



JAEA-Review

2011-039

JAEA-Review

ウラン廃棄物の非破壊測定実績

Nondestructive Measurement Results of Uranium-contaminated Wastes
Using the Passive Gamma Method

鈴木 敏 小松崎 崇 田所 秀明 大木 耕一

Satoshi SUZUKI, Takashi KOMATSUZAKI, Hideaki TADOKORO and Koichi OHKI

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
環境技術管理部

Waste Management Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

January 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

ウラン廃棄物の非破壊測定実績

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部

鈴木 敏*、 小松崎 崇*、 田所 秀明*、 大木 耕一

(2011 年 10 月 19 日受理)

本報は、パッシブガンマ法により 200ℓ ドラム缶及びコンテナ（約 1m³）に封入されたウラン廃棄物中のウラン量評価に適用する非破壊測定装置の概要、評価手法及び実廃棄物の測定結果等についてまとめたものである。

本測定において得られた結果を以下に示す。

- ① ドラム缶廃棄物の測定は、平成 10 年より開始し、平成 23 年 3 月末現在で、18,884 本（うちピット廃棄物※4,703 本）である。
- ② コンテナ廃棄物の測定は、平成 16 年より開始し、平成 23 年 3 月末現在で、749 基（うちピット廃棄物 110 基）である。
- ③ 測定作業は、廃棄物の移動・セッティング、データ解析等を含めて、1 日あたりドラム缶廃棄物は 8~12 本、コンテナ廃棄物は 1 基であった。
- ④ ドラム缶廃棄物については約 6 割、コンテナ廃棄物については約 8 割が金属及びコンクリート・土砂類であった。
- ⑤ ドラム缶廃棄物は 75%が検出下限値未満で、U-238 の平均濃度は 3.4Bq/g であった。また、コンテナ廃棄物は 17%が検出下限値未満で、U-238 の平均濃度は 2.3Bq/g であった。
- ⑥ クリアランスレベル 1.0Bq/g (IAEA RS-G-1.7) を基準とした場合、ドラム缶廃棄物、コンテナ廃棄物ともに約 8 割がクリアランスレベルを下まわっている。

* ウラン製錬関係施設から発生した廃棄物

Nondestructive Measurement Results of Uranium-contaminated Wastes
Using the Passive Gamma Method

Satoshi SUZUKI*, Takashi KOMATSUZAKI*, Hideaki TADOKORO*
and Koichi OHKI

Waste Management Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 19, 2011)

This report summarizes outline, methods and measurement results of actual wastes of nondestructive measurement system using the passive gamma method applied to the evaluation of the quantity of uranium in the drum waste(0.2m^3) and container waste(1m^3).

The following are the results.

- ① The measurement number of drum wastes was 18,884(4,703 of the number were pit wastes*), for from 1998 to the end of March, 2011.
- ② The measurement number of container wastes was 749(110 of the number were pit wastes), for from 2004 to the end of March, 2011.
- ③ Measurement number is 8~12 drums and 1 container per day, including setting of wastes, analysis of data.
- ④ About 60% of drum wastes and about 80% of container wastes were metal and concrete.
- ⑤ 75% of drum wastes were less than detection limit, and average of radioactivity is $3.4\text{Bq}(\text{U-238})/\text{g}$. Then 17% of container wastes were less than detection limit, and average of radioactivity is $2.3\text{Bq}(\text{U-238})/\text{g}$.
- ⑥ If clearance level is $1.0\text{Bq}(\text{U-238})/\text{g}$ (IAEA RS-G-1.7), about 80% of wastes are below the clearance level.

* Wastes discarded from uranium smelting facilities

Keywords : Passive Gamma Method, Drum, Container, Uranium, Nondestructive

* : E&E Techno Service Co.,Ltd.

目次

1. はじめに -----	1
2. 装置概要 -----	2
2.1 UWGS2 -----	2
2.2 CDAS -----	2
2.3 測定対象物 -----	7
3. 評価概要 -----	9
3.1 UWGS2 -----	9
3.2 CDAS -----	13
4. 校正 -----	16
4.1 線源 -----	16
4.2 UWGS2 -----	16
4.3 CDAS -----	25
5. 測定試験 -----	29
5.1 UWGS2 -----	29
5.2 CDAS -----	33
6. 廃棄物測定 -----	37
6.1 非破壊測定実績 -----	37
6.2 ドラム缶廃棄物測定 -----	39
6.3 コンテナ廃棄物測定 -----	48
6.4 メンテナンス -----	61
6.5 計量管理 -----	64
7. まとめ -----	65
7.1 UWGS2 及びドラム缶廃棄物測定結果 -----	65
7.2 CDAS 及びコンテナ廃棄物測定結果 -----	65
7.3 運用計画 -----	66
7.4 外部発表、報告 -----	67
参考文献 -----	69
付録 1 UWGS2 用外部透過線源 -----	70
付録 2 Co-60 (チェックソース) -----	71
付録 3 Ba-133 (チェックソース) -----	72
付録 4 Cs-137 (チェックソース) -----	73
付録 5 CDAS 用 Co-60 線源 -----	74

Contents

1. Introduction -----	1
2. Outline of device -----	2
2.1 UWGS2 -----	2
2.2 CDAS -----	2
2.3 Object of measurement -----	7
3. Evaluation method -----	9
3.1 UWGS2 -----	9
3.2 CDAS -----	13
4. Proofreading -----	16
4.1 Sources -----	16
4.2 UWGS2 -----	16
4.3 CDAS -----	25
5. Examinations -----	29
5.1 UWGS2 -----	29
5.2 CDAS -----	33
6. Measurement of actual wastes -----	37
6.1 Results -----	37
6.2 Drum wastes -----	39
6.3 Container wastes -----	48
6.4 Maintenance -----	61
6.5 Material Accountancy -----	64
7. Conclusions -----	65
7.1 UWGS2 and measurement results of drum wastes -----	65
7.2 CDAS and measurement results of container wastes -----	65
7.3 Plan for the future -----	66
7.4 Reports in external organization -----	67
Reference -----	69
Appendix 1 Traceability of Co-60 for UWGS2 -----	70
Appendix 2 Traceability of Co-60 for checking source -----	71
Appendix 3 Traceability of Ba-133 for checking source -----	72
Appendix 4 Traceability of Cs-137 for checking source -----	73
Appendix 5 Traceability of Co-60 for CDAS -----	74

図リスト

図 2.1 UWGS2 概念図	4
図 2.2 CDAS 概念図	5
図 3.1 UWGS2 評価フロー	10
図 3.2 ダイレクト吸収補正の考え方	11
図 3.3 近似吸収補正の考え方	12
図 3.4 CDAS 評価フロー	14
図 3.5 測定対象 γ 線	15
図 4.1 校正における幾何学的条件	19
図 4.2 エネルギーとチャンネルの関係	20
図 4.3 効率曲線	21
図 4.4 外部透過線源の初期値(I_0)測定における幾何学的条件	22
図 4.5 檢量線作成における幾何学的条件	23
図 4.6 U-238 量と 1001keV 計数率の関係	24
図 4.7 分解能評価結果	27
図 4.8 検出器効率評価結果	27
図 4.9 UWSF_解析（効率設定画面）	28
図 5.1 線源偏在評価試験における幾何学的条件	30
図 5.2 線源偏在評価試験結果（感度分布）	32
図 5.3 空コンテナ内線源設置位置	34
図 5.4 天然ウラン 100g の線源位置による誤差の分布（空コンテナ）	36
図 6.1 ドラム缶廃棄物の内容物割合	41
図 6.2 ドラム缶廃棄物の U-238 濃度分布	43
図 6.3 ドラム缶廃棄物の内容物割合（ピット廃棄物）	45
図 6.4 ドラム缶廃棄物の U-238 濃度分布（ピット廃棄物）	46
図 6.5 処理体金属評価結果	47
図 6.6 コンテナ廃棄物の内容物割合	49
図 6.7 コンテナ廃棄物の U-238 濃度分布（評価法）	52
図 6.8 コンテナ廃棄物の U-238 濃度分布（種別）	53
図 6.9 コンテナ廃棄物の内容物割合（ピット廃棄物）	55
図 6.10 コンテナ廃棄物の U-238 濃度分布（ピット廃棄物）（評価法）	57
図 6.11 コンテナ廃棄物の U-238 濃度分布（ピット廃棄物）（種別）	58
図 6.12 検出下限値（NaI(Tl)検出器）	60
図 6.13 検出下限値（Ge 検出器）	60

表リスト

表 4.1 校正に使用した線源 -----	16
表 4.2 確認測定結果 -----	26
表 4.3 解析ソフト (UWSF_解析) における効率設定 -----	28
表 5.1 線源偏在評価試験結果 (UWGS2) -----	31
表 5.2 線源偏在評価試験結果 (CDAS) -----	35
表 6.1 非破壊測定実績 -----	38
表 6.2 ドラム缶廃棄物の内容物割合 -----	41
表 6.3 ドラム缶廃棄物のウラン区分 -----	42
表 6.4 ドラム缶廃棄物の発生元 -----	42
表 6.5 ドラム缶廃棄物の内容物割合 (ピット廃棄物) -----	45
表 6.6 コンテナ廃棄物の内容物割合 -----	49
表 6.7 コンテナ廃棄物のウラン区分 -----	50
表 6.8 コンテナ廃棄物の発生元 -----	50
表 6.9 評価ケース -----	51
表 6.10 コンテナ廃棄物の内容物割合 (ピット廃棄物) -----	55
表 6.11 評価ケース (ピット廃棄物) -----	56

写真リスト

写真 2.1 UWGS2 外観 -----	6
写真 2.2 CDAS 外観 -----	6
写真 2.3 ドラム缶外観 -----	8
写真 2.4 コンテナ外観 -----	8
写真 4.1 線源設置状況 -----	26
写真 6.1 使用前点検 (UWGS2) -----	62
写真 6.2 使用前点検 (CDAS) -----	62

1. はじめに

核燃料物質使用施設において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、放射性廃棄物中の放射性物質の数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 $1m^3$ のコンテナ（以下「コンテナ」という。）に大別される。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いたが、廃棄物屋外貯蔵ピット（以下「ピット」という。）^{注1)} の改善措置（平成9年9月）以降、ドラム缶廃棄物については、パッシブガンマ法を用いた非破壊測定装置¹⁾により測定を行い、コンテナ廃棄物についても、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い、平成16年1月より測定を行ってきた。

本報告書は、ドラム缶及びコンテナに封入されたウラン廃棄物中のウラン量評価に適用する非破壊測定装置^{2) 3) 4)}の装置概要、評価手法及び平成23年3月末までに実施した廃棄物の測定結果等についてまとめたものである。

注 1) 平成9年からピット内廃棄物の取出工事・閉鎖措置を行い、管理区域解除後、現在は倉庫（第1保管庫）として利用している。

2. 装置概要

ウラン廃棄物の非破壊測定に使用したドラム缶測定装置（Uranium Waste Gamma System No.2：以下「UWGS2」という。）及びコンテナ測定装置（Container and Drum Assay System：以下「CDAS」という。）の概要について記述する。

2.1 UWGS2

2.1.1 概要

UWGS2 は、検出部として Ge 検出器（プリアンプ内蔵）、計測・制御部、パソコン、ターンテーブル、外部透過線源等で構成されている。また、遮へい体を設けた検出器をハンドリフターに載せ、ターンテーブル及び計測・制御部もコンパクトな可搬型として、廃棄物保管施設等への移動を可能にしたものである。

装置概念図を図 2.1 に、外観を写真 2.1 に示す。

測定は、ターンテーブルにドラム缶を載せ、Ge 検出器の水平中心軸上の位置に外部透過線源として Co-60 を設置する。着目する γ 線は、U-238 と放射平衡である Pa-234m の 1001keV、外部透過線源 Co-60 の 1173keV 及び評価対象核種特有の γ 線で、ターンテーブルを 10rpm で回転させ、測定対象物の内容物を均一化し評価を行う。測定時間は、600 秒を基本にしているが、 γ 線の計測状況により延長させる。

2.1.2 装置仕様

- (1) Ge 検出器 : 相対効率；約 45% (3inch ϕ NaI 検出器との相対的効率)
印加電圧；+4,000V キャンベラ製
- (2) 計測・制御部 : DSA-2000
- (3) パソコン : γ 線解析ソフト (GENIE-2000、JNC/GAMMA)
- (4) ターンテーブル : 耐荷重 800kg
- (5) 外部透過線源 : Co-60 (411kBq 2000 年 2 月 1 日現在) (付録 1)

2.2 CDAS

2.2.1 概要

CDAS は、NaI(Tl)検出器 3 台（高さ方向）、Ge 検出器 1 台からなる検出器系、MCA や PC など計測制御・データ解析を行う制御系、ターンテーブルなどの駆動系から構成されており、ターンテーブルに対象物を載せ測定を行うものである。

装置概念図を図 2.2 に、外観を写真 2.2 に示す。

測定は、ターンテーブルにコンテナを載せ、1 側面を横方向に 4 分割し、4 側面について行う。1 側面の測定が終了したら手前にターンテーブルを移動させ、90° 回転後、次の側面を測定する。検出器は、鉱物（ウランの子孫核種）を多く含む廃棄物があるため、分解能の高い Ge 検出器と感度を良くするために NaI(Tl)検出器を用いており、効率良い測定が行えるよう対象物を挟んで対向位置に配置している。NaI(Tl)検出器は、コンテナを 3 (高さ方向) \times 4 (横方向) \times 4 (側面) に分割測定するので 48 の測定データが得られる。また、Ge 検出器は、コンテナを 1 (高さ方向) \times 4 (横方向) \times 4 (側面) に分割測定するので 16 の測定データが得られる。

測定時間は、1 箇所を 15 分としており、コンテナ 1 基あたり 4 時間である。

2.2.2 装置仕様

- (1) NaI(Tl)検出器 (3 台) : 検出面 ϕ 4inch
印加電圧 +600V
メーカー SCIONIX
- (2) Ge 検出器 (1 台) : 相対効率 約 20%
印加電圧 +4,300V
メーカー ORTEC
- (3) ターンテーブル : 耐荷重 3,500kg

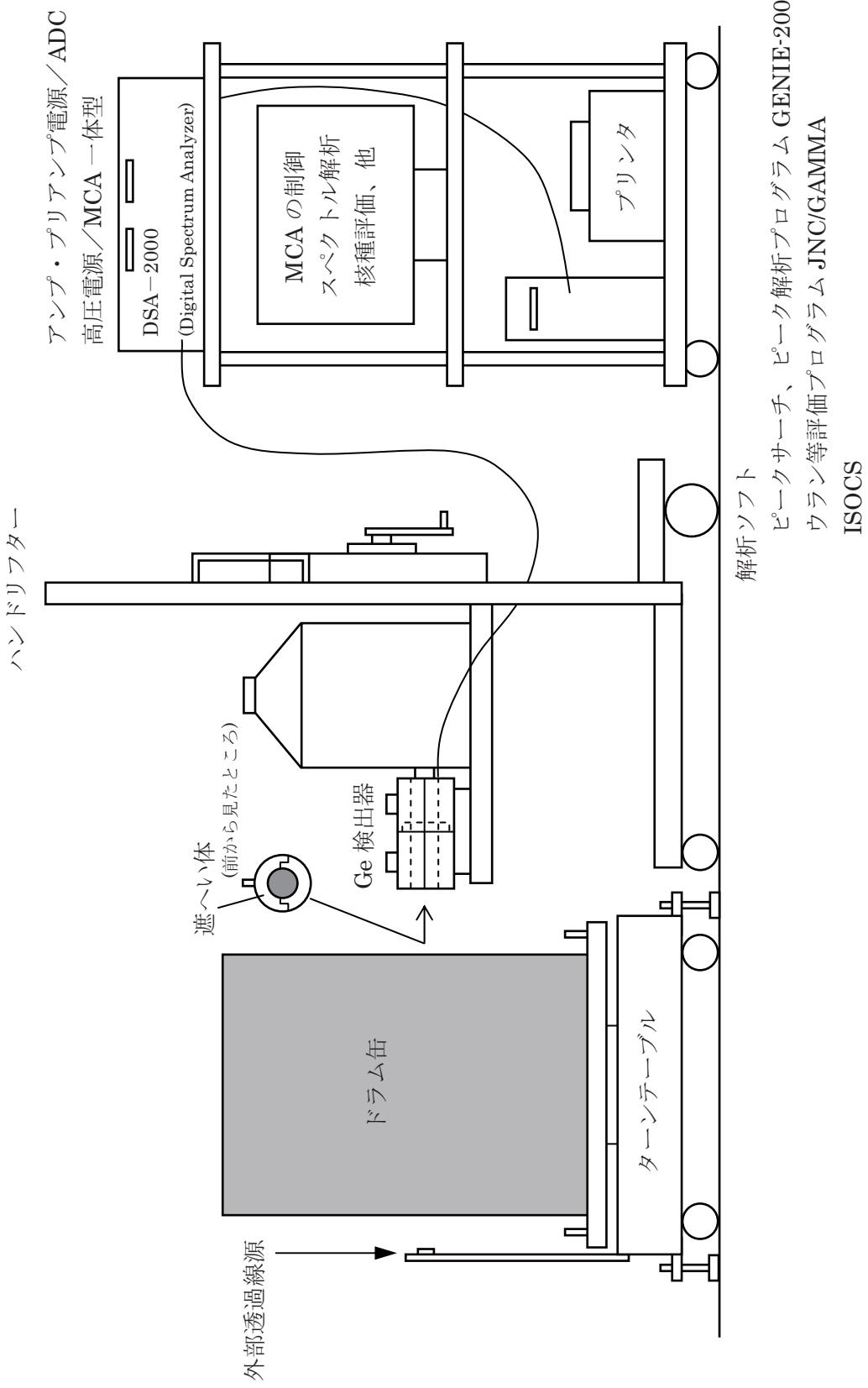


図 2.1 UWGS2 概念図

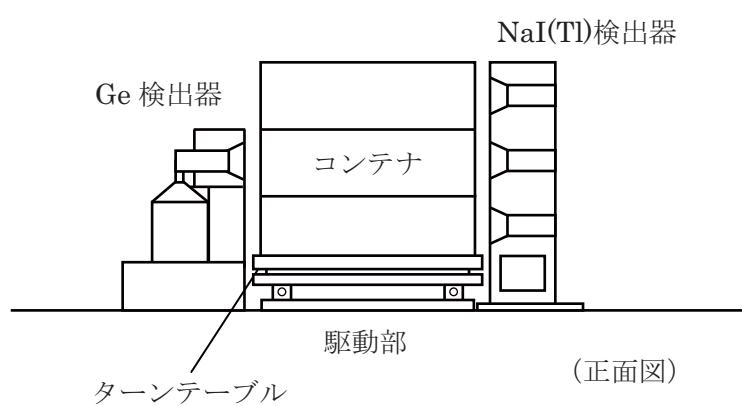
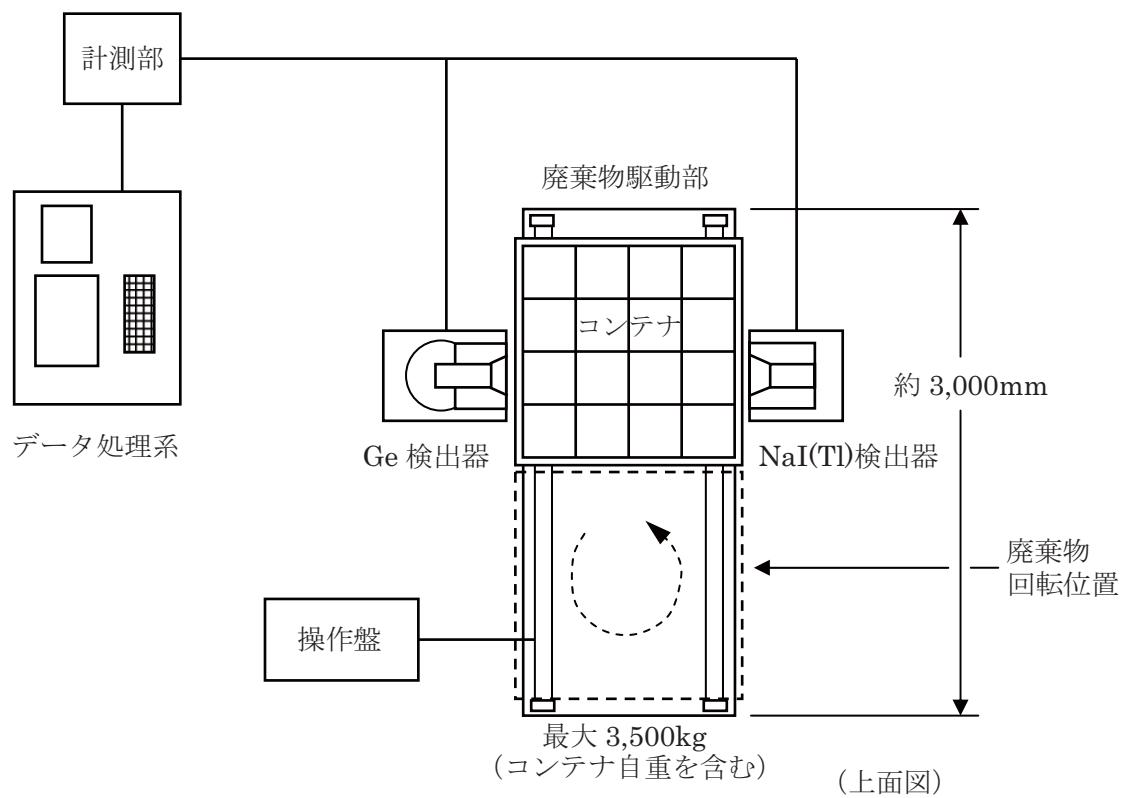


図 2.2 CDAS 概念図

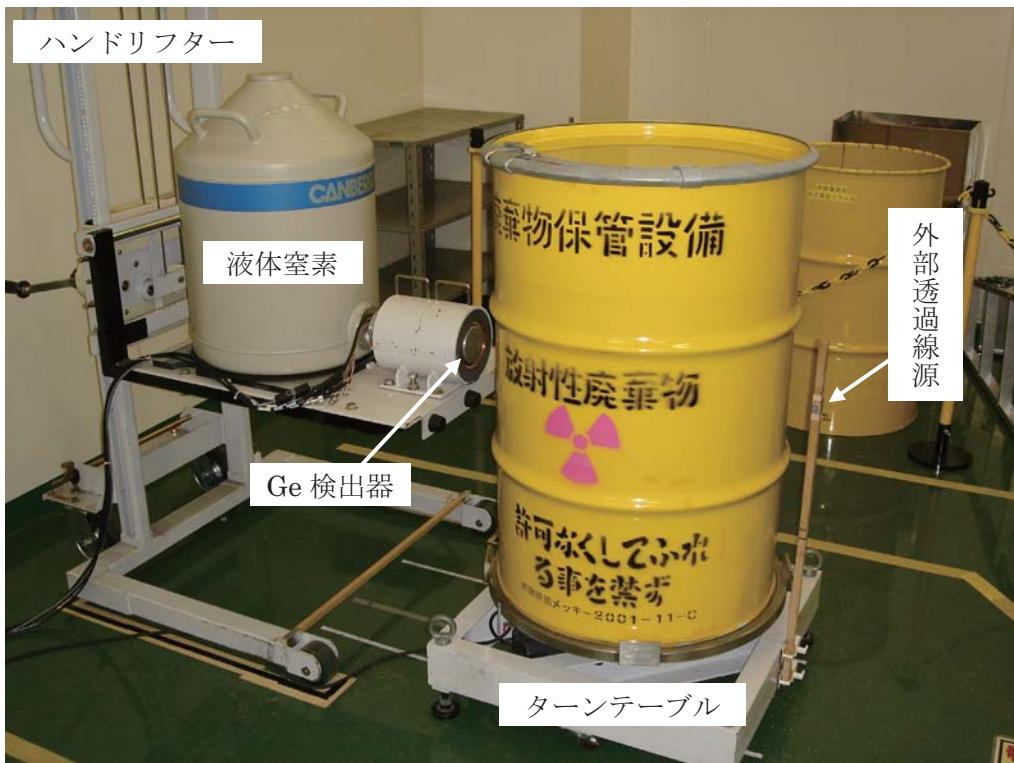


写真 2.1 UWGS2 外観

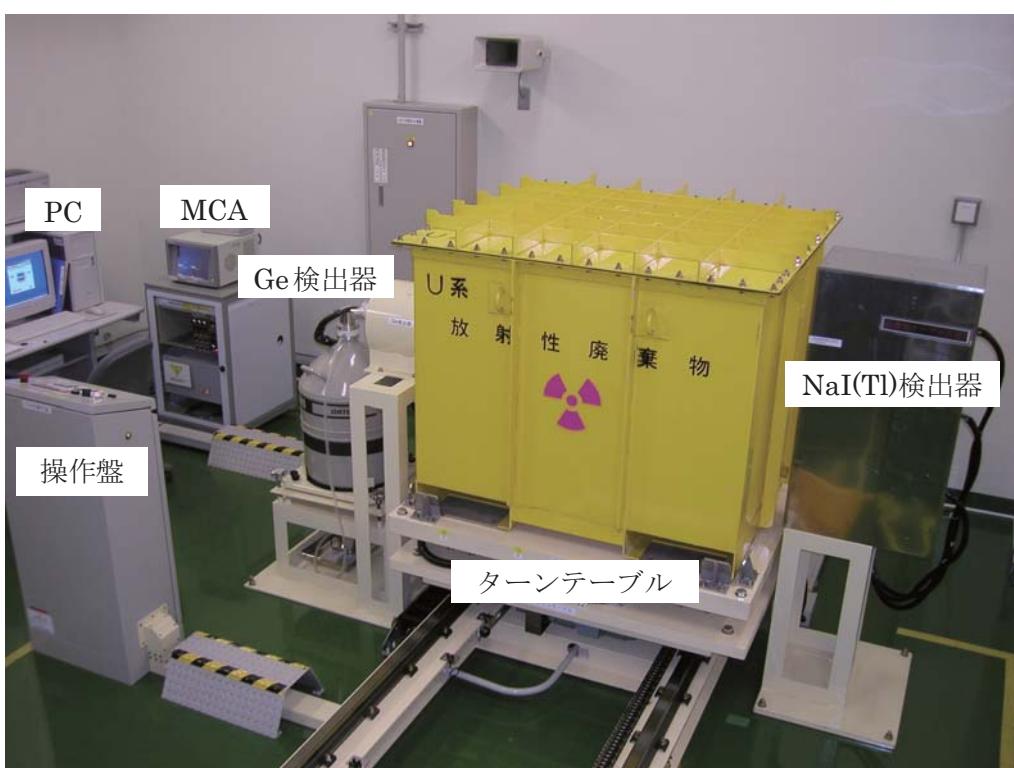


写真 2.2 CDAS 外観

2.3 測定対象物

収納されている廃棄物は、紙、ポリエチレンなどの可燃物、塩化ビニル、ゴムなどの難燃物、金属、コンクリートなどの不燃物で、核種や密度が偏在している。

2.3.1 ドラム缶廃棄物

ドラム缶外観を写真 2.3 に示す。

規 格 : JIS Z1600 M 級又は H 級オープンドラム

内 容 物 : 雜固体廃棄物 (可燃、難燃、不燃)、最大重量 約 410kg^{注2)}

含有核種 : 主にウラン

最大表面線量率 : 約 3 μ Sv/h^{注2)}

2.3.2 コンテナ廃棄物

コンテナ外観を写真 2.4 に示す。

材 質 : 炭素鋼 (SS400)

