

ウラン廃棄物を対象とした非破壊測定装置の運用実績

Measurement Performance of the NDA using Q2 System for Uranium Waste Drum

小原 義之 長沼 政喜 野廣 哲也 吉田 公一
牧田 彰典 坂手 光男 入沢 巧 村下 達也

Yoshiyuki OHARA, Masaki NAGANUMA, Tetsuya NOHIRO, Kimikazu YOSHIDA
Akinori MAKITA, Mitsuo SAKATE, Takumi IRISAWA and Tatsuya MURASHITA

人形峠環境技術センター
環境保全技術開発部

Environmental Research and Development Department
Ningyo-toge Environmental Engineering Center

March 2013

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

ウラン廃棄物を対象とした非破壊測定装置の運用実績

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター

環境保全技術開発部

小原 義之、 長沼 政喜、 野廣 哲也*、 吉田 公一**
牧田 彰典**、 坂手 光男**、 入沢 巧**、 村下 達也**

(2012 年 12 月 21 日受理)

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター(以下「センター」と言う。)では、昭和 50 年～平成 14 年まで、ウラン鉱石からウランを抽出し製錬・転換・濃縮して原子炉の燃料とするための研究開発および使用済燃料を再処理して回収したウランの、転換・再濃縮する技術開発を行ってきた。

この間に発生した放射性廃棄物(以下「廃棄物」と言う。)は、ドラム缶に密封した状態でセンターの廃棄物貯蔵庫(加工施設廃棄物貯蔵庫 1 棟、使用施設廃棄物貯蔵庫 14 棟および核原料物質廃棄物貯蔵庫 1 棟の合計 16 棟)に約 15,000 本保管しているが、昭和 50 年～平成 12 年までに発生した廃棄物は、材質別区分、放射能(センターで扱った放射能は、主にウランであることから、以下「ウラン」と言う。)評価方法、ウラン量表記等の管理基準が統一されていないことなど、廃棄物管理情報に統一性がなかった。

平成 10 年頃、センターの主要核物質取扱施設の核物質不明量 (**Material Unaccounted For ; MUF**)が保障措置上の課題として国際原子力機関(以下、「IAEA」と言う。)に指摘された。この課題解決のため、センターでは廃棄物中のウラン量を統一した手法で測定し再評価することの必要性および緊急性が認識された。

このため、センターでは、平成 12 年にドラム缶に収納した状態でウラン量を定量することができる米国 CANBERRA 社製の Q2 低レベル廃棄物ドラム缶測定装置(以下、「Q2 装置」と言う。)を導入し、廃棄物ドラム缶の非破壊でのウラン量測定を行ってきた。この間、平成 12 年に適用性確認試験により装置の特徴を把握したうえで、模擬廃棄体を使った装置の校正を行い、平成 13 年～平成 23 年の間で、廃棄物貯蔵庫に保管している約 15,000 本の廃棄物ドラム缶について、ほぼ全数の測定を実施した。

その結果、廃棄物ドラム缶中の総ウラン量は約 20ton と評価された。また、廃棄物ドラム缶は、収納されている廃棄物の種類により、澱物、吸着剤、焼却灰、樹脂、コンクリート、金属に分けることができる。これを、材質区分と呼ぶ。材質区分を基準とした比較した場合、以下の特徴があることが分かった。

- 金属、樹脂はウラン含有量が少なく、ほとんど 100gU/ドラム缶以下である。
- 澱物、NaF・アルミナはウラン含有量が多く、その合計は全体の 90%以上である。
- ドラム缶のかさ密度は平均すると 0.8g/cm³程度である。

Measurement Performance of the NDA using Q2 System for Uranium Waste Drum

Yoshiyuki OHARA , Masaki NAGANUMA , Tetsuya NOHIRO* , Kimikazu YOSHIDA**
Akinori MAKITA** , Mitsuo SAKATE** , Takumi IRISAWA** and Tatsuya MURASHITA**

Environmental Research and Development Department
Ningyo-toge Environmental Engineering Center
Japan Atomic Energy Agency
Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received December 21, 2012)

In Japan Atomic Energy Agency Ningyo-Toge Environmental Engineering Center, exploration for uranium and technical development of uranium refining, conversion and enrichment which are the front end of a nuclear fuel cycle have been performed since 1955.

By these research and development, about 15000 radioactive waste(200 liter drum) has occurred by now.

This radioactive waste drum is divided based on the commercial license facility, research and development license facility and nuclear source materials license facility, and is kept in the radioactive waste storage warehouse. This is decided by the regulation law of Japan.

The analytical and measurement technique of the amount of uranium which are included in radioactive waste drum were very an inexperienced in those days.

Therefore, measurement strict till 2002 was not able to be started.

Such a situation as this, we introduced "Q2 low-level-waste drum measuring system" which is a bulk measuring method of the passive gamma ray using a NaI scintillation detector in 2002.

As a result, the total amount of uranium in a waste drum was estimated as about 20 tons. Moreover, a radioactive waste drum can be divided into sludge, adsorbent, incineration ashes, resin, concrete, and metal according to the kind of waste materials.

We are calling material classification. And, Q2 measurement result showed that there were the following features by the difference in material classification.

*Kensakaihatu co ltd **Ningyo-toge genshiryokusangyou co ltd

- Metal and resin have little uranium content, and many drums are below 100gU / drum.
- Sludge and adsorbent have much uranium content, and the sum total is 90% or more of the whole.
- The average bulk density of a radioactive drum was about 0.8 g/cm³.

Keywords:Nda,Q2 System,Uranium Waste Drum, Ningyo-toge Environmental Engineering Center, About 15000 Radioactive Waste(200 Liter Drum) has, Bulk Measuring Method, Passive Gamma Ray, Nai Scintillation Detector

目次

1. はじめに	1
2. 廃棄物管理の現状	2
3. Q2 装置の機器構成	5
4. Q2 装置の性能確認	7
4.1 バックグラウンド測定	7
4.2 エネルギー較正	7
4.3 計数効率	9
4.4 FWHM	9
4.5 検出器応答及び測定誤差の確認	9
4.6 測定時間の設定	14
4.7 繰り返し測定による変動	16
4.8 検出限界、定量下限値の評価	17
5. 実廃棄物ドラム缶の測定	19
5.1 廃棄物ドラム缶の定量方法	20
5.2 廃棄物ドラム缶の測定実績	22
5.3 廃棄物ドラム缶測定データの妥当性評価	25
6. まとめ	30
7. 今後の課題と展開	31
謝辞	32
参考文献	32
付録 1 ウラン量定量手法	33
付録 2 ウラン線源配置によるウラン測定値の変動確認	33

Contents

1. Introduction	1
2. Present Situation	2
3. Measurement System Structure	5
4. Measurement System performance	7
4.1 Background Measurements	7
4.2 Energy Calibration	7
4.3 Counting Efficiency	9
4.4 FWHM Estimation	9
4.5 Confirmation of detector response	9
4.6 Measurement Time	14
4.7 Repeatability	16
4.8 Detection limits estimation	17
5. Measurement for the Actual Waste Drums	19
5.1 Case Example of Measurement for the Actual Waste Drums	20
5.2 Measurement for the Waste Drums	22
5.3 Evaluation of validity of measurement data waste drum	25
6. Conclusion	30
7. Future plan	31
Acknowledgment	32
References	32
Appendix 1: Determinate Quantity of Uranium Amount	33
Appendix 2: Variation of Measurement Value by Uranium Source Distribution	33

図リスト

図 2.1.1	人形峠環境技術センター施設配置図	3
図 2.2.1	貯蔵庫外観図	3
図 4.1.1	バックグラウンド γ 線エネルギースペクトル	7
図 4.2.1	標準混合線源 γ 線エネルギースペクトル	8
図 4.2.2	γ 線エネルギーの校正	8
図 4.3.1	計数効率	9
図 4.4.1	エネルギー分解能	9
図 4.5.1	模擬廃棄物ドラム缶	11
図 4.5.2	線源支持用治具外形図	11
図 4.5.3	線源挿入用治具外形図	11
図 4.5.4	ウラン線源の取付位置と測定位置の関係	12
図 4.5.5	線源ウラン量と 1001keV 計数率の関係	12
図 4.5.6	空ドラム缶の γ 線スペクトル	14
図 4.5.7	もみがらドラム缶の γ 線スペクトル	14
図 4.5.8	活性炭ドラム缶の γ 線スペクトル	14
図 4.5.9	消石灰ドラム缶の γ 線スペクトル	14
図 4.5.10	珪砂ドラム缶の γ 線スペクトル	14
図 4.8.1	検出限界	18
図 4.8.2	各測定時間の定量下限値	19
図 5.1.1	実廃棄物(アルミナ) γ 線スペクトル	21
図 5.1.2	実廃棄物(金属類) γ 線スペクトル	21
図 5.1.3	実廃棄物(アルミナ) γ 線スペクトル	21
図 5.1.4	実廃棄物(焼却灰) γ 線スペクトル	21
図 5.1.5	実廃棄物(焼却灰) γ 線スペクトル	21
図 5.2.1	廃棄物ドラム缶の測定実績	23
図 5.2.2	廃棄物の分類別ドラム缶数量と U238 量	23
図 5.2.3	廃棄物ドラム缶の U238 量の分布	24
図 5.2.4	貯蔵庫のかさ密度	24
図 5.2.5	測定誤差(NaF アルミナ)	26
図 5.2.6	測定誤差(金属)	26
図 5.2.7	測定誤差(コンクリート)	27
図 5.2.8	測定誤差(樹脂保温材)	27
図 5.2.9	測定誤差(焼却灰)	28
図 5.2.10	測定誤差(殿物)	28
図 5.2.11	校正用ドラム缶	29
図 5.2.12	線源位置と検出ウラン量	30

図 付録 2.3.1	NaI(Tl)検出器の取付位置の変更	36
図 付録 2.3.2	ウラン線源位置と検出量	39
図 付録 2.3.3	ウラン線源位置と検出量	39
図 付録 2.3.4	ウラン線源位置と検出量	39
図 付録 2.3.5	ウラン線源位置と検出量(改善後)	39
図 付録 2.3.6	ウラン線源位置と検出量(改善後)	39
図 付録 2.3.7	ウラン線源位置と検出量(改善後)	39

表リスト

表 2.1.1	平成 24 年 7 月時点での廃棄物分類区分毎の保管数量	3
表 4.2.1	標準混合線源仕様	8
表 4.5.1	ウラン標準線源リスト	10
表 4.5.2	線源ウラン量と 1001keV 係数率の関係	13
表 4.6.1	測定時間をパラメータとした供試ウラン線源量とウラン定量値との関係	16
表 4.6.2	Q2 装置の試験実施時における測定時間の設定	16
表 4.7.1	繰り返し測定における変動試験結果	17
表 4.8.1	BG 測定	17
表 4.8.2	検出限界	18
表 4.8.3	計数率	18
表 4.8.4	各測定時間の定量下限値	19
表 5.1.1	実廃棄物ドラム缶測定結果	21
表 付録 2.1.1	空および均一充填物入りドラム缶の仕様	34
表 付録 2.2.1	空ドラム缶のウラン定量値	34
表 付録 2.2.2	充填物(活性炭)ドラム缶のウラン定量値	35
表 付録 2.2.3	充填物(珪砂)ドラム缶のウラン定量値	35
表 付録 2.3.1	空ドラム缶および均一充填物入りドラム缶の仕様	36
表 付録 2.3.2	空ドラム缶の供試ウラン線源量とウラン定量値	37
表 付録 2.3.3	充填物入り(活性炭)ドラム缶の供試ウラン線源量とウラン定量値	37
表 付録 2.3.4	充填物入り(珪砂)ドラム缶の供試ウラン線源量とウラン定量値	38

写真リスト

写真 2.1.1	廃棄物ドラム缶保管状態	3
写真 3.2.1	Q2 装置外観および内部	6
写真 4.5.1	ウラン標準線源の形状	10
写真 4.5.2	模擬廃棄物ドラム缶	11
写真 4.6.1	ウラン線源の取付状況	15

1. はじめに

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センター(以下「センター」と言う。)では、昭和 50 年～平成 14 年まで、ウラン鉱石からウランを抽出し製錬・転換・濃縮して原子炉の燃料とするための研究開発および使用済燃料を再処理して回収したウランの、転換・再濃縮する技術開発を行ってきた。

この間に発生した放射性廃棄物(以下「廃棄物」と言う。)は、ドラム缶に密封した状態でセンターの廃棄物貯蔵庫(加工施設廃棄物貯蔵庫 1 棟、使用施設廃棄物貯蔵庫 14 棟および核原料物質廃棄物貯蔵庫 1 棟の合計 16 棟)に約 15,000 本保管しているが、昭和 50 年～平成 12 年までに発生した廃棄物は、材質別区分、放射能(センターで扱った放射能は、主にウランであることから、以下「ウラン」と言う。)評価方法、ウラン量表記等の管理基準が統一されていないことなど、廃棄物管理情報に統一性がなかった。

特にウラン量については、中和液等廃液処理から発生した廃棄物では、一部の廃棄物から採取したサンプルを分析してウラン量を求めているが、金属類や雑固体等の廃棄物では、ドラム缶収納時に適用可能な実用的ウラン定量手法がなかったため、サーベイメーターによりドラム缶表面線量を測定し 0.2 μ Sv 以上を 1gU、0.2 μ Sv 未満を 0gU としていた。あるいは測定を実施することなくウラン量をゼロとしていた。

平成 10 年頃、核物質不明量 (Material Unaccounted For ; MUF)が保障措置上の課題として国際原子力機関(以下、「IAEA」と言う。)に指摘された。この課題解決のため、センターでは廃棄物中のウラン量を統一した手法で測定し再評価することの必要性および緊急性が認識された。

一般的に、廃棄物中のウラン量の定量には、精度の面から、代表サンプルの湿式分析法が用いられている。しかし、保管中の廃棄物はドラム缶に密封されていることや、廃棄物中のウラン分布が不均一であるため、一般的な手法の適用は困難であった。また、保管場所の構造等から、開梱してサンプル採取することは安全上も適切ではないと判断した。

このため、センターでは、平成 12 年にドラム缶に収納した状態でウラン量を定量することができる米国 CANBERRA 社製の Q2 低レベル廃棄物ドラム缶測定装置(以下、「Q2 装置」と言う。)を導入し、廃棄物ドラム缶の非破壊でのウラン量測定を行ってきた。なお、本報告書では、特にことわりがない限りウラン量とは U-238 量のことを言う。

この間、平成 12 年に適用性確認試験により装置の特徴を把握したうえで、模擬廃棄体を使った装置の校正を行い、平成 13 年～平成 23 年の間で、廃棄物貯蔵庫に保管している約 15,000 本の廃棄物ドラム缶について、ほぼ全数の測定を実施した。

本報告書では、適用性確認試験の概要と結果、廃棄物ドラム缶の測定実績と、この結果に基づくセンターの保管廃棄物の特徴について報告する。

2. 廃棄物管理の現状

(1) 廃棄物の分別および保管数量

センターの廃棄物ドラム缶保管総数は、平成 24 年 11 月現在、約 15,000 本である。この他、既に解体済みの機器をドラム缶約 7000 本と 1m³角型コンテナ約 1200 体に収納して保管している。

それらのうち廃棄物を保管する施設として、16 棟の廃棄物貯蔵庫(以下「貯蔵庫」と言う。)を有している。廃棄物は、規制区分に従い核燃料物質加工施設貯蔵庫 1 棟、核燃料物質使用施設貯蔵庫 14 棟、核原料物質使用施設貯蔵庫 1 棟に分別して保管している。貯蔵庫の総床面積は約 4,000 m²である。

また、廃棄物は、表 2.1.1 に示す分類区分^{※1}に従い分別保管されている。貯蔵庫の構内施設配置を図 2.1.1 に、貯蔵庫外観および廃棄物ドラム缶保管状態を図 2.2.1、写真 2.1.1 に示す。

a)NaF・アルミナ

NaF・アルミナは、製錬転換およびウラン濃縮プラントの排気系に設置されているケミカルトラップの充填物(吸着剤)で、それぞれ、六フッ化ウランとフッ化水素が主な吸着物質である。

b)金属類

金属類は、主に、製錬転換およびウラン濃縮プラントのメンテナンス等により発生したもので、炭素鋼系、ステンレス鋼系、アルミニウム系等、材質は多様である。

c)コンクリート

コンクリートは、製錬転換およびウラン濃縮プラントの機器解体に伴い発生したものである。

d)樹脂保温材

樹脂保温材は、樹脂製の配管やタンク類の解体物等である。また、保温材は配管や機器類の断熱材で、グラスウールやロックウールである。

e)焼却灰

焼却灰は、可燃物を焼却した際に生じる残渣(灰)で、灰を回収した位置で、炉底灰(主灰)と飛灰に分けることができる。

f)澱物類

澱物類は、主に、製錬転換の廃液処理時に発生した中和沈澱物である。この他に、スラッジ状の廃棄物や一部の吸着剤も澱物類に含めている。

※1 ここで使用している分類区分は、廃棄物管理データを基に、パッシブγ線によるドラム缶中のウラン量測定の実用性に着目し、本報告書での評価用に設定したものである。

表 2.1.1 平成 24 年 7 月時点での廃棄物分類区分毎の保管数量

(単位：200 リットルドラム缶換算本数)

