

# 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)

2004年11月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

本資料の全部または一部を複製・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

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)

助川 泰弘\*\* 鈴木 敏\*\* 青山 佳男\* 大木 耕一\*

要 旨

本報は、パッシブガンマ法によりウラン廃棄物のうち、コンテナ(1m<sup>3</sup>)廃棄物中のウラン含有量を評価するために実施した装置設計、解析評価コードの構築、シミュレーション評価及び測定試験等についてまとめたものである。

解析手法としては、コンテナ側面の分割測定データのうちコンテナを挟んで対向する対のデータより、距離のファクターを除いて評価するものであり、減衰補正は、着目する2本のピーク比より行うものである。この手法を基本とし、着目する2本のピークのうち片方が確認されない場合は、線源位置を分割メッシュの中心と設定した線源位置設定法を、ピークが少ない場合は、グロス計数率を用いた評価法とした。

これら手法による測定装置の特性を以下に示す。

- ① 空コンテナにおける感度分布は、コンテナの中心を 1.0 とした場合、約±50%以内の分布幅であった。
- ② 模擬試験体の測定試験から、評価値/設定値の分布は、3 $\sigma$ の範囲で約±50%にてU-238量を評価できる。
- ③ 検出下限値は、コンテナの重量に依存するが、1tの場合、線源が中心付近で約20gU-238である。

---

\* : 環境保全・研究開発センター 環境保全部 環境保全課

\*\* : 原子力技術(株)

Development of Technique for Measuring Uranium Quantity within Containers  
Using the Passive Gamma Method

(Technical Document )

Yasuhiro SUKEGAWA\*\* Satoshi SUZUKI\*\* Yoshio AOYAMA\* Koichi OHKI\*

Summary

This report summarizes the system design, evaluation code, simulations and examinations which evaluate the quantity of uranium in the container(1m<sup>3</sup>).

The examination was performed using passive gamma method.

The evaluation method is using the data which measured at opposing point of container. The evaluation method removes the factor of distance with data which measured at the opposing point of the container.

The attenuation collection could be evaluated by peak counting rate ratio of two direct radiations.

If one of two gamma peak could not found, the radiation source is located, and it is evaluated. The evaluation was performed using the gross counting rate when the radiation peaks were few.

The following is characteristics of this system.

- ① The sensitivity distribution of an empty container was less than about  $\pm 50\%$  of width, when set to 1.0 in the center of the container.
- ② From the results of examination that uses simulated waste, the distribution of (an evaluation value / setting value) is about  $\pm 50\%$  width at  $3 \sigma$ .
- ③ If the weight of container is 1ton, the detection limit which located radiation source in the center of container is about 20g (U-238).

---

\*Waste Management Section Waste Management Division  
Waste Management and Fuel Cycle Research Center Tokai Works

\*\*Nuclear Technology & Engineering Co., Ltd

## 目 次

1. はじめに	1
2. 測定装置	2
2.1 装置設計	2
2.2 装置概要	3
3. 測定原理	8
3.1 原理概要	8
3.2 評価方法の概要	8
4. 解析評価コード	12
4.1 評価コード構成	12
4.2 入力及び設定	16
4.3 線源分布の設定	17
4.4 対向対評価法による評価	20
4.5 線源位置設定法による評価	25
4.6 グロス計数率による評価法	27
4.7 ウランによる自己吸収補正	30
4.8 ウランの子孫核種含有時の評価	36
4.9 検出下限値の評価	40
5. シミュレーション計算	41
5.1 測定精度確認	41
5.2 実装体系による計算	49
6. 測定試験	52
6.1 使用線源及び模擬試験体	52
6.2 感度分布測定	52
6.3 模擬試験体測定	53
6.4 ガンマ線源による測定試験	74
6.5 ドラム缶廃棄物測定試験	76
6.6 コンテナ廃棄物測定試験	76
7. まとめ	84
8. おわりに	85
9. 参考文献	86
添付資料	87
添付資料 1 バックグラウンドの設定	88
添付資料 2 子孫核種 $\gamma$ 線の補正	97
添付資料 3 ウラン量評価法における誤差評価	104

添付資料 4	ピーク比の算出における変動係数 . . . . .	110
添付資料 5	均一・均質体系の評価ルーチン . . . . .	113
添付資料 6	コンテナ測定結果出力例 . . . . .	116
添付資料 7	ドラム缶測定結果出力例 . . . . .	117

## 図目次

図 2.1	コンテナの概略図	4
図 2.2	測定回路構成	5
図 2.3	測定装置の概念図	6
図 3.1	U-238 の崩壊図	10
図 3.2	U-238量の算出フロー	11
図 4.1	評価ケースと処理手順	14
図 4.2	計算手順	15
図 4.3	線源位置設定の考え方(コンテナ断面)	18
図 4.4	線源寄与分の概念	19
図 4.5	対向対評価の考え方(体系)	20
図 4.6	嵩密度によるバックグランド計数率の変化	31
図 4.7	グロス法での線源モデル	32
図 4.8	グロス計数率とピーク計数率の変化	33
図 4.9	計数率の遮蔽厚による変化	34
図 4.10	ウランによる 1001keV のピーク計数率の減衰	35
図 5.1	廃棄物の種類と評価法(案)	44
図 5.2	測定精度確認モデル(線源位置変化)	45
図 5.3	測定精度確認モデル(鉄 1g/cm <sup>3</sup> 中,線源位置変化)	46
図 5.4	測定精度確認モデル(空気中,線源位置変化)	47
図 6.1	コンテナにおける線源配置	58
図 6.2	コンテナにおける線源配置(断面)	59
図 6.3	ドラム缶内の線源配置	60
図 6.4	ドラム缶内の線源配置(断面)	61
図 6.5	天然ウラン 100g の線源位置による誤差の分布	63
図 6.6	評価値/設定値の感度分布(ドラム缶)	65
図 6.7	模擬試験体へのウラン線源位置	68
図 6.8	模擬試験体への複数線源配置	69
図 6.9	評価値/設定値の分布(コンテナ)	72
図 6.10	評価値/設定値の分布(ドラム缶)	73
図 6.11	ドラム缶廃棄物(スラッジ)に対する測定結果の比較	79
図 6.12	コンテナ重量と評価ウラン量の分布	80
図 6.13	ピーク計数率で評価されたケースに対するグロス法での 評価ウラン量の関係	81
図 6.14	ウラン量が検出下限値以下となったケースの検出下限値	82
図 6.15	廃棄物重量と検出下限値の関係	83

## 表目次

表 4.1	検出器の役割	12
表 4.2	距離の効果と吸収効果の取り扱い	13
表 4.3	$\gamma$ 線の発生率	16
表 4.4	自己吸収補正係数(例)	30
表 4.5	$\gamma$ 線エネルギー766keVを放出する子孫核種	36
表 5.1	評価方法の特徴	42
表 5.2	ウラン量評価値(線源の正面に検出器がある場合)	48
表 5.3	マトリックスが鉄(1g/cm <sup>3</sup> )におけるウラン量評価値	48
表 5.4	マトリックスが空気におけるウラン量評価	48
表 5.5	検出器効率	50
表 5.6	空気中に対するウラン量評価	50
表 5.7	鉄(1g/cm <sup>3</sup> )に対するウラン量評価	50
表 5.8	線源強度変化に対するウラン量評価	51
表 6.1	ウラン線源データ	55
表 6.2	感度分布測定データ(コンテナ)	62
表 6.3	感度分布測定データ(ドラム缶)	64
表 6.4	測定試験条件表(コンテナ)	66
表 6.5	測定試験条件表(ドラム缶)	67
表 6.6	コンテナ測定試験結果	70
表 6.7	ドラム缶測定試験結果	71
表 6.8	ガンマ線源測定試験条件表	75
表 6.9	ガンマ線源測定試験結果	75
表 6.10	スラッジを収納したドラム缶廃棄物に対する Ge 検出器でのピーク計数率測定例	78



写真目次

写真 2.1	CDAS の外観	7
写真 6.1	ウラン線源の外観	54
写真 6.2	鉄配管試験体	56
写真 6.3	水試験体	56
写真 6.4	模擬試験体(砂,水,鉄板,配管,塩ビ)	57
写真 6.5	ドラム缶試験体(配管)	57

## 1. はじめに

放射性廃棄物を保管廃棄する場合、核燃料物質の使用等に関する規則第2条の11の記録として放射性物質の数量を記載する必要があるため、放射性廃棄物中の放射性物質の数量を把握することは不可欠である。

また、放射性廃棄物中の核種量を測定評価することは、廃棄物の管理上必要なことであり、廃棄物の処理・処分の方策を検討する上で重要である。

ここで、ウラン廃棄物の収納容器は、200ℓドラム缶(以下、「ドラム缶」という。)と約1m<sup>3</sup>のコンテナ(以下、「コンテナ」という。)に大別される。

環境保全・研究開発センターのウラン廃棄物については、各設備で使用したウラン組成、取扱量及び表面線量率から推定してきたのが実情であったが、廃棄物屋外貯蔵ピットの改善措置(平成9年9月)に際し、文部科学省(旧科学技術庁)より廃棄物を測定し、適切な数量の記載が必要であるとのコメントがあった。

このため、ドラム缶については、パッシブガンマ法を用いた非破壊測定装置<sup>1)</sup>により、ウラン廃棄物のウラン量を推定するためにサンプル測定を行い、その平均値を推定値とした。その後、廃棄物屋外貯蔵ピットの廃棄物(以下「ピット廃棄物」という。)を全数測定し、修正することで了解を得た。また、その他のウラン廃棄物についても計画的に測定を行うこととした。

更に、ピット廃棄物問題により、保障措置対応についての調整が国、IAEAとの間で行われ、ウラン量を測定し、計量報告後保管廃棄することとなった。

ピット廃棄物については、コンテナ廃棄物を除くドラム缶について全数測定し、平成12年1月に計量報告後、検認査察を受け、保管廃棄手続きを行った。

この中で、コンテナについては、測定評価手法を構築したのち、コンテナ廃棄物中のウラン量を測定し、補正報告することとした。

コンテナの測定については、プルトニウム取扱施設から発生する固体廃棄物を対象としたパッシブ中性子法による非破壊測定装置が実用化されている<sup>2)</sup>ものの、ウラン廃棄物については、ウランの自発核分裂による中性子が微量であり、適切な非破壊測定装置がなかった。

ウラン量を測定する非破壊測定手法としては、パッシブガンマ法及びアクティブ中性子法などが考えられるが、即時対応が可能で汎用性があり、安価なパッシブガンマ法を選定し、測定手法及び測定装置の開発を行った。

ここでは、コンテナに詰められたウラン廃棄物中のウラン量測定のために実施した非破壊測定装置の設計、シミュレーション計算及び試験等についてまとめたものである。

## 2.測定装置

### 2.1 装置設計

装置性能として、原子力発電所から発生する低レベル廃棄物の非破壊測定装置の検出下限値レベル(約  $1 \times 10^6 \text{Bq/t}$ )<sup>3)</sup>と同等の天然ウラン 100g を含む対象物において、平均密度  $1.0 \text{g/cm}^3$  以下で、ウラン量の測定誤差は、 $1\sigma$  で  $-50\% \sim +100\%$  以内を目標とした。

#### (1) 測定対象物

測定対象物は、 $1 \text{m}^3$  コンテナ及び 200 ㏞ドラム缶に収納されたウラン廃棄物とする。

##### ① $1 \text{m}^3$ コンテナ

コンテナの概略図を図 2.1 に示す。

材質 : 炭素鋼(SS400)  
 外形寸法 : 約  $1.3 \times 1.3 \times 1 \text{m}^h$   
 板厚 : 側面 4.5mm、底面 6.0mm、上面 4.5mm  
 自重 : 約 0.4t  
 内容物 : 雑固体廃棄物(主に不燃金属)、最大約 3t  
 含有核種 : 主にウラン  
 最大表面線量率 : 約  $5 \mu \text{Sv/h}$

##### ② 200 ㏞ドラム缶

規格 : JIS M 級又は H 級オープンドラム  
 内容物 : 雑固体廃棄物、最大約 650kg  
 含有核種 : 主にウラン  
 最大表面線量率 : 約  $5 \mu \text{Sv/h}$

#### (2) 検出部

ウラン廃棄物中には、鉍物(ウランの子孫核種)を含む廃棄物も少なくないため、ガンマ線検出には、分解能の良い、Ge 検出器を用いること及びコンテナ廃棄物は容積が大きいいため、感度を良くするために NaI 検出器が必要となる。また、コンテナ廃棄物は、核種の偏在及びマトリックス密度の偏在が考えられる。

このため、コリメータ付の NaI 検出器 3 台及び Ge 検出器 1 台によりメッシュに分割して計測することとした。なお、Ge 検出器は、ウラン製錬施設等から発生した子孫核種(Bi, Pb など)を含む廃棄物の測定評価及び含有核種評価を行う。

測定回路構成を図 2.2 に示す。

##### ① 検出器

Ge 検出器 (相対効率約 20%)	1 台
NaI 検出器 (4in $\phi$ )	3 台

##### ② 配置

NaI 検出器 3 台を縦列配置し、Ge 検出器は対象物を挟んで対向に配置する。それぞれの検出器には、コンテナ及びドラム缶測定を考慮したコリメータを設置する。

##### ③ 測定

- a. NaI 検出器は側面を  $3 \times 4$  の区分に分割して測定する。  
縦方向の 3 区分は 3 台の検出器で同時に計測  
NaI データ =  $3 \times 4 \times 4 = 48$  組
- b. Ge 検出器は側面を縦 1 分割、横 4 分割して 4 面計測  
Ge データ =  $1 \times 4 \times 4 = 16$  組

### (3) 駆動部

コンテナを測定するためには、重量物を移動・回転させるための廃棄物駆動部が必要である。廃棄物駆動部を含む測定装置の概念図を図 2.3 に示す。

廃棄物駆動部

- ・ 方式 : レール移動、測定台はターンテーブル回転式  
回転・移動は電動式、回転は 90 度ピッチ毎に回転、移動は所定位置へピッチ移動する方式。
- ・ ターンテーブル :  $1\text{m}^3$  コンテナ用と 200 ㍑ドラム缶兼用
- ・ 操作盤 : 回転・移動をスイッチ操作及びステップ運転操作を行えるような簡易操作盤とする。

## 2.2 装置概要

2.1 項の設計を基に製作した非破壊測定装置 CDAS(Container and Drum Assay System)の外観を写真 2.1 に示す。

本装置は、NaI 検出器 3 台、Ge 検出器 1 台及びその計測部並びにコンテナ等を測定・移動する廃棄物駆動部から構成される。

ここでは、廃棄物駆動部の概要を説明する。

廃棄物駆動部は、走行と旋回の動作軸を持ち、コンテナ等対象物の測定位置移動を行うものである。

制御は、ステップ運転モード、手動モード、インチングモードを設け、ステップ運転モードは、コンテナを測定するモードであり、フォークリフトによりコンテナを積載後、「ステップスタート SW」を押すことにより、自動的に測定開始位置まで走行し、測定後、再度 SW を押すことにより次の測定位置（旋回動作を含む）へ移動するものである。

手動モードは、旋回・走行とも各操作 SW を押すことにより、定められた次の停止位置まで動作するものであり、ドラム缶の測定時に使用するモードである。

ドラム缶の測定は、検出器位置をドラム缶中心軸とし、4 方向（90 度旋回ごと）から測定するものとした。

インチングモードは、旋回・走行とも各操作 SW を押している間のみ動作するものであり、任意の位置に停止する場合などに使用するものである。

これらモードにおけるインタロックは、以下の通りである。

- ・ 旋回動作は走行が積載位置であること。
- ・ 旋回動作は走行中でないこと。
- ・ 走行動作は旋回が定位置であること。
- ・ 走行動作は旋回中でないこと。

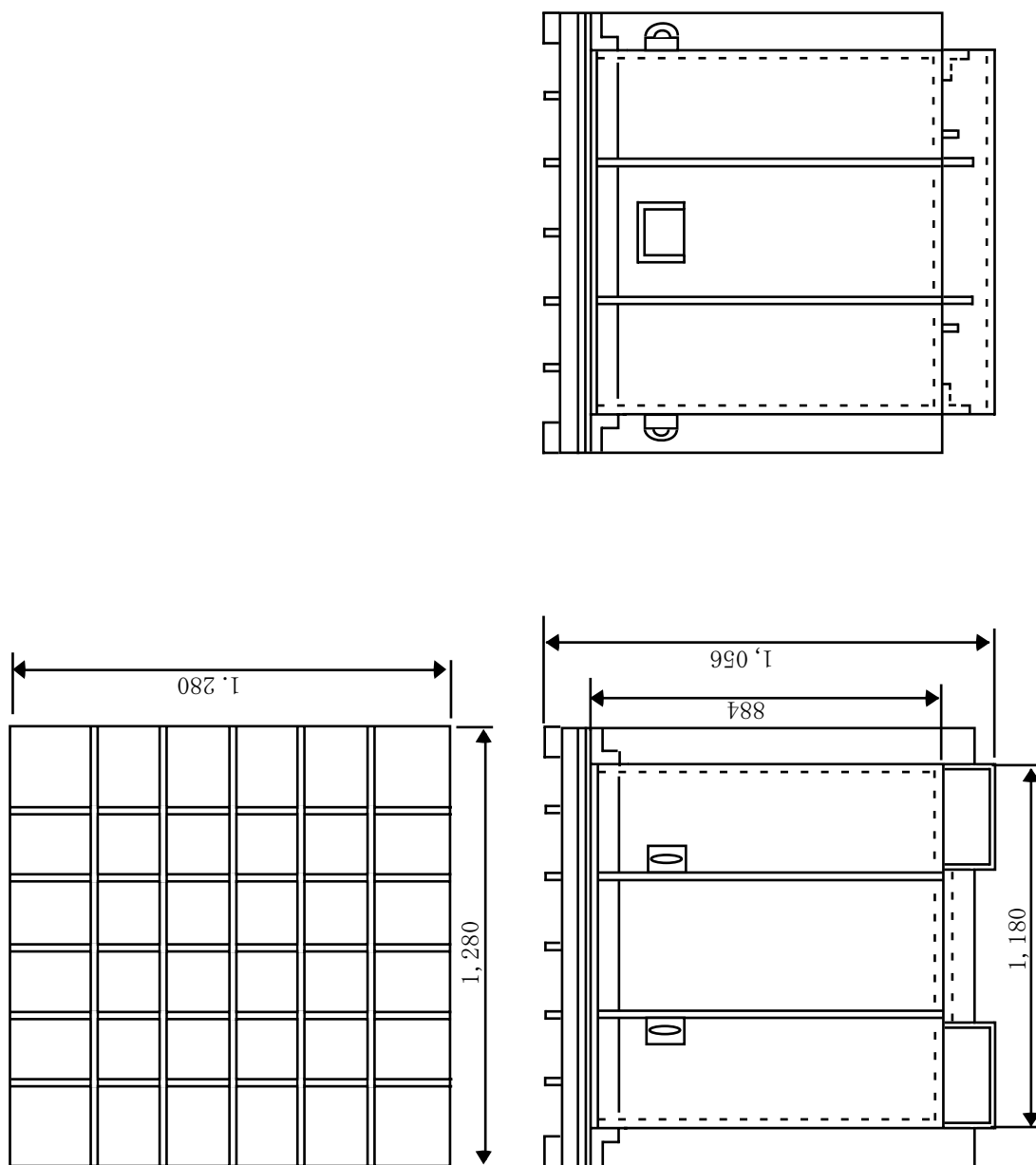


図2.1 コンテナの概略図

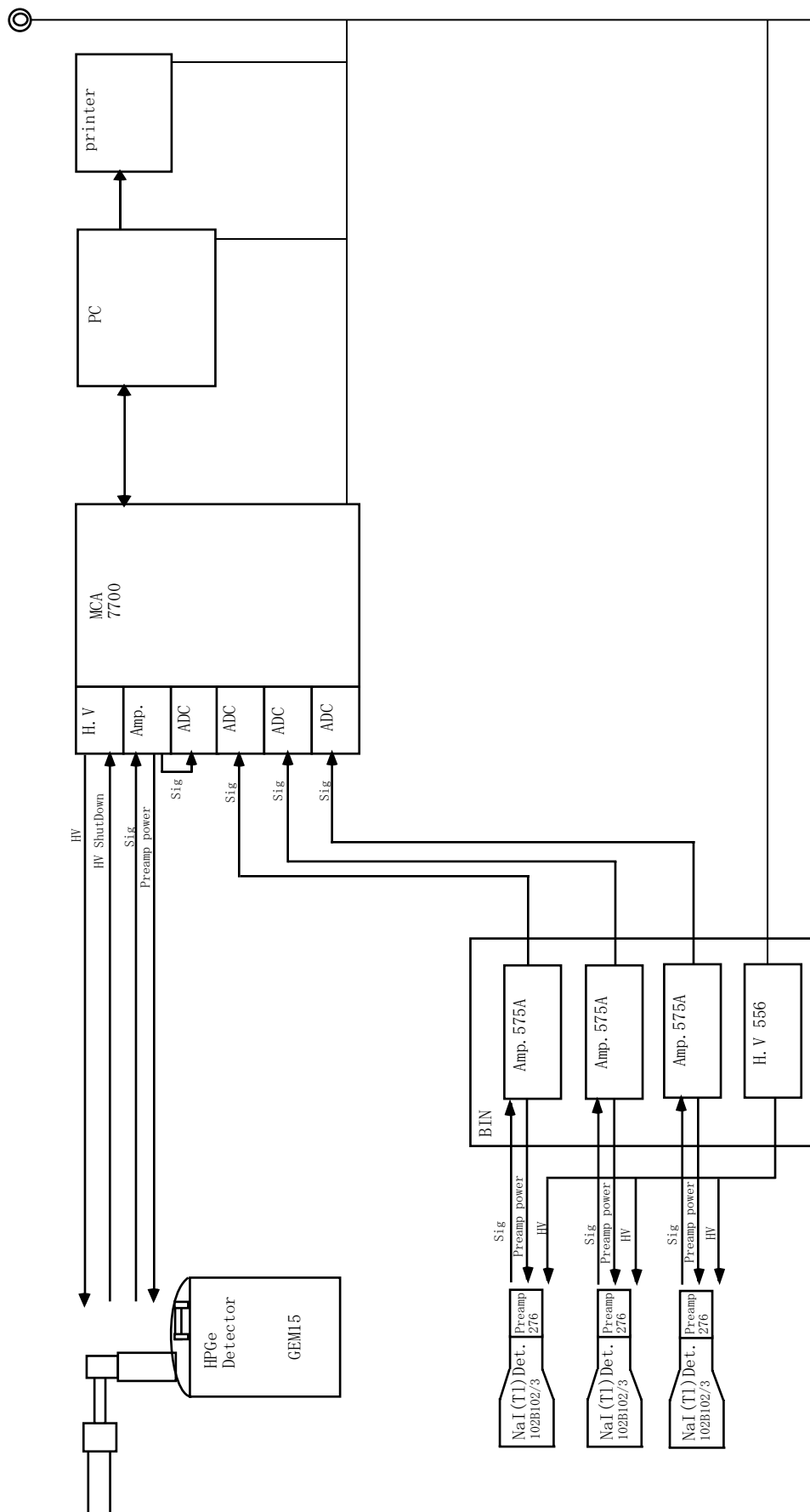


図2.2 測定回路構成

仕様

測定対象：1.1m<sup>3</sup>コンテナ、200ℓドラム缶  
 測定手法：パッシブガンマ法  
 検出器：Ge検出器 1台  
           NaI検出器 3台

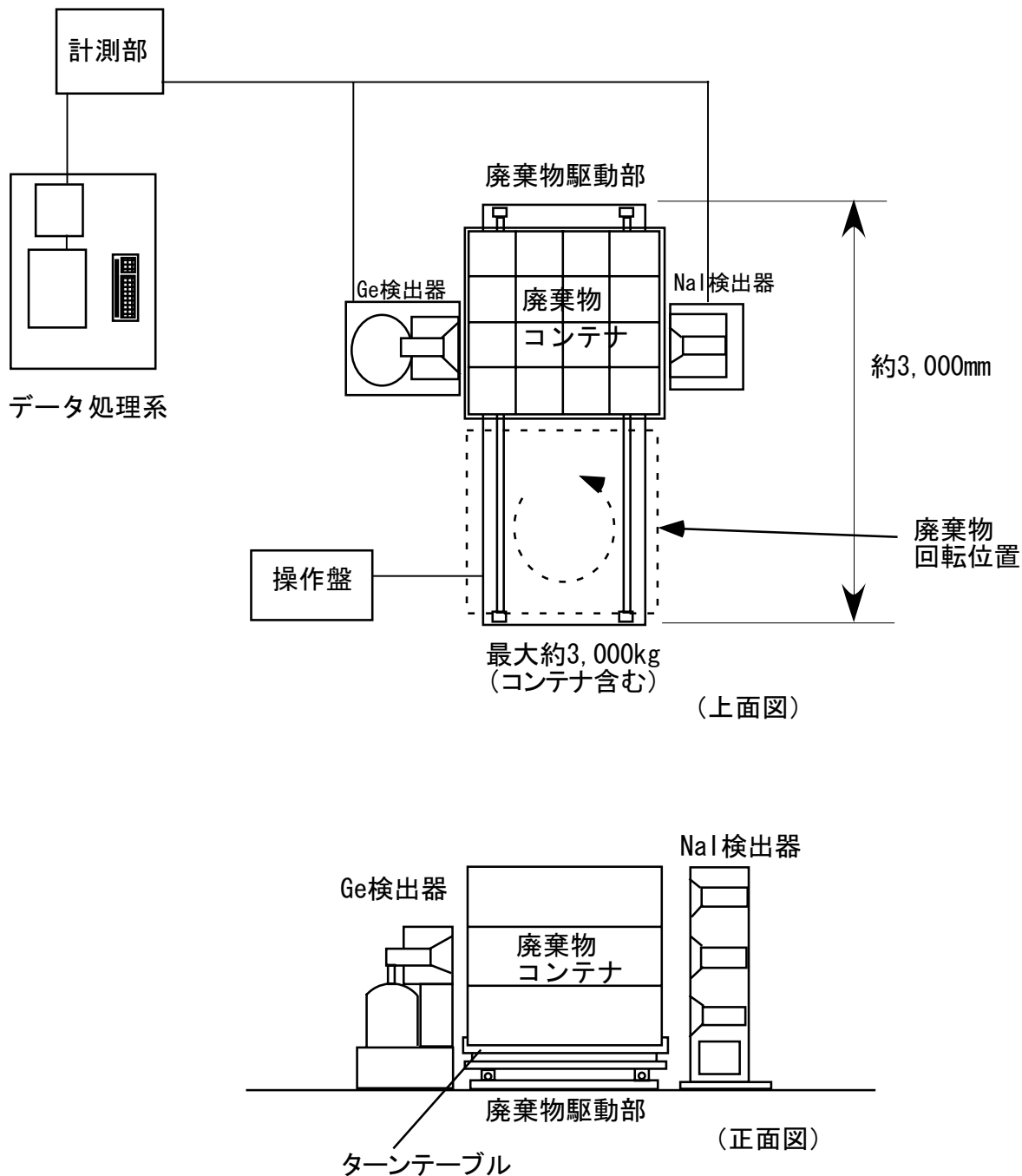


図2.3 測定装置の概念図



写真2.1 CDASの外観



### 3.測定原理

#### 3.1 原理概要

パッシブガンマ法は、廃棄物中の放射性核種から放出されている $\gamma$ 線を計測し、得られる電気信号を波高分析して、エネルギーを特定し、着目する核種量を求めるものである。

核種の定量は、あらかじめ着目するエネルギーの計数率とウラン量の関係を標準線源より求め、その関係式(検量線)から求める場合と検出効率から求める場合がある。

また、廃棄物中の放射性核種から放出される $\gamma$ 線は、廃棄物構成物質(以下「マトリックス」という。)により吸収又は減衰され、計数値が小さくなるため、それらを補正する必要がある。この吸収補正の方法としては、既知の外部透過線源を使う方法<sup>3)</sup>や廃棄物重量との関係から補正する方法が用いられることが多い。

しかし、今回測定評価する手法は、計数率分布を基に核種の存在するメッシュを設定し、核種から放出され、同じ密度分布を透過し同じ検出器へ入るエネルギーの異なる直接線を利用して、実効的な減衰距離を求め、距離の影響を取り除いて核種量を求めるものである。詳細な解析評価については、4.項にて記述する。

#### 3.2 評価方法の概要

##### (1) 測定対象 $\gamma$ 線エネルギー

U-238の子孫核種で放射平衡となっているPa-234mから放出される766keVと1001keVのエネルギーピークを計測する。また、コンプトン領域及びグロス計数についても取得する。

参考として、U-238の崩壊図<sup>4)</sup>を図3.1に示す。

##### (2) 評価方法

本評価法は、コンテナ等に収納された廃棄物マトリックスの密度偏在及び核種偏在を補正してU-238量を算出するものである。

U-238量の評価は、対向した対のデータを使用する対向対評価法を基本とし、距離の影響を取り除いて評価するが、対向する対のデータのうち片方が確認されない場合は、線源位置をメッシュの中心と設定した線源位置設定法を、ピークが弱い場合は、グロス計数率による評価法により評価する。これら評価法は、その計数値強度により可変してU-238を評価するものである。

ここでU-238量の算出フローを図3.2に示す。

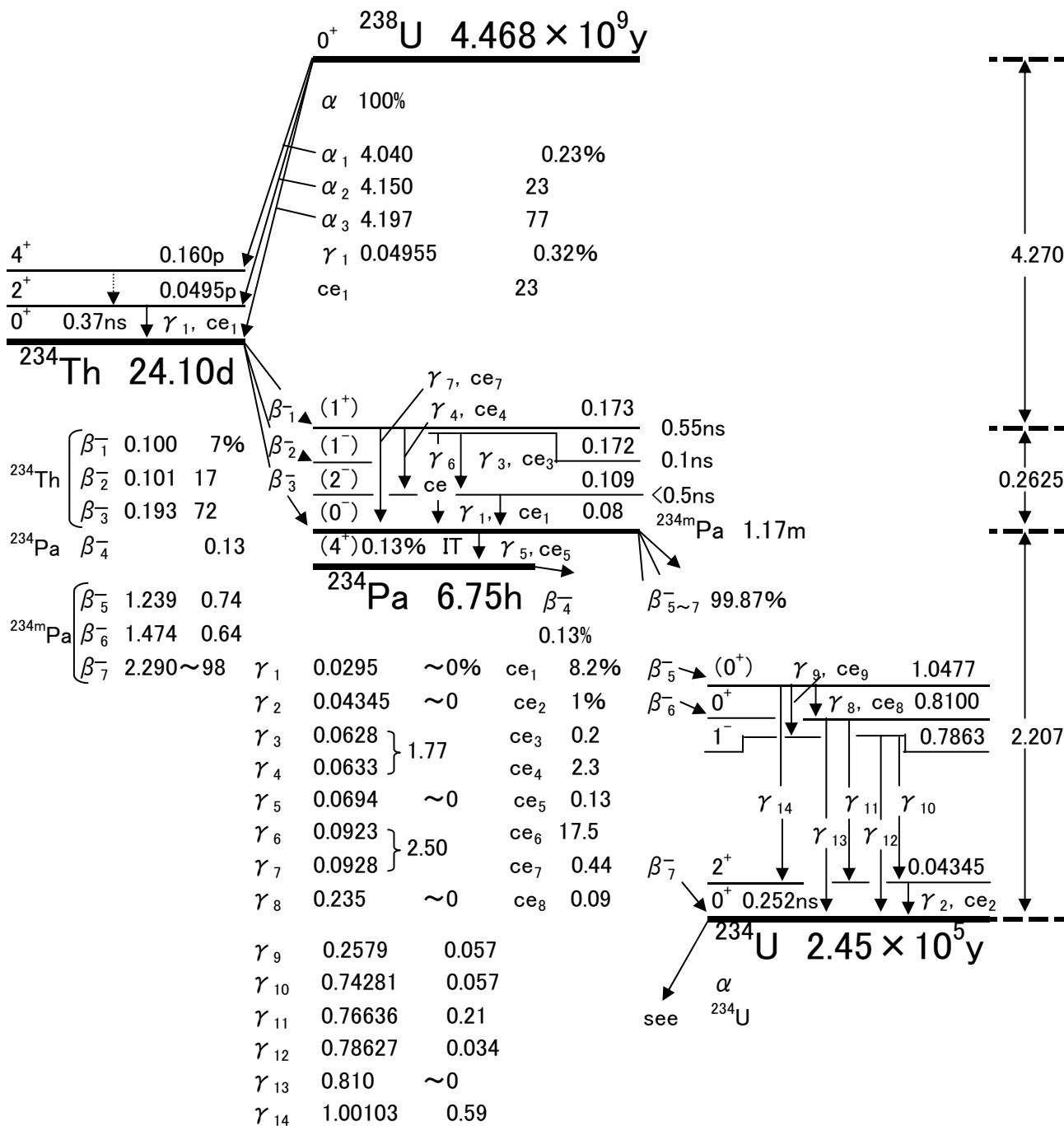
吸収補正は、766keV及び1001keVのピークとも検出された場合は、エネルギーの減衰の違いを利用し、それらピークの計数率比より実効的な吸収を求め、補正係数を算出する。また、1001keVピークが目視にて確認できるような場合は、ピーク比法や、コンプトン領域を利用したバンド/ピーク比法などにより吸収補正するものである。

また、グロス計数率による評価法の場合は、嵩密度により近似的に求めた吸収補正を行うとともに、バックグラウンドも、嵩密度との関係より求めたスペクトルを用いることとしている。

なお、ウランによる自己吸収については、標準線源を用いた測定から求めた実験式より補正する。

以下に各評価法の概略を示す。

- a. 対向対評価法  
測定対象物の相対する方向（対向）で計測したデータを用い、距離の影響を取り除いて評価する方法である。
- b. 線源位置設定法  
対向対評価法を基に、線源分布から 48 分割(NaI の場合)した NaI データより線源位置を近似的(分割メッシュの中心)に設定して評価する方法である。
- c. グロス計数率による評価法  
グロス計数率による評価法は、グロス計数率を用いて、線源位置を設定して評価する方法である。この評価法は、48 メッシュのうちピークが数本検出されるが、線源位置設定法が使用できない場合に適用するものであり、この評価法を適用することにより、検出下限値を低くできるよう考慮した。



「放射線データブック」より  
 (株)地人書館

図3.1 U-238の崩壊図

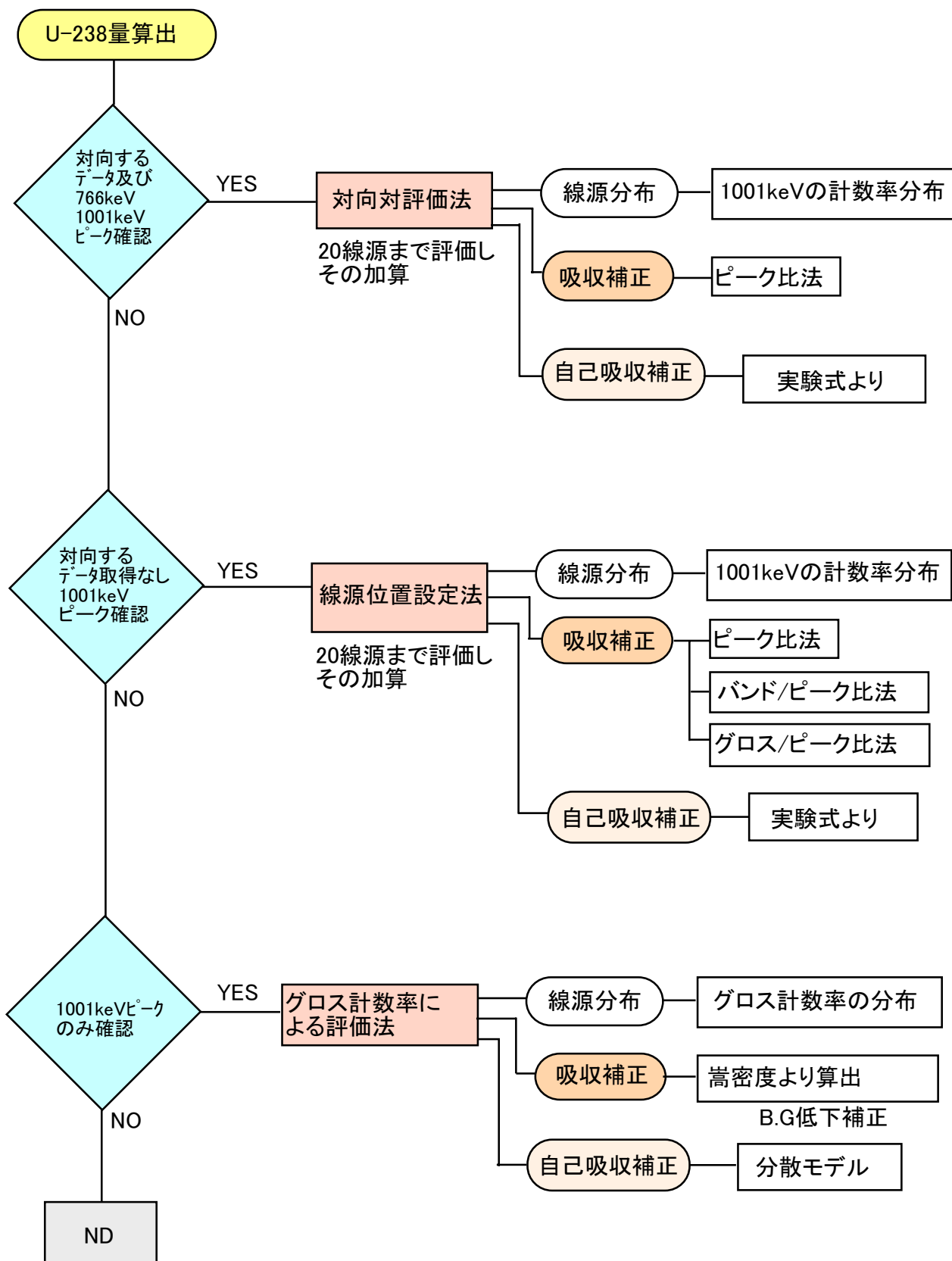


図3.2 U-238量の算出フロー

## 4.解析評価コード

## 4.1 評価コード構成

## (1) 考え方

- ① 測定対象物は雑固体で、密度及び核種が偏在している。
- ② 測定対象物を仮想的なメッシュに切って測定する。
- ③ 検出器の役割を表 4.1 に示す。

表 4.1 検出器の役割

	NaI 検出器	Ge 検出器	備考
台数	3	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ コンテナ及びドラム缶の測定。</li> <li>・ NaI 検出器の方が Ge 検出器よりも感度が良く検出下限値は小さくなる。</li> <li>・ 766keV ピーク計数率への子孫核種の影響の大きさで解法を自動選択</li> </ul>
測定点数 (幅×奥行×高さ)	$4 \times 4 \times 3 = 48$	$4 \times 4 \times 1 = 16$	
データの利用 (1)核種の確認と線源位置	計数率分布より線源の存在するメッシュ設定	対象物中に存在する核種確認	
(2)解法 ①ウランの子孫核種がほとんどない	NaI 検出器の計数率を利用	—	
②ウランの子孫核種が多い	—	Ge 検出器の計数率を利用	

## ④ 核種量の算出法

線源と検出器の距離の効果、対象物中での放射線の吸収効果の取り扱いについて表 4.2 に示す。

## (2) 評価コードの構成

評価コードは、評価ケースとその処理手順により構成され、その概要を図 4.1 に、計算手順を図 4.2 に示す。なお、U-238 量の算出フローは、図 3.2 の通りである。

基本的に、ケースとしては、ウラン含有物及び子孫核種を含むウラン含有物並びに、Co-60 を用いた確認・校正用の 3 ケースである。

ここで、Co-60 を用いるのは、確認や校正試験等を行う場合にウラン線源を取扱えない施設などで、標準線源として使用できるようにしたものである。これにより、核燃料物質による標準線源（ウラン）の移動をしなくても、RI の法定基準値未満の標準線源により、システム作動チェック、NaI 検出器などのドリフト確認・調整及び校正が可能である。

