



電離イオン式測定器に関する技術開発

— クリアランスレベル測定装置への適用性評価 —

Alpha Radioactivity Measurement Technology with Ionized Air Type Measurement
- Applicability Evaluation to Verification of the Clearance Level -

美田 豊 松村 敏博 横山 薫 杉杖 典岳

Yutaka MITA, Toshihiro MATSUMURA, Kaoru YOKOYAMA and Noritake SUGITSUE

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

October 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

電離イオン式測定器に関する技術開発 —クリアランスレベル測定装置への適用性評価—

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

美田 豊, 松村 敏博^{※1}, 横山 薫^{※1}, 杉杖 典岳

(2008年6月23日 受理)

本試験の目的は、電離イオン式測定器を用いて、硫酸湿式法により除染を行った大型テストピースの測定試験を行い、本装置のクリアランスレベル測定装置としての適用性を評価するものである。人形峠環境技術センターでは、今後の廃止措置段階において、ウランで汚染した解体物及び廃棄物が多量に発生する。これらの解体物及び廃棄物の一部は、環境保全、処分費用低減の観点から、除染処理を行い、クリアランスする計画としている。これを実現するためには、クリアランス検認に必要な、極めて低いレベルの α 放射能を測定する技術が必要である。このような技術として電離放射線イオン移送型計測技術が有望であると考えている。電離イオン式測定器の基本技術である、電離イオン流体移送型計測技術は、原理的に、極低レベルの α 放射能が測定可能であり、またサーベイメータのように人手による詳細操作の方法と比べ、大型物品まで一括して測定できるという長所がある。一方、本装置は、新しい技術であることから、実際の測定対象の測定実績が極めて少なく、実使用環境下でのバックランドからの影響や、検出限界、測定性能や信頼性に関する情報が不足している。そこで、本測定試験では、本装置を用いて、除染済実規模サンプルを用いた測定試験を行い、クリアランスレベル測定のための適用性について評価した。

人形峠環境技術センター：〒708-0698 岡山県苫田郡鏡野町上齋原 1550

※1 技術開発協力員

**Alpha Radioactivity Measurement Technology with Ionized Air Type Measurement
- Applicability Evaluation to Verification of the Clearance Level -**

Yutaka MITA, Toshihiro MATSUMURA^{※1}, Kaoru YOKOYAMA^{※1} and Noritake SUGITSUE

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

(Received June 23, 2008)

The purpose of this test is to evaluate the applicability of the clearance level measuring system by Ionized Air Type Measurement after decontaminated by sulfuric acid sample. In Ningyo-toge Environmental Engineering Center. The equipments and radioactive waste which were contaminated with uranium are generated so much in future dismantling stage. In our plan, some of equipments and radioactive waste are contaminated to a clearance level, and cut down on decommission and disposal expense. This plan needs the alpha-rays measurement technology of the very low level. We think that ionized Air transfer measurement technology is promising as of clearance verification technology. The ionized Air transfer measurement technology applied to the Ionized Air Type Measurement can measure alpha radioactivity of a very low level.

Moreover, as compared with a direct survey, there is the merit which can be measured in a short time. However ionized Air transfer measurement technology is new technology. Therefore, there is almost no measurement track record. Furthermore, the date about the influence of a background, a detection limit, measurement performance, and reliability is insufficient.

So, this measurement test estimated applicability as clearance level verification of an Ionized Air Type Measurement.

Keywords: Clearance, Verification, Ionized Air, Applicability

※1 Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 電離イオン式測定器の概要	2
2.1 測定原理	2
2.2 装置概要	2
3. 測定試験条件設定	3
3.1 測定サンプル	3
3.2 測定環境	3
3.3 BG変動要因評価	4
3.4 イオン電流ピーク値計算方法	4
4. 測定試験結果	6
4.1 測定データ	6
4.2 感度校正	7
4.3 検出下限	7
4.4 放射エネルギーに対する線形性	8
4.5 測定作業時間	10
5. クリアランスレベル測定器としての適用性の検討	12
6. まとめ	13
謝辞	13
参考文献	14

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Ionized Air Type Measurement	2
2.1 Principle of measurement	2
2.2 Outline of system	2
3. Setup of a test condition	3
3.1 Sample	3
3.2 Environment	3
3.3 Estimation of BG change factor	4
3.4 Ion current value formulate	4
4. Test result	6
4.1 Measurement data	6
4.2 Sensitivity proofreading	7
4.3 Detection limit	7
4.4 Linearity of radioactivity	8
4.5 Measurement working hours	10
5. Applicability as clearance level verification	12
6. Concluding Remarks	13
Acknowledgements	13
References	14

図リスト

Figure1	Principle of measurement	15
Figure2	Composition of the Ionized Air Type Measurement	15
Figure3	Exterior of the Ionized Air Type Measurement	16
Figure4	Form of a sample	16
Figure5	Measurement data for a functional check	17
Figure6	Frequency distribution of BG and Sample measurement data	17
Figure7	Background ion data on the first	18
Figure8	Background ion data on the second	18
Figure9	Background ion data on the third	19
Figure10	Background ion data on the fourth	19
Figure11	Correlation of a Measurement data and room temperature	20
Figure12	Correlation of a Measurement data and room humidity	20
Figure13	Measurement data used for Ion current value formulate	21
Figure14	Test data on the first	22
Figure15	Test data on the second	22
Figure16	Test data on the third	23
Figure17	Test data on the fourth	23
Figure18	The feature of BG change (1)	24
Figure19	The feature of BG change (2)	24
Figure20	Measurement data used for the sensitivity calibration	25
Figure21	The evaluation result of a detection limit	25
Figure22	Selection of linearity evaluation data	26
Figure23	Quality assessment result of Ionized Air Type Measurement	27
Figure24	The radioactivity measurement result by a direct survey (SS1)	28
Figure25	The radioactivity measurement result by a direct survey (LA1)	29
Figure26	The radioactivity measurement result by a direct survey (SA1)	30

表リスト

Table1	The list of the samples used for the test	31
Table2	Measurement data used for Ion current value formulate	31
Table3	The radioactivity(Bq) evaluation result by Ionized Air Type Measurement	32
Table4	The radioactivity(Bq/g) evaluation result by Ionized Air Type Measurement	33
Table5	Linearity evaluation data(Ionized Air Type Measurement)	33
Table6	Linearity evaluation data(ICP-MS)	34
Table7	Quality assessment data	34

写真リスト

Photo1 Ionized Air Type Measurement35

1. はじめに

本試験の目的は、電離イオン式測定器を用いて、ウランを使用した核燃料施設より発生した解体金属を対象として、硫酸湿式法により除染を行った大型テストピースの測定試験を行い、本装置のクリアランスレベル測定装置としての適用性を評価するものである。

人形峠環境技術センターでは、今後の廃止措置段階において、ウランで汚染した解体物及び廃棄物が多量に発生する。これらの解体物及び廃棄物の一部は、環境保全、処分費用低減の観点から、除染処理を行い、クリアランスする計画としている。これを実現するためには、クリアランス検認に必要な、極めて低いレベルの α 放射能を測定する技術が必要である。このような技術として電離放射線イオン移送型計測技術が有望であると考ええる。

電離イオン式測定器の基本技術である、電離イオン流体移送型計測技術は、原理的に、極低レベルの α 放射能が測定可能であり、またサーベイメータのように人手による詳細操作の方法と比べ、大型物品まで一括して測定できるという長所がある。一方、本装置は、新しい技術であることから、実際の測定対象の測定実績が極めて少なく、実使用環境下でのバックランドからの影響や、検出限界、測定性能や信頼性に関する情報が不足している。

そこで、本測定試験では、電離イオン式測定器を用いて、除染済大型サンプルを用いた測定試験を行い、クリアランスレベル測定のための適用性について評価した。

2. 電離イオン式測定器の概要

2.1 測定原理

測定原理を Figure1 に示す。測定室に廃棄物を設置すると、ウラン廃棄物から放出される α 線によって、空気がイオン化される。 α 線1粒子当たりでは、 α 線のエネルギーを、空気のW値つまりイオン対当りのエネルギー消費の値¹⁾ (35.1eV) で除算した数のイオン対が生成する。生成したイオンは、空気流によってイオンセンサへ輸送される。イオンセンサでは、イオンの電荷が電流値として測定される。 α 放射能は、その電流値から評価される。この α 放射能測定手法は、廃棄物の表面全体の近傍で α 線により生成したイオンを一括して測定できるので、非常に効率の良い手法である。

2.2 装置概要

本試験で使用した試験装置の全体構成を²⁾を Figure2 に示す。模擬廃棄物などの測定対象を設置する約1m×1m×1mの測定室、測定室内の空気をイオンセンサに絞り込む流線型出口ノズル、空気中のイオンを収集する円筒形イオンセンサ、イオンセンサで収集したイオンを電流として測定する微小電流計、配管内の気流をスムーズに循環させるバッファタンク、測定室内の空気を吸引してイオンセンサまで到達させる吸引ファンで構成される。

試験装置の測定室内のターンテーブルに測定サンプルを気流と平行に設置する。測定室内の空気を吸引ファンで吸引し、イオンセンサでは流れる空気中のイオンに対して電圧を印加した電極で収集する。さらに、そのイオンの電荷を微小電流計で電流として測定する。試験装置を Figure3 に示す。また、主要な測定条件を以下に記す。

- 空気吸引速度 : イオンセンサ入口で、約 13m/秒
- イオンセンサ電極の印加電圧 : +450V (機器仕様)
- 1 測定の電流サンプリング数 : 1000 点/約 80 秒
- 測定時間 : 約 80 秒

3. 測定試験条件設定

本試験は、日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター ウラン濃縮工学施設(部品保管室)に電離イオン式測定器を設置して実施した。

本試験に用いる電離イオン式測定器は、装置の特性から、設置場所の環境から放出されるラドンガス等の影響を強く受けることから、これらの影響を事前に評価し、計測試験の条件を設定することが重要となる。以下に、測定試験条件に関する検討結果を示す。