分類区分	加工施設 (1 棟)	核燃料使用施設 (14 棟)	核原料使用施設 (1 棟)	合計
NAF・アルミナ	9	1283	1	1293
金属類	300	4576	374	5180
コンクリート	1	346	172	519
樹脂保温材	163	918	217	1298
焼却灰	40	449	2	491
澱物類	53	5652	163	5868
計	566	13224	929	14719

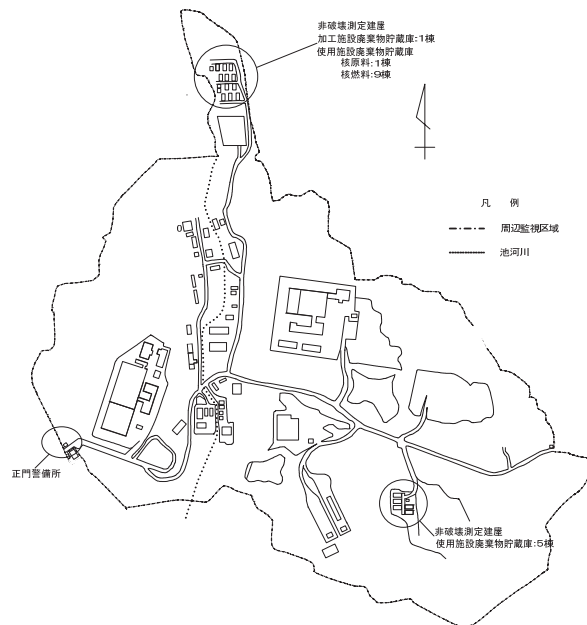


図 2.1.1 人形峠環境技術センター施設配置図

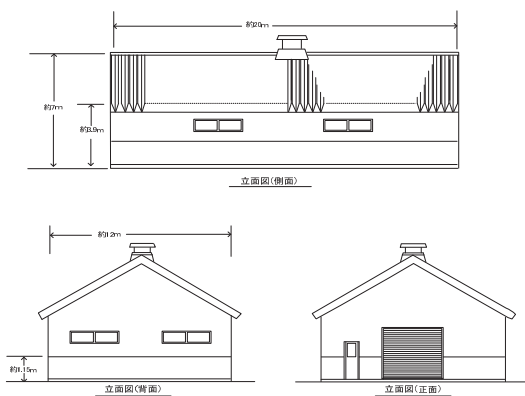


図 2.2.1 貯蔵庫外観図



写真 2.1.1 廃棄物ドラム缶保管状態

(2) 廃棄物収納状態の特徴

廃棄物を収納しているドラム缶は、日本工業規格で定められている鋼製オープンドラム缶 (JIS Z 1600 一種 M 級：形状 OD 600mmφ×890mm H、内容積 208 ℓ、側板厚さ 1.2mm、材質 SS400) を使用している。

ドラム缶に収納されている廃棄物の形状は、主に「金属類」、「コンクリート」、「その他」である。以下に、廃棄物収納状態の特徴を示す。

- a) 金属類：金属類は収納物の大きさにより、ドラム缶内の廃棄物密度分布は大きく変化する。また、ウランは金属表面に付着した状態で存在していると考えられるため、その分布は廃棄物の分布に依存している。
- b) コンクリート：コンクリートは小片に破砕した状態で収納されている場合が一般的である。このため、ドラム缶内の廃棄物密度分布は、ほぼ均一と考えてよい。また、ウラン分布についても同様な理由により、ほぼ均一に分布している。ただし、収納量を制限している場合があり、この場合、ドラム缶上部に空間がある。
- c) その他：NaF・アルミナ、焼却灰、殿物類は小径ペレット、紛体、スラッジ形状であることから、ドラム缶内の廃棄物密度分布は、ほぼ均一と考えてよい。ウラン分布については、収納物に随伴して存在していると考えられることから、ほぼ均一に分布している。ただし、発生時期等、ウラン含有量が異なる殿物類を同一のドラム缶に収納する場合もあり、このようなケースでは、ドラム缶上下方向でウラン分布に差異が生ずる。

(3) 核種組成の特性

センターで発生した廃棄物は、核種組成および廃棄物が発生した施設の特性から下記 4 種類に区分した。

- a) 未精製ウランを含む廃棄物：原子炉等規制法上核燃料物質に分類されるが、未精製でウランの子孫核種が随伴して含まれた組成。
- b) 天然ウランを含む廃棄物：精製された天然ウラン組成
- c) 回収ウランを含む廃棄物：天然にはない人工核種(U-232, U-236 等)を含むウラン同位体組成であり、微量の核分裂生成物(FP)および超ウラン元素(TRU)が含まれた組成。
- d) 核原料物質を含む廃棄物：原子炉等規制法上核原料物質とされる鉱石等で、ウランの子孫核種が含まれた組成。

(4) 保管廃棄物中のウラン量定量と Q2 装置導入の必要性

平成 10 年に、ウラン濃縮パイロットプラントの累積 MUF が増加していることを受け、プラント機器や配管内に多くのウランが滞留しているのではないかと IAEA から指摘された。この指摘を受け、プラント内の滞留ウランの測定と合わせて、既にドラム缶に収納して保管している廃棄物に含まれるウラン量についても、再度定量することが必要であることが認識された。既に保管している廃棄物では、ウラン定量について、次のような問題があった。NaF は使用前後の重量差をウラン量とし、アルミナ、金属類、樹脂保温材の廃棄物は、ドラム缶収納時に適用可能な実用的ウラン定量手法がなかったため、サーベイメーターによりドラム

缶表面線量を測定し $0.2 \mu\text{Sv}$ 以上を 1gU 、 $0.2 \mu\text{Sv}$ 未満を 0gU としていた。あるいは測定を行わずにウラン量をゼロとしていた。

また、澱物類、焼却灰については、ドラム缶収納時に分析用サンプルを採取し、ICP 発光分光分析法により、全ウランを定量した値を記載していた。しかし、採取したサンプルが限定的であることやサンプルの代表性等の課題があり定量精度を明確にすることができないという課題があった。

このような背景と合わせて、計量管理からは、前項に示す核種組成のうち、ウラン濃縮プラントで使用した天然ウランおよび回収ウランで汚染した、廃棄物を対象としてのウラン量を定量することが求められた。そのため、この核種組成における検出能力が適正であること、非破壊で廃棄物ドラム缶のウラン量を定量出来ること、及び比較的短時間で測定でき実用的であることから Q2 装置を導入した。

3. Q2 装置の機器構成

(1) 装置の概要

Q2 装置は、廃棄物ドラム缶内の U-238 の子孫核種である Pa-234m から放出される 1001keV の γ 線を NaI シンチレーション検出器で測定し、マルチチャンネルアナライザー (MCA) でエネルギースペクトルの解析をすることによって、廃棄物ドラム缶中に存在するウラン量を定量するものである。写真 3.2.1 に Q2 装置の外観写真を示す。なお、Q2 装置で測定される 1001keV エネルギースペクトルからウラン量を定量する計算式を 3.1.1 式に示す。また、詳細な計算方法について付録 1 に示す。

$$^{238}\text{U}(\text{g}) = \frac{\text{放射能}(\text{Bq})}{\text{比放射能}(\text{Bq/g})} \quad 3.1.1 \text{ 式}$$

$$\text{放射能}(\text{Bq}) = \frac{\text{ピーク計数値}}{\text{測定時間} \times \text{計数効率}^{*1} \times \text{放出比}}$$

$$*1: \varepsilon = \frac{b_1^i \cdot (1 - e^{-b_1^i \cdot \rho})}{b_2^i \cdot \rho}$$

$b_1^i \ b_2^i$: 計数率

ρ : 密度

(2) 装置仕様

① 本体

1) ドラム缶専用のバックグラウンド放射線遮蔽箱 (Canberra 社製)

・外寸法 : $W173 \times D122 \times H152$ (cm)

・総重量約 : 7200kg

- ・遮蔽体(鉄) : 100mm
- 2) ドラム缶回転用ターンテーブル+ ドラム缶重量測定装置 (Canberra 社製)
 - ・重量測定機能付ターンテーブル
 - ・最大積載量 : 450 kg
 - ・回転速度 : 12rpm
- 3) 計測部
 - ・検出器 : NaI シンチレーション検出器(温度調節器付き)2 台 (Canberra 社製)
寸法 W130×D80×L400(mm)
 - ・マルチチャンネルアナライザー(MCA) : (型式 : Canberra 社製 DSA-1000 :
512ch:2000KeV)
- ② 解析ソフトウェア
 - ・Genie PC、Waste Assay Software (Canberra 社製)

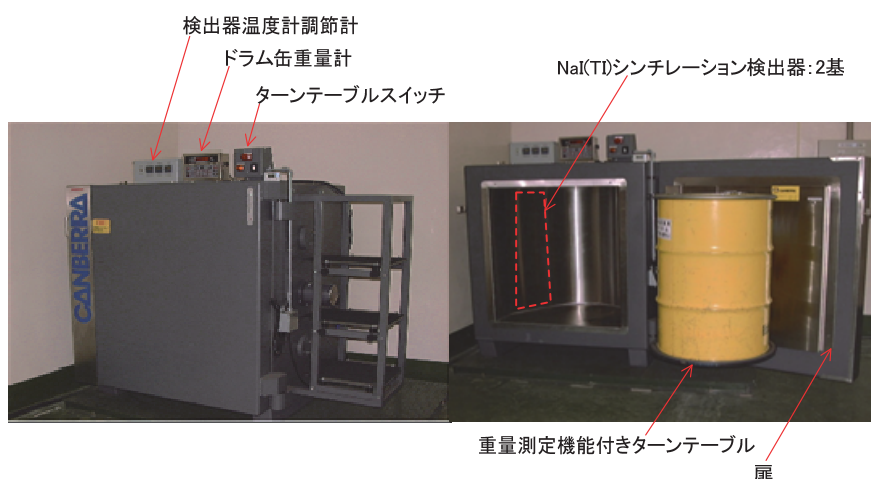


写真 3.2.1 Q2 装置外観および内部

(3) 装置の特徴

- ① 測定対象のドラム缶および検出器を遮蔽体に入れることで、環境からのバックグランド放射線の影響を低減することができる。また、遮蔽体として鉄を使用することで、鉛を使用する場合に比較して遮蔽体自体に含まれる放射性物質からのバックグランド放射線を低減することを考慮している。
- ② 長尺の NaI 検出器 (有感部長 400mm) 2 台をドラム缶側面の上下に配置することにより、ドラム缶測定時における軸方向の感度差を少なくすることを考慮している。
- ③ NaI 検出器は温度変化に弱いため温度調節器により、外部温度の影響を受けず安定して測定できることを考慮している。
- ④ ドラム缶測定時に回転させることにより、径方向での廃棄物密度分布、ウラン分布の偏在を平均化することを考慮している。
- ⑤ 自己遮へい効果(γ 線の減衰)に対してドラム缶重量から密度補正を行っている。

4. Q2 装置の性能確認

Q2 装置の特性および性能を確認するため、バックグランド測定、標準混合線源によるエネルギー校正および計数効率、半値全幅 (full width at half maximum, **FWHM**)、検出器応答、測定誤差、所要測定時間、繰り返し測定による精度及び定量下限値の確認を行った。試験に用いた標準混合線源の仕様を表 4.2.1 に示す。なお、装置の特性および性能確認試験過程で、ウラン標準線源位置のちがいによりウラン定量値に差異が生ずる事象が確認されたことから検出器位置の再調整を行った。Q2 装置は 2 基の立方体型の NaI 検出器を装備しており、初期状態では 2 基が中央付近で重なり合うよう配置されていた。この状態で模擬ドラム缶を製作して、ウラン線源の配置の差異による影響について充填物重量(かさ密度)をパラメータとして評価した。その結果、ドラム缶中心部のウラン線源が有る場合位置、実際のウラン定量よりも高い値を示すことが確認された。この原因は、2 基の検出器の検出部が上下方向に重なっていることにより、中央付近にウラン線源が集中しているようケースでは、2 基の検出器により二重に測定されたためと考えられる。そこで、検出器の位置を変更し、重なり合う部分を解消した結果、ウラン線源位置の違いによるウラン定量値のバラツキは小さくなった。詳細な試験結果は付録 2 に示す。

4.1 バックグランド測定

バックグランドの確認として、Q2 装置の測定室を空の状態にして 72000 秒測定を行った。バックグランド測定結果を図 4.1.1 に示す。有意なピークとしては K-40(1460keV)、Pa-234m (1001keV)および電子・陽電子の対消滅時に放出される 511keV のエネルギーピークが確認された。環境からのバックグランドとして一般的に検出される天然放射性核種である Bi-214(609keV)、Tl-208(583keV)等は観測されない。このことから、1000keV 以下のエネルギーでの Q2 装置の遮蔽体の効果が確認できた。

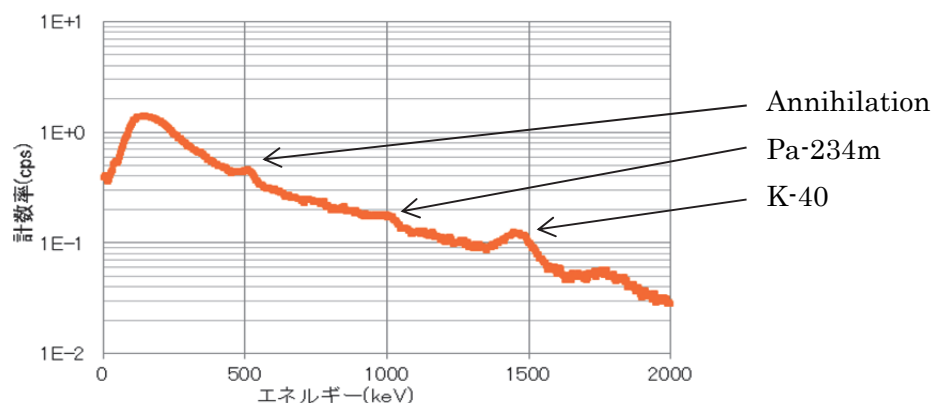


図 4.1.1 バックグランド γ 線エネルギースペクトル

4.2 エネルギー較正

表 4.2.1 に示した標準混合線源を用いて 1200 秒測定を行った。このときの γ 線エネルギースペクトルを、図 4.2.1 に示す。図から、標準混合線源に含まれる核種固有のピークが確認された。また、MCA のチャンネルと γ 線エネルギーの関係を図 4.2.2 に示す。図から、チャン

ネルと γ 線エネルギーが直線的に対応していることを確認した。

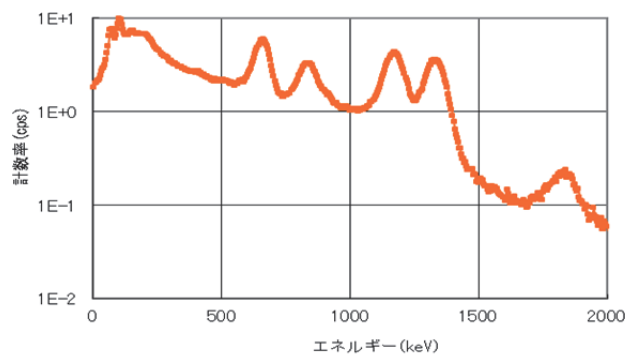
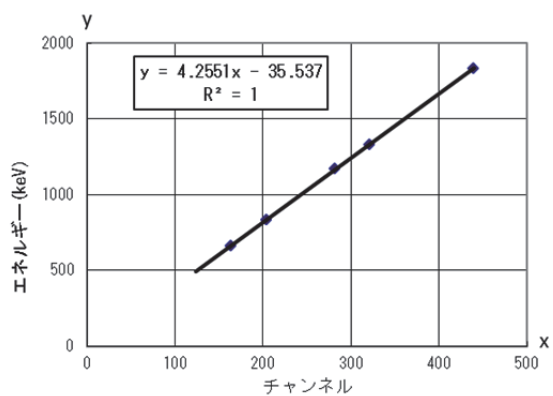
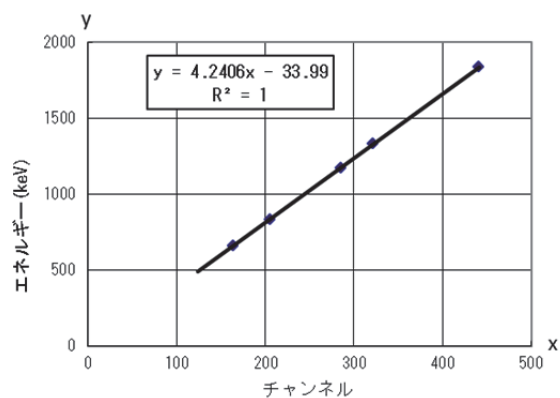