表4.2 距離の効果と吸収効果の取り扱い

(1)距離の効果と吸収効果

項目	解法	必要なデータ
距離の効果	①対向対評価法 対向した対のデータで距離の効果を取り除く ②線源位置設定法 1001keVの計数率分布より求めた線源メッシュの代表点を中心に線源が分散していると想定(ピーク計数率が全く計測されない時はNDとする) ③グロス計数率による評価法 グロス計数率分布より求めた線源メッシュの代表点(例えばメッシュ中心)に線源位置を設定	対向した位置の両側での1001keVとの766keVのピーク計数率  1001keV計数率分布  グロス計数率分布 (B.Gは廃棄物嵩密度で設定)
廃棄物中での吸収効果	①ピーク計数率を用いる方法(対向対評価法, 線源位置設定法) (A)ピーク比で補正 (B)グロス/ピーク比で補正 (C)グロス/ピーク比で補正 ②グロス計数率による評価法 廃棄物重量より算出される嵩密度と分散した線源位置を用いて吸収効果を補正	1001keVと766keVのピーク計数率 1001keV計数率とグロス計数率 グロス計数率(廃棄物嵩密度)  グロス計数率

(2)評価コードでの取り扱い

名称	解法			備考
	線源分布	線源・検出器の距離	廃棄物での吸収	
①対向対評価法	1001keVの計数率分布	①対向した対のデータで評価	(A)ピーク比	・1001keV,766keVの計数率が計測された場合
②線源位置設定法	1001keVの計数率分布	②線源のあるメッシュの代表点に線源設定	(A)ピーク比 (B)グロス/ピーク比	・1001keV,766keVの計数率が計測された場合 ・廃棄物中での吸収取り扱いは、(A), (B)の順
③グロス計数率による評価法	グロス計数率の分布	③線源のあるメッシュの代表点に線源設定	(D)嵩密度より算出	・ピークは検出されたが線源位置設定法が適用できない場合

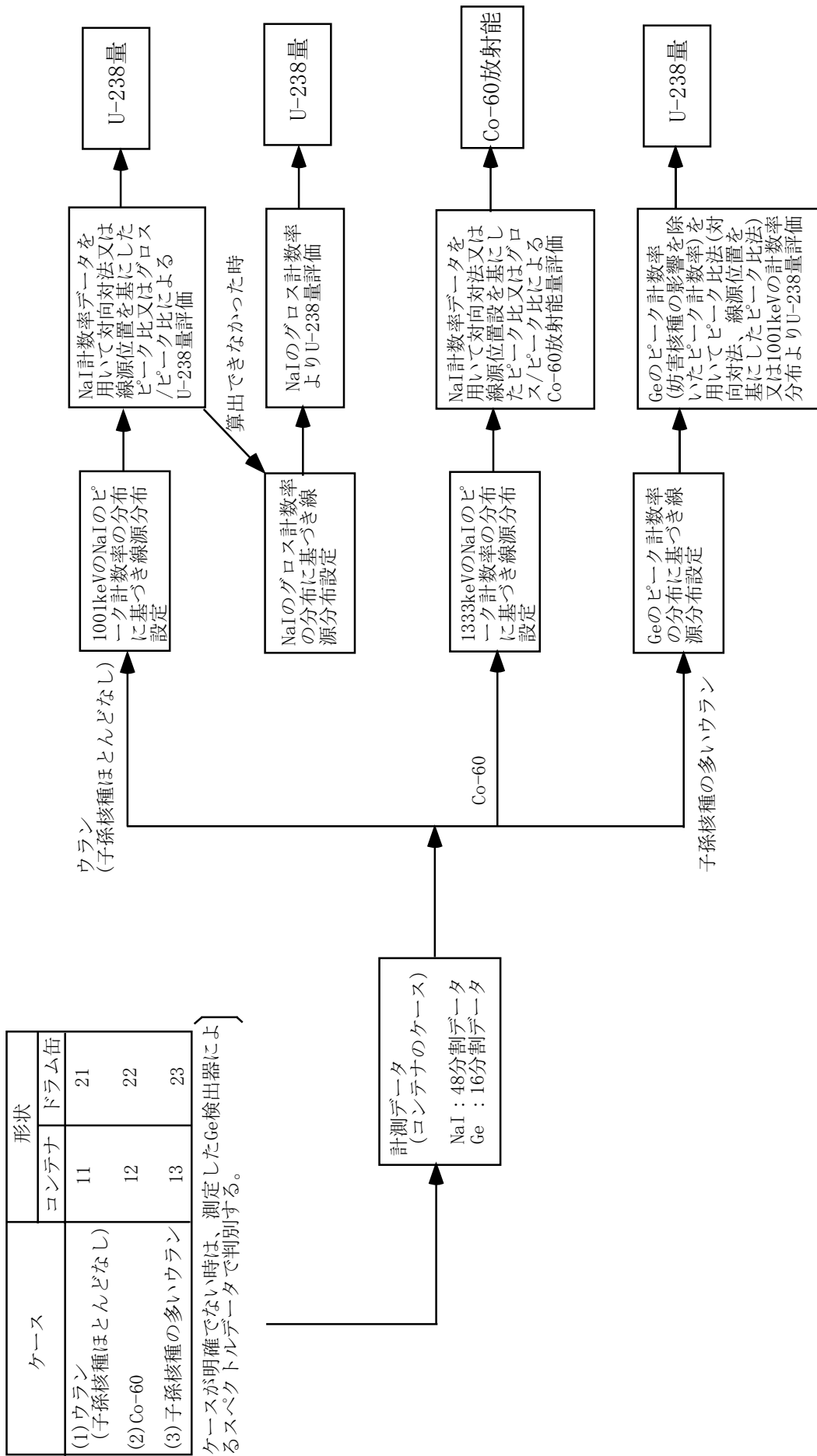


図4.1 評価ケースと処理手順

(インプット部)

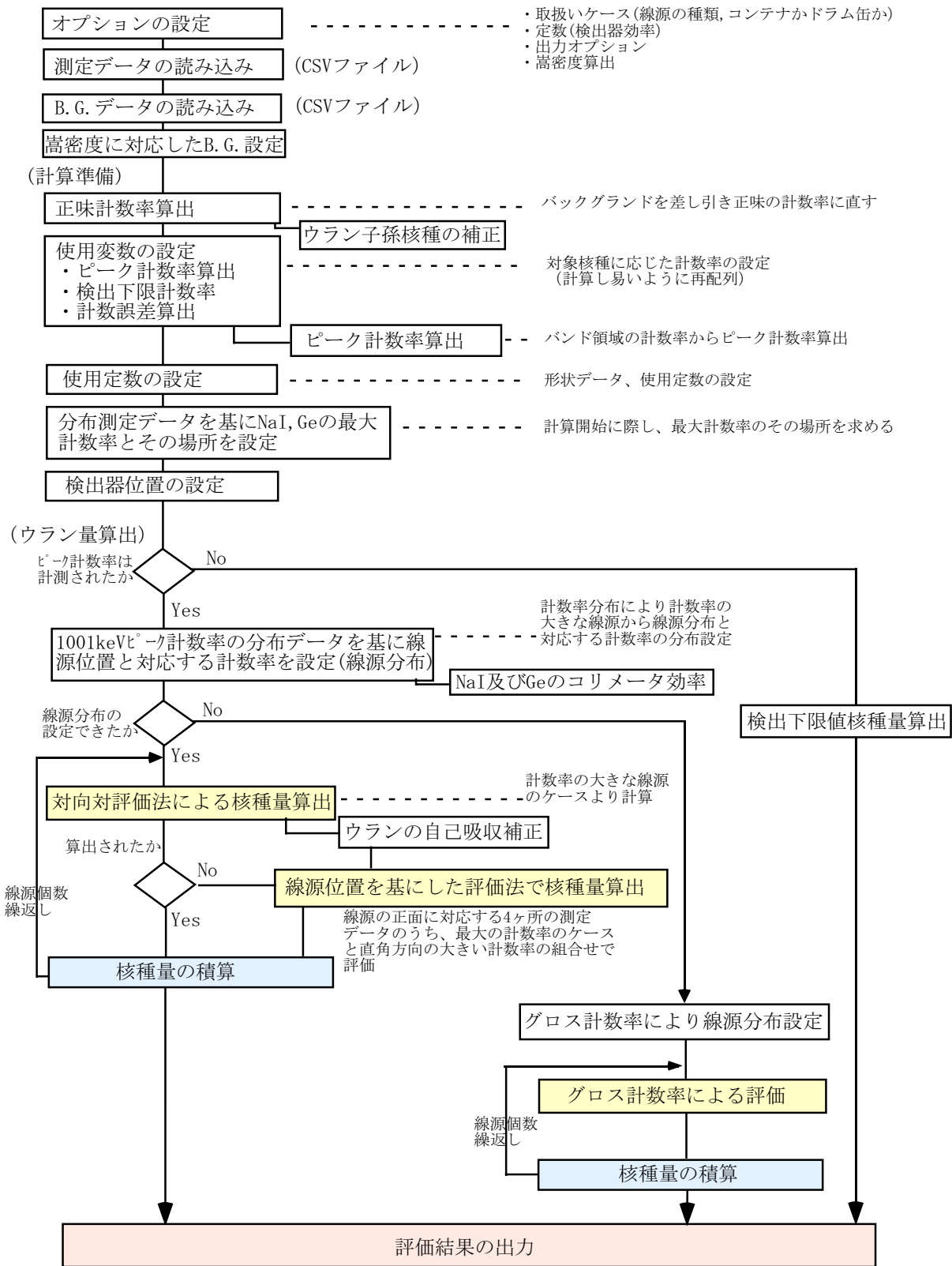


図4.2 計算手順



## 4.2 入力及び設定

### (1) オプションの設定

取扱いケースとしての設定を行う。ここでは、ウラン含有物のケース(子孫核種ほとんどなし)、Co-60 のケース及び子孫核種を含むウラン含有物のケースから選択する。これら判断については、Co-60 のケースを除き、Ge 検出器のスペクトルから自動的に選択される。

出力は、測定データ、BG データ、計数率データ、計数率の計数誤差、検出下限値、放射能評価結果があり、必要な情報を選択できる。

減弱係数を近似するための材質としては、鉄、塩化ビニル、コンクリートから選択する。

また、検出器の効率については、実際に距離を可変して線源の測定を行い、フラックスあたりの計数率を求めた。表 4.3 に、 $\gamma$  線の発生率及び検出器効率を示す。

表 4.3  $\gamma$  線の発生率

核種	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	発生率	検出器効率(cps/flux)	
			NaI	Ge
U	766	25.9 $\gamma$ /sec·gU	66.76	3.906
	1001	72.9 $\gamma$ /sec·gU	36.59	2.903
Co-60	1173	1.0 $\gamma$ /sec·Bq	22.23	2.086
	1333	1.0 $\gamma$ /sec·Bq	21.13	1.859

(注 1)100gU :  $(25.9+72.9) \times 100 = 10^4 \gamma / \text{sec} \Rightarrow 5 \times 10^3 \text{Bq}$  の Co-60 とほぼ同等

(注 2)U の自己吸収補正済

### (2) 測定データの読み込み

データの読み込みは、情報データ(CSV ファイル)及び計測データである。

- ・ 情報データ

グループ名,コンテナ番号,廃棄物重量,コメント,それぞれの検出器での ROI の開始と終了,16 組の位置番号・測定時間・カウント数(ピーク,グロス)

- ・ データ

ROI の設定データは、766keV,1001keV,1173keV(Co-60),1333keV(Co-60),それぞれの低エネルギー側ベースライン領域及び高エネルギー側ベースライン領域並びにピーク領域、ROI グロスなどがある。

### (3) バックグラウンドデータの読み込み

バックグラウンドデータ(CSV ファイル)として、コンテナ中に水を入れた時のデータ及び空コンテナにおけるデータを読み込む。バックグラウンドデータは、バンド計数率及びグロス計数率の算出に利用する。

バックグラウンドレベルは、コンテナ中の廃棄物による遮蔽効果の影響があるので測定体系に近いバックグラウンドを嵩密度から近似的に算出する。

嵩密度に対応したバックグラウンドの設定は、嵩密度の関数  $\beta$  を基に以下の式で行う。(詳細については、添付資料 1 参照)

なお、コンテナの容器重量は、400kg とした。

$$\text{合成 BG スペクトル} = (1 - \beta) \cdot (\text{空気の BG スペクトル}) + \beta \cdot (\text{水の BG スペクトル})$$

## (4) 正味の計数率算出

得られた計数率からバックグラウンドを差し引き、正味の計数率を算出する。

$$A_{\text{net}}(i, k, j) = N(i, k, j)/t - N_{\text{BG}}(k, j)/t_{\text{BG}} \quad \left( \text{但し } \frac{N}{t} > \frac{N_{\text{BG}}}{t_{\text{BG}}} + \alpha \sigma \text{ の場合} \right)$$

$N(i, k, j)$  : 位置  $i$ , 検出器  $k$ , 核種  $j$  の計数値

$A_{\text{net}}(i, k, j)$  : 位置  $i$ , 検出器  $k$ , 核種  $j$  の正味計数率

$N_{\text{BG}}(k, j)$  : 検出器  $k$ , 核種  $j$  の計数値

$t$  : 計測時間,  $t_{\text{BG}}$  : BG 計測時間,  $\sigma$  : BG 計数率の標準偏差,

$\alpha$  : 係数(3)

なお、廃棄物中にはウランの子孫核種が含まれる可能性があり、子孫核種の代表である Bi-214 の 609keV  $\gamma$  線のピーク計数率を用いて補正を行う。

(補正の詳細は、添付資料 2 に示す。)

## (5) 変数・定数の設定

## ①変数

a. 核種のピーク計数率及びグロス計数率

$A_{\text{cps}}(i, ip, j, k)$  ( $i$ :位置,  $ip$ :対面位置,  $j$ :検出器,  $k$ :核種)

Co-60 : 1173keV, 1333keV のピーク計数率, バンド計数率

U-238 : 766keV, 1001keV のピーク計数率, グロス計数率

U の子孫核種 : Bi-214 の 609.3keV のピーク計数率,

1120.3keV のピーク計数率, Pb-211 の 831.8keV のピーク計数率

b. 検出下限計数率, 計数率変動幅, 変動幅相対値(変動幅/正味計数率)

c. 線源分布設定の事前準備として、NaI と Ge の最大計数率とその位置設定

## ②定数

a. U, Co-60 の  $\gamma$  線発生率 ( $\gamma$ /(sec·gU),  $\gamma$ /(sec·Bq)), 吸収係数  $\mu$  (1/cm)

b. 形状データ(コンテナ寸法, ドラム缶寸法, 検出器と容器の距離)

c. 検出器位置を座標で設定 ( $DP_{xyz}(i, ip, j, m)$ :  $m = 1 \sim 3(x, y, z)$ )

## 4.3 線源分布の設定

コンテナ測定は、NaI が高さ方向 3 分割×4 分割/面×4 面=48 分割/廃棄物、Ge 検出器は、高さ方向の分割がなく 16 分割/廃棄物の測定データが得られる。

コンテナは、容積が大きく、線源が複数で分布する可能性があるため、NaI データを基に下記に示す取扱いで線源位置及び対応する計数率分布を設定する。

## (1) 機能

NaI の 1001keV の計数率分布より線源位置を設定する。なお、ウランの場合 1001keV, Co-60 の場合 1333keV のデータを基に設定する。

線源位置の設定は、線源による最大の計数率の一定割合(DcutB)以上の計数率がなくなるまで線源を設定する。(線源の数 :  $N_{\text{STPMX}}$  最大 20 まで)

線源位置設定後、全部の線源分布(測定された計数率の分布)、最大計数率に対応する線源を除いた計数率分布、最大計数率, 2 番目の計数率に対応する線源を除いた分布を確認する。以下に考え方及び手順を示す。

## (2) 考え方

NaI の 1001keV の計数率分布  $N_2(i, ip, j)$  より線源位置を設定する。(i=1~

8, ip=1~2, j=1~3) 図 4.3 に線源位置設定の考え方を示す。

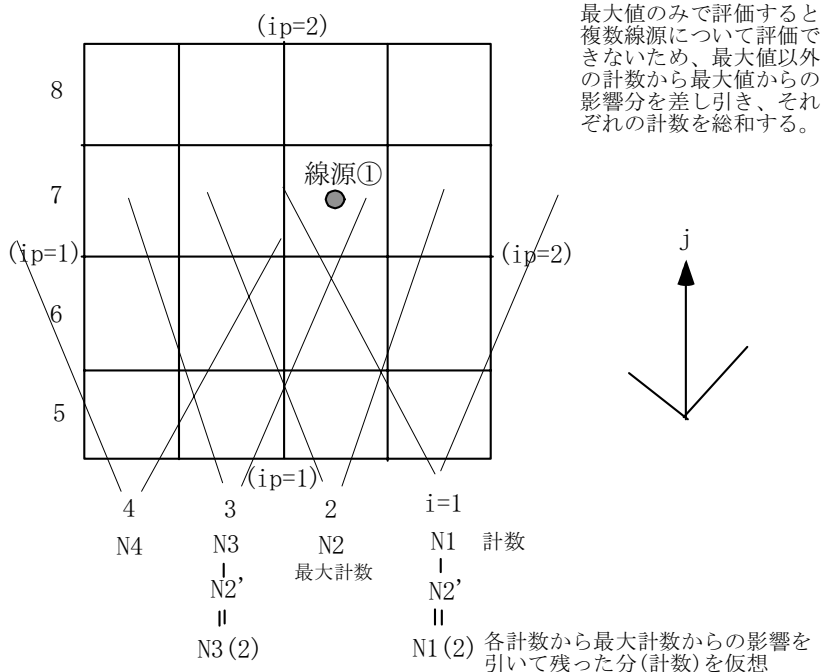


図 4.3 線源位置設定の考え方(コンテナ断面)

(3) 手順

- ①  $N_2(i, ip)$ の最大値設定..... $N_2(max)$ ,  $i(1)$ ,  $ip(1)$ ,  $j(1)$
- ②  $(i(1), ip(1), j(1))$ と直角直方向の最大計数率設定.....場所  $is(1)$ ,  $isp(1)$ ,  $j(1)$   
例えば、第1番目の線源位置  $i(1)$ ,  $is(1)$ ,  $j(1)$
- ③ 以下の手順で1番目の線源からの寄与を取り除いた計数率分布を求める。

a.  $i=I$  への線源からの計数率

$$N_2^* = N_2^0 \cdot \frac{L_0^2}{L^2} \cdot g(\theta) \dots \dots \text{ここで } g(\theta) : \text{コリメータ効率}$$

$N_2(I) - N_2^*$  : 線源①(図 4.4)以外からの線量率

線源①からの影響  $N_2^*$  を差し引くと  $N_2(I)$  における線源①以外からの  $\gamma$  線計数が算出される。

$$\frac{N_2(I) - N_2^*}{N_2(I)} = \beta \text{ とおいて他のエネルギーの計数率も同じ比例で減少させる。}$$

- b. 他の面についても  $(i(1), ip(2), j(1))$ ,  $(is(1), isp(1), j(1))$ ,  $(is(1), isp(2), j(1))$  の検出器の計数率を基に a. と同様の手順で線源①を寄与を除いた計数率を設定する。

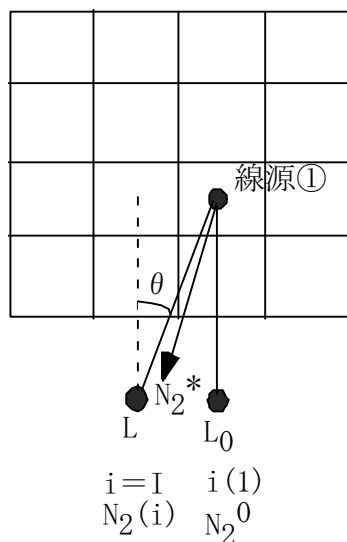


図 4.4 線源寄与分の概念

- ④ 新しい線量率分布（線源①の寄与を除いた計数率分布）で 1001keV の最大計数率の場所を探す。上記の①,②と同じ手順で 2 番目の線源位置を設定する。
- ⑤ 上記③と同じ手順で線源①,線源②の寄与を除いた計数率分布を設定する。なお、線量率分布の設定(④,⑤の手順)は、残存計数率が一定値以下になるまで繰り返す。

測定対象物からの計数率は、小さいケースが多いと予想され、測定された計数率の計数誤差については、大きいケースが予想されるので 766keV のピーク計数率についても上記③の  $\beta$  を用いて同じ取扱いを行った。

4.4 対向対評価法による評価

(1) 考え方

コンテナ容器に収納されている廃棄物は、雑固体であり核燃料物質及びマトリックス密度が偏在している。また、核燃料物質からの方向によって密度分布が異なることが予想される。(均一密度の仮定はできない。)

対向対評価法は、核燃料物質から放出され、同じ密度分布を透過し検出器へ入るエネルギーの異なる直接線を利用して、実効的な減衰距離( $\rho t$ )を求め、距離の影響を取り除いて核種量を求めるものである。

距離の影響を取り除く考え方は、図 4.5 の対向対評価の考え方(体系)に基づくものである。

図 4.5 において、「線源と検出器 a の距離」と対向する位置である「線源と検出器 c の距離」の和は一定であることから対向対のデータを用いて距離の影響を取り除くことができる。この方法は、回転して測定できない角型容器に適した方法である。

線源—検出器 a の距離： $x + \Delta$   
 線源—検出器 c の距離： $l - x + \Delta$

和： $l + 2\Delta$ ：一定

よって、2種類の $\gamma$ 線ピークデータを含む対向面でのデータにより線源位置の影響を取り除いて核種量を算出できることとなる。

ゆえに、線源位置が明確に分からなくても核種量を求めることが可能であるという利点がある。

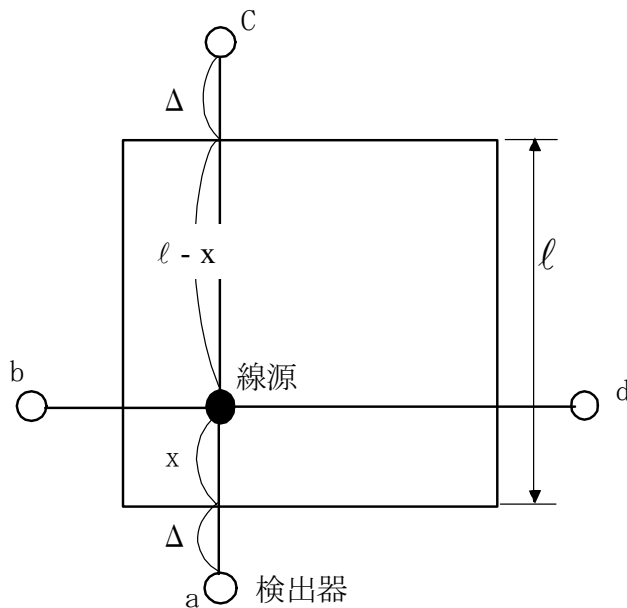


図4.5 対向対評価の考え方(体系)

(2) 評価方法

対向対評価法による計数率の取扱いについて以下に記述する。

検出器における計数率の評価は、

$$\text{計数率} = \text{放射能} \times \gamma \text{発生数} \times \gamma \text{-flux 当りの計数率} \times 1 / 4 \pi r^2 \times e^{-\mu t}$$

(cps) (Bq) ( $\gamma / \text{sec} \cdot \text{Bq}$ ) (cps/ $\gamma / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ ) 線源～検出器間の球表面積 (1/cm<sup>2</sup>)

次に、検出器 a においては、

$$N_a(1) = A \cdot k_1(1) \cdot k_2(1) \frac{1}{4 \pi (x + \Delta)^2} e^{-(\mu_1 \rho_a t_a + \mu f_1 \delta)} \dots \dots \dots (4-1)$$

$$N_a(2) = A \cdot k_1(2) \cdot k_2(2) \frac{1}{4 \pi (x + \Delta)^2} e^{-(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)} \dots \dots \dots (4-2)$$

ここで  $N_a(1)$  : 766keV の点 a での計数率

$N_a(2)$  : 1001keV の点 a での計数率

$k_1(i)$  : gU 当りの  $\gamma$  線の発生数(1001keV;72.9  $\gamma / \text{sec/gU}$ )

$k_2(i)$  :  $\gamma$ -flux 当りの計数率

(NaI で 1001keV の場合; $k_2=35.3\text{cps}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ )

$\mu$  : コンテナ内部での  $\gamma$  線エネルギーに対する単位密度当りの質量吸収係数( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$\mu f$  : 容器での  $\gamma$  線エネルギーに対する単位密度当りの質量吸収係数( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

A : 該当する  $\gamma$  線を放出する  $\gamma$  線源強度(gU-238)

$\rho$  : コンテナ内部の密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

t : 線源から検出器に入るまでの廃棄物中を通過する距離

$\delta$  : 容器での密度と厚さの積( $7.8\text{g}/\text{cm}^3 \times 0.45\text{cm} = 3.51\text{g}/\text{cm}^2$ )

$\Delta$  : 容器壁から検出器までの距離

上記式の計数比より、実効的な  $\gamma$  線の減衰  $\rho a t_a$  を求める。(対象物における計測した線源位置からの減衰を求めることとなる。)

$$\frac{N_a(1)}{N_a(2)} = \frac{A \cdot k_1(1) \cdot k_2(1) \frac{1}{4 \pi (x + \Delta)^2} e^{-(\mu_1 \rho_a t_a + \mu f_1 \delta)}}{A \cdot k_1(2) \cdot k_2(2) \frac{1}{4 \pi (x + \Delta)^2} e^{-(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)}}$$

$$\frac{N_a(1)}{N_a(2)} = \frac{k_1(1) \cdot k_2(1)}{k_1(2) \cdot k_2(2)} e^{-(\mu_1 - \mu_2) \rho_a t_a - (\mu f_1 - \mu f_2) \delta} \dots \dots \dots (4-3)$$

$\delta$  は、容器厚さ  
(4-3)式を吸収補正に用いる

測定された計数率比      定数(既知)      実廃棄物から得られる未知数

(4-2)式の  $N_a(2)$  を次の様に変形し、 $f_a$  を定義する。

$$N_a(2) = \frac{A}{(x + \Delta)^2} \cdot \frac{k_1(2) \cdot k_2(2) \cdot e^{-(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)}}{4 \pi} \dots \dots \dots (4-4)$$

$$\frac{A}{(x + \Delta)^2} = N_a(2) \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2) \cdot e^{-(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)}}$$

$$= N_a(2) \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} e^{(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)} \Rightarrow f_a$$

$$\frac{e}{e^{-(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)}} = e^{(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)}$$

$$\frac{1}{(x + \Delta)^2} = \frac{f_a}{A} \quad (x + \Delta)^2 = \frac{A}{f_a} \quad x + \Delta = \sqrt{\frac{A}{f_a}}$$

同様に  $f_c$  を定義する。

$$N_c(2) = \frac{A}{(\ell - x + \Delta)^2} \cdot \frac{k_1(2) \cdot k_2(2) \cdot e^{-(\mu_2 \rho_c t_c + \mu f_2 \delta)}}{4\pi} \dots \dots \dots (4-5)$$

$$\frac{A}{(\ell - x + \Delta)^2} = N_c(2) \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2) \cdot e^{-(\mu_2 \rho_c t_c + \mu f_2 \delta)}}$$

$$= N_c(2) \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} e^{(\mu_2 \rho_c t_c + \mu f_2 \delta)} \Rightarrow f_c$$

$$\frac{1}{(\ell - x + \Delta)^2} = \frac{f_c}{A} \quad (\ell - x + \Delta)^2 = \frac{A}{f_c} \quad \ell - x + \Delta = \sqrt{\frac{A}{f_c}}$$

よって、

$$f_a = N_a(2) \cdot \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} \cdot e^{(\mu_2 \rho_a t_a + \mu f_2 \delta)} = \frac{A}{(x + \Delta)^2} \dots \dots \dots (4-6)$$

$$f_c = N_c(2) \cdot \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} \cdot e^{(\mu_2 \rho_c t_c + \mu f_2 \delta)} = \frac{A}{(\ell - x + \Delta)^2} \dots \dots \dots (4-7)$$

ウラン量  $A$  の算出は、(4-6)と(4-7)式より  $x$  を消去して線源強度  $A$  が次の様に求められる。

$x$  方向について以下の様になる。

$$\left. \begin{array}{l} x + \Delta = \sqrt{\frac{A}{f_a}} \\ \ell - x + \Delta = \sqrt{\frac{A}{f_a}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} x + \Delta = \sqrt{\frac{A}{f_a}} \\ \ell - x + \Delta = \sqrt{\frac{A}{f_c}} \\ \hline \ell + 2\Delta = \sqrt{A}(1/\sqrt{f_a} + 1/\sqrt{f_c}) \end{array}$$

ゆえに、(4-6)と(4-7)式より  $x$  を消して線源強度  $A$  が次の様に求まる。

・  $x$  方向について

$$\sqrt{A} = (\ell + 2\Delta) \cdot (\sqrt{f_b} \cdot \sqrt{f_d}) / (\sqrt{f_b} + \sqrt{f_d})$$

$$A = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \frac{f_a \cdot f_c}{f_a + f_c + 2\sqrt{f_a} \cdot f_c} \dots \dots \dots (4-8)$$

$$(\sqrt{f_c} + \sqrt{f_a}) \cdot (\sqrt{f_c} + \sqrt{f_a}) = f_c + \sqrt{f_c} \cdot \sqrt{f_a} + \sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c} + f_a$$

・ y 方向について、同様に

$$\left. \begin{aligned} y + \Delta &= \sqrt{A/f_b} \\ \ell - y + \Delta &= \sqrt{A/f_d} \end{aligned} \right\} \ell + 2\Delta = \sqrt{A}(1/\sqrt{f_b} + 1/\sqrt{f_d})$$

$$A = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \frac{f_b \cdot f_d}{f_b + f_d + 2\sqrt{f_b \cdot f_d}} \quad \dots \dots \dots (4-9)$$

次に、x(a - c)及び y(b - d)方向における計数値の平均をとる。

$$A = \frac{(\ell + 2\Delta)^2}{2} \cdot \frac{f_a \cdot f_c}{f_a + f_c + 2\sqrt{f_a \cdot f_c}} + \frac{f_b \cdot f_d}{f_b + f_d + 2\sqrt{f_b \cdot f_d}} \quad \dots \dots (4-10)$$

この計算を最大 20 ポイントまで計算し、そのおのおの求められた値を加算して、対象物中の U-238 量を求める。

この手法の特徴としては、対向対の測定点 a, c で 766keV と 1001keV の計数率が測定されると線源位置の寄与を含まないで評価ができること。また、線源強度が弱くなると Na(1)か Nc(1)のどちらかの計数率が小さくなり、信頼性が乏しくなると適用できない。

fb, fd も利用できる時は A の値として fa と fc より求めた値と fb と fd より求めた値の相乗平均をとる。

但し、RT=ρ・t とした 時、方向によって差が大きすぎる時は、次の評価法(線源位置設定法)へ進む。

次の評価法に進む判定は、以下の通りとし、1 桁以上異なる場合としている。

$$|(RT)_a + (RT)_c - \{(RT)_b + (RT)_d\}| > \max(1)$$

$$\text{または、} |(RT)_a - (RT)_c| > \max(2)$$

(3) 誤差評価

以下に誤差評価式を示し、式の導きについては、添付資料 3 に示す。

ウラン量

$$A = (\ell + 2\Delta)^2 \frac{f_a \cdot f_c}{f_a + f_c + 2\sqrt{f_a \cdot f_c}} = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \left[ \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right]^2 \quad \dots \dots \dots (4-11)$$

Na(1)=ua, Na(2)=va, とおくと (Na(1):766keV の点 a での計数率, Na(2):1001keV の点 a での計数率)

$$f_a = c \cdot v_a \cdot \exp \left\{ -K \ln \left( \frac{u_a}{v_a} \right) + w \right\} \quad \dots \dots \dots (4-12)$$

ここで c, w は定数,  $K = \frac{\mu_2}{\mu_1 - \mu_2}$  (線源がウランで鉄での減衰を考えると

K=7.18)



従って

$$\frac{\partial A}{\partial u_a} = A \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a + f_c}} \cdot \frac{-K}{u_a} \quad \dots \dots \dots (4-13)$$

$$\frac{\partial A}{\partial v_a} = A \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a + f_c}} \cdot (1+K) \frac{1}{v_a} \quad \dots \dots \dots (4-14)$$

計数誤差を  $\Delta u_a$ ,  $\Delta v_a$ ,  $\Delta u_c$ ,  $\Delta v_c$  とすると放射能の誤差  $\Delta A$  は次の様になる。

$$\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a + f_c}}\right)^2 \left\{ K^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_a}{u_a}\right)^2 + (1+K)^2 \left(\frac{\Delta v_a}{v_a}\right)^2 \right\} + \left(\frac{\sqrt{f_a}}{\sqrt{f_a + f_c}}\right)^2 \left\{ K^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_c}{u_c}\right)^2 + (1+K)^2 \left(\frac{\Delta v_c}{v_c}\right)^2 \right\} \dots \dots \dots (4-15)$$

(4) 複数線源の取扱い

線源が複数確認された場合は、以下の取扱いとする。

$$A_T = A_1 + \dots \dots \dots + A_n$$

総ウラン量  $A_T$  は分布しているウラン量  $A_i$  の和とし、独立に求められるとする。

$$(\Delta A_T)^2 = (\Delta A_1)^2 + \dots \dots \dots + (\Delta A_n)^2$$

4.5 線源位置設定法による評価

(1) 概要

線源位置設定による評価とは、対向対評価法において、線源の近くの点では計数率が得られるが、離れた点では計数率が得られない場合、48 分割した NaI データより線源位置を近似的(分割したメッシュの中心位置に仮定)に設定し、核種量を求めるものである。(線源位置を基にしたピーク比法であり、以下「線源位置設定法」という。)

吸収補正については、2 種類の  $\gamma$  線ピークデータを用いるものであり、4.4 対向対評価法における補正法と同じである。

ここで、吸収補正については、766keV と 1001keV のピーク比法を基本とするがピーク比の誤差が大きい(計数率が小さい)場合は、コンプトン領域の計数率とピーク計数率の比を利用するバンド/ピーク比若しくは、スペクトル全計数率とピーク計数率の比を利用するグロス/ピーク比法を用いる。

(2) 評価方法

線源位置設定法による計数率の取扱いについて以下に記述する。

図 4.5 体系での点 a において、

$$N_a(2) = A \cdot k_1(2) \cdot k_2(2) \frac{1}{4\pi(x + \Delta)^2} e^{-(\mu_2 \rho_a t_a + \mu_2 \delta)} \dots \dots \dots (4-16)$$

$$\frac{N_a(1)}{N_a(2)} = \frac{k_1(1) \cdot k_2(1)}{k_1(2) \cdot k_2(2)} e^{-(\mu_1 - \mu_2) \rho_a t_a - (\mu_1 - \mu_2) \delta} \dots \dots \dots (4-17)$$

- ここで  $N_a(1)$  : 766keV の点 a での計数率
- $N_a(2)$  : 1001keV の点 a での計数率
- $k_1(i)$  : gU 当りの  $\gamma$  線の発生数
- $k_2(i)$  :  $\gamma$ -flux 当りの計数率

上記式の計数率比より、実効的な減衰距離  $\rho_a t_a$  が求まる。(対象物において、計測した線源位置からの減衰を求めることとなる。)

ここで、なんらかの方法で近似的な距離  $x$  の値が得られれば線源強度  $A$  が求まる。ここでは、線源は該当するメッシュ中心に設定する。(解析コードでは該当メッシュの領域内で  $\rho_a$  と  $\rho_b$  が近づく様フィードバックをかけている。)

$$f_a = N_a(2) \cdot \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} \cdot e^{(\mu_2 \rho_a t_a + \mu_2 \delta)} = \frac{A}{(x + \Delta)^2} \dots \dots \dots (4-18)$$

$$A = (x + \Delta)^2 \cdot f_a \dots \dots \dots (4-19)$$

点 b についても同様に求まる。

$$A = (y + \Delta)^2 \cdot f_b \dots \dots \dots (4-20)$$

ここで、式に示されるように距離  $x$ ,  $y$  の項の影響を受けるため、対向対評価法と違い、距離  $x$ ,  $y$  を正確に表現する必要がある。よって、線源位置は、分割したメッシュ中心に設定するか、または、 $\rho_a$  と  $\rho_b$  の差が小さくなる位置を線源位置とする。

(3) 誤差評価

以下に誤差評価式を示し、式の導きについては、添付資料 3 に示す。  
 ウラン量を求める式は、

$$A = (x + \Delta)^2 \cdot f_a \text{ 又は } A = (y + \Delta)^2 \cdot f_b$$

相乗平均をとると

$$A = (x + \Delta) \cdot (y + \Delta) \sqrt{f_a \cdot f_b}$$

$$\frac{\partial A}{\partial u_a} = A \cdot \left( \frac{-K}{2} \right) \cdot \frac{1}{u_a}$$

$$\frac{\partial A}{\partial v_a} = A \cdot \left( \frac{1+K}{2} \right) \cdot \frac{1}{v_a}$$

又距離  $x, y$  も独立にメッシュの  $1/2$  の誤差 (コンテナ  $\beta = \ell/8$ , ドラム缶  $\beta = \ell/4$ )  
 をもつと仮定する。

誤差の式

$$\left( \frac{\Delta A}{A} \right)^2 = \frac{1}{4} K^2 \left( \frac{\Delta u_a}{u_a} \right)^2 + \frac{(1+K)^2}{4} \cdot \left( \frac{\Delta v_a}{v_a} \right)^2 + \frac{1}{4} K^2 \left( \frac{\Delta u_b}{u_b} \right)^2 + \frac{(1+K)^2}{4} \cdot \left( \frac{\Delta v_b}{v_b} \right)^2 + \frac{\beta^2}{(x + \Delta)^2} + \frac{\beta^2}{(y + \Delta)^2} \\ \dots \dots \dots (4-21)$$

4.6 グロス計数率による評価法

(1) 概要

グロス計数率による評価法は、ピークによる線源位置設定法が適用できない場合で、48 メッシュのうち 1001keV のピークが一箇所でも検出された場合に、グロス計数（γ線スペクトル全体又はある領域の計数）の分布より線源位置を設定し、廃棄物の嵩密度を用いて、核種量を求めるものである。

評価手順としては、グロス計数率分布を基に線源分布を設定し、線源分布に従い、線源のあるメッシュ位置(線源位置はメッシュ中心)及びグロス計数率を設定する。

グロス計数率を用いる場合のバックグラウンドは、水と空気をマトリックスとしたバックグラウンド計数率と、測定装置がコンクリート建家内に設置されるとして、モンテカルロコード MCNP-4C での計算値(バックグラウンドの発生源は、コンクリート中の K-40 とウラン及びトリウムの子孫核種と仮定<sup>5)</sup>)より測定廃棄物によるバックグラウンド計数率の減衰効果を評価する。嵩密度によるバックグラウンド計数率の変化を図 4.6 に示す。

この関係より、廃棄物重量から求めた内容物の嵩密度を用いて、バックグラウンドの減衰を補正する。

ウラン量の算出では、図 4.7 に示すグロス法での線源モデルにおいて、ウラン量が分散しているとする。これは、グロス計数率を用いる場合は、対象としている廃棄物中のウラン含有量が小さく、ウランが分散していると考えられる場合を想定したものである。また、グロス計数率による評価は、少なくともどこかの測定点で 1001keV のピーク計数率が検出された場合とし、ウランの子孫核種の含有量が少ない場合にのみ適用する。

この場合の前提条件としては、

- ①廃棄物の嵩密度  $\rho_0$  が与えられる。
- ②遮蔽効果が一定以上にあるとグロス計数率  $N_3$  と  $N_2$  はほぼ比例する。

$$N_2 = \frac{N_3}{Kg} \quad (Kg : \text{比例係数})$$

ここで、 $N_2$  ; 1001keV のピーク計数率  
 $N_3$  ; グロス計数率

- ③ $N_3$  の分布より概略の線源位置が設定できる。
- ④ウラン含有量が少ないと想定されるため、長さ  $X_a$  に線源  $Q_a$ 、 $X_b$  に  $Q_b$ 、 $X_c$  に  $Q_c$ 、 $X_d$  に  $Q_d$  があるとする。(  $Q_a$  が  $X_a$  の長さに分布。  $X_a, X_b, X_c, X_d$  は当該メッシュの中央からの長さとする。)