3.1 測定サンプル

本試験では、ウラン濃縮パイロットプラントから発生した円筒状の解体金属を、希硫酸により除染し、表面汚染密度が、管理区域からの物品持ち出し基準である、 $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ の $1/10(0.04\text{Bq}/\text{cm}^2)$ 以下であることが確認されているサンプルを用いた。サンプルの形状は、Figure4 に示したように、円筒形状で、肉厚及び材質をパラメータとした。

- 厚肉アルミニウム材
- 薄肉鋼材
- 薄肉ステンレス材

本試験に用いた除染済み大型サンプルの一覧を Table1 に示す。

3.2 測定環境

本装置の設置状況を Photo1 に示す。本装置を設置した、日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター ウラン濃縮工学施設(部品保管室)は、旧人形峠ウラン鉱山の坑道上に位置しており、坑道跡等から生ずるウランの娘核種であるラドン ($\text{Rn}-222$) の濃度が高いことが知られている。このため、ラドンから放出される α 線の影響を受けることが予想されたため、予め、測定環境面からの調査を実施した。

1) 測定環境調査結果

ここでは、測定環境の調査として、以下の測定条件において、約 80 秒間で 1000 回のイオン電流計測を実施した。また、計測状態としては、チェンバ内の循環流を停止しての測定(イオン電流計の漏れ電流測定)、チェンバ内が空の状態、内部の空気を循環しての測定(BG 測定)及びチェンバ内にサンプルを入れた状態で、内部の空気を循環しての測定(実サンプル測定)を行った。

- イオンセンサ印加電圧 : +450V
- 遅延時間 : 0
- RATE : MED

その結果を Figure5 に示す。Figure5 から分かるように、漏れ電流測定と内部の空気を循環させた場合では、イオン電流に明らかな差が見られる。一方、BG 測定と実サンプル測定の差異は非常に小さいことが分かる。これは、前述したとおり、本装置を設置した部屋の、自然放射線や宇宙線によりチェンバ内に生じたイオンの影響であると推定される。

2) 測定環境評価結果

次に、このような測定環境において、実サンプルに存在する放射能(ウラン)により生ずるイオン電流を BG から分離することが可能かを、統計量から推定した。Figure6 に BG 測定時及び実サンプル測定時のイオン電流の度数分布を示す。Figure6 から、実サンプル測定時のイオン電流と BG 測定時のイオン電流は、それぞれ正規分布の集団であることが分かる。このデータを基に、t 検定を実施した。

その結果、BG 測定時のイオン電流の平均値は $1.91E^{-12}A$ で、実サンプル測定時のイオン電流は $2.03E^{-12}A$ であった。また、t 検定結果は $-27.9 \cdot P(T \leq t)$ 、両側推定は $3.5E^{-14}A$ と算出された。従って、BG 測定時のイオン電流平均値と実サンプル測定時のイオン電流平均値の差は有意であることが分かった。従って、測定環境評価に用いた実サンプル程度の放射能を有するサンプルであれば、人形峠環境技術センター ウラン濃縮工学施設(部品保管室)において試験が可能であることを確認した。

3.3 BG 変動要因評価

測定環境評価において、人形峠環境技術センター ウラン濃縮工学施設(部品保管室)は相対的に BG のレベルが高いことが確認された。ここでは、BG が相対的に高い要因及び BG の時間領域における変動について、温度及び湿度変化に着目して評価した。なお、この評価は、4 日間の測定データを用いて実施した。

Figure7 から Figure10 に評価期間である 4 日間の BG 測定時のイオン電流及び温度・湿度の変化を示した。Figure から分かるように、BG 測定時のイオン電流値は、測定を行った何れの日時においても変動していることが分かる。これらの変動が、本装置を設置した自然環境のみに起因するものか、あるいは、温度及び湿度等に起因するものなのかを判別するため、温度及び湿度と BG 測定時のイオン電流値との相関性について評価した。

イオン電流値と温度の相関関係評価結果を Figure11 に、イオン電流と湿度の相関関係評価結果を Figure12 に示す。この結果から、今回の試験環境においては、温度、湿度共に BG 測定時のイオン電流との間に明確な相関関係は認められなかった。よって、BG 測定時に見られるイオン電流値の変動は、主に、自然環境に起因する変動であることが分かった。

よって、本試験では、温度及び湿度をコントロールするなどの特別な処置は行わず試験を実施することとした。

3.4 イオン電流ピーク値計算方法

測定環境及び BG 変動用品評価結果から、人形峠環境技術センター ウラン濃縮工学施設(部品保管室)において、電離イオン式測定器を用いる場合、BG の処理が不可欠であることが分かった。そこで、BG の処理方法として、ここでは、正味電流算出法と積分法について比較検討を行った。各手法は以下の通りである。

- 正味電流算出法による被試験体からのイオン電流(Ag)

$$Ag = \sum_{i=2}^4 Ii / 3 - \left(\frac{\sum_{i=1}^4 Ibb + \sum_{i=1}^4 Iba}{2} \right) / 4 \quad (\text{式 3.4-1})$$

ここで、

Ii=実サンプル測定時イオン電流値

Ibb=実サンプル測定前 BG 測定時イオン電流値

Iba=実サンプル測定後 BG 測定時イオン電流値

正味電流算出法は、式 3.4-1 に示したように、実サンプル 4 点の測定データの内、BG 測定から切り替えた最初の測定データは定常性が弱い可能性があり、2 から 4 番目のデータを用いて実サンプル測定のイオン電流値とした。

○ 積分法による被試験体からのイオン電流(Ag)

$$Ag = \int (Ii)tdt - \int (Ib)tdt \quad (\text{式 3.4-2})$$

ここで、

Ii=実サンプル測定時イオン電流値

Ibb=実サンプル測定前後 BG 測定時イオン電流値

積分法は、式 3.4-2 に示したように、実サンプル測定時のイオン電流の積分値から BG 測定時のイオン電流の積分値を除算した。

検討に用いた測定データを Figure13 と Table2 に示した。この測定データを基に、正味電流算定法で求めた被測定体からのイオン電流は $1.42\text{E}^{-12}\text{A}$ となった。一方、積分法ではこの値が $1.25\text{E}^{-12}\text{A}$ となり、ピーク値計算法の違いにより約 10%程度の誤差を生ずる可能性があることが分かった。なお、本報告書では正味電流算定法を用いることとする。

4. 測定試験結果

本測定試験結果として、測定試験中に実施した全ての測定データ及び検出下限値評価試験結果、測定作業時間評価試験結果について以下に述べる。

4.1 測定データ

本試験では 4 日間の測定試験を行った。測定結果を測定日の時系列としてまとめた結果を Figure14 から Figure17 に示す。各試験日での測定状況の特徴を以下に示す。

1) 1 日目

1 日目は、測定条件設定のためのウラン線源(3 種類)を用いた連続測定及び薄肉鋼材の実サンプル 2 個の測定を実施した。測定を実施したサンプル No.は次の通り。

○薄肉鋼材 : SS1

○厚肉アルミニウム材 : LA2

2) 2 日目

2 日目は、測定条件設定のためのウラン線源(1 種類)を用いた連続測定の後、薄肉鋼材の実サンプル 9 個の測定を実施した。測定を実施したサンプル No.は次の通り。また、Figure18 に示したように、本装置を設置している部品保管室のシャッターの開閉時に BG 電流値の変動が見られた。さらに、12:00 から 13:20 分の時間対で、測定データの連続性が失われる現象が見られた。

○薄肉鋼材 : SS1, SS2, SS3, SS5, SS6, SS7, SS8, SS9, SS10, SS11

3) 3 日目

3 日目は、薄肉鋼材の実サンプル 2 個、厚肉アルミニウム材の実サンプル 3 個及び薄肉ステンレスの実サンプル 3 個の測定を実施した。測定を実施したサンプル No.は次の通り。また、Figure19 に示したように、12:00 から 13:20 分の時間対で、測定データの連続性が失われる現象が見られた。12:00 に測定を中断し、13:20 分に測定を再開した時点で BG 電流が上昇し、その後、BG 電流は徐々に減少した。

○薄肉鋼材 : SS1, SS12

○厚肉アルミニウム材 : LA1, LA2, LA3

○薄肉ステンレス材 : SA1, SA2, SA3

4) 4 日目

4 日目は、薄肉鋼材の実サンプル 2 個、厚肉アルミニウム材の実サンプル 1 個の測定を実施した。測定を実施したサンプル No.は次の通り。2, 3 日目とは異なり、BG 電流も終日ほぼ一定の値を示した。

○薄肉鋼材 : SS1, SS4

○厚肉アルミニウム材 : LA4

4.2 感度校正

電離イオン式測定器を用いた測定試験では、まず、装置の感度校正を実施した。感度校正は、全 α 放射能が既知のウラン標準線源を使用し、高さ4cmの台に載せ、チェンバ中央に設置した状態で、実サンプル測定時と同一条件でイオン電流の測定を行い、正味イオン電流と標準線源の放射能との関係性を評価し、1Bq当りのイオン電流生成量を校正定数(Cf)として求めた。以下に、感度校正に使用した標準線源の仕様を示す。

○ 標準線源仕様

- ・線源番号 : 協-1791
- ・有効面積 : 19.6 cm² (直径2インチ)
- ・試験日 : 2000年1月27日
- ・全 α 線表面放出率 : 1.11×10² (／秒)
- ・不確かさU : 2.1%
- ・ウランの合計放射能 : 222Bq

1) 感度校正結果

感度校正のための標準線源の測定は、3日目と4日目に実施した。測定結果をFigure20に示した。3日目に行った測定では、正味イオン電流2.97E⁻¹²A、BG電流1.76E⁻¹²Aが得られた。また、4日目に行った測定では、正味イオン電流2.87E⁻¹²A、BG電流1.71E⁻¹²Aが得られた。この測定値を用いて、放射能1Bq当たり生成されるイオン電流を求めた結果、それぞれ、5.44E⁻¹⁵A/Bq、5.26E⁻¹⁵A/Bqとなった。平均は5.35E⁻¹⁵A/Bqとなり、この値を、本測定試験での感度校正定数(Cf)とした。

