分割	5cm	中心	3397.20	81.23	-18.35	2.36
		中心から10cm離れた位置	3280.20	48.82	-21.16	1.74
		中心から20cm離れた位置	3406.00	33.51	-18.14	1.56
		最外周	3353.60	78.84	-19.40	2.30
	4cm	中心	2942.00	50.90	-29.29	1.68
		中心から10cm離れた位置	2796.80	53.71	-32.78	1.69
		中心から20cm離れた位置	2913.60	32.81	-29.97	1.39
		最外周	2827.00	51.59	-32.05	1.66
	3cm	中心	2324.80	45.94	-44.12	1.43
		中心から10cm離れた位置	2115.80	84.43	-49.15	2.19
		中心から20cm離れた位置	2224.20	40.18	-46.54	1.30
		最外周	2131.40	27.77	-48.77	1.07
	2cm	中心	1526.40	36.98	-63.31	1.07
		中心から10cm離れた位置	1485.60	23.39	-64.29	0.81
		中心から20cm離れた位置	1404.80	35.08	-66.24	1.01
		最外周	1436.00	48.65	-65.49	1.30

表3.2-10 上下コリメータ開度設定試験での計測データ（スパイラル測定）

線源位置	上下コリメータ	線源位置	平均値	計数誤差	相対比	標準偏差
最上段	8cm	中心	2456.20	54.47	-40.97	1.62
		中心から10cm離れた位置	2560.80	24.61	-38.45	1.16
		中心から20cm離れた位置	2405.80	45.99	-42.18	1.45
		最外周	1998.20	73.00	-51.97	1.92
	7cm	中心	2460.40	43.29	-40.87	1.42
		中心から10cm離れた位置	2560.20	47.71	-38.47	1.52
		中心から20cm離れた位置	2333.60	52.27	-43.91	1.55
		最外周	1971.00	51.93	-52.63	1.47
	6cm	中心	2463.00	18.88	-40.80	1.06
		中心から10cm離れた位置	2460.00	46.08	-40.87	1.47
		中心から20cm離れた位置	2227.60	74.94	-46.46	2.00
		最外周	1933.00	39.35	-53.54	1.21
	5cm	中心	2233.60	22.59	-46.32	1.03
		中心から10cm離れた位置	2231.20	77.27	-46.37	2.05
		中心から20cm離れた位置	1983.80	38.73	-52.32	1.21
		最外周	1696.00	138.57	-59.24	3.40
	4cm	中心	1850.40	48.57	-55.53	1.37
		中心から10cm離れた位置	1977.80	28.01	-52.46	1.03
		中心から20cm離れた位置	1736.20	53.40	-58.27	1.45
		最外周	1517.40	87.09	-63.53	2.18
	3cm	中心	1520.40	38.19	-63.46	1.09
		中心から10cm離れた位置	1522.40	38.10	-63.41	1.09
		中心から20cm離れた位置	1381.40	53.78	-66.80	1.40
		最外周	1273.80	62.93	-69.38	1.59
	2cm	中心	1224.60	39.09	-70.57	1.05
		中心から10cm離れた位置	1292.60	30.63	-68.93	0.89
		中心から20cm離れた位置	1139.40	30.40	-72.61	0.86
		最外周	798.80	29.06	-80.80	0.77
	1cm	中心	592.60	25.32	-85.76	0.65
		中心から10cm離れた位置	637.00	21.20	-84.69	0.57
		中心から20cm離れた位置	556.20	26.49	-86.63	0.67
		最外周	514.80	18.90	-87.63	0.50
最下段	8cm	中心	719.40	42.26	-82.71	1.05
		中心から10cm離れた位置	1069.40	37.17	-74.30	0.99
		中心から20cm離れた位置	1315.40	24.83	-68.38	0.79
		最外周	750.40	23.06	-81.96	0.63
	7cm	中心	723.00	34.59	-82.62	0.88
		中心から10cm離れた位置	1077.60	15.85	-74.10	0.57
		中心から20cm離れた位置	1278.00	47.08	-69.28	1.24
		最外周	754.80	13.61	-81.86	0.44
	6cm	中心	739.60	22.57	-82.22	0.61
		中心から10cm離れた位置	1045.80	27.60	-74.86	0.78
		中心から20cm離れた位置	1321.60	30.25	-68.24	0.89
		最外周	741.80	45.88	-82.17	1.14
	4cm	中心	636.40	41.15	-84.70	1.02
		中心から10cm離れた位置	909.00	36.78	-78.15	0.95
		中心から20cm離れた位置	1154.40	73.81	-72.25	1.83
		最外周	626.00	24.21	-84.95	0.63
	2cm	中心	321.60	11.87	-92.27	0.31
		中心から10cm離れた位置	378.20	16.21	-90.91	0.42
		中心から20cm離れた位置	611.80	24.27	-85.30	0.63
		最外周	402.00	13.73	-90.34	0.37
	1cm	中心	168.20	6.94	-95.96	0.18
		中心から10cm離れた位置	193.20	11.58	-95.36	0.29
		中心から20cm離れた位置	348.80	7.26	-91.62	0.22
		最外周	283.60	11.65	-93.18	0.30

表3. 3-1 検出限界評価試験データ

測定時間 [分]	測定値 [カウント]	検出限界 計数率 [cpm]	検出限界 [MBq]	^{239}Pu 検出限界 重量 [mg]
20	49	1.73	7.70	4.75
30	66	1.31	5.83	3.60
40	84	1.09	4.86	3.00
50	113	1.00	4.44	2.74
60	134	0.90	4.00	2.46
70	155	0.82	3.66	2.26
720	1464	0.23	1.03	0.64
1440	2890	0.16	0.72	0.44

表3. 3-2 線源位置偏在の測定試験データ(カートンボックス)

廃棄物	線源位置	測定値					平均値	標準偏差
布手袋	(1)	30.38	28.85	28.49	27.65	30.67	29.21	1.28
	(2)	33.40	37.48	30.02	32.70	33.73	33.47	2.68
	(3)	32.12	29.84	28.69	29.57	25.86	29.22	2.27
	(4)	28.86	30.07	29.14	31.81	28.70	29.72	1.29
グローブ	(1)	35.10	36.26	34.42	30.57	36.51	34.57	2.39
	(2)	38.14	41.08	33.13	37.51	37.84	37.54	2.85
	(3)	36.82	42.15	38.67	39.46	37.18	38.86	2.13
	(4)	34.42	37.86	36.46	34.07	34.83	35.53	1.59

単位: mg

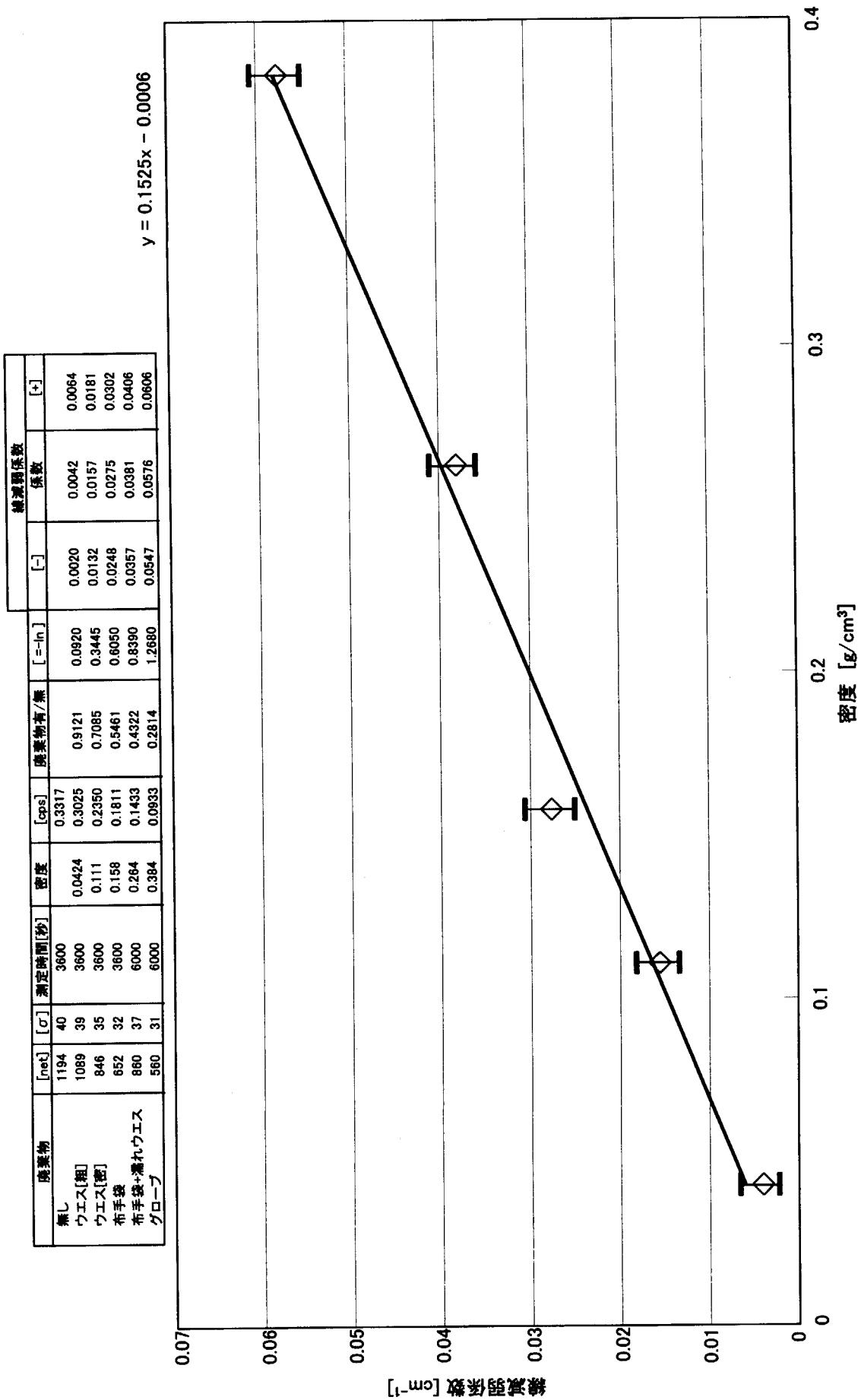


図3.1-1 密度一線減弱係数の関係

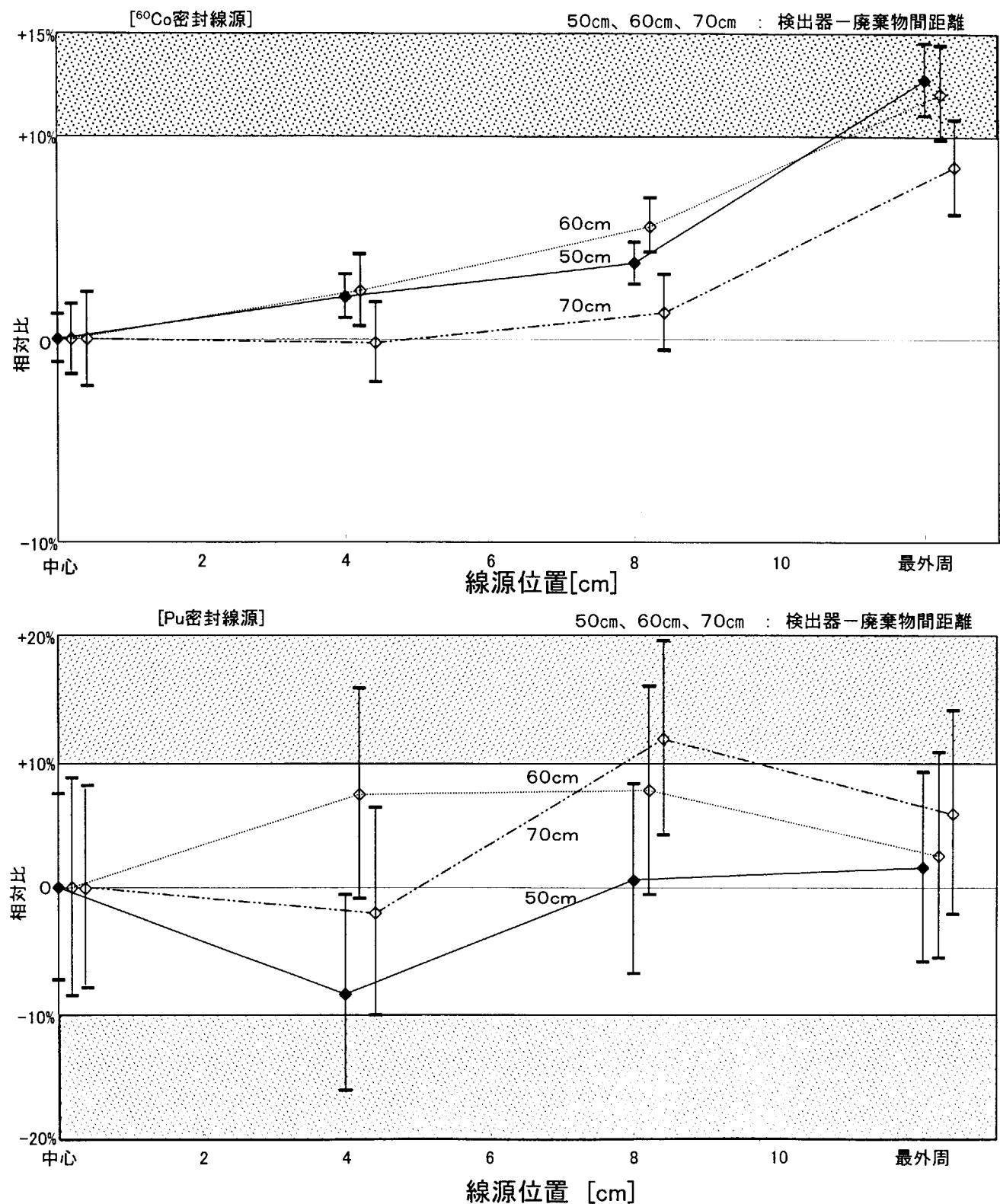


図3. 2-1 検出器一廃棄物間距離設定試験データ

(密度ゼロ: 廃棄物無し) (カートンボックス)