なお、ここでは、分散した線源を想定するため、自己吸収補正は行わないこととする。

(2) 評価方法

①一つの線源に対する計算

$$\frac{N_a(3)}{Kg} = k_1(2)k_2(2) \int_0^{X_a} \frac{Q_a}{X_a} \cdot \frac{e^{-\mu_2 \rho_0 X - \mu_2^* \delta}}{4\pi(X + \Delta)^2} dX \quad \dots \dots \dots (4-22)$$

$$Z_a = \int_b^{X_a} \frac{e^{-\mu_2 \rho_0 X}}{(X + \Delta)^2 X_a} dX$$

$$c = Kg \frac{k_1(2)k_2(2)}{4\pi} e^{-\mu_2^* \delta}$$

とすると

$$Q_a = \frac{N_a(3)}{cZ_a} \dots \dots \dots (4.23)$$

$Q_b, Q_c, Q_d$ も同様に算出できる。  
 核種量： $Q_T = Q_a + Q_b + Q_c + Q_d \dots \dots \dots (4.24)$

- ここで、 $k_1(2)$ :1001keVのgU当りの $\gamma$ 線の発生数
- $k_2(2)$ : $\gamma$ -flux当りの計数率
- Kg: 比例定数
- $\rho_0$ : 嵩密度
- $\mu_2$ : コンテナ内部での $\gamma$ 線エネルギーに対する単位密度当りの質量吸収係数
- $\mu_2^*$ : 容器での $\gamma$ 線エネルギーに対する単位密度当りの質量吸収係数
- $\delta$ : 容器壁での密度と厚さの積
- $\Delta$ : 容器壁から検出器までの距離

②設定された線源分布ごとに $Q_T$ を算出し、加算して廃棄物中の核種量を求める。

(3) 誤差評価

$N(3)$ を $u$ (サフィクスは同じ)と簡略して書くと核種量は次の様になる。

$$Q_T = Q_a + Q_b + Q_c + Q_d = \frac{u_a}{cZ_a} + \frac{u_b}{cZ_b} + \frac{u_c}{cZ_c} + \frac{u_d}{cZ_d} \dots \dots \dots (4.25)$$

ここで、誤差要因として次の2種類を想定する。

- ① 計数誤差： $\Delta u_a, \Delta u_b, \Delta u_c, \Delta u_d$ (それぞれ独立)
- ② 分布している長さに関する誤差： $\Delta X_a, \Delta X_b (X_c = l - X_a, X_d = l - X_b)$

これらより、

$$\Delta Q_T^{*2} = Q_a^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_a^*}{u_a}\right)^2 + Q_b^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_b^*}{u_b}\right)^2 + Q_c^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_c^*}{u_c}\right)^2 + Q_d^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_d^*}{u_d}\right)^2$$

$$+ \left(Q_a \cdot F(X_a) \cdot \frac{\beta}{X_a} - Q_c \cdot F(X_c) \cdot \frac{\beta}{X_c}\right)^2 + \left(Q_b \cdot F(X_b) \cdot \frac{\beta}{X_b} - Q_d \cdot F(X_d) \cdot \frac{\beta}{X_d}\right)^2$$

・・・・・・・・・・・・・・(4・26)

線源が複数の場合は、各線源に対する  $\Delta Q_T^{*2}$  の加算値の平方根で全体の標準偏差を求める。

式の導きについては、添付資料 3(3.グロス計数率による評価)に示す。

(4) グロス計数率の適用性確認

ウラン線源を用いて、グロス計数率による評価の適用性について確認した。コンテナに水を張った状態に 100gU の線源を配置し、U-238 からのエネルギーピーク 766keV 及び 1001keV とグロス計数率の関係並びに試験体による遮蔽厚との関係の評価した。なお、グロス計数率のエネルギー範囲は、約 100keV～1200keV とした。

取得した距離と計数率の関係を図 4.8 及び 4.9 に示す。

この関係から、遮蔽効果が一定以上になるとグロス計数率と 1001keV の計数率は、ほぼ比例していることを確認した。また、この関係からグロス/ピーク比による吸収補正への適用も確認された。

4.7 ウランによる自己吸収補正

(1) 概要

ウランが分散せず存在する場合、ウラン量が多くなるとウラン自身によるγ線の減衰が大きくなる。このため、以下の考え方により近似的に吸収補正を行う。

(2) 補正

補正は、ウラン量=A(評価式で求めた値)/F(自己吸収補正因子)・・・(4-27)  
補正係数 F は、次の関係式より設定する。

マトリックスを鉄とするとピーク比より鉄中での減衰としてウラン量 A を減衰補正して算出する。

$$N_2(\text{cps}) = A \times k1 \times f_{Fe} \times f^* \rightarrow \text{マトリックス部での減衰 } f^*, \text{線源部の減衰 } f_{Fe}(\text{マトリックス部と同じ材質})$$

$$= A^* \times k1 \times f_U \times f^* \rightarrow \text{マトリックス部での減衰 } f^*, \text{線源部での減衰 } f_U \text{とした時のウラン量を } A^* \text{とした時の関係式}$$

従って、 $A^* \times k1 \times f_U \times f^* = A \times k1 \times f_{Fe} \times f^*$  より

$$A^* = \frac{A}{(f_U/f_{Fe})} \dots \dots \dots (4-28)$$

$F = f_U/f_{Fe} \rightarrow U_3O_8$  とした時と鉄とした時の吸収の補正值比(k1 : 比例定数)

次に、自己吸収についてウラン線源約 10g～約 15kg について測定し、計数率との関係を取得した。その結果を図 4.10 に示す。

これら関係式は、 $y = -0.0895 \ln(x) + 1.1851$  となった。

ここで、y : 1001keV のピーク計数率(ピーク計数率/発生量の相対値)

x : gU(天然ウラン)

なお、ウラン線源測定から評価式で求めた値 A と補正係数 F の関係を表 4.3 に示す

表 4.4 自己吸収補正係数(例)

A(g)	9.3	60.16	143.96	736.3	1613.5	14676.5
F	1.0	1.230	1.434	1.473	1.609	1.545

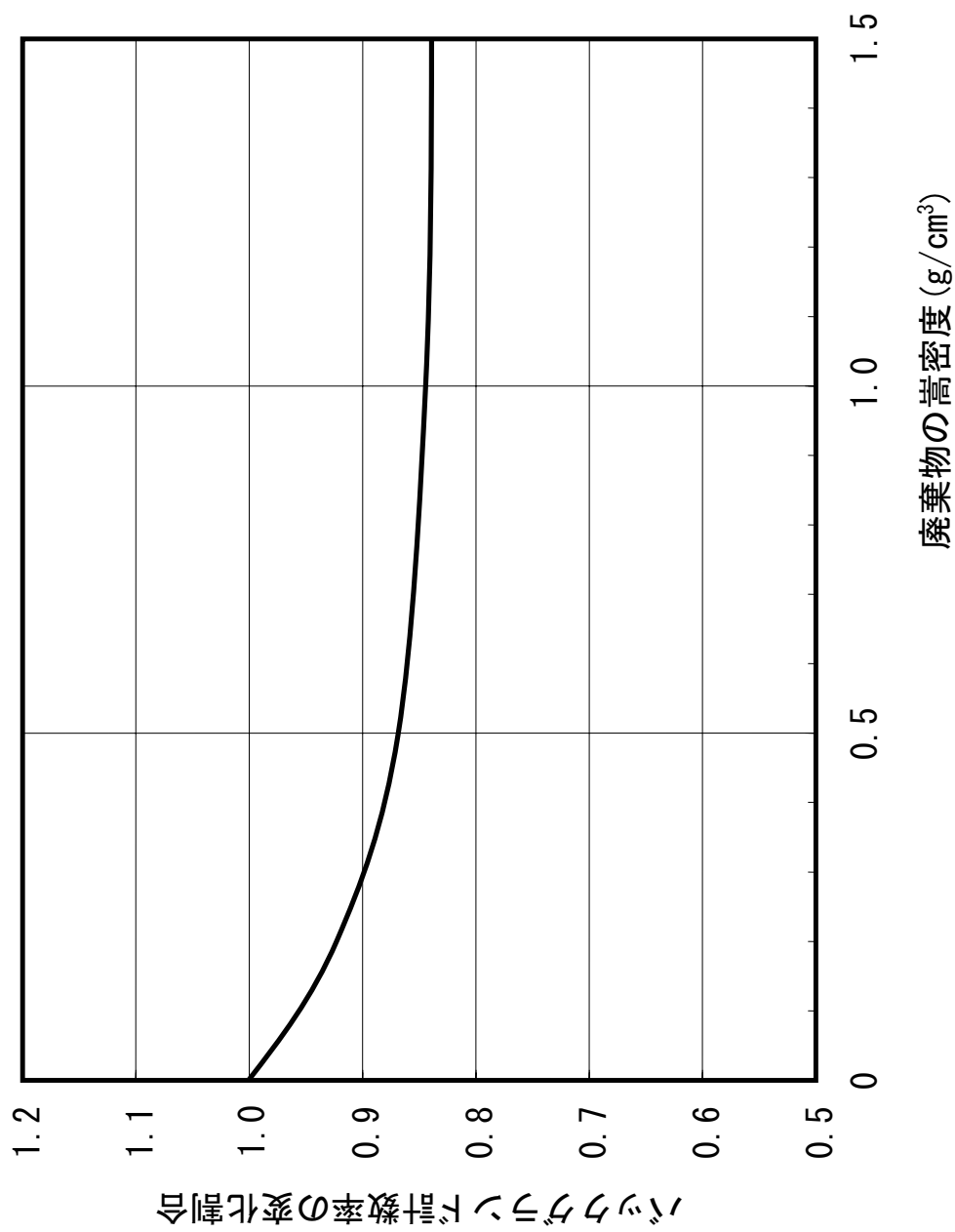
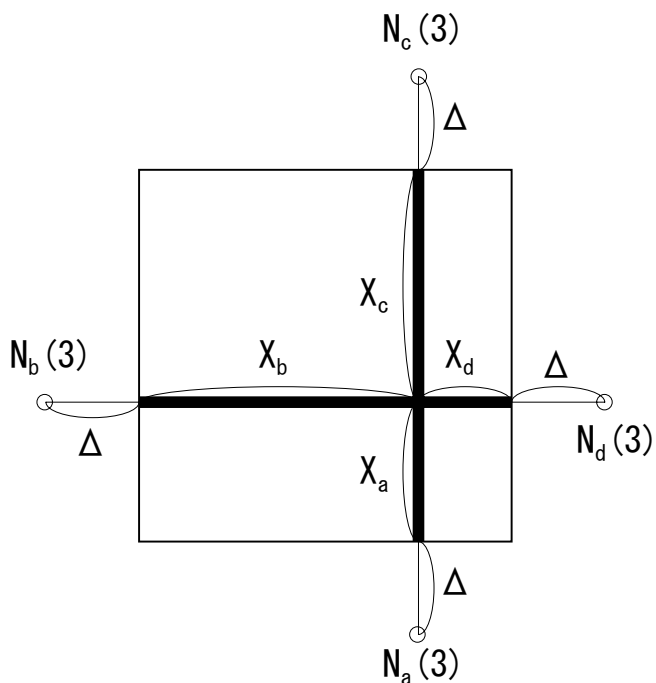


図 4.6 嵩密度によるバックグラウンド計数率の変化  
(空のコンテナ(空気)における計数率を 1 とした)





a 点でのグロス計数率に対応する線源量が長さ  $X_a$  に渡り分布。  
 他の b, c, d 点についても同様。  
 但し  $X_a + X_c = \ell$  ,  $X_b + X_d = \ell$   
 $\ell$  は容器内の一辺の長さである。  
 図中の **——** は線源を示す。

図 4.7 グロス法での線源モデル

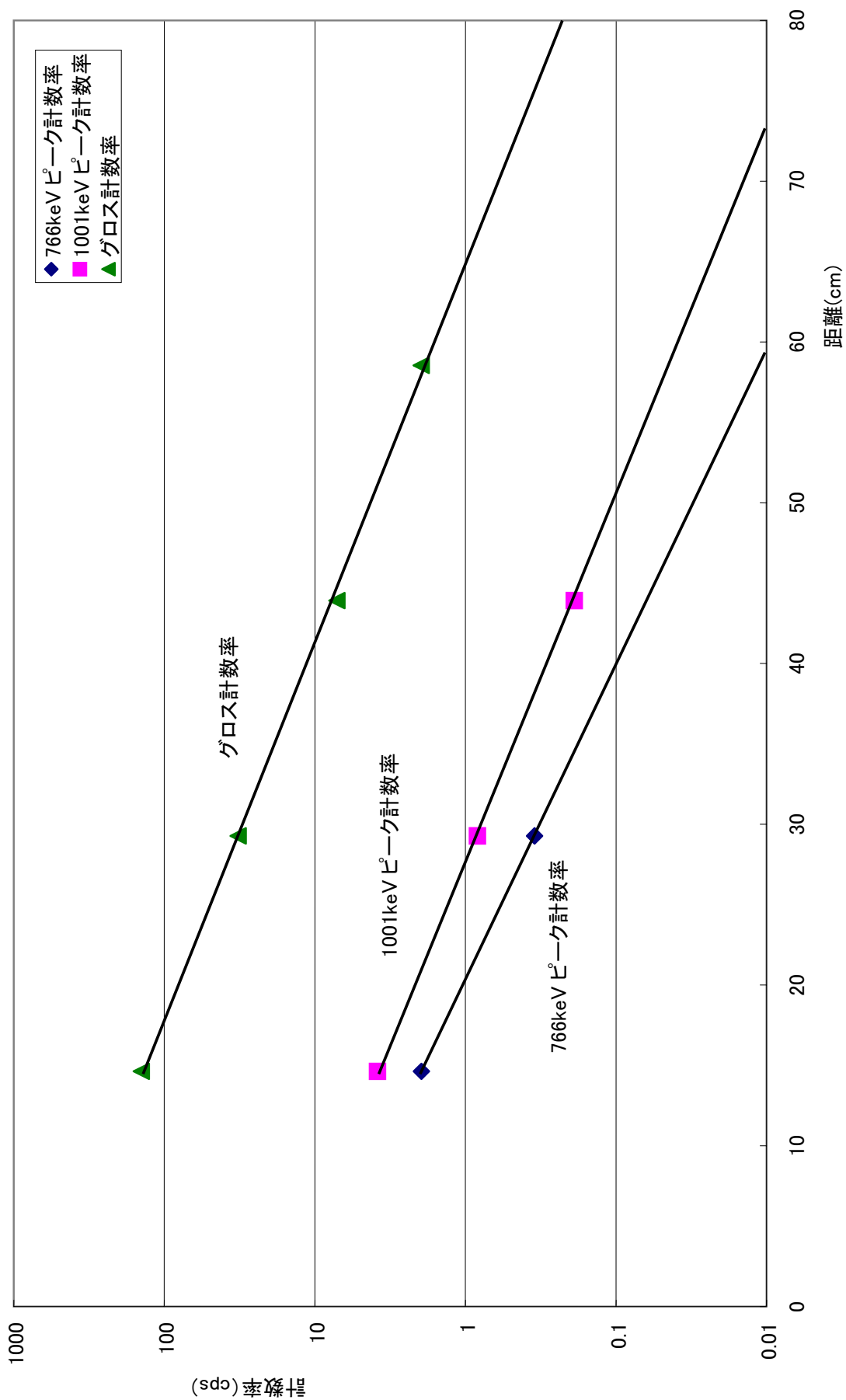


図 4.8 グロス計数率とピーク計数率の変化



UO<sub>2</sub> サンプル

天然ウラン (gU)	形状 (cm <sup>φ</sup> ×cm)	UO <sub>2</sub> 密度 (g/cc)
10	1.5×2.0	3.2
48.9	3.6×1.9	3.1
100	3.6×3.8	3.1
500	5.8×7.0	3.2
1000	7.8×7.5	3.2
9,500	16×17	3.3

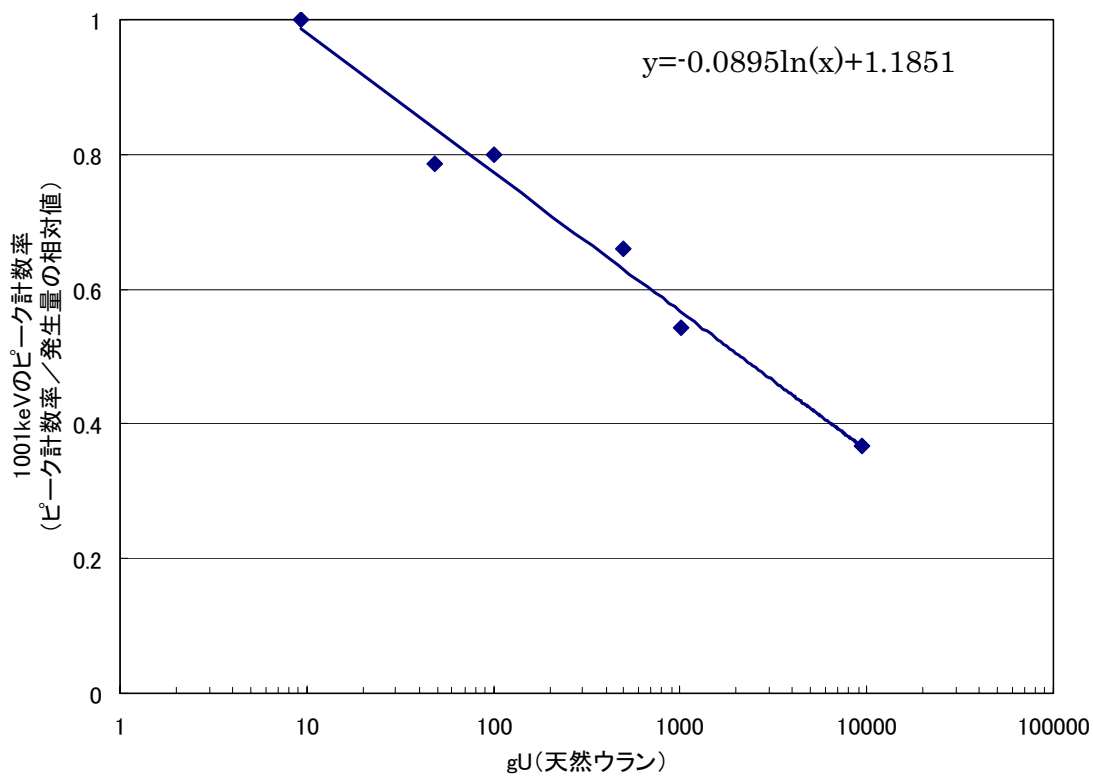


図 4.10 ウランによる 1001keV のピーク計数率の減衰

## 4.8 ウランの子孫核種含有時の評価

## (1) 概要

ウラン廃棄物には、原子燃料公社時代のウラン製錬等からの廃棄物及び鉍滓などが含まれているため、ウランを取り除いたウラン、トリウム等系列における子孫核種が含まれている。また、ウランの不純物としてや崩壊によるものとして子孫核種がウラン廃棄物中に含まれている物がある。γ線を放出する核種として代表的なものは、Bi-214, Pb-214, Ac-228, Pb-211 などがある。

これら子孫核種を含む廃棄物等については、NaI 検出器の分解能では、エネルギーを分解することができないため、なだらかなスペクトルとなってしまう。

このため、分解能が良い、Ge 検出器を用いてウラン量の評価を行うこととした。しかし、子孫核種から放出されるγ線エネルギーは、複数であり、ウランの 766keV のピークと重なる核種も存在することから、子孫核種からの寄与分を補正することが必要となる。(表 4-5 にγ線エネルギー766keV を放出する子孫核種を示す。) このため、次の手順で補正する。

- ① Bi-214 の 609.3keV 及び 1120keV のピーク計数率より放出率を考慮して、768.4keV の計数率を対数で内挿する。
- ② Pb-211 の 831.8keV のピーク計数率より、エネルギー依存性が Bi-214 と同じとして 766.3keV の計数率を算出する。
- ③ 766keV のピーク計数率より、Bi-214 及び Pb-211 からの寄与分を除き U-238 のピーク計数率とする。

求めた U-238 の 766keV と 1001keV のピーク計数率より、ピーク比で廃棄物中での放射線の減衰効果を求め、含有量を算出する。

なお、ウラン廃棄物中に子孫核種が含まれる割合は、今までに測定したウラン廃棄物(ドラム缶詰)から 3 割前後と推定される。

表 4.5 γ線エネルギー766keV を放出する子孫核種

核種	No	エネルギー (keV)	放出率 (γ/dis)	k2 (cps/flux)
U-238	1	766	(25.9)	3.906
	2	1001	(72.9)	2.903
Bi-214	1	609.3	0.461	5.474
	2	768.4	0.0488	3.906
	3	1120	0.150	2.342
	4	1238	0.0592	2.037
	5	1765	0.159	1.243
Pb-211		404.8	0.0300	(9.683)
		766.3	0.00489	3.906
		831.8	0.0282	3.547

注1. U-238 の放出率は、gU 当り

注2. 放出率は、ICRP-38 (1983) より引用

注3. 検出器の感度は現在の採用値 (または近似式からの評価値)

(2) ウランの 766keV のピーク計数率算出について

ウランの 766keV のピーク計数率への子孫核種からの寄与分を補正するため、以下の取扱いを行う。

① Bi-214 の 766keV ピークへの寄与

考え方

$$m = \frac{A \cdot k1 \cdot k2}{4\pi\ell^2} \cdot e^{-\mu(\rho t + \theta)}$$

$$\ln \frac{m}{k1 k2} = \ln \frac{A}{4\pi\ell^2} - \mu\rho t$$

$$g = \frac{m}{k1 \cdot k2}, \quad Z = \ln(g)$$

$$Z = c - \mu \cdot a$$

$$\text{但し, } c = \ln \frac{A}{4\pi\ell^2}$$

$$a = \rho t + \theta$$

Bi-214 は複数の  $\gamma$  線をだす為、次の式が成立する。

$$Z_i = c - \mu_i \cdot a \quad (\gamma \text{ 線の種類 } (i) \text{ に対し } c, a \text{ は定数})$$

表 4.3 で 609.3keV (i=1) と 1120keV (i=3) の  $\gamma$  線の計数率が大きくなるのでこれらの値を使って 768.4keV (i=2) の計数率 ( $\delta_1$ ) を  $\mu$  により内挿する。

$$a = -\frac{Z_1 - Z_3}{\mu_1 - \mu_3}$$

$$Z = c - \mu \cdot a \text{ より}$$

$$Z_2 = Z_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_3 - \mu_1} (Z_3 - Z_1)$$

ここで、 $Z_2 = \ln(g_2) = \ln \left\{ \frac{m_2}{(k1 \cdot k2)_2} \right\}$  であるため

$$\delta_1 = m_2 = (k1 \cdot k2)_2 \cdot e^{Z_2} \quad (766\text{keV での Bi-214 からの計数率}) \dots (4-29)$$

また対数で  $g$  と  $E$ (エネルギー)より内挿すると次の様になる。

$$Z_2^+ = \frac{Z_3 - Z_1}{\ln E_3 - \ln E_1} (\ln E_2 - \ln E_1) + Z_1$$

$$\delta_1^+ = m_2 = (k1 \cdot k2)_2 \cdot e^{Z_2^+}$$

$\delta_1$ ( $\mu$  の違いによる算出)と  $\delta_1^+$ (エネルギーの違いによる算出)の違いはほとんどないため、物質に依存しないエネルギーを用いて内挿する。

② Pb-211 の 766keV ピークへの寄与

766keV に近い 831.8keV のピーク計数率が測定されるのでこの値を用いて、 $\ln g$  と  $\ln E$  の相関関係より傾きが Bi-214 と同じとして 766keV のピークへの Pb-211 の  $\gamma$  からの寄与 ( $\delta$ ) を求める。

$$b = \frac{Z_3 - Z_1}{\ln E_3 - \ln E_1} \quad (\text{Bi-214 の } \ln g \text{ と } \ln E \text{ の相関関係より})$$

831.8keV の Pb-211 の値を  $n_3^*$ ,  $g_3^*$ ,  $Z_3^*$ ,  $E_3^*$  とし、Bi-214 の勾配を用いて

$$Z_2^* = b(\ln E_2^* - \ln E_3^*) + Z_3^*$$

$$\delta = n_2^* = (k_1 \cdot k_2)_2^* \cdot e^{Z_2^*} \dots \dots \dots (4-30)$$

(3) 評価プログラムでの処理

① 子孫核種が多いケースへの切換え

ウラン測定において、

$$R1 = n1^* / n1$$

$n1$  : 計測された U の 766keV のピーク計数率

$n1^*$  : 子孫核種の影響を補正した 766keV のピーク計数率

R1 にて子孫核種が多いかの判定を行う。

② U の 766keV の計数率の補正

Bi-214 の存在の判定

$$m (609.3keV) > 0 \text{ かつ } m (1120keV) > 0$$

Pb-211 の存在の判定

$$m (831.8keV) > 0 \text{ かつ } m (404.8keV) > 0$$

766keV への寄与

・ Bi-214 からの寄与 ( $\delta_1$ )  $\dots \dots \mu$  を用いた内挿 ((4-29)式)

・ Pb-211 からの寄与 ( $\delta_2$ )  $\dots \dots$  エネルギーによる内挿 ((4-30)式)

補正した U の 766keV の計数率 ( $n_1^*$ )

$$n_1^* = n_1 - \delta_1 - \delta_2$$

③ ピーク比の算出

ウランと Bi-214 が同じ様に分布しているとして以下の取扱いをする。(詳細については、添付資料 4 に示す。)

・ ピーク比の変動係数の算出

$$P_B = \frac{m_1}{m_3} \quad \text{但し, } m_1 : 609.3keV \text{ のピーク計数率}$$

$$m_3 : 1120keV \text{ のピーク計数率}$$

$$\sigma_B^2 = (\sigma_1^*)^2 + (\sigma_3^*)^2 \quad \text{但し, } \sigma_B : P_B \text{ の変動係数}$$

$$\sigma_1^* : m_1 \text{ の変動係数}$$

$$\sigma_3^* : m_3 \text{ の変動係数}$$

$$P_u = \frac{n_1 - \delta_1 - \delta_2}{n_3} \quad \text{但し, } n_1 : 766keV \text{ のピーク計数率}$$

$$n_3 : 1001keV \text{ のピーク計数率}$$

$$\delta_1 : \text{Bi-214 からの寄与}$$

$$\delta_2 : \text{Pb-211 からの寄与}$$

$$\sigma_u^2 = \frac{P_0^2}{(P_0 - P_D)^2} (\sigma_1^2 + \sigma_3^2) + \frac{P_D^2}{(P_0 - P_D)^2} \left\{ \omega^2 \cdot (\sigma_1^*)^2 + (1 - \omega)^2 \cdot (\sigma_3^*)^2 + \sigma_3^2 \right\}$$

$$\dots \dots \dots (4-31)$$

但し,  $\delta_2 = 0$  の場合の式である。

$\sigma_u$  はピーク比  $P_u$  の変動係数

$$P_0 = \frac{n_1}{n_3}, \quad P_D = \frac{\delta_1}{n_3}$$

$$\omega = \frac{\ln(768.4/609.3)}{\ln(1120/609.3)} = 0.38109$$

$\sigma_1, \sigma_3$  は  $n_1, n_3$  の変動係数

$\sigma_1^*, \sigma_3^*$  は  $m_1, m_3$  の変動係数

・ピーク比の設定

$\sigma_B < \sigma_u$  の時……  $P_B$  を用いて実効減衰距離補正

$\sigma_u < \sigma_B$  の時……  $P_u$  を用いて実効減衰距離補正



## 4.9 検出下限値の評価

## (1) 考え方

- ① 1001keV のピーク計数率が全く計測されない場合を検出下限とし、ウラン量の検出下限値を 1001keV のピーク計数率がメッシュ毎データのうち 1 つでも有意な値が得られるか否かで評価する。
- ② 線源位置をメッシュの代表点に設定し、嵩密度で廃棄物中の減衰を評価する。

## (2) 評価式

嵩密度  $\rho_a$ , 検出下限計数率  $N_a^*$  (等価な距離を与えるメッシュ位置の中での最大値) を用いて次の式で検出下限ウラン量を評価する。

$$N_a(2) = A \cdot k_1(2) \cdot k_2(2) \frac{1}{4\pi(x + \Delta)^2} e^{-(\mu_2 \cdot \rho_a \cdot t_a + \mu_{2(Fe)} \cdot \rho_{Fe} \cdot \Delta)} \dots \dots \dots (4-32)$$

なお位置は、コンテナの中央部と表層部とする。

## 5. シミュレーション計算

本章では、コンテナサイズ用測定装置の機器構成が妥当であるかを確認するために、幾つかの廃棄物モデルについて測定される計数値の評価を QAD コードにより行い、求めた計数値を基にウランの放射能評価及び測定精度の確認をした測定精度確認計算及び装置構成後の実装体系による精度確認計算をまとめたものである。

### 5.1 測定精度確認

#### (1) 概要

本シミュレーション計算は、装置構成・評価法検討後に実施した性能確認のための計算であり、4.解析評価コード構成とは異なる場合もある。なお、4.解析評価コードは、本シミュレーション及び測定試験から改良を加えたものである。

放射能評価においては、距離の影響を補正するために、測定したデータとその対面からの測定データに基づく対向対評価法を採用し、廃棄物中での放射線の吸収補正としてピーク比法及びバンド/ピーク比法を用いた。また、天然ウランの子孫核種が多い廃棄物へ適用する評価法についても検討した。

#### (2) 計算モデル

##### ① システム構成

- ・ 検出器：高純度 Ge 検出器(相対効率 10～20%) 1 台  
NaI 検出器(4in φ) 3 台
- ・ 配置：検出器を固定し、廃棄物を移動(回転,直進)  
NaI 検出器(3 台縦列配置)と Ge 検出器は廃棄物を挟んで対向配置  
NaI 検出器及び Ge 検出器のコリメータはコンテナとドラム缶で入換

##### ② 計測方法

- ・ 測定：NaI 検出器は側面を 3(縦方向)×4(横方向)に分割して 4 面計測(1 区分縦 292mm、横 293mm)縦方向の 3 区分は 3 台の NaI 検出器で同時に計測(NaI データ=3×4×4=48 組(15 分/3 点とすると約 4 時間))  
：Ge 検出器は側面を縦 1 分割、横 4 分割して 4 面計測  
Ge データ=1×4×4=16 組
- ・ 定量：分割した各区分の以下の測定データを基に、吸収補正を行い、対向対評価により定量を行う。  
N<sub>(1)</sub>;1001keV のピーク計数率  
N<sub>(2)</sub>;766keV のピーク計数率  
N<sub>(3)</sub>;186keV のピーク計数率  
N<sub>(4)</sub>;バンド計数率

##### ③ 放射能評価方法

###### ・ 評価方法の適用

廃棄物の種類と評価法を図 5.1 の廃棄物の種類と評価法(案)に示す。なお、評価法には、表 5.1 に示す特徴がある。

天然ウランが主体の廃棄物については、図 5.1 に示すように、NaI データで放射能と分布の評価を行い、NaI データによる分布データを基に Ge データで確認評価を行うよう計画した。

表 5.1 評価方法の特徴

	計数値が少ない	計数値が多い	備考
核種が少ない (ウラン主体)	NaI - B/P (Ge - B/P, NaI - P/P)	Ge - P/P (NaI - P/P,B/P, Ge - B/P)	NaIの方がGeより感度が良い
核種が多い (子孫核種が多い)	Ge - P/P	Ge - P/P	分解能の観点よりNaIの適用困難

注) P/P : ピーク比法, B/P : バンド/ピーク比法

#### ④計算モデル

測定精度を確認するため、図 5.2～5.4 に示すモデルについてシミュレーション計算を行った。

モデルは、以下に示す 16 ケースである。

##### a. 廃棄物に含まれるウラン量が異なるにもかかわらず、計数率が同じ場合

図 5.2 に示すコンテナに入った 6 種類の天然ウランを含む廃棄物について、いずれについても基準を満たすことを確認する。

なお、図 5.2 に示す廃棄物に含まれるウラン量と容器及び遮蔽体の厚さは、図 5.2 に示されている数値以外は、コンテナの側面の中心における天然ウランの 1001keV $\gamma$ 線に対するピーク計数率が 6 種類とも等しくなるような値とする。但し、ケース 5 は A 点(天然ウラン 2 に近い方の面の中心)、ケース 6 は B 点(遮蔽体を挟んでウラン線源がある側とは逆の面の中心)におけるピーク計数率とした。

ケース 1 : 均一な 1g/cm<sup>3</sup> の鉄の中心に 100g の天然ウランが存在する場合

ケース 2 : 遮蔽体のない天然ウランが存在する場合

ケース 3 : 鉄容器中の 10kg の天然ウラン

ケース 4 : 均一な 1g/cm<sup>3</sup> の鉄に均一に分布した天然ウラン

ケース 5 : 鉄容器中の 10kg の天然ウラン 1 と遮蔽のない天然ウラン 2(A 点の計数率に及ぼす寄与が天然ウラン 1 等しくなる量)

ケース 6 : 鉄容器中の 10kg の天然ウランと 1cm 厚さの鉄遮蔽体

##### b. 廃棄物に含まれるウラン量が等しいにもかかわらず、計数率が異なる場合

図 5.3、図 5.4 に示すコンテナに入った天然ウランを含む(ウラン量は等しいが位置が異なる)廃棄物について、いずれに対しても基準を満たすことを確認する。

なお、ウラン量はいずれも 100g/コンテナとした。廃棄物は、図 5.3 については、均一な 1g/cm<sup>3</sup> の鉄とし、図 5.4 については、空気とした。

・マトリックスが鉄の場合及び空気の場合、それぞれについて以下のケースとした。

- ケース 1：コンテナ中心にある状態
- ケース 2：コンテナ側面中央に密着した状態
- ケース 3：コンテナの直方体頂点に密着した状態
- ケース 4：コンテナ中心と側面中央の midpoint にある状態
- ケース 5：コンテナ中心との直方体頂点の midpoint にある状態

### (3) 計算結果

図 5.2～図 5.4 に示す体系に対するウラン量の評価結果を表 5.2～表 5.4 に示す。

表 5.2 のケース 5 のように遮蔽されたウランと裸のウランの混在が予想される場合は、バンド/ピーク比を用いることとする。(対向対評価での対の方向が  $x$  軸と  $y$  軸で大きく異なる場合等)

表 5.2～表 5.4 に示す評価結果から、コンテナサイズ用非破壊測定装置の目標精度(-50%～+100%)を満足することを確認した。

なお、ケース 3 における計数値の低下は、コリメータの影響によるものと考えられる。

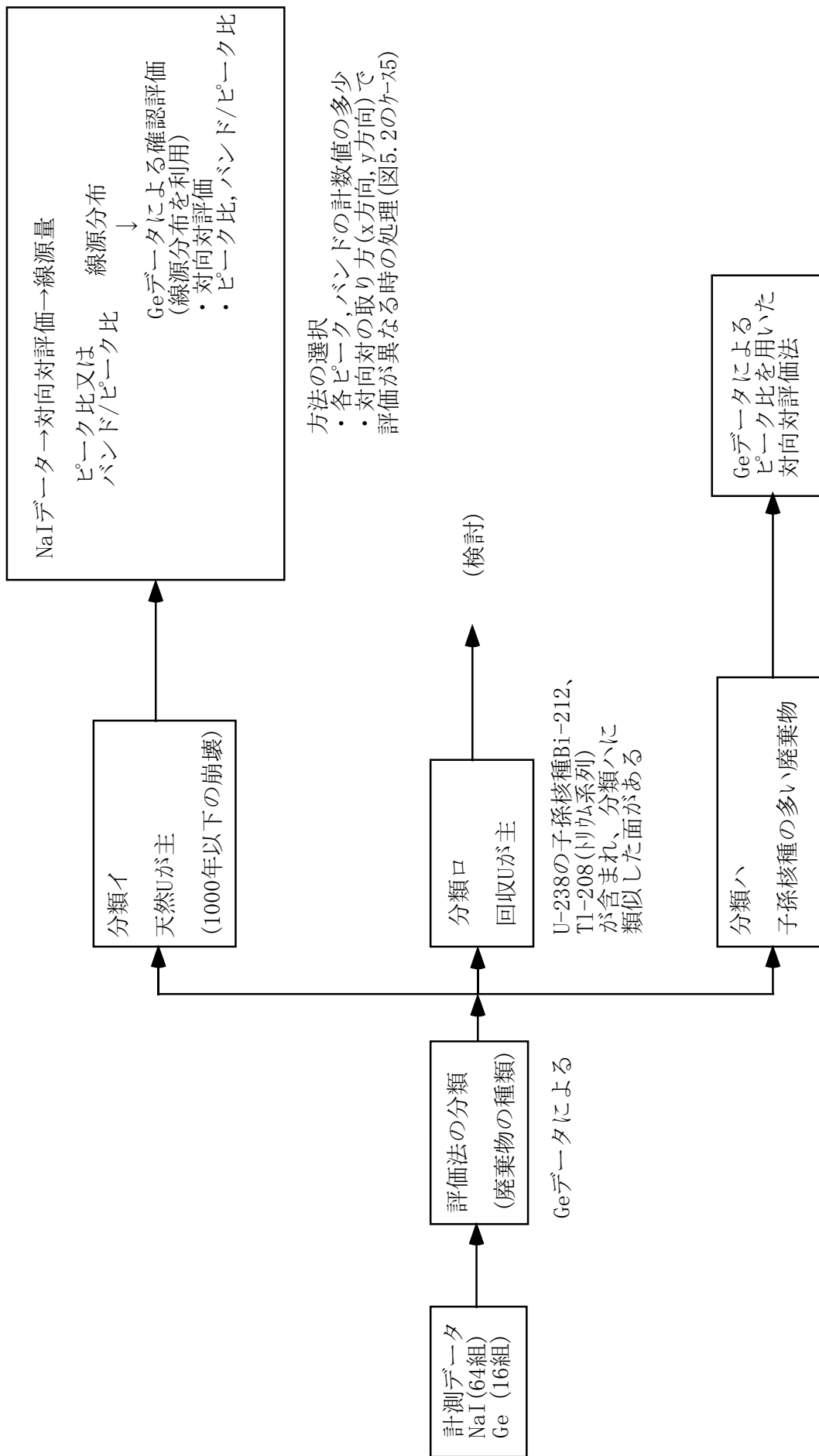
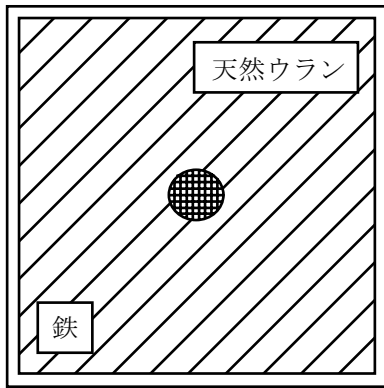
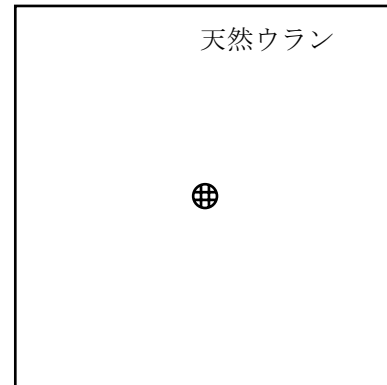


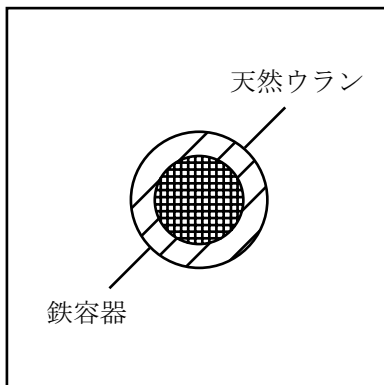
図5.1 廃棄物の種類と評価法(案)