図 4.2.1 標準混合線源 γ 線エネルギースペクトル



(上部検出器)



(下部検出器)

図 4.2.2 γ 線エネルギーの校正

表 4.2.1 標準混合線源仕様

核 種	エネルギー (KeV)	放射能 (Bq)	核種拡張不確かさ (%)
109Cd	88	2.669×10^4	3.7
57Co	122・136	1.776×10^3	2.9
139Ce	165	1.775×10^3	2.9
51Cr	320	4.421×10^4	3.0
85Sr	514	2.210×10^3	3.1
137Cs	662	2.217×10^3	3.0
54Mn	835	2.461×10^3	2.8
88Y	898・1836	2.639×10^3	2.5
60Co	1173・1333	2.829×10^3	3.0

放射性核種純度：98%以上

4.3 計数効率

同様に標準混合線源を用いて行った 1200 秒測定時における γ 線エネルギーと計数効率の関係を確認した。図 4.3.1 に示したように、標準混合線源から発生する代表的なエネルギーピークにおける係数効率が得られた。

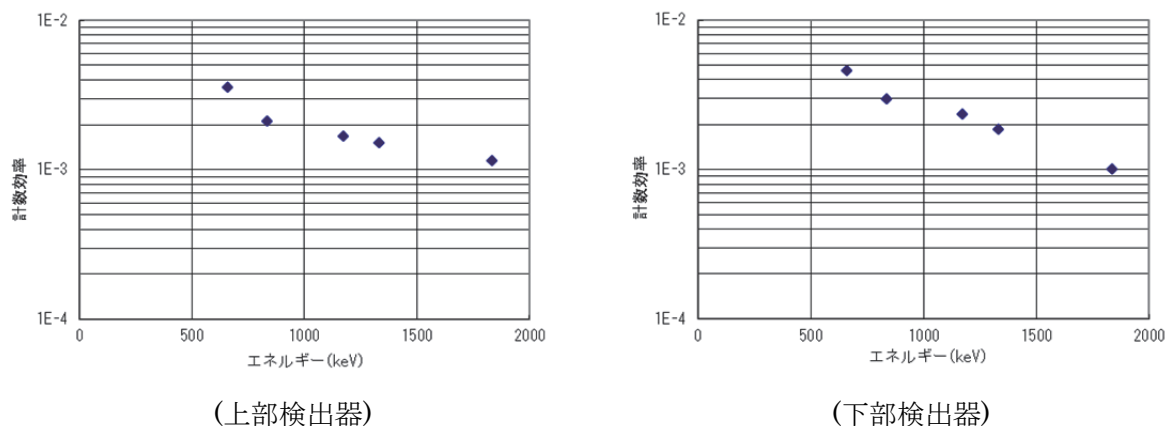


図 4.3.1 計数効率

4.4 FWHM

同様に標準混合線源を用いて行った 1000 秒測定時における γ 線エネルギーと FWHM の関係について確認した結果を図 4.4.1 に示す。この結果から、Q2 装置の測定対象である 1001keV における FWHM は約 80keV であることを確認した。

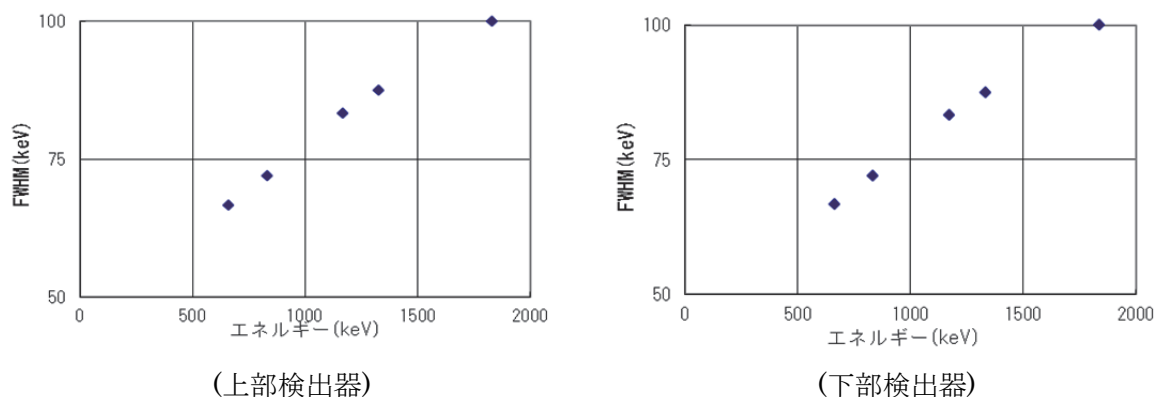


図 4.4.1 エネルギー分解能

4.5 検出器応答及び測定誤差の確認

ここでは、模擬廃棄物とウラン標準線源を用いて、廃棄物の材質、かさ密度、およびウラン量をパラメータとして、Q2 装置の検出器応答及び測定誤差について確認した。

(1) ウラン標準線源

ウラン標準線源は、天然核種組成の八酸化三ウラン(U_3O_8)粉末を、ポリプロピレン製マルエム容器 (15mmφ) に封入したものを使用した。

一つの容器に封入したウラン量は、0.5gU/容器、1gU/容器、5gU/容器、10gU/容器の4種類である。表 4.5.1 に各ウラン標準線源の仕様を示す。また、写真 4.5.1 に標準線源容器の外観を示す。

表 4.5.1 ウラン標準線源リスト

線源量	全重量 (g)	容器重量 (g)	紛体重量 (g)	U 含有率 (%)	U 重量 (gU)
0.5gU U ₃ O ₈	3.85	3.26	0.59	84.80	0.5
1.0gU U ₃ O ₈	4.44	3.26	1.18	84.80	1.0
5.0gU U ₃ O ₈	9.16	3.26	5.90	84.80	5.0
10.0gU U ₃ O ₈	15.05	3.26	11.79	84.80	10.0

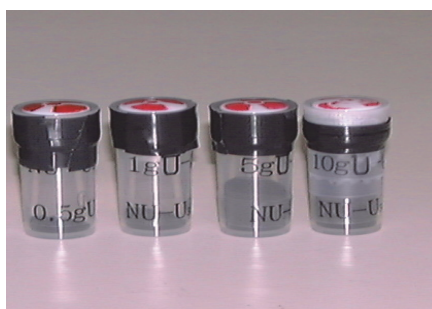


写真 4.5.1 ウラン標準線源の形状

(2) 試験用機材

① 模擬廃棄物ドラム缶

模擬廃棄物ドラム缶は、廃棄物収納用ドラム缶として実際に使用している鋼製オープンドラム缶を使用し、模擬廃棄物は以下の5種類を使用した。写真 4.5.2 及び図 4.5.1 に模擬廃棄物ドラム缶の外観及び内部配置図を示す。

- 充填物なし
- もみがら（密度：0.246g/cm³）
- 活性炭（密度：0.550g/cm³）
- 消石灰（密度：0.800g/cm³）
- 珪砂（密度：1.368g/cm³）

② 線源支持用治具

模擬廃棄物ドラム缶にウラン標準線源を配置するための、塩化ビニール配管7本を上下合板で固定した治具で、図 4.5.2 に概略構造を示す。

③ 線源挿入用治具

ウラン標準線源を支持用治具の塩化ビニール配管に挿入・固定するための、塩化ビニール溶接棒に線源を取り付ける治具で、図 4.5.3 に概略構造を示す。



写真 4.5.2 模擬廃棄物ドラム缶

模擬ドラム缶の内部構造

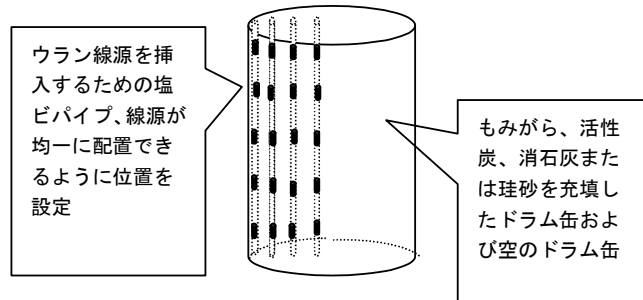


図 4.5.1 模擬廃棄物ドラム缶

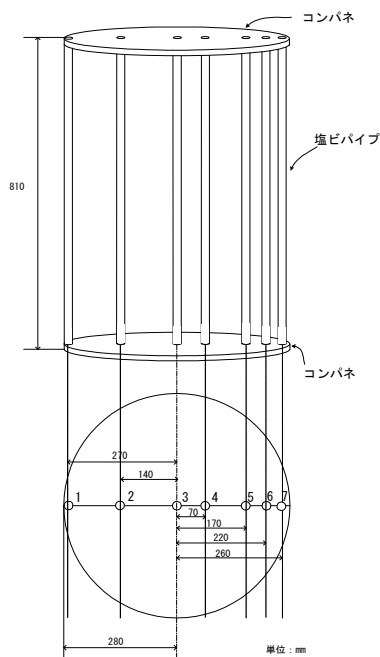


図 4.5.2 線源支持用具外形図

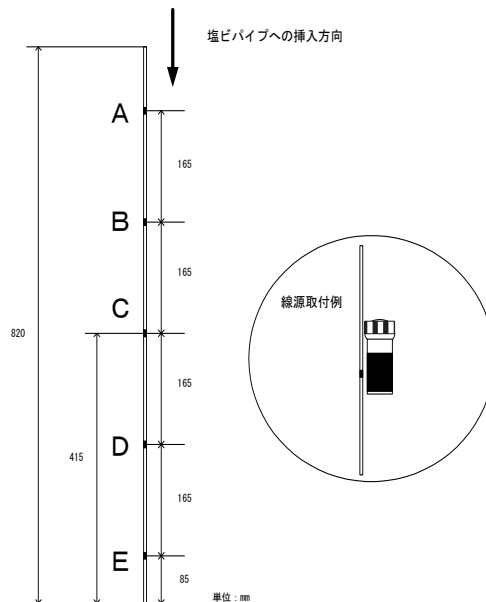


図 4.5.3 線源挿入用具外形図

(3) 測定条件および測定結果

模擬廃棄物ドラム缶の中心にウラン標準線源を配置し、ウラン量を変換させ Q2 装置で測定ウラン量定量測定を行った。なお、模擬廃棄物は(2)に示した 4 種類と空の状態について試験を実施した。この結果を用いて、廃棄物の種類毎に、ウラン量をパラメータとした時の Q2 装置で測定される 1001keV の計数率に対する確率誤差を評価した。

① 試験条件

- 1) ウラン量 : 10gU、20gU、50gU、100gU、200gU
- 2) 検出器位置 : 線源から 370mm、ドラム缶表面から 80mm
- 3) 線源設置高さ : 415 mm (図 4.5.4 参照)
- 4) 測定時間 : 300 秒

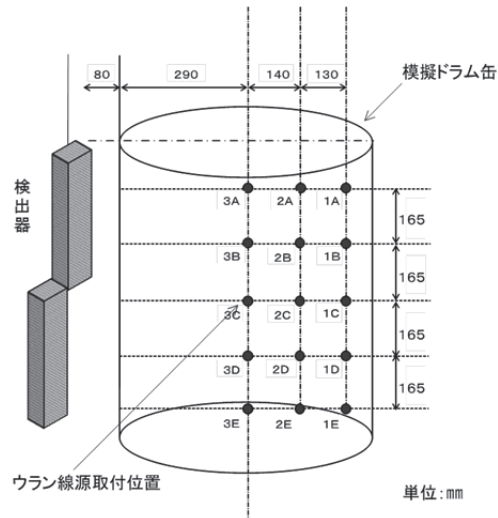


図 4.5.4 ウラン線源の取付位置と測定位置の関係

② 試験結果

模擬廃棄物の種類に関わらず、ウラン量(gU)と 1001keV 計数率は、図 4.5.5 に示す通り線形関係があることが確認できた。また、廃棄物材質毎でウラン量をパラメータとした時の Q2 装置に組み込まれたソフトウェアが評価した測定誤差(表中、CPS 2 σ error と標記)を表 4.5.2 に示す。この表から分かるように 20gU 以上のウラン線源量における測定誤差は $\pm 5\%$ 以内に収まっていることが確認された。

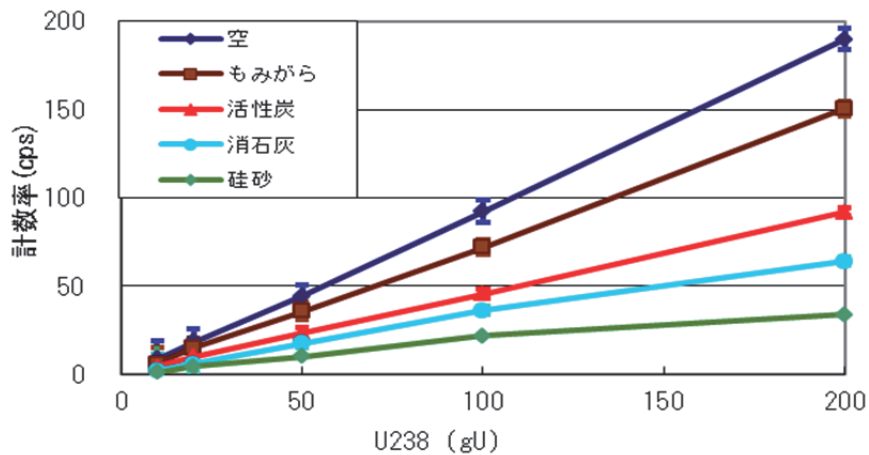
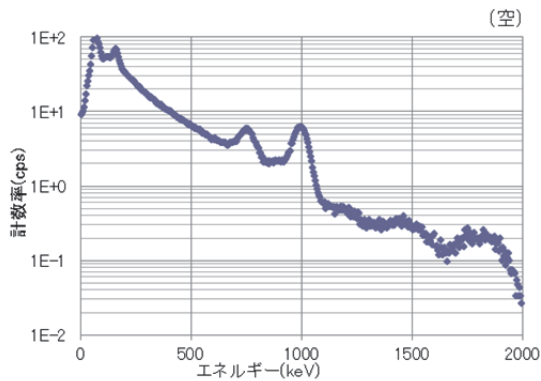
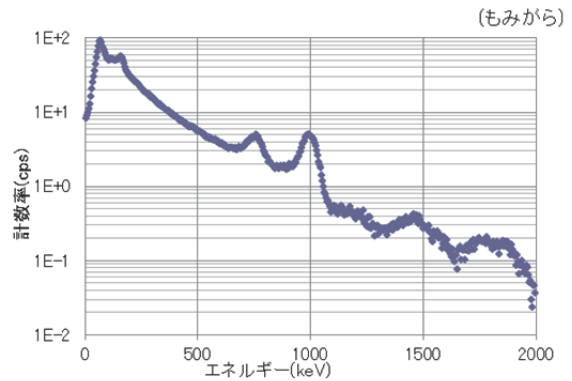
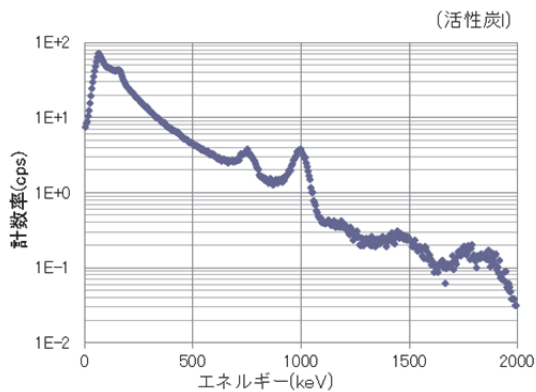
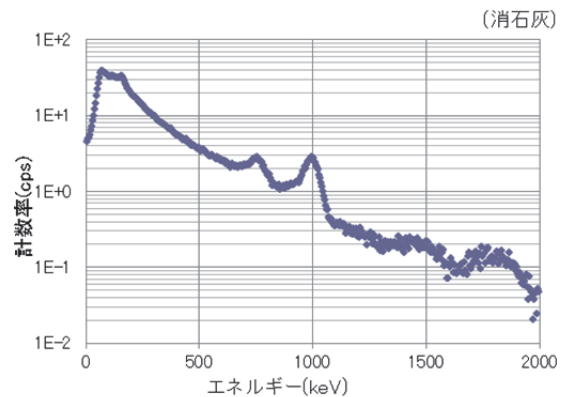
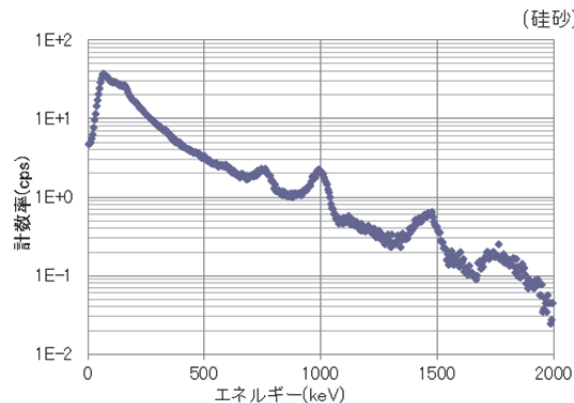