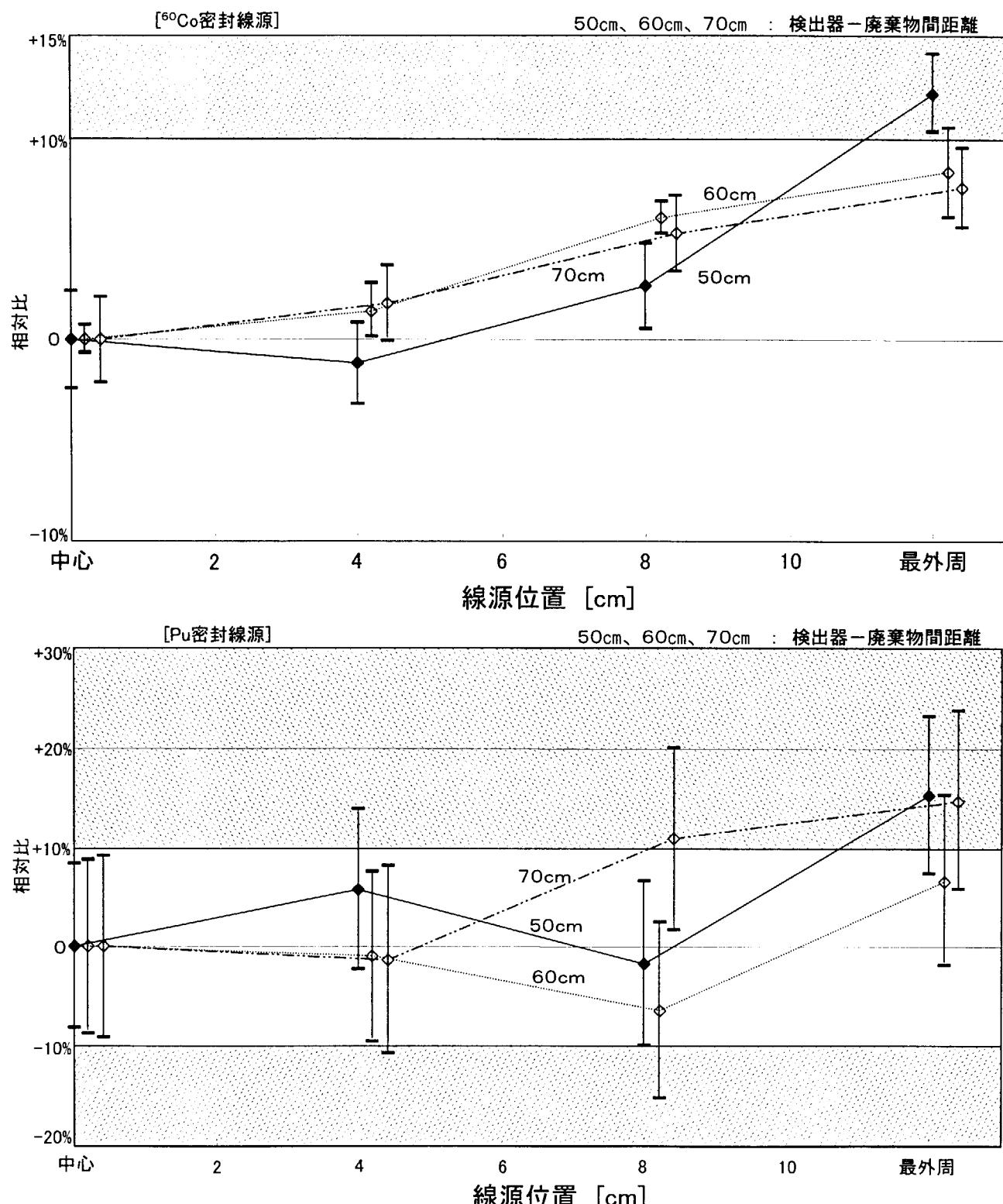


図3. 2-2 検出器-廃棄物間距離設定試験データ
(密度小: 布手袋) (カートンボックス)

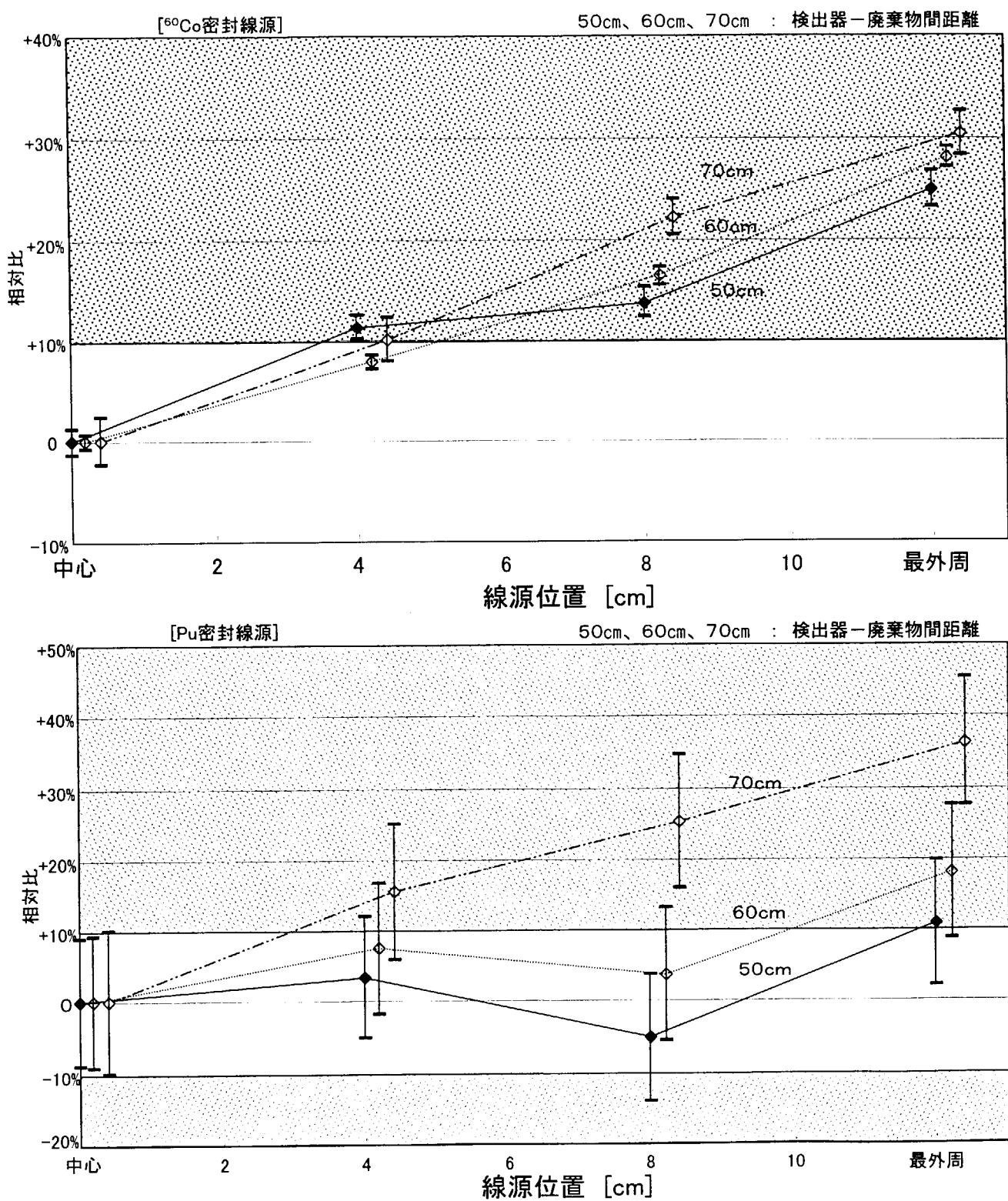


図3. 2-3 検出器-廃棄物間距離設定試験データ
(密度大:グローブ) (カートンボックス)

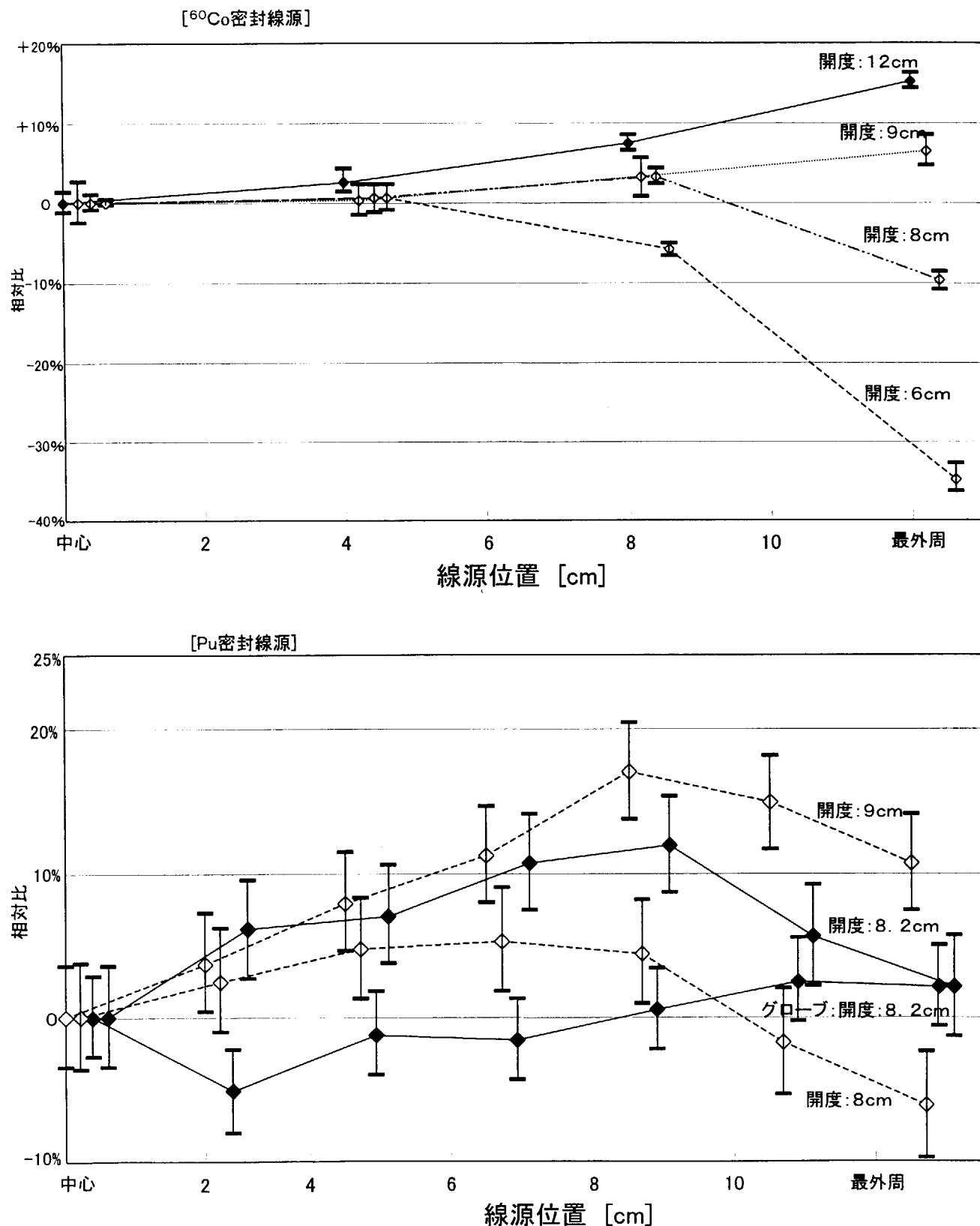
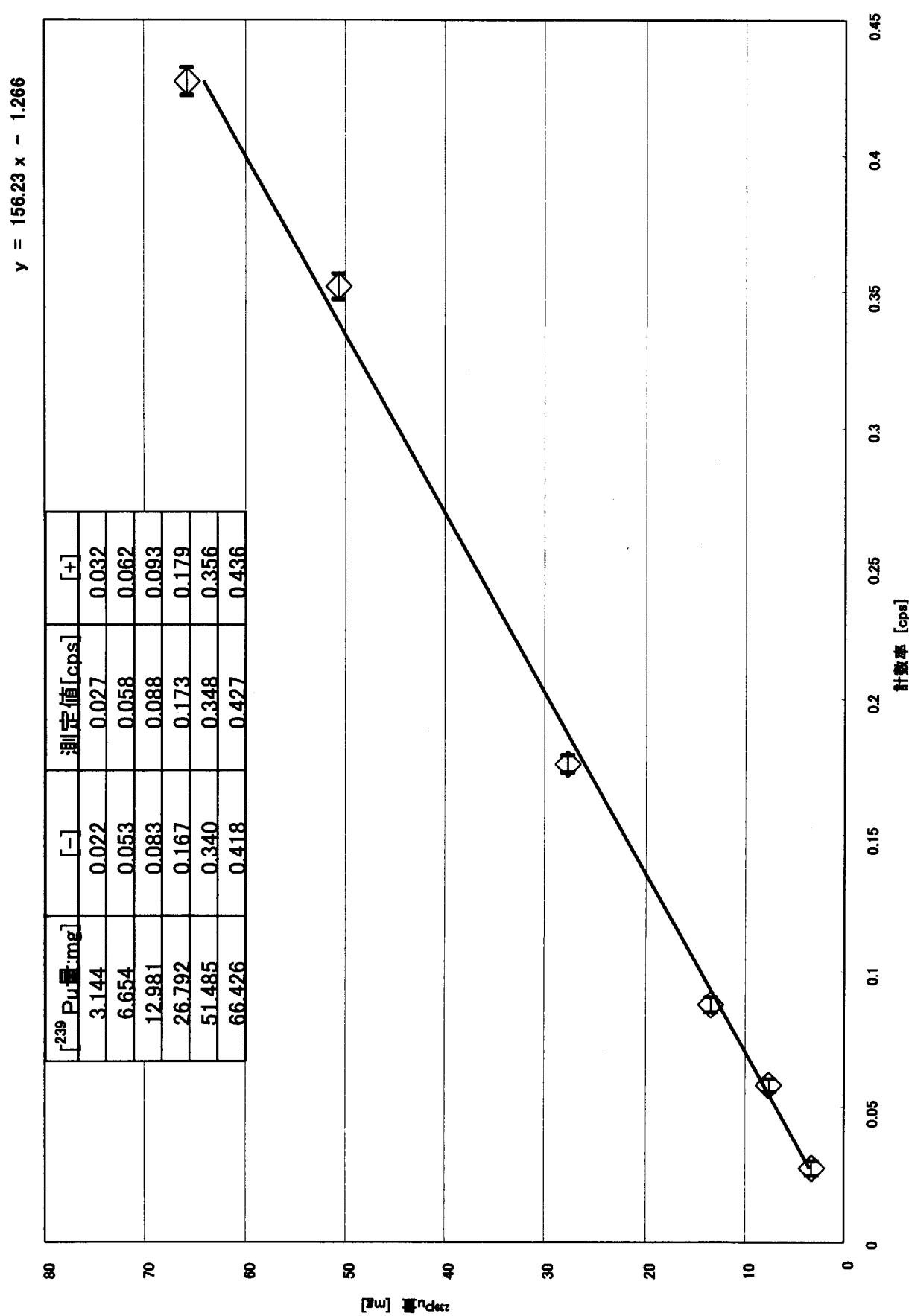