4.3 検出下限

ここでは、上記の測定試験データに基づき、本装置の検出下限について、重量濃度(Bq/g)を基準として評価した。

1) 実サンプルの重量濃度

測定試験を実施した、薄肉鋼材、厚肉アルミニウム材及び薄肉ステンレス材について、式4.3-1により、正味イオン電流値から放射エネルギーを求めた。

$$B_g = A_g \times C_f \quad (\text{Bq}) \quad (4.3-1)$$

ここで、

A_g =正味イオン電流(A)

C_f =感度校正定数=5.35E⁻¹⁵

式4.3-1から求められる、各サンプルの放射エネルギーの評価結果をTable3に示した。また、薄肉鋼材、厚肉アルミニウム材及び薄肉ステンレス材毎の平均と標準偏差は次のようになった。

- 薄肉鋼材 : 7.90±6.00Bq
- 厚肉アルミニウム材 : 29.00±6.20Bq
- 薄肉ステンレス材 : 14.80±1.30Bq

次に、上述した値を、現行のクリアランスレベル単位に準じて、各サンプル重量で除し、重量濃度を求めた結果を Table 4 に示した。

2) 検出下限

本装置の検出下限値(AI)については、BG 電流値の標準偏差(σb)と感度校正定数(Cf)を用いて、式 4.3-2 により定義した。

$$AI = c_1 \times \sqrt{2} \times \frac{\sigma b}{Cf} \quad (\text{Bq}) \quad (\text{式 4.3-2})$$

ここで、

$$c_1 = 3.29$$

σb = BG 電流値の標準偏差

Cf = 感度校正定数

式 4.3-2 を用い、測定サンプルの重量をパラメータとした検出下限値評価結果を Figure21 に示す。なお、この評価では、BG 電流値の標準偏差として、実サンプル測定期間の平均値である、 $1.78E^{-14}A$ を用いた。

この結果、Figure21 に示したように、実サンプルの最低重量を 1.00kg 程度と考えると、本装置での重量濃度の検出下限値は、約 $1.54E^{-2}Bq/g$ と評価される。なお、式 4.3-2 から分かるように、検出下限値は BG 電流の標準偏差に比例する。この事と、3.2 測定環境でも述べているように、本試験を実施した、人形峠センターの敷地内がラドン等の影響により BG が高いことを考えると BG 低減化対策を行うことで、検出下限値をさらに下げることが期待できる。

4.4 放射エネルギーに対する線形性

放射能測定器としての重要な特性には、上記の検出下限値のほかに、放射エネルギーに対する線形性がある。ここでは、実サンプルの全表面を溶解し、ICP-MS により定量した放射エネルギーを基準として、この値と、電離イオン式測定器の測定結果を比較することで、放射エネルギーに対する正味イオン電流の線形性を評価した。

線形性の評価では、まず、評価対象実サンプルの選択を行った。薄肉鋼材については、Figure22 に示した本装置での測定データのなかから、正味イオン電流値が、ほぼ等間隔となるよう、評価対象サンプルとして丸で示した 4 点抽出した。また、厚肉アルミニウム材及び薄肉ステンレス材については、 α サーベイにより、放射能分布がある程度既知となっているサンプルを採用し、6 点の実サンプルにより線形性の評価を行った。この 6 サンプルについての電離イオン式測定器での測定結果と ICP-MS による定量結果を、Table5, Table6 に示す。

1) ICP-MS 定量結果からの全 α 線の算出

選択した 6 サンプルについては、テストピースの表面を 100 または 200 の酸で溶解し、溶解液の一部を ICP-MS でウラン量及び $^{235}U/^{238}U$ の同位体比を測定した。分析結果については Table6 のとおり。

次に、この ICP-MS での分析結果から得られたウラン量から、ウラン同位体(^{235}U , ^{238}U 、

^{234}U の全放射能を式 4.4-1, 4.4-2 及び式 4.4-3 により計算した。また、計算結果を Table7 に示す。

(1) ^{235}U 放射能(Ra235)の算出式

$$Ra_{235} = \frac{w_5}{a_5} \times N_a \times \frac{\ln(2)}{T_5} \quad (\text{Bq}) \quad (\text{式 4.4-1})$$

ここで,

w_5 = ^{235}U 重量
 a_5 = ^{235}U 原子量
 N_a =アボガドロ数
 T_5 = ^{235}U 半減期

(2) ^{238}U 放射能(Ra238)の算出式

$$Ra_{238} = \frac{w_8}{a_8} \times N_a \times \frac{\ln(2)}{T_8} \quad (\text{Bq}) \quad (\text{式 4.4-2})$$

ここで,

w_8 = ^{238}U 重量
 a_8 = ^{238}U 原子量
 N_a =アボガドロ数
 T_8 = ^{238}U 半減期

(3) ^{234}U 放射能(Ra234)の算出式

$$Ra_{234} = \frac{m_{5c}}{m_{5n}} \times \frac{w_4}{a_4} \times N_a \times \frac{\ln(2)}{T_4} \quad (\text{Bq}) \quad (\text{式 4.4-3})$$

ここで,

m_{5c} = ^{235}U 同位体比 (ICP-MS 分析結果)
 m_{5n} = ^{235}U 同位体比 (天然ウラン)
 w_4 = ^{234}U 重量
 a_4 = ^{234}U 原子量
 N_a =アボガドロ数
 T_4 = ^{234}U 半減期

^{234}U の放射能については、式 4.4-3 に示したように、 ^{235}U 同位体比から推定して算出している。なお、この計算では、 ^{234}U の同位体比は天然ウランの ^{234}U の同位体比 (0.00541%) を基準にした。

○天然ウランの重量比

^{238}U 99.284%

^{235}U 0.711%

^{234}U 0.00541%

2) 線形性評価

上述した ICP-MS によるウラン定量分析結果から算出したウラン同位体の全 α 放射能の基準として、電離イオン式測定器の正味イオン電流から算出した全 α 放射能をプロットした結果を figure23 に示す。

この図から、最小二乗法により一次の近似式を求め、この近似式から推定される正味イオン電流の値と、電離イオン式測定器での実測値の差の標準偏差を求めた。その結果、標準偏差約 0.99Bq を得た。

このことから、電離イオン式測定器は、微量放射能領域においても、良好な直線性を持つことが分かる。

4.5 測定作業時間

α 核種で汚染した物品の測定方法として最も一般的な方法としては、 α サーベイメータによるダイレクトサーベイ法が知られている。ここでは、測定作業時間の観点から、ダイレクトサーベイと電離イオン式測定器について比較した。

1) α サーベイメータによるダイレクトサーベイ

α サーベイメータによるダイレクトサーベイにより、実サンプルの内面と外面について、高さ方向 5 点、半径方向は 90 度ごとに 4 点の測定を行った。測定条件及び測定を行った実サンプルを以下に示す。

○ α サーベイメータ

・ 1 分間 α 線強度を測定した。測定条件とサンプルを以下に記す。

・ α サーベイメータ : アロカ製 TCS-352

・ α 線機器効率 : 38.6%

・ 窓寸法 : 6×12cm

・ 測定時間 : 1 分

○ 測定対象実サンプル

薄肉鋼材 : OP-1B B2-030

厚肉アルミニウム材 : OP-1B B3-296

薄肉ステンレス : OP-1B B4-018

なお、BG の補正を行うため、測定環境の α 線係数率を測定した結果、最大 2cpm であったことから、この値をダイレクトサーベイの BG 係数率とした。

Figure24 から 26 に、薄肉鋼材、厚肉アルミニウム材及び薄肉ステンレス材のダイレクトサーベイ結果を示した。各 Figure から分かるように、本測定試験に用いた実サンプルでは、表面の放射能分布に偏在性が確認された。このため、ダイレクトサーベイにより重量濃度を求め

るには、少なくとも本測定試験で行った程度の点数のサーベイを実施し、その結果を加重平均する等の処理が必要であることがわかる。

2) 作業時間比較

α サーベイメータによるダイレクトサーベイでは、40点の実サンプルのサーベイに約1時間を要している。これに対して電離イオン式測定器では、実サンプル測定の前後でBG電流の測定を行ったとした場合でも、約5分程度で測定可能である。また、ダイレクトサーベイでは、測定者の習熟度により測定結果に差異を生ずることが考えられるが、電離イオン式測定器では、放射能測定に直接的な人的関与がない。

5. クリアランスレベル測定器としての適用性の検討

α 核種で汚染した物品をクリアランスするための放射能濃度の基準値を全 α 放射能で 0.1Bq/g と仮定し、本試験で用いた、電離イオン式測定器のクリアランス測定器としての適用性について以下に考察した。なお、本試験に用いた電離イオン式測定器は、現状では、装置の特性上から測定可能な被試験体の形状が限定されるため、ここでの考察の適用範囲は、本試験に用いた円筒形状の被試験体に限定される。

5.1 検出感度の観点からの適用性

本試験で用いた電離イオン式測定器の放射能濃度測定下限は、4.3 に示した通り、測定対象の重量を 1kg とした場合、0.015Bq/g という値が得られており、この値は、想定基準値の約 1/10 である。一般的な廃止措置や除染処理では、配管等の円筒機材を解体・切断する場合、比重の小さなアルミニウム等の金属を想定した場合でも、解体物重量が 1kg 以下になるような解体・細断を行うことは稀なケースと考えてよい。

従って、検出感度面からは、クリアランス測定用装置としての適用性を有していると判断できる。

5.2 線形性の観点からの適用性

本試験で用いた電離イオン式測定器の線形性は、4.4 に示した通り、本試験で用いた被試験体の総放射エネルギーである、5Bq から 40Bq の範囲においては、良好な線形性を示しており、1kg 程度の小型・軽量機材を想定した場合においても、電離イオン式測定器の読値から、測定対象機材の放射エネルギーを評価可能であると考えてよい。

従って、線形性の観点からは、クリアランス測定用装置としての適用性を有していると判断できる。

5.3 作業性の観点からの適用性

本試験で用いた電離イオン式測定器の作業性は、4.5 に示した通り、測定時間面では、測定に要する実用時間が 5 分程度と短くサーベイメータによるダイレクトサーベイと比較して、約 1/10 程度である。また、測定方法も、測定対象機材を測定チェンバにセットすることで測定が出来ることから、人的ファクターの関与を考慮する必要がない。