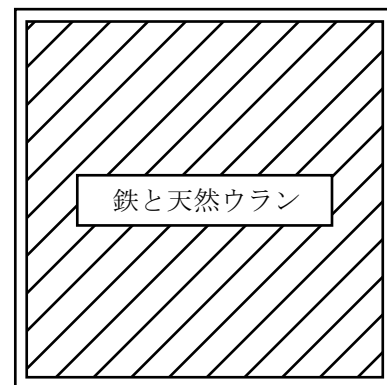
CASE1  
均一な $1\text{g}/\text{cm}^3$ の鉄の中心に  
100gの天然ウラン



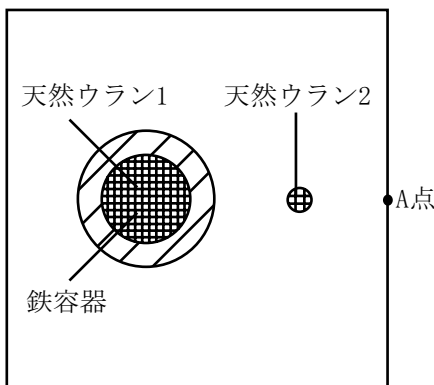
CASE2  
遮蔽体のない天然ウラン



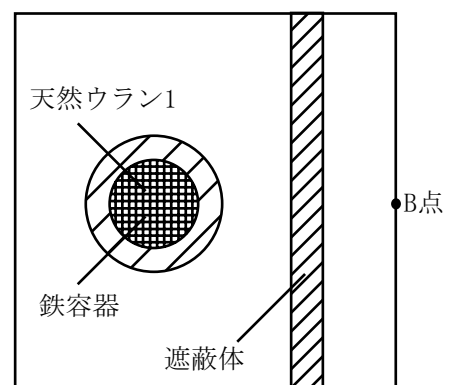
CASE3  
鉄容器中の10kgの天然ウラン



CASE4  
均一な $1\text{g}/\text{cm}^3$ の鉄に均一に  
分布した天然ウラン

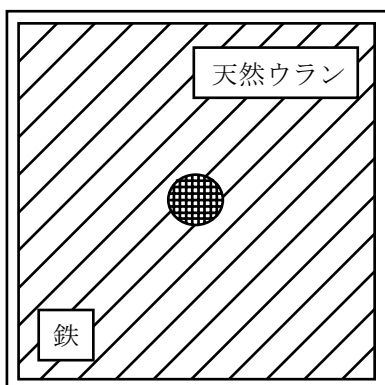


CASE5  
鉄容器中の10kgの天然ウラン1  
と遮蔽のない天然ウラン2 (A点  
の計数率に及ぼす寄与が天然ウ  
ラン1等しくなる量)

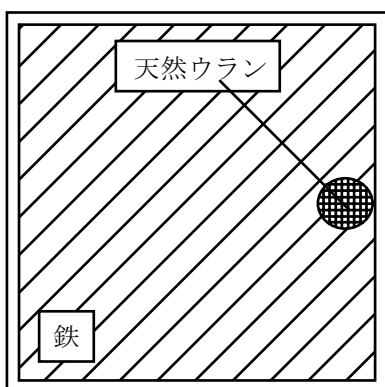


CASE6  
鉄容器中の10kgの天然ウラン  
と1cm厚さの鉄遮蔽体

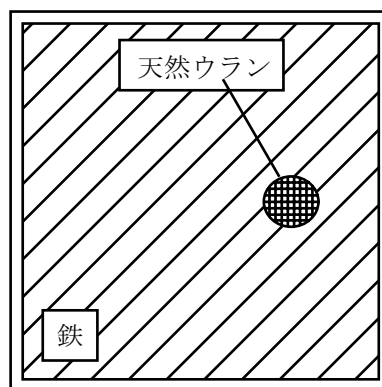
図5.2 測定精度確認モデル(線源位置変化)



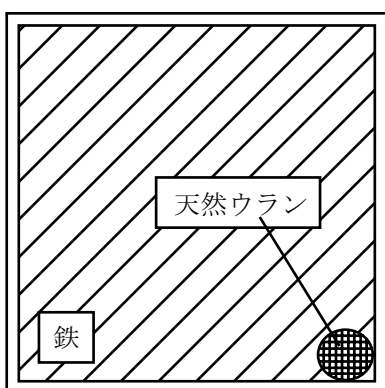
CASE1  
コンテナ中心にある状態



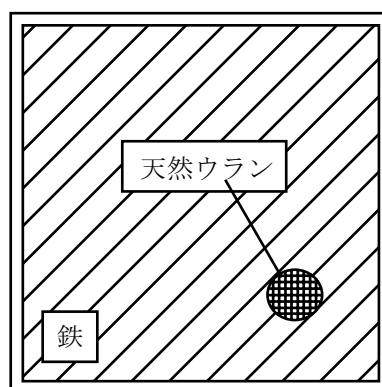
CASE2  
コンテナ側面中央に密着した状態



CASE4  
コンテナ中心と側面中央の  
中点にある状態

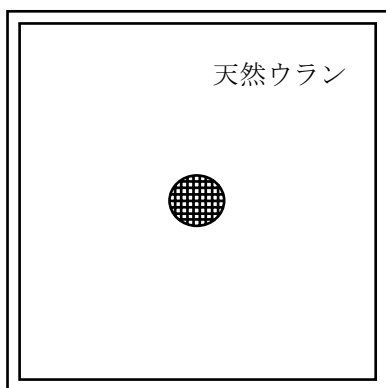


CASE3  
コンテナの直方体頂点に密着した状態

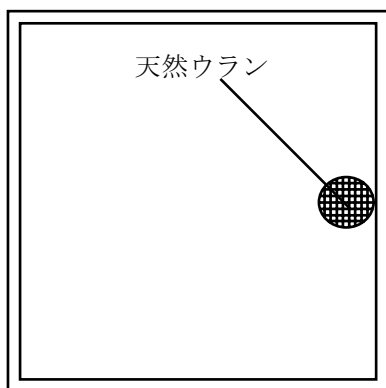


CASE5  
コンテナ中心との直方体頂点  
の中心にある状態

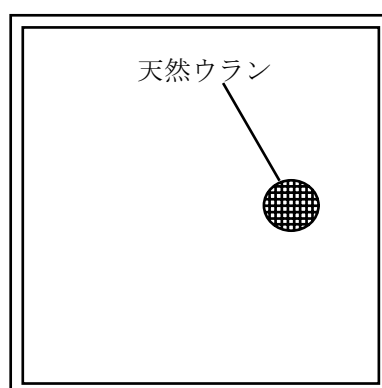
図5.3 測定精度確認モデル(鉄1g/cm<sup>3</sup>中, 線源位置変化)



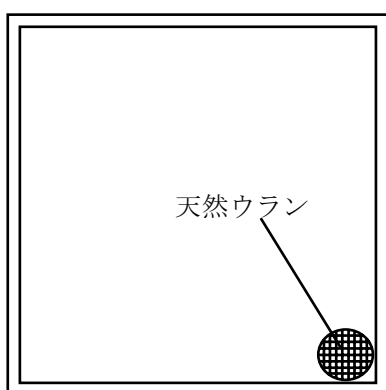
CASE1  
コンテナ中心にある状態



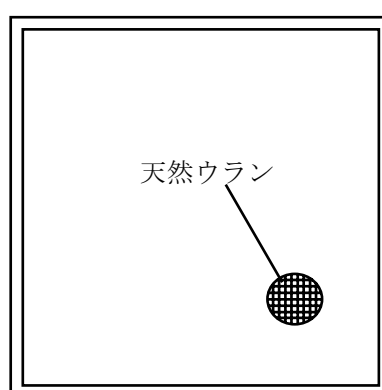
CASE2  
コンテナ側面中央に密着した状態



CASE4  
コンテナ中心と側面中央の  
中点にある状態



CASE3  
コンテナの直方体頂点に密着した状態



CASE5  
コンテナ中心との直方体頂点  
の中点にある状態

図5.4 測定精度確認モデル(空气中, 線源位置変化)



表 5.2 ウラン量評価値(線源の正面に検出器がある場合)

ケース	設定 U 量	ピーク比による評価値	バンド/ピーク比による評価値
1	100g	102g	99g
2	1.9g	1.7g	2.4g
3	10kg	9.6kg	8.4g
4	36.4g	23g	32g
5	10kg+0.47g	<u>2.9kg</u>	5.9kg
6	10kg	9.6kg	8.4kg

表 5.3 マトリックスが鉄(1g/cm<sup>3</sup>)におけるウラン量評価値

ケース	設定 U 量 (g)	ピーク比による評価値(g)	バンド/ピーク比による評価値(g)	備 考
1	100	104	83	
2	100	77	56	
3	100	54	<u>42</u>	コリメタの影響での計数率低下
4	100	100	78	
5	100	92	70	線源中心は端より4cm

表 5.4 マトリックスが空気におけるウラン量評価

ケース	設定 U 量 (g)	ピーク比による評価値(g)	備 考
1	100	103	
2	100	77	
3	100	54	コリメタの影響での計数率低下
4	100	98	
5	100	92	線源中心は端より4cm

## 5.2 実装体系による計算

### (1) 概要

装置の製作及び評価解析コードの作成後における測定精度の確認をするため、5.1 測定精度確認において実施したモデルによる再確認を行った。ウラン量の評価は、4.解析評価コードで記述したものをを用いた。

### (2) 計算モデル

システム構成における検出器,配置,測定及び計算モデルは、5.1 項と同様である。なお、実際に運用する検出器の感度を表 5.5 に示す。

### (3) 計算結果

#### ① 空気中に対するウラン量評価

計算結果を表 5.6 に示す。評価値/設定値は、0.67～1.01 の値となった。

#### ② 鉄(1g/cm<sup>3</sup>)に対するウラン量評価

計算結果を表 5.7 に示す。評価値/設定値は、0.71～1.25 の値となった。

#### ③ 線源強度変化に対するウラン量評価

計算結果を表 5.8 に示す。均一・均質体系については、添付資料 5 に示すルチンで処理した。10kg の天然ウランが容器に入ったケースについてはグロス/ピーク法(G/P 法)で評価した。評価値/設定値は、0.7～1.1 となった。

#### ④ 実装体系によるシミュレーションの結果、評価値/設定値は 0.67～1.25 の範囲であり、当初目標の - 50%～+100%以内の精度であることを確認した。

表 5.5 検出器効率

核種	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	発生率	検出器効率		鉄の線吸収 係数(1/cm)
			NaI	Ge	
U-238	766	25.9 $\gamma$ /sec $\cdot$ gU	66.76	3.906	0.5291
	1001	72.9 $\gamma$ /sec $\cdot$ gU	36.59	2.903	0.4644
Co-60	1173	1.0 $\gamma$ /sec $\cdot$ Bq	22.23	2.086	0.4291
	1333	1.0 $\gamma$ /sec $\cdot$ Bq	21.13	1.859	0.4023

注 1)100gU(25.9+72.9) $\times$ 100=10<sup>4</sup>  $\gamma$ /sec 5 $\times$ 10<sup>3</sup>Bq の Co-60 とほぼ同等

注 2)U の自己吸収補正済

表 5.6 空気中に対するウラン量評価

ケース	設定ウラン量 (g)	評価値/設定値	備考
1	100	1.01	
2	100	0.81	
3	100	0.67	コリメータの影響での計数低下による
4	100	0.92	
5	100	0.91	線源中心は端より 4cm

注)計数誤差は含めていない。

表 5.7 鉄(1g/cm<sup>3</sup>)に対するウラン量評価

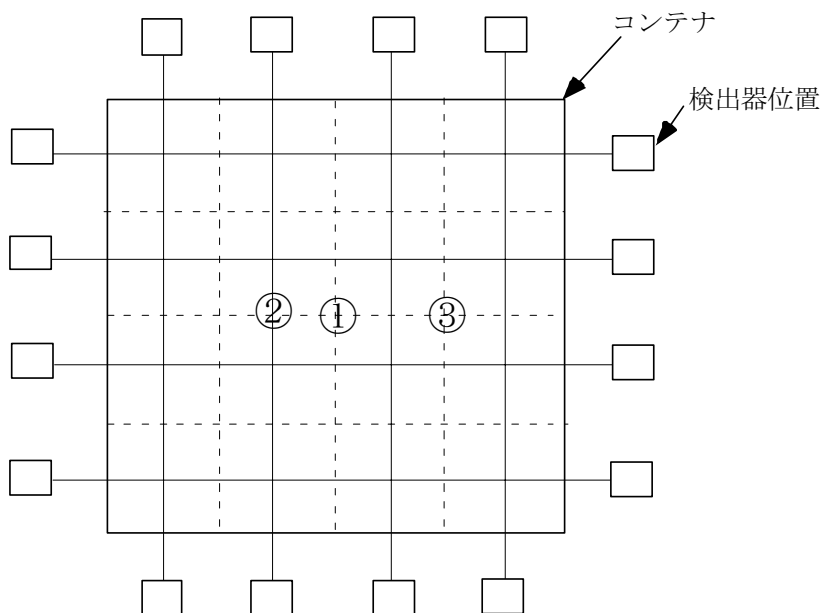
ケース	設定ウラン量 (g)	評価値/設定値	備考
1	100	1.25	G/P 比で評価
2	100	0.71	
3	100	1.21	コリメータの影響での計数低下による
4	100	1.01	
5	100	0.99	線源中心は端より 4cm

表 5.8 線源強度変化に対するウラン量評価

ケース	設定ウラン量	評価値/設定値	ウランの中心位置	備考
1	100g	1.01	1	G/P 比で評価
2	1.9g	1.05	1	
3	10kg	0.70	1	G/P 比で評価
4	36.4g	0.99	2	追加した均一線源取扱いルーチンによる
5	10kg+0.47g	0.87	2,3	G/P 比で評価。0.47gU からのグロス計数値への影響は小さい。
6	10kg	0.78	2	G/P 比で評価

注1) 計数誤差を含まない。

注2) 線源位置と検出器位置は以下の配置通り



注 3) 10kg の天然ウラン

密度  $3.07\text{g/cm}^3$  の  $\text{UO}_2$  を想定。天然ウラン領域直径  $19.2\text{cm}$  の球。鉄  $13.3\text{cm}$  の厚さとする と直径  $45.8\text{cm}$  の球となる。

## 6.測定試験

本章は、測定装置及び解析評価コードの確認調整並びに本装置の特性把握のために、実施した測定試験について記述したものである。

### 6.1 使用線源及び模擬試験体

#### (1) 使用線源

##### ①ウラン線源

天然ウラン UO<sub>2</sub> 粉末：10g(10 個), 50g, 100g(10 個), 500g, 1kg, 10kg  
ウラン線源の外観を写真 6.1 に、線源データを表 6.1 に示す。

##### ②RI 線源

Co-60 の密封線源：約 2MBq 1 個

#### (2) 模擬試験体

試験体として、鉄板、塩化ビニール、水、砂、配管材を用い、コンテナ等に詰め、模擬試験体とした。

試験体の一部を写真 6.2～写真 6.5 に示す。

なお、模擬試験体は、以下のマトリックスである。

鉄板材 500×500×5t 10 枚, 500×500×10t 10 枚

塩ビ板 500×500×10t 20 枚, 水タンク 6 個

砂タンク 18 個, 配管材(150A×800 5 本,25A×800 26 本)

### 6.2 感度分布測定

#### (1) 方法

空コンテナ及び空ドラム缶における感度分布を測定し、線源偏在による影響を把握するため、線源を各位置に配置して測定評価を行った。

コンテナにおける線源配置図を図 6.1 及び図 6.2 に示し、ドラム缶における線源配置を図 6.3 及び図 6.4 に示す。

#### (2) 結果

感度分布測定データ(コンテナ)を表 6.2 に、評価値/設定値の感度分布を図 6.5 に示す。ここで、評価値は、U-238 量を測定評価した値であり、設定値は、試験に用いたウラン線源の分析値である。

また、ドラム缶における感度分布測定データを表 6.3 に、評価値/設定値の感度分布を図 6.6 に示す。

- ①空コンテナ(空気中)における感度分布を評価値/設定値でみると、平均としては、0.90 であり、最小が 0.45、最大が 2.08 であった。
- ②傾向としては、中心付近及びコンテナのコーナー部において、誤差が大きくなっている。
- ③コンテナの中心を 1.0 とした場合、0.45～2.06 の分布幅であり、約±80%以内であった。ここで、最小及び最大値は、ピーク計数率が小さく、計数誤差が大きくなったケースであった。このため、有意量における感度分布は、約±50%である。
- ④空ドラム缶(空気中)における評価値/設定値の分布は、0.52～1.97 であり、平均では、0.92 であった。

- ⑤傾向としては、検出器の高さ付近の外側部で設定値(線源量)より高く、中心部及び上下部で低い値となった。
- ⑥ドラム缶の中心を 1.0 とした場合、0.52～1.97 の分布幅であり、約±73%であった。
- ⑦これらより、コンテナの感度分布は、ドラム缶の分布幅と同等であり、これは、対象物の大きさは異なるが、検出器による側面分割数によるものと考えられる。
- ⑧また、ドラム缶については、ターンテーブルに乗せて回転する場合<sup>1)</sup>の約±55%に比べ、今回の1/4回転ごとの測定では、分布幅が大きくなっている。これは、回転させていないこと及びコリメータによるものと考えられる。

### 6.3 模擬試験体測定

#### (1) 方法

線源量,線源位置,線源数(分散)及び試験体をパラメータとして、測定評価を行い、解析手法及び精度の確認を行った。表 6.4 にコンテナにおける測定試験条件を、表 6.5 にドラム缶での測定試験条件を示す。

鉄,塩化ビニール試験体については、その厚さを可変してコンテナ内に配置し、模擬試験体については、鉄,塩化ビニール,砂,水を組み合わせて製作したものである。また、均一な試験体として、コンテナ内に水を張ったものを用いた。

模擬試験体への線源配置について、点線源時を図 6.7 に、複数線源のときについて図 6.8 に示す。

#### (2) 結果

コンテナにおける測定試験結果を表 6.6 に、ドラム缶における測定試験結果を表 6.7 に示す。また、それぞれの評価値/設定値の分布を図 6.9 及び図 6.10 に示す。

- ① コンテナの測定試験より、評価値/設定値の分布は、0.01～1.85 の範囲であるが、平均値は、 $0.97 \pm 0.38$  であった。なお、0.01 と 1.85 の値を示したのは、水を入れたコンテナ中心に線源を配置した場合であり、計数が少なく統計誤差が大きくなっていること及び減衰補正が大きくなったためと考えられる。
- ② 図 6.9 の評価値/設定値の分布(コンテナ)から本測定評価法により、有意量であれば、約±50%にて評価できることを確認した。
- ③ ドラム缶については、評価値/設定値の分布は、0.11～2.41 の範囲であり、平均値は、 $0.88 \pm 0.61$  であった。ドラム缶においても、有意量であれば、約±50%にて評価できる。
- ④ 図 6.11 よりコンテナ及びドラム缶の評価において、装置製作の目標であった - 50%～+100%の精度で評価できることを確認した。



写真6.1 ウラン線源の外観

表6.1 ウラン線源データ

No.	核物質管理 No.	Gross (g)	UO <sub>2</sub> 量(g)	Ratio (U/UO <sub>2</sub> )	U量 (g)	U-238量 (g)
1	18N-1	11727.0	11351.0	0.8368	9498.5	9429.6
2	15N-24	1195.3	1137.9	0.8815	1003.0	995.7
3	15N-23	597.7	567.2		500.0	496.4
4	15N-22	63.2	55.5		48.9	48.5
5	15N-2	121.6	113.9		100.4	99.7
6	15N-3	121.9	114.2		100.7	100.0
7	15N-4	121.8	114.1		100.6	99.9
8	15N-5	121.3	113.6		100.1	99.4
9	15N-6	121.3	113.6		100.1	99.4
10	15N-7	122.0	114.3		100.8	100.1
11	15N-8	121.7	114.0		100.5	99.8
12	15N-9	122.2	114.5		100.9	100.2
13	15N-10	121.7	114.0		100.5	99.8
14	15N-11	121.5	113.8		100.3	99.6
15	15N-12	13.5	10.8		9.5	9.4
16	15N-13	13.6	10.9		9.6	9.5
17	15N-14	14.0	11.3		10.0	9.9
18	15N-15	14.8	12.1		10.7	10.6
19	15N-16	14.3	11.6		10.2	10.1
20	15N-17	14.0	11.3		10.0	9.9
21	15N-18	13.0	10.3		9.1	9.0
22	15N-19	13.6	10.9		9.6	9.5
23	15N-20	13.3	10.6		9.3	9.2
24	15N-21	13.2	10.5		9.3	9.2



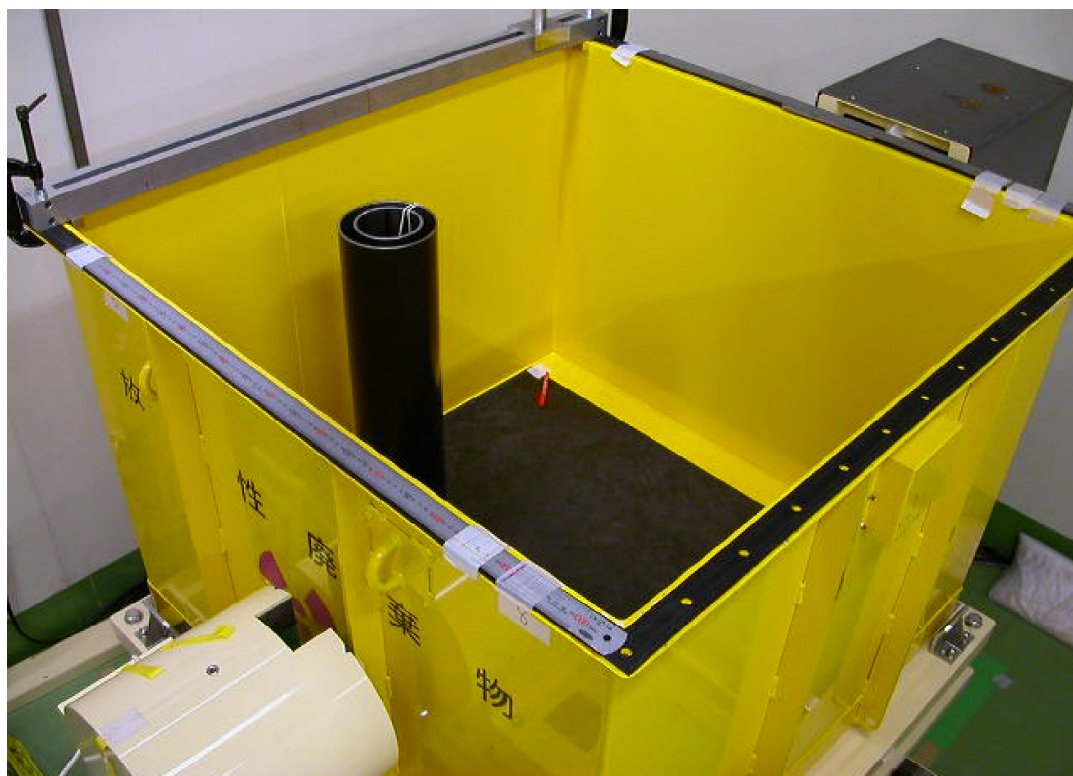


写真6.2 鉄配管試験体

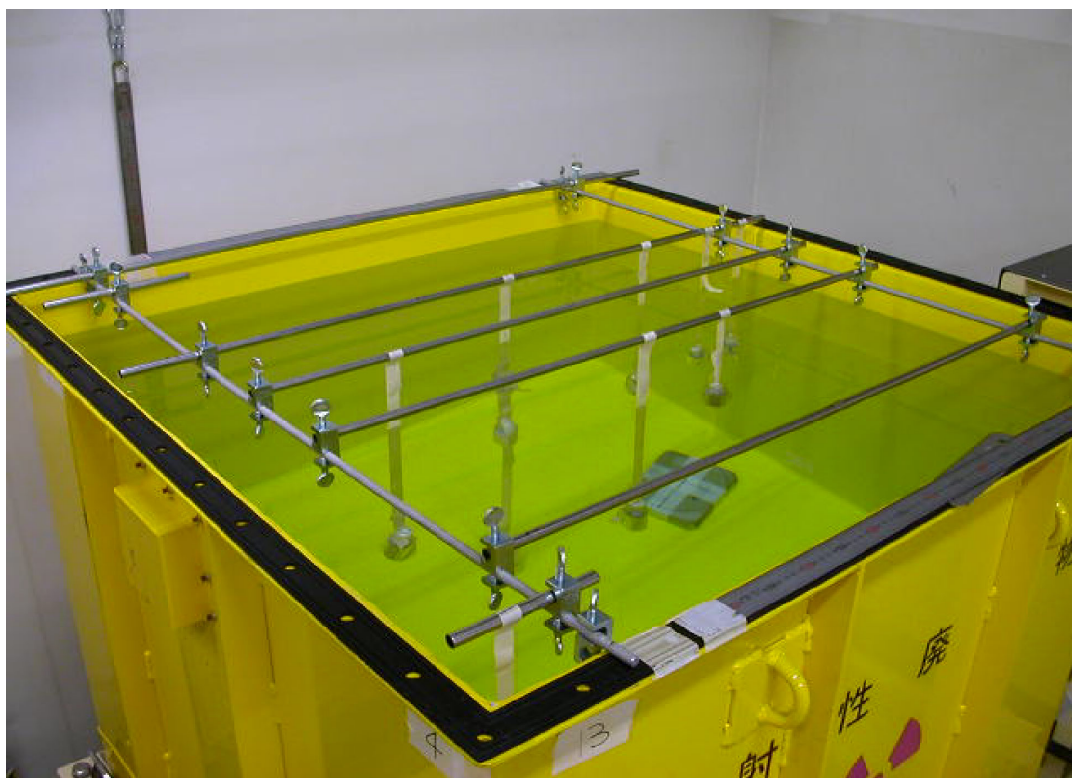


写真6.3 水試験体



写真6.4 模擬試験体(砂,水,鉄板,配管,塩ビ)

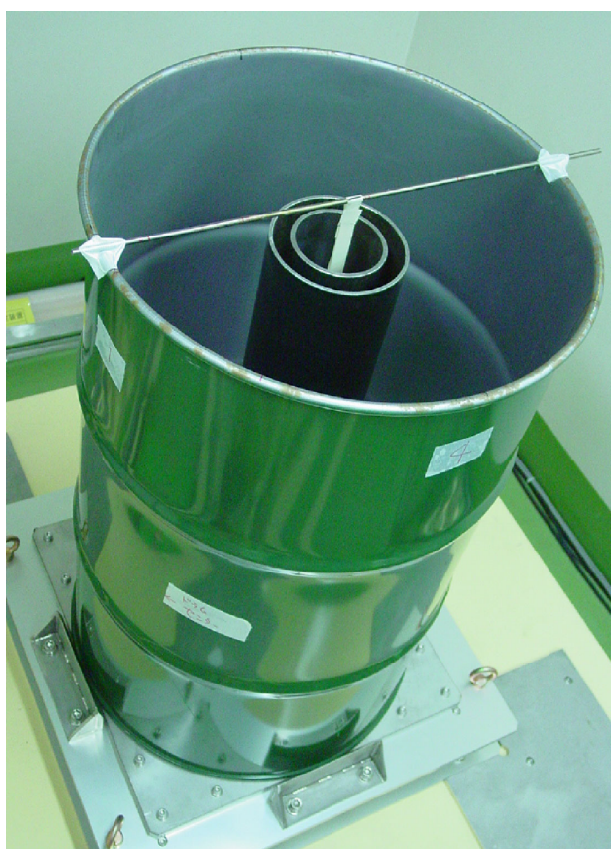


写真6.5 ドラム缶試験体(配管)

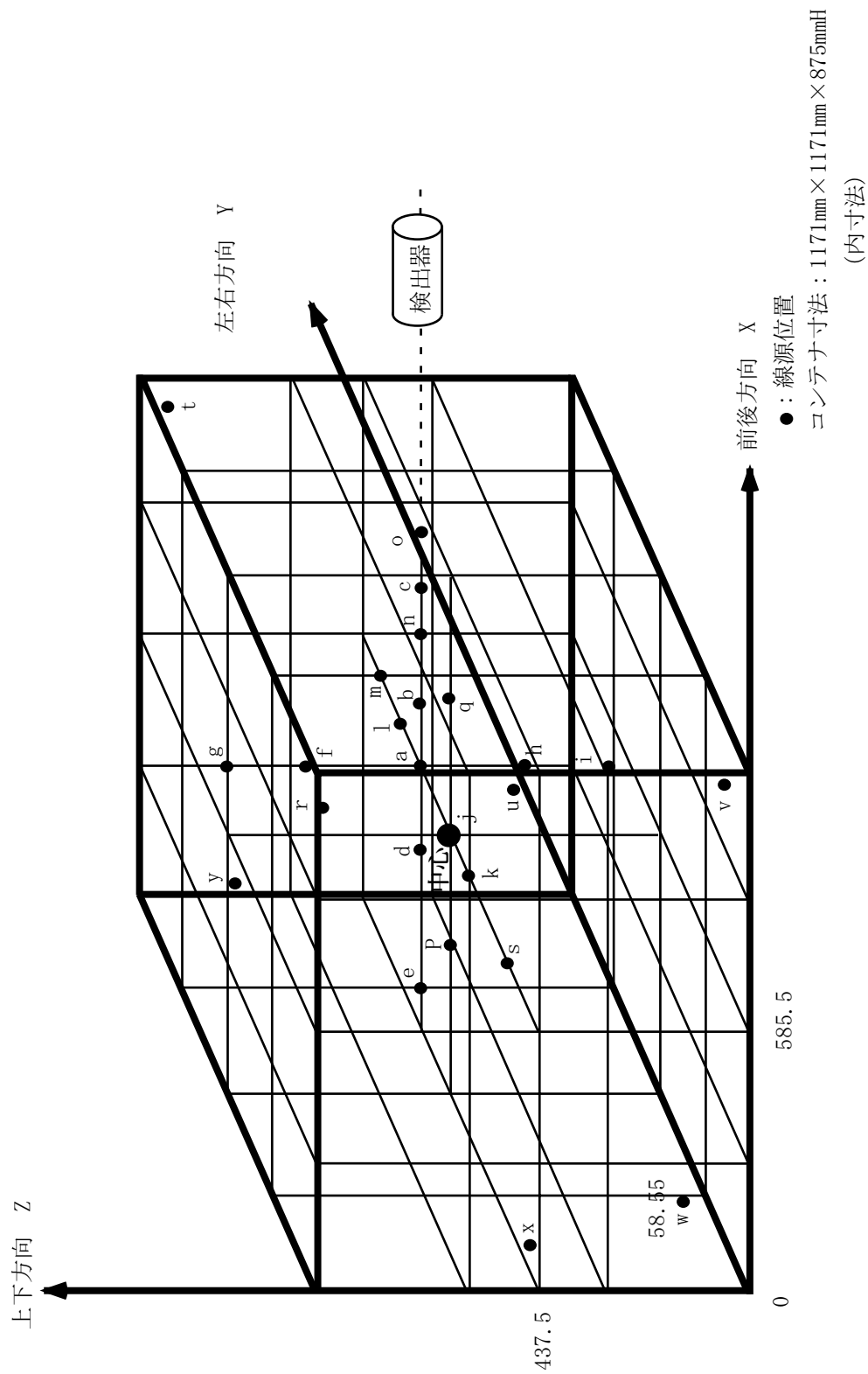


図6.1 コンテナにおける線源配置

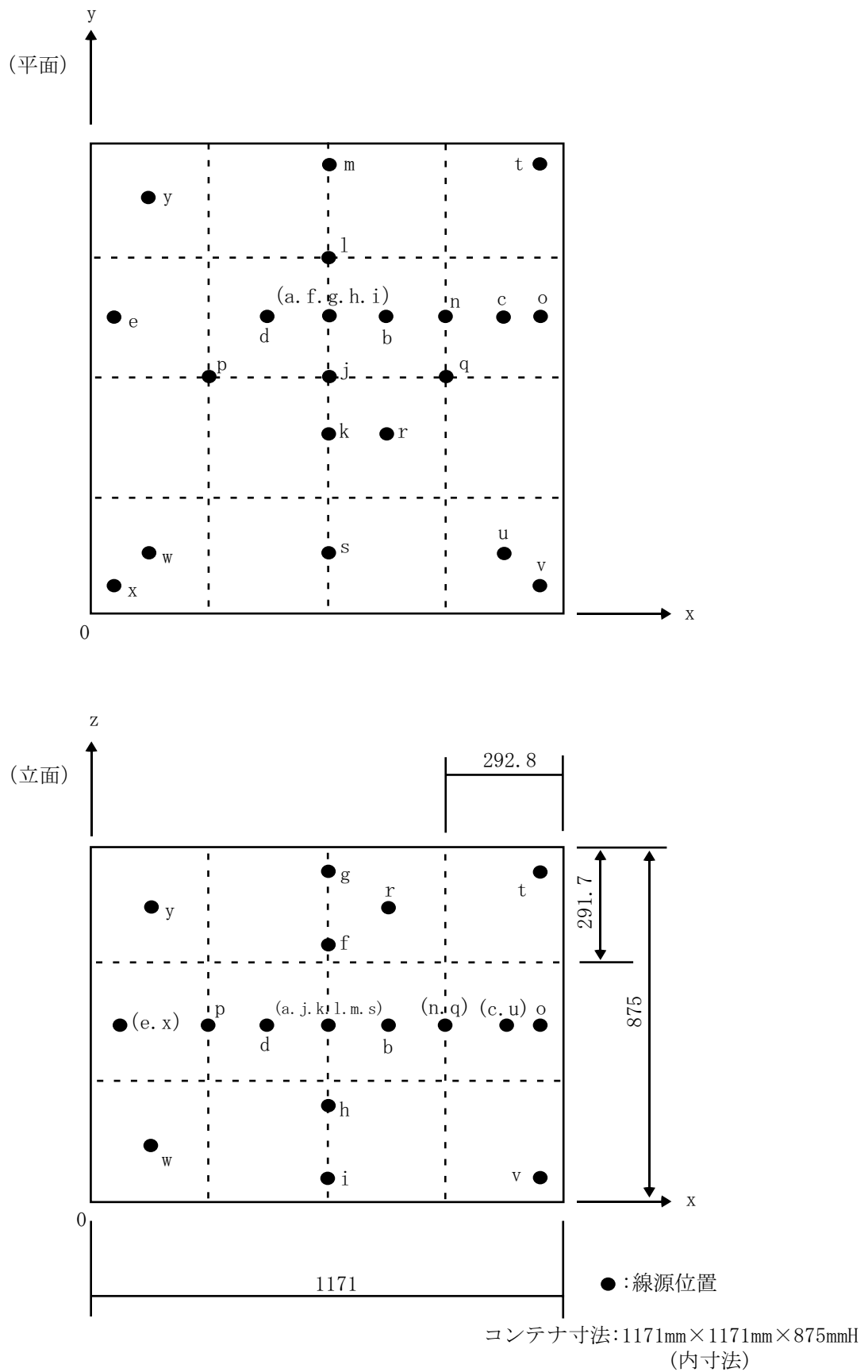


図6.2 コンテナにおける線源配置 (断面)

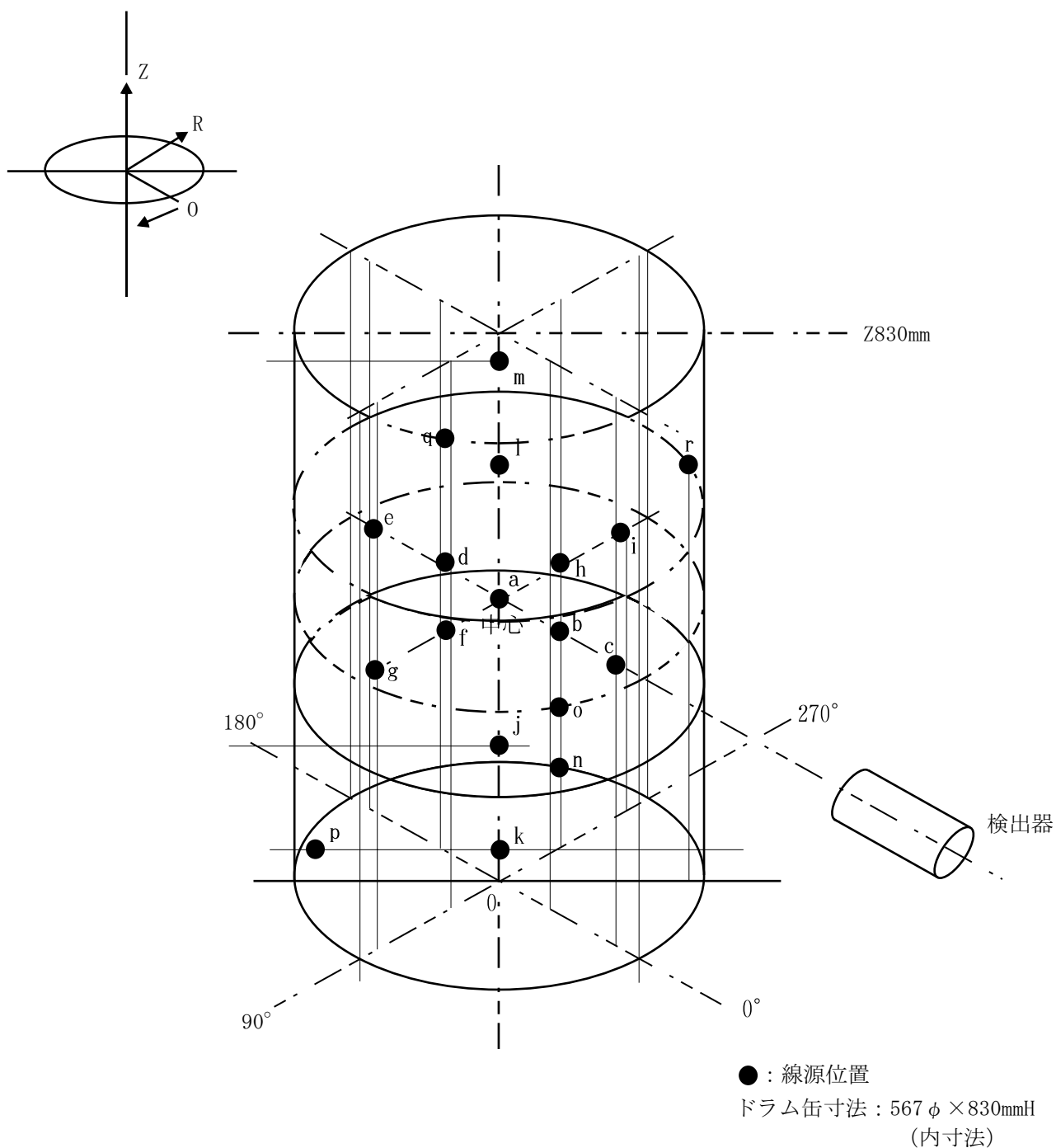


図6.3 ドラム缶内の線源配置

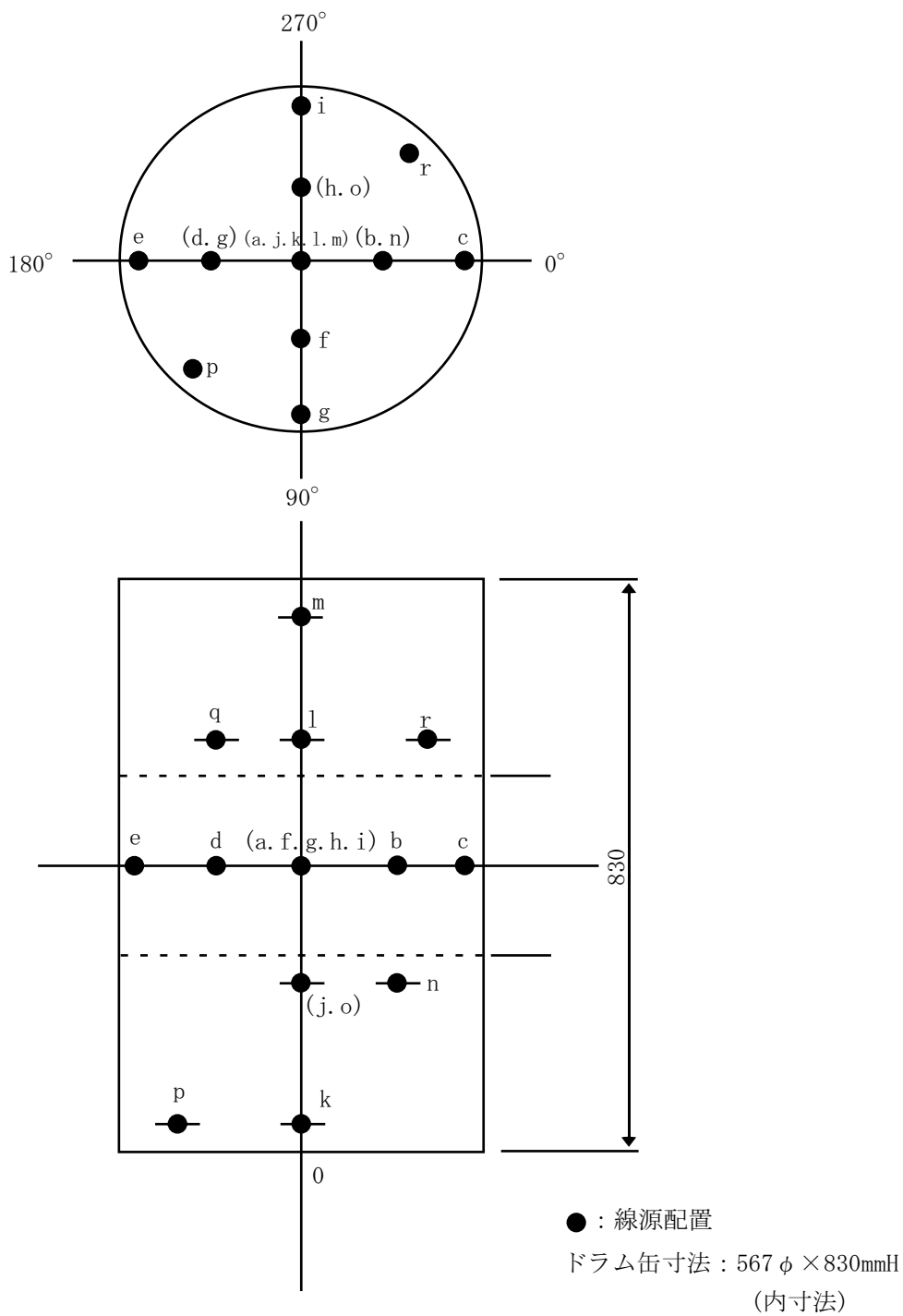


図6.4 ドラム缶内の線源配置(断面)