図3. 2-4 左右コリメータ開度の測定精度（廃棄物：布手袋、グローブ）
(カートンボックス)



$$y = 170.202x + 0.649333$$

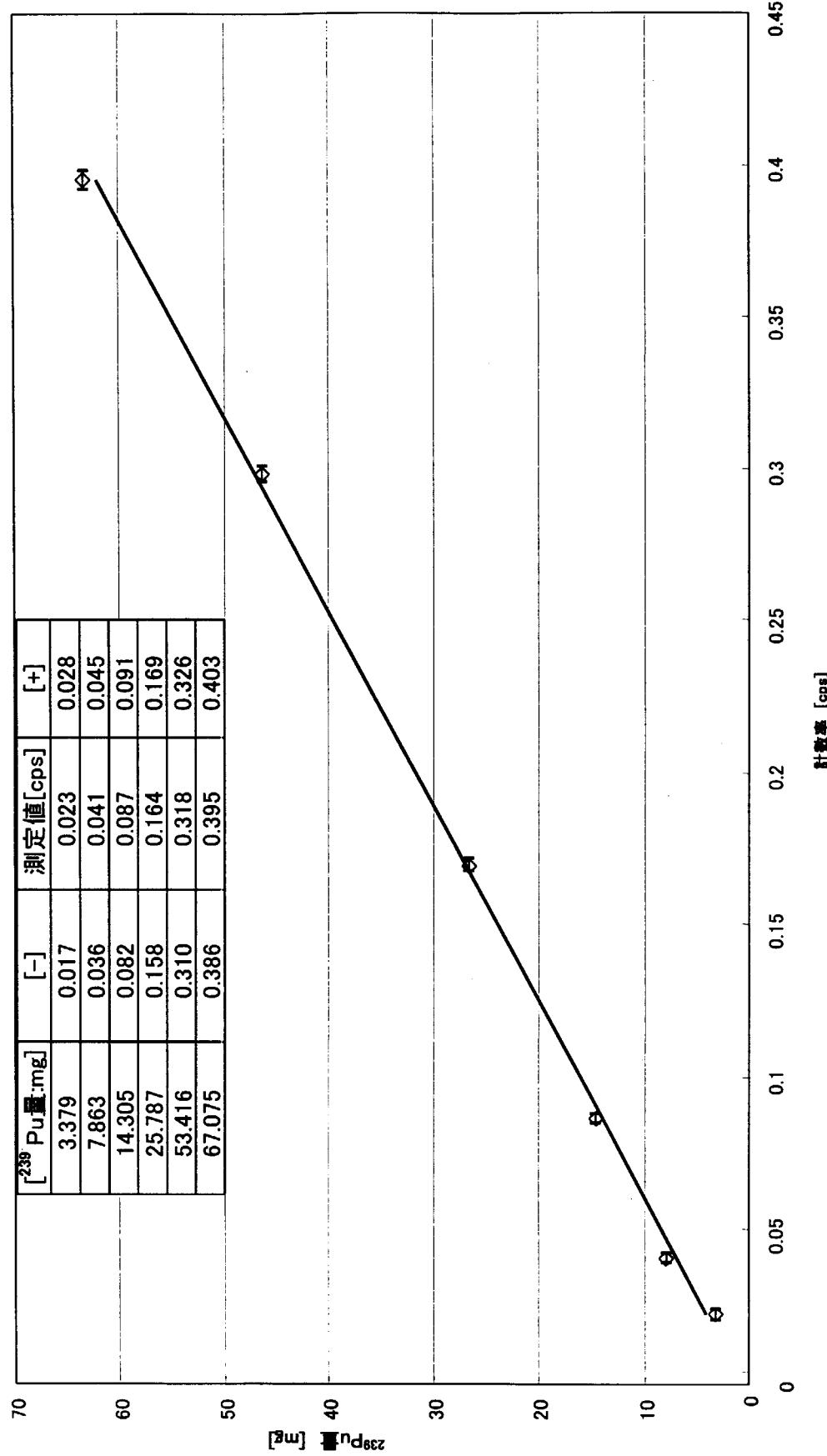


図3. 2-6 検量線 (45ℓ缶)

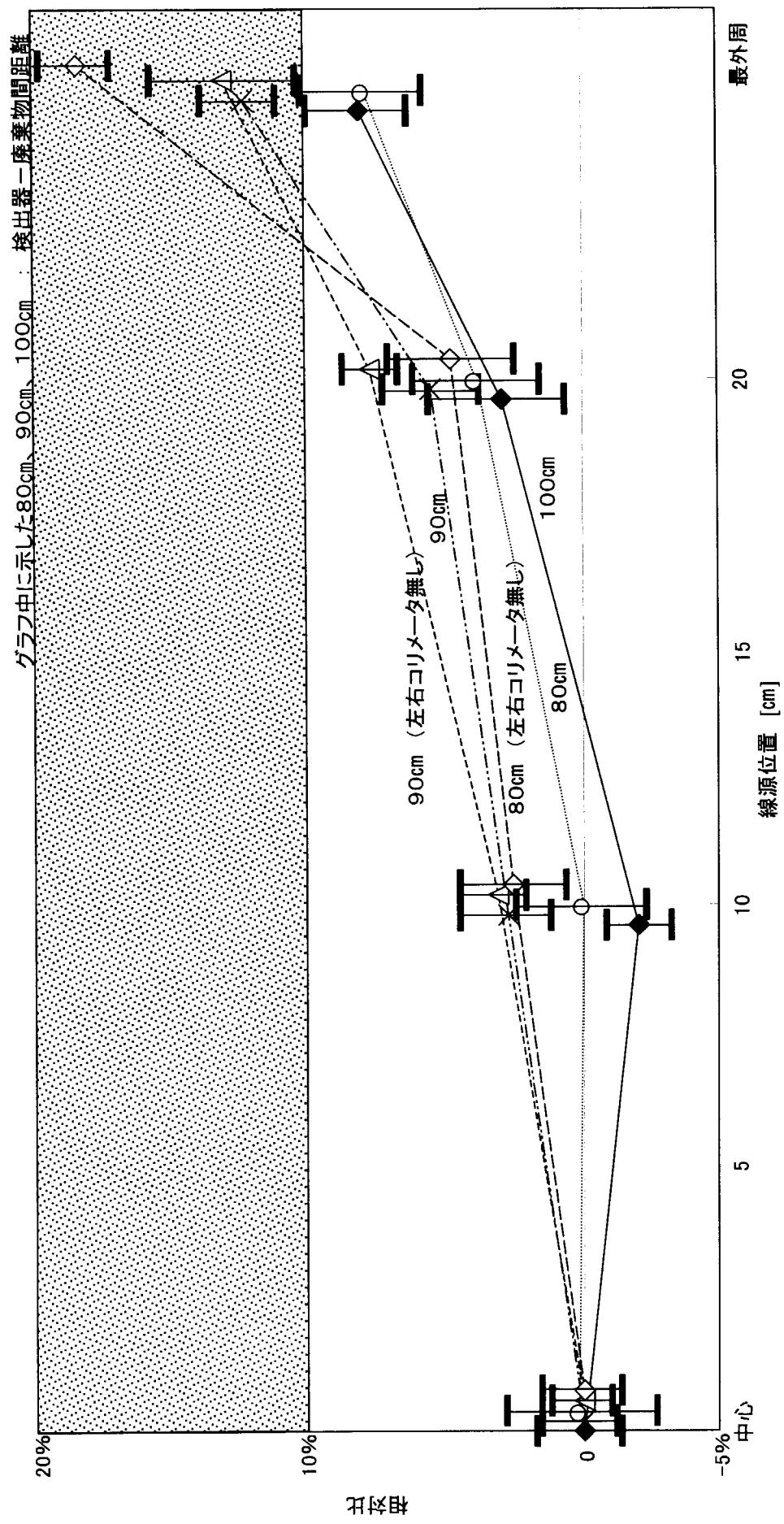


図3.2-7 検出器－廃棄物間距離設定試験データ(200ℓ缶)

(廃棄物:ウエス+布手袋)

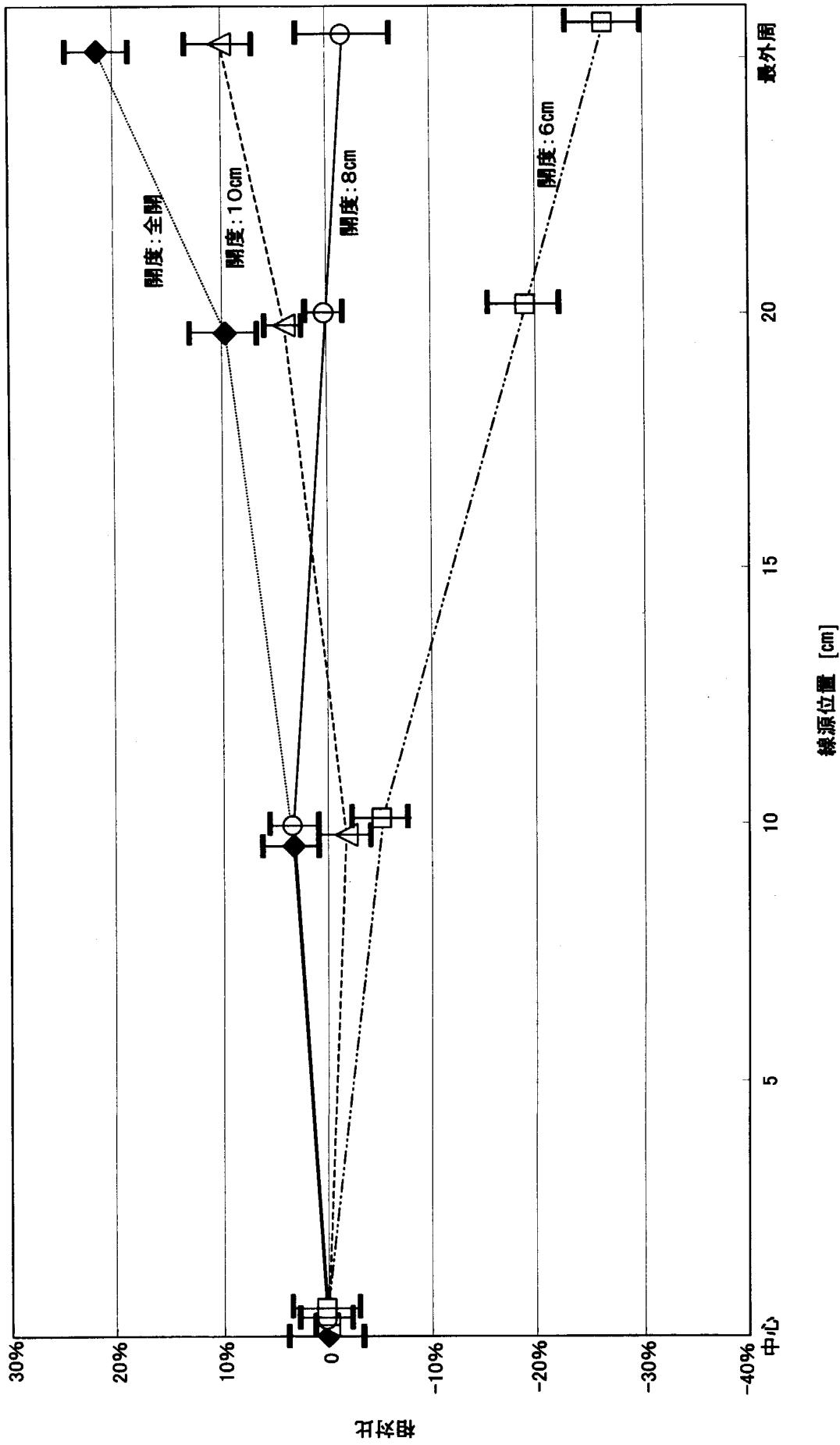


図3.2-8 左右コリメータ開度設定試験データ (200 l 缶)

(廃棄物: ウエス+布手袋)