従って、作業性の面からも、多量の機材の測定が求められることが想定される、クリアランス測定用装置としての適用性を有していると判断できる。

6. まとめ

電離イオン式測定器を用いて、ウランを使用した核燃料施設より発生した解体金属を対象として、硫酸湿式法により想定されるクリアランスレベル以下まで除染を行った大型テストピースの測定試験を行い、本装置のクリアランスレベル測定装置としての適用性を評価した。

その結果、試験に用いた 1kg 以上の円筒形状の機材であれば、クリアランス測定装置に求められる、検出感度、線形性等の基本的特性を有していることを確認した。また、作業性においても、多量の機材の測定が求められることが想定される、クリアランス測定用装置に適合していることを確認した。

電離イオン式測定器の検出下限や測定精度は、装置を設置する場所のバックグラウンドに影響される。今回試験を実施した人形峠環境技術センターの敷地内は、相対的にバックグラウンドが高いことが知られており、装置の設置環境を改善することで、更なる特性の改善が期待できる。

謝辞

本報告書をまとめるにあたっては、バックエンド推進部門の諸氏に助言をいただきました。また、株式会社 東芝 電力システム社の諸氏には、試験装置の調整や援助、助言をいただきました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) G. F. Knoll、放射線計測ハンドブック第3版、2001.
- 2) JAEA、東芝、東北大、東大、名工大：革新的原子力技術開発費補助事業平成17年度成果報告書、電離放射線のイオン流体移送型計測に関する技術開発、2006.