図 4.5.5 線源ウラン量と 1001keV 計数率の関係

表 4.5.2 線源ウラン量と 1001keV 係数率の関係

	U238(gU)	total net cts	3 σ error	計数率 (cps)	cps 2 σ error(%)
空	200	56946	1786	189.8	4.0
空	100	27716	1827	92.4	4.1
空	50	13283	1945	44.3	4.3
空	20	5522	2262	18.4	5.0
空	10	2644	2989	8.8	6.6
もみがら	200	45196	1217	150.7	2.7
もみがら	100	21625	1282	72.1	2.8
もみがら	50	10765	1410	35.9	3.1
もみがら	20	4466	1794	14.9	4.0
もみがら	10	1865	2755	6.2	6.1
活性炭	200	27581	742	91.9	1.6
活性炭	100	13683	802	45.6	1.8
活性炭	50	7009	922	23.4	2.0
活性炭	20	3032	1263	10.1	2.8
活性炭	10	1362	1962	4.5	4.4
消石灰	200	19234	631	64.1	1.4
消石灰	100	10811	693	36.0	1.5
消石灰	50	5363	801	17.9	1.8
消石灰	20	1764	1370	5.9	3.0
消石灰	10	659	2819	2.2	6.3
硅砂	200	10117	496	33.7	1.1
硅砂	100	6571	558	21.9	1.2
硅砂	50	3077	734	10.3	1.6
硅砂	20	1350	1226	4.5	2.7
硅砂	10	294	4551	1.0	10.1

また、ウラン量 100gU の標準線源を用いた試験における 5 種類の模擬廃棄物ドラム缶毎の γ 線エネルギースペクトルを図 4.5.6 から図 4.5.10 に示す。いずれのエネルギースペクトルも 1001keV のピークが明確に判別できる。

図 4.5.6 空ドラム缶の γ 線スペクトル図 4.5.7 もみがらドラム缶の γ 線スペクトル図 4.5.8 活性炭ドラム缶の γ 線スペクトル図 4.5.9 消石灰ドラム缶の γ 線スペクトル図 4.5.10 珪砂ドラム缶の γ 線スペクトル

4.6 測定時間の設定

放射線測定では、測定精度と測定時間には密接な関係がある。一般的に、放射線測定では、式 4.6.1 に示した変動係数が 10%以内となるよう測定時間を設定することが理想とされている。このため、空の模擬廃棄物ドラム缶を用い、ウラン量をパラメータ (1gU、2gU、5gU、10gU) として測定時間と変動係数の関係を評価し、この結果を用いて Q2 装置の測定時間の目安とした。

変動係数の算出方法

$$C_v = \frac{\sigma}{x} \times 100$$

$$= \frac{1}{x} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}} \times 100 \quad (\%) \quad 4.6.1 \text{ 式}$$

C_v : 変動係数

x_i : 測定値

σ : 標準偏差

x : 平均値

(1) 試験条件

- 1) ウラン量 : 1gU、2gU、5gU、10gU
- 2) 検出器位置 : 線源から 370mm、ドラム缶表面から 80mm
- 3) 線源設置高さ : 415mm (図 4.5.4、写真 4.6.1 参照)
- 4) 測定時間 : 300s、600s、1200s(1gU は、1800s、3600s も実施)
- 5) 測定回数 : 各 3 回



写真 4.6.1 ウラン線源の取付状況

(2) 試験結果

試験結果を表 4.6.1 に示す。この表から、ウラン量が 1gU～2gU の場合、変動係数が 10% 以下となる測定時間は 1200 秒以上となった。一方、

ウラン量が 5gU、10gU では測定時間が 300 秒で変動係数は 10%以下となった。この結果からは、ウラン量に対応した Q2 装置の理想的な測定時間は、表 4.6.2 に示すとおり「1gU 以下の時は 1200 秒」、「5gU 以下の時は 600 秒」、「5gU 以上の時は 300 秒」と評価された。なお、実際の測定では、廃棄物ドラム缶内のウラン量は未知であることから、予め、変動係数に基づいて測定時間を設定することは困難であるため、ルーチン作業の実用性も考慮し測定時間は 300 秒とした。例えば、廃棄物ドラム缶内のウラン量が数 g 程度と少な

い場合、測定精度が低下しても、廃棄物前提のウラン量推定への影響は少ないものと判断した。

表 4.6.1 測定時間をパラメータとした供試ウラン線源量とウラン定量値との関係

供試U量*1 (gU)	測定時間 (s)	検出ウラン量*2 (gU)				標準偏差 (gU)	変動係数 (%)	*2/*1
		1 回	2 回	3 回	平均			
1	300	3.26	2.22	2.20	2.56	0.61	23.8	2.56
1	600	2.91	2.81	2.01	2.58	0.49	19.0	2.58
1	1200	2.55	2.61	2.19	2.45	0.23	9.4	2.45
1	1800	2.31	2.15	2.29	2.25	0.09	4.0	2.25
1	3600	2.37	2.42	2.33	2.37	0.05	2.1	2.37
2	300	4.69	5.74	4.32	4.92	0.74	15.0	2.46
2	600	5.39	4.41	5.38	5.06	0.56	11.1	2.53
2	1200	5.12	5.14	5.37	5.21	0.14	2.7	2.61
5	300	12.7	13.2	12.6	12.83	0.32	2.5	2.57
5	600	13.2	12.9	12.1	12.73	0.57	4.5	2.55
5	1200	13.1	12.8	12.9	12.93	0.15	1.2	2.59
10	300	23.9	25.6	25.1	24.87	0.87	3.5	2.49
10	600	25.6	25.6	25.9	25.7	0.17	0.7	2.57
10	1200	25.4	26.1	25.5	25.67	0.38	1.5	2.57

表 4.6.2 Q2 装置の試験実施時における測定時間の設定

ウラン量	測定時間	測定結果
1gU 以下	1200 s 以上	線源位置：ドラム缶の中心
5gU 以下	600 s 以上	変動係数：±10%
5gU 以上	300s	

4.7 繰り返し測定による変動

Q2 装置の特性として繰り返し測定による変動係数について評価した。ここで、変動係数は式 4.6.1 に示した通りである。

(1) 試験条件

- 1) ウラン量 : 1gU、10gU
- 2) 検出器位置 : 線源から 370mm、ドラム缶表面から 80mm
- 3) 線源設置高さ : 415mm (図 4.5.4、写真 4.6.1 参照)
- 4) 測定時間 : 300s
- 5) 測定回数 : 各 10 回

(2) 測定結果

試験結果を表 4.7.1 に示す。この表から、ウラン量 10gU では、変動係数が 3% となり、表 4.6.1 に示した値の 10% 以下であることから、繰り返し測定時の変動は十分小さいものと判断できる。

また、ウラン量 1gU については、変動係数が 15% 程度になっているが、これは測定時間を 300 秒としていることを反映した結果である。4.6 との比較から、測定回数を 3 回から 10 回に増やしたことによる誤差の収束傾向がみられることから、繰り返し測定時の変動は少ないものと判断される。

表 4.7.1 繰り返し測定における変動試験結果

U 量 (gU)	ウラン定量値(gU)											標準偏差 (σ)	変動係数 (%)
	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回	9 回	10 回	平均		
1	2.39	2.34	3.15	3.03	2.98	2.12	3.10	2.63	2.45	2.45	2.64	0.39	14.8
10	26.6	25.6	25.5	25.1	25.8	25.3	25.0	24.9	25.4	24.2	25.41	0.7	2.8

4.8 検出限界、定量下限値の評価

(1) 検出限界の評価方法

放射線測定装置の検出限界(nd)は、ウラン線源を配置していない模擬廃棄物ドラム缶を測定したスペクトルの、対象エネルギー(1001keV)のピークエリアから、4.8.1 式にて求める。なお、検出限界は 3σ 法を用いて算出した。

$$\text{検出限界 } n_d(\text{cps}) = \frac{k}{2} \left[\frac{k}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{k}{t_s} \right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right)} \right] \quad 4.8.1 \text{ 式}$$

k : 正規分布乗数(ここで 3σ なので $k=3$ とする)

n_b : バックグラウンド計数率

t_s : 試料の測定時間

t_b : バックグラウンドの測定時間

測定時間 1800 秒での BG 測定結果を表 4.8.1 に示す。

表 4.8.1 BG 測定

	珪砂	消石灰	活性炭	もみ殻	空	平均
1001keV(cps)	-0.265	-0.023	0.294	0.351	0.085	0.088
ベース(cps)	11.505	5.550	5.265	5.958	5.374	6.730

これらの値を 4.8.1 式に代入すると、表 4.8.2 及び図 4.8.1 に示す測定時間ごとの検出限界が求められる。

表 4.8.2 検出限界

測定時間 (sec)	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300	3600
検出限界 (cps)	0.589	0.463	0.411	0.382	0.364	0.350	0.341	0.333	0.327	0.322	0.318	0.314

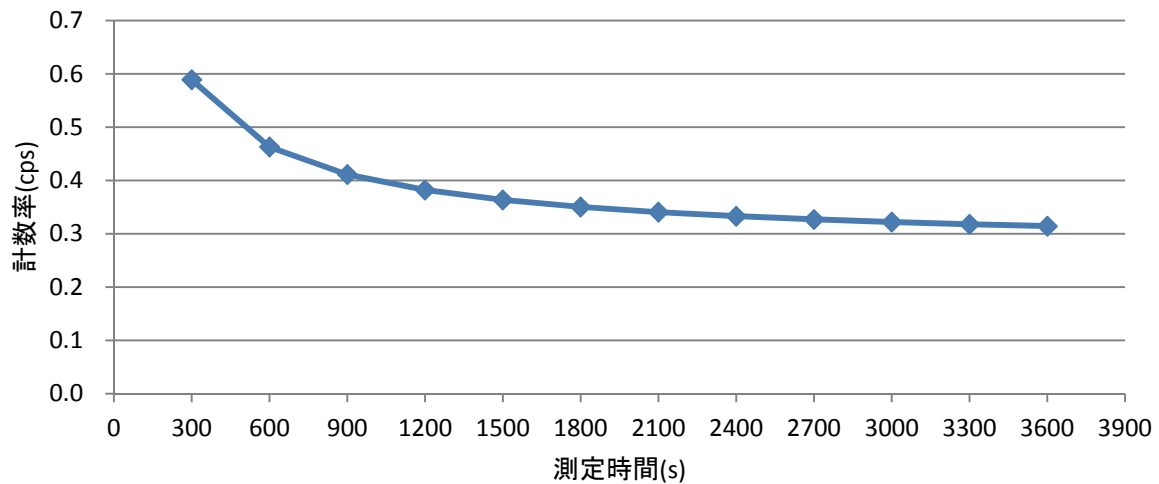


図 4.8.1 検出限界

(2) 定量下限値

定量下限値は 10σ を用いて算出した。ウラン量 1gU における計数率はウラン量 200gU の条件で測定した計数率の値を使って換算し推定した。表 4.8.3 にウラン量 200gU と 1gU の対応を示す。

表 4.8.3 計数率

内容物	200gU に対する cps	1gU に対する cps
もみ殻	150.7	0.7535
活性炭	91.9	0.4595
消石灰	64.1	0.3205
珪砂	33.7	0.1685

以上の条件において評価した。各測定時間に対応した定量下限値を表 4.8.4、図 4.8.2 に示す。この結果により測定における定量下限値を 300 秒の平均値 6gU に設定し測定を行う。

表 4.8.4 各測定時間の定量下限値

測定時間 (sec)	検出限界 (cps)	定量下限値(gU)			
		珪砂	消石灰	活性炭	もみ殻
300	0.589	11.166	5.870	4.095	2.497
600	0.463	8.294	4.361	3.041	1.855
900	0.411	7.149	3.758	2.621	1.599
1200	0.382	6.515	3.425	2.389	1.457
1500	0.364	6.109	3.212	2.240	1.366
1800	0.350	5.824	3.062	2.136	1.302
2100	0.341	5.614	2.951	2.058	1.255
2400	0.333	5.451	2.866	1.999	1.219
2700	0.327	5.321	2.797	1.951	1.190
3000	0.322	5.215	2.742	1.912	1.166
3300	0.318	5.127	2.695	1.880	1.147
3600	0.314	5.053	2.656	1.853	1.130

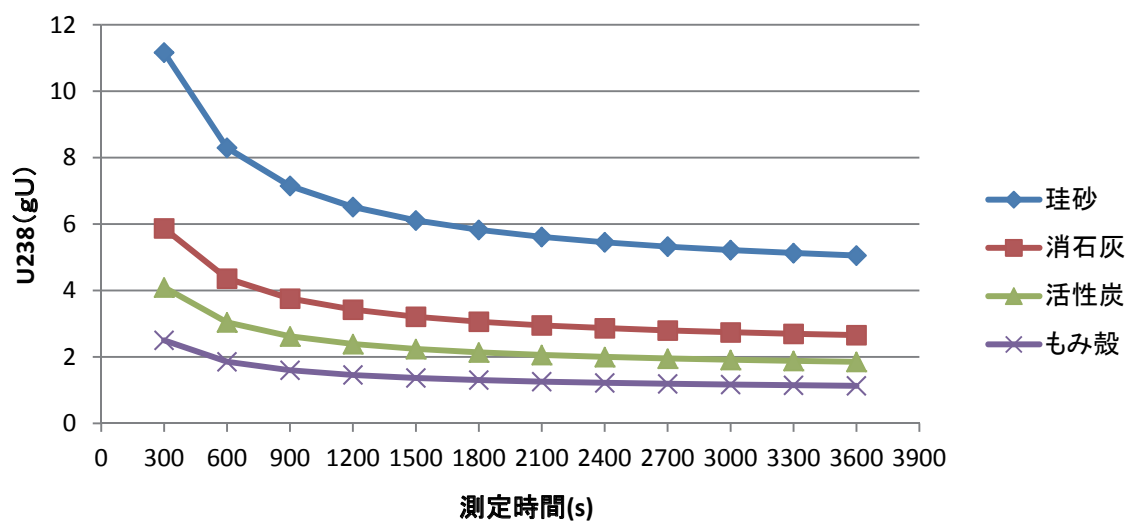


図 4.8.2 各測定時間の定量下限値

5. 実廃棄物ドラム缶の測定

5.章では、Q2 装置の性能確認後にルーチン作業として実施した、貯蔵庫に保管されている実廃棄物ドラム缶測定結果および測定結果に基づくセンターの廃棄物の特徴、Q2 装置による保管廃棄物中のウラン量推定結果について述べる。

5.1 廃棄物ドラム缶の定量方法

(1) ウラン量と計数率

Q2 装置では測定した 1001keV の γ 線の強さ(カウント値)を基に、ウラン量を計算している。4.5 で実施した試験で 1g から 200g のウラン量において図 4.5.5 に示すように γ 線の計数率とウラン量に比例直線的な関係があることが確認できる。従って 200g 以上のウラン量についてもこの関係を外挿してウラン量を計算する。