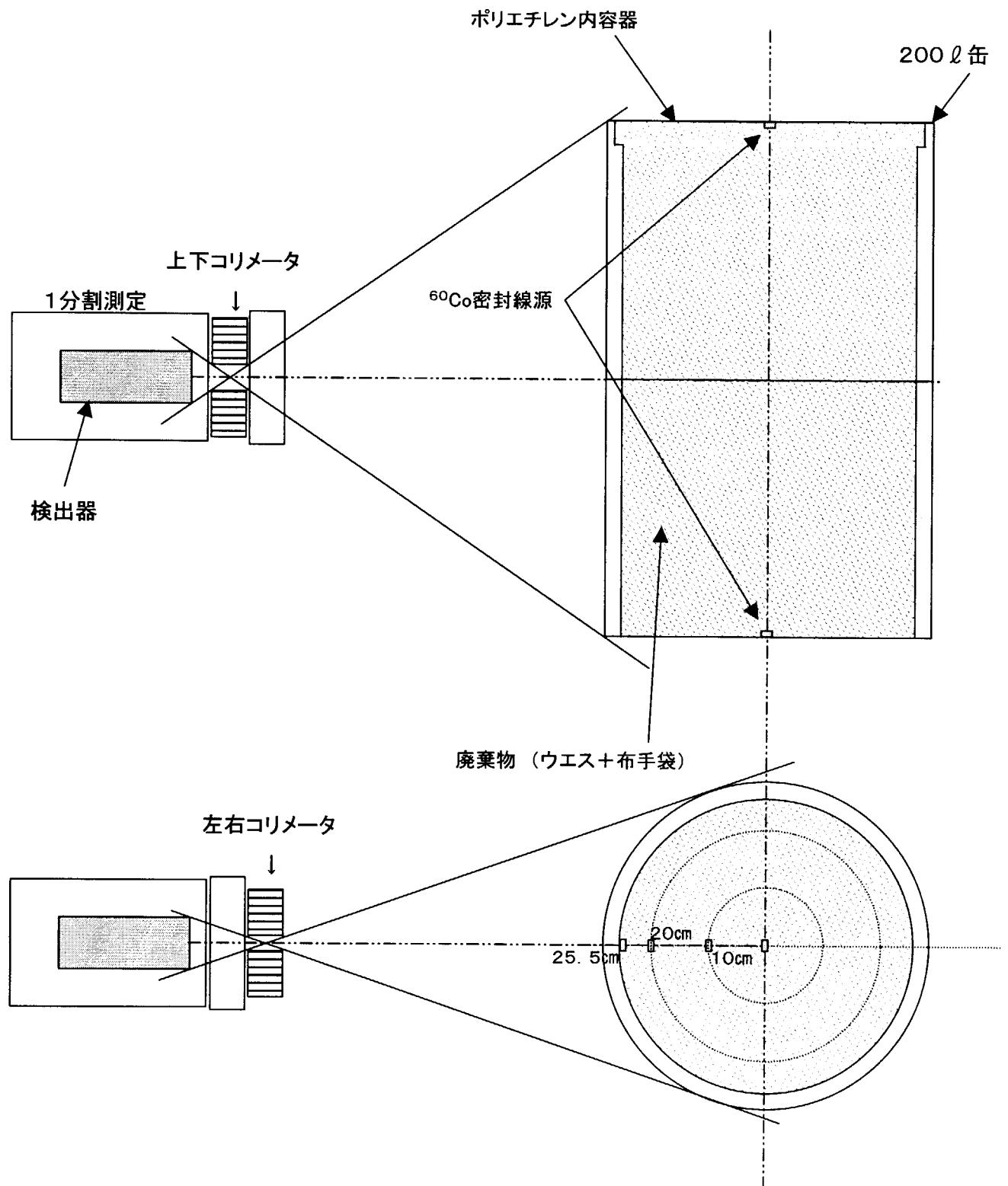


図3.2-9 スライス測定での上下コリメータ開度設定

(200 ℓ 缶) (1分割測定の場合)

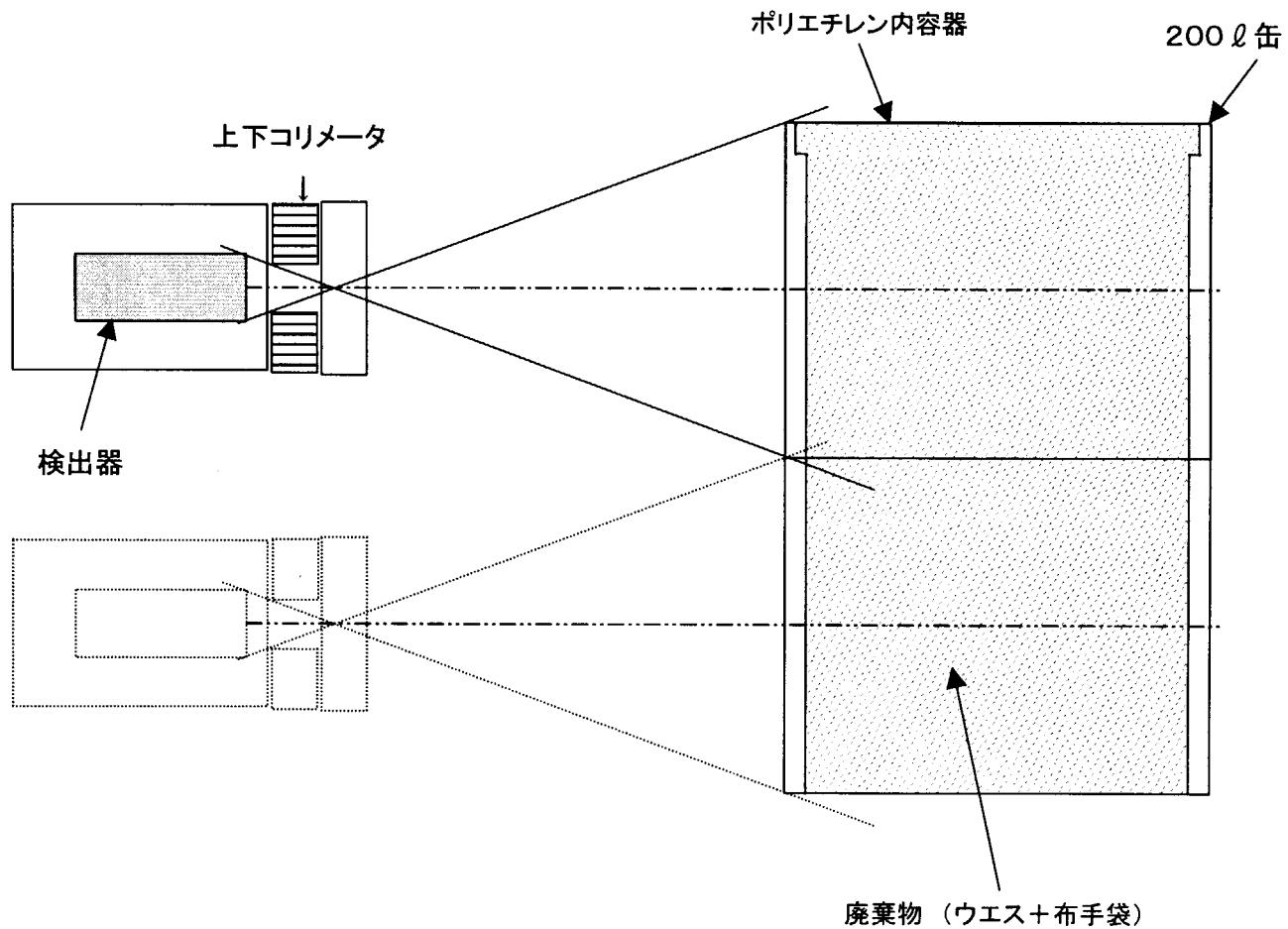


図3. 2-10 スライス測定での上下コリメータ開度設定

(200 ℥缶) (2分割測定の場合)

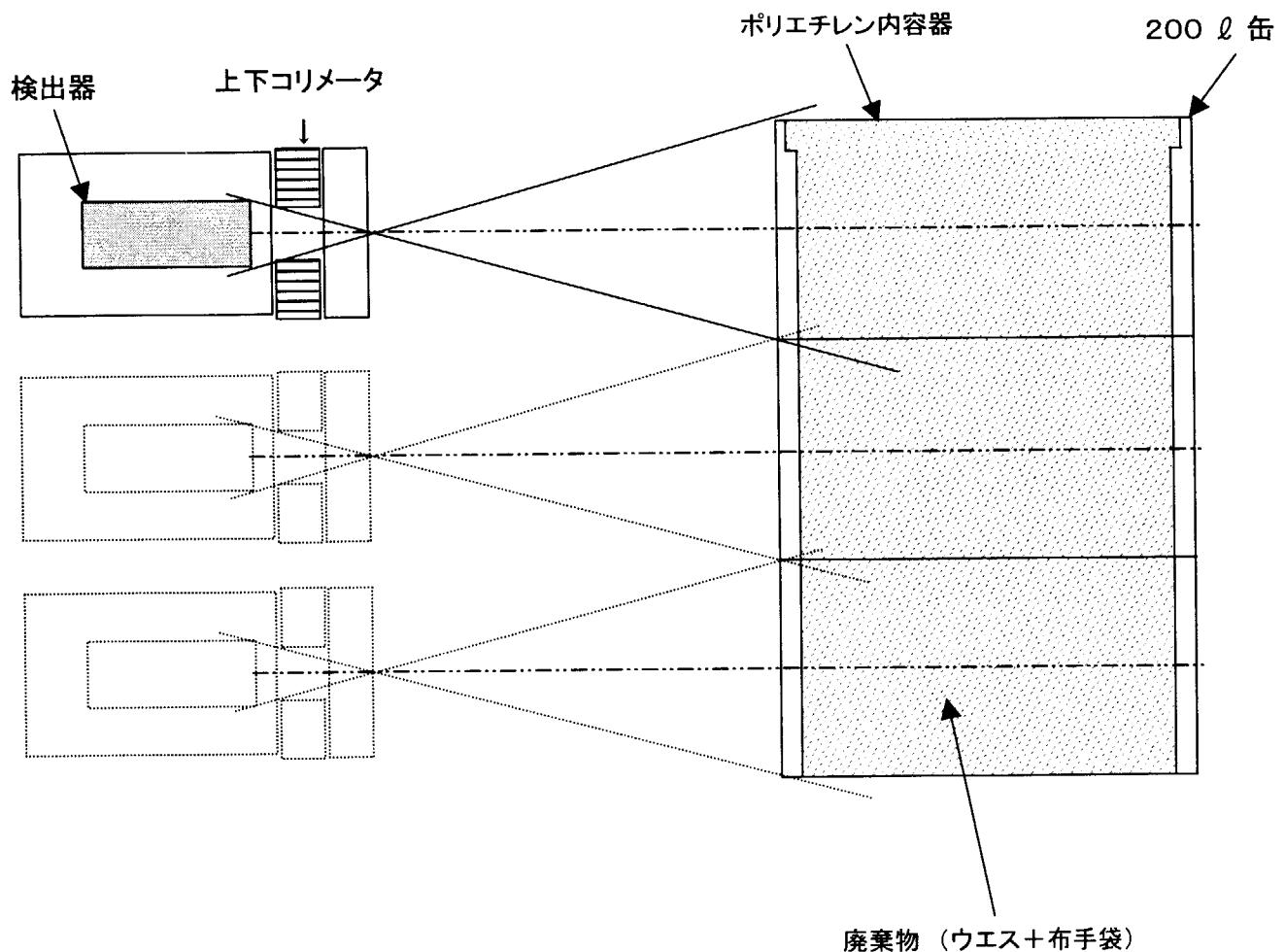


図3. 2-11 スライス測定での上下コリメータ開度設定

(200 ℥ 缶) (3分割測定の場合)

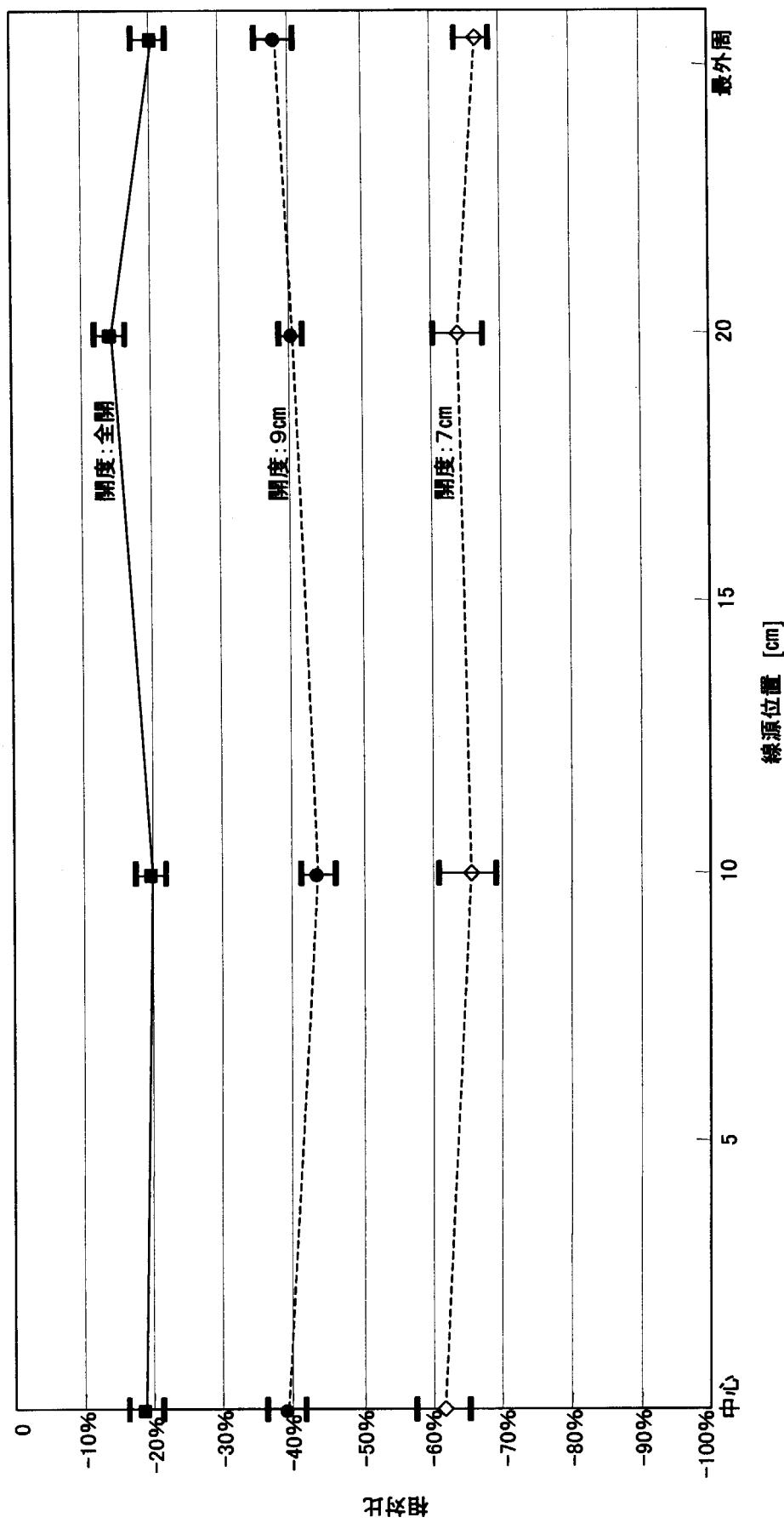


図3. 2-12 上下コリメータ開度設定試験データ
(200 ℥缶、1分割スライス測定、廃棄物:ウエス+布手袋)