表6.2 感度分布測定データ(コンテナ)

No.	U-238量 (g)	線源位置	評価値/設定値	中心を1.0と した相対値	評価 線源数
1	100	a	1.36	1.35	2
2	100	b	0.80	0.79	1
3	100	c	0.87	0.86	1
4	100	d	2.08	2.06	1
5	100	e	0.71	0.70	1
6	100	f	0.55	0.54	1
7	100	g	0.65	0.64	1
8	100	h	1.23	1.22	3
9	100	i	0.91	0.90	2
10	100	j	1.01	1.00	2
11	100	k	0.83	0.82	2
12	100	l	1.29	1.28	2
13	100	m	1.08	1.07	1
14	100	n	0.53	0.52	3
15	100	o	1.57	1.55	1
16	100	p	0.98	0.97	2
17	100	q	0.85	0.84	2
18	100	r	0.53	0.52	1
19	100	s	1.00	0.99	1
20	100	t	0.45	0.45	1
21	100	u	0.55	0.54	1
22	100	v	0.72	0.71	1
23	100	w	0.67	0.66	1
24	100	x	0.59	0.58	1
25	100	y	0.75	0.74	1
平均			0.90	0.89	
標準偏差			0.38	0.37	

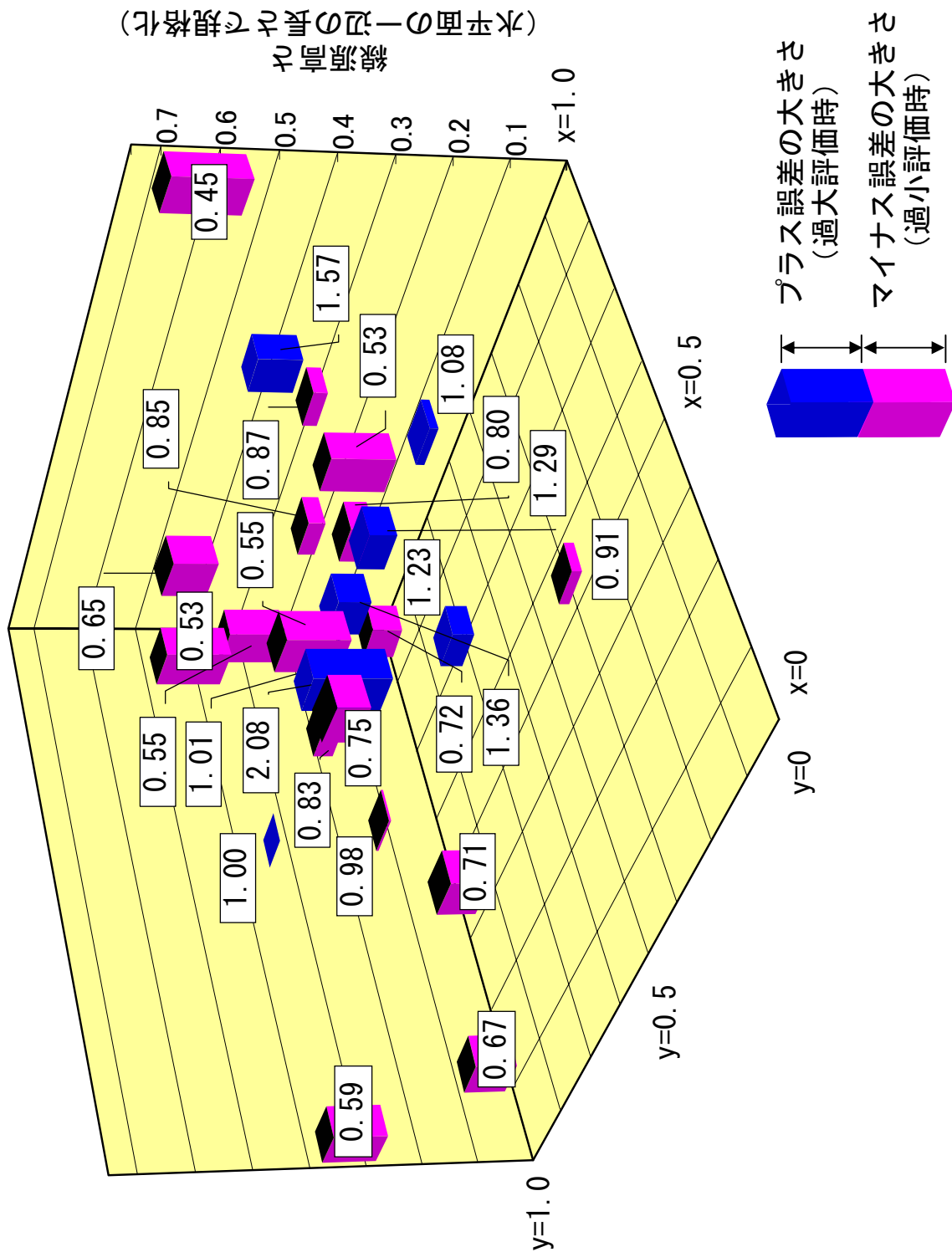


図 6.5 天然ウラン 100g の線源位置による誤差の分布

(図中の値は評価値/真値である)



表6.3 感度分布測定データ(ドラム缶)

No.	U-238量 (g)	線源位置	評価値／設定値	中心を1.0とした 相対値	評価 線源数
1	100	a	0.74	1.00	3
2	100	b	1.76	2.38	1
3	100	c	1.97	2.66	1
4	100	e	0.72	0.97	1
5	100	j	1.16	1.57	1
6	100	k	0.73	0.99	2
7	100	l	0.58	0.78	1
8	100	m	0.60	0.81	3
9	100	n	1.01	1.36	3
10	100	p	0.74	1.00	2
11	100	q	0.56	0.76	3
12	100	r	0.52	0.70	2
平均			0.92	1.25	
標準偏差			0.48	0.62	

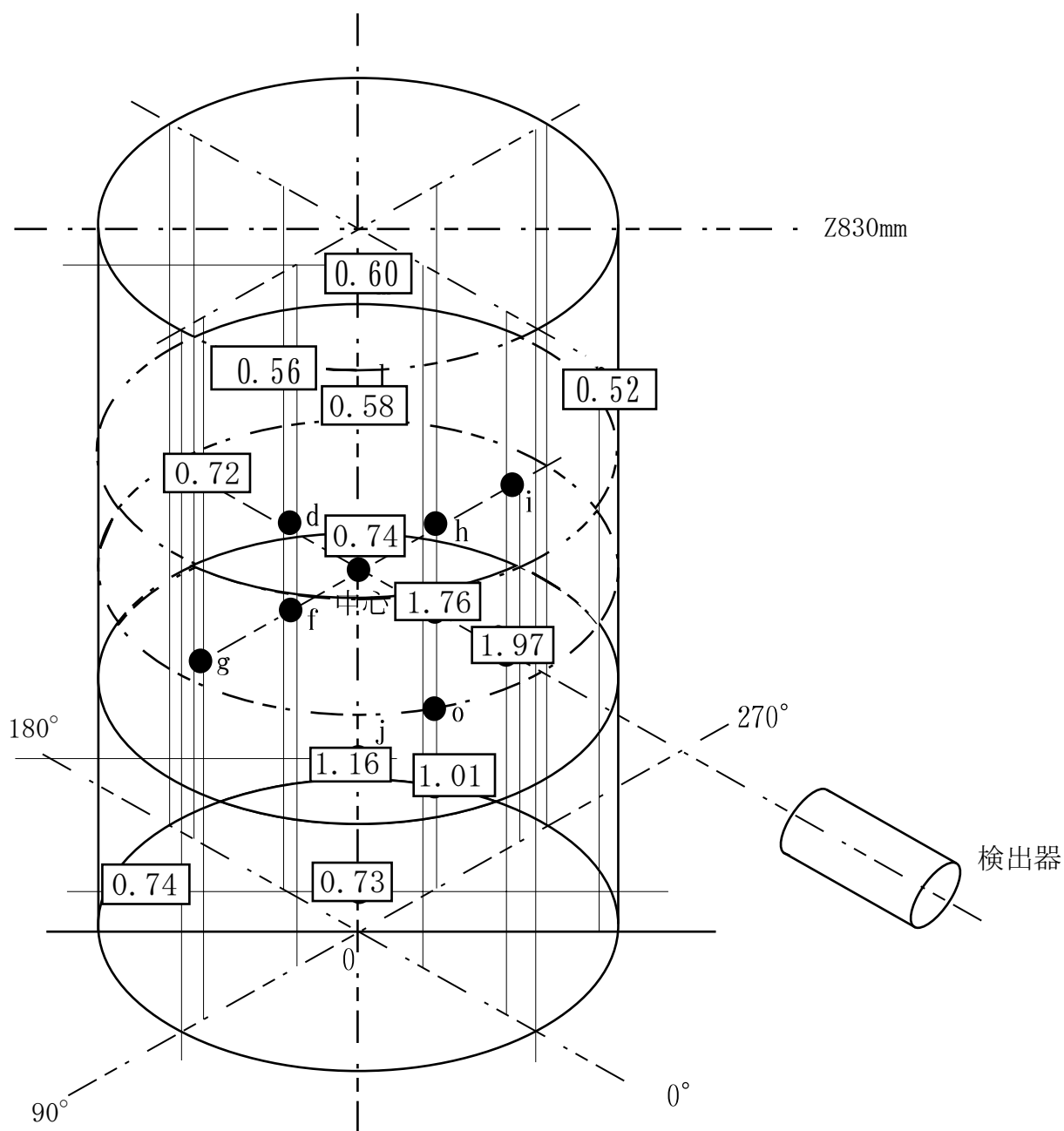


図6.6 評価値／設定値の感度分布(ドラム缶)

表6.4 測定試験条件表(コンテナ)

No.	試験項目	線源量	線源数	線源位置	マトリックス	測定時間
1	ウラン量変化	50gU	1	a	air	1ステップ15分 4時間
2		500gU	1	"	"	"
3		1kgU	1	"	"	"
4		10kgU	1	"	"	"
5	複数線源 中心的偏在	100gU	10	a,b,d,f,g,h, j,k,r,p	"	"
6	複数線源 外側偏在	100gU	10	i,m,o,s,t,u, v,w,x,y	"	"
7	複数線源 下部側偏在	100gU	10	a,c,e,h,i,j, p,s,v,w	"	"
8	マトリックスによる 減衰・遮蔽	500gU	1	a	鉄(10.7cm)	"
9		500gU	1	a	鉄(23.0cm)	"
10		500gU	1	a	鉄(48.5cm)	"
11		500gU	1	n	鉄(10.7cm)	"
12		500gU	1	n	鉄(23.0cm)	"
13		500gU	1	n	鉄(48.5cm)	"
14		500gU	1	a	塩ビ(11.3cm)	"
15		500gU	1	a	塩ビ(27.3cm)	"
16		500gU	1	a	塩ビ(44.8cm)	"
17		500gU	1	n	塩ビ(11.3cm)	"
18		500gU	1	n	塩ビ(27.3cm)	"
19		500gU	1	n	塩ビ(44.8cm)	"
20		500gU	1	a	鉄(23.0cm)	"
21		500gU	1	n	鉄(23.0cm)	"
22		500gU	1	a	塩ビ(27.3cm)	"
23	500gU	1	n	塩ビ(27.3cm)	"	
24	均質マトリックス 点線源	100gU	1	a	水	"
25		100gU	1	b	"	"
26		1kgU	1	a	"	"
27		10kgU	1	a	"	"
28	均質マトリックス 複数線源	10gU	10	a,c,f,i,k,n, o,p,r,x	"	"
29		100gU	10	a,c,f,i,k,n, o,p,r,x	"	"
30	模擬廃棄物 点線源	100gU	1	A	水,砂,鉄等 ( $\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ )	"
31		100gU	1	B	"	"
32		100gU	1	C	"	"
33		1kgU	1	A	"	"
34		1kgU	1	B	"	"
35		1kgU	1	C	"	"
36	模擬廃棄物 複数線源	10gU	10	ABCDEFGHIJ	"	"
37		100gU	10	ABCDEFGHIJ	"	"

表6.5 測定試験条件表(ドラム缶)

No.	試験項目	線源量	線源数	線源位置	マトリックス	測定時間
1	複数線源	100gU	10	a,e,f,j,i,n, o,p,q,y	air	1ステップ15分 4時間
2	マトリックスによる 減衰・遮蔽	500gU	1	a	鉄(10.7mm)	〃
3		500gU	1	a	鉄(36mm)	〃
4		500gU	1	a	鉄(48.5mm)	〃
5		500gU	1	a	塩ビ(11.3mm)	〃
6		500gU	1	a	塩ビ(27.3mm)	〃
7		500gU	1	a	塩ビ(44.8mm)	〃
8	均質マトリックス	100gU	1	a	水	〃
9		100gU	10	a,e,f,j,i,n, o,p,q,y	水	〃

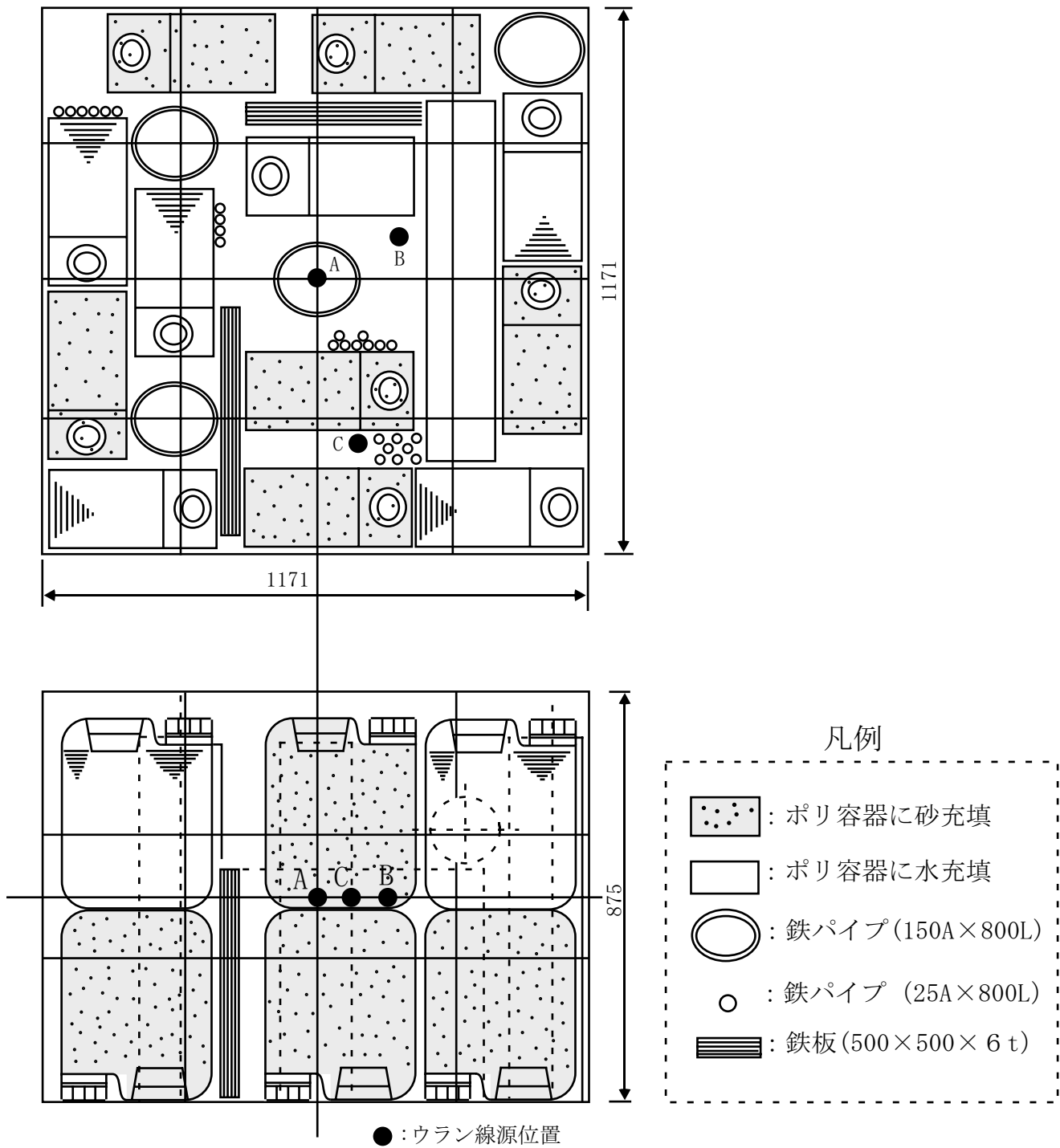


図6.7 模擬試験体へのウラン線源位置

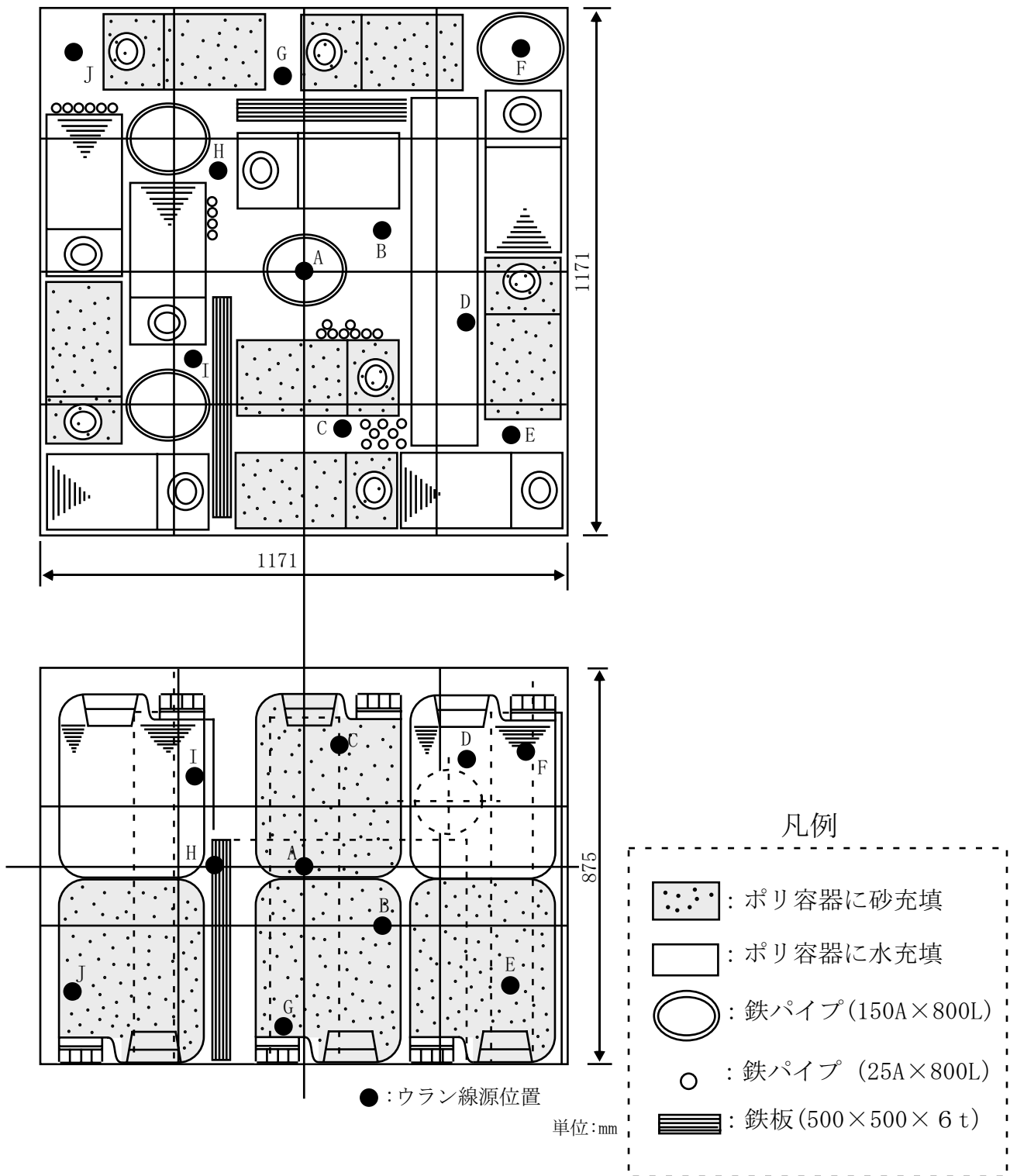


図6.8 模擬試験体への複数線源配置

表6.6 コンテナ測定試験結果

No.	U-238量 (g)	線源数	線源位置	マトリックス	評価値/設定値	解法	評価 線源数
1	48.9	1	a	air	1.58	P	2
2	500	1	"	"	0.74	P	2
3	1000	1	"	"	1.16	P	4
4	9500	1	"	"	0.88	P	4
5	1010	10	a,b,d,f,g,h, j,k,r,p	"	0.68	P	4
6	1010	10	i,m,o,s,t,u, v,w,x,y	"	0.97	P	6
7	1010	10	a,c,e,h,i,j, p,s,v,w	"	0.98	P	3
8	500	1	a	鉄(10.7cm)	1.03	P	3
9	500	1	a	鉄(23.0cm)	0.99	P	3
10	500	1	a	鉄(48.5cm)	1.18	P	1
11	500	1	n	鉄(10.7cm)	1.30	P	3
12	500	1	n	鉄(23.0cm)	1.26	P	1
13	500	1	n	鉄(48.5cm)	1.66	P	1
14	500	1	a	塩ビ(11.3cm)	1.25	P	4
15	500	1	a	塩ビ(27.3cm)	1.18	P	3
16	500	1	a	塩ビ(44.8cm)	1.47	P	4
17	500	1	n	塩ビ(11.3cm)	0.71	P	1
18	500	1	n	塩ビ(27.3cm)	0.77	P	1
19	500	1	n	塩ビ(44.8cm)	1.07	P	3
20	500	1	a	鉄(23.0cm)	1.24	P	1
21	500	1	n	鉄(23.0cm)	0.61	P	1
22	500	1	a	塩ビ(27.3cm)	0.81	P	2
23	500	1	n	塩ビ(27.3cm)	1.14	P	2
24	100	1	a	水	0.01	G	1
25	100	1	b	"	0.17	G	4
26	1000	1	a	"	0.84	P	1
27	9500	1	a	"	1.85	P	1
28	97.3	10	a,c,f,i,k,n, o,p,r,x	"	0.97	P	1
29	1010	10	a,c,f,i,k,n, o,p,r,x	"	1.49	P	1
30	100	1	c	air	0.89	P	1
31			y	air	0.69	P	1
32	100	1	c	鉄(12.3cm)	0.85	P	1
33	100	1	A	水,砂,鉄等 ( $\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.49	G	4
34	100	1	B	"	1.47	P	1
35	100	1	C	"	0.75	G	4
36	1000	1	A	"	0.47	P	1
37	1000	1	B	"	0.61	P	1
38	1000	1	C	"	0.77	P	1
39	97.3	10	ABCDEFGHIJ	"	1.15	P	2
40	1010	10	ABCDEFGHIJ	"	0.85	P	2
				平均	0.97		
				$\sigma$	0.38		

注)解法のP:ピーク計数率使用、G:グロス法

表6.7 ドラム缶測定試験結果

No.	U-238量 (g)	線源数	線源位置	マトリックス	評価値/設定値	解法	評価線 源数
1	1010	10	a,e,f,j,i,n, o,p,q,y	air	0.77	P	2
2	500	1	a	鉄(10.7mm)	0.72	P	1
3	500	1	a	鉄(36mm)	2.41	P	2
4	500	1	a	鉄(48.5mm)	0.40	G	1
5	500	1	a	塩ビ(11.3mm)	0.89	P	2
6	500	1	a	塩ビ(27.3mm)	0.80	P	1
7	500	1	a	塩ビ(44.8mm)	0.67	P	1
8	100	1	a	水	1.12	G	1
9	97.3	10	a,e,f,j,i,n, o,p,q,y	水	0.11	P	2
					平均	0.88	
					$\sigma$	0.61	

注)解法のP:ピーク計数率使用、G:グロス法



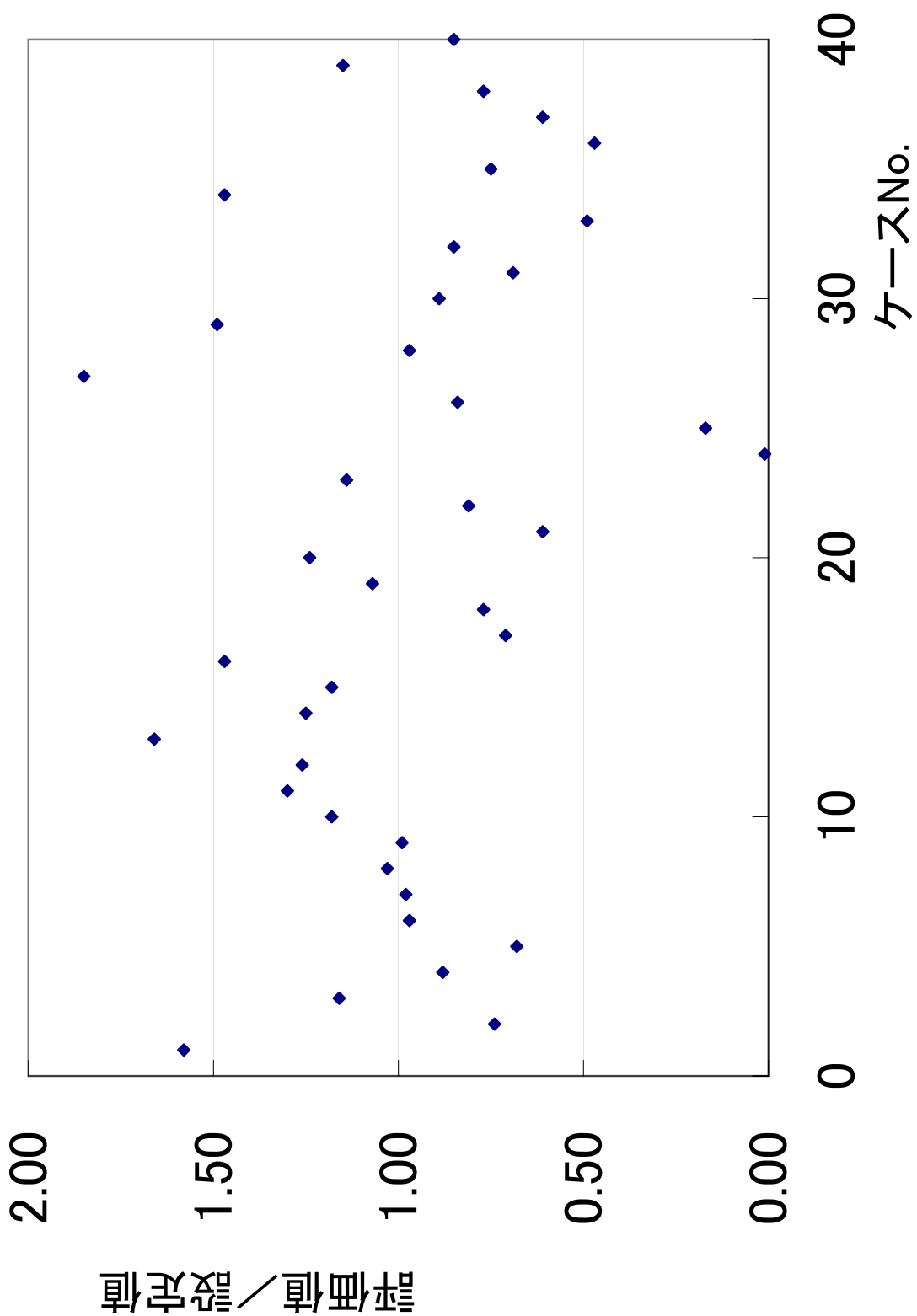


図6.9 評価値 / 設定値の分布(コンテナ)

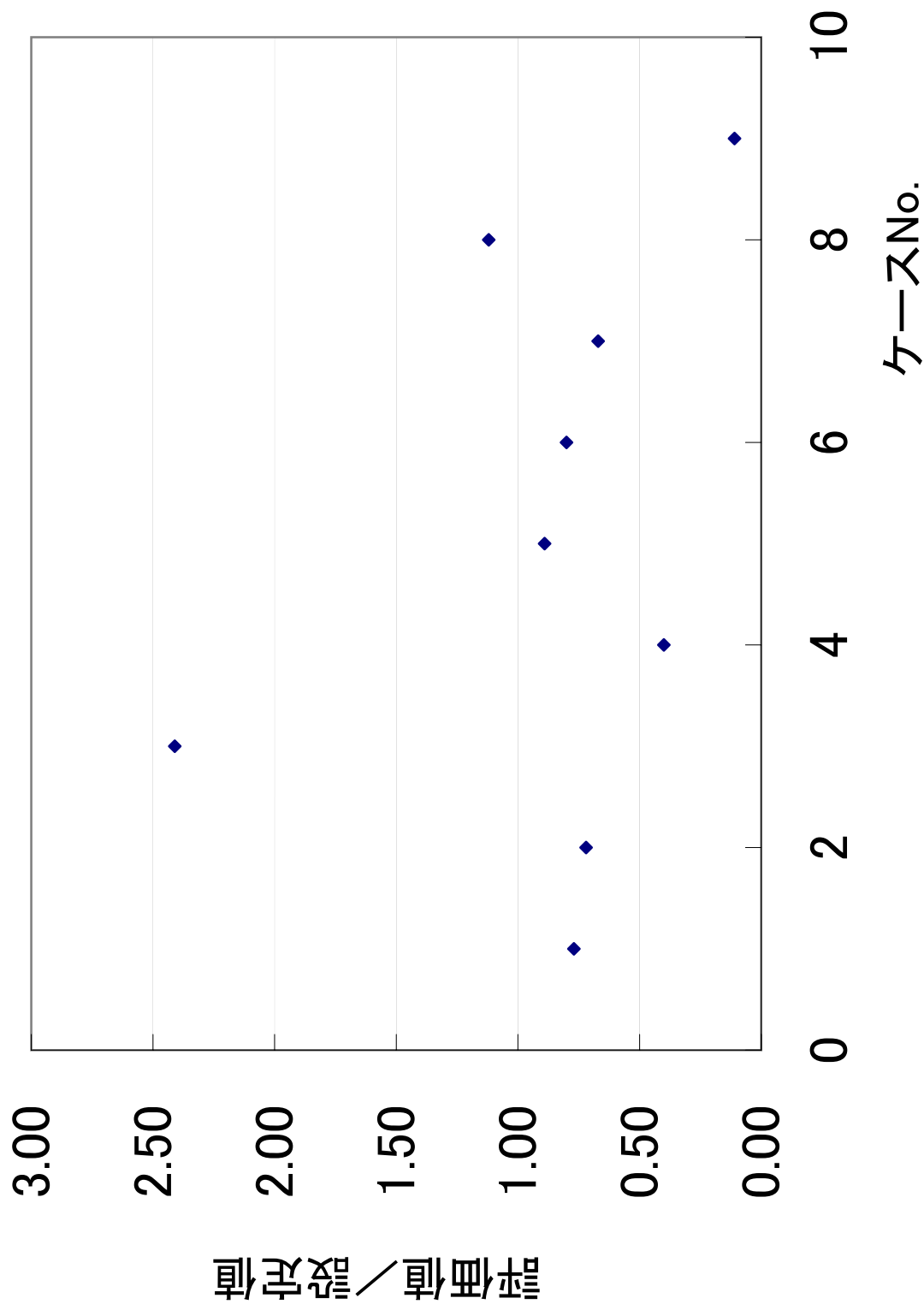


図6.10 評価値 / 設定値の分布(ドラム缶)

## 6.4 ガンマ線源による測定試験

ウラン線源が取扱えない施設での校正及び試験を考慮し、ウラン線源と同様に2本のエネルギーピークを有し、NaI 検出器にて分解できるエネルギー間隔のガンマ線源として、Co-60 を用いた試験について記述する。

### (1) 方法

線源位置の可変及び模擬試験体を用い、ガンマ線源(Co-60)を使用しての評価解析手法の確認を行った。

解析評価の手順については、ウランを解析評価する手法と同じものであり、評価値としては、放射能(Bq 数)とした。

測定試験の条件表を表 6.8 に示す。

なお、Co-60 の着目するエネルギーピークは、1173keV 及び 1333keV である。

### (2) 結果

測定試験の結果を表 6.9 に示す。

- ① 線源位置をコンテナ中心部,上部端,中心下部として、測定評価し、それぞれ評価値/設定値は、1.30、0.90、2.00 となった。
- ② 模擬廃棄物の中心部に配置した結果は、評価値/設定値が 0.54 であり、マトリックスによる減衰補正もほぼ問題ないことを確認した。
- ③ これらより、4 ケースの極端なケースのみではあるが、変動幅が - 46%～+100%であるため、ガンマ線源を用いて装置の校正及び試験を行っても問題ないと考える。
- ④ なお、ウラン線源での同一線源位置における評価値/設定値の値とを比較すると、a 点を除き異なっていることから、ウランの自己吸収の影響及びエネルギーの違いによる減衰補正などの影響があると考えられる。よって、装置特性に係る試験は、ガンマ線源で問題ないと考えられるが、ウラン量評価に関する試験については代替することは難しい。

線源位置	100gU① (評価値/設定値)	60Co② (評価値/設定値)	比率 ②/①
a	1.39	1.30	0.94
t	0.53	0.90	1.70
I	0.95	2.00	2.11
A(模擬)	1.01	0.54	0.53

表6.8 ガンマ線源測定試験条件表

No.	試験項目	線源	線源放射能	線源数	線源位置	マトリックス	測定時間
1	点線源分布	Co-60	約2MBq	1	a	air	1ステップ15分 4時間
2		Co-60	約2MBq	1	t	air	1ステップ15分 4時間
3		Co-60	約2MBq	1	i	air	1ステップ15分 4時間
4	模擬廃棄物	Co-60	約2MBq	1	A	模擬廃棄物	1ステップ15分 4時間

注)線源位置については、図6.1及び図6.7参照

表6.9 ガンマ線源測定試験結果

No.	Co-60放射能	線源数	マトリックス	線源位置	評価値/設定値	評価値に対する誤差	評価線源数
1	1.68E+06	1	air	a	1.30	2.47E-02	3
2	1.59E+06	1	air	t	0.90	5.23E-02	1
3	1.68E+06	1	air	i	2.00	2.48E-02	2
4	1.58E+06	1	模擬廃棄物	A	0.54	3.59E-01	3

注)線源位置については、図6.1及び図6.7参照

## 6.5 ドラム缶廃棄物測定試験

### (1) 目的及び方法

ウラン廃棄物のうち、200ℓドラム缶詰めスラッジ(子孫核種を含む。嵩密度は約  $1\text{g}/\text{cm}^3$  程度)を対象として、本装置のコンテナモードとドラム缶モードで測定を行い、別途保有しているパッシブガンマ測定装置<sup>1)</sup>での評価値と比較を行った。

なお、ドラム缶用のパッシブガンマ測定装置は、対象物をターンテーブルに載せ、回転させながら Ge 検出器を用いて測定するものであり、内容物による  $\gamma$  線の減衰補正は、外部透過線源を用いて行うものである。

対象ドラム缶内容物：スラッジ

測定本数：10本

測定時間：コンテナモード 4時間/本

ドラム缶モード 1時間/本

パッシブガンマ測定装置 10分/本

### (2) 結果

スラッジドラム缶測定例を表 6.10 に、別途保有しているパッシブガンマ測定装置とコンテナモード及びドラム缶モードにおける評価値との比較を行った結果を図 6.11 に示す。

- ① 別途保有パッシブガンマ測定装置との相対値は、コンテナモードで、0.83~1.23 の範囲にあり、平均値は、1.05、変動係数は 14%であった。
- ② また、ドラム缶モードで測定した場合は、相対値の平均値は 0.96、変動係数は 14%であった。
- ③ これらより、子孫核種を多く含むウラン廃棄物に対して、本測定装置は適用可能であることを確認した。

## 6.6 コンテナ廃棄物測定試験

### (1) 目的及び方法

コンテナ詰めウラン廃棄物を測定し、評価方法の妥当性及び検出下限値の確認を行った。

対象コンテナ：70基 (空コンテナ1基を含む)

対象コンテナ重量：740kg~1,900kg (空コンテナ 400kg 含む)

平均重量：1120kg (嵩密度約  $0.65\text{g}/\text{cm}^3$ )

測定時間：4時間/基

### (2) 結果

コンテナ重量と評価ウラン量の分布を図 6.12 に、ピーク計数率でウラン量を評価できたケースに対するグロス法での評価ウラン量の関係を図 6.13 に示す。

また、評価値が検出下限値となったケースの検出下限ウラン量を図 6.14 に、廃棄物重量と検出下限値の関係を図 6.15 に示す。

- ① 図 6.12 より、約 50g 以下では、グロス計数率を用いた評価法が多く、NaI 検出器のピーク計数率を用いた評価(対向対評価法及び線源位置設定法)については、約 5g~2,000g と全体的に適用されている。これは、線源の偏在によるものと考えられ、表面付近の少ない量を評価したものと考えられる。

なお、子孫核種の影響があるため Ge 検出器によるピーク計数率を用いた評価(対向対評価法及び線源位置設定法)では、約 50～900g の範囲であった。評価法としては、線源強度による評価法の分布(適用)から妥当性が確認できた。