(2) 廃棄物ドラム缶密度と計数率の関係

γ 線の減衰は、廃棄物ドラム缶のかさ密度に依存するため、重い廃棄物ドラム缶では検出する γ 線が少なくなる。Q2 装置を用いて実廃棄物ドラム缶のウラン量を定量するためには、模擬廃棄物ドラム缶密度と測定された計数率の関係をあらかじめ与えておく必要がある。このため、性能確認試験で用いた「廃棄物密度分布が均一でかさ密度およびウラン量(100gU)が既知」のデータを使って、かさ密度をパラメータとして、ウラン量 1gU あたりの 1001keV の計数率を計算した。この計数率を Q2 装置に組み込み、実廃棄物ドラム缶の重量から計算されるドラム缶密度と測定された γ 線計数率からウラン量を計算する。(3.1.1 式参照)

(3) 1001keV ピークの分離性確認

性能確認試験では天然核種組成の八酸化三ウラン粉末を使った。実廃棄物ドラム缶には天然ウランを含む廃棄物の他、回収ウランを含む廃棄物等も存在する。そのため、ウランの定量に用いる 1001keV のピークの分離性を確認する。ここでは、センターで発生した廃棄物の中から、以下に示す代表的な 3 種類の材質の実廃棄物ドラム缶を Q2 装置で測定した結果を用いて、実廃棄物測定時のエネルギースペクトルの形状を、特に測定対象である 1001keV のピーク周辺に着目して分離性確認を行った。

1) 実廃棄物ドラム缶の内容物と重量

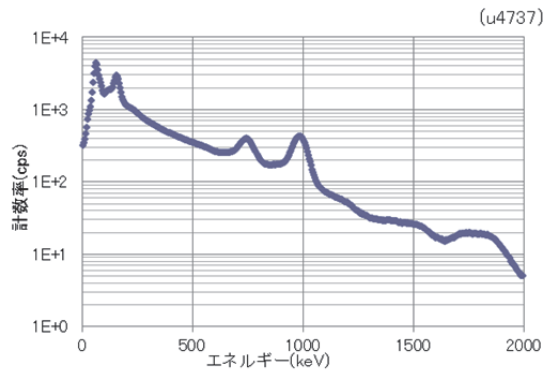
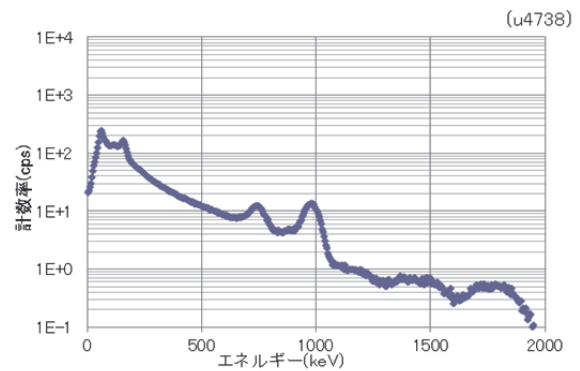
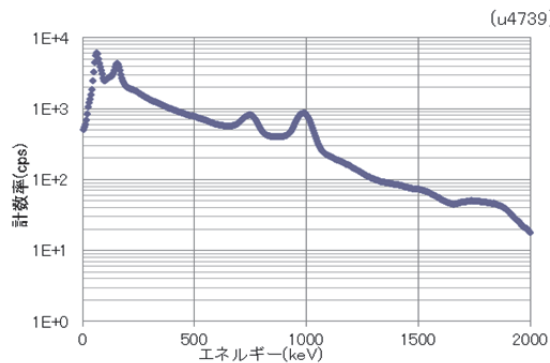
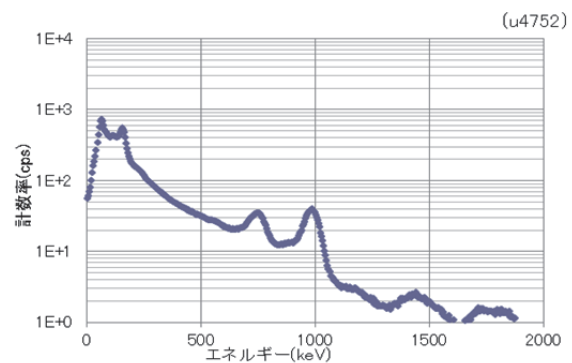
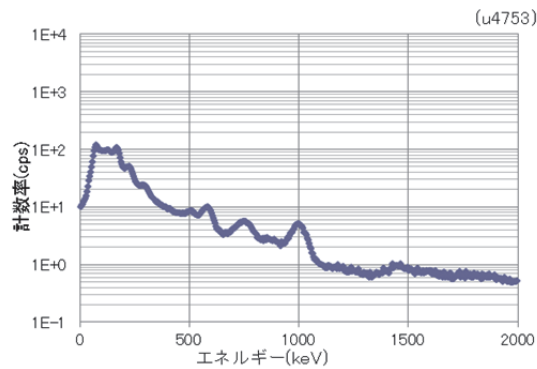
- ① アルミナ(2 本) : 125 kg、155 kg
- ② 金属類(1 本) : 110 kg
- ③ 焼却灰(2 本) : 95 kg、140 kg

2) 試験結果

実廃棄物ドラム缶 5 本の測定結果を表 5.1.1 に、この時のエネルギースペクトルを図 5.1.1 から図 5.1.5 に示す。この図から、実廃棄物ドラム缶を測定した場合でも、模擬廃棄物ドラム缶同様、測定対象エネルギーである 1001keV のスペクトルは確実に分離できることが分かる。

表 5.1.1 実廃棄物ドラム缶測定結果

廃棄物 No.	評価ウラン量 (gU)	cps 2 σ error (%)	総重量 (kg)	Count	内容物
U4737	13520	± 3.3	128	1807245	アルミナ
U4738	394.3	± 3.4	110	58971	金属類
U4739	28420	± 3.5	153	3309347	アルミナ
U4752	1055	± 3.3	97.3	170837	焼却灰
U4753	135	± 4	138	17206	焼却灰

図 5.1.1 実廃棄物(アルミナ) γ 線スペクトル図 5.1.2 実廃棄物(金属類) γ 線スペクトル図 5.1.3 実廃棄物(アルミナ) γ 線スペクトル図 5.1.4 実廃棄物(焼却灰) γ 線スペクトル図 5.1.5 実廃棄物(焼却灰) γ 線スペクトル

5.2 廃棄物ドラム缶の測定実績

(1) 測定対象外

Q2 装置の測定において未精製ウラン及び核原料物質を含む廃棄物、焼却予定の可燃物、難燃物、及び大型金属機器(ドラム缶換算 70 本)は測定対象外としている。また、加工施設に保管している廃棄物ドラム缶は測定を予定をしているが、Q2 装置は使用施設で許認可を申請しているため現在は測定ができていない。

(2) 測定実績

センターの貯蔵庫 15 棟（加工施設は除く。）に保管されている廃棄物ドラム缶を対象として平成 13 年度から平成 23 年度までに、14,148 本の測定を行った。各年度の測定数量を図 5.2.1 に示す。なお、14,148 本には、同一ドラム缶を複数回測定^{※2}した数量を含んでいる。

※2 ドラム缶の腐食による詰替え後の再測定等。

(3) 収納廃棄物の種類毎のドラム缶本数

本報告書は、センター貯蔵庫に保管している廃棄物を、廃棄物の材質により以下の 6 種類の材質区分に分類している。

- ①NaF・アルミナ
- ②金属
- ③コンクリート
- ④樹脂保温材
- ⑤焼却灰
- ⑥澱物

これら 6 種類の廃棄物のドラム缶単位での保管本数と Q2 装置で測定したウラン量を図 5.2.2^{※3}に示す。この図から、材質を基準とした場合の廃棄物の主体は金属および澱物であることが分かる。また、材質区分毎のウラン量については約 80%が澱物に含まれている。

※3 未測定と測定対象外のドラム缶 1447 本は除いている。

(4) 収納物の種類毎のウラン量

材質区分毎の廃棄物ドラム缶中のウラン量分布を図 5.2.3^{※3}に示す。この図から、金属および樹脂については、相対的にウラン量が少なく、ほとんどのドラム缶中のウラン量は 100gU 以下であることが分かる。逆に、NaF・アルミナや焼却灰は、平均 1kgU 程度のウランが含まれている。また、澱物は 100gU 以下のドラム缶から 10kgU を超えるドラム缶まで幅広く存在する。

(5) かさ密度

Q2 装置の重量測定データを用いて求めたドラム缶毎のかさ密度を基準としたドラム缶本数の分布を図 5.2.4^{※4}に示す。この図から、かさ密度はほぼ正規分布をしており、平均かさ密度は約 0.8g/cm³である。また、一般的に、Q2 装置のようなパッシブ γ 線を用いた非破壊

測定装置では、ウラン定量精度が低下するとされている、かさ密度の高いドラム缶は存在しないことが分かる。最もかさ密度が高いドラム缶でも約 1.6g/cm^3 である。