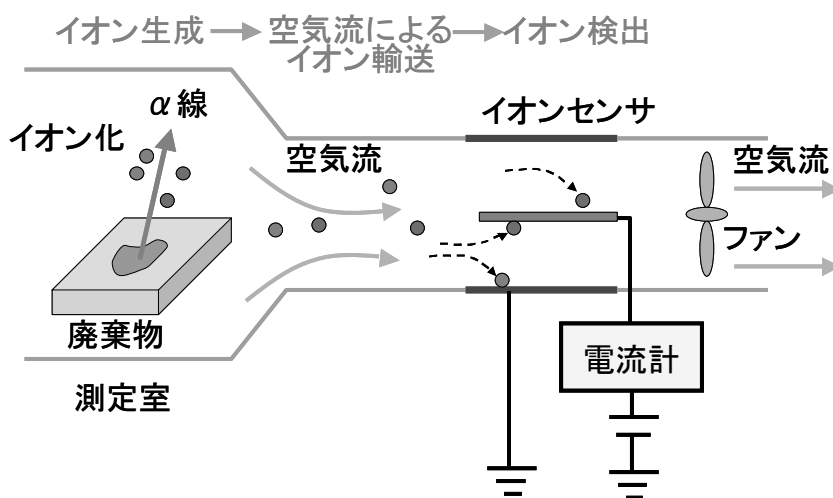


Figure1 Principle of measurement

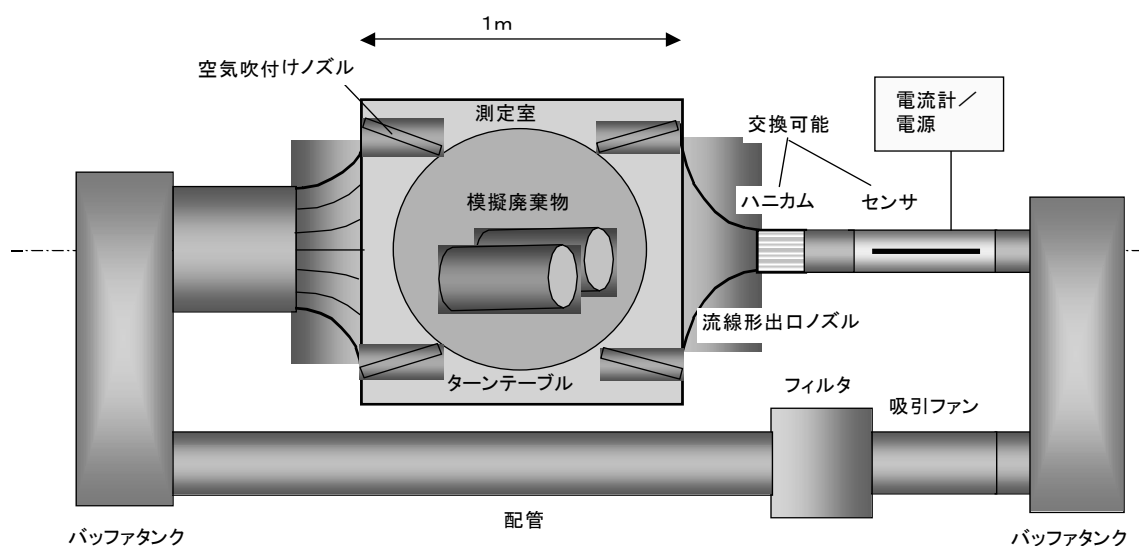


Figure2 Composition of the Ionized Air Type Measurement

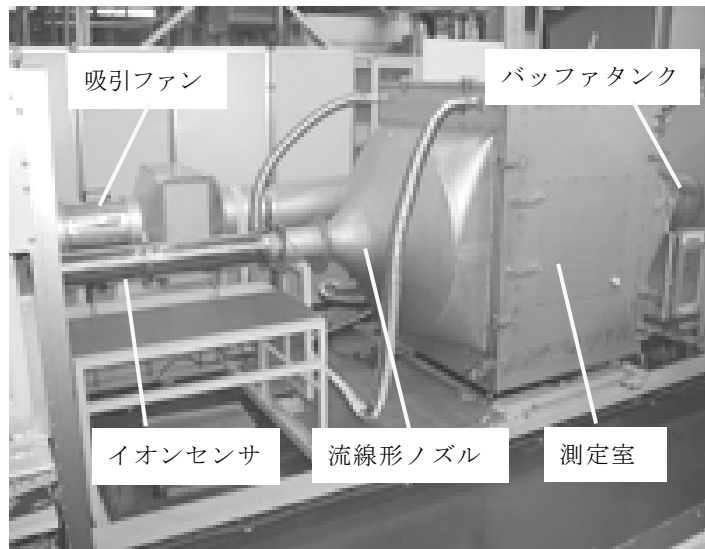


Figure3 Exterior of the Ionized Air Type Measurement

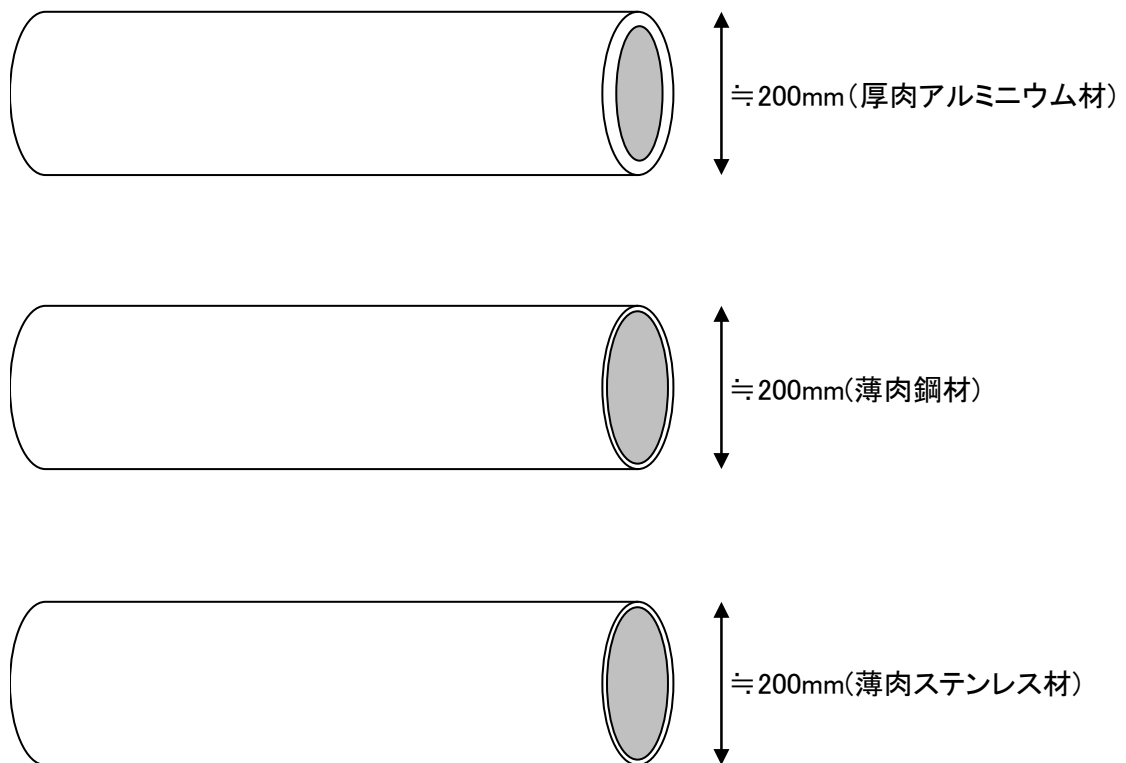


Figure4 Form of a sample

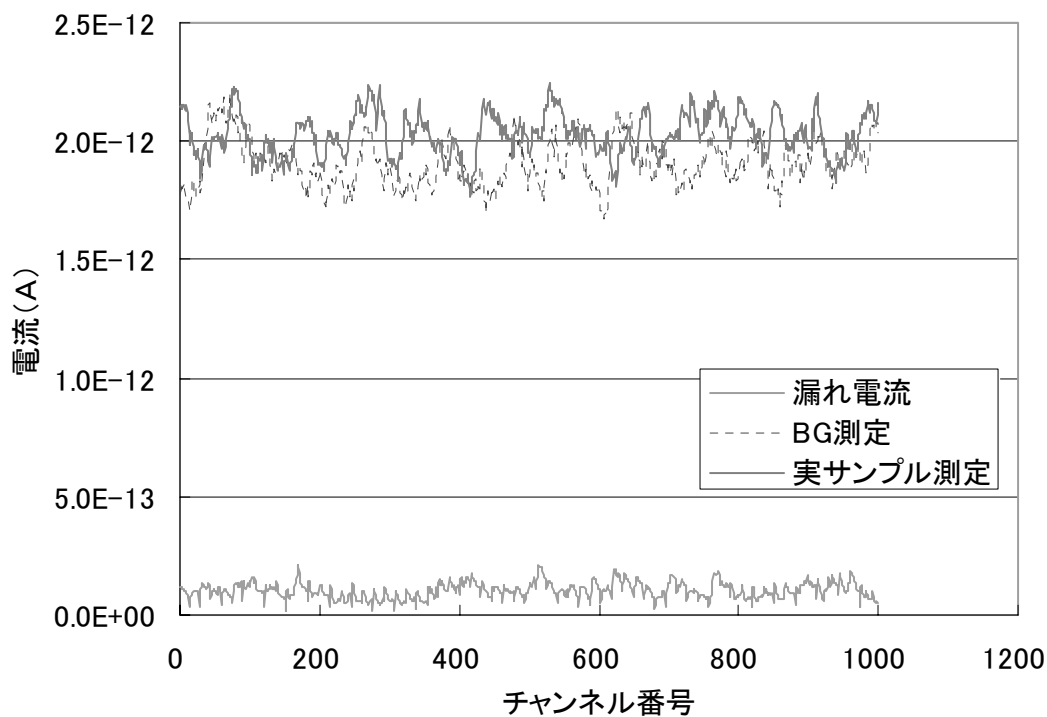


Figure5 Measurement data for a functional check

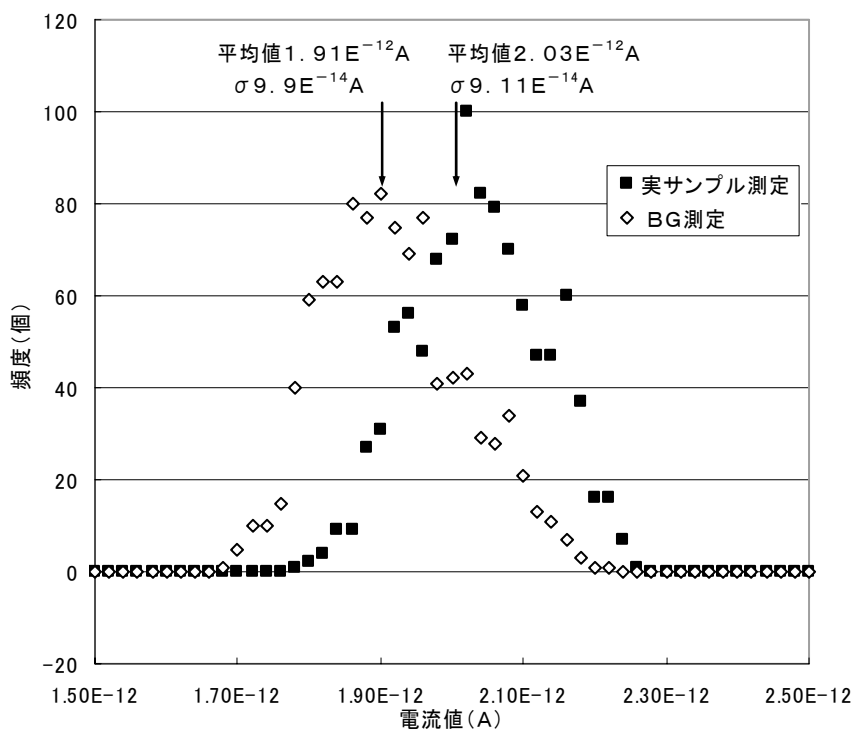


Figure6 Frequency distribution of BG and Sample measurement data