- ② 図 6.13 は、子孫核種の影響が少ないケースで、NaI 検出器によるピーク計数率を用いて線源量を評価し、その結果を相互比較したものである。
- ③ ピーク計数率を用いた評価値が約 30gU-238 以下の場合、線源強度が弱くなるため、ピーク計数率では評価できない線源が出てくることから、グロス計数率を用いた評価値の方が若干大きくなっている。これは、対向対評価法は、点線源で評価するが、グロス計数率を用いた評価法では、ある点から表面まで分布しているとして評価するためと考えられる。なお、グロス計数率を用いる評価法で点線源とした評価を行うと減衰補正が大きくなり、大きな誤差(数十倍以上)となるため、分布として評価することとしている。

これらを除く範囲では、ピーク計数率を用いた評価値とグロス計数率を用いた評価値は、ほぼ一致した。

- ④ コンテナ測定において、ウラン量が定量できなかったケースの検出下限値は、1001keV のピーク計数率が全く計測されない場合を検出下限とし、ウラン量の検出下限値を 1001keV のピーク計数率がメッシュごとデータのうち 1 つでも有意な値が得られるか否かで評価した。

図 6.14 に示すように、本装置の検出下限値は、内容物の嵩密度に依存し高くなるが、今回の嵩密度の範囲において、線源位置を内側のメッシュ中央に設定した場合、約 10～50gU-238 であり、線源位置を表面側のメッシュに設定した場合は、約 2～4gU-238 であった。

- ⑤ 図 6.14 より、今回の嵩密度の範囲において、検出下限値は、線源を中央部に仮定すると約 20～50g、表層部に仮定すると 2～3g 程度であった。
- ⑥ 次に、図 6.15 から中央部の関係式は、 $y = 2.2758e^{0.0022x}$  となり、表層部では、 $y = 1.269e^{0.007x}$  となった。それぞれ相関係数は、0.95 を超えており、これにより、廃棄物重量から検出下限値の推定が可能である。

表6.10 スラッジを収納したドラム缶廃棄物に対する  
Ge検出器でのピーク計数率測定例

測定位置	ウラン 1001keV $n_3$ (cps)	ウラン 766keV $n_1$ (cps)	766keVのピーク計 数率のうち Bi-214からの寄与 $\delta_1$ (cps)	766keVのピーク計 数率のうち Pb-211からの寄与 $\delta_1$ (cps)	ウラン 766keVの 補正計数率 $n_1^*$ (cps)	相対値 $n_1^*/n_1$
側面 - 1 No1	0.142	0.228	0.182	—	0.045	0.200
側面 - 1 No2	0.647	1.022	0.700	—	0.323	0.316
側面 - 1 No3	0.671	0.892	0.637	—	0.255	0.286
側面 - 1 No4	0.108	0.229	0.179	—	0.050	0.220
側面 - 2 No1	0.138	0.338	0.180	—	0.158	0.467
側面 - 2 No2	0.677	1.031	0.757	—	0.275	0.266
側面 - 2 No3	0.682	0.976	0.707	—	0.269	0.275
側面 - 2 No4	0.129	0.244	0.160	—	0.084	0.345
側面 - 3 No1	0.117	0.250	0.162	—	0.088	0.352
側面 - 3 No2	0.631	0.986	0.737	—	0.249	0.252
側面 - 3 No3	0.666	0.986	0.740	—	0.245	0.249
側面 - 3 No4	0.147	0.204	0.159	—	0.045	0.222
側面 - 4 No1	0.161	0.169	0.153	—	0.016	0.096
側面 - 4 No2	0.653	0.996	0.727	—	0.268	0.269
側面 - 4 No3	0.626	0.957	0.668	—	0.289	0.302
側面 - 4 No4	0.112	0.211	0.170	—	0.041	0.196

(注) Ge検出器は高さ方向には中央1ヶ所、横方向には側面当り4ヶ所測定する。

また、 $n_1^* = n_1 - \delta_1 - \delta_2$

(注) 766keVの計数率に対してPb-211からの寄与は検出下限以下であった。

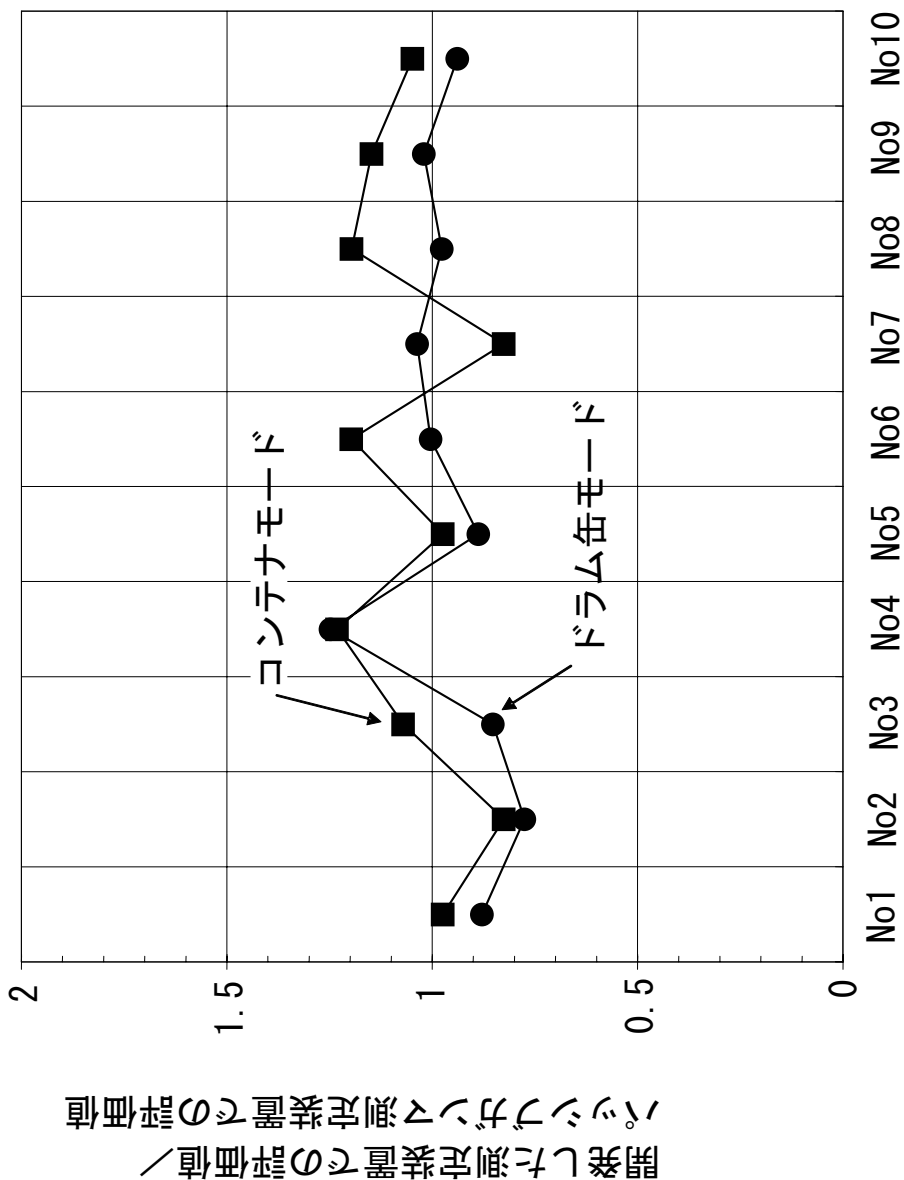


図 6.11 ドラム缶廃棄物(スラッジ)に対する測定結果の比較



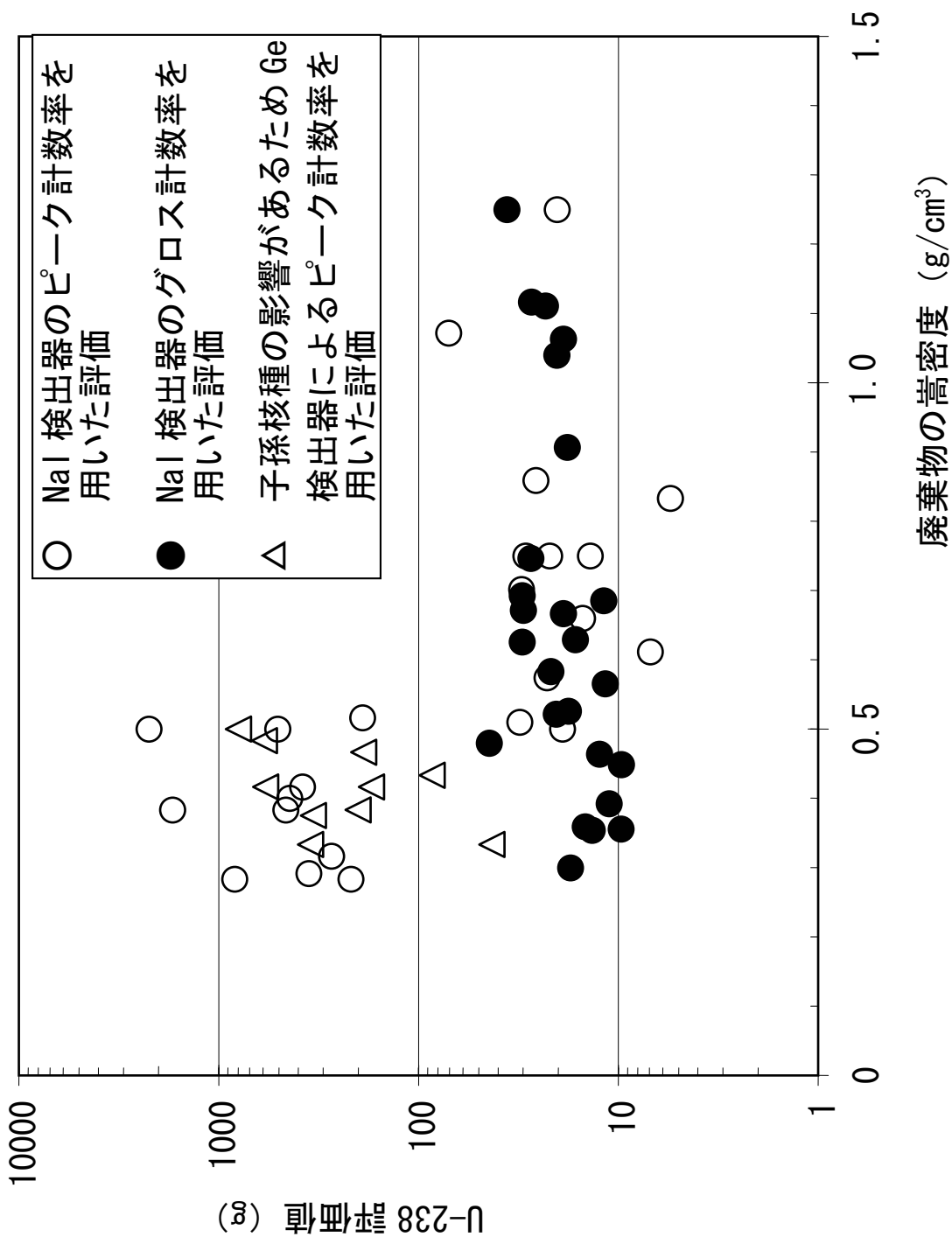
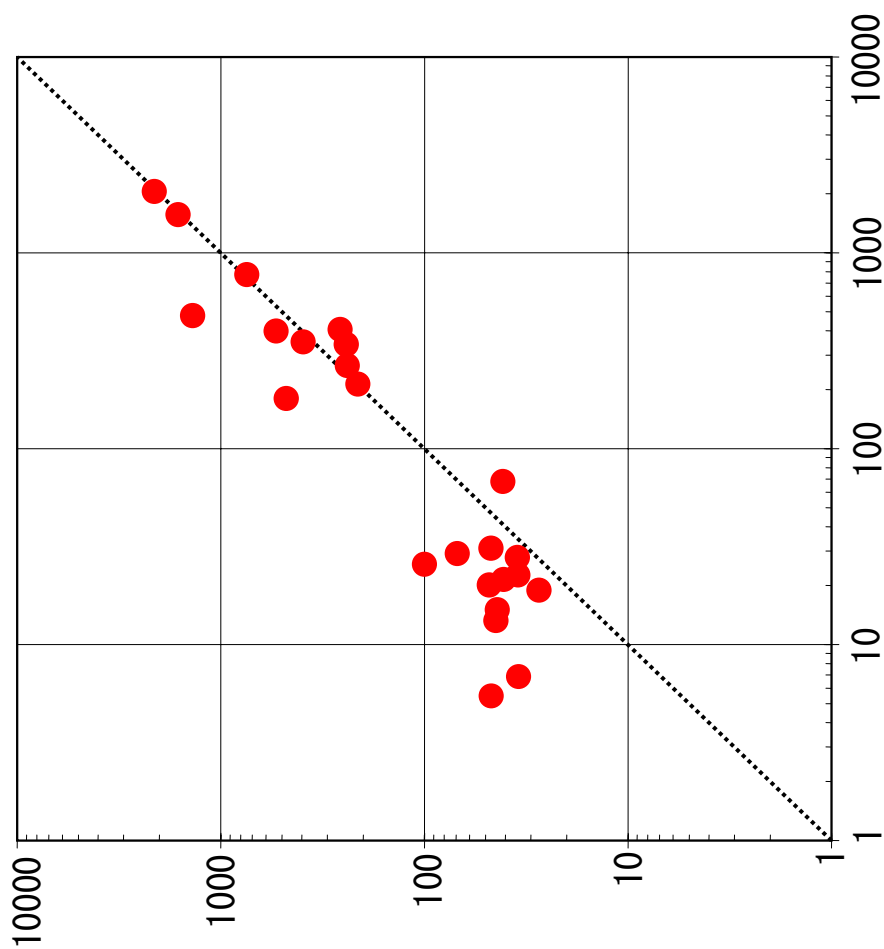


図 6.12 コンテナ重量と評価ウラン量の分布



クロス法で解法した場合の評価値 (gU-238)

ピーク計数率を用いた方法  
(対向対法・線源位置設定法) での評価値 (gU-238)

図 6.13 ピーク計数率で評価されたケースに対するグロス法での評価ウラン量の関係

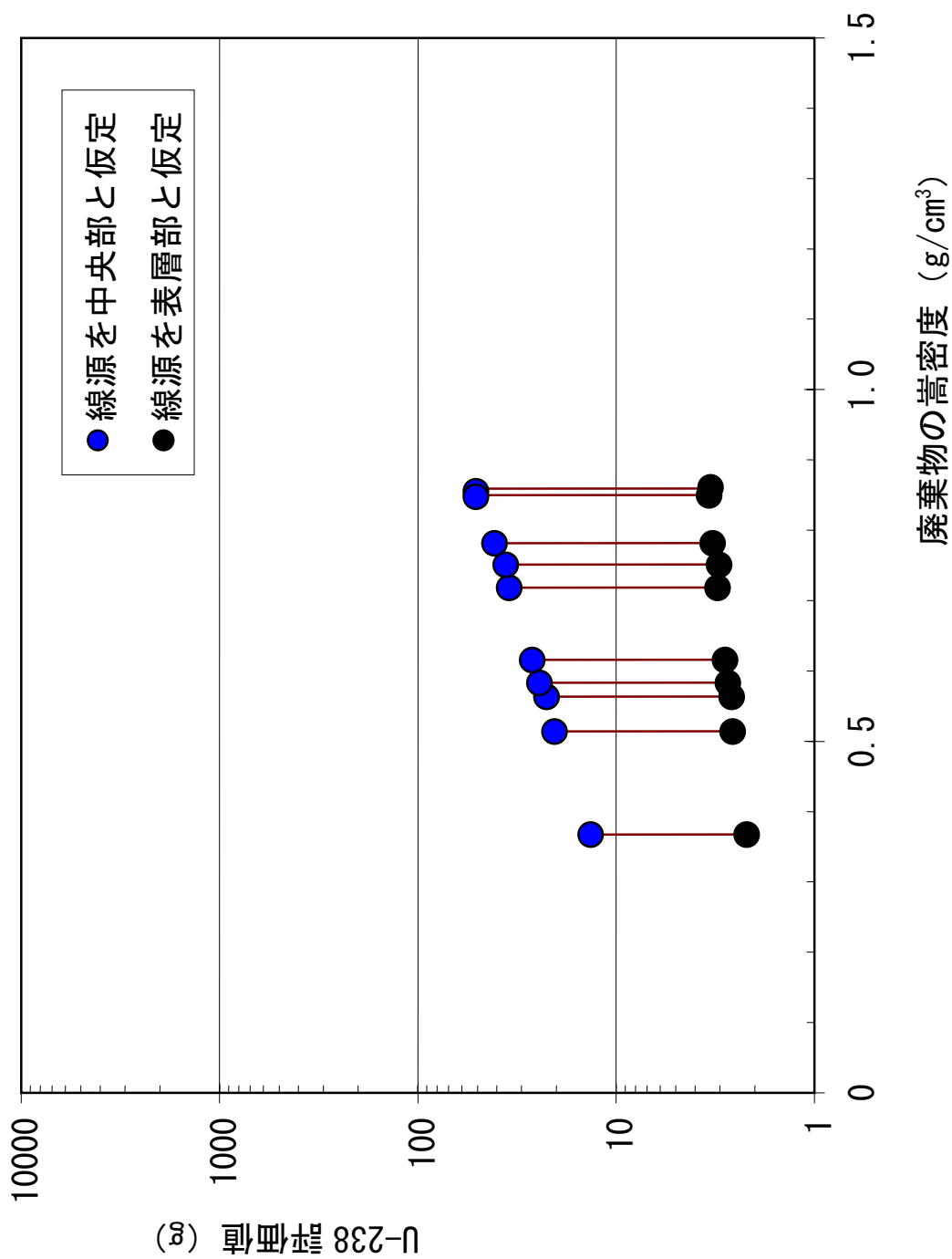


図 6.14 ウラン量が検出下限値以下となったケースの検出下限値

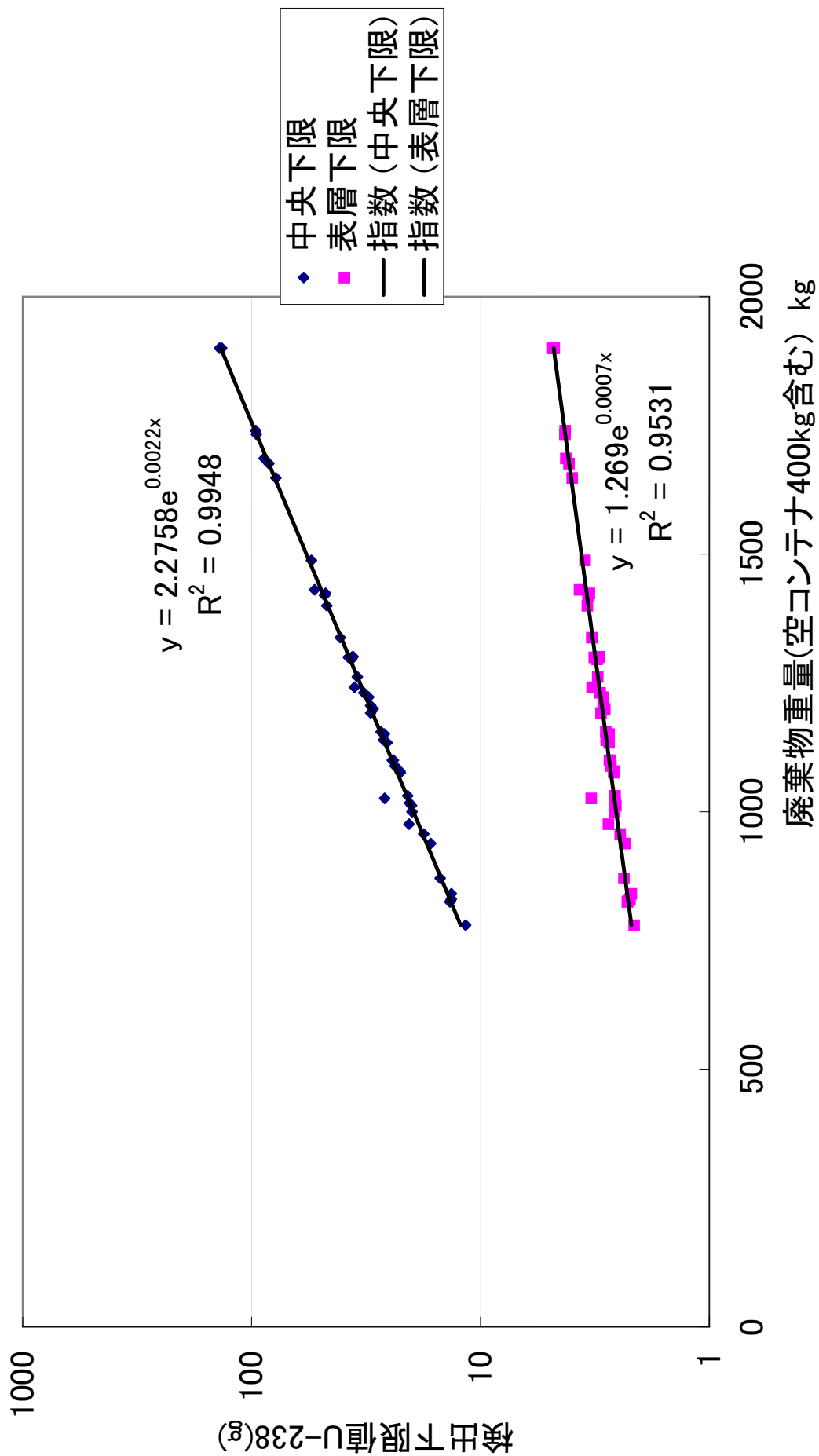


図6.15 廃棄物重量と検出下限値の関係

## 7.まとめ

コンテナ廃棄物中のウラン含有量を評価するために実施した装置設計、解析評価コードの構築及び測定試験から以下のことを確認した。

- ① ウラン廃棄物において、ウランの子孫核種が存在しない場合は、NaI 検出器により高感度でウランを評価できる。しかし、子孫核種を含む場合は、ピーク分解能の良い Ge 検出器による測定評価が必要となる。
- ② 角型容器であるコンテナの測定は、NaI 及び Ge 検出器を用いた分割測定により、対向する測定データを用いた対向対評価法で評価できることを確認した。また、対向対評価法が適用できない場合は、線源位置設定法またはグロス計数率を用いた評価法により評価可能である。
- ③ 本手法により、線源及びマトリックスが偏在していても、それらの影響を補正して U-238 量を評価できることを確認した。
- ④ 模擬試験体の測定試験から、 $3\sigma$  の範囲で約  $\pm 50\%$  にて評価できることを確認した。
- ⑤ 対向対評価法、線源位置設定法及びグロス計数率による評価法の信頼性を考慮し、順次用いることにより、有意量であれば、ウラン量を約  $\pm 50\%$  で評価できることを確認した。
- ⑥ 検出下限値は、コンテナの重量に依存するが、1t の場合、線源が中心付近で約 20gU-238 である。
- ⑦ ウラン線源が取扱えない施設での校正及び試験をウラン線源の代替として Co-60 を適用できることを確認した。

今後の課題として、以下のことが上げられる。

- ・ 測定時間がコンテナ 1 基あたり、約 4 時間を要するため、1 日のスケジュールとして装置校正確認、測定準備及びデータ整理等を考えると約 1 基/日となる。このため、効率的な測定を行うには、検出器の増加改良を検討することが必要である。
- ・ ウランの子孫核種を含む場合は、Ge 検出器 1 台による測定となるため、測定感度及び精度とも悪化する。よって、感度及び精度を向上させるには検出器を増設することが必要である。
- ・ 現状、計測系と駆動系が別々の操作となるため、計測系と同期を取って自動駆動させることが、測定効率の向上及び分割測定でのヒューマンエラーを無くすことに繋がると考える。
- ・ なお、本手法は、 $\gamma$  線源を対象とするため、Pu 等の  $\gamma$  線放出核種を対象とした測定評価への適用も可能である。

## 8.おわりに

コンテナ中に収納された廃棄物中のウラン量をパッシブガンマ法により測定する測定手法及び測定装置を開発した。本装置は、NaI 検出器 3 台、Ge 検出器 1 台及び廃棄物駆動部より構成される。

本装置の特性は、

- ① 空コンテナにおける感度分布は、コンテナの中心を 1.0 とした場合、約±50%以内の分布幅であった。
- ② 模擬試験体の測定試験から、評価値／設定値の分布は、約±50%にて U-238 量を評価できる。
- ③ 検出下限値は、コンテナの重量に依存するが、1t の場合、線源が中心付近で約 20gU-238 である。

また、実廃棄物に対する測定データより、ピーク計数率を用いた評価値とグロス計数率を用いた評価値の整合性も確認できた。

本装置の考案により、コンテナ廃棄物中のウラン量を評価できたことは、大きな成果であり、また、パッシブガンマ法で測定評価できたことによって、汎用性があり、経済的(低コスト)で、メンテナンス性も良いと考えられる。

今後は、この測定装置により、今まで測定できなかったコンテナ廃棄物中のウラン量を測定評価し、放射性物質の適切な数量記載及び計量管理を行い、適宜、国及び IAEA に報告していく予定である。

なお、更に低いレベルのウラン量を測定するためには、 $\gamma$ 線の計測ではなく、透過力のある中性子を用いたアクティブ中性子法<sup>6)</sup>などが有効であり、それらの適用性評価や技術開発が必要と考えられます。

## 9.参考文献

- 1) 助川泰弘, 鈴木敏, 他: “パッシブガンマ法によるウラン廃棄物測定試験”, JNC TN8440 2002-019, P20~P68(2002年)
- 2) 館野久夫, 後藤安志, 他: “パッシブ中性子同時計数法による廃棄物コンテナ中Puの測定技術開発”, サイクル機構技報, No.10, P51~P57(2001)
- 3) 環境保全・研究開発センター: “低レベル放射性廃棄物管理プログラム”, JNC ZN8410 2001-024, P5-13~P5-14(2002)
- 4) 村上悠紀雄他: 放射線データブック, 地人書館, P268(1982年)
- 5) M.Tsutsumi, T.Oishi, et al.: “Simulation of the Background for Gamma Detection System in the Indoor Environments of Concrete Buildings”, J.Nucl Sci.Technol., Vol.38, No.12, P.1109~1114(2001)
- 6) 助川泰弘, 他: “アクティブ中性子法による TRU 核種測定技術開発” 動燃技報 No.80, P39~P50 (1991年)

## 添付資料

1. バックグラウンドの設定
2. 子孫核種 $\gamma$ 線の補正
3. ウラン量評価法における誤差評価
4. ピーク比の算出における変動係数
5. 均一・均質体系の評価ルーチン
6. コンテナ測定結果出力例
7. ドラム缶測定結果出力例



## バックグラウンドの設定

コンテナ中の充填は一様とし、かさ密度に応じて BG 計数率（グロス）の低下率を計算で設定し補正する。

## ① 計算条件

- ・ BG スペクトル・・・添 1-表 1

BG スペクトルの主要核種と割合は以下の通りである 1)。

K-40 : 1.46MeV、組成割合 28%

Tl-208 : 2.62MeV、組成割合 13% 0.58MeV、組成割合 11%

Pb-212 : 0.24MeV、組成割合 6%

Bi-214 : 0.61MeV、組成割合 5%

- ・ 計算体系・・・添 1-図 1（計算コード MCNP）

## ② 計算結果

- ・ BG スペクトルの比較

空気での BG 測定スペクトルから、K-40 のピーク計数率と K-40（1461keV）領域の計算値が同じとして図示した。

: 5ch 毎の積算・・・添 1-図 2 (1/2)\_空気、添 1-図 3 (1/2)\_水

: 10ch 毎の積算・・・添 1-図 2 (2/2)\_空気、添 1-図 3 (2/2)\_水

- ・ 空気に対する水での BG 低下率

ケース	A	B	C	D
	25ch-300ch	50ch-300ch	75ch-300ch	100ch-300ch
実測	0.84	0.84	0.84	0.83

\*1) BG 低下率 = 水での BG 計数率 / 空気での BG 計数率

\*2) 4.0keV/ch

- ・ 密度による BG 低下

1) 密度 1.0 以下の時・・・添 1-図 4

$$X = \text{BG 低下率(密度}\rho) = \text{密度}\rho\text{のMCNPの低下率}(\rho) \times \frac{\text{実測}(\rho = 1.0)\text{の低下率}}{\text{MCNP}(\rho = 1.0)\text{の低下率}}$$

$X_0$  : 実測 ( $\rho = 1.0$ ) の低下率

$$\beta = \frac{(1-X)}{(1-X_0)}$$

合成BGスペクトル =  $(1-\beta) \cdot (\text{空気のBGスペクトル}) + \beta \cdot (\text{水のBGスペクトル})$

2)密度 1.0 以上の時……添 1-図 6

$$\gamma = \text{MCNPでの密度}(\rho)\text{の時の低下率} \times \frac{\text{実測}(\rho = 1.0)\text{の低下率}}{\text{MCNP}(\rho = 1.0)\text{の低下率}}$$

合成BGスペクトル =  $\gamma \cdot$  (水のBGスペクトル)

ここで  $\rho = 1.2 \text{ g/cc}$  の時  $\gamma = 0.9953$ 、 $\rho = 1.5 \text{ g/cc}$  の時  $\gamma = 0.9917$  である。

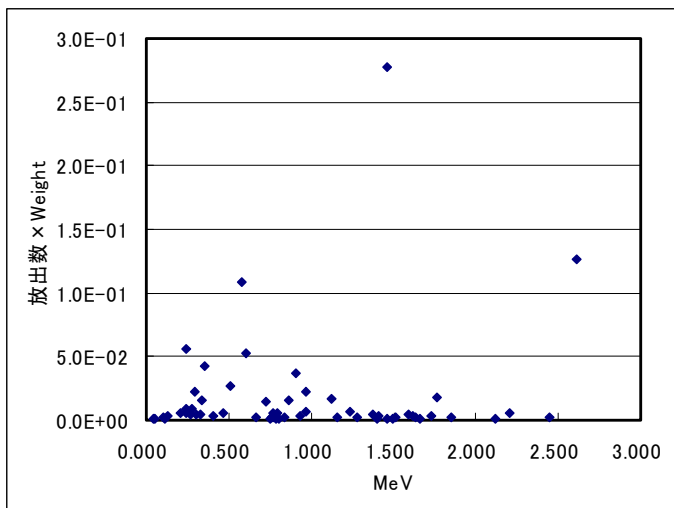
(参考文献)

- [1] Simulation of the Background for Gamma Detection System in the Indoor Environments of Concrete Buildings, Masahiro Tsutsumi etc., JAERI-Tokai

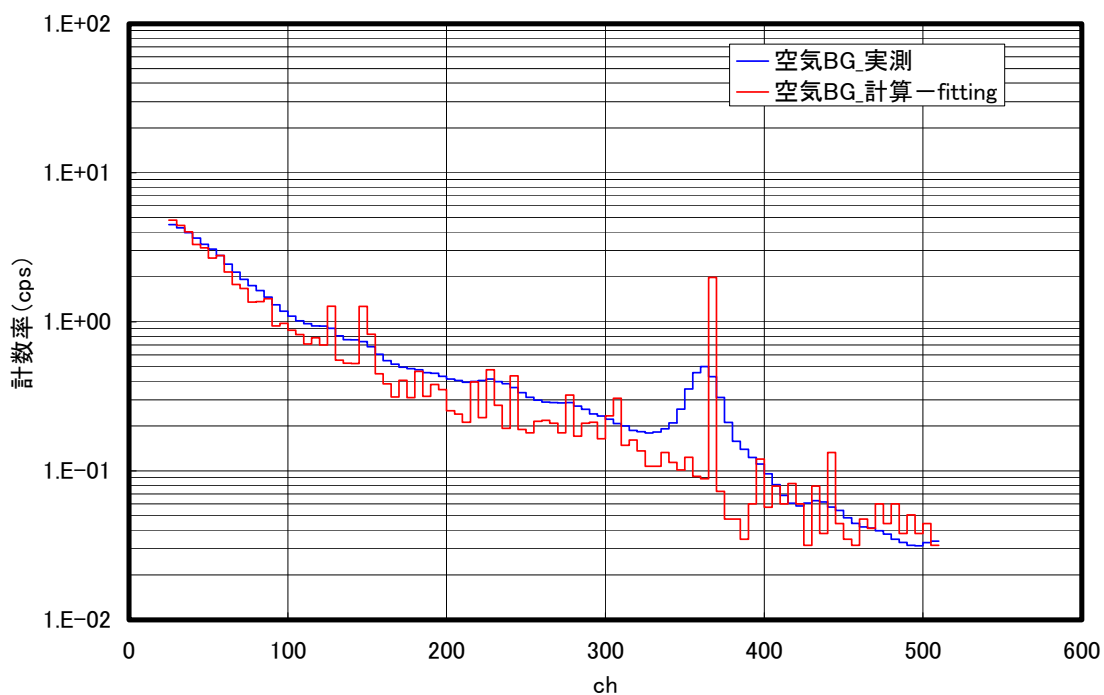
添 1-表 1 計算で仮定したコンクリート中より発生する BG スペクトル

BGスペクトル

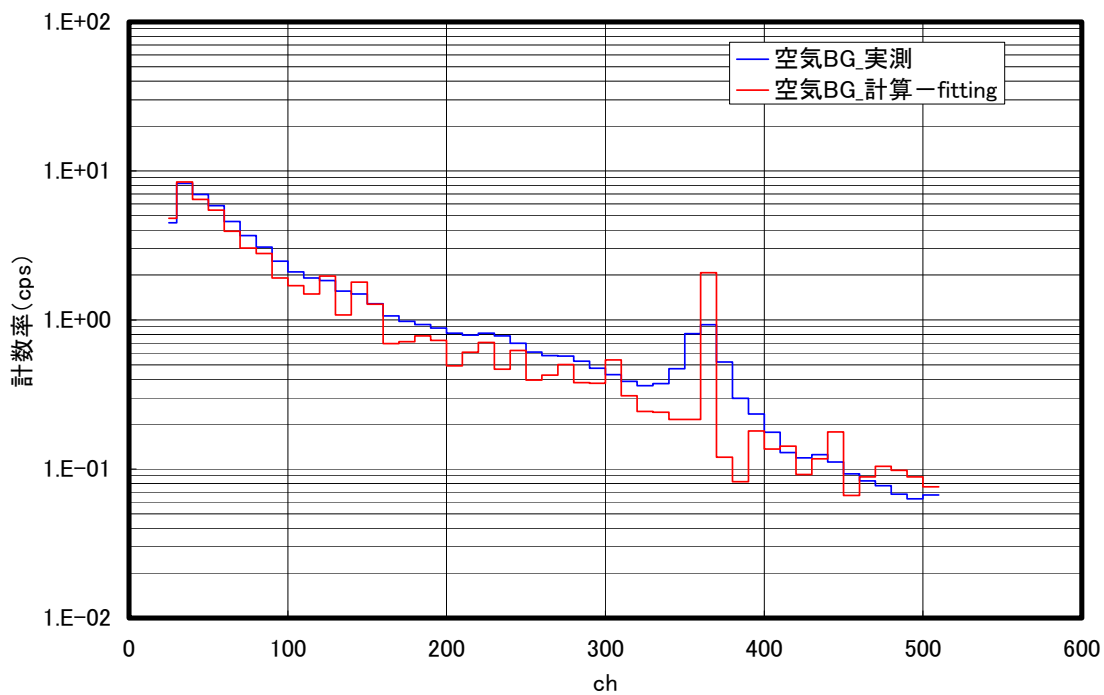
核種	エネルギー(MeV)	BGスペクトル
	E'	計算で設定した 放出割合
K-40	1.461	0.277
Pb-214	0.053	0.001
	0.242	0.009
	0.295	0.022
	0.352	0.042
	0.786	0.001
Bi-214	0.609	0.053
	0.666	0.002
	0.768	0.006
	0.806	0.001
	0.934	0.004
	1.120	0.017
	1.155	0.002
	1.238	0.007
	1.281	0.002
	1.378	0.005
	1.401	0.002
	1.408	0.003
	1.509	0.003
	1.661	0.001
	1.730	0.003
	1.765	0.018
	1.847	0.002
	2.119	0.001
	2.204	0.006
	2.448	0.002
Ac-228	0.099	0.002
	0.129	0.004
	0.209	0.006
	0.270	0.005
	0.328	0.004
	0.338	0.015
	0.409	0.003
	0.463	0.006
	0.755	0.001
	0.772	0.002
	0.795	0.006
	0.836	0.002
	0.911	0.037
	0.965	0.007
	0.969	0.022
	1.459	0.001
1.496	0.001	
1.588	0.005	
1.630	0.002	
0.115	0.001	
Pb-212	0.239	0.056



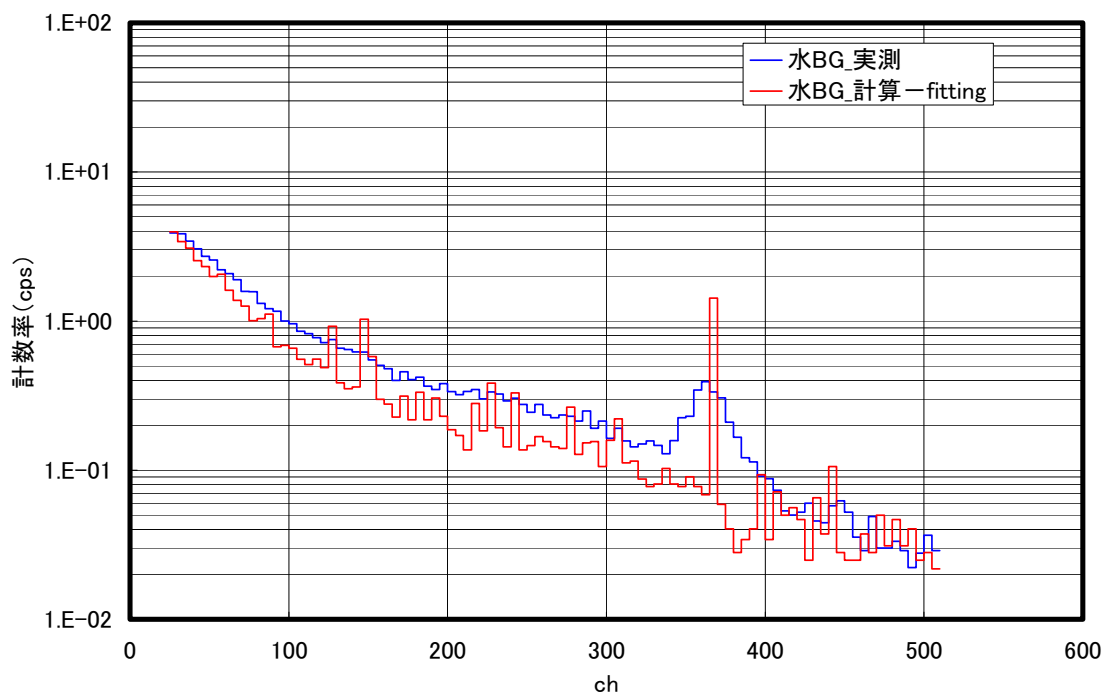




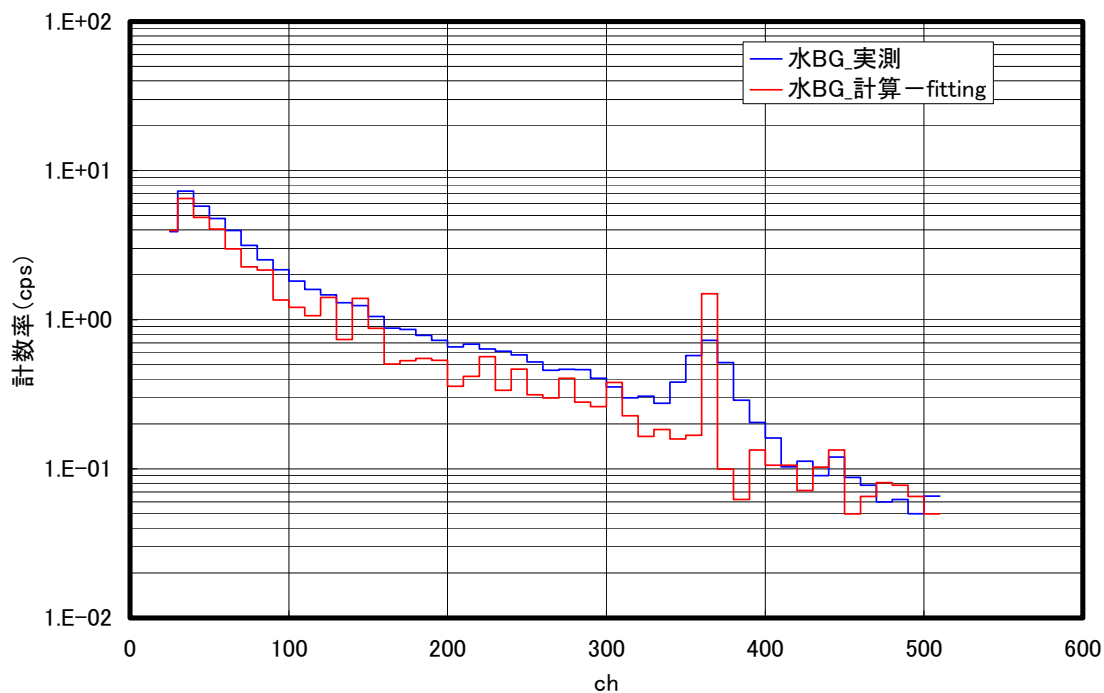
添 1-図 2 (1/2) BG スペクトルの比較 (空気\_5ch 毎の積算)