外形寸法 : 1,280 mm(W)×1,280 mm(D)×1,056 mm(H) (容量約 1m³)

板 厚 : 側面 4.5mm、底面 6.0mm、上面 4.5mm

自 重 : 約 400kg

内 容 物 : 雜固体廃棄物 (主に金属)、最大重量 約 2,500kg^{注2)}

含有核種 : 主にウラン

最大表面線量率 : 約 6 μ Sv/h^{注2)}

注 2) ピット廃棄物を除くこれまでの測定データより

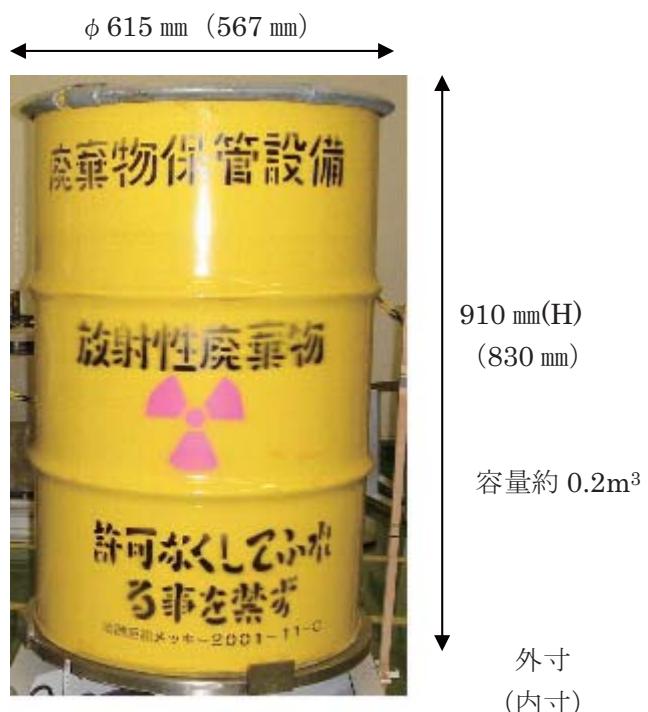


写真 2.3 ドラム缶外観

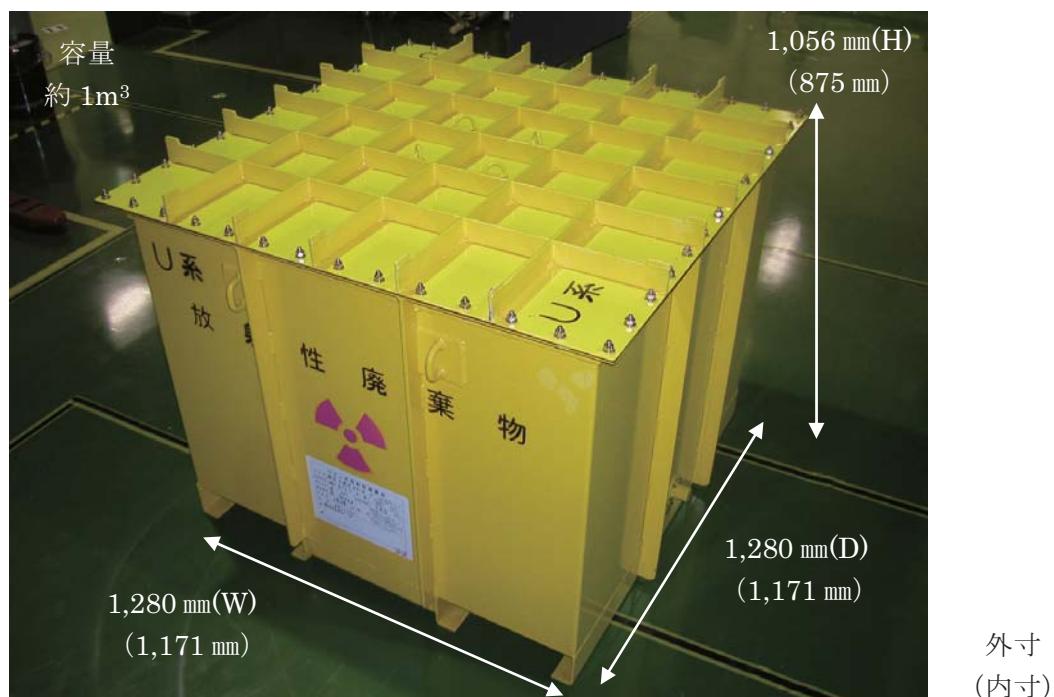


写真 2.4 コンテナ外観

3. 評価概要

3.1 UWGS2

3.1.1 原理概要

Ge 検出器に入射した γ 線は電気信号に変換され、DSA-2000 を通し、パソコン上で解析される。 γ 線の入射量は核種量に比例するため、ピーク計数率と検量線（着目する γ 線エネルギーのピーク計数率と U-238 量の関係式）から U-238 量の定量を行う。その際、 γ 線はドラム缶に収納された廃棄物の構成物質により吸収、減衰され計数値が小さくなるため補正が必要となる。補正是 Ge 検出器軸上（ドラム缶を挟んで反対側）に外部透過線源 Co-60 を設置し、測定対象物が何もないときの値と廃棄物を測定したときの値との比より行う。

評価フローを図 3.1 に示す。また、以下に計算過程を示す。

3.1.2 評価法

(1) 検量線による定量

検量線（1001keV と U-238 量の関係式）を下式とする。

$$I_p = a_1 \times G + b_1 \quad a_1, b_1 : \text{定数}$$

次に、1001keV ピーク計数率 I_p から U-238 量 $G(g)$ を算出する。

γ 線の吸収補正是ダイレクト吸収補正で行う。図 3.2 に考え方を示す。

測定対象物があるときの外部透過線源のピーク計数率 I と、測定対象物がないときの外部透過線源のピーク計数率 I_0 より透過度 T を求め、吸収補正係数 CF を求める⁵⁾。

$$CF = \frac{-K \times \ln(T)}{1 - T^K} \quad (T < 0.1 のとき K=0.75, 0.1 \leq T < 1.0 のとき K=0.823)$$

この吸収補正係数を用いて、以下の式より U-238 の定量を行う。

$$\text{U-238 量 (g/試料)} = G \times CF$$

(2) 効率による定量

着目ピーク計数率 $I_\gamma(\text{cps})$ から放射能 $A(\text{Bq})$ は次のように求められる。

$$A = \frac{I_r}{\varepsilon_p \times \frac{Y_i}{100}} \quad Y_i \text{ は核種放出比(%)}, \varepsilon_p \text{ は対象エネルギーでの絶対効率}$$

γ 線の吸収補正是計算による近似吸収補正で行う。図 3.3 に考え方を示す。

次に、着目核種のエネルギーごとに近似透過度 T_{ne} を求め、エネルギーを変数とした吸収補正係数 CF(Eng) を求め、以下の式より着目核種の定量を行う。

$$\text{着目核種量(Bq/試料)} = A \times CF(\text{Eng})$$

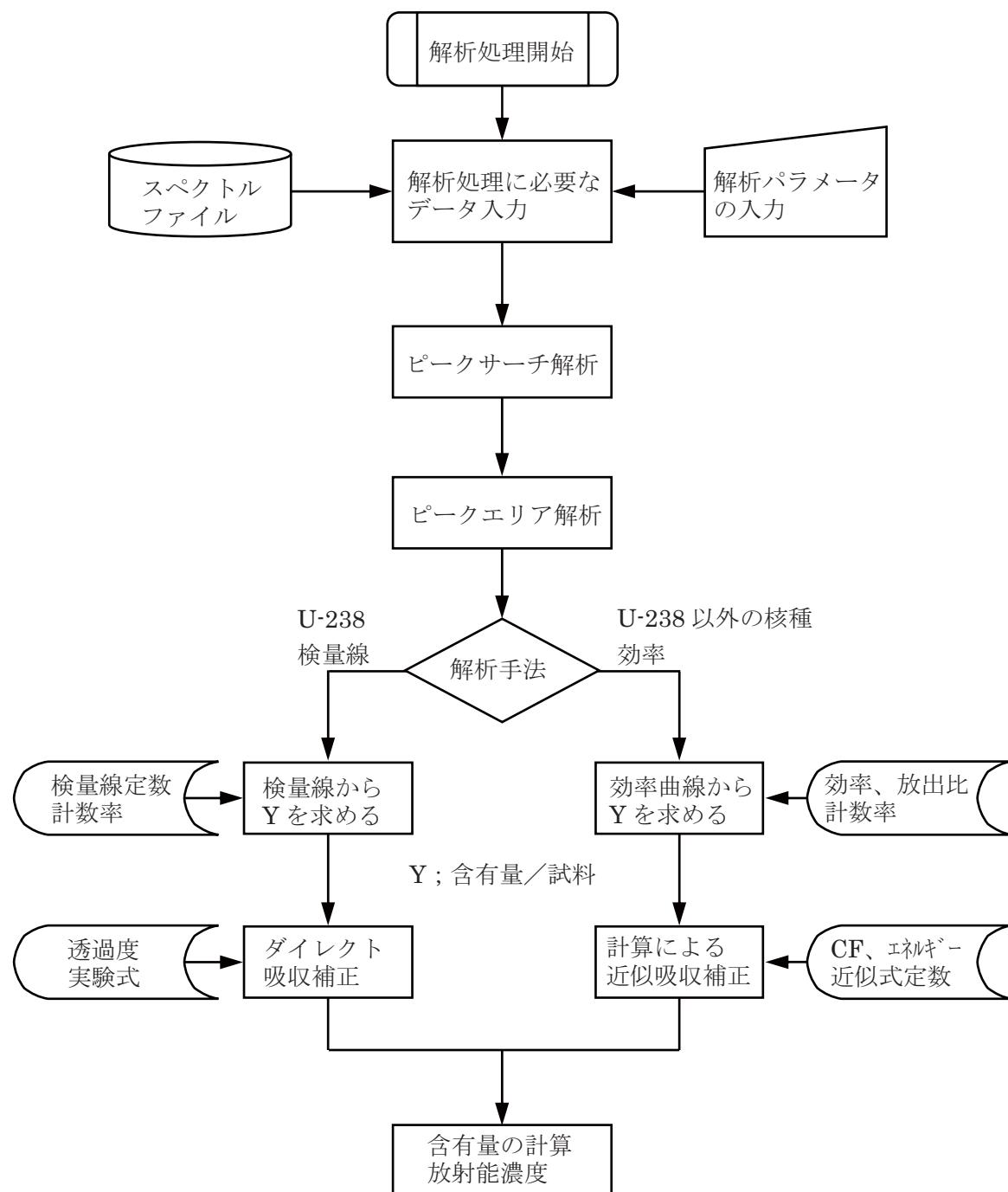


図 3.1 UWGS2 評価フロー

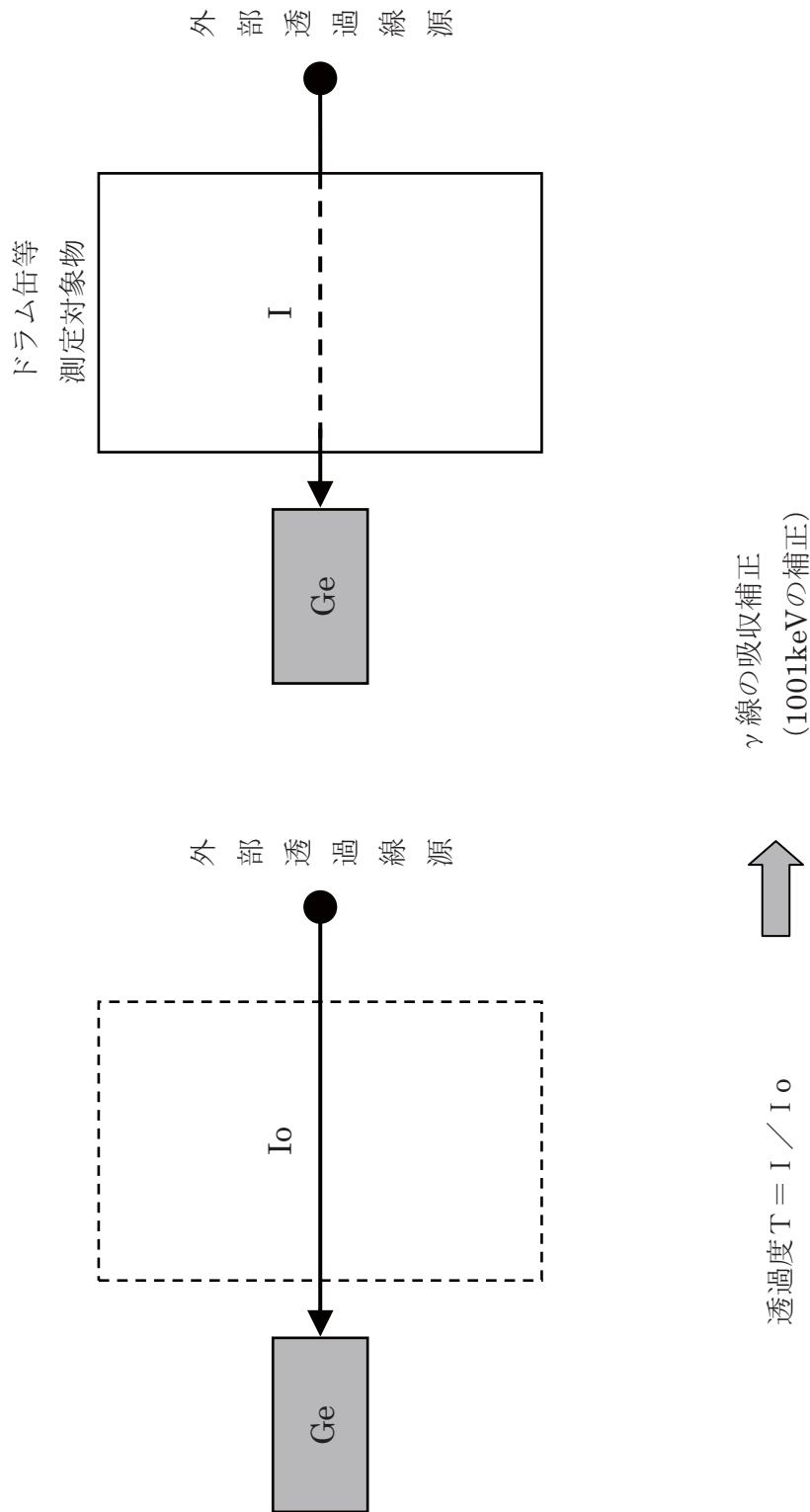


図 3.2 ダイレクト吸収補正の考え方

水による減衰曲線を透過度で廃棄物ごとに補正し、
着目核種のエネルギーの透過度を求め、 γ 線の吸収補正を行う。

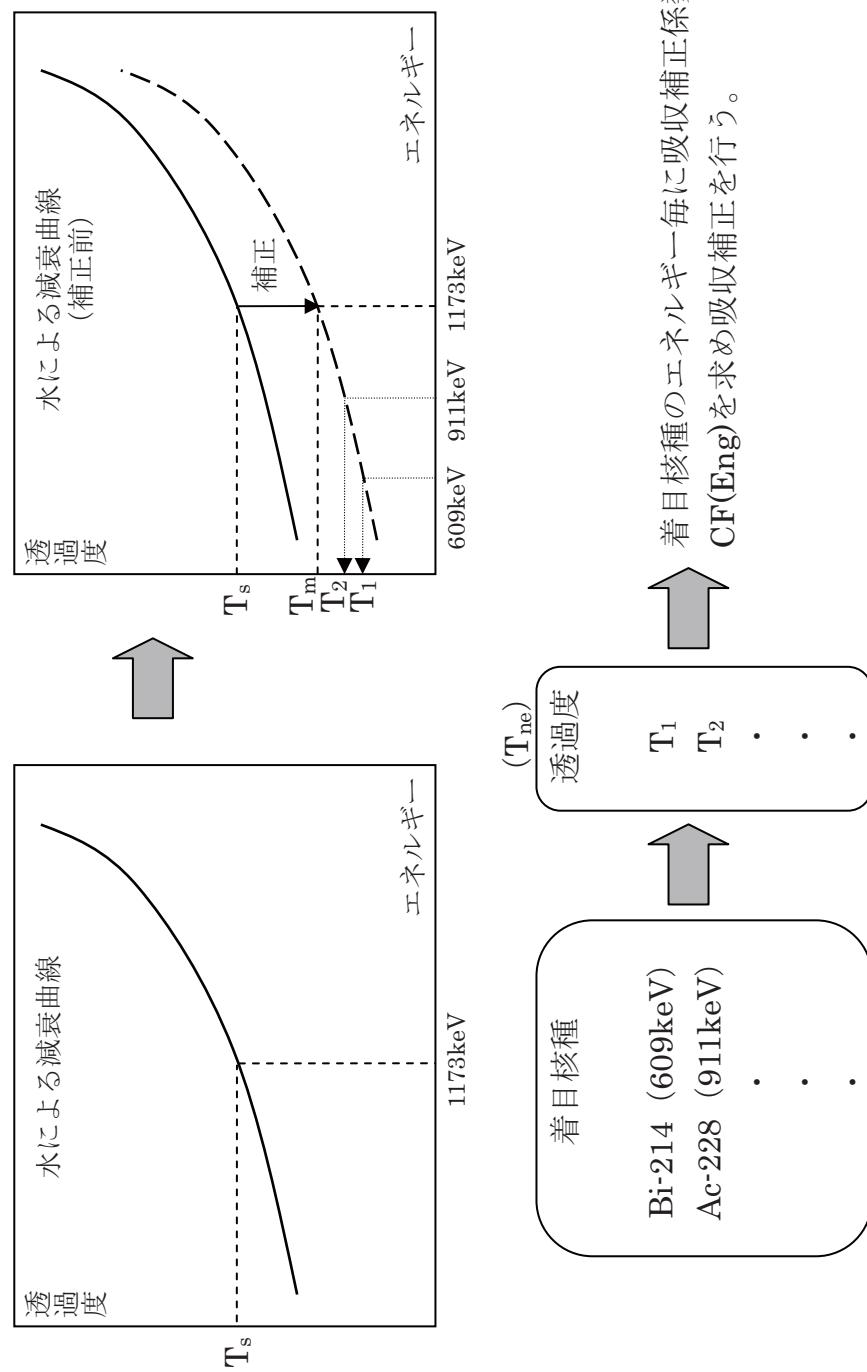


図3.3 近似吸収補正の考え方

3.2 CDAS

3.2.1 原理概要

本評価法は、コンテナ等に収納された廃棄物の密度偏在及び核種の偏在を補正してU-238量を算出するもので、計数率(1001keV)の分布を基に核種の存在する位置(線源メッシュ)を選定する。

U-238量の評価は、図3.4の評価フローのように、線源メッシュについて対向する面における対のデータ(U-238の子孫核種のうち放射平衡となっているPa-234mから放出される γ 線:766keV、1001keV)が検出された場合、検出器間距離が一定であることを利用して、線源までの距離の影響を取り除いて評価する対向対評価法を、対向する面における対のデータのうち片方が確認されない場合は、垂直面におけるデータを用い、線源までの距離を与えることで評価する線源位置設定法を用い、対向対評価法と併用する。1001keVが検出されても線源メッシュが選定できない場合は、グロス計数率を用いたグロス法により評価を行う。選定できるメッシュ数は最大20個で、評価量は線源メッシュごとに算出した核種量を積算した値となる。

吸収補正是、図3.5に示すように、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 γ 線である766keV、1001keVに着目し、エネルギーによる減衰の違い(ピーク比)を利用して行う。766keVが検出されにくい場合は、コンプトン散乱領域を利用したバンド/ピーク比、またはグロス/ピーク比により吸収補正を行う。また、グロス法の場合は、嵩密度により近似的に求めて吸収補正を行うとともに、バックグラウンドについては、シミュレーション及び模擬廃棄物を用いた測定から算出したスペクトルを用いることとしている。

なお、ウランの自己吸収については、標準線源を用いた測定による実験式から補正を行う。

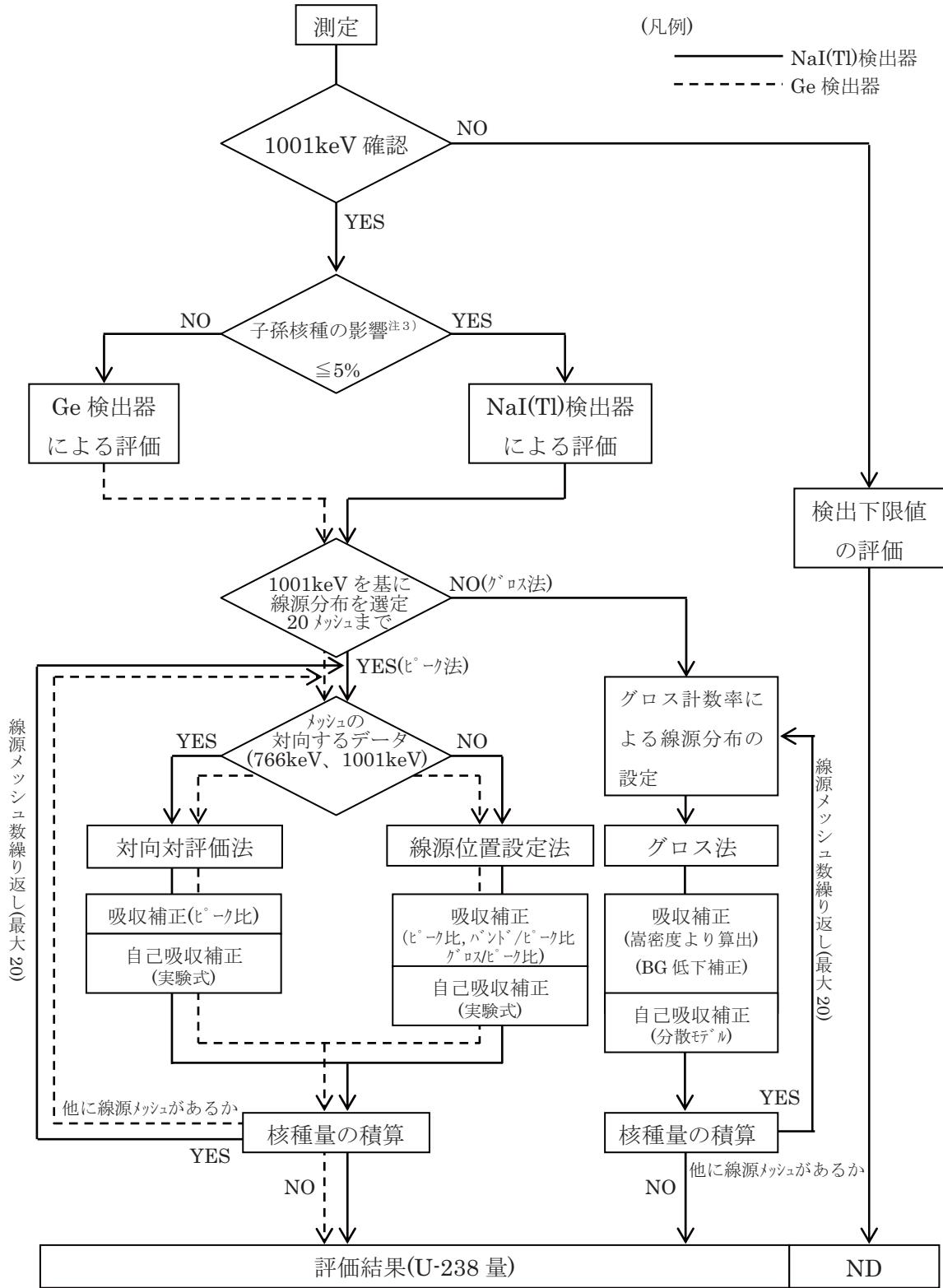
3.2.2 ウラン子孫核種の影響

ウラン廃棄物には、ウラン製錬により発生した廃棄物などウランの子孫核種を多く含む廃棄物があり、これら子孫核種を多く含有する廃棄物に対しては、分解能が高いGe検出器を用いて評価を行う。ただし、766keV γ 線に関しては、子孫核種から放出される γ 線の寄与分を取り除く必要がある。これらの重なる γ 線は、Bi-214の768.4keVとPb-211の766.3keVで、766keV γ 線への寄与分は、同一核種から放出される他のエネルギー γ 線を用いて、放出率とエネルギー依存性を考慮して算出する。この寄与分が766keVピーク計数の5%以下ならNaI(Tl)検出器、5%より大きければGe検出器を用いた評価となる。