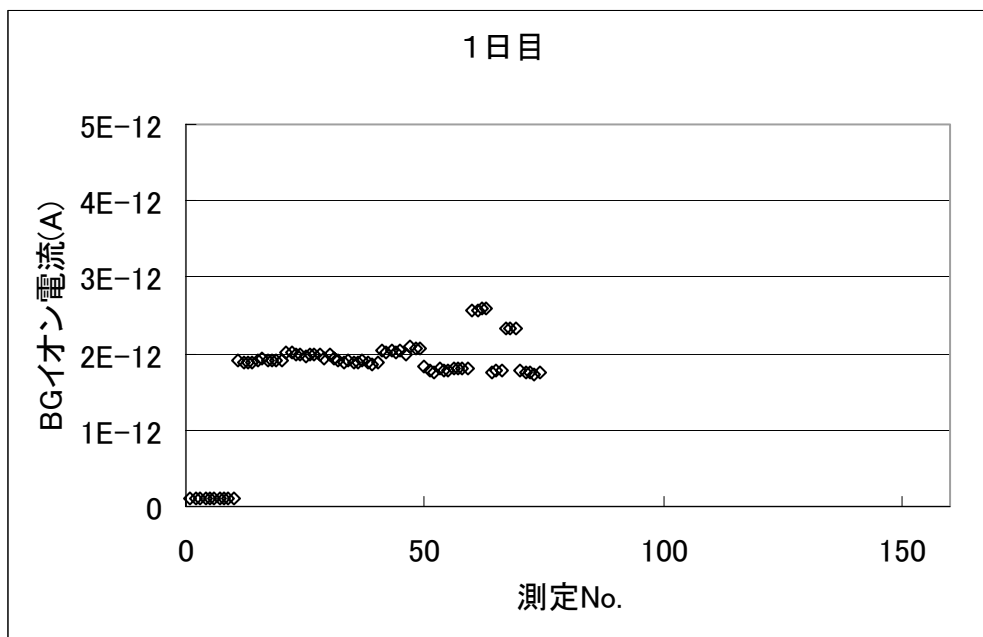


Figure7 Background ion data on the first

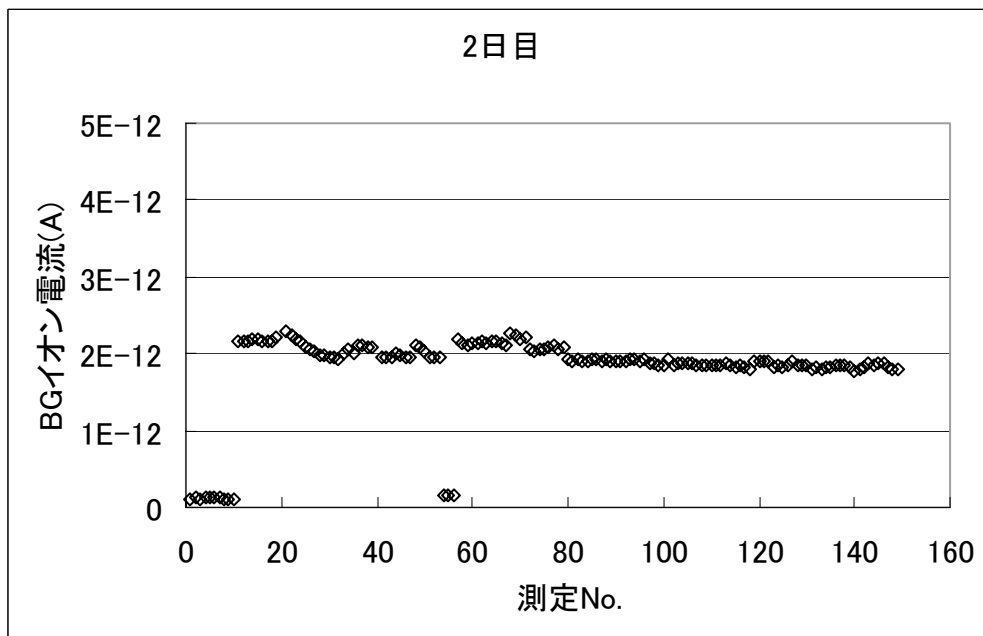


Figure8 Background ion data on the second

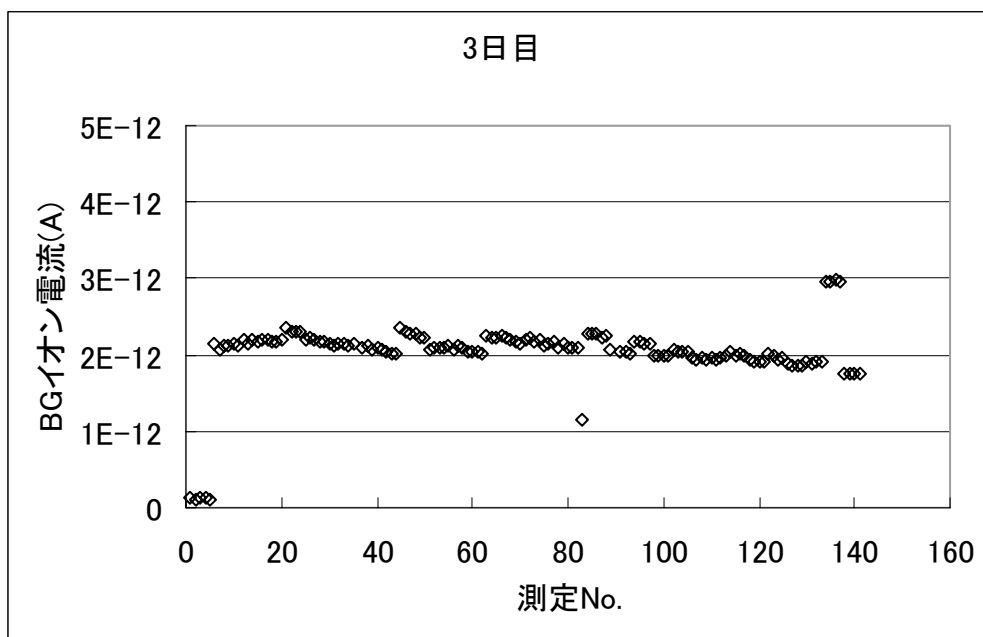


Figure9 Background ion data on the third

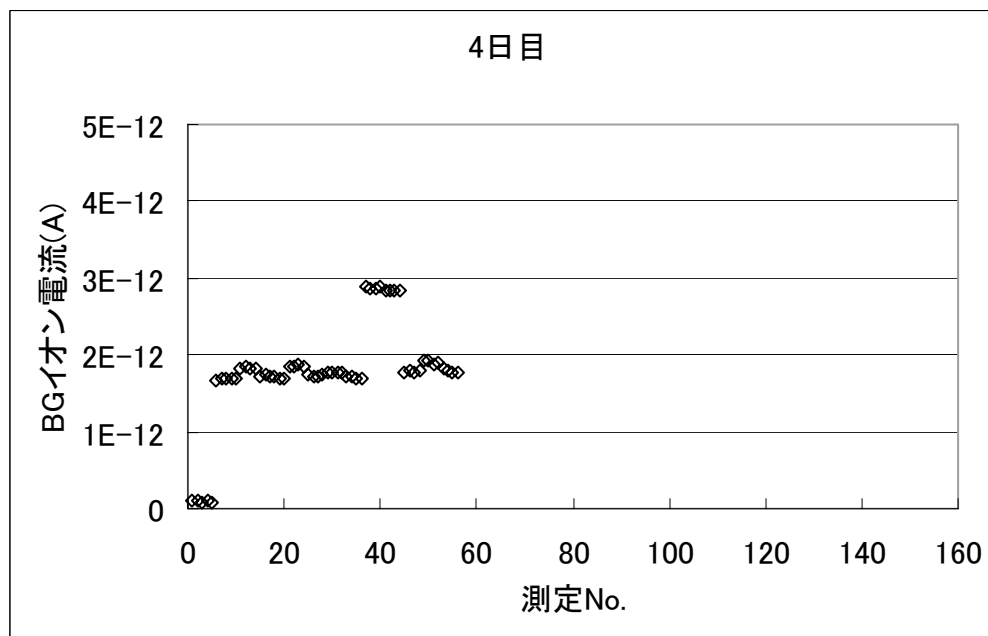


Figure10 Background ion data on the fourth

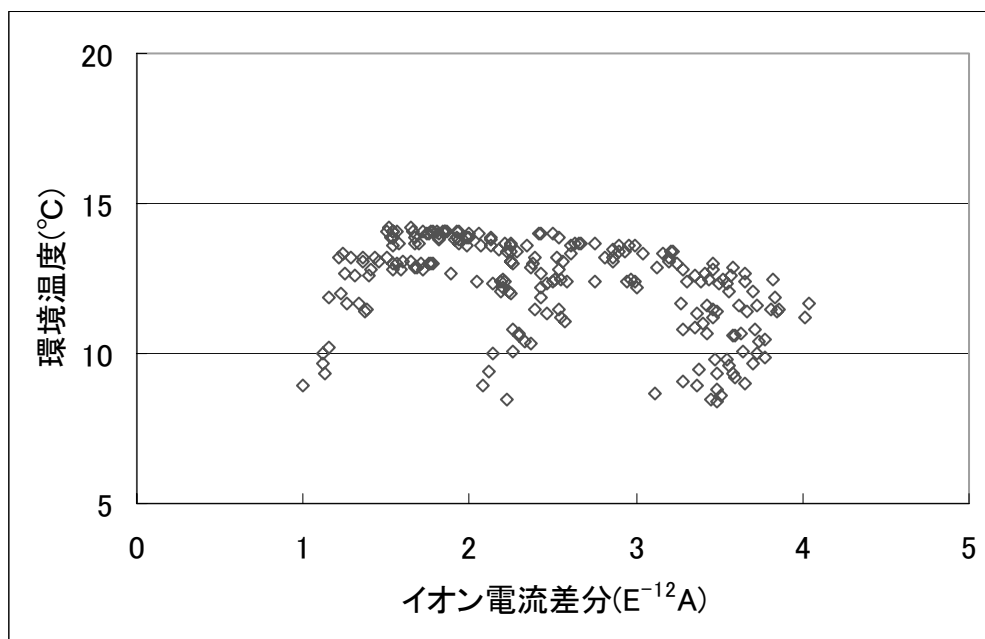


Figure11 Correlation of a Measurement data and room temperature

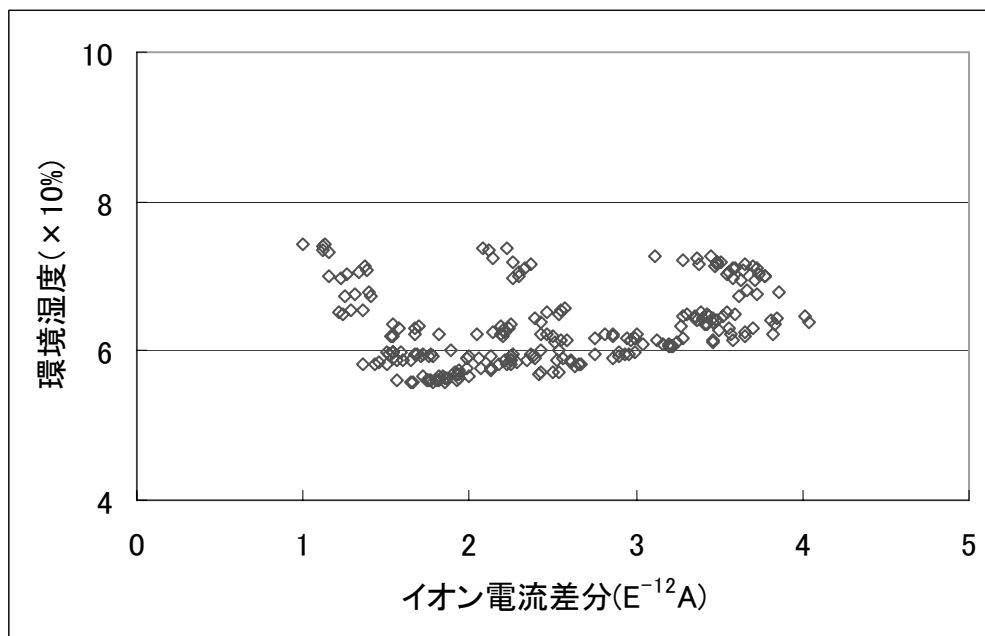