※⁴Q2 装置で測定した重量からかさ密度を算出。従って、未測定と測定対象外のドラム缶は評価対象外。

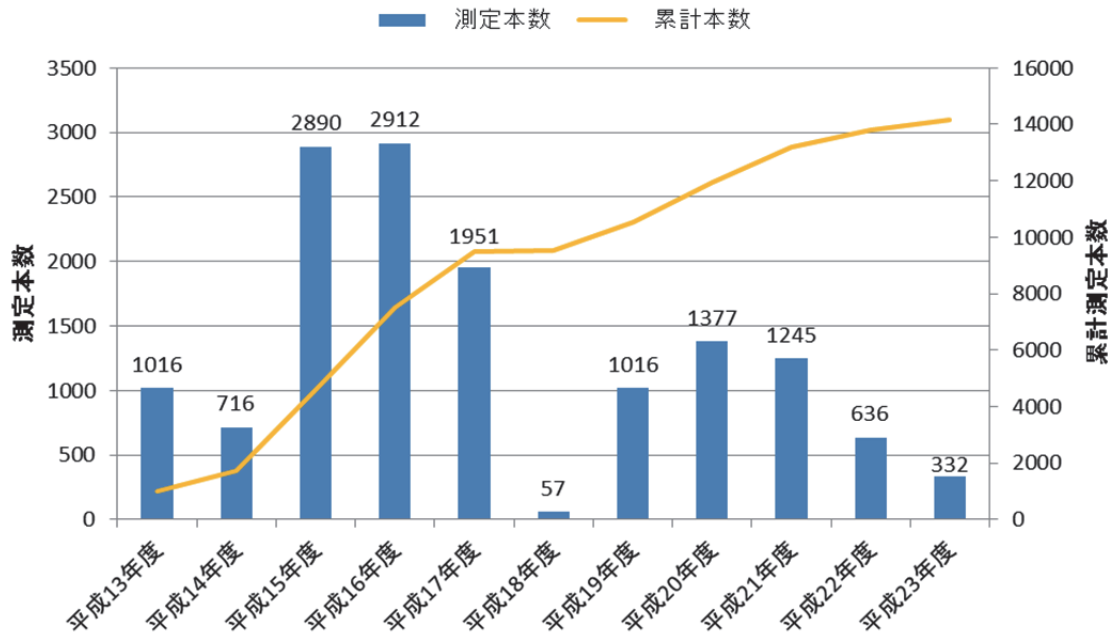


図 5.2.1 廃棄物ドラム缶の測定実績

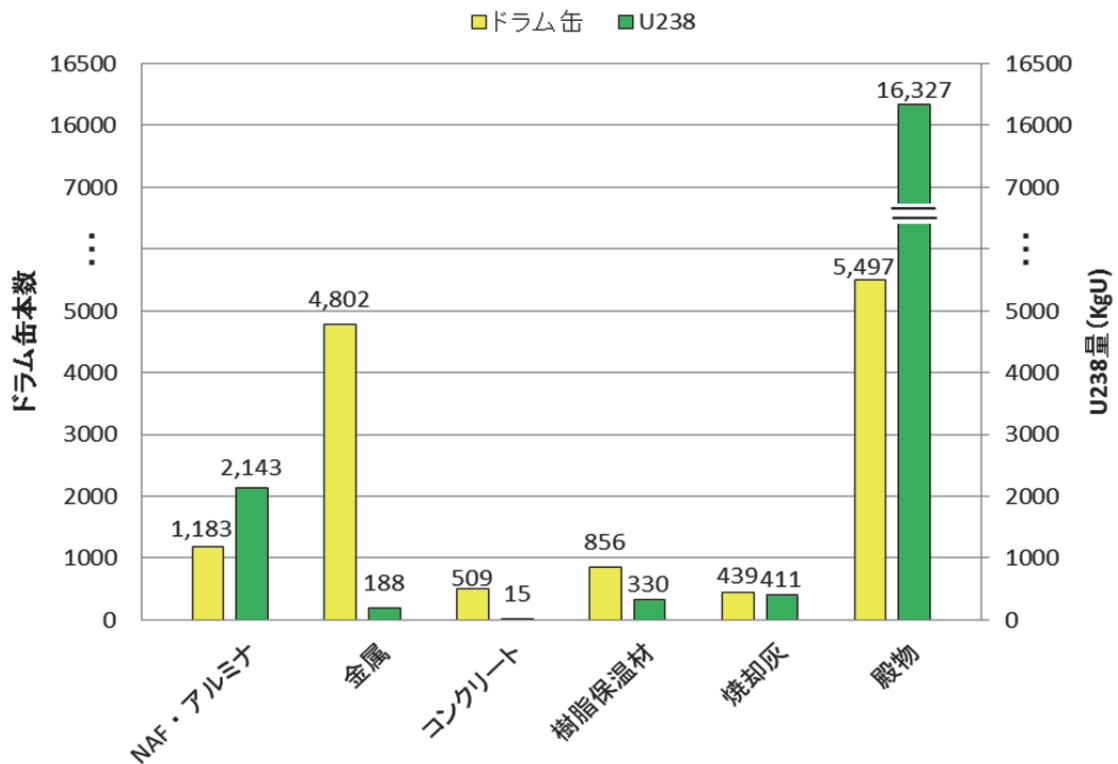


図 5.2.2 廃棄物の分類別ドラム缶数量と U238 量

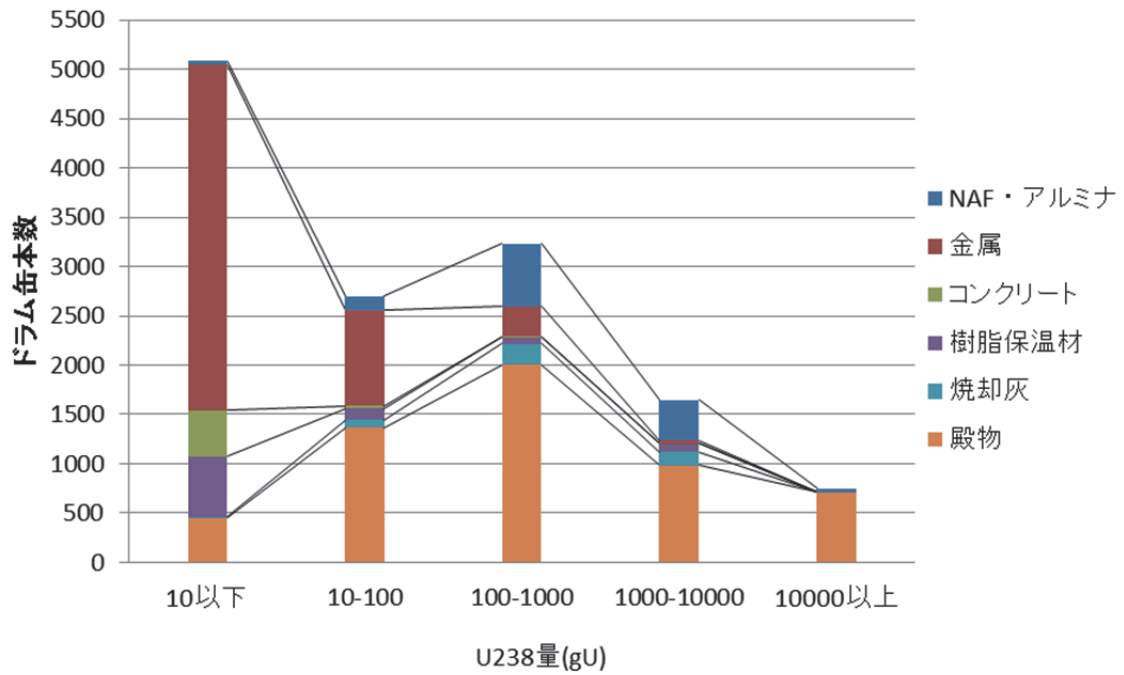


図 5.2.3 廃棄物ドラム缶の U238 量の分布

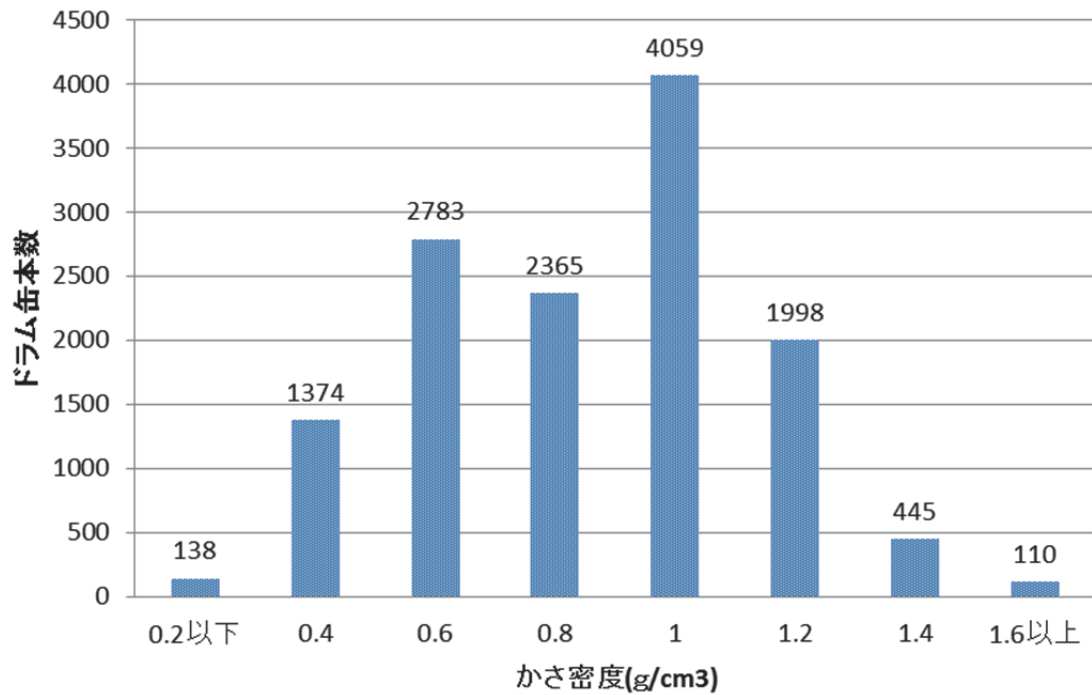


図 5.2.4 貯蔵庫のかさ密度

5.3 廃棄物ドラム缶測定データの妥当性評価

(1) ランダム誤差に起因するウラン定量誤差

廃棄物ドラム缶の γ 線測定を行う場合、測定上の誤差は装置などに依存する系統誤差と γ 線のカウントに依存するランダム誤差がある。また、ウラン量定量上の誤差はドラム缶中の廃棄物の不均一性に依存する偏在誤差がある。

ここでは、ランダム誤差の評価を行う。平成 22 年度までに測定した廃棄物ドラム缶約 14,000 本について各マトリックスに U238 の測定値とそのときの計数率から評価したランダム誤差に依存する定量誤差の相関、および U238 の測定値ヒストグラムを図 5.2.5 から図 5.2.10 にグラフ化した。このとき、95%の信頼度でウラン量を評価すると設定し、ランダム誤差 σ から定量誤差 Error を 5.3.1 式のように計算した。 n_s : 全計数率、 n_p : 正味計数率、 n_B : BG 計数率、 t_s : 測定時間、 t_B : BG 測定時間である。なお、定量誤差 Error を計算するため、Q2 装置から出力される 1001keV の γ 線の計数率を使用した。ただし、Q2 装置の設定上 1001keV の計数率が出力されない場合があるため、U238 の測定値と定量誤差の相関グラフは、1001keV の計数率の出力がある測定データについてのみ作成した。一方、U238 の測定値は常に出力されるため、U238 の測定値ヒストグラムは測定された全データを使用した。

$$Error = \frac{1.96 \times \sigma}{n_p} = 1.96 \times \sqrt{\frac{n_s}{t_s} + \frac{n_B}{t_B}} / n_p \quad 5.3.1 \text{ 式}$$

図 5.2.5 から図 5.2.10 の結果から NaF・アルミナ、樹脂保温材、焼却灰、殿物ではドラム缶ごとのばらつきがないことがわかる。したがって、これらのドラム缶は比較的均質であると考えられる。

コンクリートでは、ウラン量 10gU 以下で、ばらつくデータが多少発生する。コンクリートなどの場合、形状が塊状であり U238 もその表面に付着して偏在状態になっていることが考えられる。

金属はウラン量 10gU 以下でデータが大きくばらついている。つまり、同じウラン量と評価しても計数率のばらつきが大きいことを示している。つまり、金属では廃棄物分布が偏在状態になっていることが推定される。

以上のことから、NaF・アルミナ、樹脂保温材、焼却灰、殿物については廃棄物ドラム缶中が均一とした計算方法を適用しても問題ないと考えられる。また、コンクリートについては廃棄物ドラム缶中が均一とした計算方法を適用しても廃棄物分布の偏在状態の影響は小さいと考えられる。一方、金属では廃棄物分布の偏在状態の影響が大きいため廃棄物ドラム缶中が均一とした計算方法は適用が難しいことが推定される。したがって、金属に関して廃棄物分布の偏在の影響を評価する。

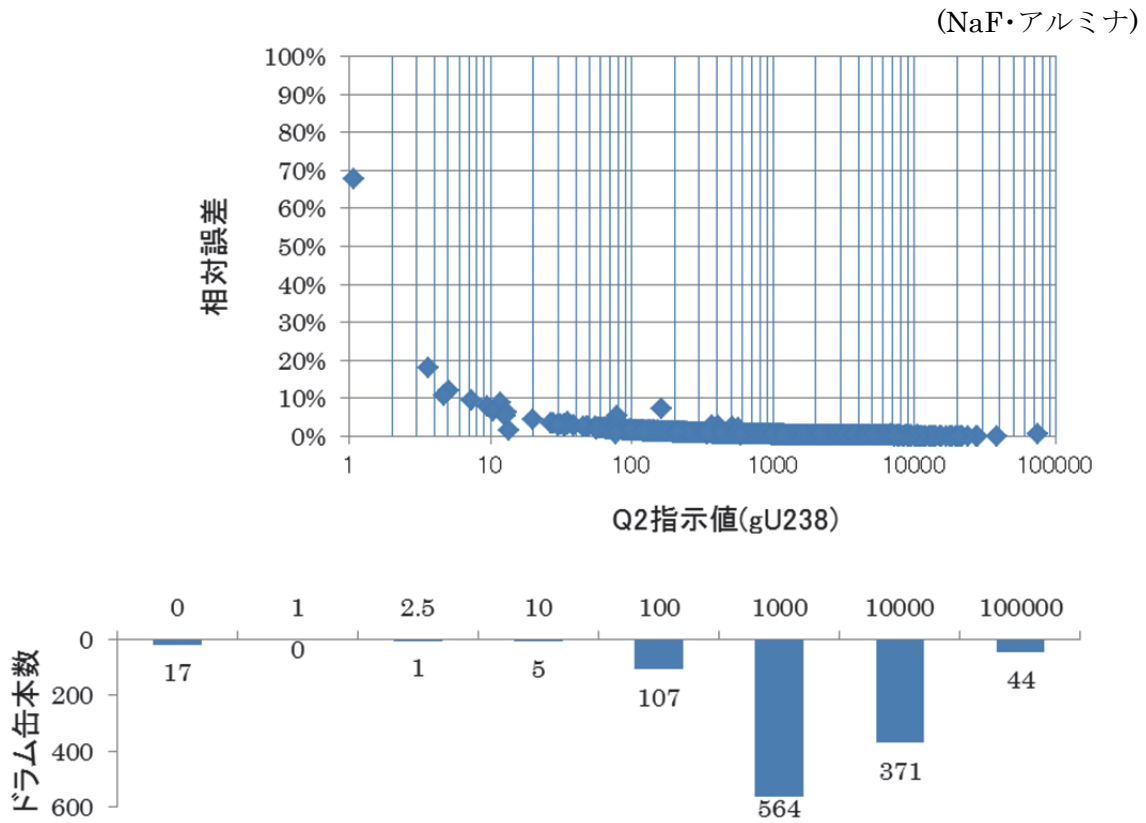


図 5.2.5 測定誤差(NaF・アルミナ)

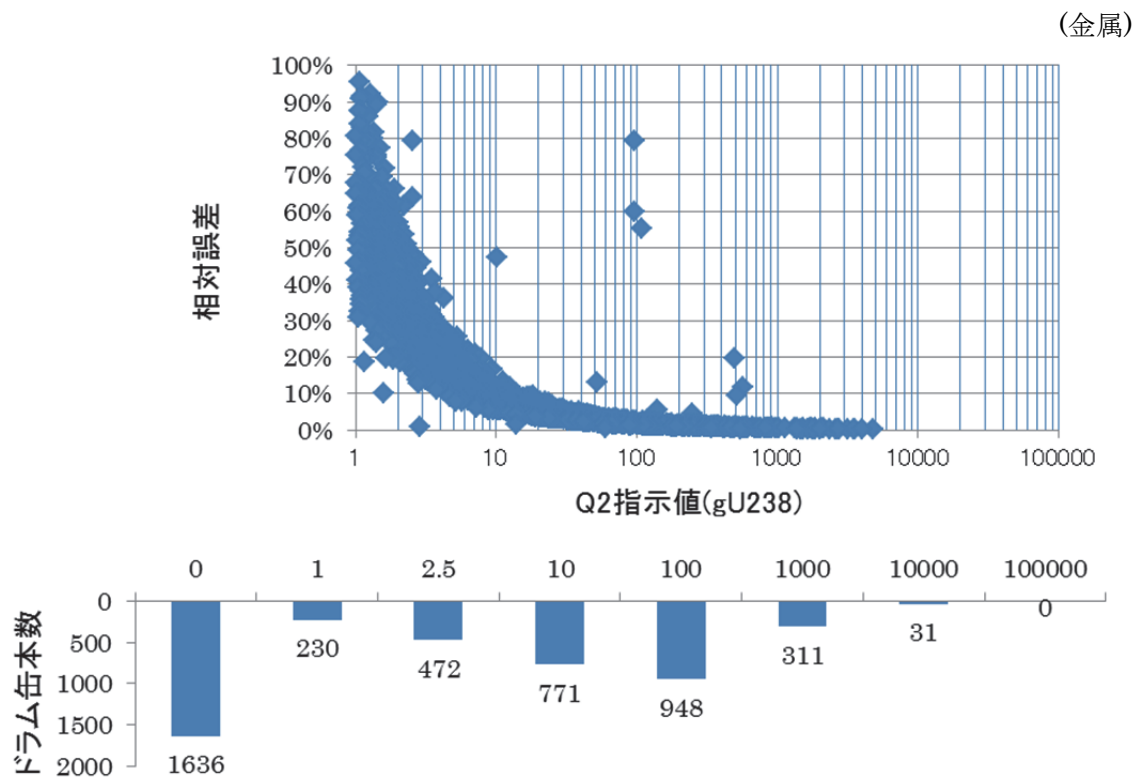


図 5.2.6 測定誤差(金属)

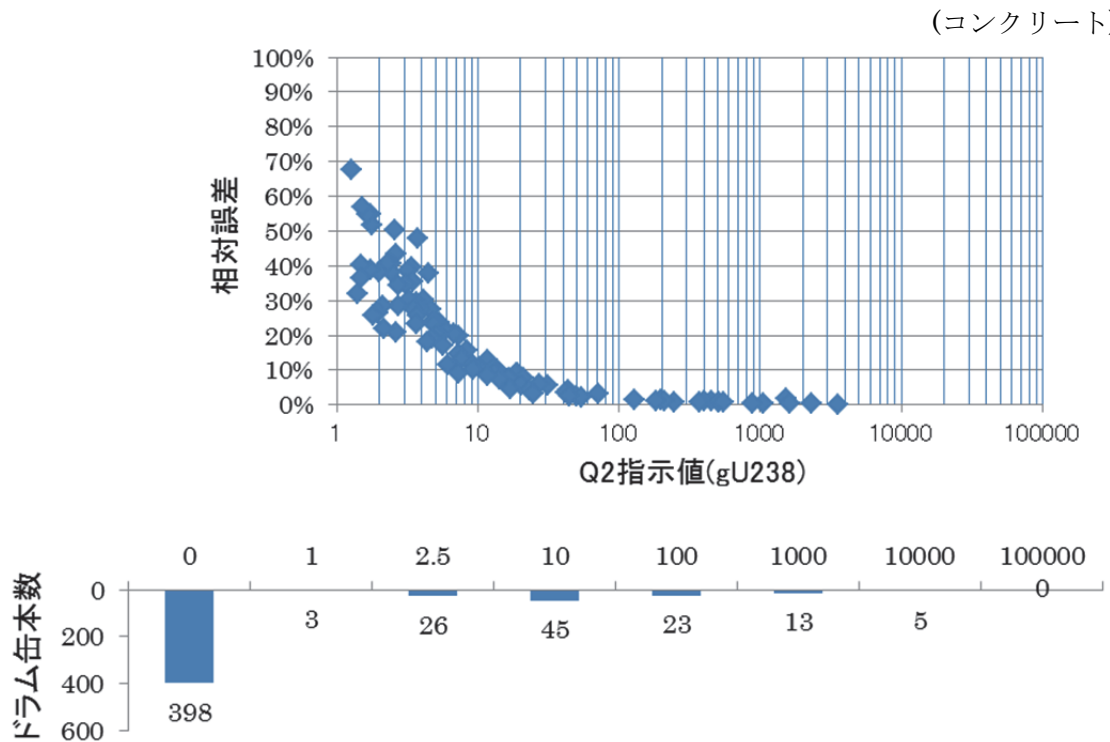


図 5.2.7 測定誤差(コンクリート)

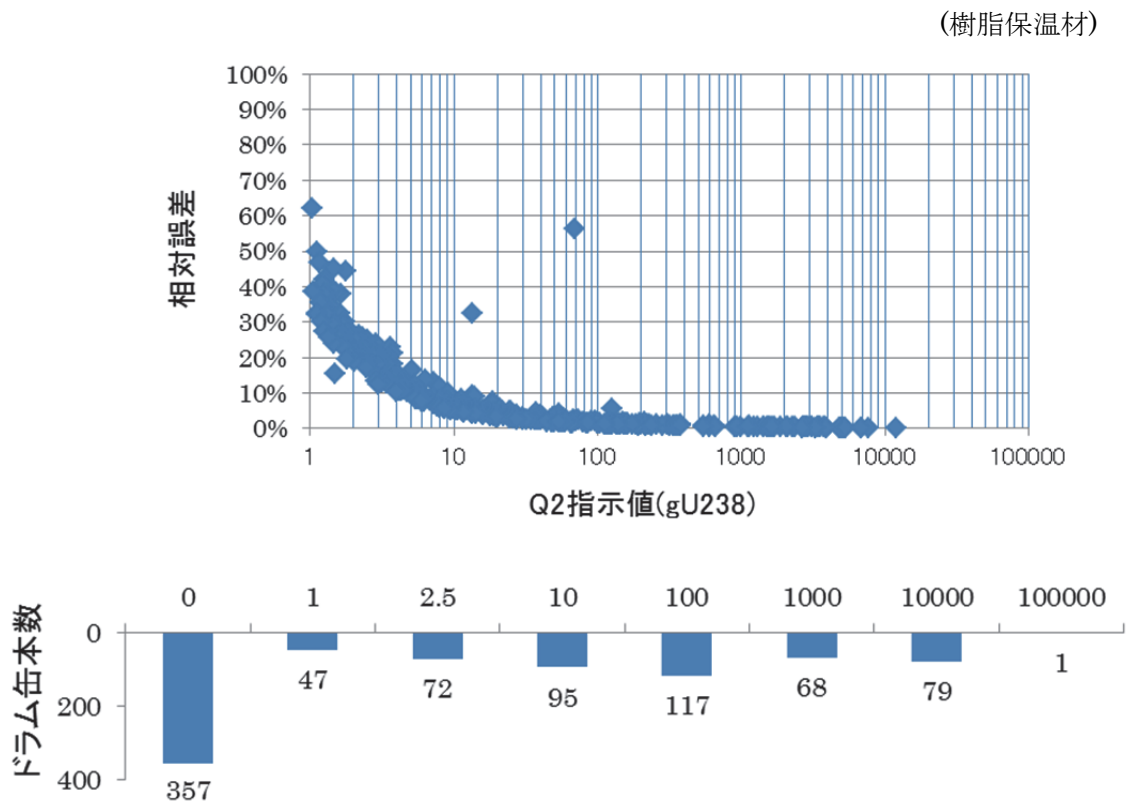


図 5.2.8 測定誤差(樹脂保温材)