以下に766keVピークの補正式を示す。

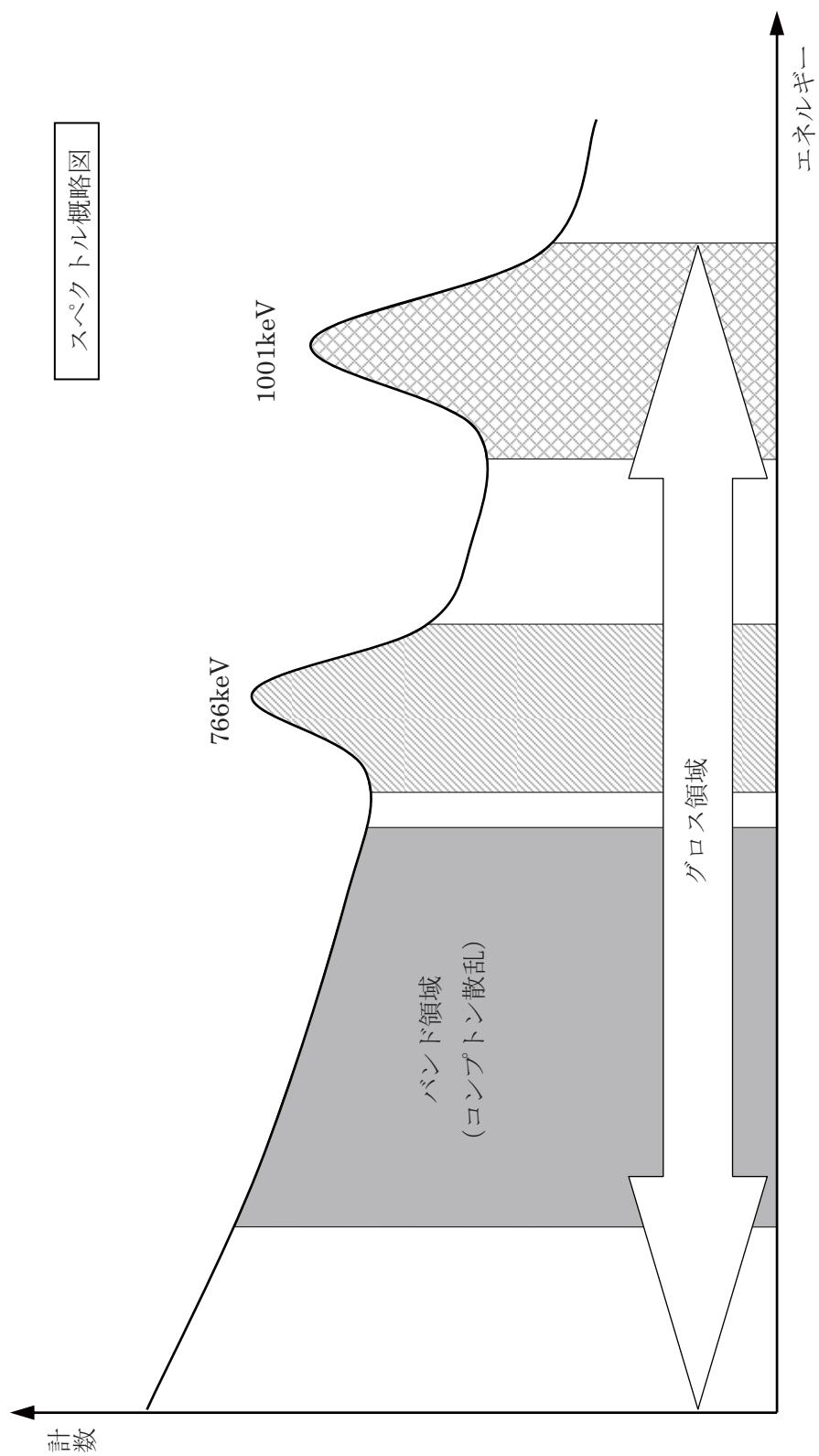
$$\text{U-238(766keV)計数率} =$$

$$[766\text{keV 計数率}] - [\text{Bi-214}(768.4\text{keV})\text{計数率}] - [\text{Pb-211}(766.3\text{keV})\text{計数率}]$$



注3) Ge検出器における766keV γ 線への子孫核種の影響度合

図 3.4 CDAS 評価フロー



エネルギーの異なる γ 線が同じ密度分布を透過し同一の検出器に入射する

図 3.5 測定対象 γ 線

4. 校正

ウラン廃棄物中のウラン量を測定評価するには、測定準備として装置の校正が必要となる。ここでは、UWGS2 及び CDAS の校正方法及び使用線源データ等について記述する。

4.1 線源

使用した線源を表 4.1 に示す。

線源については、校正の種類ごとに必要なものを選定し、使用した。

表 4.1 校正に使用した線源

No.	核種	放射能量	分析日	エネルギー(keV)	備考
1	Co-60	411kBq	2000.2.1	1173.24、1332.5	UWGS2 用外部透過線源 (付録 1)
2	Co-60	339.8kBq	2000.12.15	1173.24、1332.5	チェックソース (付録 2)
3	Ba-133	350.1kBq	2000.12.15	81、276.4、302.9、 356、383.85	チェックソース (付録 3)
4	Cs-137	346.5kBq	2000.12.15	661.65	チェックソース (付録 4)
5	Co-60	3.7MBq	1996.8.22	1173.24、1332.5	CDAS 校正用 (付録 5)

4.2 UWGS2

4.2.1 エネルギー校正

MCA のチャンネルに対するエネルギーを評価に適した状態に調整するため、測定するエネルギー範囲内に γ 線を放出する線源を選定・測定し、エネルギー対チャンネルの校正を行う。

幾何学的条件を図 4.1 に示す。線源は、検出器軸上に配置し、 γ 線の検出状況により距離を変えて測定する。例えば、デッドタイムが多い線源は Ge 検出器から離したり、強度が弱く、計測しにくい線源は近づけたりしても校正には影響がない。

(1) 測定条件

- ① チャンネル数：4,096ch、エネルギー範囲：50～1,600keV（約 0.4keV/ch）
- ② 線源：Co-60（付録 2）、Ba-133（付録 3）、Cs-137（付録 4）
- ③ 線源設置位置：Ge 検出器中心軸上
- ④ 測定時間：1,000 秒

(2) 結果

エネルギー対チャンネルの関係式を図 4.2 に示す。

$$Y = 3.999 \times 10^{-1} \times ch + 1.642 \times 10^{-1}$$

ここで、 Y はエネルギー (keV)、 ch は MCA におけるチャンネルである。

4.2.2 効率校正

エネルギーと検出器効率（計数率／ γ 線放出率）の関係を校正するため、測定するエネルギー範囲内に γ 線を放出する線源を選定・測定し、効率校正を行う。
幾何学的条件を図4.1に示す。

(1) 測定条件

- ① 線源：Co-60（付録2）、Ba-133（付録3）、Cs-137（付録4）
- ② 線源設置位置：Ge 検出器表面から385mm、ターンテーブル上面から441mm
(ドラム缶廃棄物を装置に積載した時の中心位置)
- ③ 測定時間：5,000秒（1回）

(2) 結果

効率曲線を図4.3に示す。

$$\ln(Eff) = -3.346 \times 10^{-2} \times \ln(Ene)^4 + 9.384 \times 10^{-1} \times \ln(Ene)^3$$

$$- 9.703 \times \ln(Ene)^2 + 4.316 \times 10^1 \times \ln(Ene) - 7.753 \times 10^1$$

ここで、 Eff は検出器効率、 Ene はエネルギー(keV)である。

4.2.3 外部透過線源の初期値(Io)測定

U-238量定量時の γ 線吸収補正に用いる外部透過線源の初期値を取得する。
幾何学的条件を図4.4に示す。また、測定条件及び結果を以下に示す。

(1) 測定条件

- ① 線源：Co-60（付録1）（外部透過線源）
- ② 線源設置位置：外部透過線源設置位置
- ③ 測定時間：1,000秒（1回）
- ④ 計測 γ 線エネルギー：1173.24keV

(2) 結果

外部透過線源の初期値(Io)は、12.0cps(H19.4.11取得)であった。

4.2.4 検量線作成

U-238 量の算出に用いる 1001keV 計数率と U-238 量の関係式（検量線）を作成する。ウラン標準線源を計測し、U-238 量と計数率との関係を求める。

幾何学的条件を図 4.5 に示す。また、測定条件及び結果を以下に示す。

(1) 測定条件

- ① 標準線源：天然ウラン約 2g、20g、50g
- ② 線源設置位置：Ge 検出器表面から 385mm、ターンテーブル上面から 441mm
- ③ 測定時間：1,000 秒～5,000 秒（各線源：3 回、状況により時間を調整する）
- ④ ターンテーブル回転：10rpm

(2) 結果

検量線を図 4.6 に示す。

$$Y(cps) = 2.4139 \times 10^{-2} \times X(g) \quad Y : 1001\text{keV 計数率}, X : \text{U-238 量}$$

4.2.5 検出下限値の評価

BG 計数率と以下の式より、検出限界計数率を求め、検量線を用いて検出限界値を算出する。

$$\text{検出限界計数率}(cps) = \frac{K}{2} \left\{ \frac{K}{T_s} + \sqrt{\left(\frac{K}{T_s} \right)^2 + 4ND \left(\frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_b} \right)} \right\}$$

ここで、 T_s : 試料の測定時間(sec)

T_b : BG 測定時間(sec)

K : 標準偏差に対する倍数 $3(3\sigma)$

ND : BG 計数率(cps)

ドラム缶廃棄物の代表として、1001keV γ 線が検出されない約 100kg の不燃（金属）の実廃棄物について考える。計測されたスペクトルを BG として評価すると、BG 測定時間は 600sec、1001keV ピーク範囲の計数率は 0.137cps であり、検出限界値を算出すると約 8gU-238 となる。

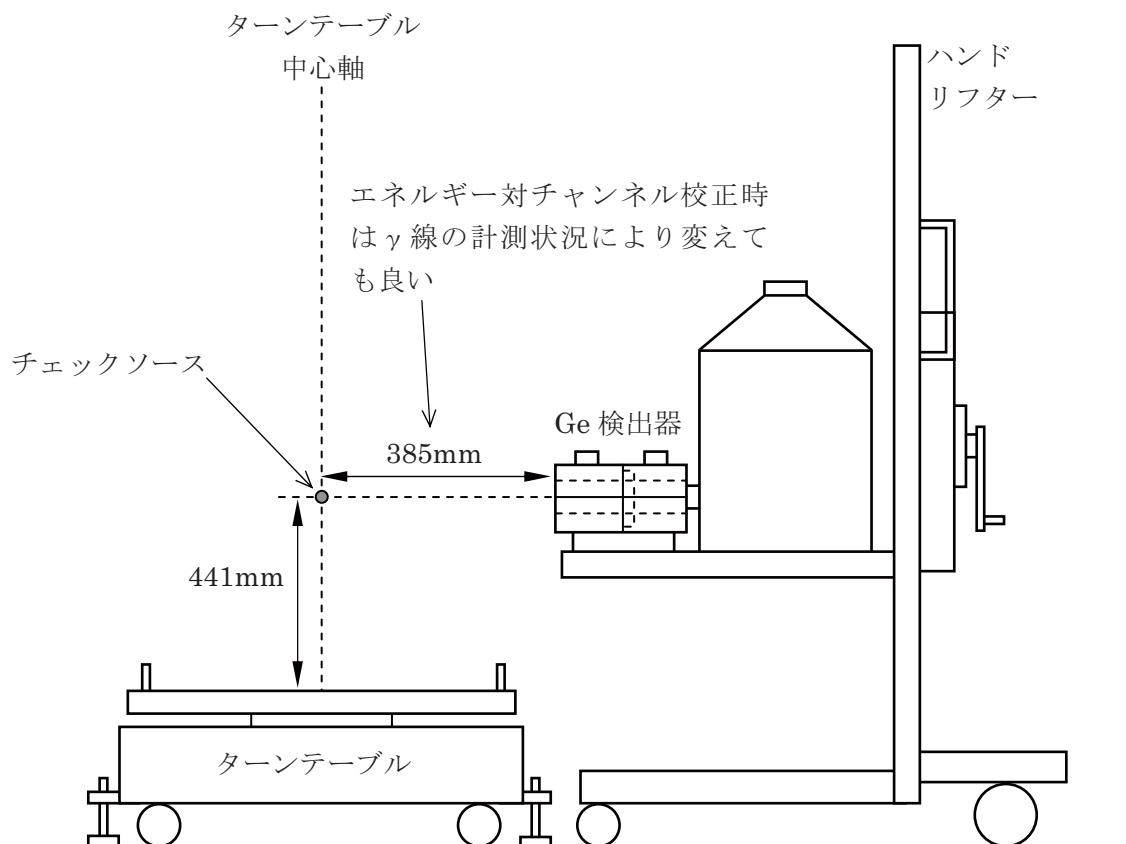
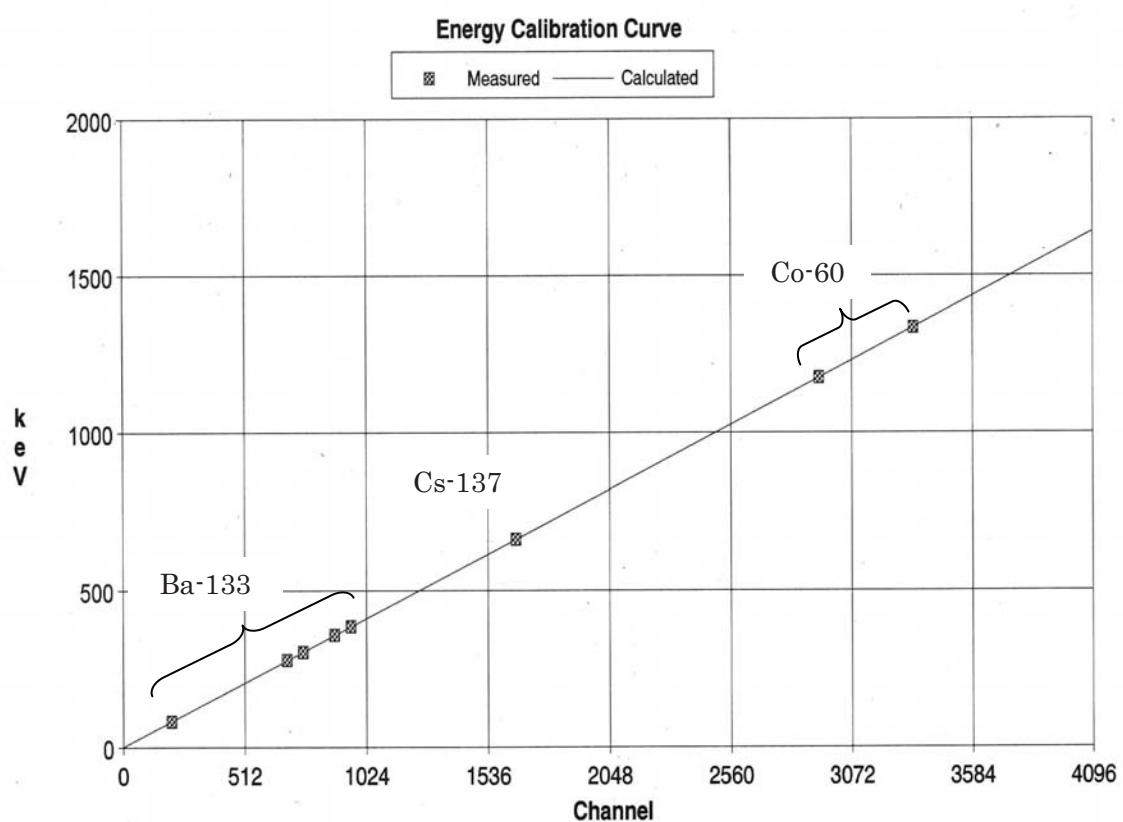
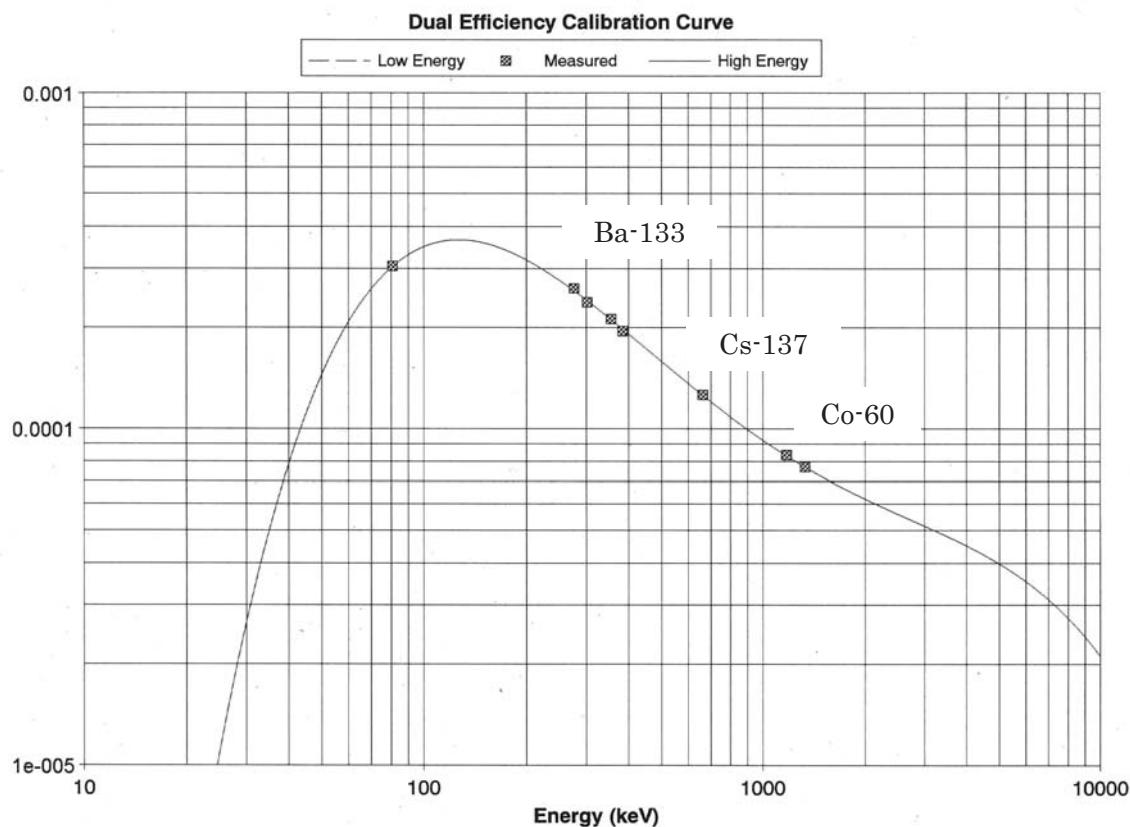


図 4.1 校正における幾何学的条件



Datasource: C:\GENIE2K\CAMFILES\energy20080822.CNF
 Energy = $1.642e-001$ keV + $3.999e-001$ *Ch
 FWHM = $7.744e-001$ keV + $2.999e-002$ *E $^{1/2}$
 Lo Tail = $2.718e+000$ keV - $6.478e-004$ *E

図 4.2 エネルギーとチャンネルの関係



Datasource: C:\GENIE2K\CAMFILES\energy20080822.CNF
 $\ln(\text{Eff}) = -7.753e+001 + 4.316e+001 \ln(E) - 9.703e+000 \ln(E)^2 + 9.384e-001 \ln(E)^3 - 3.346e-002 \ln(E)^4$