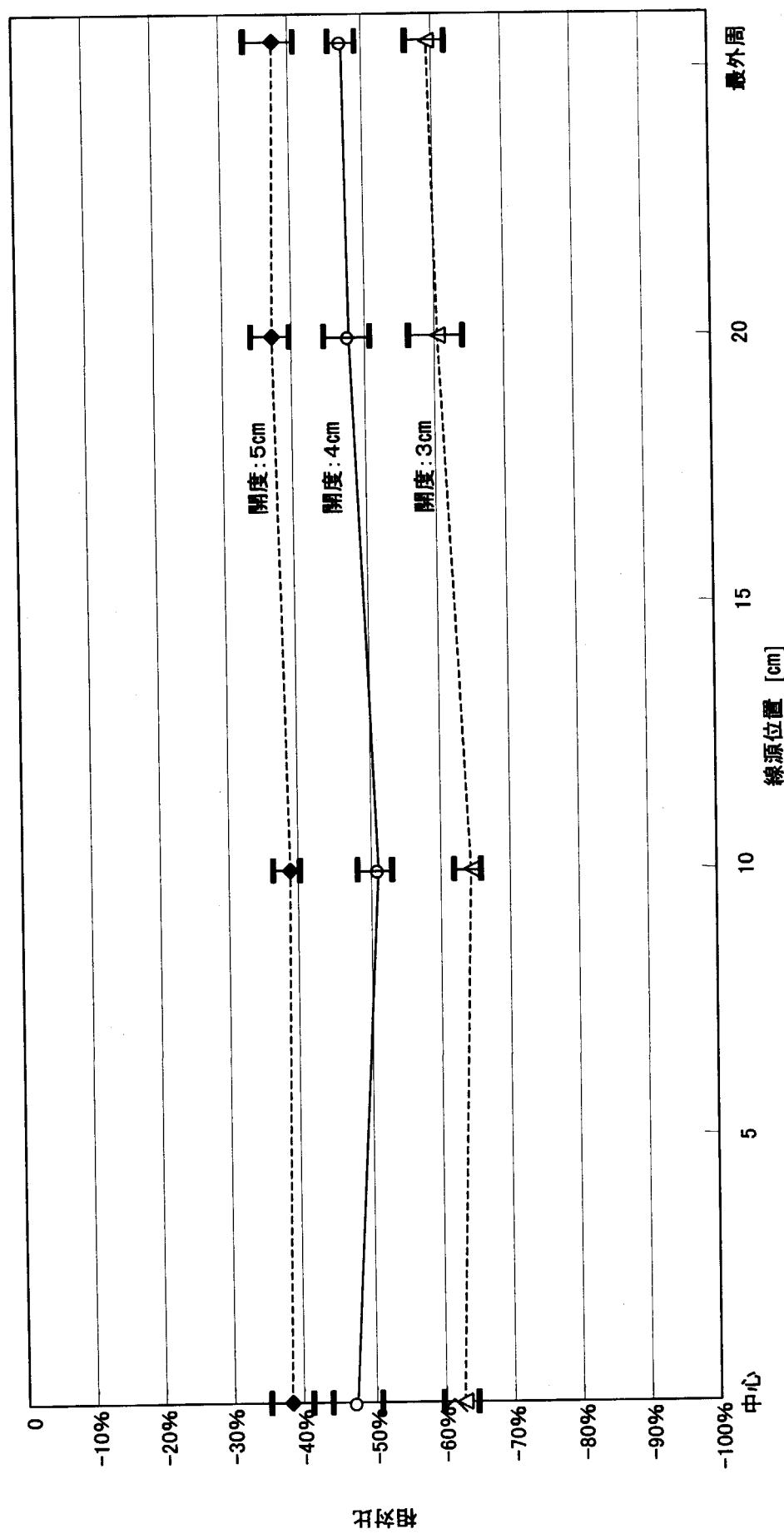


図3. 2-13 上下コリメータ開度設定試験データ

(200 l 缶、2分割スライス測定、廃棄物：ウエス+布手袋)

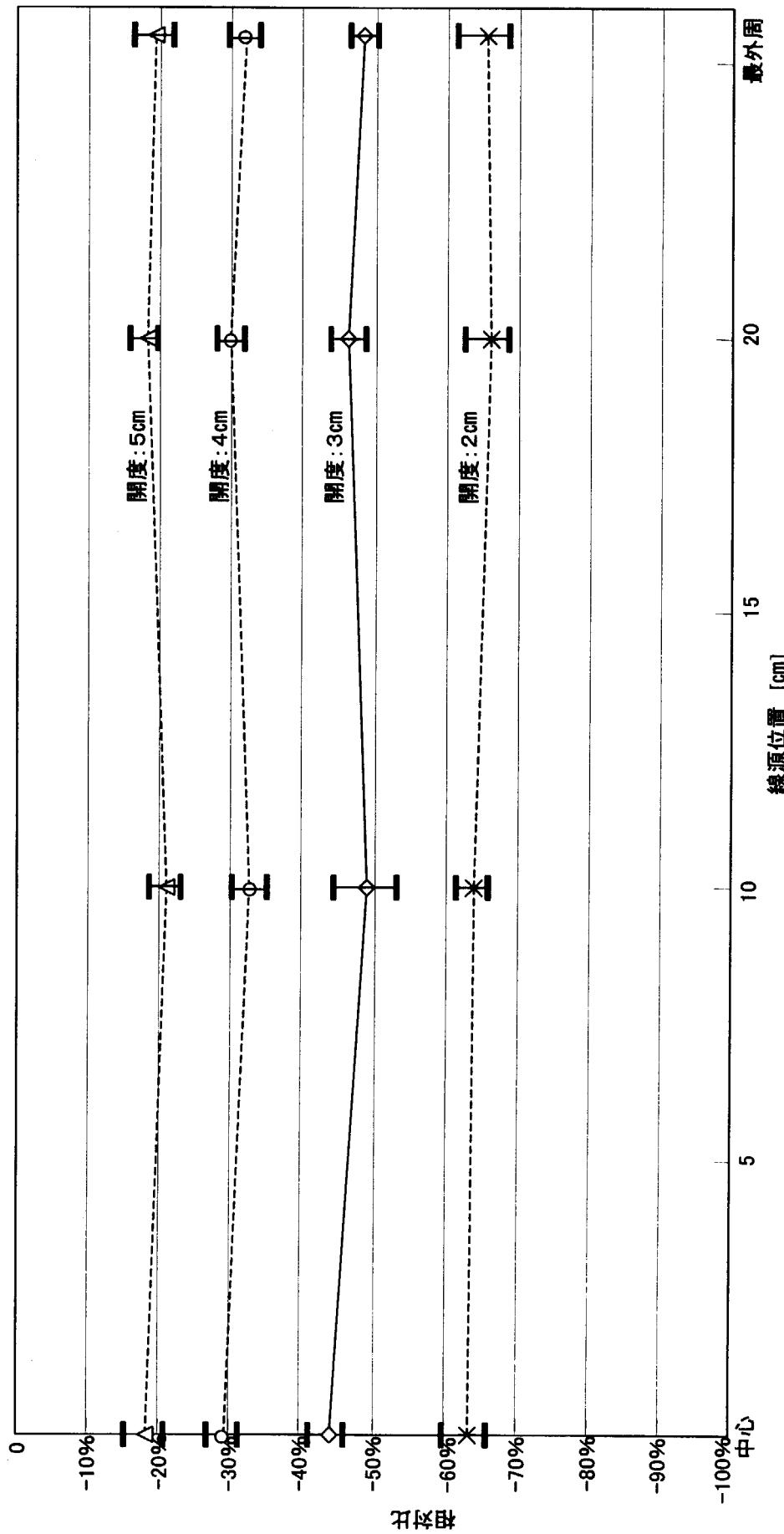


図3.2-14 上下コリメータ開度設定試験データ

(200ℓ缶、3分割スライス測定、廃棄物：ウエス+布手袋)

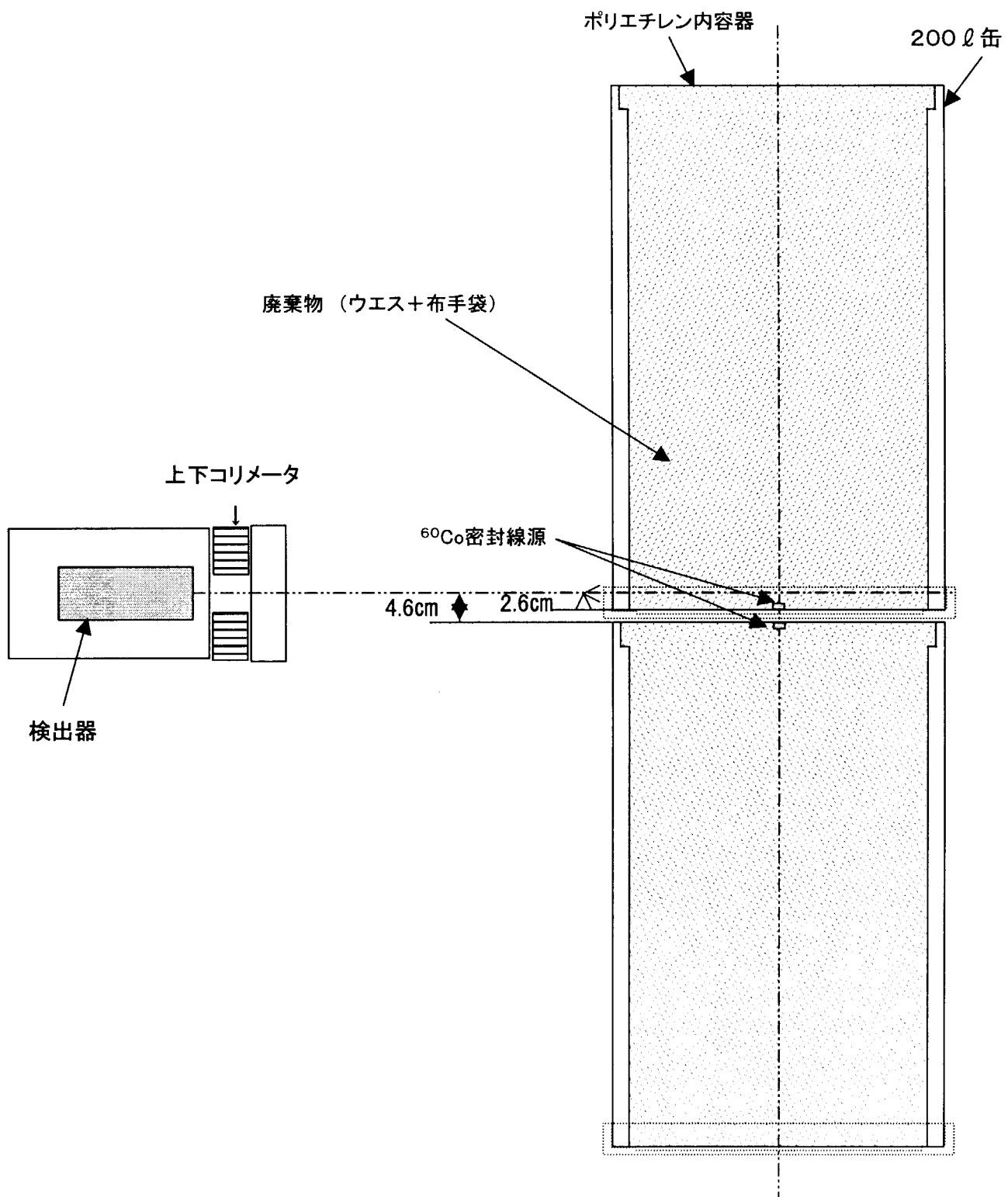


図3. 2-15 スパイラル測定での上下コリメータ開度設定

(200 ℥ 缶)