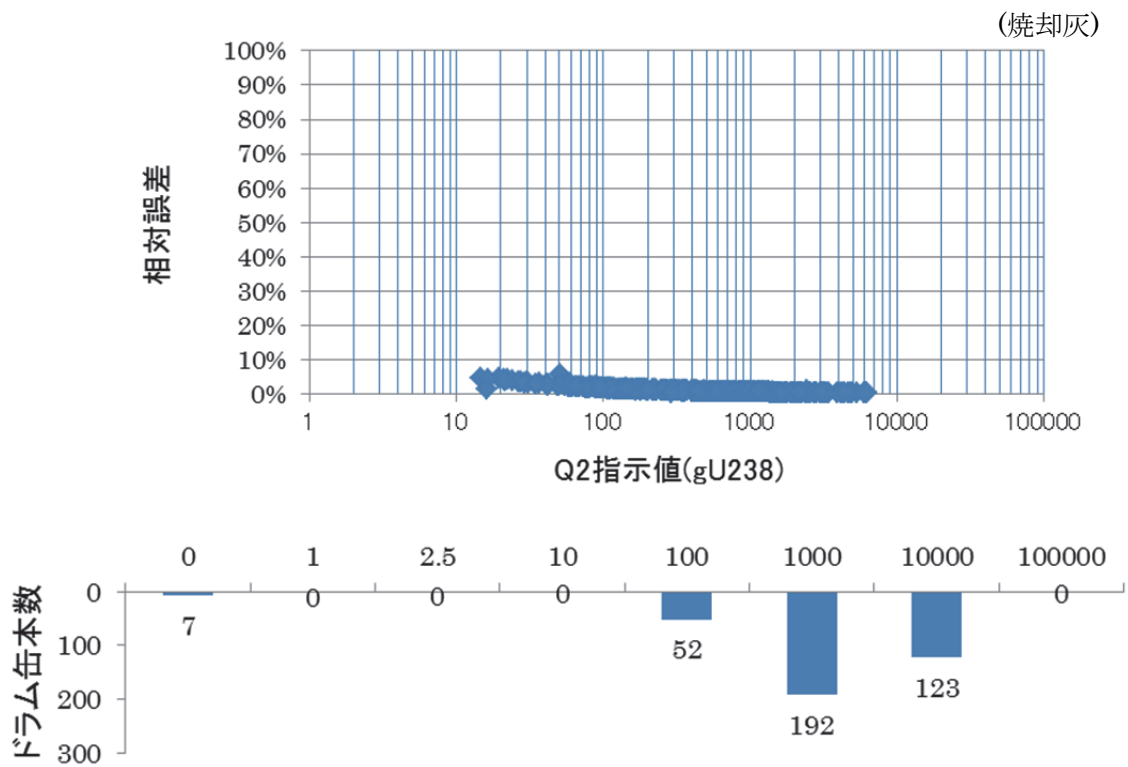


図 5.2.9 測定誤差(焼却灰)

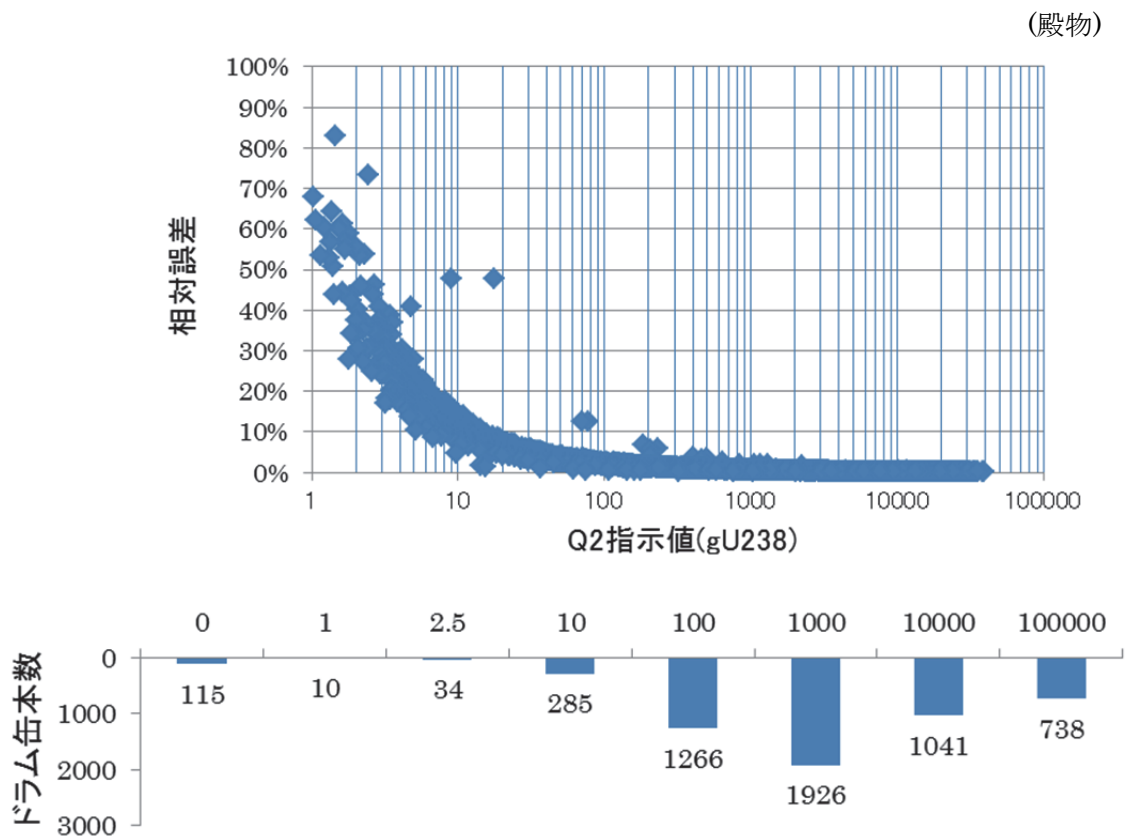


図 5.2.10 測定誤差(殿物)

(2) 金属の密度分布による偏在・遮蔽の影響

Q2 装置は、ドラム缶を重量測定および回転することで γ 線の自己遮蔽と偏在に対応しているので、金属類等の密度が高く、ウランが偏在している廃棄物ドラム缶についての影響を確認した。

1) 試験方法

試験は①空の状態、②空きスペースに消石灰を充填した状態、③空きスペースに鉄材を 165 kg 配置した状態の 5 種類の校正用ドラム缶（図 5.2.11 参照）を用いて、試料挿入パイプ 4 番～7 番にウラン線源を 100gU 配置して測定を行った。

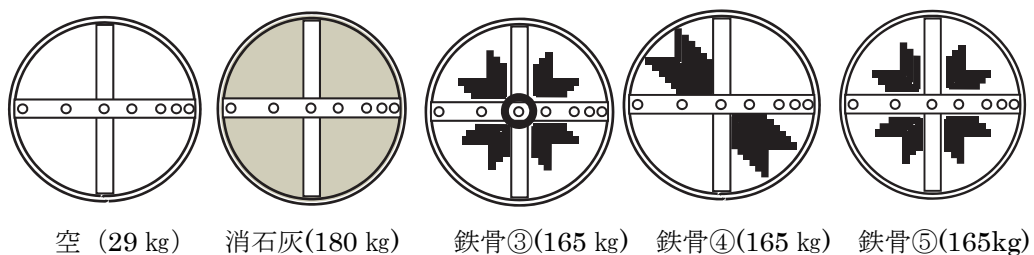


図 5.2.11 校正用ドラム缶

なお、充填材等は以下のとおり。

- L** : 10cm 鉄アングル 80cm 長 9mm 厚さ 12 本
- : 鉄パイプ 肉厚 2.3mm および 3.8mm の 2 枚重ね 65cm 長
- : 試料挿入パイプ 左から順に 1 番～7 番。

2) 試験結果

試験結果を図 5.2.12 に示す。空ドラム缶のように重量が軽いドラム缶は、ウラン線源がどの位置にあっても真値に近い値を示している。しかし、消石灰のように重量が重いドラム缶は、ウラン線源が外側にあると真値に対し過大に検出され、ウラン線源が中心であると真値に対し過小に検出されている。また、鉄材のように重量は重い配置に偏りがでやすい場合、ウラン線源が中心にあっても、自己遮蔽の影響が少ないにもかかわらず、均一ドラム缶と同様に測定重量による補正をおこなうため、検出値は過大に表示されている。

以上のように極端な偏在を試験し測定データの検証を行った結果、偏在の状態によって真値(標準線源)に対して 50～250%のずれが生じることがわかった。

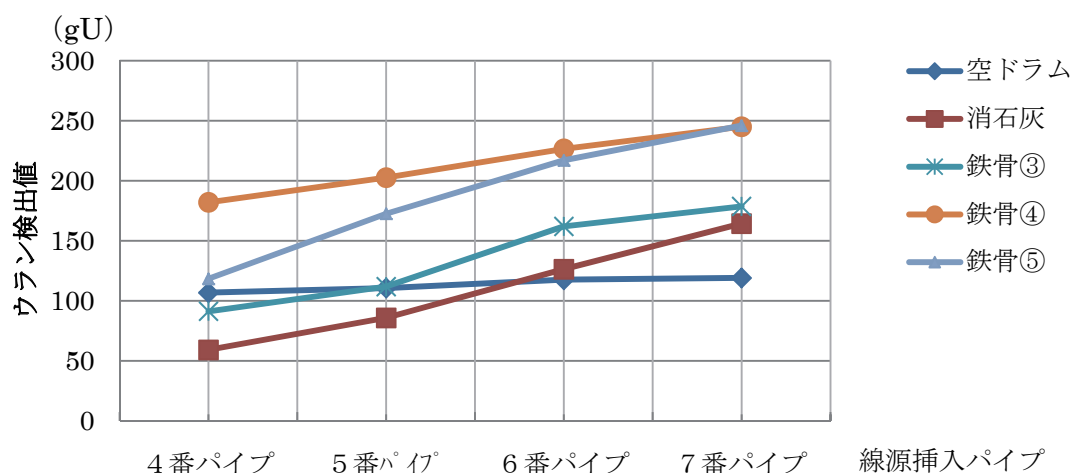


図 5.2.12 線源位置と検出ウラン量

(3) 廃棄物ドラム缶測定データの妥当性評価

現在までに測定した廃棄物ドラム缶約 14,000 本 (NaF・アルミナ、金属、コンクリート、樹脂保温材、焼却灰、殿物) についてウラン量は約 20tU と推定される。NaF・アルミナ、コンクリート、樹脂保温材、焼却灰、殿物については廃棄物ドラム缶中が均一とした計算方法の適用が妥当と考えられるため、ランダム誤差のみを評価するとウラン量の誤差は約 60kgU となる。一方、金属は廃棄物ドラム缶中が均一とした計算方法は適用が難しいと考えられるため、極端な偏在を試験して得られた最大誤差 250%をのせて評価する。この結果、金属に関する偏在誤差は約 490kgU となる。したがって、廃棄物ドラム缶全体の誤差は最大で約 550kgU と推定される。この値は、廃棄物ドラム缶約 14,000 本の総ウラン量の約 2.7% にあたり、センターに保管されている廃棄物ドラム缶のウラン量の総量に与える影響は小さいと考えられる。

6. まとめ

(1) 測定精度

Q2 装置は、廃棄物ドラム缶の収納物のから密度によって測定精度に幅があるが、センターで保管している廃棄物ドラム缶のかさ密度の範囲(0.4g/cm³から 1.4g/cm³)および材質であれば、標準線源および標準廃棄物によるエネルギー効率等の校正を行うことで、測定誤差は 20gU 以上では±10%以内である。

(2) 定量下限値

定量下限値は、測定対象の廃棄物ドラム缶かさ密度と測定時間により定義される。5.1 に示した、保管廃棄物ドラム缶の平均かさ密度(0.8g/cm³)、測定時間を 300 秒とした場合、定量下限値は約 6.0gU である。また、測定時間を 1200 秒とした場合には約 4.0gU となる。

(3) 測定時間

測定時間は、これまで 300 秒としているが、保管ドラム缶の約 40%程度は、廃棄物中に含まれるウラン量が 10gU 以下であることを考えると、10gU 以下については検出下限値および変動係数から 1200 秒程度の測定を行う事が望ましい。

(4) 貯蔵庫で保管している廃棄物中のウラン量

貯蔵庫で保管している廃棄物中のウラン量は約 20tU と評価された。また、その誤差は約 3% と推定される。

7. 今後の課題と展開

(1) Q2 装置は、貯蔵庫に保管されている「精製後の天然ウランおよび回収ウラン組成」で汚染された廃棄物を収納した廃棄物ドラム缶内のウラン量の定量を目的として導入された装置である。この点から、所期の目的は達成できた。ただし、廃棄物密度の偏在性が高い「金属」系廃棄物ドラム缶やウラン含有量が 20gU 以下の廃棄物ドラム缶の測定結果については、ウラン定量精度の実証的な検証ができていないため、これらの検証が必要である。また、人形峠センターには、廃棄物貯蔵庫以外に、約 7000 本のドラム缶、約 1200 体の 1m³メッシュコンテナに解体物が保管されており、これらに含まれるウラン量の定量作業への適用が望まれる。なお、これらの解体物の測定では、現状の Q2 装置では測定が難しい、ウランの子孫核種が放射平衡状態にあるウランや、FP/TRU に分類される核種の一部の濃度が高い廃棄物があること、廃棄物密度の偏在やウラン分布の偏在が大きい金属系の廃棄物が主な測定対象であることから、これらに対応するための対策が必要となる。特に、廃棄物密度の偏在性が高い廃棄物では、廃棄物の性状により線源から検出器の間の遮へい条件が一定ではなくなるため、内包するウラン量が同じでも γ 線計数率が大きく変化してしまい、ウラン定量評価に大きな誤差を生じる要因となる。原子力機構 人形峠環境技術センターの横山、杉杖が構築した「等価モデル手法」¹²⁾では、放射性物質から放出される 2 つのエネルギー(ウランの場合、766keV と 1001keV)の γ 線の減衰効果の違いから、廃棄物密度の不均一性や線源分布の不均一性などで生じる遮へい効果を定量化し、ウラン量を補正して放射能の定量に反映させることが可能であり、この手法を Q2 装置へ組み込むことについて検討・実証を行う予定である。

(2) Q2 装置は当初 OS2 システム(以下 OS2 と言う。)の PC で構成されていたが平成 20 年に Windows システム(以下 Win と言う。)に変更になった。このためスペクトル解析ソフト、廃棄物測定用ソフトおよび MCA を WinPC 用に変更した。廃棄物を測定する際に U238 量の多いドラム缶の場合には γ 線を高レートで検出するため、パイルアップによる数え落としを生ずる。OS2 ではこれに対応できなかったが Win ではこれに対応することが出来る様に性能が向上していた。

このため U238 量の多いドラム缶では OS2 システムでの測定値は Win の測定値に比べて少ない値で示されていたことが判明した。U238 量の多いドラム缶で誤差が大きくなるので無視できない問題である。

検討の結果、スペクトルの解析を行うことで補正が可能になることが分かったので、今後そのためのソフトウェアの開発、作業の実施を計画している。

- (3) NaI を用いている現行の Q2 装置では分解能が悪いので、未精製ウラン及び核原料物質を含む廃棄物ドラム缶は妨害核種により測定できない。今後、センターにおけるウラン量定量のために、分解能の良い Ge 検出器の併用を行う予定である。また、加工施設の廃棄物ドラム缶は Q2 装置の許認可を変更し測定することを予定している。

以上

謝辞

このレポートを作成するにあたりご指導ご協力いただいた人形峠環境技術センターの岡田 敏夫氏、在間 直樹氏、坂尾 亮太氏、横山 薫氏、秦 はるひ氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 横山 薫、杉杖 典岳：“放射性廃棄物容器中のウラン放射能簡易定量評価のためのパッシブ γ 線計測”、Radioisotopes,59,PP707-719(2010)
- 2) 横山 薫、杉杖 典岳：“放射性廃棄物容器中のウラン放射能簡易定量評価のためのパッシブ γ 線計測方法”、Radioisotopes,60,PP13-20(2011)
- 3) 日本原子力学会標準
「ウラン取扱施設におけるクリアランスの判断方法：2010」(AESJ-SC-F020：2010)