図 4.3 効率曲線

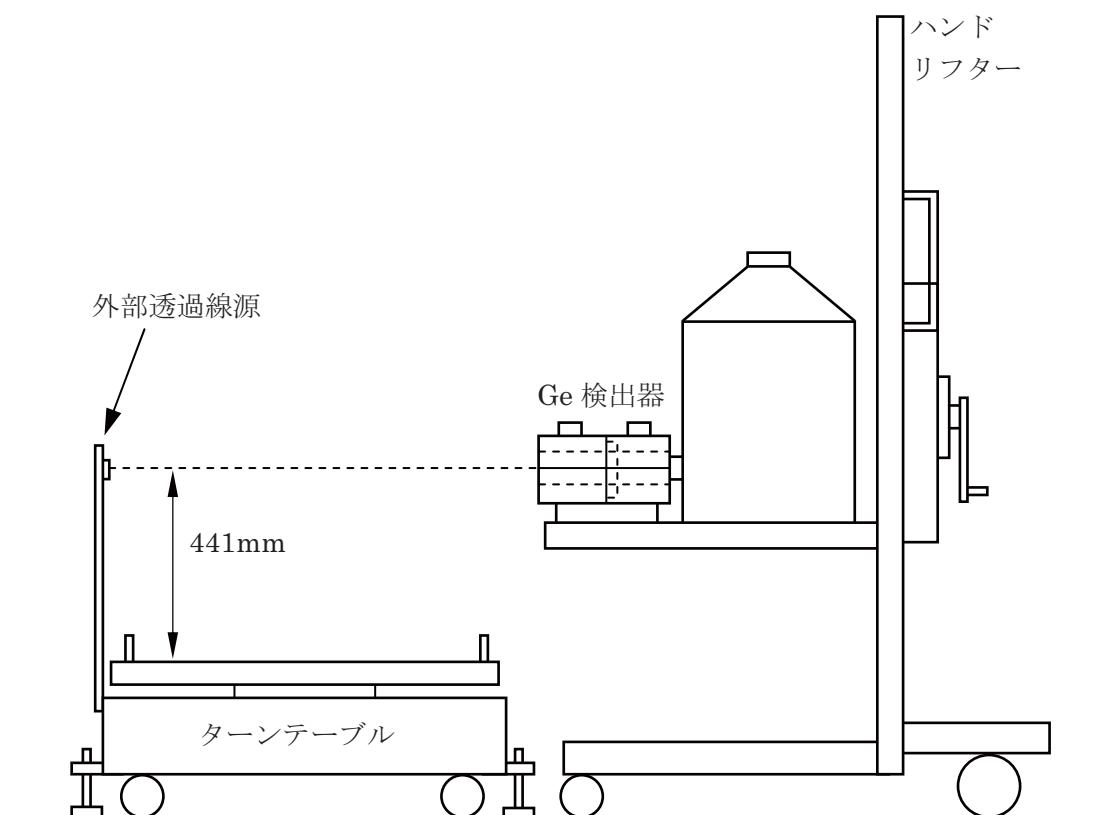


図 4.4 外部透過線源の初期値(I_0)測定における幾何学的条件

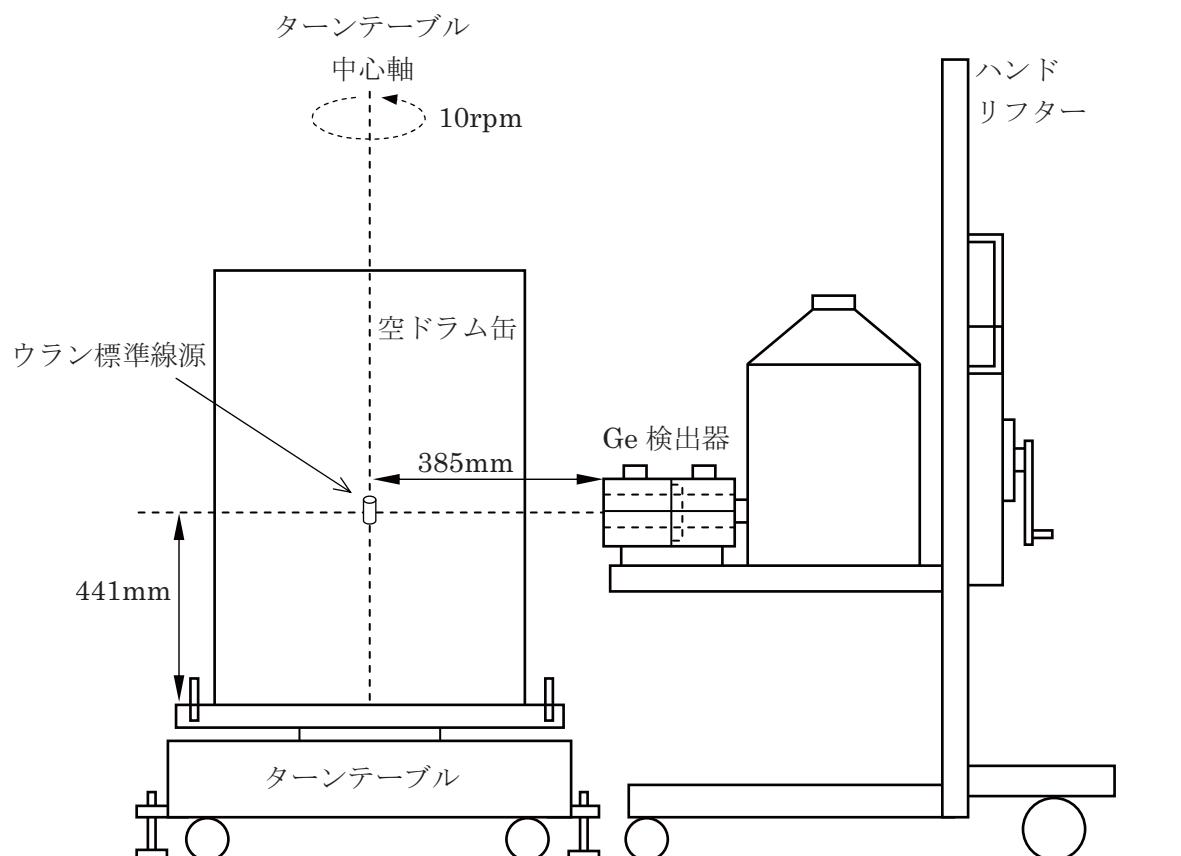
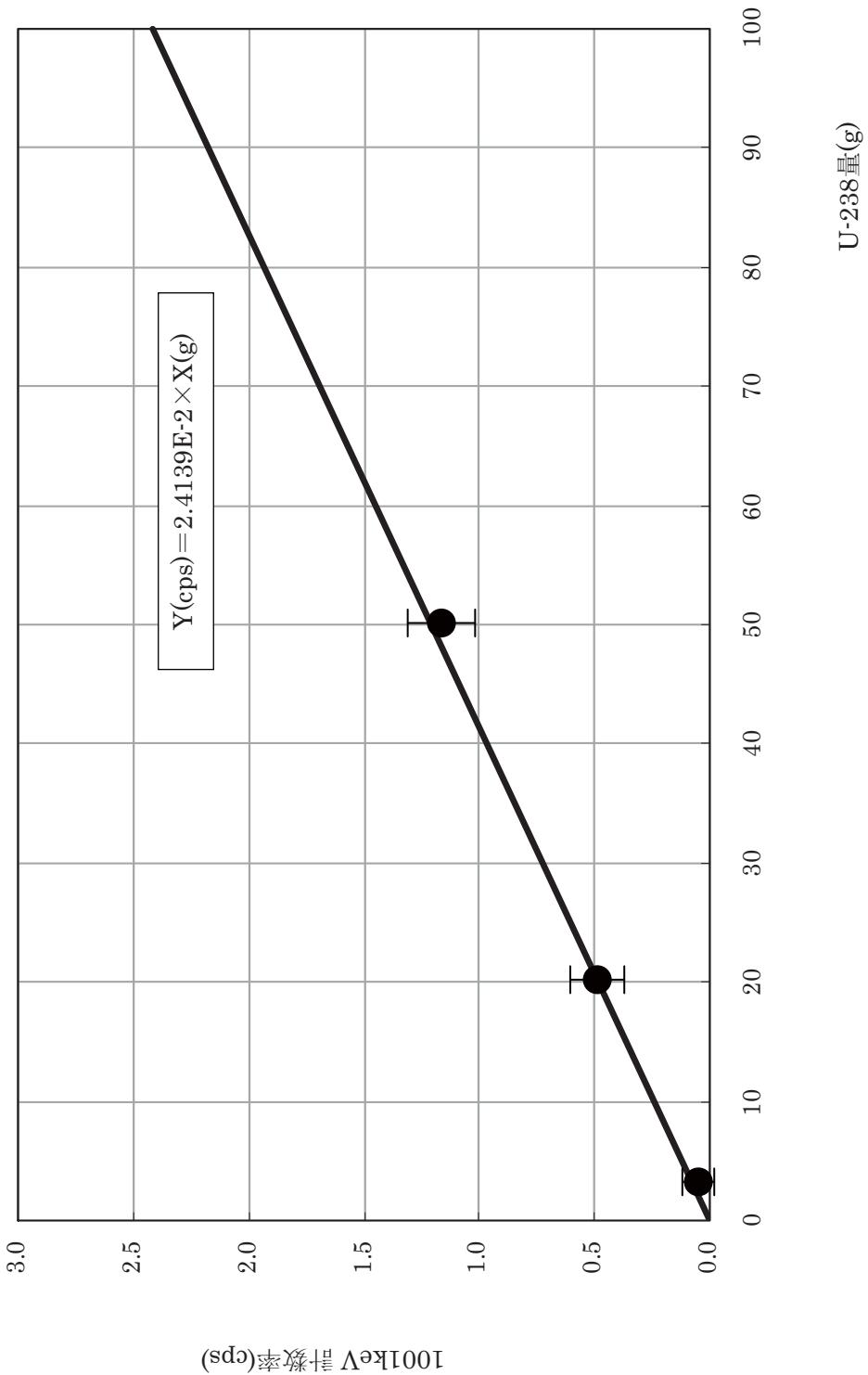


図 4.5 検量線作成における幾何学的条件

図4.6 U-238量と1001keV γ -線数率の関係

4.3 CDAS

4.3.1 効率校正

評価に使用している検出器については、経年劣化によりゲインが低下していくことが予想される。そこで、検出器の基本性能として、分解能、検出器効率の確認測定を行い、性能低下が確認されれば、評価に用いる検出器効率を適切な値に修正する必要がある。

(1) 測定条件

- ① 線源 : Co-60 (付録 5)、Cs-137 (付録 4)
- ② 線源設置位置 : 検出器中心軸上で、表面から 25cm (写真 4.1)
- ③ 測定時間 : 600 秒 (10 回の平均を使用)

(2) 実績

H21 年 3 月に NaI(Tl) 検出器のゲイン低下に伴い検出器の交換を行った。

測定結果について表 4.2 に確認測定結果、図 4.7 に分解能評価結果、図 4.8 に検出器効率評価結果を示す。

- ① 分解能評価結果より、以前 (H15 年設置時) の値と比較して $\pm 7\%$ となり、ほぼ同等の性能を有していることを確認した。
- ② 検出器効率評価結果より、600keV 付近では以前の検出器と比較してほぼ同等であるが、エネルギーが高くなるに従い、低下する傾向が確認された。

(3) 検出器効率の変更

検出器効率の変更結果を表 4.3 に示す。また、解析ソフト (UWSF_ 解析) における検出器効率設定画面を図 4.9 に示す。

確認測定より、2~12% の検出器効率の低下が確認された。実廃棄物測定には U-238 の γ 線 (766keV、1001keV) に対する検出器効率が必要となるが、ウラン線源がないため、Cs-137 及び Co-60 により得られたデータから近似式を算出し、検出器毎にファクター (従前の値と確認測定での値の比) を求め、従前の値を校正した。

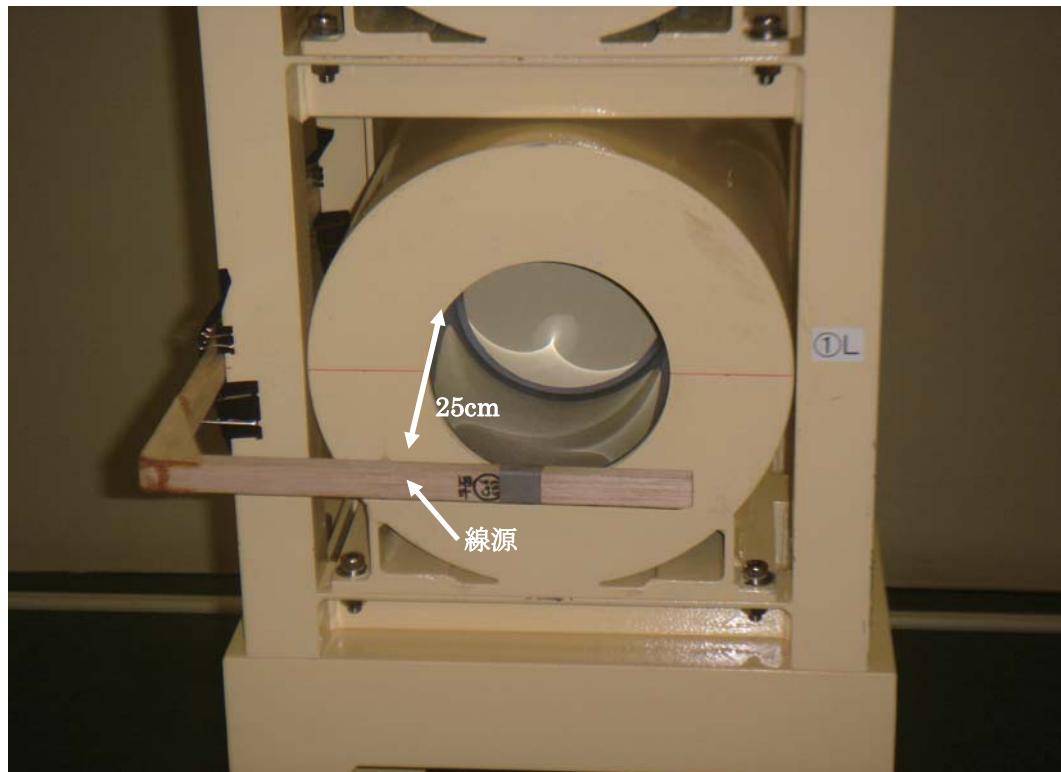


写真4.1 線源設置状況

表4.2 確認測定結果

検出器	核種	γ 線 keV	放出比	cps	中心 ch	半値幅	分解能		検出器効率	
							/現状値	cps/flux	/現状値	
NaI-3 (SAE538)	Cs-137	662	0.8512	1066.5	165.31	12.37	7.5%	1.07	3.4407E+01	0.96
	Co-60	1173	1.0	283.8	292.83	16.14	5.5%	—	1.9658E+01	0.91
		1333	1.0	263.6	332.08	17.42	5.2%	1.01	1.8243E+01	0.88
NaI-2 (SAD911)	Cs-137	662	0.8512	1085.6	166.03	11.40	6.9%	0.98	3.5022E+01	0.98
	Co-60	1173	1.0	321.0	293.18	15.02	5.1%	—	2.2231E+01	0.96
		1333	1.0	300.6	332.82	16.17	4.9%	0.93	2.0816E+01	0.95
NaI-1 (SSX623)	Cs-137	662	0.8512	1054.0	165.71	12.47	7.5%	1.07	3.4005E+01	0.95
	Co-60	1173	1.0	288.1	293.21	16.29	5.6%	—	1.9954E+01	0.91
		1333	1.0	267.2	332.70	17.64	5.3%	1.02	1.8506E+01	0.88

※ 核種の強度は測定日に合わせて減衰計算した値
現状値はH15年設置時から使用している値

$$\text{分解能} = \frac{\text{半値幅}}{\text{中心ch}}$$

$$flux = \frac{\text{放出比} \times \text{放射能強度}}{4\pi r^2} \quad r = \text{距離}$$

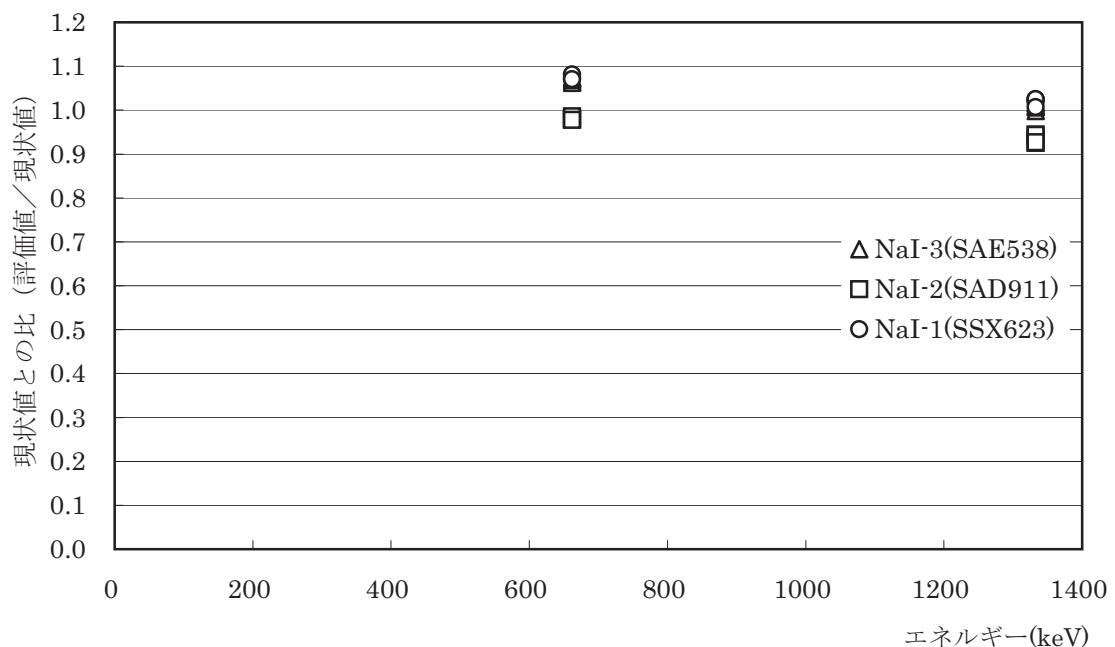


図4.7 分解能評価結果

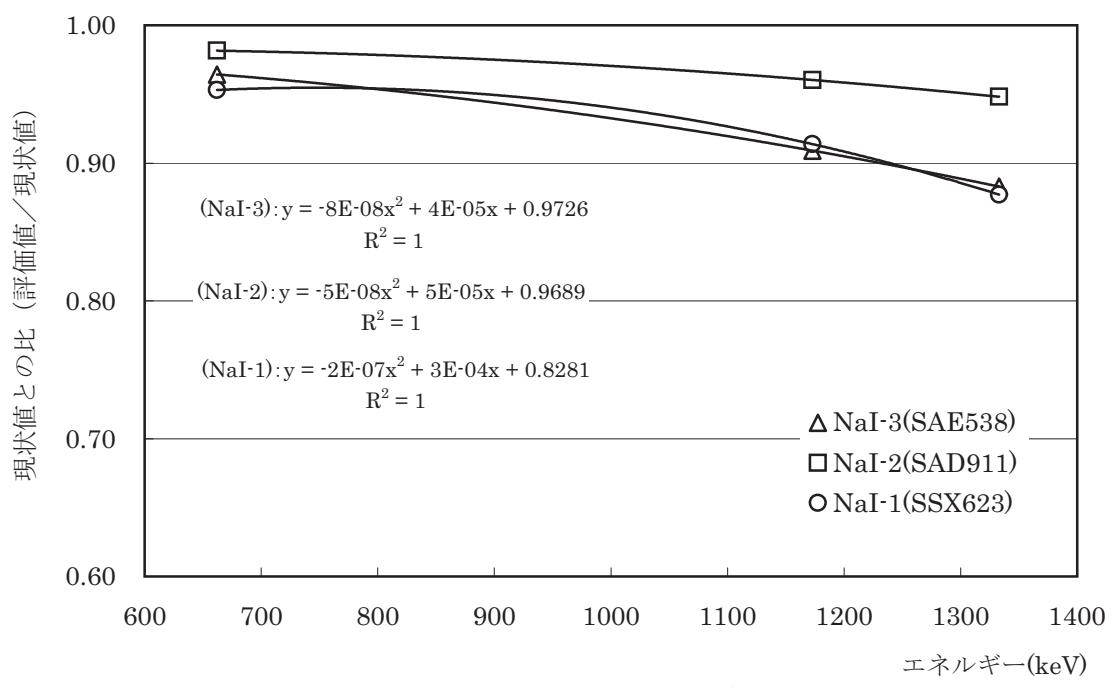


図4.8 検出器効率評価結果

表4.3 解析ソフト (UWSF_解析) における効率設定

核種 (Energy)	検出器効率(cps/flux)								
	NaI-1			NaI-2			NaI-3		
	現状値	ファクター	補正值	現状値	ファクター	補正值	現状値	ファクター	補正值
ウラン (766keV)	6.667E+01	0.94	6.271E+01	6.938E+01	0.98	6.784E+01	6.529E+01	0.96	6.244E+01
ウラン (1001keV)	3.654E+01	0.93	3.391E+01	3.803E+01	0.97	3.684E+01	3.579E+01	0.93	3.337E+01
Co-60 (1173keV)	2.184E+01	0.90	1.976E+01	2.315E+01	0.96	2.219E+01	2.162E+01	0.91	1.967E+01
Co-60 (1333keV)	2.110E+01	0.87	1.841E+01	2.196E+01	0.95	2.079E+01	2.066E+01	0.88	1.826E+01

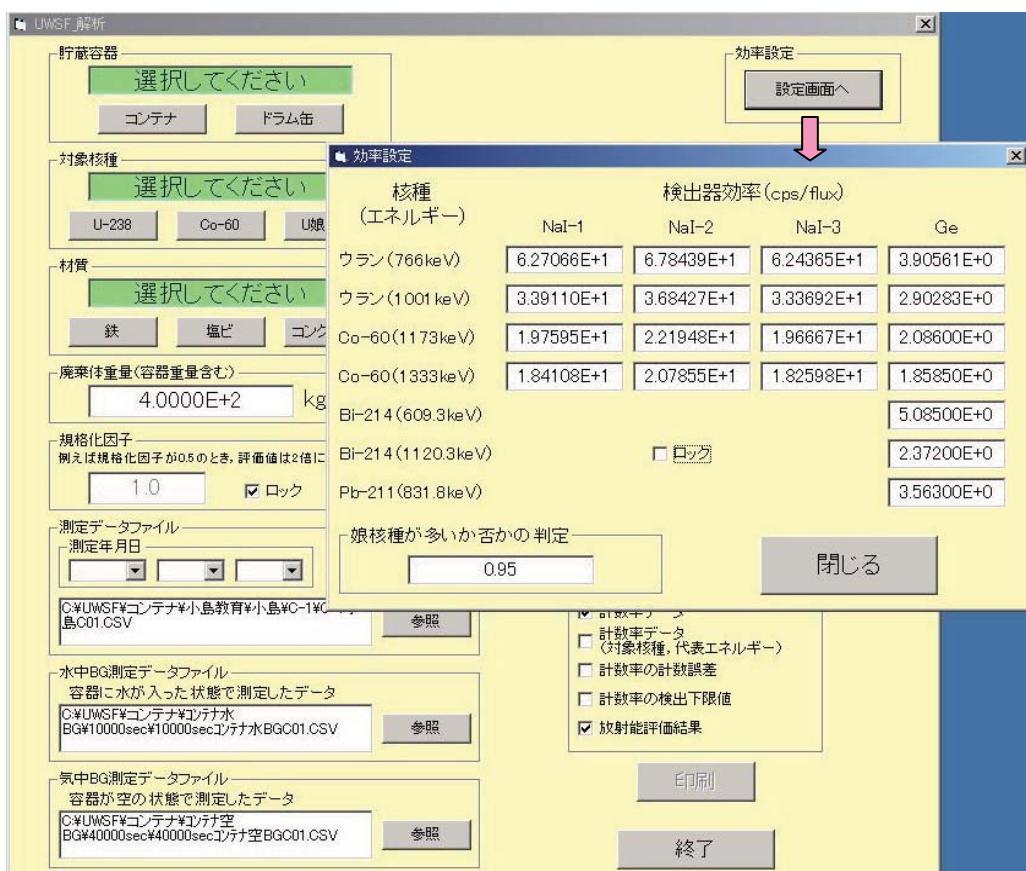


図4.9 UWSF_解析(効率設定画面)

5. 測定試験

5.1 UWGS2

5.1.1 線源偏在評価

(1) 方法

ドラム缶内の核種位置による評価への影響を確認するため、模擬ドラム缶について、チェックソースを任意のポイントに設置し、測定を行い、ドラム缶中心での計数を 1 としたときの各ポイントの相対感度を確認する。

以下に測定条件を示す。また、幾何学的条件を図 5.1 に示す。

模擬ドラム缶：空ドラム缶（23kg）
塩化ビニル 0.3g/cm³（83kg）
金属 0.43g/cm³（109kg）

線源：Co-60（1173.24keV）（付録 2） ※ 1001keV に近いピークとして選定

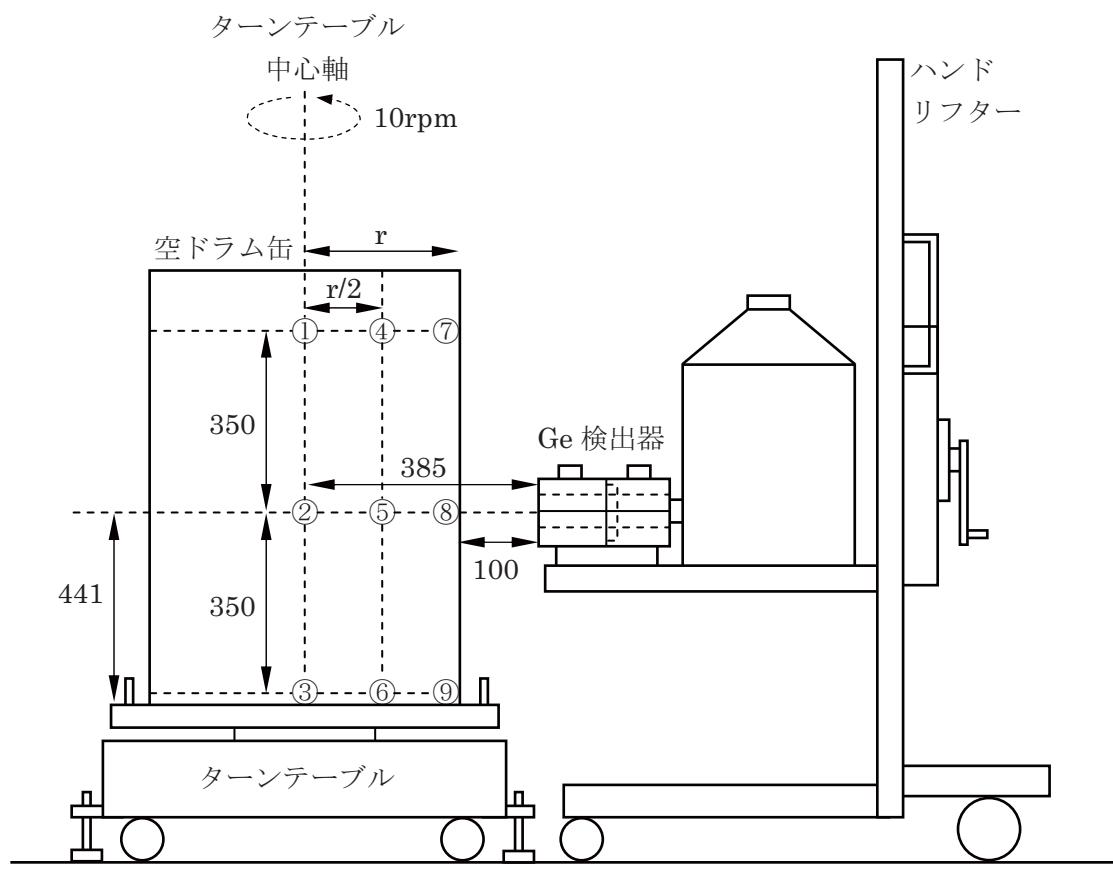
測定時間：600 秒または 1,000 秒

ターンテーブル回転数：10rpm

(2) 結果

評価結果を表 5.1、図 5.2 に示す。

分布幅は、空ドラム缶で±63%、塩化ビニル試験体で±73%、金属試験体で±75% となった。また、測定精度としては、金属試験体の分布幅±75%に加え、統計誤差、吸収補正誤差、検量線誤差等から約±100%になると推定される。