Figure12 Correlation of a Measurement data and room humidity

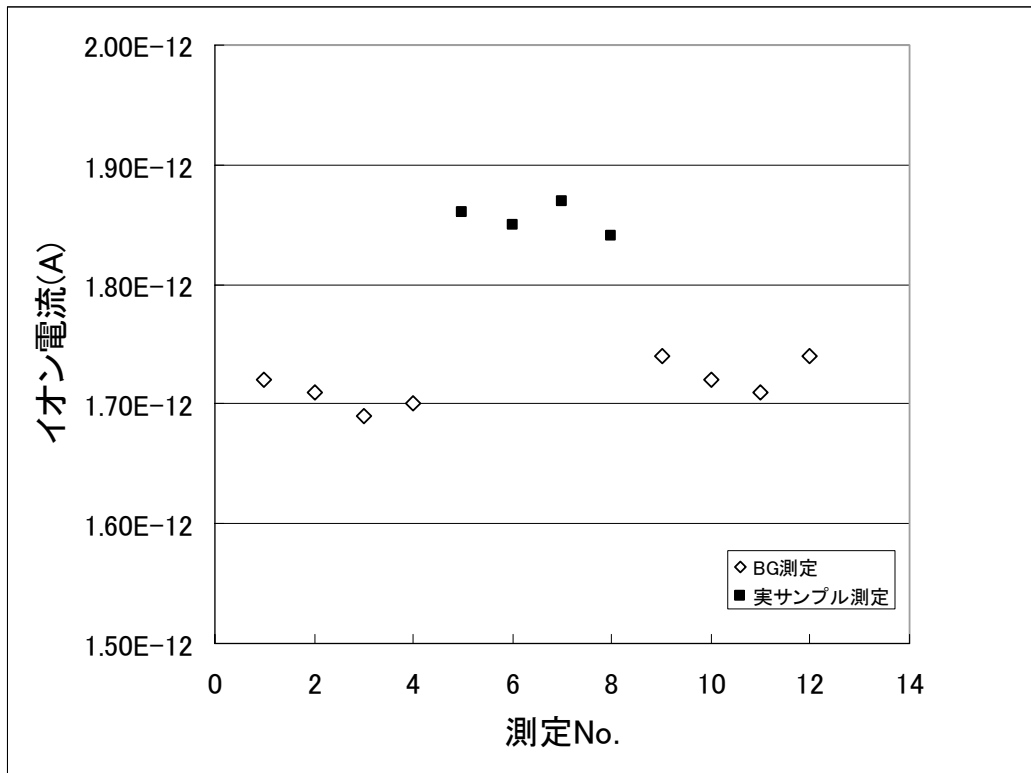


Figure13 Measurement data used for Ion current value formulate

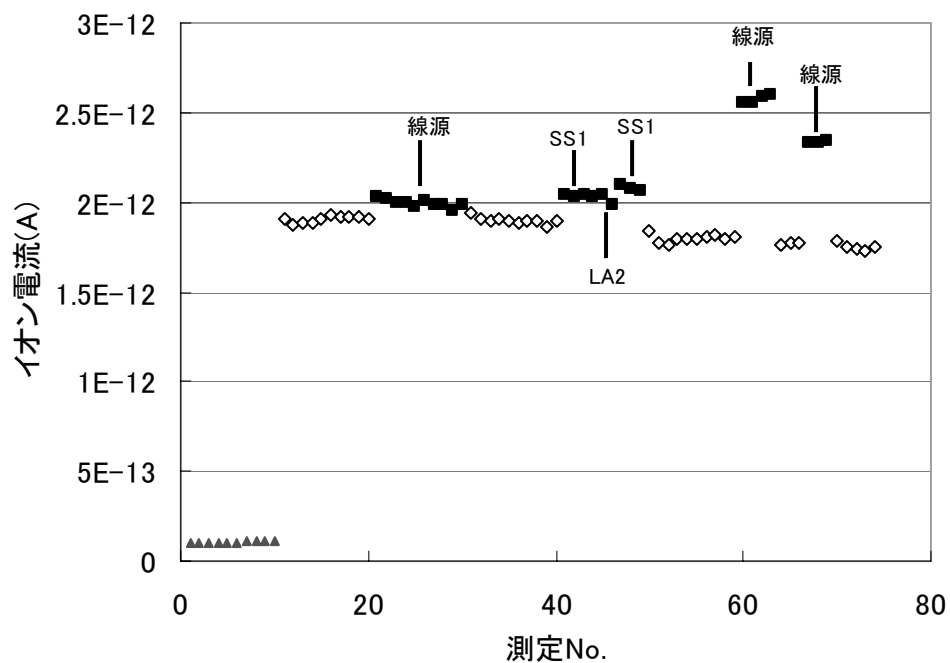


Figure14 Test data on the first

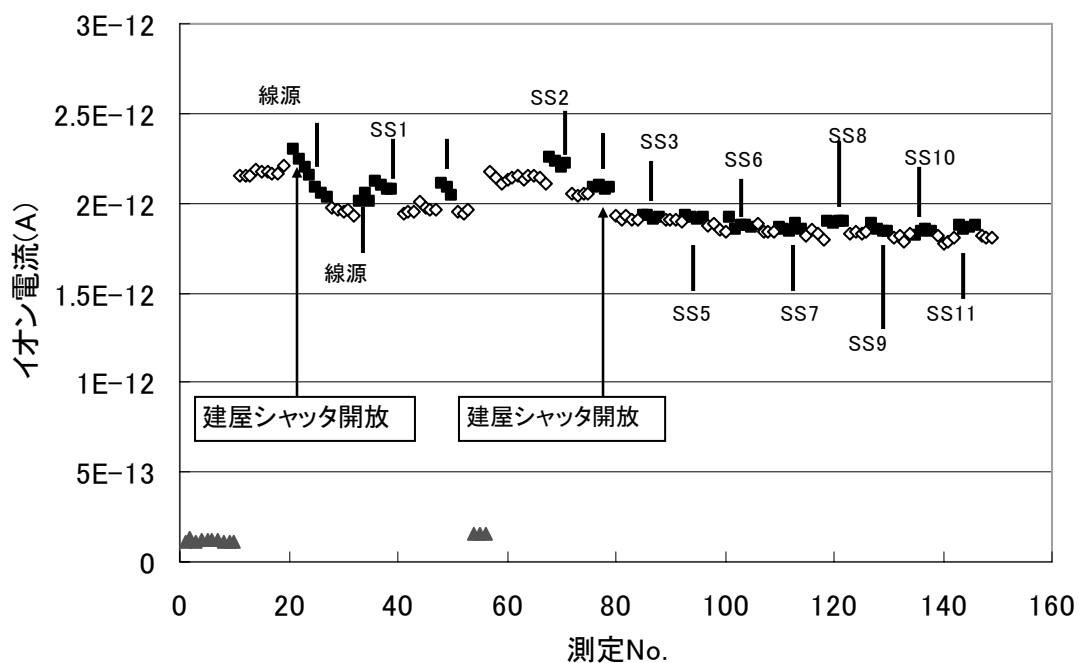


Figure15 Test data on the second

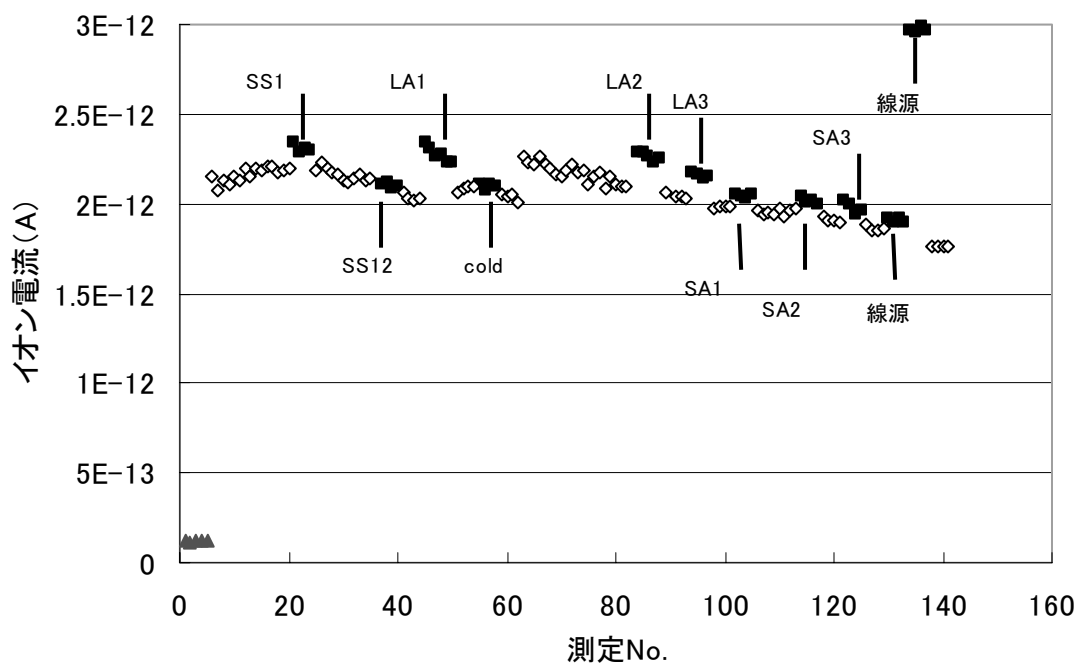


Figure16 Test data on the third

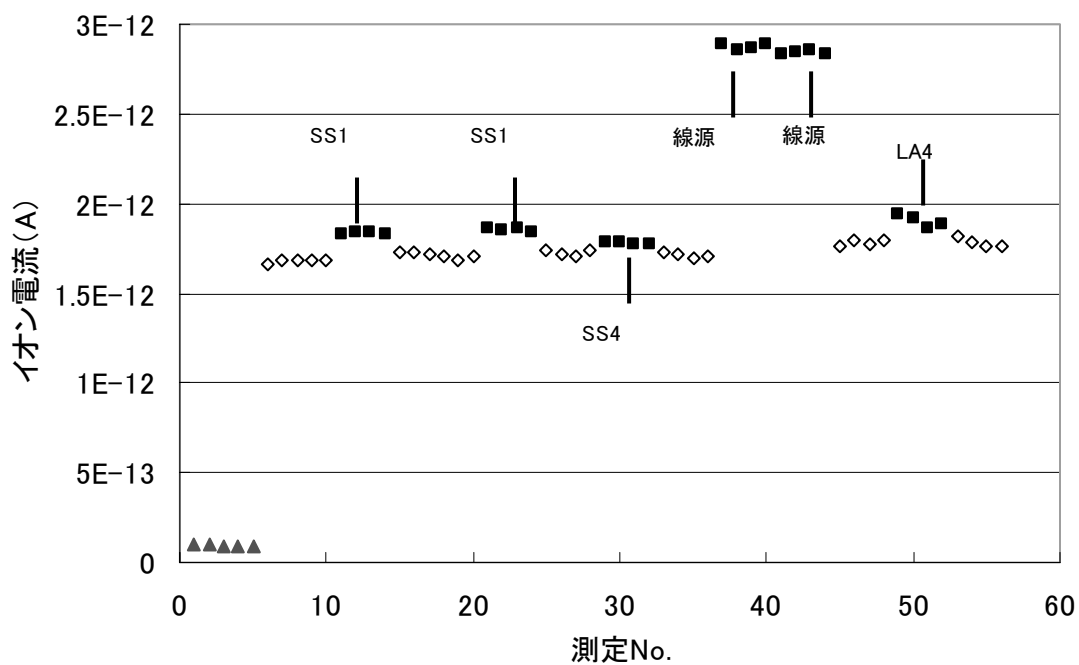


Figure17 Test data on the fourth

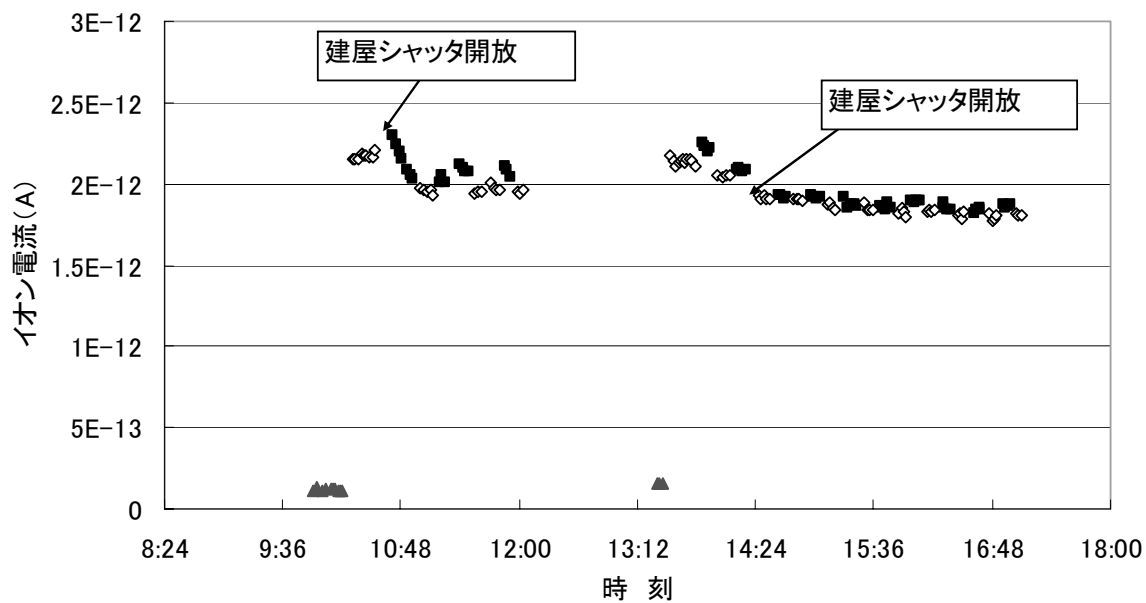


Figure18 The feature of BG change (1)