付録1 ウラン量定量手法

γ 線エネルギースペクトルからウランを定量する際には、U-238 自身は γ 線を放出しないので、U-238 の子孫核種である Pa-234m の 1001keV ピークを用いる。U-235 の 186keV ピークに比較し高エネルギーのため、ドラム缶充填物中における減衰が少なく、かつ γ 線エネルギースペクトル上のベースラインも低位であるため有利である。U-238 と Pa-234m は完全に放射平衡であるとして、1001keV ピーク計数値から①によりウラン量 (U-238 質量) を計算する。また、評価誤差としては②に示すように NaI 検出器の対象物中のウランおよびバックグランド計数誤差から導出した値を用いる。

① ウラン量算出式

$$^{238}\text{U}(\text{g}) = \frac{\text{放射能}(\text{Bq})}{\text{比放射能}(\text{Bq/g})}$$

$$\text{放射能}(\text{Bq}) = \frac{\text{ピーク計数値}}{\text{測定時間} \times \text{計数効率}^{*1} \times \text{放出比}}$$

$$*1: \quad \varepsilon = \frac{b_1^i \cdot (1 - e^{-b_1^i \cdot \rho})}{b_2^i \cdot \rho}$$

b_1^i b_2^i : 係数
 ρ : 密度

② 放射能誤差の算出式

$$\text{放射能誤差}(\text{Bq}) = \text{放射能} \sqrt{\left(\frac{\text{ピーク計数値の相対誤差}}{\text{ピーク計数値}} \right)^2 + \left(\frac{\text{効率の相対誤差}}{\text{効率}} \right)^2}$$

付録2 ウラン線源配置によるウラン測定値の変動確認

模擬ドラム缶を製作して、ウラン線源の配置の差異による影響を評価した。また、ドラム缶内の充填物重量(かさ密度)の影響についても評価した。

試験では、ウラン線源を図 4.5.4 に示す通り模擬ドラム缶の 15 ポイントに配置して測定を実施し、線源ウラン量とウラン定量値との関係を求める。

2.1 試験条件

- | | |
|--------------|--------------------------|
| 1) ウラン線源 | : U_3O_8 |
| 2) ウラン線源量 | : 表 付録 2.1.1 参照 |
| 3) 測定時間 | : 300s |
| 4) ウラン線源取付位置 | : 15 ポイント(図 4.5.4 参照) |
| 5) 測定回数 | : 各 3 回 |

表 付録 2.1.1 空および均一充填物入りドラム缶の仕様

充填物	嵩密度 (g/cm ³)	ウラン線源量	ドラム缶
空	—	10gU	
活性炭	0.550	10gU	JIS Z 1600
珪砂	1.368	20gU、30gU	

2.2 測定結果

測定の結果を表 付録 2.2.1 から表 付録 2.2.3 に示す。

空ドラム缶では、表 6.2.1、図 6.2.1 に示すように、1C の位置にウラン線源を置いたときのウラン線源量に対しウラン定量値は約 3 倍と多く検出されている。一方、ドラム缶の上下方向では、ウラン線源量に対しウラン定量値は、若干多い程度である。

充填物入りドラム缶については、図 6.2.2 から図 6.2.3 に示すように、嵩密度が高くなるにつれて、ドラム缶中心の検出器に近い位置(1C)でウラン線源のウラン量に対し測定値が多くなっているが、上下方向においては、線源ウラン量に対しウラン定量値は少なくなっている。

この原因としては、ウラン線源と検出器との距離、嵩密度および検出器の形状(取付状態)が関係している。

ドラム缶中心部のウラン線源位置(1C、2C、3C)の場合にウラン定量値は多く計測されていることについては、図 4.5.4 に示すように、2 基の検出器の検出部が上下方向に重なっていることにより二重に測定されたためと考えられる。

なお、検出部がカバーする範囲がドラム缶の中心部に片寄っていることから、検出器 2 基の取付け位置がドラム缶縦方向の γ 線をカバーできるよう取付け位置の変更が必要である。

表付録 2.2.1 空ドラム缶のウラン定量値

測定位置	U 量 (gU)	検出ウラン量(gU)			
		1 回	2 回	3 回	平均
1A	10	9.72	9.00	9.56	9.43
2A	10	11.9	11.9	12.4	12.07
3A	10	13.0	11.6	13.2	12.60
1B	10	23.5	23.6	23.1	23.40
2B	10	22.3	21.3	22.0	21.87
3B	10	20.7	20.9	20.5	20.70
1C	10	32.8	34.0	33.8	33.53
2C	10	26.1	28.6	26.6	27.10
3C	10	25.9	24.3	25.2	25.13
1D	10	27.8	27.4	27.2	27.47
2D	10	23.6	22.4	23.7	23.23

3D	10	21.9	21.0	22.8	21.90
1E	10	13.0	12.4	11.0	12.13
2E	10	13.4	14.0	14.0	14.10
3E	10	15.4	14.0	16.0	15.13

表付録 2.2.2 充填物(活性炭)ドラム缶のウラン定量値

測定位置	U 量 (gU)	検出ウラン量(gU)			
		1 回	2 回	3 回	平均
1A	10	18.9	19.5	17.6	18.67
2A	10	15.8	16.0	14.2	15.33
3A	10	13.5	14.5	14.4	14.13
1B	10	24.6	28.6	27.2	26.80
2B	10	15.6	17.9	15.7	16.40
3B	10	10.8	12.8	12.9	12.17
1C	10	43.6	45.7	42.6	43.97
2C	10	20.7	23.7	20.4	21.60
3C	10	15.7	15.6	17.5	16.27
1D	10	35.6	35.1	35.0	35.23
2D	10	20.3	19.0	18.7	19.33
3D	10	14.8	15.4	13.1	14.43
1E	10	12.9	13.1	12.7	12.90
2E	10	9.57	8.61	9.17	9.12
3E	10	9.06	6.50	8.40	7.99

表付録 2.2.3 充填物(珪砂)ドラム缶のウラン定量値

測定位置	U 量 (gU)	検出ウラン量(gU)			
		1 回	2 回	3 回	平均
1A	30	43.7	42.9	43.7	43.43
2A	30	15.2	11.6	11.2	12.67
3A	30	9.36	5.94	5.38	6.75
1B	20	75.8	76.5	70.7	74.33
2B	20	17.4	13.3	19.3	16.67
3B	20	8.72	5.33	5.34	6.46
1C	20	124	123	122	123.00
2C	20	29.4	30.1	28.6	29.37
3C	20	10.5	10.7	9.72	10.31
1D	20	94.2	98.5	94.4	95.70

2D	20	21.5	20.3	24.1	21.97
3D	20	10.7	10.1	7.29	9.36
1E	20	32.3	30.7	32.2	31.73
2E	20	6.24	6.73	7.41	6.79
3E	30	8.67	6.14	5.90	6.90
2A : 900s、3A : 1200s 以外は 300 s					

この結果から、Q2 装置の初期設定状態ではウラン線源量と定量値との乖離が大きかった為 NaI 検出器の取付位置の変更を行った。

2.3 NaI 検出器取付位置の変更

NaI 検出器の取り付け位置を図 付録 2.3.1 に示すように上下方向に移動し検出器有感部の重複を排除する変更を行い、前項と同様に試験を実施した。

① 試験条件

- 1) ウラン線源 : U_3O_8
- 2) ウラン線源量 : 表 7.1 参照
- 3) 測定時間 : 300s
- 4) ウラン線源取付位置 : 15 ポイント(図 4.5.4 参照)

表 付録 2.3.1 空ドラム缶および均一充填物入りドラム缶の仕様

充填物	嵩密度 (g/cm ³)	ウラン線源量	ドラム缶	備 考
空	—	10gU		
活性炭	0.550	10gU	JIS Z 1600	
珪砂	1.368	10gU		

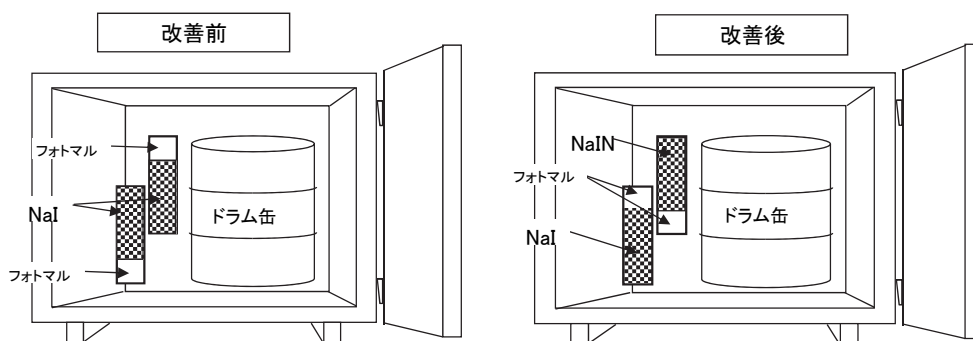


図 付録 2.3.1 NaI(Tl)検出器の取付位置の変更

② 測定結果

NaI 検出器の取り付け位置を変更により、空ドラム缶、活性炭充填ドラム缶および珪砂充填ドラム缶のいずれもウラン線源位置の違いによる定量値のバラツキは小さくなった。線源 1gU あたりの検出値として換算したグラフを図 付録 2.3.2 から図 付録 2.3.7 に示す。

また、検出器の位置変更で測定精度も向上していることが確認された。測定結果を表 付録 2.3.2 から表 付録 2.3.4 に示す。

表 付録 2.3.2 空ドラム缶の供試ウラン線源量とウラン定量値

測定位置	線源 U 量 (gU)	検出ウラン量 (gU)	平均値 (gU)	標準偏差 (σ)	相対標準偏差 (%)
1	A	10.9	12.7	0.148	11.6
	B	14.1			
	C	12.6			
	D	14.3			
	E	11.7			
2	A	9.98	11.7	0.128	11.0
	B	12.2			
	C	12.3			
	D	13.2			
	E	10.8			
3	A	10.4	11.4	0.108	9.6
	B	12.2			
	C	12.2			
	D	12.1			
	E	10.0			

表 付録 2.3.3 充填物入り(活性炭)ドラム缶の供試ウラン線源量とウラン定量値

測定位置	線源 U 量 (gU)	検出ウラン量 (gU)	平均値 (gU)	標準偏差 (σ)	相対標準偏差 (%)
1	A	13.7	15.3	0.15	9.8
	B	17.5			
	C	14.8			
	D	16.2			
	E	14.5			

2	A	10	7.56	8.1	0.05	6.2
	B	10	8.33			
	C	10	8.17			
	D	10	8.85			
	E	10	7.78			
3	A	10	4.54	6.6	0.13	20.3
	B	10	6.43			
	C	10	8.04			
	D	10	7.45			
	E	10	6.37			

表 付録 2.3.4 充填物入り(珪砂)ドラム缶の供試ウラン線源量とウラン定量値

測定位置	線源 U 量 (gU)	検出ウラン量 (gU)	平均値 (gU)	標準偏差 (σ)	相対標準偏差 (%)
1	A	10	20.8	18.7	0.22
	B	10	16.5		
	C	10	17.4		
	D	10	21.4		
	E	10	17.5		
2	A	10	3.55	3.6	0.08
	B	10	4.26		
	C	10	2.13		
	D	10	4.04		
	E	10	3.77		
3	A	10	—	3.5	0.15
	B	10	2.37		
	C	10	—		
	D	10	—		
	E	10	4.5		

—：検出限界以下

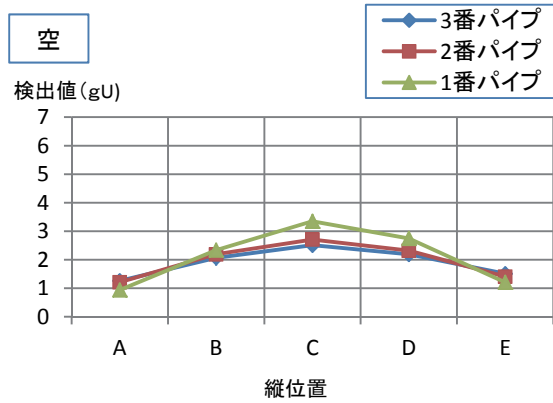


図 付録 2.3.2 ウラン線源位置と検出量

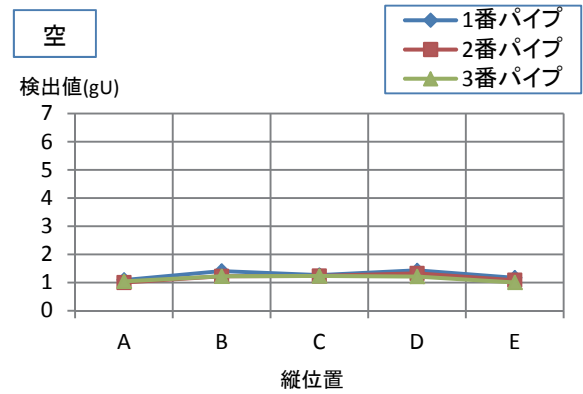


図 付録 2.3.5 ウラン線源位置と検出量
(改善後)

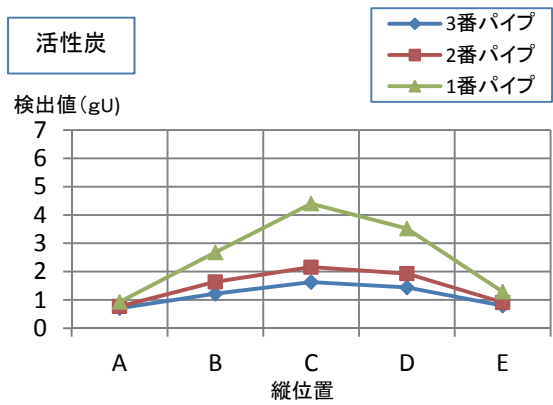


図 付録 2.3.3 ウラン線源位置と検出量

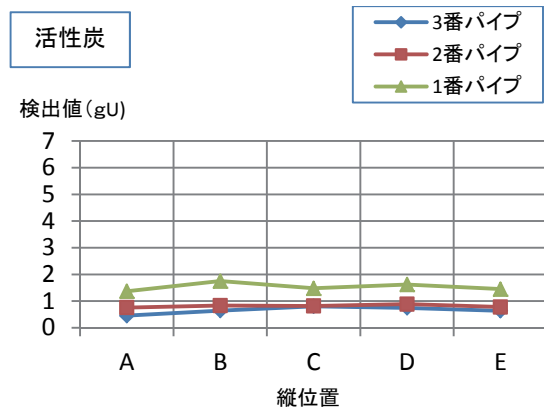


図 付録 2.3.6 ウラン線源位置と検出量
(改善後)

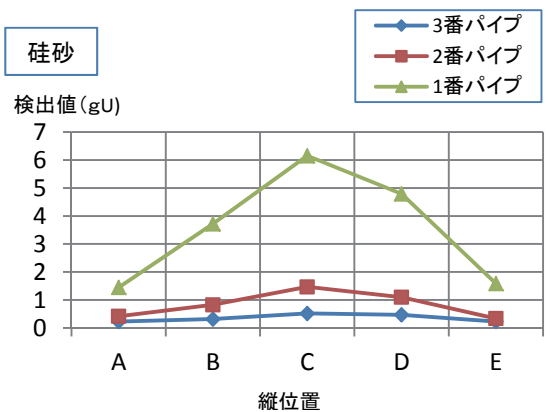


図 付録 2.3.4 ウラン線源位置と検出量

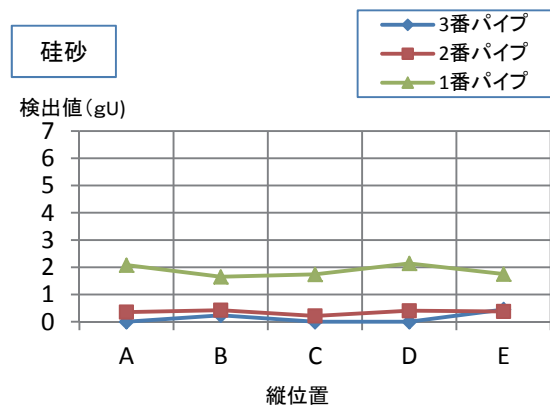


図 付録 2.3.7 ウラン線源位置と検出量
(改善後)

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	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	数メートル	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
比体積	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
電界の強さ	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	キログラム毎立法メートル	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
比誘電率 ^(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) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束流	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	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	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	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一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎平方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	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	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	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	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 ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ 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	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/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, l	1L=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
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
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
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	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
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	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 ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 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	f	1フェルミ≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J (「15℃」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