単位 : mm
 r : ドラム缶内径

図 5.1 線源偏在評価試験における幾何学的条件

表5.1 線源偏在評価試験結果(UWGS2)

内容物	位置	1173keV			中心(②) との比	分布幅	
		計数値 count	計測時間 sec	計数率 cps		Min $(Min+Max)/2$	Max $(Min+Max)/2$
空	①	11,000	600	18.33	0.53	37% ~ 63%	
	②	20,600	600	34.33	1.00		
	③	11,100	600	18.50	0.54		
	④	10,000	600	16.67	0.49		
	⑤	23,200	600	38.67	1.13		
	⑥	10,100	600	16.83	0.49		
	⑦	7,420	600	12.37	0.36		
	⑧	31,600	600	52.67	1.53		
	⑨	7,090	600	11.82	0.34		
塩化ビニル 0.3g/cm ³	①	20,367	1,000	20.37	0.45	27% ~ 73%	
	②	45,133	1,000	45.13	1.00		
	③	19,000	1,000	19.00	0.42		
	④	19,733	1,000	19.73	0.44		
	⑤	53,033	1,000	53.03	1.18		
	⑥	18,233	1,000	18.23	0.40		
	⑦	16,333	1,000	16.33	0.36		
	⑧	105,000	1,000	105.00	2.33		
	⑨	16,300	1,000	16.30	0.36		
金属 0.43g/cm ³	①	16,433	1,000	16.43	0.37	25% ~ 75%	
	②	44,333	1,000	44.33	1.00		
	③	15,733	1,000	15.73	0.35		
	④	16,867	1,000	16.87	0.38		
	⑤	52,267	1,000	52.27	1.18		
	⑥	17,267	1,000	17.27	0.39		
	⑦	14,367	1,000	14.37	0.32		
	⑧	102,000	1,000	102.00	2.30		
	⑨	14,700	1,000	14.70	0.33		

※ 空はH19年4月取得データ
塩化ビニル、金属はH13年6月取得データ

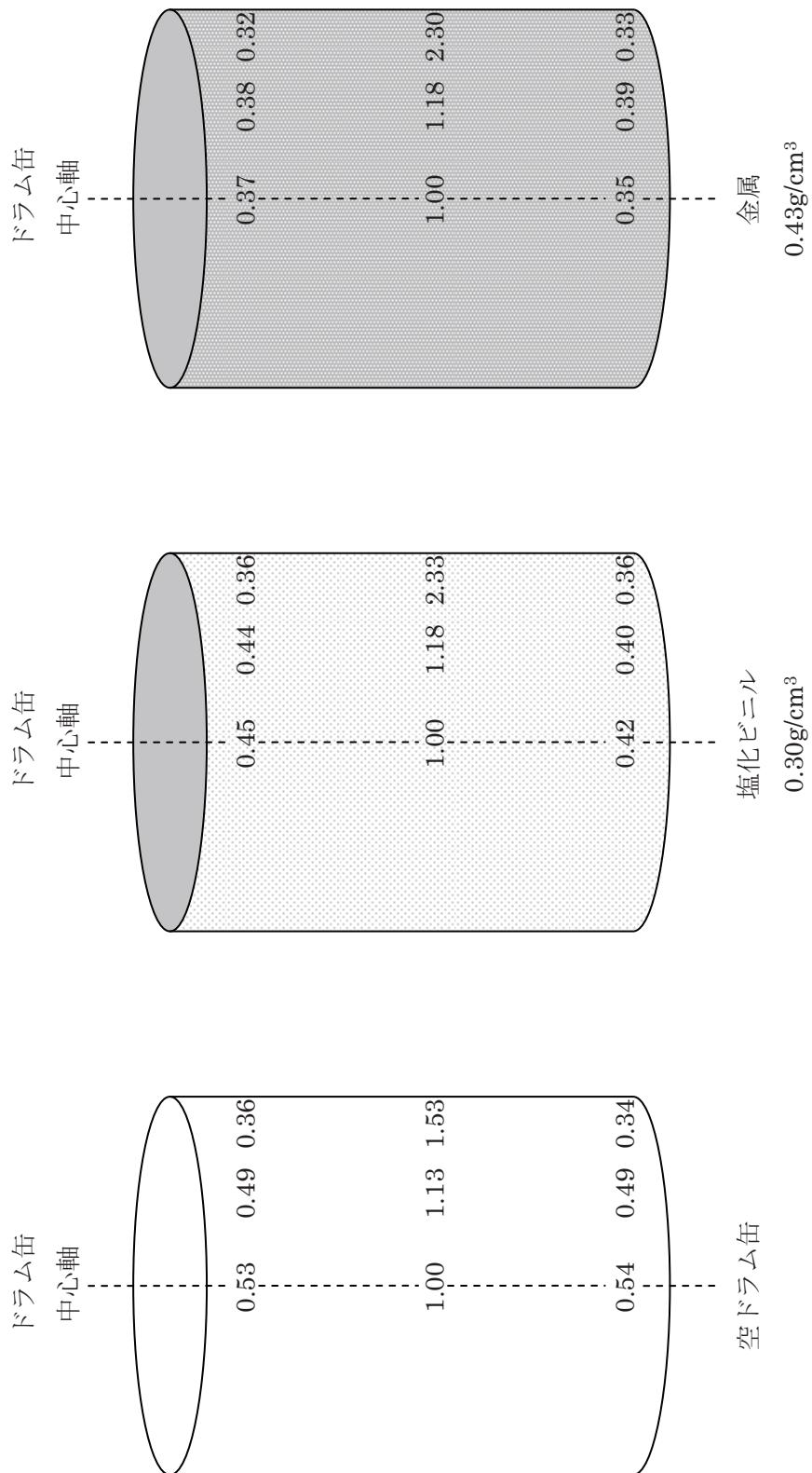


図 5.2 線源偏在評価試験結果（感度分布）

5.2 CDAS

5.2.1 線源偏在評価

(1) 目的及び方法

コンテナ内の線源位置による評価値への影響を確認するため、ウラン線源を空コンテナ内任意の位置に設置、測定し、各ポイントにおける設定値に対する評価値の比より、線源偏在による影響を確認する。

以下に測定条件を示す。

線源：天然ウラン UO₂ 粉末 100g (ポリбин)

測定時間：1 ポイントあたり 4 時間

線源設置ポイント：中央、表層など 25 ポイント (図 5.3)

(2) 結果

評価結果を表 5.2、図 5.4 に示す。

平均 0.90、分布幅は 0.45～2.08 (標準偏差 0.37) であり、空コンテナ内にウラン 100g が偏在した場合、設定値に対して $\pm 50\%$ (1σ) の評価となることを確認した。

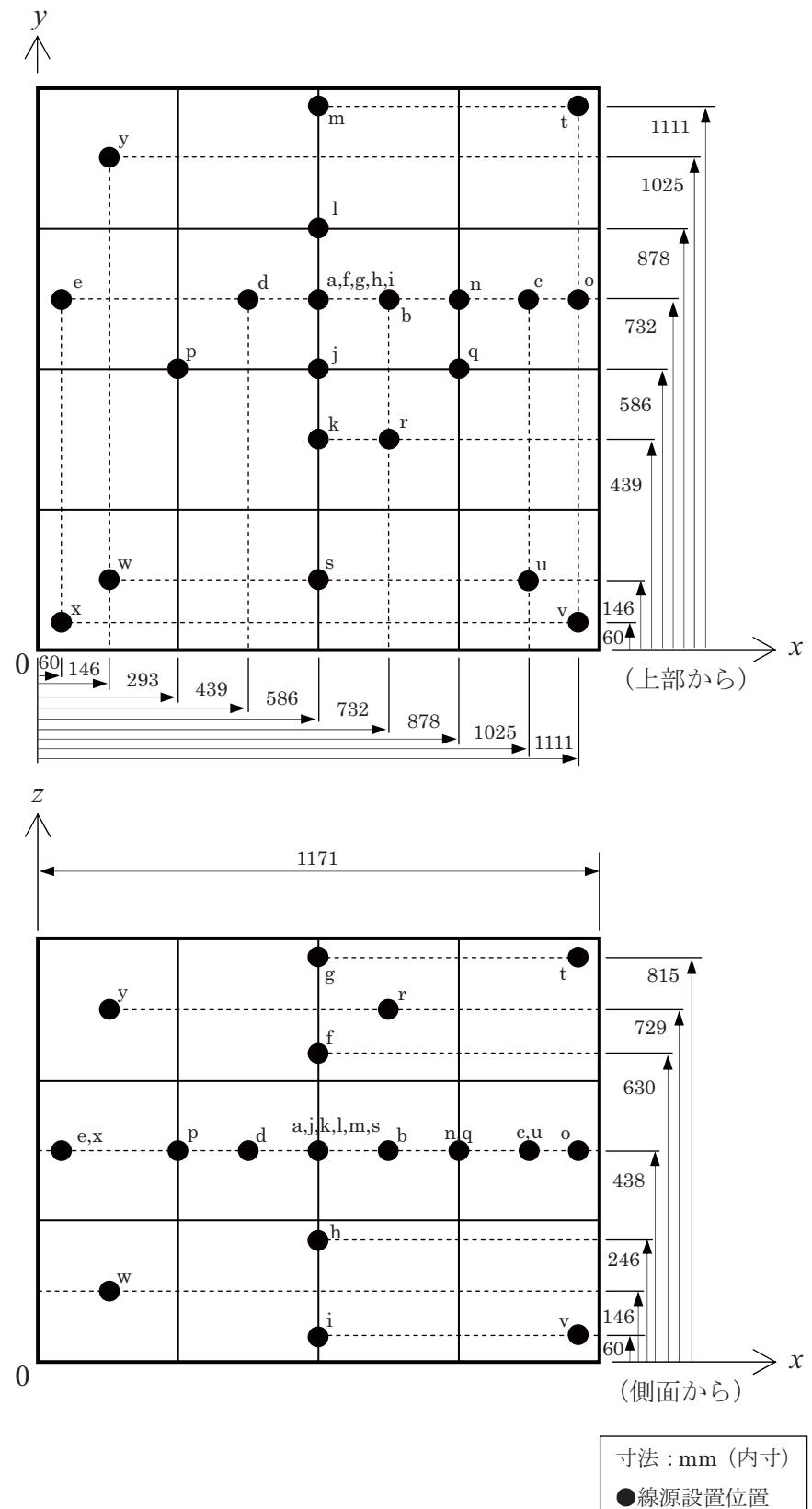


図 5.3 空コンテナ内線源設置位置

表5.2 線源偏在評価試験結果(CDAS)

解法Pはピーク法

ボイント	線源設置位置	x (mm)	y (mm)	z (mm)	U量 設定値	評価値 /設定値	解法
1	a	586	732	438	100g	1.36	P
2	b	732	732	438	100g	0.80	P
3	c	1025	732	438	100g	0.87	P
4	d	439	732	438	100g	2.08	P
5	e	60	732	438	100g	0.71	P
6	f	586	732	630	100g	0.55	P
7	g	586	732	815	100g	0.65	P
8	h	586	732	246	100g	1.23	P
9	i	586	732	60	100g	0.91	P
10	j	586	586	438	100g	1.01	P
11	k	586	439	438	100g	0.83	P
12	l	586	878	438	100g	1.29	P
13	m	586	1111	438	100g	1.08	P
14	n	878	732	438	100g	0.53	P
15	o	1111	732	438	100g	1.57	P
16	p	293	586	438	100g	0.98	P
17	q	878	586	438	100g	0.85	P
18	r	732	439	729	100g	0.53	P
19	s	586	146	438	100g	1.00	P
20	t	1111	1111	815	100g	0.45	P
21	u	1025	146	438	100g	0.55	P
22	v	1111	60	60	100g	0.72	P
23	w	146	146	146	100g	0.67	P
24	x	60	60	438	100g	0.59	P
25	y	146	1025	729	100g	0.75	P
						平均値	0.90
						標準偏差	0.37
						変動係数	41.1%

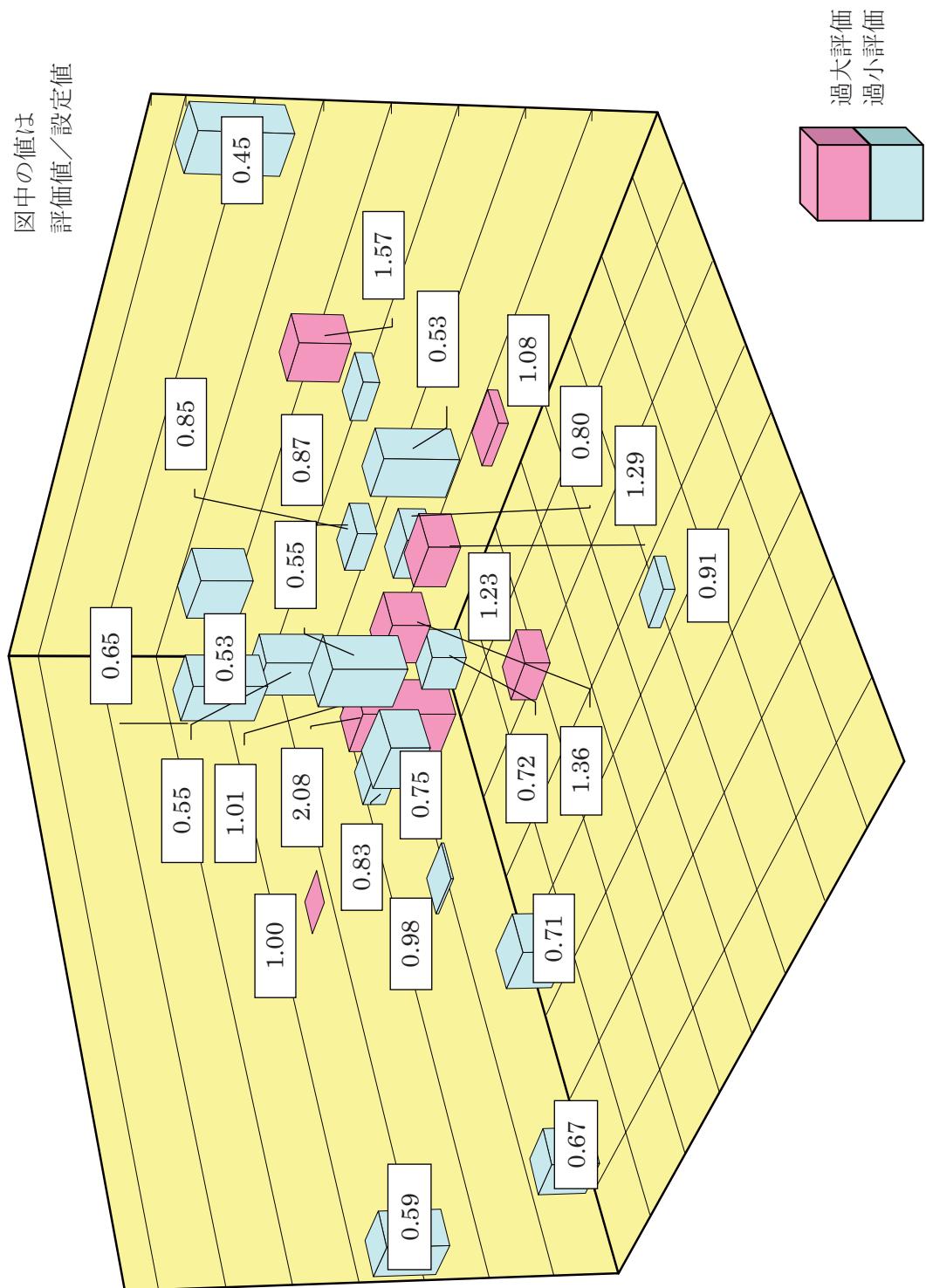


図 5.4 天然ウラジン 100g の線源位置による誤差の分布（空コントナ）

6. 廃棄物測定

6.1 非破壊測定実績

ウラン廃棄物の非破壊測定実績を表 6.1 に示す。

ドラム缶廃棄物については、平成 9 年 9 月より実施したピットの改善措置を期に、測定手法を検討、装置の製作を行い、平成 10 年 6 月よりピット廃棄物^{注4)} の測定を開始した。ピット廃棄物については、測定終了後、平成 12 年 1 月に計量報告し、検認査察を受け、保管廃棄手続きを行った。ピット廃棄物以外の廃棄物についてもウラン量測定を継続し、平成 23 年 2 月に計量報告、平成 23 年 3 月末での測定本数は総計 18,884 本（うちピット廃棄物 4,703 本）となった。

また、コンテナ廃棄物については、適切な非破壊測定装置がなかったため、平成 12 年 4 月より H14 年度末にかけて、測定手法の構築、装置の製作、据え付けを行い、平成 16 年 1 月より測定を開始し、平成 23 年 3 月末で総計 749 基（うちピット廃棄物 110 基）の測定を実施した。ピット廃棄物については、推定値で計量報告していたため、実測後修正報告を行った。その他のコンテナ廃棄物についてはドラム缶廃棄物と同様の時期に計量報告を行った。

注 4) ウラン製錬関係施設から発生した廃棄物

表6.1 非破壊測定実績

対象物	施設	年度											H23年3月31日現在			
		H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	
ドラム缶	ATR棟※1	12月 設計 製作 試験 ---	6月 9月 4,526本(ヒット)													
	第4廃棄物倉庫※2 UWSF		12月 9本 (ヒット)	8月 168本 (ヒット)	2月 130本(うち詰替4本)											
	ウラン系廃棄物倉庫※3					6月 2,178本	8月 2,178本									
	第2UWSF							11月				11,873本(うち詰替187本)				
	コントナ 第2UWSF					設計、製作、試験、据付		1月								
	計量報告 第2UWSF											749基(うちヒット残棄物110基)				
													8月修正報告 ▼	2月※5 ▽	2月	
													(ヒット)ドラム缶:3,385※4本 コンテナ:110基	ドラム缶:22,078※6本 コンテナ:908※6基		

※1 プルトニウム燃料工場第三開発室ATR棟(廃棄物屋外貯蔵ピット)取出工事に伴う廃棄物の一時保管場所として利用

※2 ウラン廃棄物倉庫として運用していたが、老朽化のため現在は解体・撤去済み

※3 旧廃棄物屋外貯蔵ピット(作業建家で、管理区域解除後、現在は倉庫(第1保管庫)として利用

※4 破壊分析した原油6本を含む

※5 NDA済廃棄物に対し実施したが、査察対象の変更により破棄

※6 未測定廃棄物を含む全廃棄物(H22年12月31日現在)

6.2 ドラム缶廃棄物測定

H10年6月からH23年3月31日までで、総計18,884本の測定を行った（内容物を詰め替えたドラム缶廃棄物191本を含む）。また、ピット廃棄物については、4,703本の測定をH10年6月から9月に実施した。ピット廃棄物のうち金属廃棄物については選択的に圧縮による減容処理を行った。

ドラム缶廃棄物1本あたりの測定時間は、原則として600秒としているが、コンクリートや金属などの比較的重い廃棄物で γ 線が透過しにくいものについては、1,200秒～1,800秒の測定を実施した。また、ピット廃棄物については、UWGS2と手法（外部透過線源を用いたパッシブガンマ法）は同じだが、機器等の組み合わせが異なる測定装置にて評価を行った。

6.2.1 ウラン廃棄物（ピット廃棄物以外）

ピット廃棄物以外のドラム缶廃棄物の測定本数は、総計14,181本であるが、測定後191本について、内容物の詰め替えを実施し、測定をしているため、実際に保管管理しているNDA済みドラム缶廃棄物の本数は13,990本であり、評価はこれらについて行うこととする。

- (1) 表6.2、図6.1に測定したドラム缶廃棄物の内容物割合を示す。
不燃物については、金属が5,072本(36%)、コンクリート・土砂が2,836本(20%)、焼却灰が150本(1%)、処理体フィルタが106本(1%)、フィルタ類が64本(0.5%)、その他が718本(5%)であった。また、難燃物については、塩ビが2,084本(15%)、ゴムが669本(5%)、その他が458本(3%)、可燃物は、木片が891本(6%)、紙・ウエスが421本(3%)、酢酸ビニルが417本(3%)、ポリエチレンが79本(1%)で、その他ガムテープ等が25本(0.2%)であった。
- (2) 不燃物が6割以上を占め、難燃物が約2割、可燃物が約1割という割合であった。
- (3) 種別については、金属類が最も多く約3割、次いでコンクリート・土砂が約2割で、これらが全体の約半分を占めている。
- (4) 表6.3、表6.4にウラン区分及び発生元を示す。
ウラン区分については、天然ウランが97%、濃縮ウランが2%、回収ウランが1%、劣化ウランが0.4%であった。発生元については、廃棄物屋外貯蔵ピット工事で発生した二次廃棄物が一番多く、次いで旧生産棟、再処理（ウラン試験）、J棟・G棟であった。
- (5) 図6.2にU-238濃度分布を示す。
13,990本のうち約75%がND（検出下限値未満）であり、ウランが検出されたドラム缶廃棄物（3,461本）の平均濃度は14Bq/gで、全体では3.4Bq/gであった。
- (6) クリアランスレベルを1.0Bq/g（IAEA RS-G-1.7）とすると82%がクリアランスの対象となる可能性がある。
- (7) 重量分布としては、40～100kgに可燃・難燃が多くなっている。また、不燃については、焼却灰は内容物がほぼ規格化されているため50～120kgに集中し、金属やコンクリート・土砂類及びその他については、材質や内容物が多様なため40～410kgの広範囲に分布しており、U-238濃度も広範囲にわたっている。
- (8) 重量は20kg～410kgの範囲で、可燃物ドラム缶の平均重量は52kg、難燃物は62kg、不燃物は154kgであり、全体では119kgであった。
- (9) 含有ウラン量については、最大で16.7kgU-238、表面線量は3 μ Sv/hであった。

(10) 子孫核種については、ウラン系列の Bi-214 が 23%、アクチニウム系列の Pb-211 が 8%、トリウム系列の Ac-228 が 17%で、その他 4%に Cs-137 が確認された。

表6.2 ドラム缶廃棄物の内容物割合

内容物の種類	測定本数 計	全体に対する割合		各燃性に対する割合	
		計	計	計	計
可燃	木片	891	1,833	6%	49%
	紙・ウエス	421		3%	23%
	酢酸ビニル	417		3%	23%
	ホリエチレン	79		1%	4%
	ガムテープ [®]	20		0.1%	1%
	タイベックスツ	2		0.01%	0.1%
	レガーテープ [®]	1		0.01%	0.1%
	その他	2		0.01%	0.1%
難燃	塩ビ	2,084	3,211	15%	65%
	ゴム	669		5%	21%
	その他	458		3%	14%
不燃	金属(除染難)	4,395	8,946	31%	49%
	金属(除染容易)	677		5%	8%
	コンクリート・土砂	2,836		20%	32%
	焼却灰	150		1%	2%
	処理体フィルタ	106		1%	1%
	フィルタ(他)	45		0.3%	1%
	フィルタ(木枠)	19		0.1%	0.2%
	その他	718		5%	8%
合計		13,990		100%	