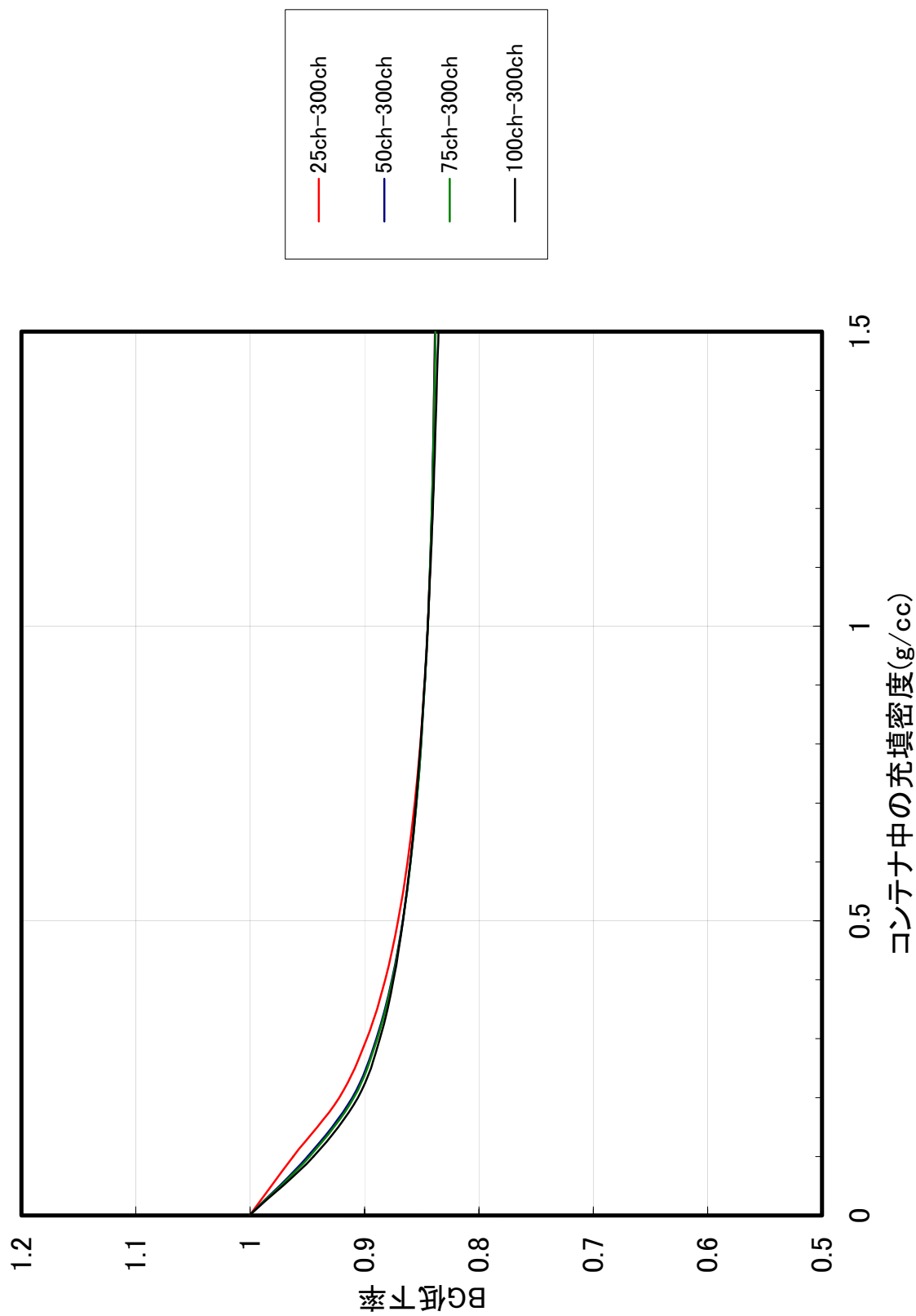
添 1-図 2 (2/2) BG スペクトルの比較 (空気\_10ch 毎の積算)



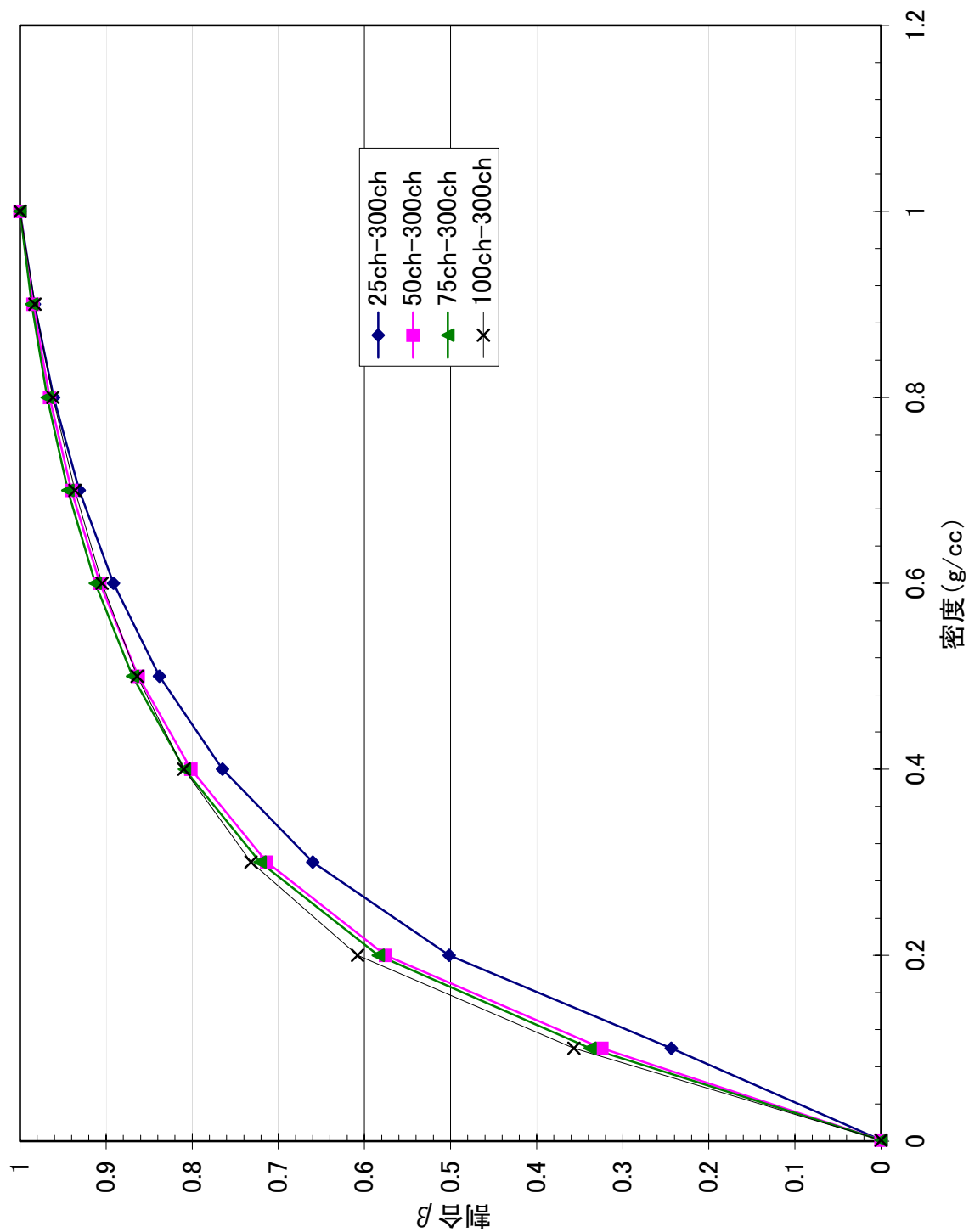
添 1-図 3 (1/2) BG スペクトルの比較 (水\_5ch 毎の積算)



添 1-図 3 (2/2) BG スペクトルの比較 (空気\_10ch 毎の積算)

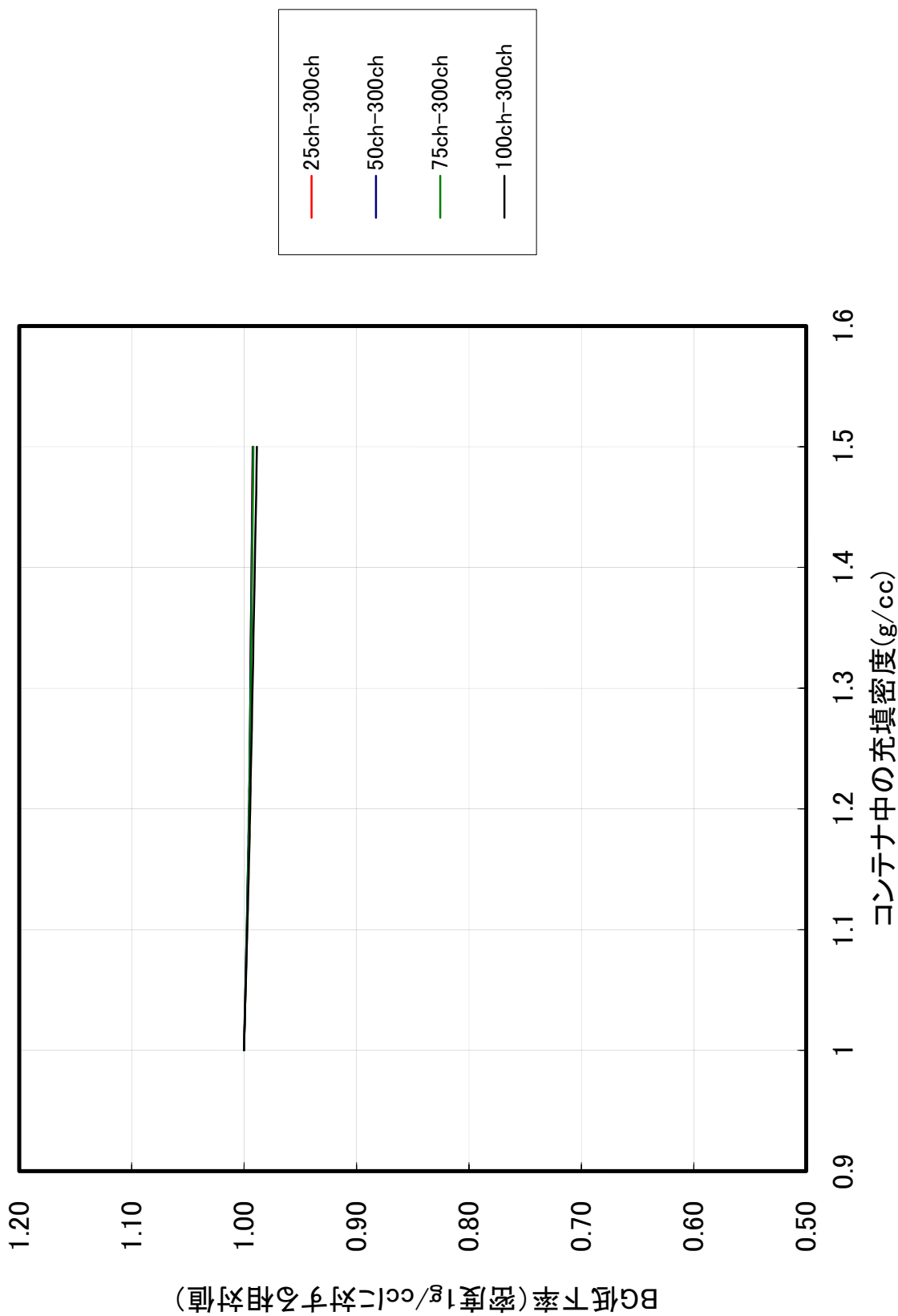


添1-図4 BG低下率と近似曲線



添 1-図 5 β の密度依存性





添1-図6  $\gamma$  の密度依存性

子孫核種  $\gamma$  線の補正

## (1) スラッジでの 609keV のピーク計数率と NaI のグロス計数率の対応

スラッジをコンテナモードで計測した結果を以下に示す様に整理した。BG は平均密度で補正した BG を使用した（重量としてドラム缶重量-27kg（ドラム缶容器）+400kg（コンテナ容器）の値を与えて平均密度算出）。

次の記号を使用する。

NB1(i) : 位置 i の Bi-214 の 609keV のピーク計数率（Ge 検出器）

NB2(i) : 位置 i の Bi-214 の 1120keV のピーク計数率（Ge 検出器）

NGT(i) : 位置 i の NaI のグロス計数率

$$NGT(i) = NG(i, 1) + NG(i, 2) + NG(i, 3)$$

但し NG(i, j) は位置 i、NaI 検出器 No. j のグロス計数率

## ① 609keV のピーク計数率（NB1）と NaI グロス計数率との対応……添 2-図 1 参照

添 2-図 1 の横軸は NB1（cps）、縦軸はグロス・ピーク計数率の相対値 NGT/NB1 である。NB1 が大きい場合、比の値は約 700 となっている。

## ② 1120keV のピーク計数率と 609keV のピーク計数率の比（NB2/NB1）とグロス・ピーク計数率比（NGT/NB1）との対応……添 2-図 2 参照

添 2-図 2 の横軸はピーク比（ $P = NB2/NB1$ ）、縦軸はグロス・ピーク比（ $GR = NGT/NB1$ ）である。ln(GR) は P が大きくなると増加してくる。

## (2) 廃棄物中の Bi-214 の 609keV の計数率とその影響

## ① 実廃棄物の計数率分布

実廃棄物の測定データを基に  $\gamma$  スタジオで求めたピーク計数率、グロス・ピーク比、ピーク比を以下に示す。

- ・添 2-表 1……609keV の計数率分布（NB1）
- ・添 2-表 2……グロス・ピーク比（NGT/NB1）
- ・添 2-表 3……ピーク比（NB2/NB1）
- ・添 2-図 3……609keV のピーク計数率とグロス・ピーク比の対応

## ② 娘核種によるグロス計数率の影響の除染

## 1) 娘核種の効果

$$NGTB = K \cdot NB1$$

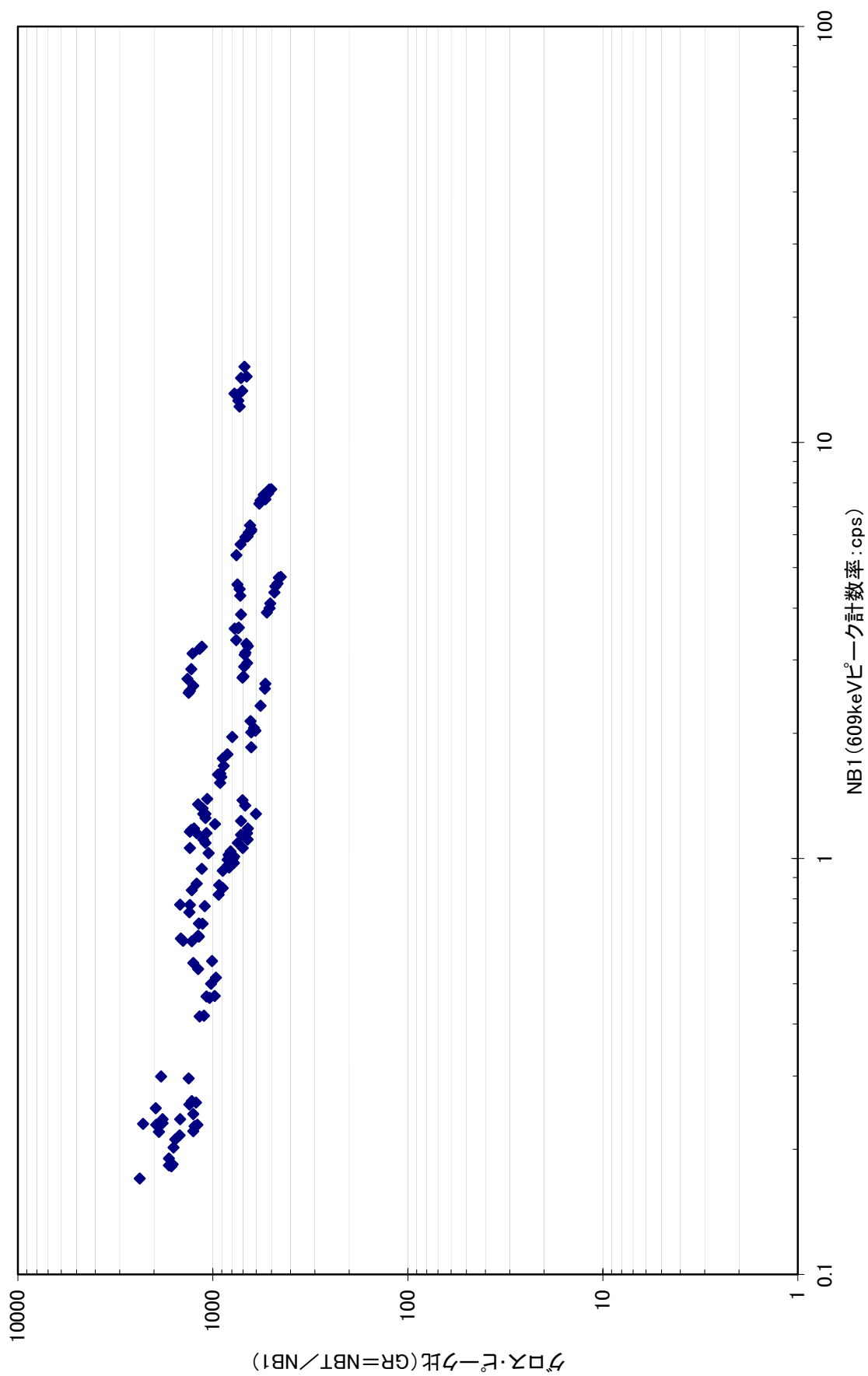
NB2………検出されない時  $K = 700$ （添 2-図 1 より）

NB2, ……検出された場合  $\ln K = 7.231 \cdot P + 5.048$

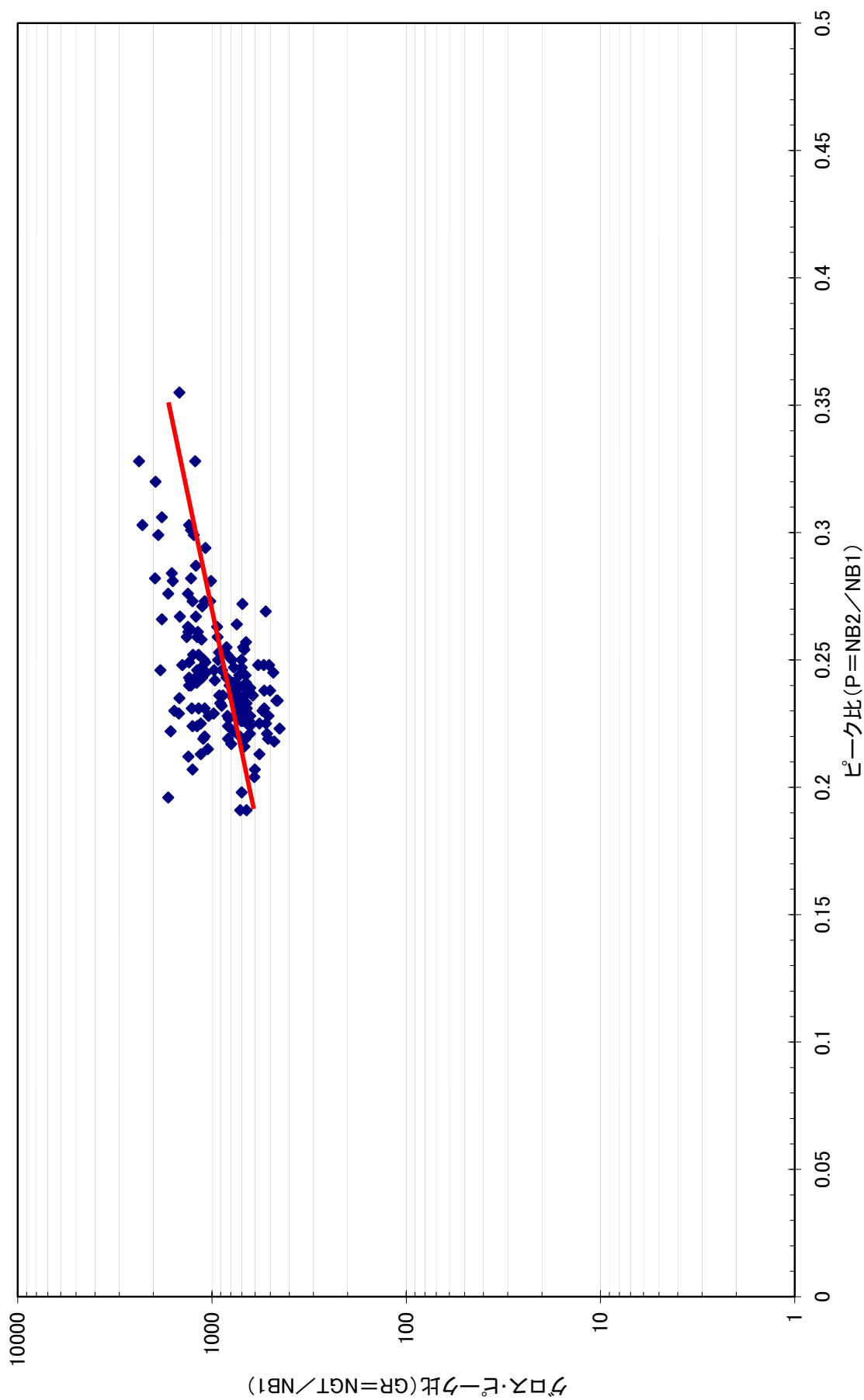
（NB1 が検出されたケースの約 1/3）

## 2) グロス計数率の補正

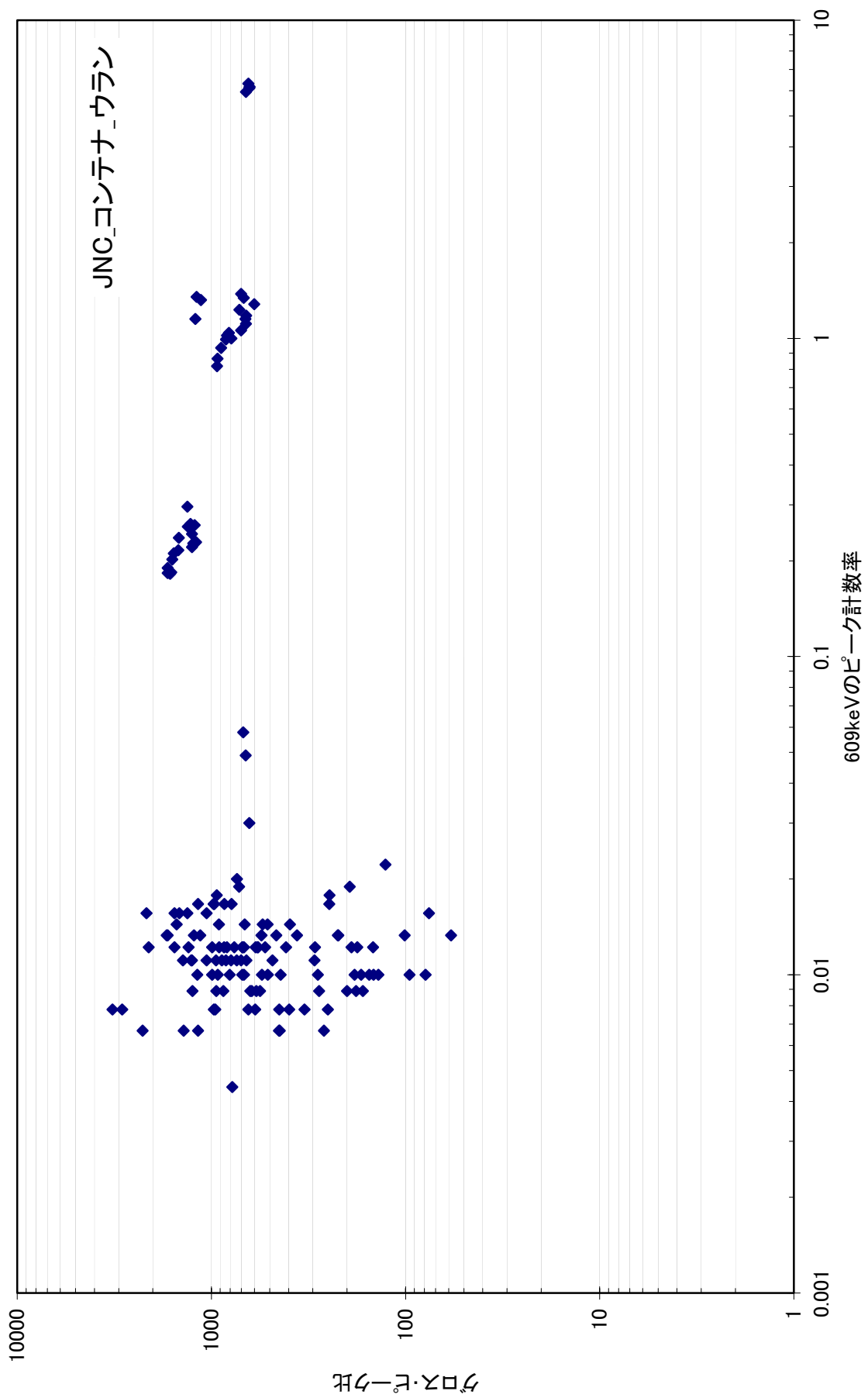
$$NG(i, k) = NG(i, k) \times \frac{NGT - NGTB}{NGT}$$



添2-図1 609keV ピーク計数率とグロス・ピーク比の対応



添2-図2 ピーク比とグロス・ピーク比の対応



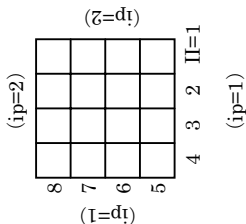
添2-図3 609keVのピーク計数率とグロス・ピーク比の対応 (実廃棄物)

添2表1 実廃棄物におけるGeでのBi-214の609.3keVの計数率

SETPR内のAACPS(IIIP,4.11)の出力

II,IP	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2	8.1	8.2
D-1281	—	—	1.89E-02	—	—	1.67E-02	—	—	2.00E-02	—	—	3.00E-02	—	—	1.11E-02	1.33E-02
D-1282	1.33E-02	—	—	—	—	—	—	1.78E-02	1.22E-02	—	1.22E-02	1.44E-02	—	—	1.56E-02	—
D-1283	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.22E-02	—	—	—	—	—	—
D-1284	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.33E-02	—	—
D-1286	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.67E-03	—	—
D-1287	—	—	8.89E-03	1.33E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1288	—	1.33E-02	8.89E-03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1289	—	—	—	—	7.78E-03	—	6.67E-03	—	1.22E-02	—	—	—	1.22E-02	—	—	—
D-1290	—	—	—	—	—	—	—	—	1.22E-02	—	1.00E-02	1.22E-02	—	—	—	1.00E-02
D-1291	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.78E-03	—	—	—	—	—	—
D-1292	—	—	—	—	4.44E-03	6.67E-03	8.89E-03	8.89E-03	—	—	—	—	—	—	1.44E-02	—
D-1293	—	—	1.00E-02	—	1.22E-02	—	1.22E-02	—	1.22E-02	—	1.00E-02	—	—	—	—	—
D-1294	—	—	—	1.22E-02	—	1.00E-02	—	—	—	—	—	1.22E-02	—	—	—	—
D-1295	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1296	—	—	1.11E-02	—	—	—	—	5.78E-02	1.00E-02	—	—	1.00E-02	7.78E-03	1.22E-02	—	—
D-1297	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1298	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1299	—	—	8.89E-03	—	—	1.78E-02	—	—	—	7.78E-03	—	—	2.22E-02	—	—	—
M-139	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-140	—	—	—	1.67E-02	—	—	1.33E-02	—	1.11E-02	—	—	—	—	—	—	7.78E-03
M-143	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-144	—	—	—	1.56E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.67E-02	8.89E-03	—
M-145	—	—	—	—	—	1.00E-02	—	—	—	1.22E-02	—	—	—	—	—	7.78E-03
M-147	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00E-02	—	—
M-148	—	—	1.22E-02	—	8.89E-03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-149	—	1.56E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.78E-03	—	—	—
M-150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.89E-03	1.00E-02	—	—
M-151	—	1.22E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.33E-02
M-152	—	—	—	—	—	—	1.11E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-153	—	—	—	—	1.56E-02	—	—	—	—	1.56E-02	—	1.00E-02	—	—	—	—
M-154	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00E-02	—	—	—	—
M-156	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-158	—	—	—	1.22E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-159	—	—	—	6.67E-03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-160	—	—	—	—	—	—	1.22E-02	1.11E-02	—	—	—	7.78E-03	—	—	1.44E-02	—
M-164	—	—	—	1.00E-02	1.33E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-166	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.11E-02
R-52	—	—	—	—	—	—	—	—	1.11E-02	—	—	—	—	—	—	—
R-53	1.44E-02	—	1.33E-02	—	—	—	1.22E-02	—	1.11E-02	—	—	—	—	—	—	1.44E-02
R-54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-55	—	—	1.33E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.78E-03	—	8.89E-03	—
R-58	—	—	—	1.89E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00E-02	—	—
R-59	—	—	—	—	—	1.11E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-60	—	—	—	—	—	1.11E-02	—	—	—	—	—	1.00E-02	—	—	—	—
R-61	—	1.33E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.56E-02
R-70	1.67E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	1.22E-02	—	—	—	—	—	—
R-71	—	—	—	—	1.67E-02	—	—	—	—	—	1.00E-02	—	—	—	1.22E-02	—
R-72	—	—	8.89E-03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-73	—	—	1.67E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	6.67E-03	—	—	—	1.00E-02
BG	—	—	5.73E-03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

横の座標 (i, ip) は次の位置を示す。

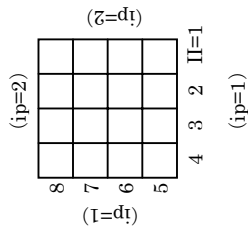


添2-表2 実廃棄物におけるグロス・ピーク比

SETPR内のZRの出力

II,IP	1,1	1,2	2,1	2,2	3,1	3,2	4,1	4,2	5,1	5,2	6,1	6,2	7,1	7,2	8,1	8,2
D-1281	—	—	7.20E+02	—	—	9.65E+02	—	—	7.38E+02	—	—	6.37E+02	—	—	1.26E+03	1.70E+03
D-1282	1.68E+03	—	—	—	—	—	9.37E+02	—	2.10E+03	—	1.55E+03	1.51E+03	—	—	1.06E+03	—
D-1283	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.74E+02	—	—	—	—	—	—
D-1284	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1286	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.82E+01	—	—
D-1287	—	—	2.00E+02	2.22E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.45E+02	—	—
D-1288	—	4.63E+02	2.79E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1289	—	—	—	—	3.97E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.80E+02	—
D-1290	—	—	—	—	—	—	1.39E+03	—	8.31E+02	—	—	—	4.13E+02	—	—	—
D-1291	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9.53E+01	1.77E+02	—	—	—	9.27E+02
D-1292	—	—	—	—	—	2.63E+02	5.61E+02	8.68E+02	—	5.94E+02	—	—	—	—	5.14E+02	—
D-1293	—	—	1.54E+02	—	1.90E+02	—	6.90E+02	—	8.60E+02	—	2.83E+02	—	—	—	—	—
D-1294	—	—	—	—	—	7.88E+01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1295	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1296	—	—	2.94E+02	—	—	—	—	—	8.05E+02	—	—	1.38E+02	—	1.47E+02	—	—
D-1297	—	—	—	—	—	—	—	6.85E+02	—	—	—	—	—	—	6.66E+02	—
D-1298	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.30E+02	—
D-1299	—	—	1.80E+02	—	—	2.46E+02	—	—	—	9.72E+02	—	—	1.27E+02	—	5.44E+02	—
M-139	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-140	—	—	—	1.17E+03	—	—	5.52E+02	—	8.40E+02	—	—	—	—	—	—	2.88E+03
M-143	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.47E+02	1.66E+02	—	—
M-144	—	—	—	7.58E+01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9.53E+02	—
M-145	—	—	—	—	—	1.83E+02	—	—	—	7.61E+02	—	—	—	1.46E+02	—	7.91E+02
M-147	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-148	—	—	5.92E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-149	—	1.33E+03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-151	—	1.31E+03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-152	—	—	—	—	—	—	1.06E+03	—	—	—	—	—	—	—	—	1.23E+03
M-153	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.16E+03	—	—	—	—	—	—
M-154	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-156	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-158	—	—	—	2.93E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-159	—	—	—	4.48E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-164	—	—	—	5.12E+02	2.23E+02	—	9.10E+02	8.83E+02	—	—	—	—	7.80E+02	—	—	9.47E+02
M-166	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-53	3.94E+02	—	1.01E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-54	—	—	—	—	—	—	5.29E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-58	—	—	—	1.94E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-61	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-70	7.86E+02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
BG	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

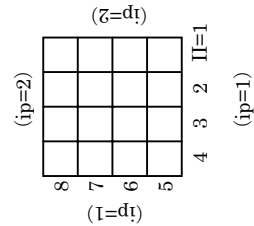
横の座標 (i, ip) は次の位置を示す。



添2-表3 実廃棄物におけるピーク比

II,IP	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2	8.1	8.2
D-1281	—	—	2.35E-01	—	—	—	—	—	—	—	—	3.27E-01	—	—	—	—
D-1282	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.55E-01	—	—	—	—	—
D-1283	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1284	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1286	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.67E-01	—	—
D-1287	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1288	—	8.33E-02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1289	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1290	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1291	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.33E-01	—	—	—	—	—
D-1292	—	—	—	—	1.50E+00	—	—	2.50E-01	—	8.57E-01	—	—	—	—	5.25E-01	—
D-1293	—	—	2.22E-01	—	—	—	—	—	2.73E-01	—	1.11E-01	—	—	—	—	—
D-1294	—	—	—	—	—	3.33E-01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1295	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D-1296	—	—	1.00E-01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.45E-01	—	—
D-1297	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.23E-01	—
D-1298	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.79E-01	—
D-1299	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.31E-01	—
M-139	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-140	—	—	—	3.33E-01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.86E-01
M-143	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-144	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.86E-01
M-145	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00E+00	—	—
M-147	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-148	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-149	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-151	—	2.73E-01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-152	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-153	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-154	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.22E-01	—	—	—	—
M-156	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-158	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-159	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.86E-01	—	—	—	—
M-160	—	—	—	—	—	—	3.64E-01	2.00E-01	—	—	—	—	—	—	—	—
M-164	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.00E-01
M-166	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.43E-01	—	6.25E-01	—
R-55	—	—	5.00E-01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-61	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.64E-01	—	—	—	—	—	—
R-71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.11E-01	—	—	—	—	—
R-72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
BG	—	2.61E-01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

横の座標 (i, ip) は次の位置を示す。





ウラン量評価法における誤差評価

1. 対向対評価法

ウラン量算出式

$$A = (\ell + 2\Delta)^2 \frac{f_a \cdot f_c}{f_a + f_c + 2\sqrt{f_a \cdot f_c}} = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \left[ \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right]^2 \dots \dots \dots (1)$$

$N_a(1)=u_a$ ,  $N_a(2)=v_a$ , とおくと ( $N_a(1)$ :766keV の点 a での計数率,  $N_a(2)$ :1001keV の点 a での計数率)

$$f_a = v_a \cdot \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} e^{\mu_2(\rho_a t_a + \delta)} = v_a \cdot z_2 \cdot e^{\mu_2 \rho_a t_a + \delta^*} \dots \dots \dots (2)$$

$$f_c = v_c \cdot \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} e^{\mu_2(\rho_c t_c + \delta)} = v_c \cdot z_2 \cdot e^{\mu_2 \rho_c t_c + \delta^*} \dots \dots \dots (3)$$

但し  $v_a = N_a(2)$ ,  $v_c = N_c(2)$ ,  $z_2 = \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)}$ ,  $\mu_2 \delta = \delta^*$

$$\frac{N_a(1)}{N_a(2)} = \frac{u_a}{v_a} = \frac{k_1(1) \cdot k_2(1)}{k_1(2) \cdot k_2(2)} \cdot e^{-(\mu_1 - \mu_2) \rho_a t_a} = z_1 \cdot e^{-(\mu_1 - \mu_2) \rho_a t_a} \dots \dots \dots (4)$$

$z_1 = \frac{k_1(1) \cdot k_2(1)}{k_1(2) \cdot k_2(2)}$  とおく

$$\rho_a t_a = -\frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \ln \left( \frac{1}{z_1} \cdot \frac{u_a}{v_a} \right)$$

ここで、

$f_a = N_a(2) \cdot \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)} e^{-\mu_2(\rho_a t_a + \delta)} = \frac{A}{(x + \Delta)^2}$  式に代入すると

$$f_a = v_a \cdot z_2 \cdot \exp \left\{ \mu_2 \cdot \left( -\frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \right) \cdot \ln \left( \frac{1}{z_1} \cdot \frac{u_a}{v_a} \right) + \delta^* \right\} = v_a \cdot z_2 \cdot \exp \left\{ -K \cdot \ln \left( \frac{u_a}{v_a} \right) + K \cdot \ln z_1 + \delta^* \right\} \dots \dots \dots (5)$$

$$K = \frac{\mu_2}{\mu_1 - \mu_2}, \quad c = z_2 = \frac{4\pi}{k_1(2) \cdot k_2(2)}, \quad w = K \cdot \ln z_1 + \delta^* = K \cdot \ln \left( \frac{k_1(1) \cdot k_2(1)}{k_1(2) \cdot k_2(2)} \right) + \delta^*$$

(K, c, w : 定数)

計数率だけにすると

$$\frac{v_a u_a^{-k} \cdot v_a^k \cdot v_a^{-k}}{v_a^{-k} \cdot u_a^k \cdot u_a^{-k}} = \frac{v_a^k \cdot v_a}{u_a^k} = \frac{v_a^{k+1}}{u_a^k}$$

$$f_a = c \cdot v_a \cdot \exp \left\{ -K \cdot \ln \left( \frac{u_a}{v_a} \right) + w \right\} \dots \dots \dots (6)$$