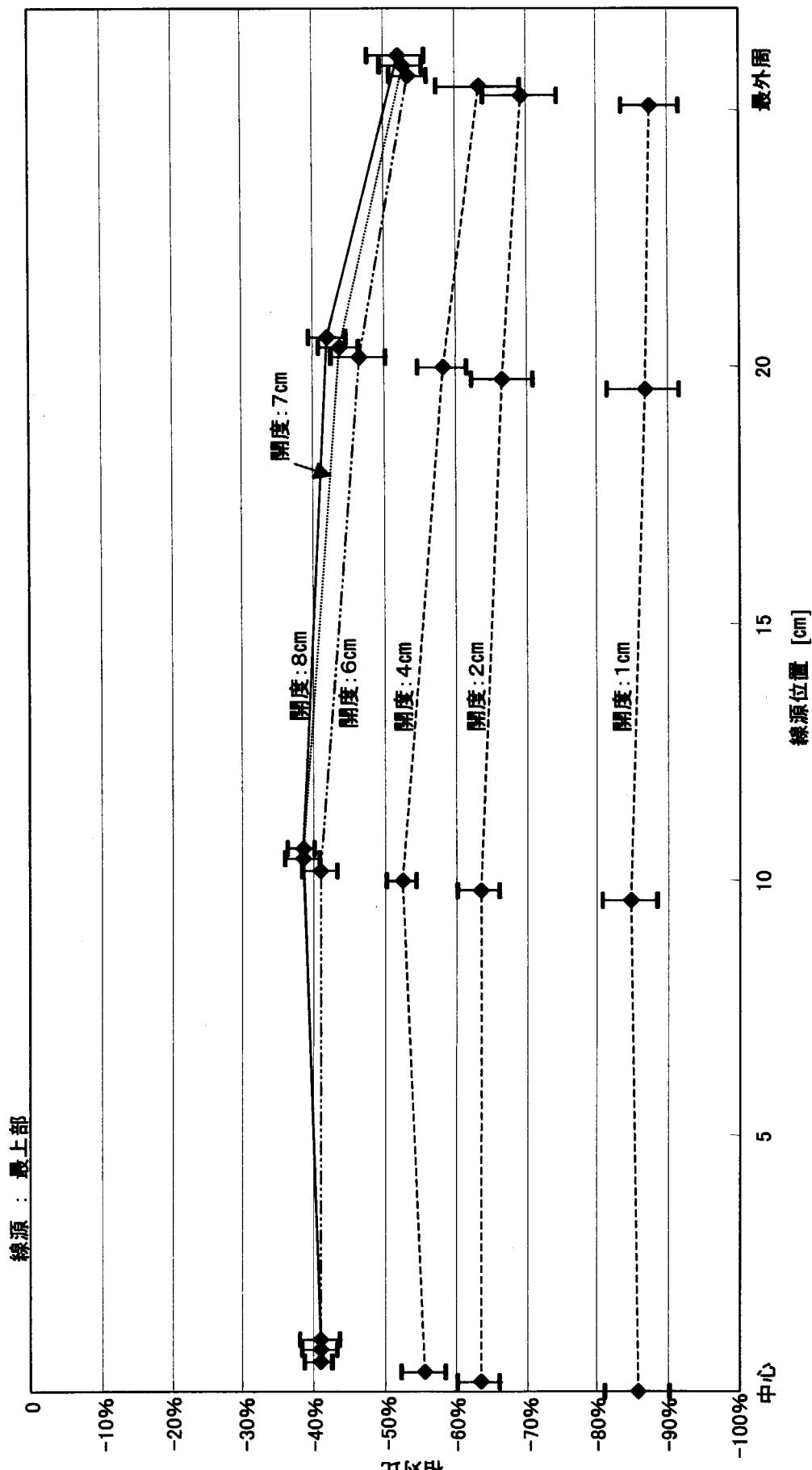
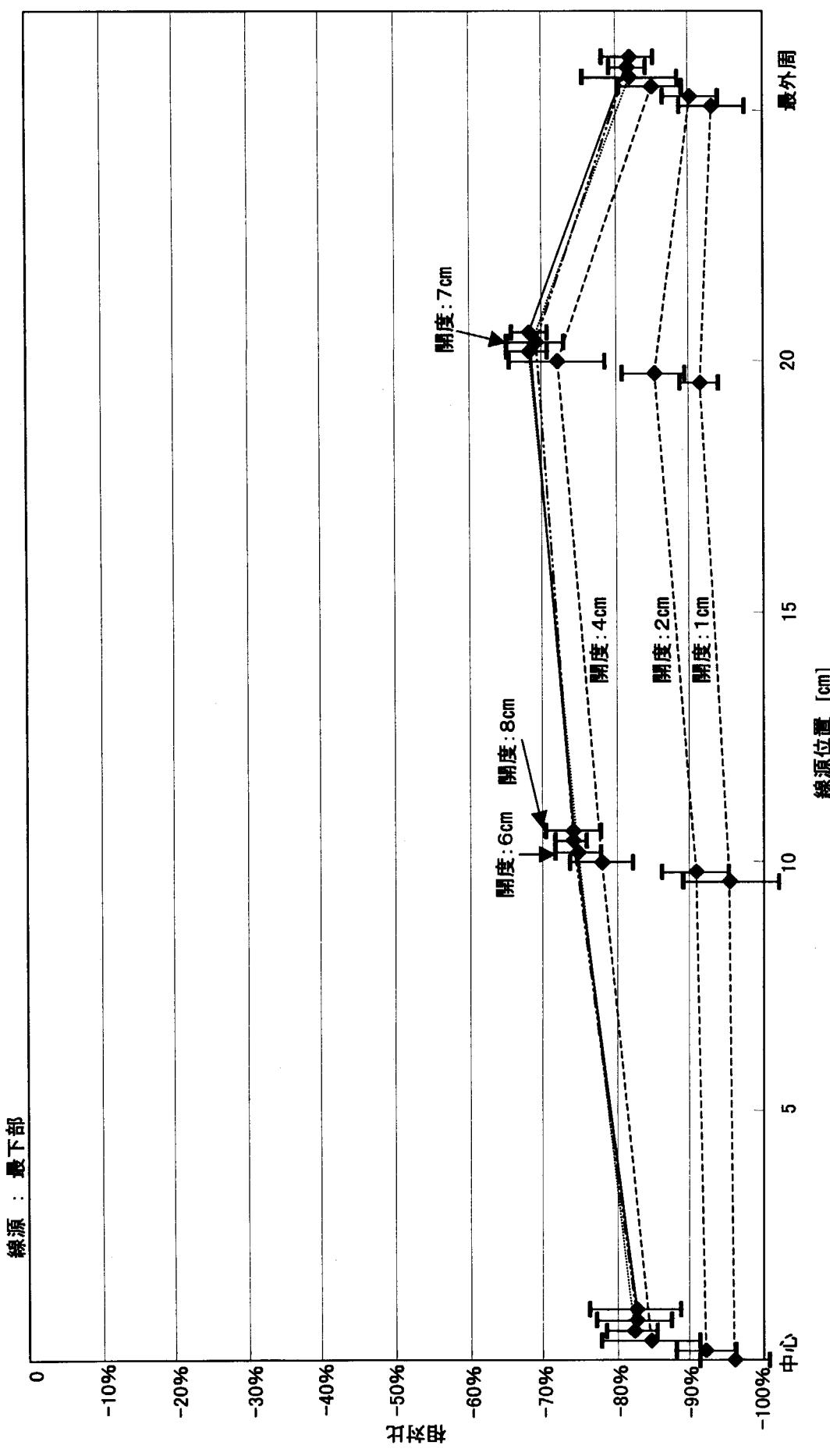


図3. 2-16 上下コリメータ開度設定試験データ
(200 ℥缶、スパイラル測定、廃棄物:ウエス+布手袋)



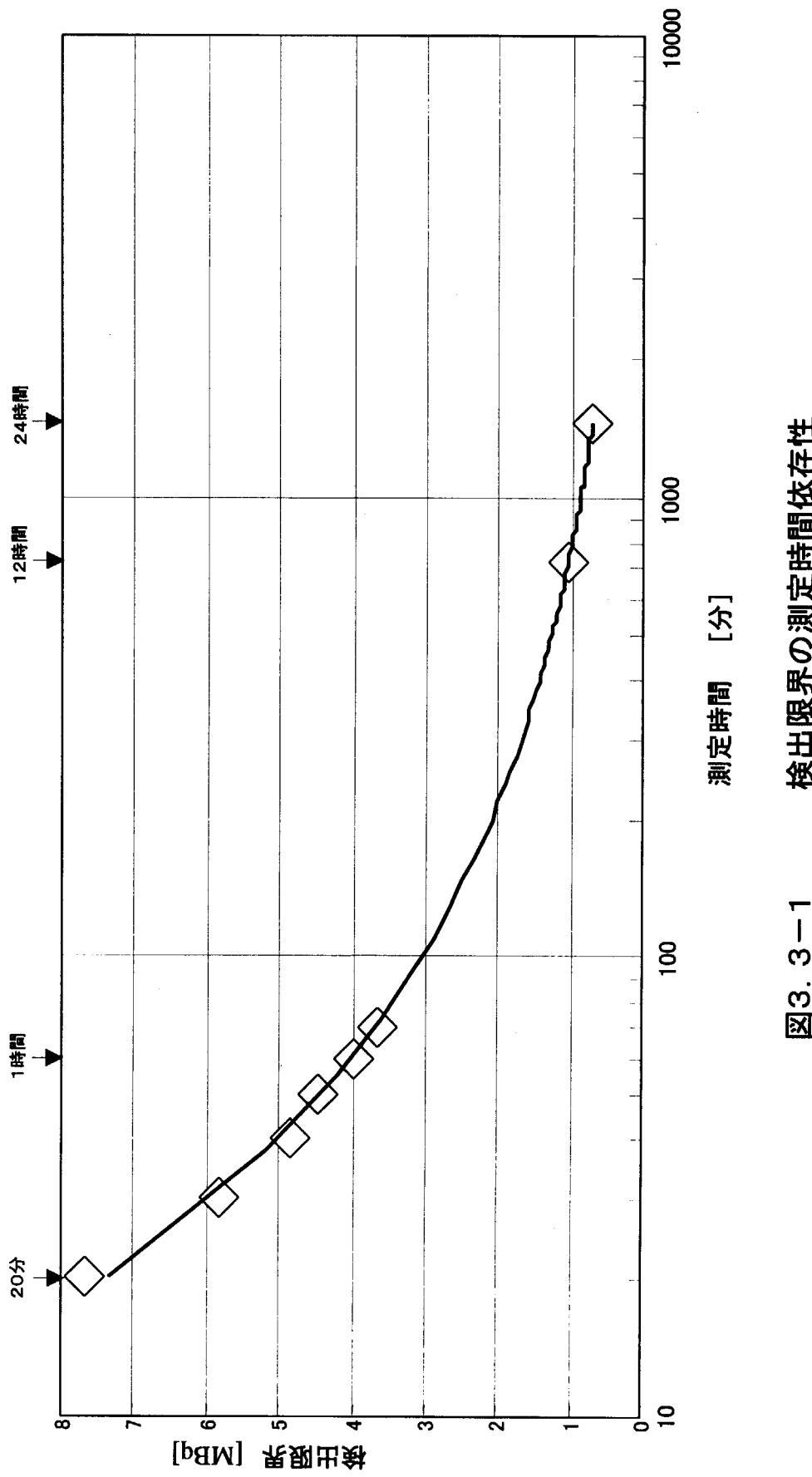


図3.3-1 検出限界の測定時間依存性

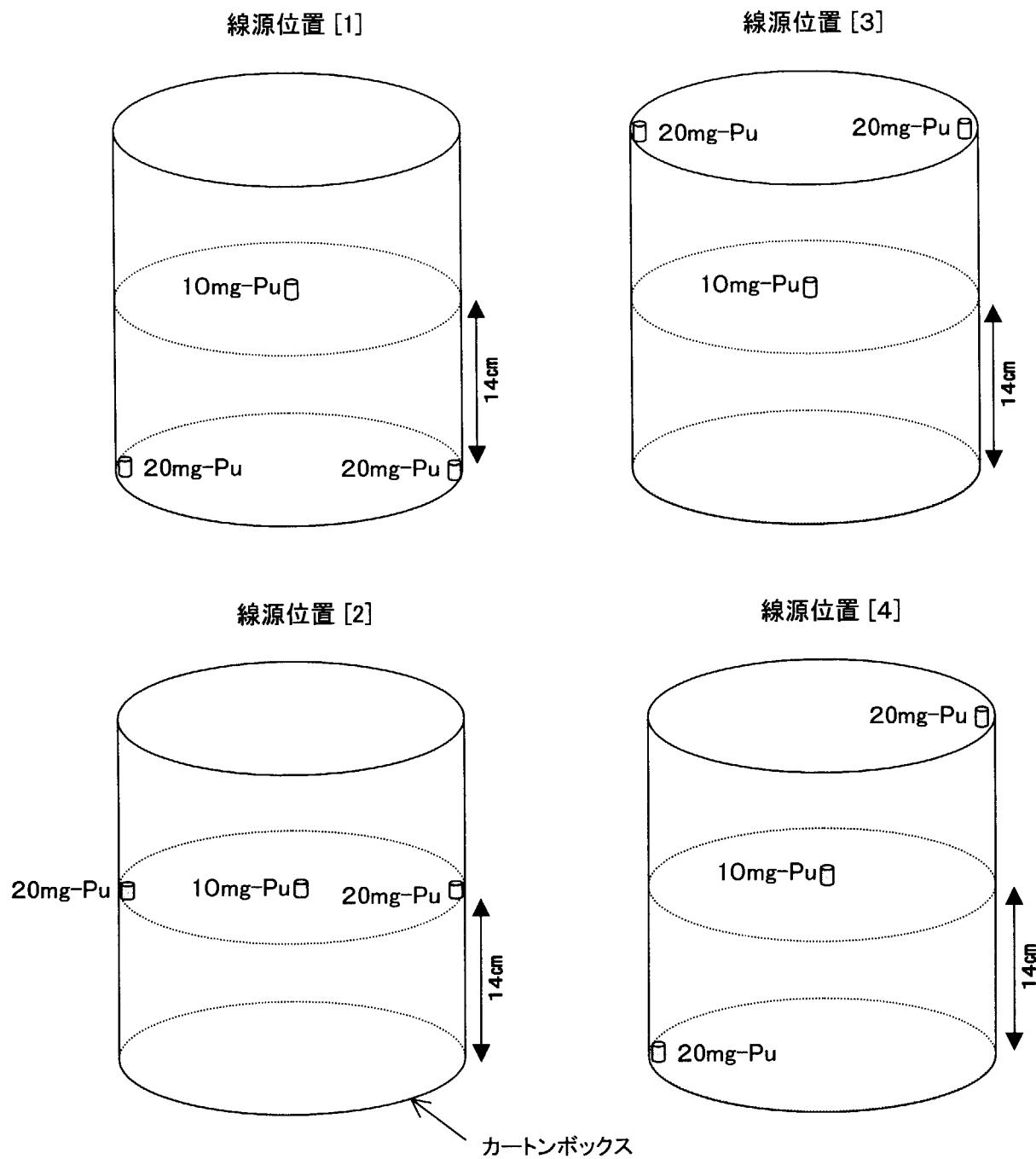
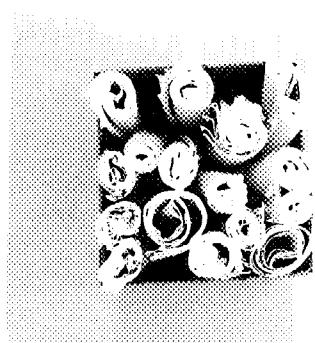
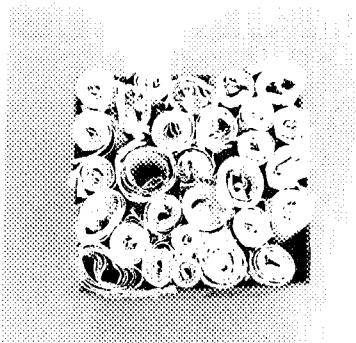


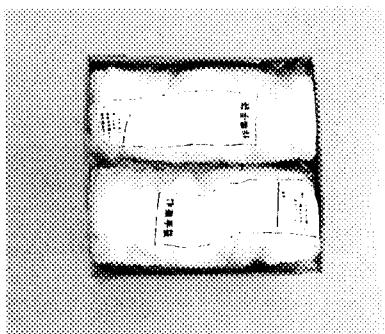
図3.3-2 模擬廃棄物の線源位置配置図
(カートンボックス)



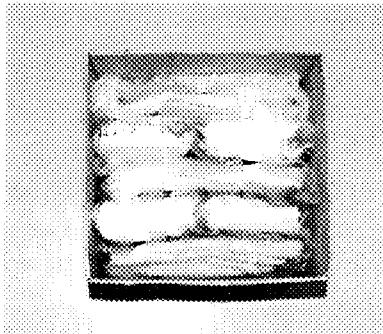
[ウエス粗]



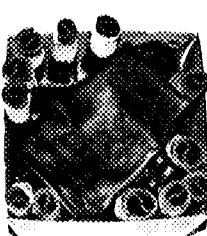
[ウエス密]



[布布手袋]



[濡れウエス+布手袋]



[グローブ]

写真-3 模擬廃棄物

This is a blank page.