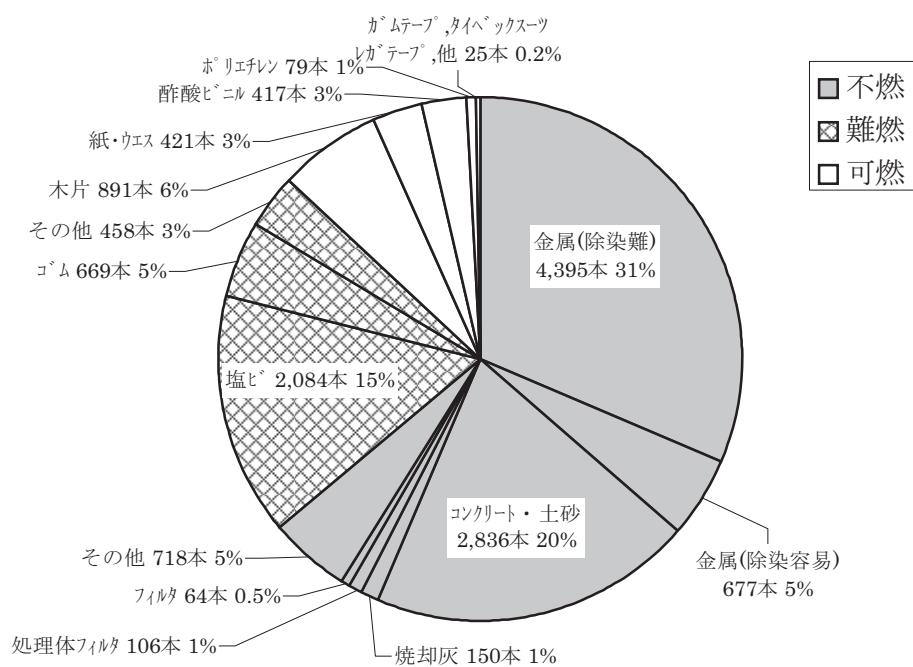


図6.1 ドラム缶廃棄物の内容物割合

表6.3 ドラム缶廃棄物のウラン区分

ウラン区分	本数	割合
天然	13,528	97%
濃縮	241	2%
回収	168	1%
劣化	53	0.4%
合計	13,990	100%

表6.4 ドラム缶廃棄物の発生元

施設番号	本数	割合	施設名称
A-101	28	0.2%	ウラン系廃棄物貯蔵施設(UWSF)
B-101	16	0.1%	第1～6廃棄物倉庫
C-301	276	2%	モックアップ
D-101	2,378	17%	ウラン系廃棄物倉庫(旧ピット) ^{※1}
P-301	11	0.1%	Pu第一開発室
P-303	52	0.4%	Pu第三開発室
P-304	234	2%	燃料製造機器試験室(モックアップ)
P-305	40	0.3%	ウラン貯蔵庫(Pu)
R-301	1,289	9%	再処理(ウランラン)
S-301	73	1%	安全管理棟
S-302	271	2%	安全管理別棟 ^{※2}
S-303	610	4%	第2ウラン系廃棄物貯蔵施設(第2UWSF)
T-201	164	1%	A棟
T-202	108	1%	B棟
T-203	131	1%	D棟 ^{※3}
T-204	7	0.1%	K棟 ^{※3}
T-205	1	0.01%	R棟 ^{※3}
T-206	1,834	13%	旧生産棟 ^{※3}
T-207	416	3%	応用試験棟
T-208	340	2%	焼却施設
T-209	152	1%	中央廃水処理場 ^{※3}
T-210	815	6%	洗濯場
T-500	858	6%	M棟(UWTF)
U-101	161	1%	廃水処理室
U-102	926	7%	G棟
U-103	554	4%	H棟
U-104	1,214	9%	J棟
U-105	561	4%	L棟
U-106	191	1%	M棟
U-107	279	2%	濃縮施設(その他)
合計	13,990	100%	

※1 廃止後、倉庫へ転用

※2 廃止後、一般施設として運用

※3 廃止後、撤去

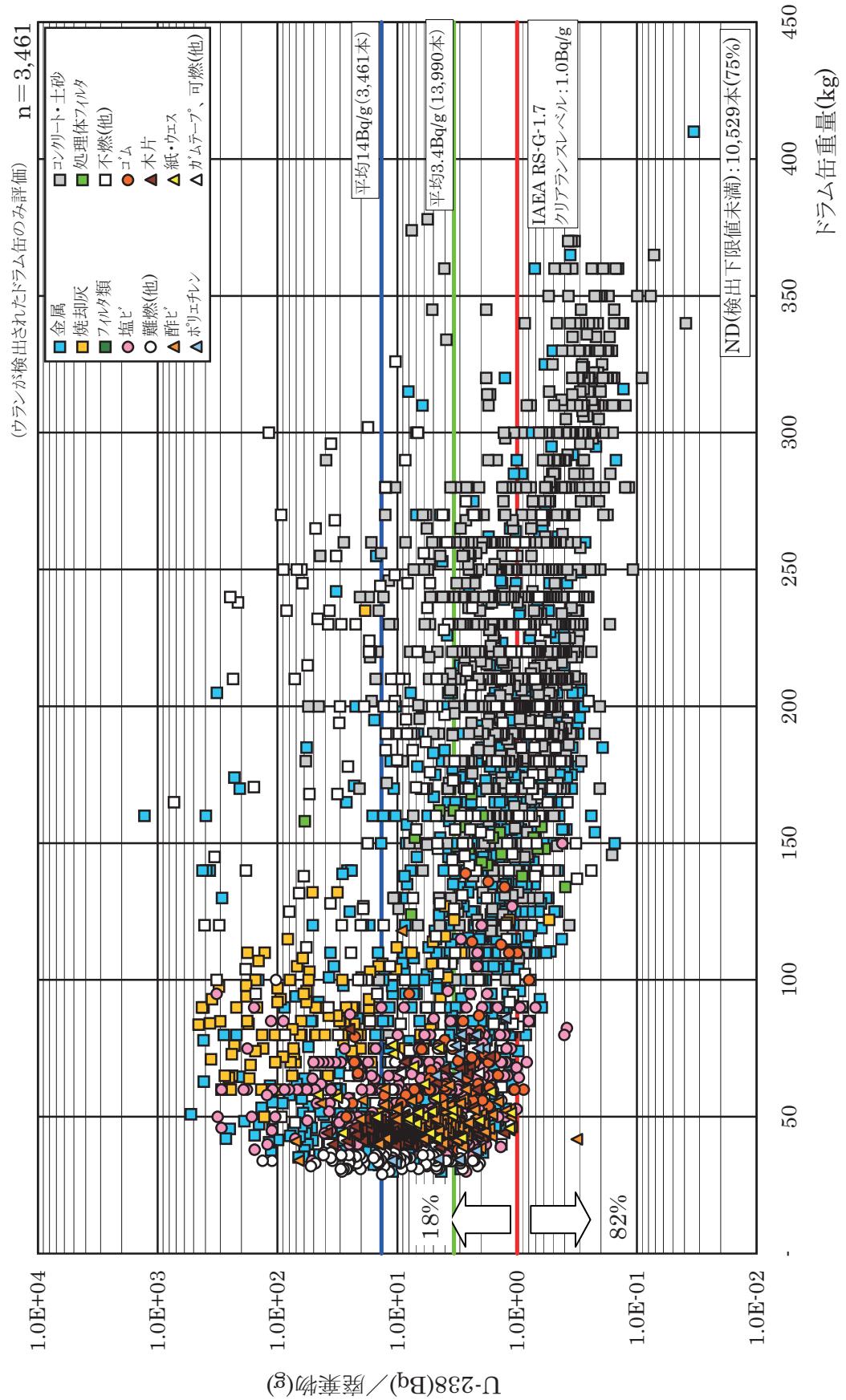


図6.2 ドラム缶廃棄物のU-238濃度分布

6.2.2 ピット廃棄物

測定本数は総計 4,703 本であるが、測定後、金属類で圧縮可能なものは減容処理し処理体金属 157 本としたため、実際に管理している NDA 濟みドラム缶廃棄物は 3,222 本である。処理体金属については、計量上の量を一致させるため、圧縮する前の NDA 値を用いてウラン量を評価した。

- (1) 表 6.5、図 6.3 に測定したドラム缶廃棄物の内容物割合を示す。

不燃物は、コンクリート・土砂が 1,166 本(36%)、金属が 95 本(3%)、焼却灰が 3 本(0.1%)、その他が 733 本(23%)であった。また、難燃物については塩ビのみで 881 本(27%)であった。可燃物は、木片が 249 本(8%)、紙・ウエスが 53 本(2%)、酢酸ビニルが 39 本(1%)、その他ポリエチレン等が 3 本(0.1%)であった。

- (2) ウラン区分は、ピット製錬時の廃棄物であることから全て天然ウランである。

- (3) 図 6.4 に U-238 濃度分布を示す。

3,222 本のうち ND は 25%で、クリアランスレベルを 1.0Bq/g とすると、26%がクリアランスの対象となる可能性がある。また、ウランが検出されたドラム缶廃棄物の平均濃度は 76Bq/g で、ND を含めた全体では 57Bq/g であった。これらの濃度は、ピット廃棄物以外のウラン廃棄物と比べて、それぞれの場合で約 5.4 倍、約 17 倍高い値である。

- (4) 重量は 30kg～294kg で、可燃物ドラム缶の平均重量は 64kg、難燃物は 52kg、不燃物は 174kg であり、全体では 129kg であった。

- (5) 含有ウラン量については、最大で約 30kgU-238、表面線量は $16 \mu \text{Sv/h}$ であった。

6.2.3 ピット廃棄物（処理体金属）

ピット廃棄物のうち金属廃棄物については、貯蔵裕度を確保するために圧縮し、減容することとした。収納は H 級ドラム缶で、圧縮前にウラン量を計測し、そのデータを基に重量配分して処理体金属中のウラン量の評価を行い、科学技術庁（現文部科学省）及び IAEA へ計量報告した。

図 6.5 に評価結果を示す。

処理体金属は 157 本で、平均重量は約 590kg、平均ウラン量は約 620gNU であった。収納状態により多少重量のばらつきはあるが、処理体金属 1 個あたり約 75kg に規格化されており、ドラム缶 1 本あたり 8 個を目安に収納されているため、ドラム缶重量としては 600kg～650kg に集中している。

表6.5 ドラム缶廃棄物の内容物割合（ピット廃棄物）

内容物の種類	測定本数 計	全体に対する割合		各燃性に対する割合		
		計	計	計	計	
可燃	木片	249	344	8%	11%	72%
	紙・ウエス	53		2%		15%
	酢酸ビニル	39		1%		11%
	ポリエチレン	2		0.1%		1%
	その他	1		0.03%		0.3%
難燃	塩ビ	881	881	27%	27%	100%
不燃	コンクリート・土砂	1,166	1,997	36%	62%	58%
	金属(除染難)	95		3%		5%
	焼却灰	3		0.1%		0.2%
	その他	733		23%		37%
合計		3,222	100%			

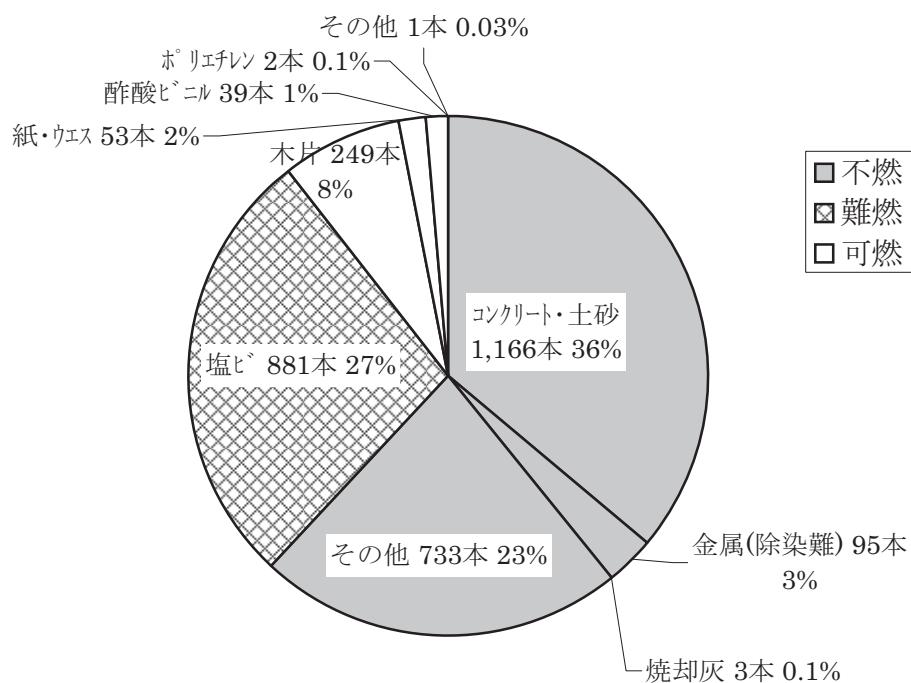


図6.3 ドラム缶廃棄物の内容物割合（ピット廃棄物）

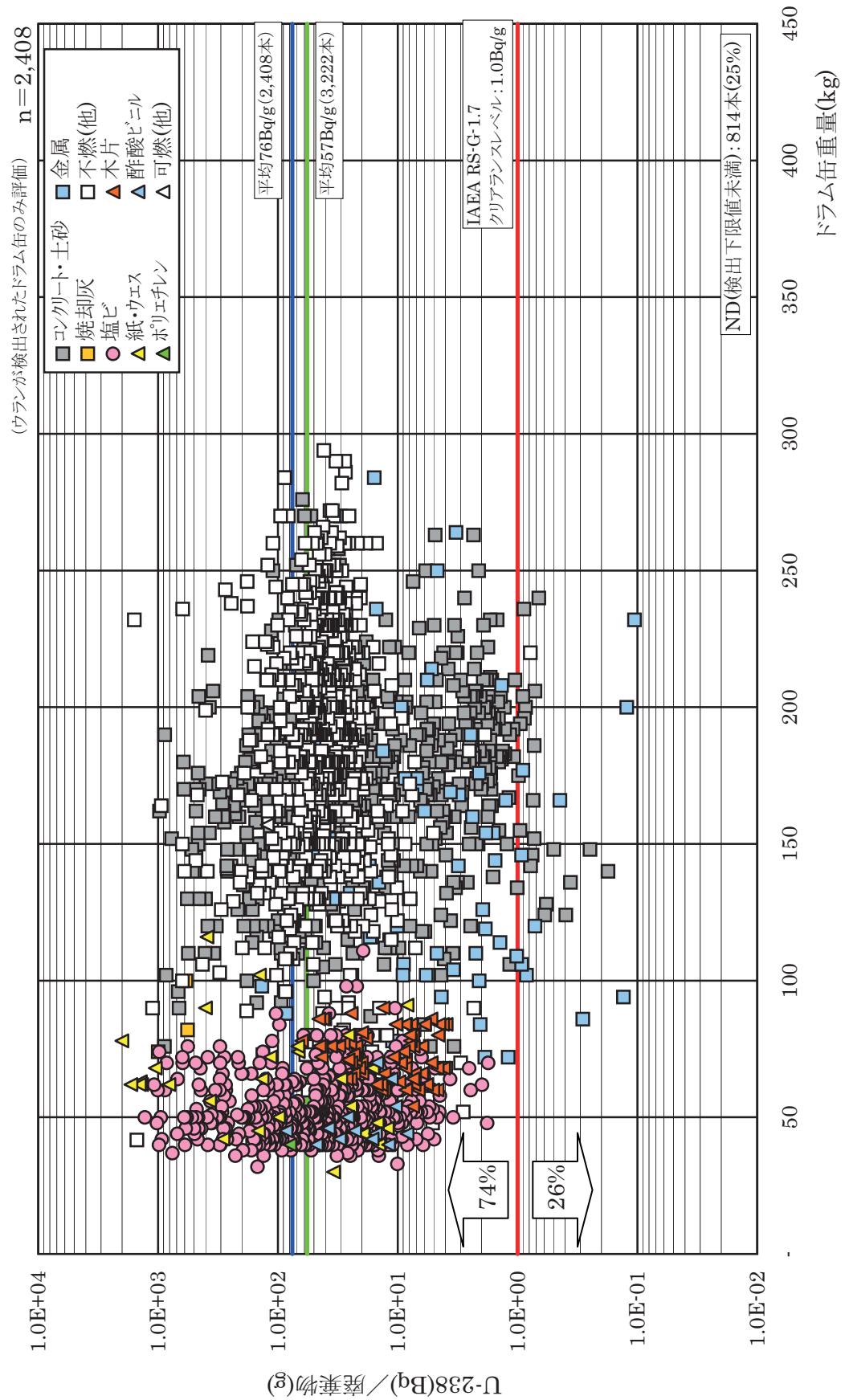


図6.4 ドラム缶廃棄物のU-238濃度分布(ピット廃棄物)

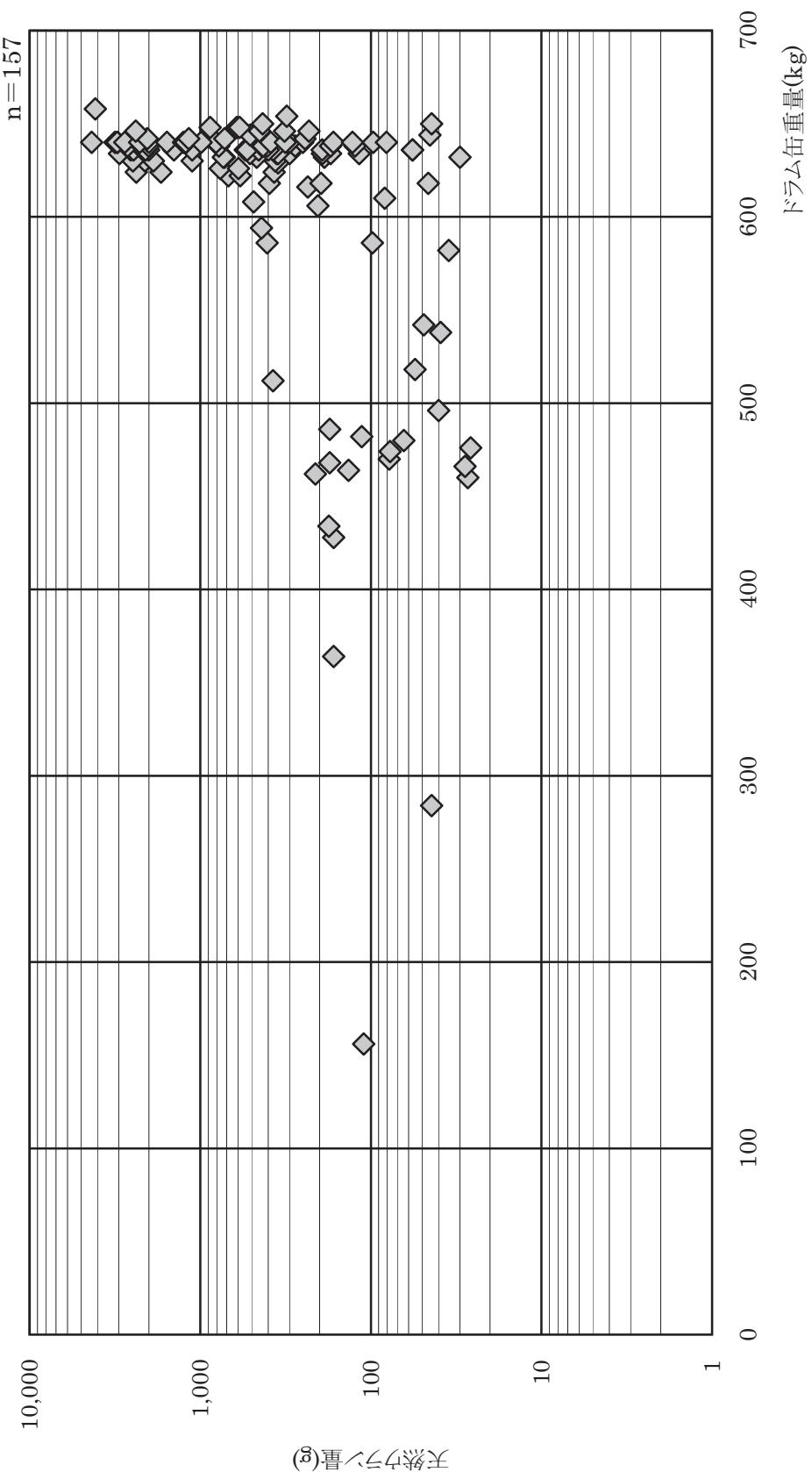


図6.5 処理体金属評価結果

6.3 コンテナ廃棄物測定

H16年1月からH22年9月30日までで、合計749基の測定を行った。

測定は、コンテナ廃棄物をフォークリストにてCDASターンテーブルに積載し、1基あたり4時間測定(1側面1時間×4側面)し、専用の解析ソフトにて評価する。運搬やターンテーブルへのアクセス等の作業時間を考慮すると、1日1基の測定となる。

6.3.1 ウラン廃棄物（ピット廃棄物以外）

H16年1月からH22年8月末までで、合計639基の測定を行った。

(1) 内容物の割合を表6.6、図6.6に示す。

不燃物は、金属が493基(77%)、フィルタが59基(9%)、コンクリート・土砂が6基(1%)、その他が52基(8%)であった。また、難燃物については、塩ビが15基(2%)、ゴムが1基(0.2%)、その他が13基(2%)であった。

(2) 全体の95%が不燃物で、種別としては金属が8割弱を占めている。

(3) 表6.7、表6.8にウラン区分及び発生元を示す。

ウラン区分については、天然ウランが89%、濃縮ウランが0.5%、回収ウランが10%で、劣化ウランはなかった。発生元については、廃棄物屋外貯蔵ピット工事関連から発生した二次廃棄物が一番多く、次いで第1～6廃棄物倉庫、燃料製造機器試験室（モックアップ）、第一応用試験棟、洗濯場であった。

(4) 表6.9に評価ケースを示す。

全体の17%がNDであった。また、約半分が弱 γ 線を利用したグロス評価法であり、残り約3割が γ 線ピークを用いた評価法（ピーク法）で、対向対評価法及び線源位置設定法の割合は同等であった。子孫核種については、3%に評価に影響のある強度の γ 線が確認された。

(5) 図6.7、図6.8にU-238濃度分布を示す。

比較的濃度の高い方(1.0Bq/g～)に対向対評価法が適用されており、線源位置設定法は線源量が少なくても偏在した場合や γ 線の遮へい効果が大きい場合に適用されることから全体的に分布している。グロス評価法は γ 線強度が弱いため、低い濃度域に適用されており、平均濃度は、ウランが検出されたコンテナ廃棄物に対して2.7Bq/gで、NDを含めた全体では2.3Bq/gであった。

(6) クリアランスレベルを1.0Bq/gとすると、約8割がクリアランスの対象となる可能性がある。これら廃棄物に対する評価法は、グロス法が適用されており、線源が少なくても偏在している場合などは線源位置設定法が適用されていた。また、種別は金属が多く、クリアランス対象物を金属に限定すると、金属廃棄物のうち約7割が該当する。

(7) 分布としては、コンテナ重量500kg前後のところに比較的密度の低いフィルタ、塩ビ類が多く、金属については配管や大型設備の解体品など形状や材質が多様なため、500kgから2,000kgの広範囲にわたっていた。

(8) 重量は約500kg～2,500kgの範囲で、不燃物の平均重量は1,011kg、難燃物は618kgであり、全体では994kgであった。

(9) 含有ウラン量については、最大で26.8kgU-238、表面線量は6 μ Sv/hであった。

表6.6 コンテナ廃棄物の内容物割合

内容物の種類		測定基数 計	全体に対する割合		各燃性に対する割合	
			計	計	計	計
難燃	塩ビ	15	2%	5%	52%	100%
	ゴム	1			3%	
	その他	13			45%	
不燃	金属(除染難)	443	69%	95%	73%	100%
	金属(除染容易)	50			8%	
	フィルタ(他)	54			8%	
	フィルタ(木枠)	5			1%	
	コンクリート・土砂	6			1%	
	その他	52			8%	
	合計	639			100%	

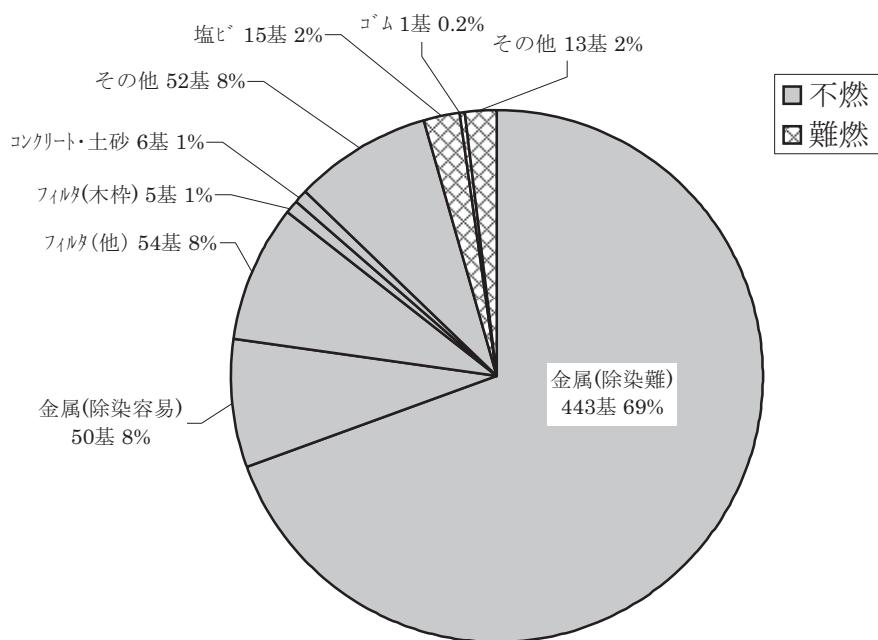


図6.6 コンテナ廃棄物の内容物割合

表6.7 コンテナ廃棄物のウラン区分

ウラン区分	基数	割合
天然	570	89%
濃縮	3	1%
回収	66	10%
劣化	0	0%
合計	639	100%

表6.8 コンテナ廃棄物の発生元

施設番号	基数	割合	施設名称
A-101	3	0.5%	ウラン系廃棄物貯蔵施設(UWSF)
B-101	97	15%	第1～6廃棄物倉庫
C-301	2	0.3%	モックアップ
D-101	198	31%	ウラン系廃棄物倉庫(旧ピット) ^{※1}
P-304	80	13%	燃料製造機器試験室(モックアップ)
P-305	2	0.3%	ウラン貯蔵庫(Pu)
S-301	2	0.3%	再処理(ウランラン)
T-206	35	5%	旧生産棟 ^{※2}
T-207	59	9%	応用試験棟
T-208	6	1%	焼却施設
T-209	6	1%	中央廃水処理場
T-210	58	9%	洗濯場
T-500	6	1%	M棟(UWTF)
U-101	1	0.2%	廃水処理室
U-102	11	2%	G棟
U-103	18	3%	H棟
U-104	30	5%	J棟
U-105	25	4%	L棟
合計	639	100%	