同様に

$$f_c = c \cdot v_c \cdot \exp\left\{-K \cdot \ln\left(\frac{u_c}{v_c}\right) + w\right\} \dots \dots \dots (7)$$

$$f_a = c \cdot v_a \cdot \exp\left\{\ln\left(\frac{u_a}{v_a}\right)^{-K} + w\right\} = c \cdot \exp(w) \cdot v_a \cdot \left(\frac{u_a}{v_a}\right)^{-K} = c^* \frac{v_a^{K+1}}{u_a^K} \dots \dots (8)$$

$$\frac{\partial f_a}{\partial u_a} = c^* \cdot (-K) \cdot \frac{v_a^{K+1}}{u_a^K} \cdot \frac{1}{u_a} = f_a \cdot \frac{-K}{u_a}$$

$$\frac{1}{U_a^k} = \left(\frac{1}{U_a}\right)^k$$

$$\frac{\partial f_a}{\partial v_a} = c^* \cdot (K+1) \cdot \frac{v_a^{K+1}}{u_a^K} \cdot \frac{1}{v_a} = f_a \cdot \frac{K+1}{v_a}$$

$$V_a \text{を一つ小さくするため } \frac{1}{V_a} = (V_a^{-1})$$

$A = (\ell + 2\Delta)^2 \frac{f_a \cdot f_c}{f_a + f_c + 2\sqrt{f_a \cdot f_c}}$  を偏微分すると

$$\frac{\partial A}{\partial u_a} = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial u_a} \left( \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right)^2 = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial f_a} \left( \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right)^2 \cdot \frac{\partial f_a}{\partial u_a} \dots \dots (9)$$

$$\text{ここで } \frac{\partial}{\partial f_a} \left( \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right)^2 = 2 \cdot \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \cdot \frac{\partial}{\partial f_a} \left( \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h}{f+g} \right) = \frac{h'(f+g) - h(f'+g')}{(f+g)^2}$$

$$f_a = f_a^{1/2} \\ \frac{\partial}{\partial f_a} = \frac{1}{2} f_a^{-1/2}$$

$$= 2 \cdot \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2} f_a^{-1/2}\right) \sqrt{f_c} (\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}) - \sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c} \left(\frac{1}{2} f_a^{-1/2}\right)}{(\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c})^2} \\ = \frac{\sqrt{f_c} (\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c} + \sqrt{f_c} \cdot \sqrt{f_c} - \sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c})}{(\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c})^3} = \left( \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right)^3 \dots \dots (10)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial u_a} = f_a \cdot \frac{(-K)}{u_a}$$

$$\text{従つて } \frac{\partial A}{\partial u_a} = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \left( \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right)^3 \cdot f_a \cdot \frac{-K}{u_a} = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \underbrace{\left( \frac{\sqrt{f_a} \cdot \sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \right)^2}_{A} \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \cdot \frac{-K}{u_a} \\ = (\ell + 2\Delta)^2 \cdot \frac{\sqrt{f_a}^2 \cdot \sqrt{f_c}^2}{(\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c})^2} \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \cdot \frac{-K}{u_a} \\ = A \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \cdot \frac{-K}{u_a} \dots \dots \dots (11)$$

同様に

$$\frac{\partial A}{\partial v_a} = A \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}} \cdot \frac{K+1}{v_a} \quad \dots \dots \dots (12)$$

誤差の伝播の式  $A = F(u_a, u_c, v_a, v_c)$

$$(\Delta A)^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial u_a}\right)^2 \cdot (\Delta u_a)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial v_a}\right)^2 \cdot (\Delta v_a)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial u_c}\right)^2 \cdot (\Delta u_c)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial v_c}\right)^2 \cdot (\Delta v_c)^2$$

$$\text{ここで} \left(\frac{\partial A}{\partial u_a}\right)^2 \cdot (\Delta u_a)^2 = A^2 \left(\frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}}\right)^2 \cdot K^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_a}{u_a}\right)^2$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial v_a}\right)^2 \cdot (\Delta v_a)^2 = A^2 \left(\frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}}\right)^2 \cdot (K+1)^2 \cdot \left(\frac{\Delta v_a}{v_a}\right)^2$$

同様に

$$\left(\frac{\partial A}{\partial u_c}\right)^2 \cdot (\Delta u_c)^2 = A^2 \left(\frac{\sqrt{f_a}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}}\right)^2 \cdot K^2 \cdot \left(\frac{\Delta u_c}{u_c}\right)^2$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial v_c}\right)^2 \cdot (\Delta v_c)^2 = A^2 \left(\frac{\sqrt{f_a}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}}\right)^2 \cdot (K+1)^2 \cdot \left(\frac{\Delta v_c}{v_c}\right)^2$$

従って

$$\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}}\right)^2 \left\{ K^2 \left(\frac{\Delta u_a}{u_a}\right)^2 + (K+1)^2 \left(\frac{\Delta v_a}{v_a}\right)^2 \right\} + \left(\frac{\sqrt{f_a}}{\sqrt{f_a} + \sqrt{f_c}}\right)^2 \left\{ K^2 \left(\frac{\Delta u_c}{u_c}\right)^2 + (K+1)^2 \left(\frac{\Delta v_c}{v_c}\right)^2 \right\} \dots \dots \dots (13)$$

2. 線源位置設定法

ウラン量算出式

$$A = (x + \Delta)(y + \Delta)\sqrt{f_a \cdot f_b} \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{\partial f_a}{\partial u_a} = f_a \cdot \left( \frac{-K}{u_a} \right), \quad \frac{\partial f_a}{\partial v_a} = f_a \cdot \left( \frac{K+1}{v_a} \right)$$

ここで独立変数を  $x, y, u_a, v_a, u_b, v_b$  とすると

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial u_a} &= (x + \Delta)(y + \Delta)\sqrt{f_b} \cdot \frac{1}{2\sqrt{f_a}} \cdot \frac{\partial f_a}{\partial u_a} = (x + \Delta)(y + \Delta)\sqrt{f_b} \cdot \frac{1}{2\sqrt{f_a}} \cdot \left( \frac{-K}{u_a} \right) \cdot f_a \\ &= A \cdot \left( -\frac{K}{2} \right) \cdot \frac{1}{u_a} \dots \dots \dots (15) \end{aligned}$$

同様にして

$$\frac{\partial A}{\partial v_a} = A \cdot \left( \frac{K+1}{2} \right) \cdot \frac{1}{v_a} \dots \dots \dots (16)$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} = (y + \Delta) \cdot \sqrt{f_a \cdot f_b} = \frac{A}{x + \Delta}$$

$\Delta A$  を次の式で考える。

$$\begin{aligned} (\Delta A)^2 &= \left( \frac{\partial A}{\partial u_a} \right)^2 (\Delta u_a)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial v_a} \right)^2 (\Delta v_a)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial u_b} \right)^2 (\Delta u_b)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial v_b} \right)^2 (\Delta v_b)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 (\Delta x)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 (\Delta y)^2 \\ (\Delta A)^2 &= A^2 \left( \frac{K^2}{4} \right) \left( \frac{\Delta u_a}{u_a} \right)^2 + A^2 \frac{(K+1)^2}{4} \left( \frac{\Delta v_a}{v_a} \right)^2 + A^2 \left( \frac{K^2}{4} \right) \left( \frac{\Delta u_b}{u_b} \right)^2 + A^2 \frac{(K+1)^2}{4} \left( \frac{\Delta v_b}{v_b} \right)^2 + \frac{(\Delta x)^2}{(x + \Delta)^2} A^2 + \frac{(\Delta y)^2}{(y + \Delta)^2} A^2 \end{aligned}$$

ここで  $\Delta x, \Delta y$  をメッシュの 1/2 の距離  $\beta$  とすると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \left( \frac{\Delta A}{A} \right)^2 &= \frac{K^2}{4} \cdot \left( \frac{\Delta u_a}{u_a} \right)^2 + \frac{(K+1)^2}{4} \cdot \left( \frac{\Delta v_a}{v_a} \right)^2 + \frac{K^2}{4} \cdot \left( \frac{\Delta u_b}{u_b} \right)^2 + \frac{(K+1)^2}{4} \cdot \left( \frac{\Delta v_b}{v_b} \right)^2 + \left( \frac{\beta}{x + \Delta} \right)^2 + \left( \frac{\beta}{y + \Delta} \right)^2 \\ &\dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

3. グロス計数率による評価

$N(3)$  を  $u$ (サフィクスは同じ)と簡略して書くと核種量は次の様になる。

$$Q_T = Q_a + Q_b + Q_c + Q_d = \frac{u_a}{cZ_a} + \frac{u_b}{cZ_b} + \frac{u_c}{cZ_c} + \frac{u_d}{cZ_d} \dots \dots (18)$$

ここで、誤差要因として次の 2 種類を想定する。

- ①計数誤差： $\Delta u_a, \Delta u_b, \Delta u_c, \Delta u_d$ (それぞれ独立)
- ②分布している長さに関する誤差： $\Delta X_a, \Delta X_b (X_c = l - X_a, X_d = l - X_b)$

$$Z(y) = \frac{1}{y} \int_b^y \frac{e^{-aX}}{(X + \Delta)^2} dX \quad \text{但し } \alpha = \mu_2 \rho_0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial y} = -\frac{1}{y^2} \int_b^y \frac{e^{-aX}}{(X + \Delta)^2} dX + \frac{1}{y} \frac{e^{-ay}}{(y + \Delta)^2} = -\frac{Z}{y} \cdot F(y)$$

ここで  $F(y) = 1 - \frac{ye^{-ay}}{(y + \Delta)^2} / \left( \int_b^y \frac{e^{-aX}}{(X + \Delta)^2} dX \right)$

$$X_c = l - X_a \text{ のため } \frac{\partial Z_c}{\partial X_a} = \frac{\partial Z_c}{\partial X_c} \cdot \frac{\partial X_c}{\partial X_a} = -\frac{\partial Z_c}{\partial X_c}$$

交点がメッシュ中心にあるとしているが、交点がメッシュ内に分布するとし、 $X_a, X_b$  の標準偏差を  $\beta$  とした時  $3\beta = \text{メッシュ幅} / 2$  で考える。

$$\frac{\partial Q_T}{\partial X_a} = \frac{-u_a}{cZ_a^2} \cdot \frac{\partial Z_a}{\partial X_a} + \frac{u_c}{cZ_c^2} \cdot \frac{\partial Z_c}{\partial X_c} = -Q_a \cdot \frac{F(X_a)}{X_a} + Q_c \cdot \frac{F(X_c)}{X_c}$$

従って、次の変化となる。

$$\Delta Q_T(\Delta u_a) = \frac{\Delta u_a}{cZ_a} = Q_a \cdot \left( \frac{\Delta u_a}{u_a} \right)$$

$$\Delta Q_T(\Delta X_a) = - \left\{ Q_a \cdot F(X_a) \cdot \frac{\Delta X_a}{X_a} - Q_c \cdot F(X_c) \cdot \frac{\Delta X_a}{X_c} \right\}$$

$Q_T$  の標準偏差  $\Delta Q_T^*$  は誤差伝播の式を適用することにより次の様になる。(\*で各変数の標準偏差を示す。  $\Delta X_a^* = \Delta X_b^* = \beta$  とおく)

$$\begin{aligned} \Delta Q_T^{*2} = & Q_a^2 \cdot \left( \frac{\Delta u_a^*}{u_a} \right)^2 + Q_b^2 \cdot \left( \frac{\Delta u_b^*}{u_b} \right)^2 + Q_c^2 \cdot \left( \frac{\Delta u_c^*}{u_c} \right)^2 + Q_d^2 \cdot \left( \frac{\Delta u_d^*}{u_d} \right)^2 \\ & + \left( Q_a \cdot F(X_a) \cdot \frac{\beta}{X_a} - Q_c \cdot F(X_c) \cdot \frac{\beta}{X_c} \right)^2 + \left( Q_b \cdot F(X_b) \cdot \frac{\beta}{X_b} - Q_d \cdot F(X_d) \cdot \frac{\beta}{X_d} \right)^2 \\ & \dots \dots \dots (19) \end{aligned}$$

線源が複数の場合は、各線源に対する  $\Delta Q_T^{*2}$  の加算値の平方根で全体の標準偏差を求める。

## ピーク比の算出における変動係数

ウランと Bi-214 が同じ様に分布しているとして以下の取扱いをする。

## 1. ピーク比の変動係数の算出

(1) Bi-214 のピーク比  $P_B$ 

$$P_B = \frac{m_1}{m_3} \quad \text{但し, } m_1 : 609.3\text{keV のピーク計数率}$$

$$m_3 : 1120\text{keV のピーク計数率}$$

$\Delta$  で標準偏差を示すとする  $u(x,y,z,\dots)$  の標準偏差は誤差の伝播の式より次の様に与えられる。

$$(\Delta u)^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots$$

従って、

$$(\Delta P_B)^2 = \left(\frac{1}{m_3}\right)^2 \cdot (\Delta m_1)^2 + \left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta m_3}{m_3}\right)^2 = P_B^2 \left\{ \left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_3}{m_3}\right)^2 \right\}$$

$$\sigma_B^2 = \left(\frac{\Delta P_B}{P_B}\right)^2 = (\sigma_1^*)^2 + (\sigma_3^*)^2$$

$$\sigma_1^* = \frac{\Delta m_1}{m_1}, \quad \sigma_3^* = \frac{\Delta m_3}{m_3} \quad \text{ここで } \sigma_1^*, \sigma_3^* \text{ は } m_1, m_3 \text{ の変動係数となる。}$$

$$\sigma_B^2 = (\sigma_1^*)^2 + (\sigma_3^*)^2$$

但し,  $\sigma_B$  :  $P_B$  の変動係数

$\sigma_1^*$  :  $m_1$  の変動係数

$\sigma_3^*$  :  $m_3$  の変動係数

$$P_u = \frac{n_1 - \delta_1 - \delta_2}{n_3}$$

但し,  $n_1$  : 766keV のピーク計数率

$n_3$  : 1001keV のピーク計数率

$\delta_1$  : Bi-214 からの寄与

$\delta_2$  : Pb-211 からの寄与

## (2) ウランのピーク比

① Bi-214 からの寄与・・・エネルギーで内挿する。

$$g_i = \left(\frac{m}{k_1 \cdot k_2}\right)_i$$

$m$ : Bi-214 の計数率

$i=1$  : 609.3keV

$i=2$  : 768.4keV

$i=3$  : 1120keV

$$\ln g_2 - \ln g_1 = \frac{\ln g_3 - \ln g_1}{\ln E_3 - \ln E_1} \cdot (\ln E_2 - \ln E_1)$$

$$\omega = \frac{\ln(E_2/E_1)}{\ln(E_3/E_1)} = 0.38109$$

$$\ln(g_2/g_1) = \ln(g_3/g_1)^\omega \rightarrow g_2 = g_3^\omega \cdot g_1^{(1-\omega)}$$

$$\delta = \frac{(k1 \cdot k2)_2}{(k1 \cdot k2)_3^\omega \cdot (k1 \cdot k2)_1^{1-\omega}} \cdot m_3^\omega \cdot m_1^{1-\omega} = c \cdot m_3^\omega \cdot m_1^{1-\omega}$$

ここで c は定数

②ウランのピーク比

$$P_u = \frac{n_1 - \delta}{n_3} = \frac{n_1}{n_3} - \frac{\delta}{n_3} = P_0 - P_D$$

$$P_0 = \frac{n_1}{n_3}, \quad P_D = \frac{\delta}{n_3}$$

ここで、

$$\frac{\partial P_u}{\partial n_1} = \frac{1}{n_3}, \quad \frac{\partial P_u}{\partial n_3} = -\frac{n_1 - \delta}{n_3^2} = -P_u \cdot \frac{1}{n_3}, \quad \frac{\partial P_u}{\partial m_1} = -\frac{1}{n_3} \frac{\omega \cdot \delta}{m_1}$$

$$\frac{\partial P_u}{\partial m_3} = -\frac{1}{n_3} \frac{(1-\omega) \cdot \delta}{m_3}$$

従って、

$$(\Delta P_u)^2 = P_0^2 \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_3^2) + P_D^2 \cdot \left\{ \omega^2 (\sigma_1^*)^2 + (1-\omega)^2 (\sigma_3^*)^2 + \sigma_3^2 \right\}$$

$$\text{但し、} (\Delta P_u)^2 = \frac{1}{n_3^2} \cdot \left\{ \left( \frac{\partial \delta}{\partial m_1} \right)^2 (\Delta m_1)^2 + \left( \frac{\partial \delta}{\partial m_3} \right)^2 (\Delta m_3)^2 \right\} + \left( \frac{\delta}{n_3} \right)^2 \cdot \left( \frac{\Delta n_3}{n_3} \right)^2$$

$$\left( \frac{\partial \delta}{\partial m_1} \right)^2 = \omega^2 \cdot \delta^2 \cdot \left( \frac{1}{m_1} \right)^2$$

$$\left( \frac{\partial \delta}{\partial m_3} \right)^2 = (1-\omega)^2 \cdot \delta^2 \cdot \left( \frac{1}{m_3} \right)^2$$

上式を  $P_u^2 = (P_0 - P_D)^2$  で割ると、次の式になる。

$$\sigma_u^2 = \frac{P_0^2}{(P_0 - P_D)^2} (\sigma_1^2 + \sigma_3^2) + \frac{P_D^2}{(P_0 - P_D)^2} \left\{ \omega^2 \cdot (\sigma_1^*)^2 + (1-\omega)^2 \cdot (\sigma_3^*)^2 + \sigma_3^2 \right\}$$

但し、 $\delta_2 = 0$  の場合の式である。

$\sigma_u$  はピーク比  $P_u$  の変動係数

$\sigma_1, \sigma_3$  は  $n_1, n_3$  の変動係数

$\sigma_1^*, \sigma_3^*$  は  $m_1, m_3$  の変動係数

・ピーク比の設定

$\sigma_B < \sigma_u$  の時・・・ $P_B$  を用いて実効減衰距離補正



$\sigma_u < \sigma_B$  の時・・・ $P_u$  を用いて実効減衰距離補正

2. 子孫核種が多いケースへの切換え

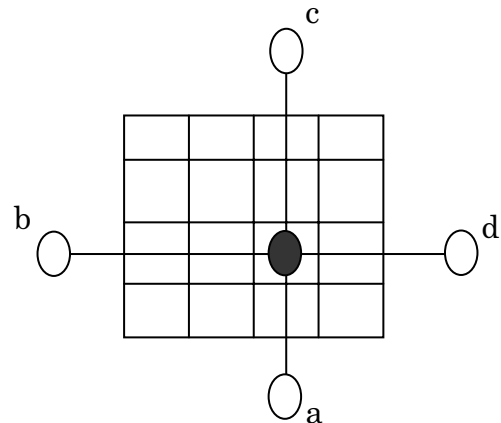
(1) 判別指標

Ge での計数率分布

各点の 766keV のピーク計数率 :  $N_1$   
 子孫核種の寄与を補正した 766keV の  
 ピーク計数率 :  $N_1^*$

$$R1 = N_1^* / N_1$$

- ① 各 a,b,c,d で 766keV のピーク計数率の比  $R1$  の最小値(ゼロ以外の値)・・・ $R1(N)$   $N$  は線源番号
- ② 線源のうち  $R1(N)$  の最小値 :  $RX1$



(2) 使い分け

$RX1 \geq RX1MCA$ ・・・ウランケースで解析

$0.95 > RX1MCA > 0$ ・・・子孫核種で解析

ピーク比による補正を考えると次の様になる。

- ・ 子孫核種の影響を補正しない時のピーク比 :  $P$
- ・ 子孫核種の影響を補正した時のピーク比 :  $P^*$

$$P^* = P \times R1$$

影響の大きさ

$$\omega = \frac{\mu_2}{\mu_1 - \mu_2}$$

ここで、 $\mu$  : 線吸収係数

サフィックス=1 : 766keV

2:1001keV

鉄,塩化ビニル,コンクリートで  $\omega = 7.18 \sim 7.37$

$$F = \exp(-\omega \ln P^*) = \exp(-\omega \ln R1) \cdot \exp(-\omega \ln P)$$

補正することによる効果

$$g = \exp(-\omega \ln R1)$$

$R1$  の最小値 :  $RX1$ ,  $RX1 = 0.95$  の時  $g = 1.45 \sim 1.46$

## 均一・均質体系の評価ルーチン

均一・均質体系の評価ルーチンとして、以下の機能とした。

## 1. 判別方法

① 次の記号を用いる。

$N_1(I, J)$  : 766keV の位置 I, 検出器番号 J(J=1~3)の計数率

$N_2(I, J)$  : 1001keV の位置 I, 検出器番号 J(J=1~3)の計数率

$N_G(I, J)$  : グロスの位置 I, 検出器番号 J(J=1~3)の計数率

$N_1^*(J), N_2^*(J), N_G^*(J)$  : 位置に対する平均値

② 判別指標

$$\left\{ \frac{N_1(I, J) - N_1(J)^*}{N_1(J)^*} \right\}_{\max} < \varepsilon$$

$$\left\{ \frac{N_2(I, J) - N_2(J)^*}{N_2(J)^*} \right\}_{\max} < \varepsilon$$

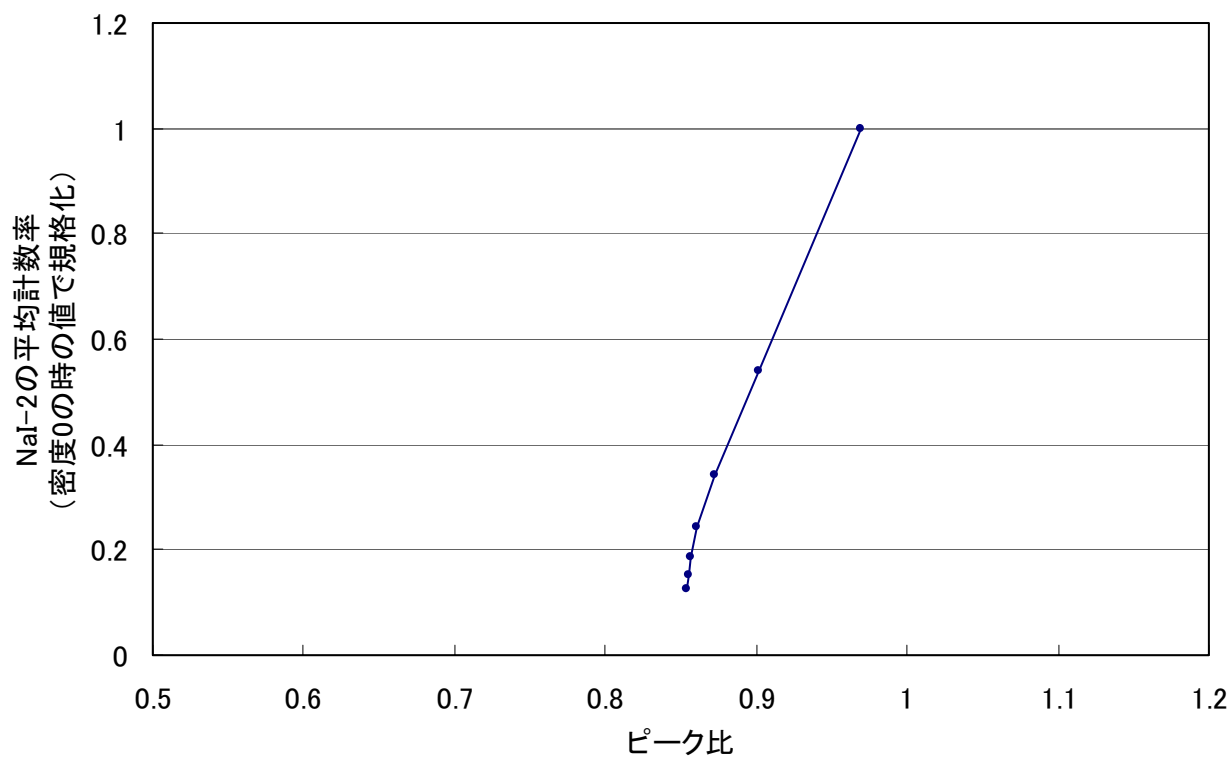
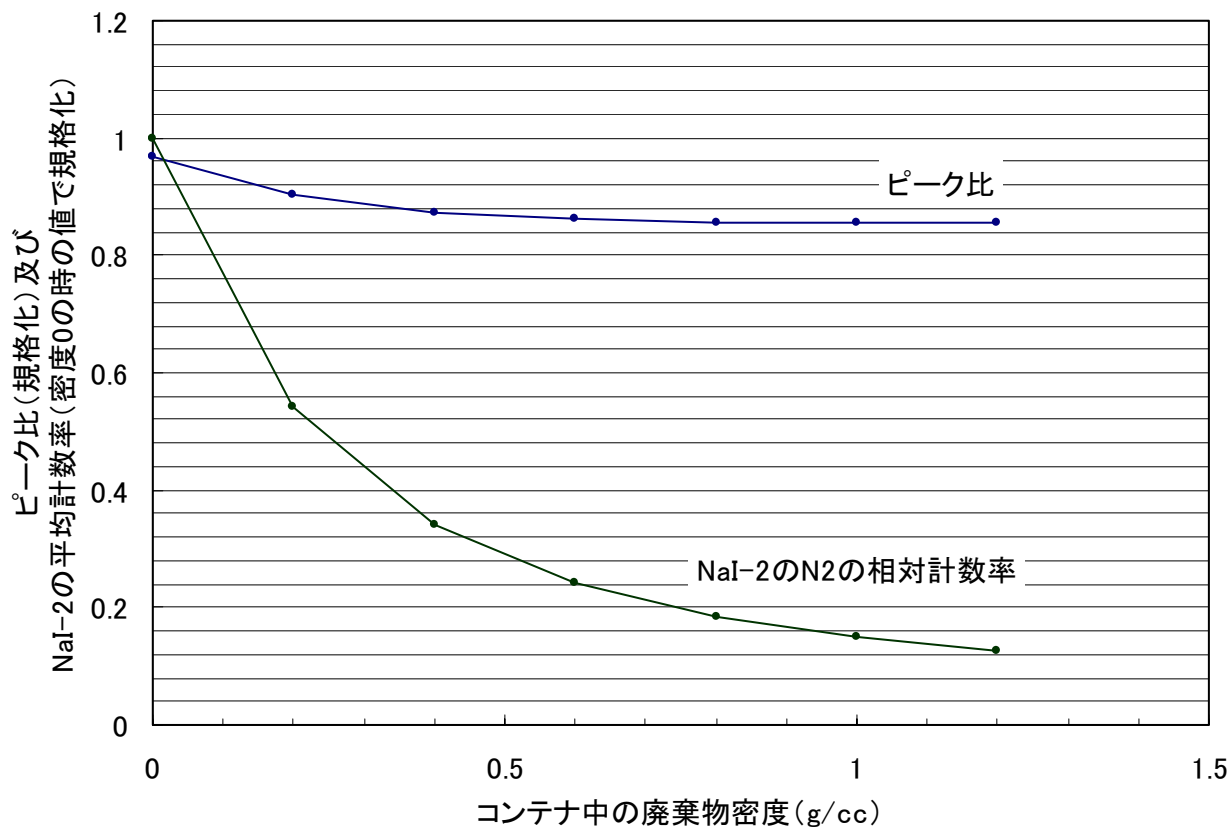
$$\left\{ \frac{N_G(I, J) - N_G(J)^*}{N_G(J)^*} \right\}_{\max} < \varepsilon \quad (\varepsilon = 0.15 \text{ を想定})$$

上記 3 条件を満足した時、均一・均質体系として取扱う。

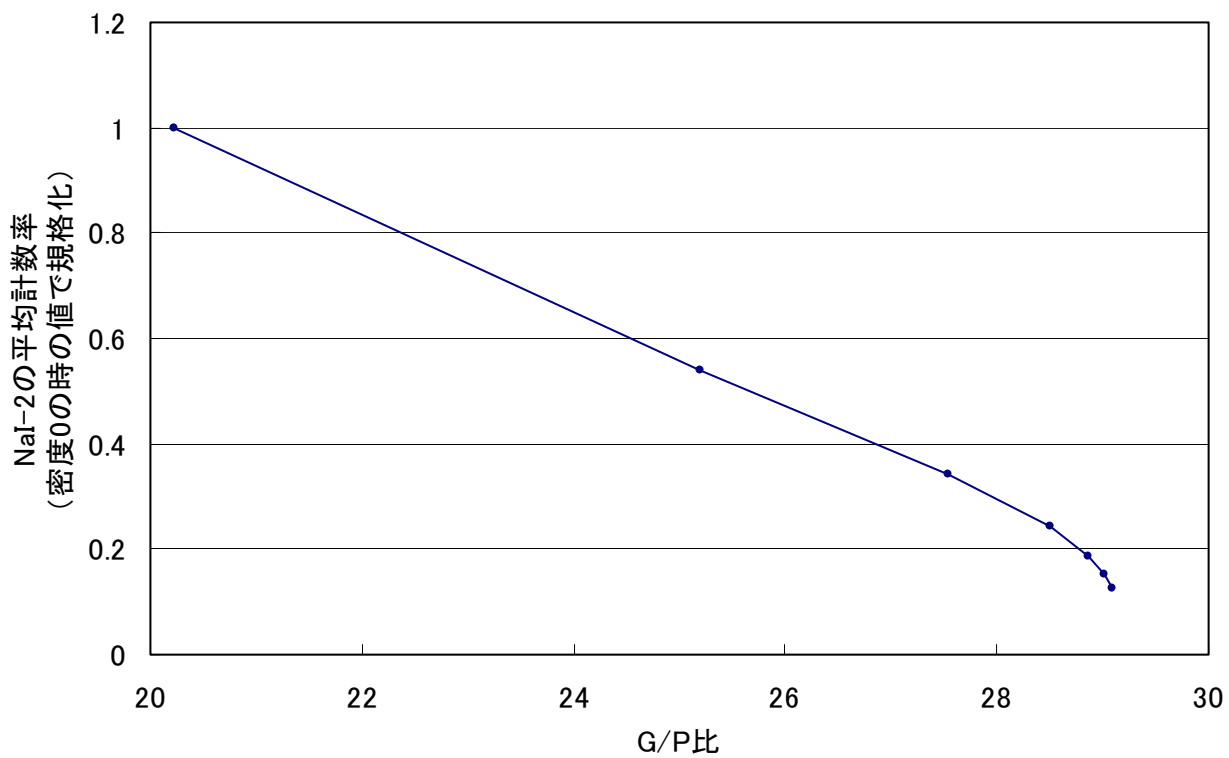
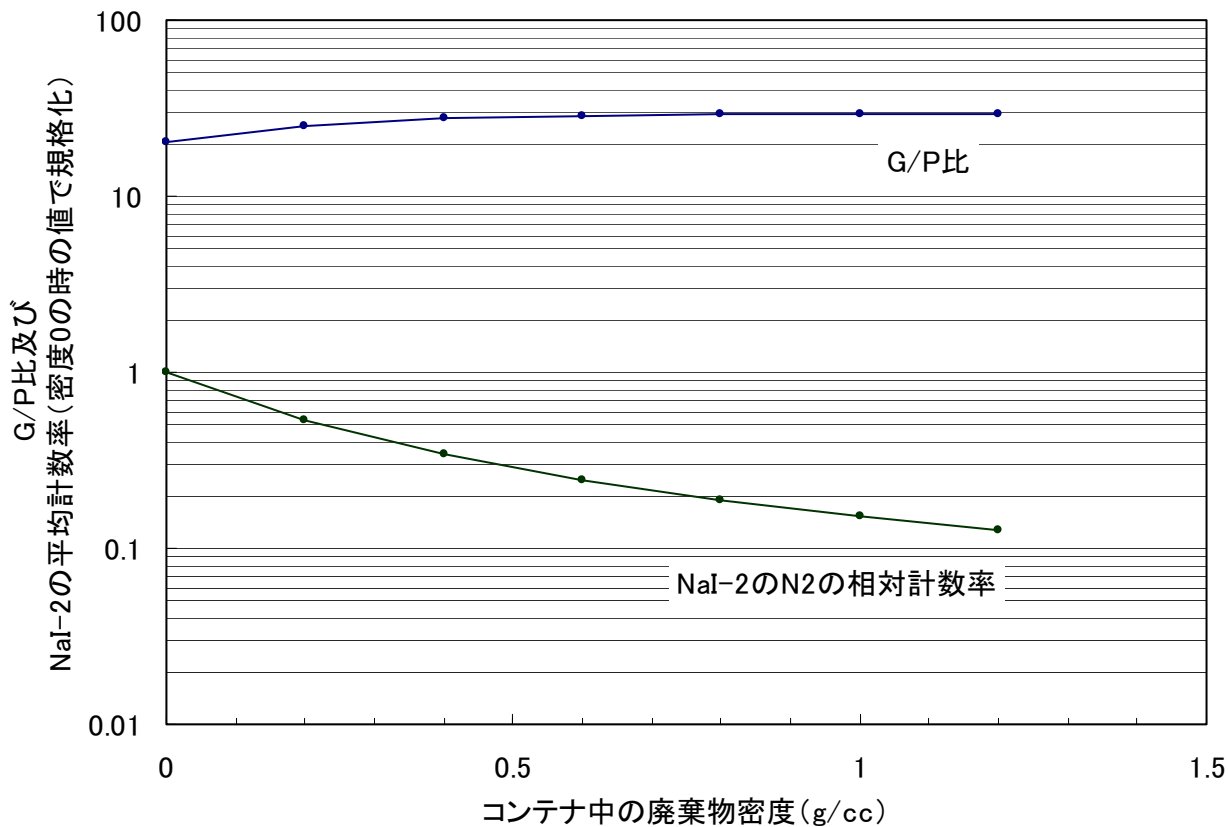
## 2. 補正係数

コンテナ中の廃棄体の密度が変化した時の 1001keV のピーク計数率の相対値（密度が 0.0 の時の値で規格化）とピーク比，グロス・ピーク比（G/P）の対応を添 5-図 1, 添 5-図 2 に示した。

ピーク比又はグロス・ピーク比でピーク計数率の減衰をよみとり，減衰補正してコンテナ中の放射エネルギーを求めることができる。



添 5-図 1 均一体系での平均密度・1001keV のピーク計数率・ピーク比の対応



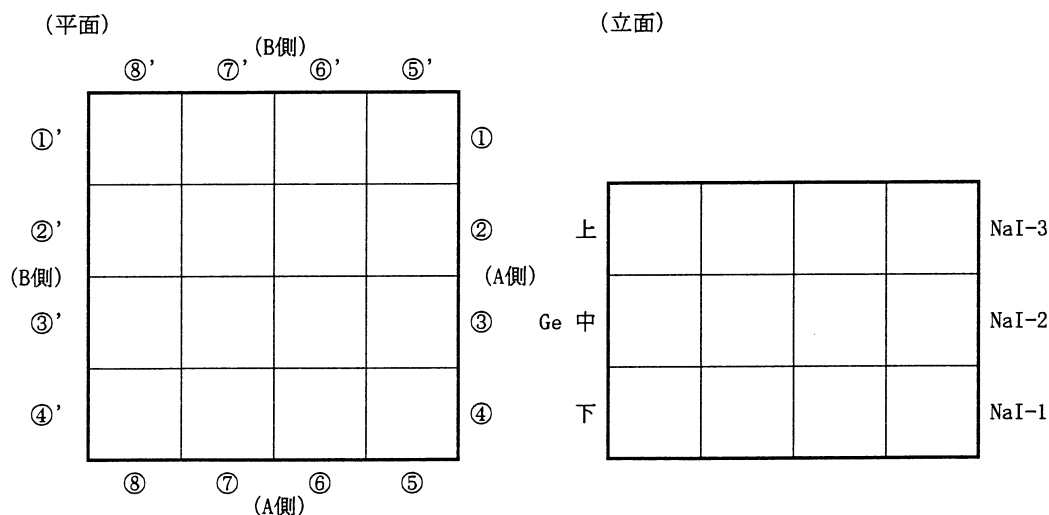
添 5-図 2 均一体系での平均密度・1001keV のピーク計数率・G/P 比の対応

非破壊測定結果

(1) 測定条件

- 廃棄体種類 : 0-01
- 廃棄体番号 (試験番号) : 100g
- 廃棄体重量 : 1.3000E+03 kg
- 測定年月日 : 2004年 10月 19日
- 廃棄体情報, 測定条件等 : No. C15 U:100g 配置o コンテナ
- ファイル名 : C15. CSV
- 水中BG情報等 : water
- ファイル名 : NDABG2C01. CSV
- 気中BG情報等 : 20040126
- ファイル名 : BG空コンテナC01. CSV
- 測定時間 : 900秒測定 16回 TOTAL 2.40E+02 分

(2) 計数率分布



NaI, Ge計数率 (Net cps, U-238の場合: 1001keV, Co-60の場合: 1333keV)

測定場所	NaI-1		NaI-2		NaI-3		Ge	
	A側	B側	A側	B側	A側	B側	A側	B側
①	0.00E+00	4.49E-01	0.00E+00	5.85E-01	0.00E+00	6.34E-01	0.00E+00	6.11E-02
②	0.00E+00	8.47E-01	1.38E+01	8.56E-01	0.00E+00	5.16E-01	1.50E+00	7.17E-02
③	0.00E+00	6.28E-01	0.00E+00	7.02E-01	0.00E+00	4.22E-01	0.00E+00	5.78E-02
④	3.05E-01	3.86E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.65E-01	0.00E+00	0.00E+00
⑤	1.33E+00	9.76E-01	1.58E+00	2.66E+00	1.04E+00	9.95E-01	1.22E-01	2.74E-01
⑥	5.53E-01	0.00E+00	5.77E-01	5.10E-01	3.16E-01	0.00E+00	3.28E-02	0.00E+00
⑦	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
⑧	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.47E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

(3) 評価結果

- 評価条件
  - ケース : U-238 (11)
  - 材質 : 鉄
  - 解法 : ピーク (線源メッシュ数 1)
- 評価時の情報等 : 測定試験 (コンテナ)
- 評価値 : 7.73E+01 gU-238
- (検出下限値: (中央部) — , (表層部) — )
- σ (相対値) : 4.99E-01

コンテナ測定結果出力例

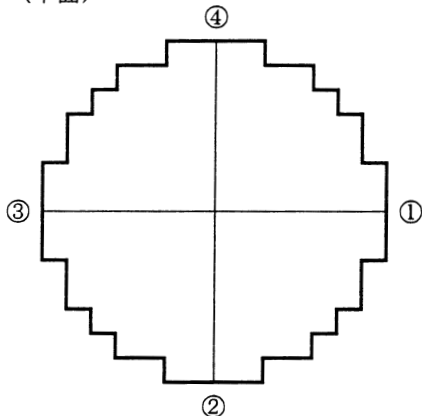
非破壊測定結果

(1) 測定条件

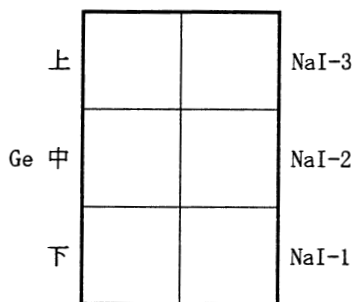
- 廃棄体種類 : A1
- 廃棄体番号 (試験番号) : U500g\_ドラム\_遮蔽
- 廃棄体重量 : 2.0000E+02 kg
  
- 測定年月日 : 2004年 10月 19日
  
- 廃棄体情報, 測定条件等  
 ファイル名 : D20 U500g Fe:10.7mm 配置a ドラム  
 : D20.CSV
  
- 水中BG情報等  
 ファイル名 : BG:水中(ドラム缶), 900sec, ステップ運転  
 : 水中ドラム缶BG.CSV
- 気中BG情報等  
 ファイル名 : ドラム缶水  
 : BGBG1C01空.CSV
  
- 測定時間 : 900秒測定 4回 TOTAL 6.00E+01 分

(2) 計数率分布

(平面)



(立面)



NaI, Ge計数率 (Net cps, U-238の場合: 1001keV, Co-60の場合: 1333keV)

	NaI-1	NaI-2	NaI-3	Ge
①	3.46E+00	5.63E+00	3.10E+00	5.29E-01
②	3.42E+00	5.57E+00	2.91E+00	5.68E-01
③	3.12E+00	5.59E+00	3.09E+00	5.62E-01
④	3.47E+00	5.69E+00	2.93E+00	5.62E-01

(3) 評価結果

- 評価条件  
 ケース : U-238 (21)  
 材質 : 鉄  
 解法 : ピーク (線源メッシュ数 1)
  
- 評価時の情報等 : 測定試験 (ドラム缶)
  
- 評価値 : 4.55E+02 gU-238  
 : (検出下限値: (中央部) — , (表層部) — )
  
- σ (相対値) : 2.98E-01

ドラム缶測定結果出力例