4. まとめ

廃棄物 NDA 装置は、NUCEFで発生する α 固体廃棄物を対象に廃棄物に含まれるプルトニウム量を把握するため設置し、パッシブガンマ線計測法で行う。NUCEFでは、 α 固体廃棄物を当面施設内で保管するが、 α 固体廃棄物のレベル区分の把握、また、廃棄物であっても、プルトニウム量を1容器毎に把握する必要がある。このため、廃棄容器毎に装置の測定体系を設定する必要がある。この設定は、廃棄物内容物による自己遮へい効果を評価するために、模擬廃棄物を使用して線減弱係数の回帰式を決定し、廃棄物容器毎に本装置の測定体系を設定し、測定体系の妥当性を確認した。

① カートンボックス

本装置の測定体系は、以下の通りである。

- i) 廃棄物－検出器間距離 : 50 cm
- ii) コリメータ開度 : 左右コリメータ：8.2 cm
上下コリメータ：全開

この体系で、カートンボックスの検量線回帰式を決定した。この検量線を使用して、密度の異なる模擬廃棄物にプルトニウム密封線源をばらばらに置いて測定データの妥当性を検証した。その結果、線源位置の変動による影響は小さいことが確認できた。また、設定した装置体系から、実廃棄物を20分計測した場合、検出限界が7.70 MBqとなり、[A-1] 区分と [B-2] 区分の分別が十分に可能であることが確認できた。

② 45ℓ 缶

45ℓ 缶は、①項で設定したカートンボックスの測定体系を使用して、45ℓ 缶の検量線回帰式を決定した。45ℓ 缶では、カートンボックスについて実施した測定データの妥当性検証は実施しなかったが、カートンボックスと同様に、線源位置の変動による影響は小さいと考えられる。

③ 200ℓ 缶

本装置の測定体系は、以下の通りである。

- i) 廃棄物－検出器間距離 : 100 cm
- ii) コリメータ開度 : 左右コリメータ：8 cm
上下コリメータ：
 - ・スライス測定：(1分割) 全開

謝 辞

本試験を実施するにあたり、安全試験部臨界技術課曾野浩樹氏には、目的核種 (^{239}Pu : 414 keV) からの γ 線強度が遮へい効果により減衰し、この減衰効果を計算コード「連続エネルギーモンテカルロコード：MVP」で評価するに当たり、貴重なコメント及び助言を頂き、深く感謝いたします。エネルギーシステム研究部炉物理研究グループ課長代理春山満夫氏には、検出器の特性評価をするにあたり、貴重な助言を頂き、深く感謝いたします。さらに、本書の原稿の査読をしていただいた保健物理部施設放射線管理第2課課長代理水書利雄氏に深く感謝いたします。また、放射線利用振興協会片岡孝行氏には、試験の初期から廃棄物NDA装置の運転及びデータ処理を実施して頂き、深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 三島毅: PNCT860-77-01「核物質定量 NDA 技術及び核物質管理システムへの応用」(1977)
- (2) 森口繁一: 「初等数理統計学」培風館 (1977)

添付資料－1

プログラム

本装置の計算機でプルトニウム評価を実施する場合、計算結果は廃棄物容器1個毎のプリントアウトのみであり、管理上煩雑となる。BASIC言語でプログラムを作成して、ファイル化し、固体廃棄物管理に利用する。以下に計算プログラムを示す。

プログラムの操作手順

- ① ^{133}Ba 及び ^{239}Pu のピークネット計数を計測する。
- ② 測定時間、 ^{133}Ba 及び ^{239}Pu のピークネット計数の順で入力データファイルを作成する。
- ③ プログラムの実行(画面表示の順に実行する)
- ④ 測定時間、 ^{133}Ba ピークネット計数、 ^{239}Pu のピークネット計数及び ^{239}Pu 量の順で出力データファイルが作成される。

```

1000 '「プルトニウム量計算プログラム」
1010 '
1020 ' save "b:\$basic\$acc3.bas",a
1030 '
1040 DIM B(5000),C(5000),D(5000),Y1(5000)
1050 '
1060 CLS: INPUT "1:20_ 2:45_ 3:200_ 0:終了 ";A10
1070 IF A10=0 THEN END
1080 IF A10>=4 THEN GOTO 1060
1090 INPUT "廃棄物重量 [g] 入力 ";A20
1100 '
1110 '「データの読み込」
1120 '
1130 ON A10 GOTO 1150,1160,1170
1140 '
1150 OPEN "b:\$basic\$20_read.txt" FOR INPUT AS #1 : GOTO 1190
1160 OPEN "b:\$basic\$45_read.txt" FOR INPUT AS #1 : GOTO 1190
1170 OPEN "b:\$basic\$200read.txt" FOR INPUT AS #1 } ファイルの読み込み
1180 '
1190 FOR K2 =1 TO 5000
1200 IF EOF(1) THEN GOTO 1230
1210 INPUT #1, B(K2),C(K2),D(K2) ← B:測定時間、C: $^{133}\text{Ba}$ net数、D: $^{239}\text{Pu}$ net数
1220 NEXT K2
1230 CLOSE #1
1240 '
1250 ON A10 GOTO 1270,1330,1390
1260 '
1270 '「カートンボックスの計算」
1280 '
1290 RD=28      : A30=21243.45 ← RD:容器の直径、A30:容器の体積
1300 X1=156.23  : X2=-1.266 ← 検量線の回帰式係数
1310 GOSUB *ABC : GOTO 1470
1320 '
1330 '「45_缶の計算」
1340 '
1350 RD=30      : A30=28274.33
1360 X1=170.202 : X2=.649333
1370 GOSUB *ABC : GOTO 1470
1380 '

```

```

1390 '「200_缶の計算」
1400 '
1410 RD=      : A30=
1420 X1=      : X2=
1430 GOSUB *ABC
1440 '
1450 '「データの書き込み」
1460 '
1470 ON A10 GOTO 1490,1500,1510
1480 '
1490 OPEN "b:$basic\$20_write.txt" FOR OUTPUT AS #1 : GOTO 1530
1500 OPEN "b:$basic\$45_write.txt" FOR OUTPUT AS #1 : GOTO 1530
1510 OPEN "b:$basic\$200write.txt" FOR OUTPUT AS #1
1520 '
1530 FOR KK =1 TO K2-1
1540 PRINT #1, B(KK),C(KK),D(KK),Y1(KK) ← Y1:239Pu量
1550 NEXT KK
1560 CLOSE #1
1570 '
1580 GOTO 1060
1590 '
1600 '
1610 *ABC ← 239Pu量計算サブルーチン
1620 '
1630 I0=(652-40.857)/500
1640 '
1650 FOR KK=1 TO K2-1
1660 '
1670 I1=C(KK)/B(KK) : C=D(KK)/B(KK)
1680 ZA=.1525*(A20/A30)-.0006 ← 密度一線減弱係数の回帰式
1690 ZT=-(LOG(I1/I0))/RD
1700 TA=(I1/I0)^(ZA/ZT)
1710 CF=-(LOG(TA^.823))/(1-TA^.823)
1720 BC=C*CF
1730 '
1740 Y1(KK)=X1*BC+X2 ← 検量線の回帰式
1750 PRINT KK;Y1(KK);
1760 '
1770 NEXT KK
1780 '
1790 RETURN

```

45 ℥ 缶の入力データ例 [45_read.txt]

測定時間 [秒]	^{133}Ba [net]	^{239}Pu [net]
1200	793	31
1200	865	4
1200	830	2
1200	870	12

45 ℥ 缶の出力データ例 [45_write.txt]

測定時間 [秒]	^{133}Ba [net]	^{239}Pu [net]	^{239}Pu 量 [mg]
1200	793	31	7.13657
1200	865	4	.3553
1200	830	2	-.147017
1200	870	12	2.36457
1200	870	20	4.37383
1200	854	14	

添付資料－2

一次直線回帰式の評価

n 個のデータセット(x_i, y_i)に基づいて推定された一次直線回帰式の係数をそれぞれ a 及び b とすると、 i 番目のデータ x_i に関する回帰直線上の値 f_i は、以下の式で求める。

$$f_i = a x_i + b$$

x_i に対応する実測値 y_i の推定値を f_i とすると、 y_i と f_i との差 e_i を残差とする。これらの値に基づいて以下の計算を実施する。

$$\begin{aligned} S_y &= (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2 \\ S_f &= (f_1 - \bar{f})^2 + (f_2 - \bar{f})^2 + \dots + (f_n - \bar{f})^2 \\ S_e &= e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2 \end{aligned}$$

ここで、 \bar{y} を実測値 y_i の平均値、 \bar{f} を推定値 f_i の平均値、 S_y を実測値の偏差平方和、 S_f を推定値の偏差平方和とする。また、推定値の平均値 \bar{f} と実測値の平均値 \bar{y} は等しい。 S_e は、各々の残差を二乗して合計したものを残差平方和とする。回帰係数 a 及び b は、 S_e が最小になるように決定されるので、以下の関係式が成り立つ。

$$S_y = S_f + S_e$$

この関係式は、実測値の平方和 S_y が、回帰式から求めた推定値の平方和 S_f と回帰式から求められない値 S_e に分解できる。実測値の平方和 S_y と回帰式から求めた推定値の平方和 S_f との割合を決定係数 R^2 とすると、以下の式が成立する。

$$R^2 = \frac{S_f}{S_y} = 1.0 - \frac{S_e}{S_y}$$

この式から R^2 を計算して、一次直線回帰式の評価を実施する。

添付資料-3

MVP入力データ

密封線源1個の場合

GAMMA-RAY SCATTERING PROBLEM (PLUTONIUM GAMMA-RAY SOURCE IN CARTON BOX)
 DETAIL MODEL AROUND HPGE DETECTER (INPUT 99.9.14 VERSION=>pu5.inp)

```

*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* CONDITION PARAMETERS
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*
***** YOU CAN CHANGE FOLLOWING LINES ENCLOSED WITH '='. =====
***** CALCULATING CONDITION *****
% NB = 100 /* NUMBER OF BATCH(TOTAL HISTORY = NB * 10000)
* CPU TIME IS APPROXIMATELY 1 MINUTE PER 100 BATCH.
*
***** CONTENTS OF CARTON BOX / STEEL DRAM *****
% CX = 0.0 /* X POSITION OF CARTON BOX(CM) (*1)
% CY = 0.0 /* Y POSITION OF CARTON BOX(CM) (*1)
% CZ = 67.25/* Z POSITION OF CARTON BOX(=HEIGHT OF TURNTABLE)(CM) (*1)
% CL = 34.5 /* LENGTH OF CARTON BOX(CM)
% CT = 0.1 /* THICKNESS OF CARTON BOX(CM)
% CTD= 28.0 /* DIAMETER OF CARTON BOX TOP(CM)
% CBD= 28.0 /* DIAMETER OF CARTON BOX BOTTOM(CM)
% CL = 40.0 /* LENGTH OF yellow waste can(CM)
% CT = 0.05/* THICKNESS OF yellow waste can(CM)
% CTD= 30.0 /* DIAMETER OF yellow waste can TOP(CM)
% CBD= 30.0 /* DIAMETER OF yellow waste can BOTTOM(CM)
% TT = 1.0 /* THICKNESS OF TURNTABLE(CM)
}

} カートンボックス

% TT = 1.0 /* THICKNESS OF TURNTABLE(CM)
}

} 45 ℥ 缶(黄色廃棄物容器)

*****
***** PLUTONIUM GAMMA-RAY SOURCE *****
*(RELATIVE COORDINATES AS THE ORIGIN IS BOTTOM CENTER OF CARTON BOX)
% SX = 0.0 /* RELATIVE X POSITION OF SOURCE(CM) (*2)
% SY = 0.0 /* RELATIVE Y POSITION OF SOURCE(CM) (*2)
% SZ = 17.25/* RELATIVE Z POSITION OF SOURCE(CM) (*2)
% SD = 1.42 /* DIAMETER OF SOURCE(CM)
% SL = 1.44 /* LENGTH OF SOURCE(CM)
% ST = 0.16 /* THICKNESS OF SOURCE CLADDING(CM)
% GE = 4.1369E+5 /* GAMMA-RAY ENERGY(EV)
% DGE= 1.81E+3 /* RESOLUTION(FWHM)(EV)
% PU = 5.44269E-3 /* WEIGHT OF PUO2(G) [27]
% P8 = 0.1219 /* RATIO OF PU-238(WEIGHT%)
% P9 = 75.7691 /* RATIO OF PU-239(WEIGHT%)
% P0 = 21.7412 /* RATIO OF PU-240(WEIGHT%)
% P1 = 1.6421 /* RATIO OF PU-241(WEIGHT%)
% P2 = 0.7258 /* RATIO OF PU-242(WEIGHT%)
% BI = 3.40608 /* WEIGHT OF BI2O3(G) [27]
*
***** DETECTER ***** (NO DEAD LAYER OF GERMANIUM CRYSTAL)
% DX = 35.0 /* X POSITION OF DETECTER(CM)(=STROKE(CM)+34) (DX>34) (*3)
% DY = 0.0 /* Y POSITION OF DETECTER(CM) (*3)
% DZ = 89.5 /* Z POSITION OF DETECTER(CM) (*3)
% DD = 5.45 /* DIAMETER OF GERMANIUM CRYSTAL(CM)
% DL = 6.4 /* LENGTH OF GERMANIUM CRYSTAL(CM)
% DT = 0.3 /* THICKNESS OF ALUMINUM CAP(CM)
% DA = 16.75 /* LENGTH OF ALUMINUM CAP(CM)
% DB = 0.05 /* THICKNESS OF BERYLLIUM WINDOW(CM)
% DG = 0.3 /* WINDOW TO GERMANIUM CRYSTAL DISTANCE(CM)
% DV = 6.0 /* VERTICAL LEAD SHIELD DISTANCE FROM CENTER(CM) (DV>0)
% DH = 4.1 /* HORIZONTAL LEAD SHIELD DISTANCE FROM CENTER(CM) (DH>0)
=====
BOTTOM LINE CAN BE CHANGED =====
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* OPTION
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
  PHOTON      FIXED-SOURCE      NO-NEUTRON      NO-FISSION
  NO-EIGEN-VALUE    NO-LATTICE      RUSSIAN-ROULETTE    NO-RESTART
  FLUX-PRINT