※1 廃止後、倉庫へ転用

※2 廃止後、撤去

表6.9 評価ケース

評価手法	基数	割合	評価ケース	基数	割合	評価法	基数	割合
ピーコク法	217	34%	U-238	195	31%	対向対評価法	110	17%
						線源位置設定評価法	85	13%
	子孫核種	3%	U-238	22	3%	対向対評価法	10	2%
						線源位置設定評価法	12	2%
グロス法	312	49%	U-238	312	49%	グロス評価法	312	49%
ND	110	17%		110	17%	—	110	17%
合計	639	100%		639	100%		639	100%

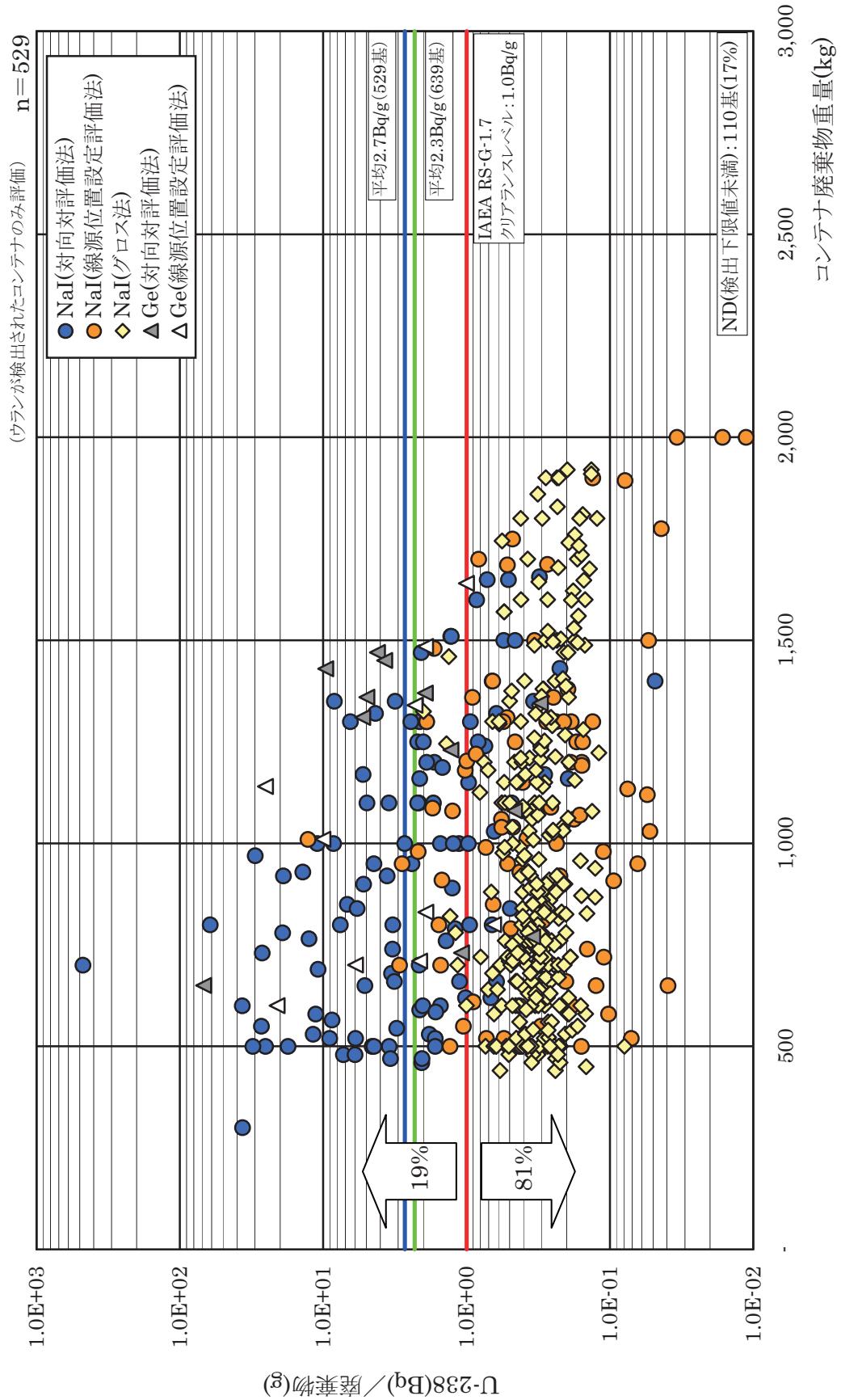


図6.7 コントナ廃棄物のU-238濃度分布(評価法)

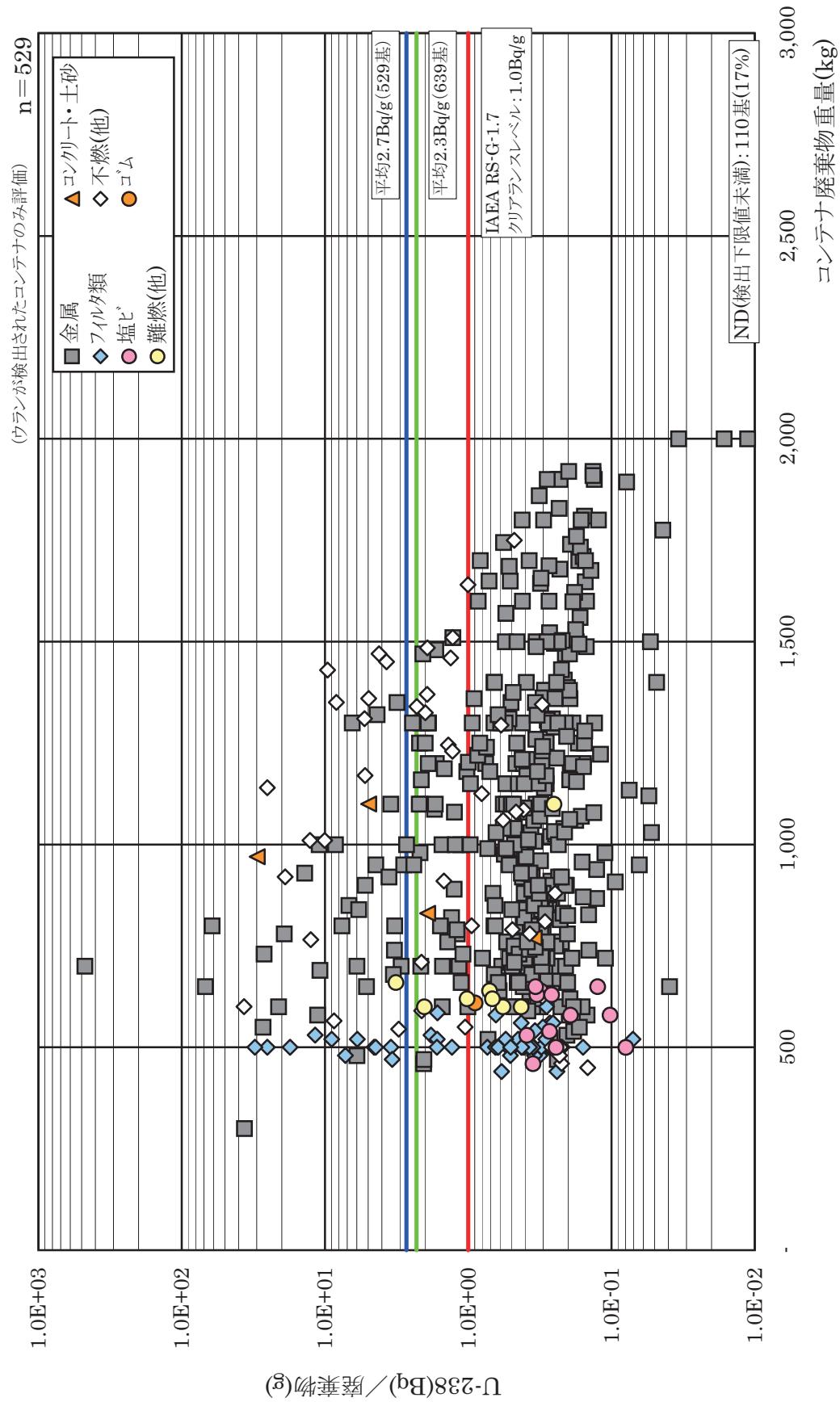


図6.8 コンテナ廃棄物のU-238濃度分布(種別)

6.3.2 ピット廃棄物

H16年5月からH18年3月まで、合計110基の測定を行った。

- (1) 内容物の割合を表6.10、図6.9に示す。

内容物は全て不燃物で、金属が96基(87%)、その他が14基(13%)であった。

- (2) 表6.11に評価ケースを示す。

測定したコンテナについては、全てウランが検出された。評価法は、全てピーク法での評価となり、95%が対向対評価法であった。また、評価に影響のある子孫核種が含有されている割合は約6割であった。これは、ウラン製錬時の廃棄物で、ウラン鉱石等を多く扱っていたためと考えられる。

- (3) 図6.10、図6.11にU-238濃度分布を示す。

平均濃度は8.9Bq/gとなり、クリアランスレベルを1.0Bq/gとすると、クリアランス廃棄物の対象となる可能性のある廃棄物は5%であった。濃度分布としては、10Bq/g前後に集中しており、通常のウラン廃棄物と比較すると約3倍高い濃度であった。

- (4) 全体的に対向対評価法が適用されており、 γ 線が比較的強い廃棄物に有効な手法であることを確認した。また、1.0Bq/gより低い濃度の廃棄物に対して、線源位置設定法が有効な手法であることを確認した。

- (5) 分布としては、コンテナ廃棄物重量1,000kgまでは金属が多く、1,000kgを超えてくると金属やコンクリート・土砂等が混在した不燃(その他)が多かった。

- (6) 含有ウラン量については、最大で約5kgU-238、表面線量は3.5 μ Sv/hであった。

- (7) 重量は680kg～1,400kgの範囲で、平均880kgであった。

表6.10 コンテナ廃棄物の内容物割合（ピット廃棄物）

内容物の種類	測定基数		全体に対する割合	
	計		計	
不燃	96	110	87%	100%
その他	14		13%	

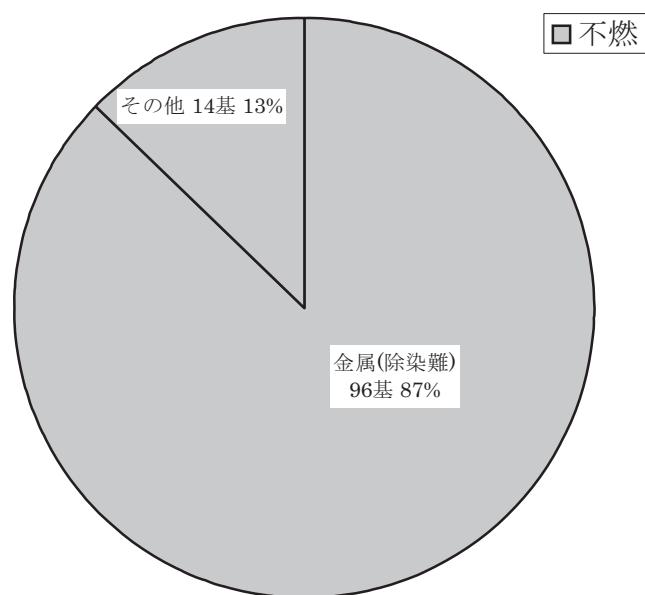


図6.9 コンテナ廃棄物の内容物割合（ピット廃棄物）

表6.11 評価ケース（ピット廃棄物）

評価手法	基数	割合	評価ケース	基数	割合	評価法	基数	割合
ピーク法	110	100%	U-238	42	38%	対向対評価法	39	35%
			子孫核種	68	62%	線源位置設定評価法	3	3%
グロス法	0	0%	U-238	0	0%	対向対評価法	66	60%
ND	0	0%		0	0%	線源位置設定評価法	2	2%
合計	110	100%		110	100%		110	100%

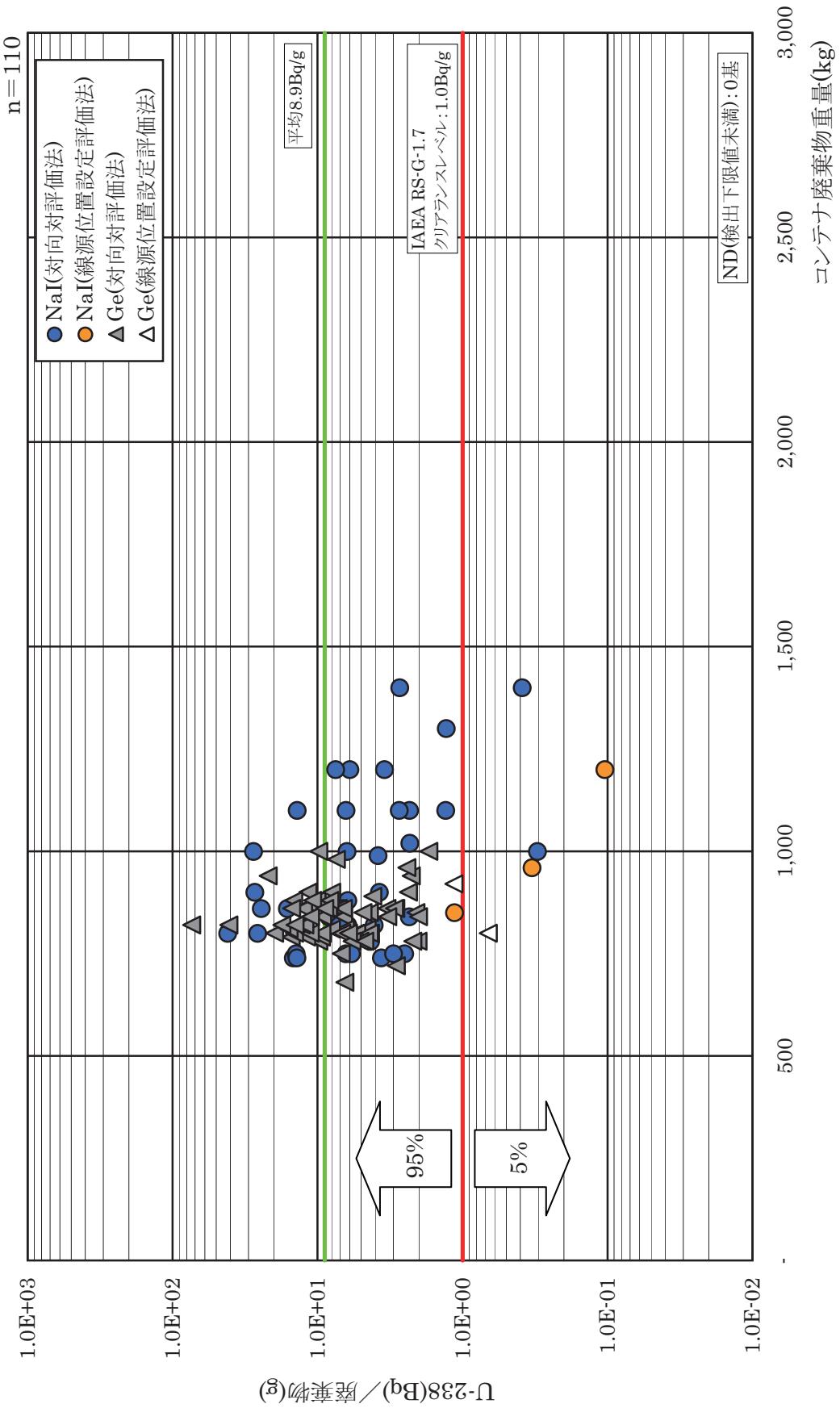


図6.10 コンテナ廃棄物のU-238濃度分布(ヒット廃棄物)(評価法)

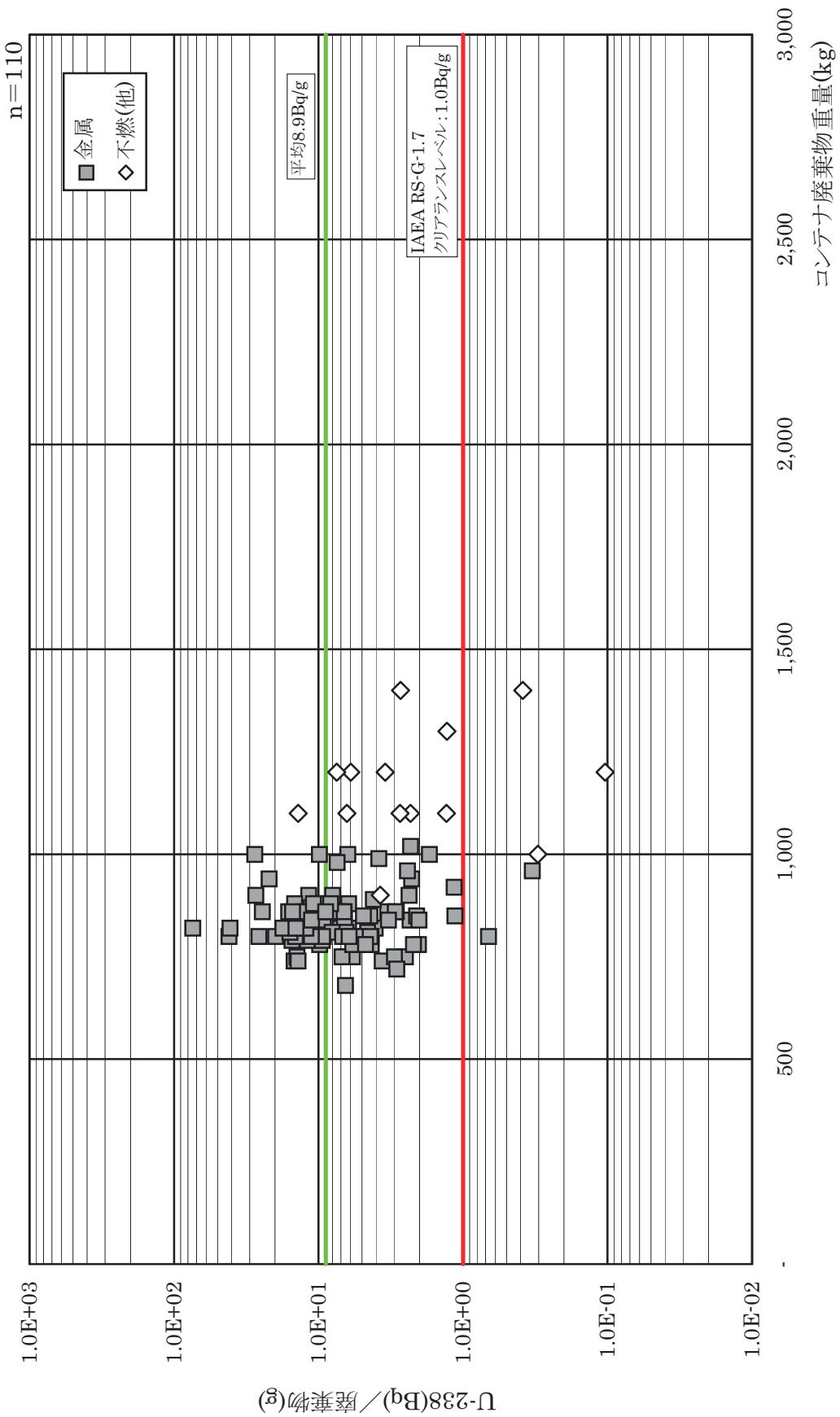


図6.11 コンテナ廃棄物のU-238濃度分布(ピット廃棄物)(種別)

6.3.3 検出下限値

検出下限値未満のコンテナ廃棄物について、NaI(Tl)検出器及びGe検出器による検出下限値の評価を行った。結果を図6.12、図6.13に示す。

NaI(Tl)検出器による評価では、例えば1,000kgのコンテナ廃棄物の場合、検出器から一番遠い中央部で約21gU-238、検出器に近い表層部で約3gU-238となった。またGe検出器については、中央部で約71gU-238、表層部で約9gU-238であった。

図6.12、図6.13より、NaI(Tl)検出器の方がGe検出器よりも感度が約3倍良いことを確認した。また、検出器から遠い中央部付近より検出器に近い表層部付近の方が約7倍感度が良いことを確認した。

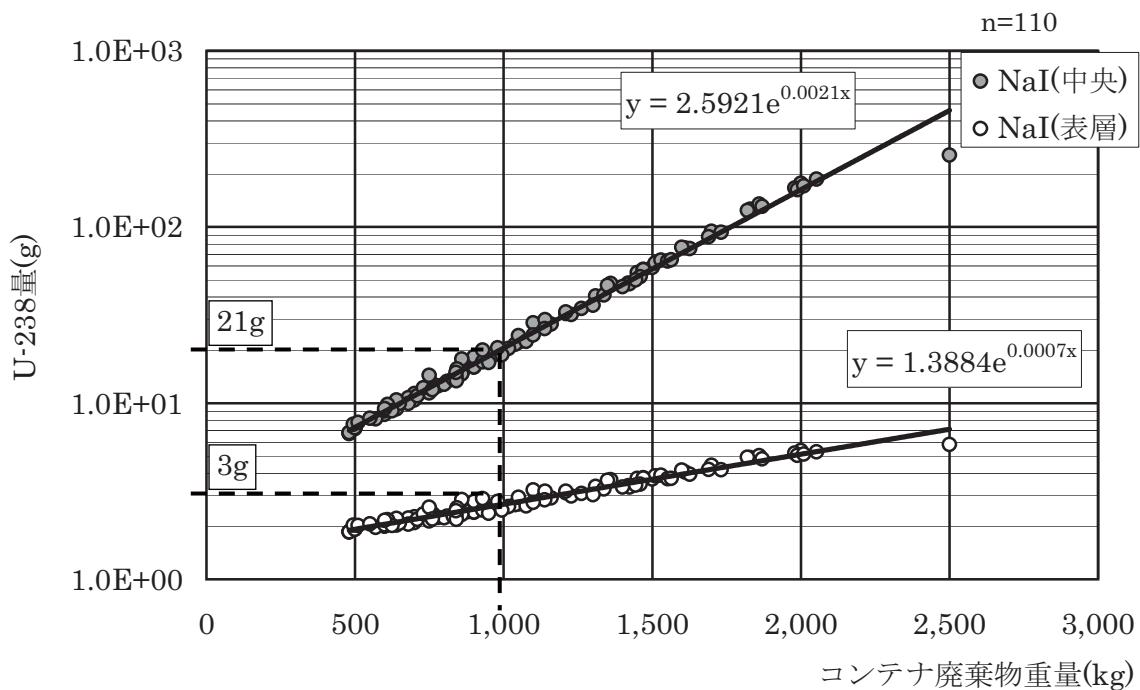


図6.12 検出下限値 (NaI(Tl)検出器)

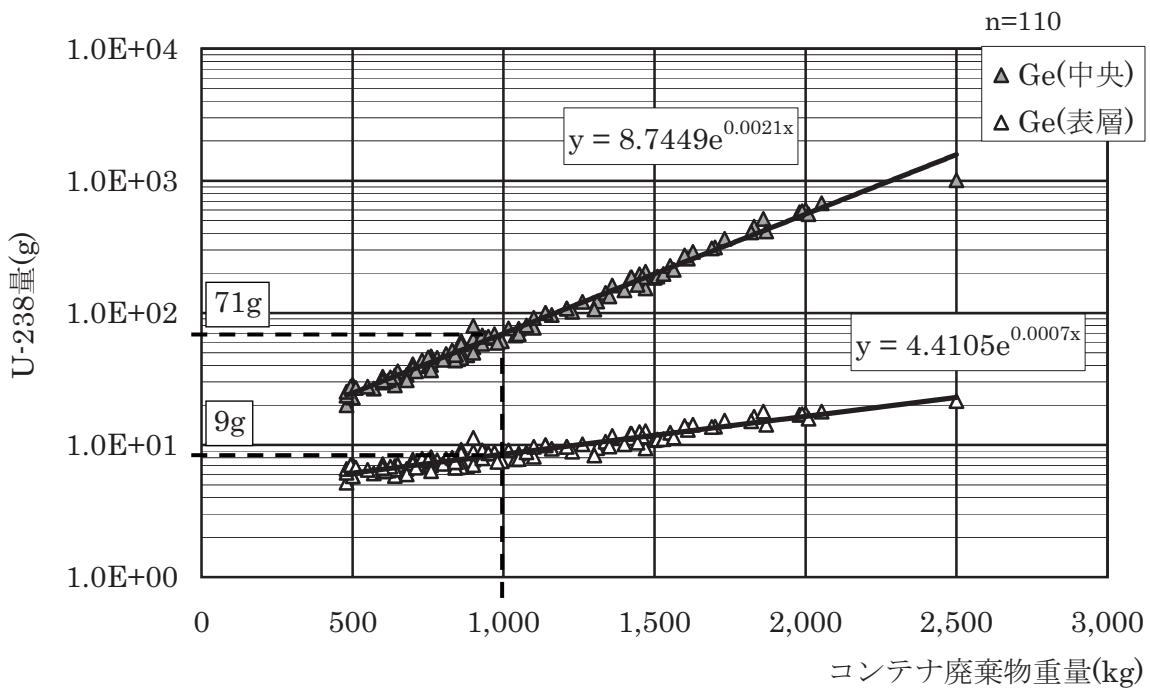


図6.13 検出下限値 (Ge検出器)

6.4 メンテナンス

6.4.1 使用前点検

本非破壊測定装置は、計量管理へ適用する観点から品質管理が重要であり、評価した放射性物質の数量の信頼性を証明するために、測定前における装置の健全性を確認する必要があるとともに、装置の異常・故障等を早期に発見し、速やかに対応することが必要不可欠である。これらの理由から、測定前に点検として標準線源を測定し、装置の健全性及び異常の有無を確認することとしている。

点検に用いる線源は、ウラン量測定時の着目 γ 線エネルギーに近い γ 線を放出する Co-60 とする。

(1) UWGS2

写真 6.1 のように、UWGS2 用の外部透過線源である Co-60 線源（付録 1）を外部透過線源設置位置に配置する。測定時間は十分計数が取得できる 300 秒とする。

評価項目は、1173keV ピークチャンネル及び計数率、半値幅で、これらのトレンド管理（ 3σ 以内の確認）を行うことにより異常の有無を確認する。ピークチャンネルが $2933.1\text{ch} \pm 1\text{ch}$ を超えている場合は、ゲインにより基準範囲内へ調整する。

(2) CDAS

写真 6.2 のように、CDAS 用 Co-60 線源（付録 5）を専用治具にて設置する。線源位置は、対向位置に配置している NaI(Tl) 検出器及び Ge 検出器の検出効率を考慮し、中段の NaI(Tl) 検出器と Ge 検出器の中心軸上で、Ge 検出器表面から 465mm の位置とした。測定時間は十分計数が取得できる 100 秒とする。

評価項目は、1333keV ピークチャンネル及び計数率、半値幅、BG（グロス）計数率、液体窒素消費量である。これらのトレンド管理（ 3σ 以内の確認）を行うことにより異常の有無を確認する。また、評価に用いる計測データは ROI 設定をしていることから、ピークチャンネルがずれると評価に影響があるため、NaI(Tl) 検出器については 1333keV のピークチャンネルが $333\text{ch} \pm 2\text{ch}$ 、Ge 検出器については $2665\text{ch} \pm 1\text{ch}$ であることを確認する。なお、基準範囲から外れている場合はゲインにより、基準範囲内へ調整する。液体窒素消費量については、例えば真空リークが発生すると消費量が増えるので消費量の増加により異常の有無を確認する。

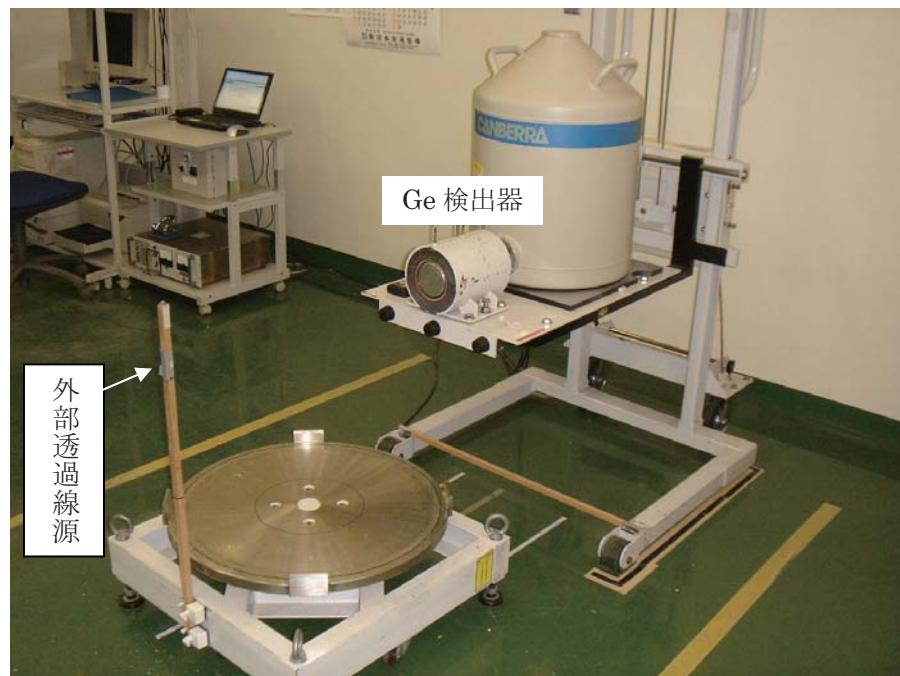


写真 6.1 使用前点検 (UWGS2)

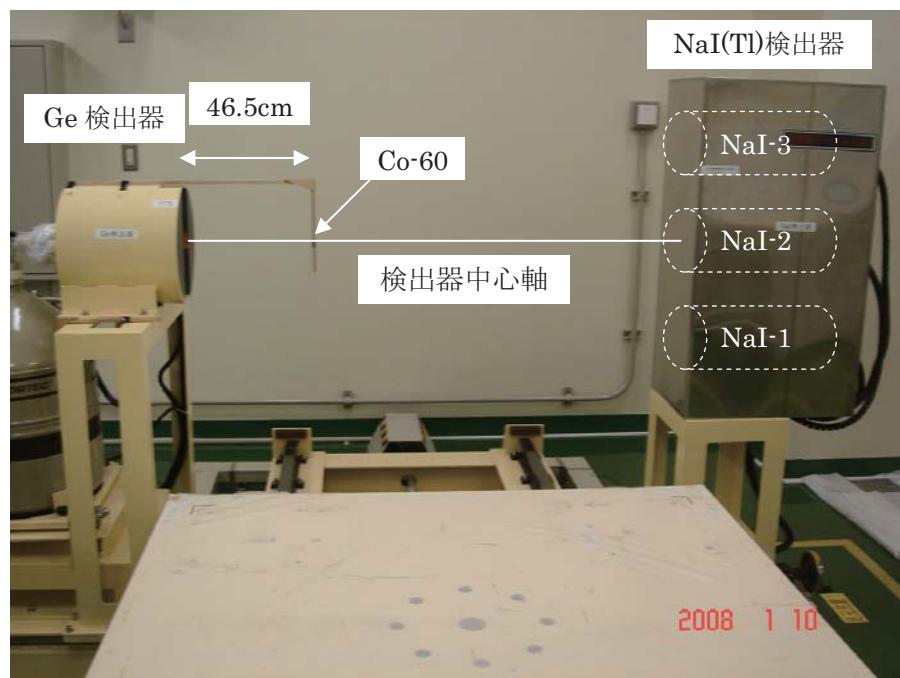


写真 6.2 使用前点検 (CDAS)

6.4.2 液体窒素の充填

Ge 検出器については計測を行う場合は分解能の確保、ノイズ低減の観点から冷却されていなければならず、冷却するまでに約 1 日かかることから日々液体窒素の残量を確認し、残量に応じて液体窒素用タンクへの充填を行っている。現在使用している Ge 検出器は、ドラム缶用測定装置及びコンテナ用測定装置に各 1 台ずつで、タンク容量は 30 ℥である。通常 1 日あたり約 2 ℥の消費量となるので、約 2 週間でタンクが空になるが、作業効率を考慮し基本的に 1 週間に 1 度充填を行っている。

6.4.3 空調管理

非破壊測定で使用している検出器は、Ge 検出器及び NaI(Tl)検出器で、それぞれの特長を生かし計測を行っている。ここで、NaI(Tl)検出器については、高検出効率という特長があるが、反対に環境（温湿度）の影響を受けやすい性質があり、温湿度が変動すると計測データがドリフトしてしまう。また、Ge 検出器については冷却することで検出器周辺への結露が確認されたため、結露しない条件かつ作業員への健康管理を考慮し、区画された非破壊測定室の温湿度を一定（室温 20°C、湿度 50%以下）に管理することとしている。温湿度を一定にしたことで、これまで計測上のトラブル等はなく測定業務が行えている。

6.5 計量管理

6.5.1 経緯

平成 9 年 8 月 26 日、廃棄物屋外貯蔵ピットに保管されていたウラン系廃棄物の容器が腐食、浸水していることが確認されたため、ピット内廃棄物の取出し工事を実施し、取出した廃棄物を健全な容器（ドラム缶、コンテナ）に収納した。その際、文部科学省（旧科学技術庁）より、廃棄物中の放射性物質量を測定し、計量報告の必要があるとの指導を受けた。

従来、ウラン廃棄物中に含まれるウラン量は、各設備で使用したウラン組成、表面線量率から推定していたがこの指導を受け、計量測定の技術開発を行い、全数測定後に計量報告することとした。報告において、減容のために圧縮処理した処理体金属については、圧縮前の個々の測定値から重量により配分して評価することとした。また、コンテナについては、測定装置がなかったことからドラム缶の測定値より暫定的に推定値（75g／コンテナ）を定め、コンテナ測定装置を構築後、測定し修正報告することの了解を得た。なお、定常的に施設から発生し、貯蔵施設に保管されているウラン廃棄物については、ピット廃棄物の測定終了後、継続的に測定を行うこととした。

ピット廃棄物については、平成 12 年 1 月に検認検査、計量報告を行い、保管廃棄とした。また、平成 19 年 8 月に、減容処理によるドラム缶のアイテム数（3,385 本）及びコンテナ廃棄物（110 基）の測定終了による推定値から測定値への修正報告を行った。

6.5.2 PIV

PIV (Physical Inventory Verification) は、毎月実施する核物質在庫変動報告 (ICR) に基づき、IAEA、国等が毎年度核物質の在庫量を確認（査察）するものである。また、これら核物質の在庫量の確認・報告を含めて計量管理という。

ピット廃棄物以外で貯蔵施設に保管されているウラン廃棄物について、平成 23 年 2 月 17 日にウラン量の測定が終了した廃棄物（ドラム缶：22,078 本、コンテナ：908 基）、未測定廃棄物（実測定値の平均値を用いた推定値）の実在庫検認が行われた。

PIV 当日は、機構所有の測定装置 (UWGS2、CDAS) 及び IAEA 持参の測定装置 (IMCG : Inspector Multi-channel Gamma Analyzer 2000 (with Ge)) を使用し、ランダムに選択した廃棄物の測定を行った。結果としては、問題ないとのことであった。

7.まとめ

7.1 UWGS2 及びドラム缶廃棄物測定結果

- (1) ドラム缶廃棄物中の線源量に対する評価値の分布幅は±75%である。
- (2) 検出下限値は、例えば100kgのドラム缶廃棄物で約8gU-238である。
- (3) 作業実績としては、廃棄物の移動・セッティング、データ解析・整理等を含め、内容物にもよるが1日あたり8~12本であった。
- (4) 測定したドラム缶廃棄物のうち金属及びコンクリート・土砂類が半分以上を占めた。これらは、設備解体に伴う廃棄物と考えられる。
- (5) 子孫核種の含有割合については、ウラン系列のBi-214を基準にすると23%に有意値が確認された。
- (6) 全体の75%がNDで、全体の平均U-238濃度は3.4Bq/gであった。また、クリアランスレベル1.0Bq/g(IAEA RS-G-1.7)を基準にすると、82%がクリアランスレベルを下まわっている。

7.2 CDAS 及びコンテナ廃棄物測定結果

- (1) コンテナ廃棄物中の線源量に対する評価値の分布幅は±50% (1σ)である。
- (2) 検出下限値は、例えば1,000kgのコンテナ廃棄物で、NaI(Tl)検出器による評価では中央部付近で約21gU-238、表層部付近で約3gU-238、Ge検出器による評価では中央部付近で約71gU-238、表層部付近で約9gU-238である。
- (3) 作業実績としては、廃棄物の移動・セッティング、データ解析・整理等を含め、1日あたり1基であった。
- (4) 測定したコンテナのうち約80%が金属で、これらは施設・大型設備の解体に伴う廃棄物と考えられる。
- (5) 子孫核種の含有割合については、Bi-214 γ 線の影響度合いで判断しており、3%に確認された。
- (6) 全体の17%がNDで、全体の平均U-238濃度は2.3Bq/gであった。また、クリアランスレベル1.0Bq/g(IAEA RS-G-1.7)を基準にすると、81%がクリアランスレベルを下まわっている。

7.3 運用計画

(1) 廃棄物の測定

① 第 2UWSF

保管されている廃棄物のうち未測定の廃棄物について、測定評価を継続する（H23 年 3 月末現在でドラム缶約 3,400 本）。また、新規発生した廃棄物（ドラム缶、コンテナ）についても測定評価していく予定である。

② UWSF

保管されている廃棄物は、ほぼ全数未測定のものであるので、今後測定評価する必要がある（H23 年 3 月末現在でドラム缶約 5,000 本、コンテナ 270 基）。

(2) 課題

① UWSF 保管廃棄物の測定

- ・UWSF は空調設備がなく、結露による測定装置の故障を考えられる。装置の健全性を確保するためには、常時空調を運転し、温度管理・除湿が望ましいが、できない場合は計測基盤等への結露防止のため、機器への連続通電が必要である。
- ・保管されているコンテナは全て不定型（コンテナ以外をいう）であり、CDAS での測定ができない形状がほとんどである。今後測定するにあたっては、コンテナ等への詰め替えが必要である。若しくは、不定型コンテナに適用する装置、評価法の開発が必要となってくる。

② 線源の管理

- ・外部透過線源(Co-60)が減衰（半減期 5.271 年）し、 γ 線が対象物を透過しなくなるためウラン量評価ができなくなる。現在使用している線源は、規制対象外の強度であるが、放射線障害防止法の改正（H19.4.1 施行）に伴い規制値が下げられたため、評価に十分な強度を持つ線源を取得するには、RI として保管管理する必要があり、それに伴い RI 施設にする許認可が必要となる。
- ・装置の校正に必要な線源についても減衰し、使用できなくなるため、外部透過線源同様の対応が必要となってくる。

③ 使用目的

本装置は核燃料物質の使用等に関する規則、保障措置（計量管理）に係る放射性物質量の把握を目的としており、今後も継続して使用していく予定である。クリアランスや区分管理に適用するには感度・精度の面で満足したスペックではないので、それらの装置については別途、検討・開発する必要がある。

7.4 外部発表、報告

7.4.1 日本原子力学会

(1) 「2004 年 春の年会」

ウラン廃棄物の非破壊測定技術開発－第 1 報：放射能評価手法の開発－

Development of Nondestructive Measuring Techniques for Uranium-contaminated Waste – First : Method Development on Radiation Measurement and Source Evaluation –

日：平成 16 年 3 月 29～31 日

場所：岡山大学

概要：大型の角型容器であるコンテナ（約 1m³）に収納された廃棄物中のウラン量評価について、パッシブガンマ法により測定評価する手法を開発し、その適用性について報告を行った。

(2) 「2004 年 春の年会」

ウラン廃棄物の非破壊測定技術開発－第 2 報：測定装置の製作と性能確認試験－

Development of Nondestructive Measuring Techniques for Uranium-contaminated Waste – Second : Measurement Equipment Construction and its Performance Tests –

日：平成 16 年 3 月 29～31 日

場所：岡山大学

概要：大型の角型容器であるコンテナ（約 1m³）に収納された廃棄物中のウラン量評価について、装置を製作し、ウラン線源を用いた性能確認試験を行い、その適用性について報告を行った。

(3) 「2005 年 秋の大会」

ウラン廃棄物の非破壊測定技術開発－実廃棄物による測定試験－

Development of Nondestructive Measuring Techniques for Uranium-contaminated Waste – Measurement Test Using Uranium-contaminated Wastes –

日：平成 17 年 9 月 13～15 日

場所：八戸工業大学

概要：コンテナ中のウラン量を非破壊測定する装置における実廃棄物を用いた測定試験の結果について報告を行った。

(4) 「2006年 秋の大会」

ウラン廃棄物の非破壊測定技術開発 －子孫核種含有廃棄物の測定－

Development of Nondestructive Measuring Techniques for Uranium-contaminated Waste － Measurement of Uranium-contaminated Wastes including daughter nuclides－

日：平成 18 年 9 月 27～29 日

場所：北海道大学

概要：コンテナ中のウラン量を非破壊測定する装置における実廃棄物（子孫核種を含む）を用いた測定試験の結果について報告を行った。

(5) 「2007年 秋の大会」

ウラン廃棄物の非破壊測定技術開発 －実廃棄物（ドラム缶）測定試験－

Development of Nondestructive Measuring Techniques for Uranium-contaminated Waste －Measurement of Uranium-contaminated Wastes in Drum－

日：平成 19 年 9 月 27～29 日

場所：北九州国際会議場他

概要：ドラム缶（200 ℥）中のウラン量を非破壊測定する手法及び実廃棄物を用いて実施した測定試験の結果について報告を行った。

(6) 「2008年 秋の大会」

ウラン廃棄物の非破壊測定技術開発 －核種組成評価の検討－

Development of Nondestructive Measuring Techniques for Uranium-contaminated Waste －Examination of evaluating nuclide composition－

日：平成 20 年 9 月 4～6 日

場所：高知工科大学

概要：ドラム缶中のウラン量を非破壊測定する装置について行ったウランの同位体組成を評価する試験の結果について報告を行った。

7.4.2 その他

(1) 「International Waste Management Symposium 2005」

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

日：平成 17 年 2 月

場所：Tucson (米国)

概要：コンテナ中のウラン量を非破壊測定する手法、装置の性能確認試験の結果について報告を行った。

参考文献

- 1) 助川泰弘, 鈴木敏, 吉田充宏, 大木耕一, 入之内重徳：“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 (2002)
- 2) 助川泰弘, 鈴木敏, 青山佳男, 大木耕一：“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）” JNC TN8410 2004-012 (2004)
- 3) 大木耕一, 青山佳男, 助川泰弘, 鈴木敏, 他：“パッシブガンマ法によるコンテナ等廃棄物中のウラン量測定技術の開発”, サイクル機構技報, No.25, p.57–68 (2004)
- 4) 鈴木敏, 小松崎崇, 助川泰弘, 大木耕一：“パッシブガンマ法によるコンテナ等廃棄物中ウラン量の測定技術開発（技術報告－検証試験－）” JAEA-Technology 2010-035 (2010)
- 5) J.L.Parkar, and T.D.Reilly : “Attenuation Corrections for the Passive Gamma-Ray Assay of Cylindrical Samples” LA-6142-PR, 1975 P.16

付録 1 (UWGS2 用外部透過線源)



**AEA Technology
QSA GmbH**

CERTIFICATE

No. CO 20866 - HA 911

for a Sealed Radioactive Source

Source Type: Reference Source

Product code	CKR1151
Drawing	VZ-1240/2
Source no.	HA 911
Nuclide	Cobalt-60

Measurement Data

Activity	411 kBq
Overall uncertainty*	3%
Reference date	1 February 2000
Traceability*	Defined on page 2
Radioactive impurities	Related to Co-60 (equal 100 %) the following radioactive impurities were detected: none

**Leakage and
Contamination Test/s**

Test method/s*	II and I
Test/s passed on	28 January 2000

Additional Information

ISO classification*	C.34343
---------------------	---------

* see page 2 for explanation

AEA Technology QSA GmbH

18899_1m_30/01/2011

AEA Technology QSA GmbH
Sitz Braunschweig, Registergericht
Braunschweig, HRB 4647

Geschäftsführer:
Dr. Hermann Dornhöfer

Commerzbank, Braunschweig
BLZ 270 400 80
Konto 5302591

AEA Technology plc
329 Harwell, Didcot, Oxfordshire OX11 0RA,
Registered in England and Wales, Nr. 3095862

付録2 (Co-60 : チェックソース)

NIST TRACEABLE CERTIFICATE GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Co-60	Customer:	JAPAN RADIOTOPE ASSOCIATION		
Half-life:	5.272 ± 0.001 years	P.O. No.:	12161		
Catalog No.:	GF-290-0003	Reference Date:	15-Dec-00	12:00	PST
Source No.:	VV-621	Contained Radioactivity:	9.185	μCi	339.8 kBq

Physical description:

- | | |
|------------------------------|--------------------------|
| A. Capsule type: | Chip |
| B. Nature of active deposit: | Evaporated metallic salt |
| C. Active Diameter: | 3 mm |
| D. Backing: | Epoxy |
| E. Cover: | Acrylic |

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	1173, 1333 keV
Branching ratio used:	0.999, 0.999 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

- | | |
|---|---------|
| A. Type A (random) uncertainty: | ± 1.1 % |
| B. Type B (systematic) uncertainty: | ± 3.0 % |
| C. Uncertainty in aliquot weighing: | ± 0.0 % |
| D. Total uncertainty at the 99% confidence level: | ± 3.2 % |

Notes:

- See reverse side for leak tests performed on this source.
- IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (As in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This is a sealed source with a working life of 5 years.



ISOTOPE PRODUCTS LABORATORIES

Quality Control

Date Signed

ISO 9001 CERTIFIED

IPL Reference Number: 733-91

付録 3 (Ba-133 : チェックソース)

NIST TRACEABLE CERTIFICATE GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Ba-133	Customer:	JAPAN RADIOISOTOPE ASSOCIATION		
Half-life:	3862 ± 15 days	P.O. No.:	12161		
Catalog No.:	GF-290-0003	Reference Date:	15-Dec-00	12:00	PST
Source No.:	VV-619	Contained Radioactivity:	9.462	μCi	350.1 kBq

Physical description:

A. Capsule type:	Chip
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active Diameter:	3 mm
D. Backing:	Epoxy
E. Cover:	Acrylic

Radioimpurities:

Cs-134 = 0.397% on 15 Dec 00

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	302.9, 356.0 keV
Branching ratio used:	0.183, 0.619 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.7 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.1 %

Notes:

- See reverse side for leak tests performed on this source.
- IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (As in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This is a sealed source with a working life of 5 years.



ISOTOPE PRODUCTS LABORATORIES

Quality Control

Date Signed

ISO 9001 CERTIFIED

IPL Reference Number:

733-91

付録 4 (Cs-137 : チェックソース)

NIST TRACEABLE CERTIFICATE GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Cs-137	Customer:	JAPAN RADIOISOTOPE ASSOCIATION		
Half-life:	30.17 ± 0.16 years	P.O. No.:	12161		
Catalog No.:	GF-290-0003	Reference Date:	15-Dec-00 12:00 PST		
Source No.:	VV-618	Contained Radioactivity:	9.385	μCi	346.5 kBq

Physical description:

A. Capsule type:	Chip
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active Diameter:	3 mm
D. Backing:	Epoxy
E. Cover:	Acrylic

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	661.7 keV
Branching ratio used:	0.851 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.6 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.1 %

Notes:

- See reverse side for leak tests performed on this source.
- IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (As in NRC Regulatory Guide 4.16).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This is a sealed source with a working life of 5 years.



ISOTOPE PRODUCTS LABORATORIES

Quality ControlDate Signed

ISO 9001 CERTIFIED

IPL Reference Number: 733-91

付録 5 (CDAS 用 Co-60 線源)

平成 8年 8月22日

協技 第96-715



成績書

社団法人 日本アイントープ協会

名 称 : 照射線量率基準ガンマ線源

核 種 : ^{60}Co

線源番号 : Co 6/683

公称放射能 : 3.7 MBq

上記の線源についての試験結果は次の通りです。

照射線量率 : $8.94 \times 10^{-12} \text{ C}/(\text{kg} \cdot \text{s})$
 ($125 \mu\text{R}/\text{h}$)
 {散乱ガンマ線の寄与を含まず}

距 離 : 放射線源部の中心より 1 m

測定方向 : 別図参照

基準年月日 : 1996年 8月22日

精 度 : $\pm 10\%$ (信頼度 95%)

本品は工業技術院電子技術総合研究所において校正を受けたガンマ線源と比較測定して値付けしたものです。

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。

(b) これらは無次元あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同じである。したがって、温度差や温度間隔を表す數値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	タ	Y	10 ⁻¹	デシ
10 ²¹	ゼ	タ	Z	10 ⁻²	センチ
10 ¹⁸	エ	ク	E	10 ⁻³	ミリ
10 ¹⁵	ペ	タ	P	10 ⁻⁶	マイクロ
10 ¹²	テ	ラ	T	10 ⁻⁹	ナノ
10 ⁹	ギ	ガ	G	10 ⁻¹²	ピコ
10 ⁶	メ	ガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト
10 ³	キ	ロ	k	10 ⁻¹⁸	アト
10 ²	ヘ	ク	h	10 ⁻²¹	ゼット
10 ¹	デ	カ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=1(60)'=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)"=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L	1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイーン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォート	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ x
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe△(10 ³ /4n)A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

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