```

```

NHIST(10000)  NPART(<NB*%NHIST>)  NBANK(15000)      NGROUP.P(<NG=3>)
TCPU(20)       IRAND(1)             NMEMO(10)        NMEMS(5)
NMEMOP(2)      NRSKIP(0)           ETOP.P(1.0E+6)   EBOT.P(1.0E+4)
DEPS(1.0E-5)   DINF(1.0E-7)

*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* PHOTON CROSS SECTION
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$XSEC
***** PU GAMMA-RAY SOURCE (PU02+BI2O3) *****
* QUOTED FROM RIKA-NENPYO(1997)
& IDMAT( 1 ) /* PU02+BI2O3
% PU02=(238*P8+239*P9+240*P0+241*P1+242*P2)/100+15.9994*2
% BI2O3=208.98037*2+15.9994*3
% NA=6.022E-1 /* (=6.022E+23/1E+24)
    PUNPTNMC( <PU/PU02*NA> )
    BINPTNMC( <BI/BI2O3*NA*2> )
    OONPTNMC( <(PU/PU02*2+BI/BI2O3*3)*NA> )

*& IDMAT( 1 ) /* AIR
*  NONPTNMC( 3.9016E-5 )
*  OONPTNMC( 1.0409E-5 )
***** SOURCE CLADDING (SUS304) *****
* QUOTED FROM JAERI-M 90-126(1990)/JAERI-M 6928(1977)
& IDMAT( 10 ) /* SUS304
    C0NPTNMC( 3.1729E-4 )
    SINPTNMC( 1.6962E-3 )
    S0NPTNMC( 4.4572E-5 )
    CRNPTNMC( 1.7408E-2 )
    MNNPTNMC( 1.7343E-3 )
    FENPTNMC( 5.7872E-2 )
    NINPTNMC( 8.1116E-3 )

*& IDMAT( 10 ) /* AIR
*  NONPTNMC( 3.9016E-5 )
*  OONPTNMC( 1.0409E-5 )
***** SUS304 *****
* QUOTED FROM JAERI-M 90-126(1990)/JAERI-M 6928(1977)
& IDMAT( 11 ) /* SUS304
    C0NPTNMC( 3.1729E-4 )
    SINPTNMC( 1.6962E-3 )
    S0NPTNMC( 4.4572E-5 )
    CRNPTNMC( 1.7408E-2 )
    MNNPTNMC( 1.7343E-3 )
    FENPTNMC( 5.7872E-2 )
    NINPTNMC( 8.1116E-3 )

***** GERMANIUM CRYSTAL *****
* DENSITY=5.4(G/CC),ATOMIC MASS=72.61 /* QUOTED FROM RIKA-NENPYO
& IDMAT( 20 )
    GENPTNMC( 4.4786E-2 )

***** ALUMINUM CAP*****
* DENSITY=2.69(G/CC),ATOMIC MASS=26.981539 /* QUOTED FROM RIKA-NENPYO
& IDMAT( 21 )
    ALNPTNMC( 6.0038E-2 )

***** BERYLLIUM WINDOW *****
* DENSITY=1.84(G/CC),ATOMIC MASS=9.012182 /* QUOTED FROM RIKA-NENPYO
& IDMAT( 22 )
    BENPTNMC( 1.2295E-1 )

***** LEAD SHIELD *****
* DENSITY=11.34(G/CC),ATOMIC MASS=207.2 /* QUOTED FROM RIKA-NENPYO
& IDMAT( 30 )
    PBNPTNMC( 3.2958E-2 )

***** ACRYL (C4-H6-O2)N *****
* DENSITY=1.18(G/CC),MOLECULAR MASS=86.09 /* QUOTED FROM RIKA-NENPYO
& IDMAT( 31 )
    C0NPTNMC( 3.3016E-2 )
    OONPTNMC( 1.6508E-2 )
    HONPTNMC( 4.9525E-2 )

```

```

***** COPPER *****
* DENSITY=8.93(G/CC),ATOMIC MASS=63.546 /* QUOTED FROM RIKA-NENPYO
& IDMAT( 32 )
  CUNPTNMC( 8.4626E-2 )
*
* ===== YOU CAN CHANGE FOLLOWING LINES ENCLOSED WITH "=". =====
***** CARTON BOX (C6-H10-O5)N *****
* DENSITY=1.0(G/CC),MOLECULAR MASS=162.14 /* QUOTED FROM RIKA-NENPYO
*& IDMAT( 100 ) /* PAPER
*  CONPTNMC( 2.2284E-2 )
*  H0NPTNMC( 3.7141E-2 )
*  O0NPTNMC( 1.8570E-2 ) } カートンボックス
***** yellow waste can [carbon steel]*****
* QUOTED FROM JAERI-M 90-126(1990)
& IDMAT( 100 ) /*carbon steel
  C0NPTNMC( 1.2514E-3 )
  S0NPTNMC( 3.3449E-4 )
  S0NPTNMC( 5.8599E-5 )
  P0NPTNMC( 6.0660E-5 )
  MNNPTNMC( 2.5650E-4 )
  FENPTNMC( 8.3319E-2 ) } 45 ℥ 缶(黄色廃棄物容器)

***** CONTENTS INSIDE CARTON BOX *****
*& IDMAT( 110 ) /* AIR
*  N0NPTNMC( 3.9016E-5 )
*  O0NPTNMC( 1.0409E-5 )

***** CONTENTS INSIDE yellow waste can *****
& IDMAT( 110 ) /* AIR
  N0NPTNMC( 3.9016E-5 )
  O0NPTNMC( 1.0409E-5 )
*& IDMAT( 110 ) /* PAPER
*  C0NPTNMC( 2.2284E-2 )
*  H0NPTNMC( 3.7141E-2 )
*  O0NPTNMC( 1.8570E-2 )

***** BOTTOM LINE CAN BE CHANGED =====
*
***** AIR *****
& IDMAT( 200 )
  N0NPTNMC( 3.9016E-5 )
  O0NPTNMC( 1.0409E-5 )
$END XSEC
*
*-----+-----+-----+-----+-----+
* GEOMETRY
*-----+-----+-----+-----+-----+
$GEOM
***** BODY *****
* BOUNDARY
  RPP( 1 -100 150 -100 100 -50 200 ) /* OUTER SURFACE
* CARTON BOX
% CTR=CTD/2 /* CTR = RADIUS OF CARTON BOX TOP
% CBR=CBD/2 /* CBR = RADIUS OF CARTON BOX BOTTOM
  TRC( 10 <CX> <CY> <CZ> <CX> <CY> <CZ+CL> <CBR> <CTR> ) /* CARTON BOX
  TRC( 11 <CX> <CY> <CZ+CT> <CX> <CY> <CZ+CL> <CBR-CT> <CTR-CT> )
  RCC( 15 0 0 <CZ-TT> 0 0 <TT> 31.2 ) /* TURNTABLE
* DETECTOR
% DR=DD/2 /* DR = RADIUS OF GERMANIUM CRYSTAL
  RCC( 20 <DX+15> <DY> <DZ> <DA> 0 0 3.5 ) /* ALUMINUM CAP
  RCC( 21 <DX+15> <DY> <DZ> <DA> 0 0 <3.5-DT> )
  RCC( 22 <DX+15> <DY> <DZ> <DB> 0 0 <3.5-DT> ) /* BERYLLIUM WINDOW
  RCC( 23 <DX+15+DG+DB> <DY> <DZ> <DL> 0 0 <DR> ) /* GERMANIUM CRYSTAL
  RCC( 24 <DX+15+DA> <DY> <DZ> <-(DA-DB-DG-DL)> 0 0 <DR> ) /* CRYOSORP.
  RCC( 25 <DX+15+DA> <DY> <DZ> <31.7-DA> 0 0 3.5 ) /* PRE-AMP.(SUS304)
* LEAD SHIELD
  RPP( 30 <DX+12.5> <DX+38> <DY-11> <DY+11> <DZ-11> <DZ+11> ) /* BODY
  RPP( 31 <DX+13> <DX+37.5> <DY-10.5> <DY+10.5> <DZ-10.5> <DZ+10.5> )
  RCC( 32 <DX+13> <DY> <DZ> 24.5 0 0 6 ) /* HOLE
  RCC( 33 <DX+38.2> <DY> <DZ> 8.5 0 0 11 ) /* BACK COVER

```

```

RCC( 34 <DX+38.7> <DY> <DZ> 7.5 0 0 10.5 )
RCC( 35 <DX+38.2> <DY> <DZ> 8.5 0 0 3.6 ) /* HOLE
RCC( 36 <DX+38.7> <DY> <DZ> 7.5 0 0 4.1 )
RCC( 40 <DX+12.5> <DY> <DZ> 25.5 0 0 4.5 ) /* AIR GAP
RCC( 41 <DX+12.5> <DY> <DZ> 25.5 0 0 5.0 ) /* ACRYL
RCC( 42 <DX+12.5> <DY> <DZ> 25.5 0 0 5.5 ) /* COPPER
* LEAD COLLIMATOR
RPP( 50 <DX> <DX+6> <DY+DH> <DY+DH+8> <DZ-11> <DZ+11> ) /* L
RPP( 51 <DX+0.5> <DX+5.5> <DY+DH+0.5> <DY+DH+7.5> <DZ-10.5> <DZ+10.5>
RPP( 52 <DX> <DX+6> <DY-DH-8> <DY-DH> <DZ-11> <DZ+11> ) /* R
RPP( 53 <DX+0.5> <DX+5.5> <DY-DH-7.5> <DY-DH-0.5> <DZ-10.5> <DZ+10.5>
RPP( 54 <DX+6.2> <DX+12.2> <DY-11> <DY+11> <DZ+DV> <DZ+DV+8> ) /* U
RPP( 55 <DX+6.7> <DX+11.7> <DY-10.5> <DY+10.5> <DZ+DV+5> <DZ+DV+7.5>
RPP( 56 <DX+6.2> <DX+12.2> <DY-11> <DY+11> <DZ-DV-8> <DZ-DV> ) /* B
RPP( 57 <DX+6.7> <DX+11.7> <DY-10.5> <DY+10.5> <DZ-DV-7.5> <DZ-DV-5> )
* PLUTONIUM GAMMA-RAY SOURCE AND SUS304 CLADDING
% SR=SD/2 /* SR = RADIUS OF SOURCE
    RCC( 100 <CX+SX> <CY+SY> <CZ+SZ> 0 0 <SL+ST*3> <SR+ST> ) /* CLADDING
    RCC( 101 <CX+SX> <CY+SY> <CZ+SZ+SL+ST*2> 0 0 <ST> <SR> ) /* WELL
    RCC( 102 <CX+SX> <CY+SY> <CZ+SZ+ST> 0 0 <SL> <SR> ) /* SOURCE
END
***** ZONE *****
VOID      :   -1000 : -1
AIR       : 10 :   200 : +1 -10 -15 -25 -30 -33 -50 -52 -54 -56
CARTONBOX : 20 :   100 : +10 -11
CONTENTS  : 21 :   110 : +11 -100 OR +101
TURNTABLE : 22 :     11 : +15
SOURCECLAD : 30 :     10 : +100 -101 -102
SOURCEPUI : 31 :     1 : +102
SHIELDLEAD : 40 :   30 : +31 -32
SHIELDCLAD : 41 :   11 : +30 -31 OR +32 -42
COPPER    : 42 :   32 : +42 -41
ACRYL    : 43 :   31 : +41 -40
AIRGAP    : 44 :   200 : +40 -20 -25
BACKLEAD  : 45 :   30 : +34 -36
BACKCLAD  : 46 :   11 : +33 -34 OR +36 -35
BACKGAP   : 47 :   200 : +35 -25
COLLILEAD : 50 :   30 : +51 OR +53 OR +55 OR +57
COLLICLAD : 51 :   11 : +50 -51 OR +52 -53 OR +54 -55 OR +56 -57
GERMANIUM : 60 :   20 : +23
BERYLLIUM : 61 :   22 : +22
PREAMP    : 62 :   11 : +24 OR +25
ALUMINUM  : 63 :   21 : +20 -21
DETECTGAP : 64 :   200 : +21 -22 -23 -24
***** TALLY REGION *****
#TALLY REGION
  DEFINE @GERM( 60 )
    @CRTN( 20 21 )
    @SCLD( 30 )
    @ALL( * )
$END GEOM
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* TALLY
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
  ENGYB.P( <%ETOPP> <GE+DGE> <GE-DGE> <%EBOTP> )
  TRVOL( <3.14159*DL*DR**2>
         <3.14159*(CTR**2+CBR**2)/2>
         <3.14159*((SL+ST*3)*(SR+ST)**2-(SL+ST)*SR**2)>
         <250.0*200.0*250.0> )
$TALLY
& ID( 1 )
  LABEL( PHOTON FLUX BY PLUTONIUM GAMMA-RAY SOURCE )
  EVENT( TRACK )
  PHOTON
  DIMENSION( REGION ENERGY )
  REGION( @GERM @CRTN @SCLD )

```

```
IENERGY( 1 2 3 )
$END TALLY
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* GAMMA-RAY SOURCE
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
$SOURCE
&PHOTON
    RATIO( <PU> )
    @( XX YY ) = #DISC( 0.0 <SR> );
    @X0 = <CX>+<SX>;
    @Y0 = <CY>+<SY>;
    @X = @XX+@X0;
    @Y = @YY+@Y0;
    @Z = #UNIFORM( <CZ+SZ+ST> <CZ+SZ+ST+SL> );
    @( A B C ) = #ISOTROPIC();
    @E = #TABLE X( <GE> ) PX( 1.0 ) INT( DISCRETE );
$END SOURCE
*
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
* VARIANCE REDUCTION
*-----+-----+-----+-----+-----+-----+
    WKIL.P( !*( 0.95 0.10 0.95 ) )
    WSRV.P( !*( 1.00 1.00 1.00 ) )
    NRESP( 1 ) RESP( <NG>(1.0) )
/

```

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	9.80665	1	0.967841	735.559	14.2233
	4.44822	0.453592	1	760	14.6959
				1	1.93368 × 10 ⁻²
粘度	1 Pa·s(N·s/m ²)	= 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))			
動粘度	1 m ² /s	= 10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)			

エネルギー	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)
仕事・熱量	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