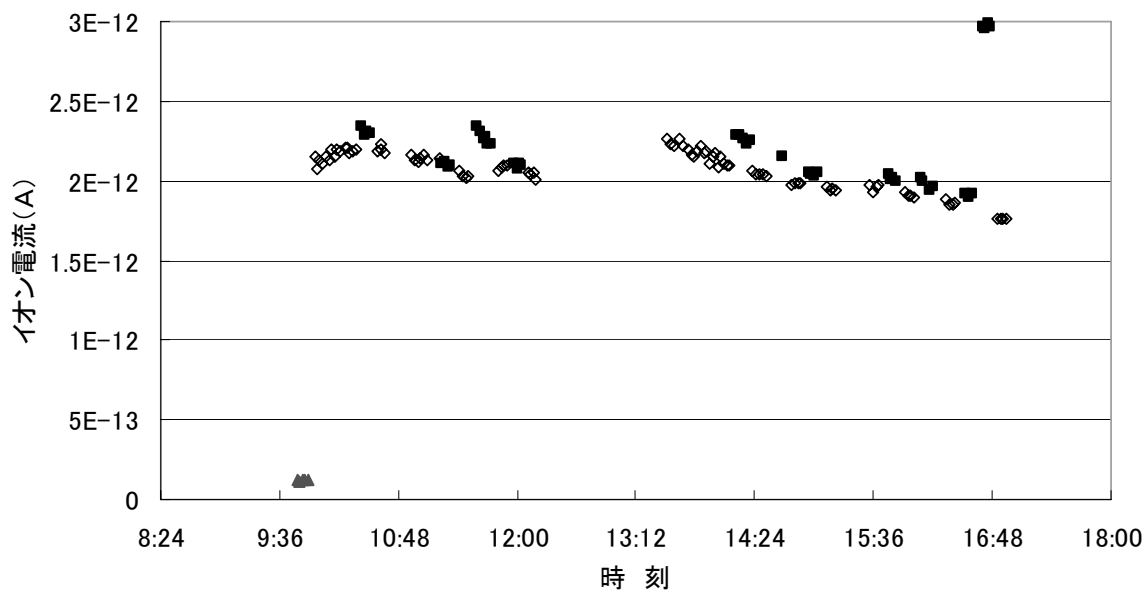


Figure19 The feature of BG change (2)

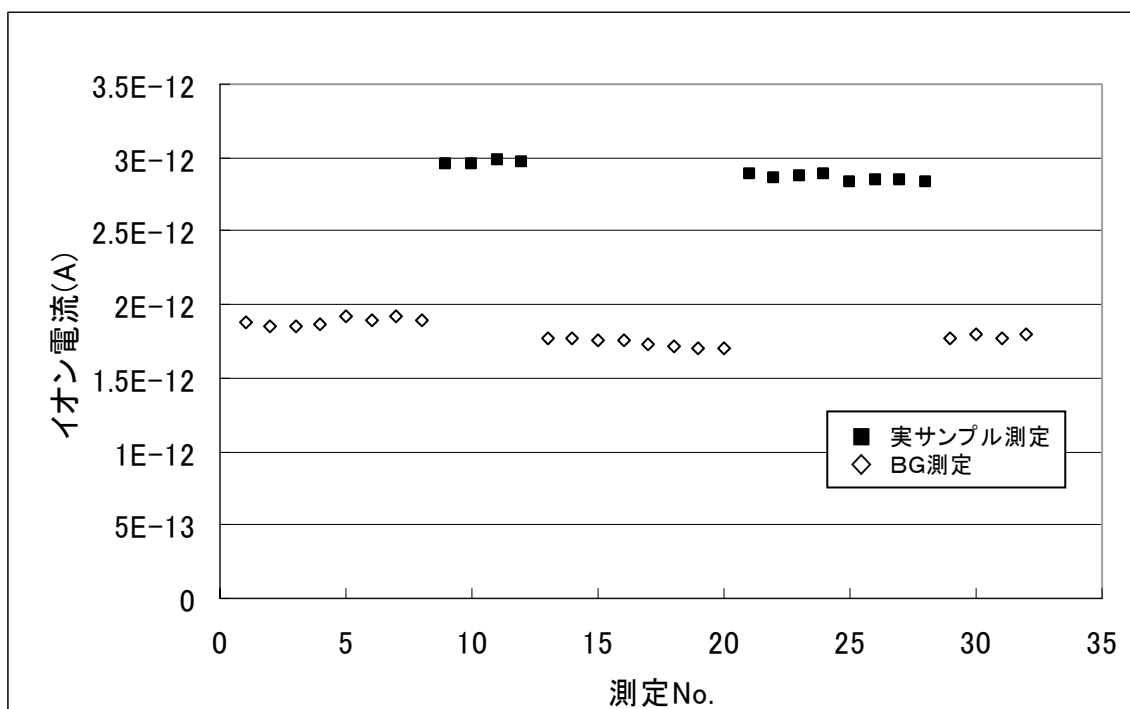


Figure20 Measurement data used for the sensitivity calibration

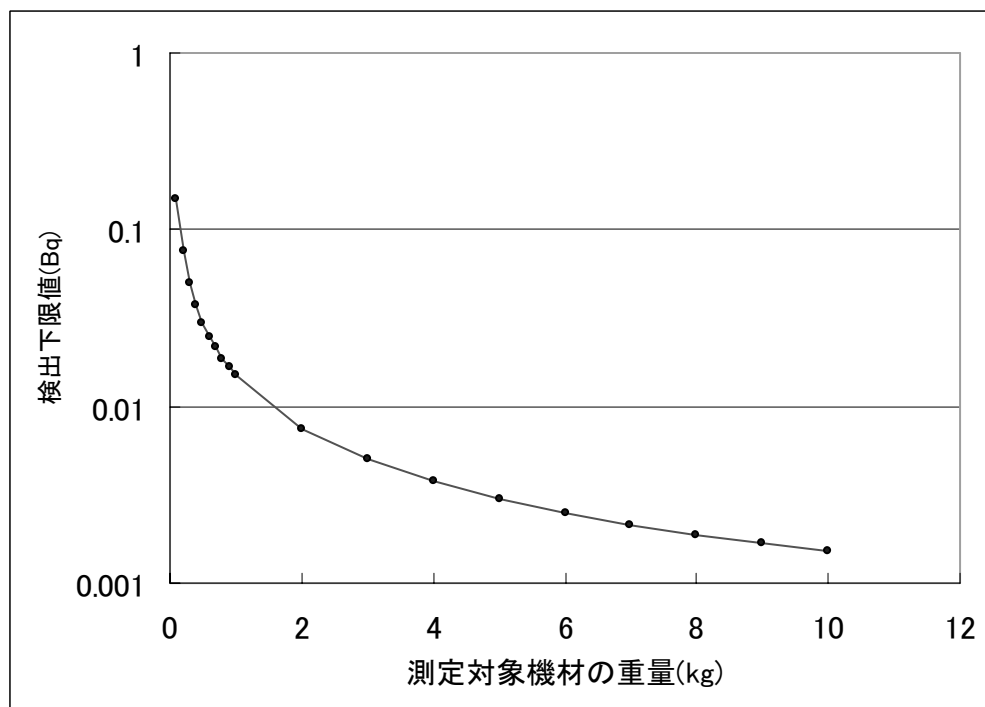


Figure21 The evaluation result of a detection limit

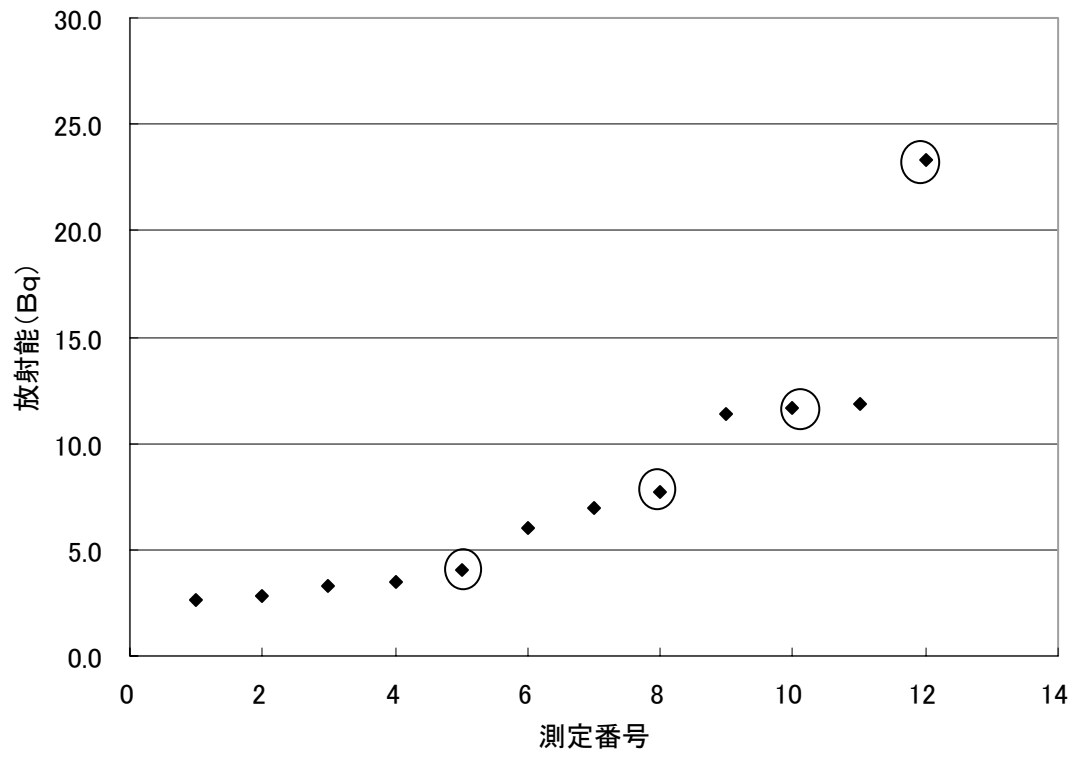


Figure22 Selection of linearity evaluation data

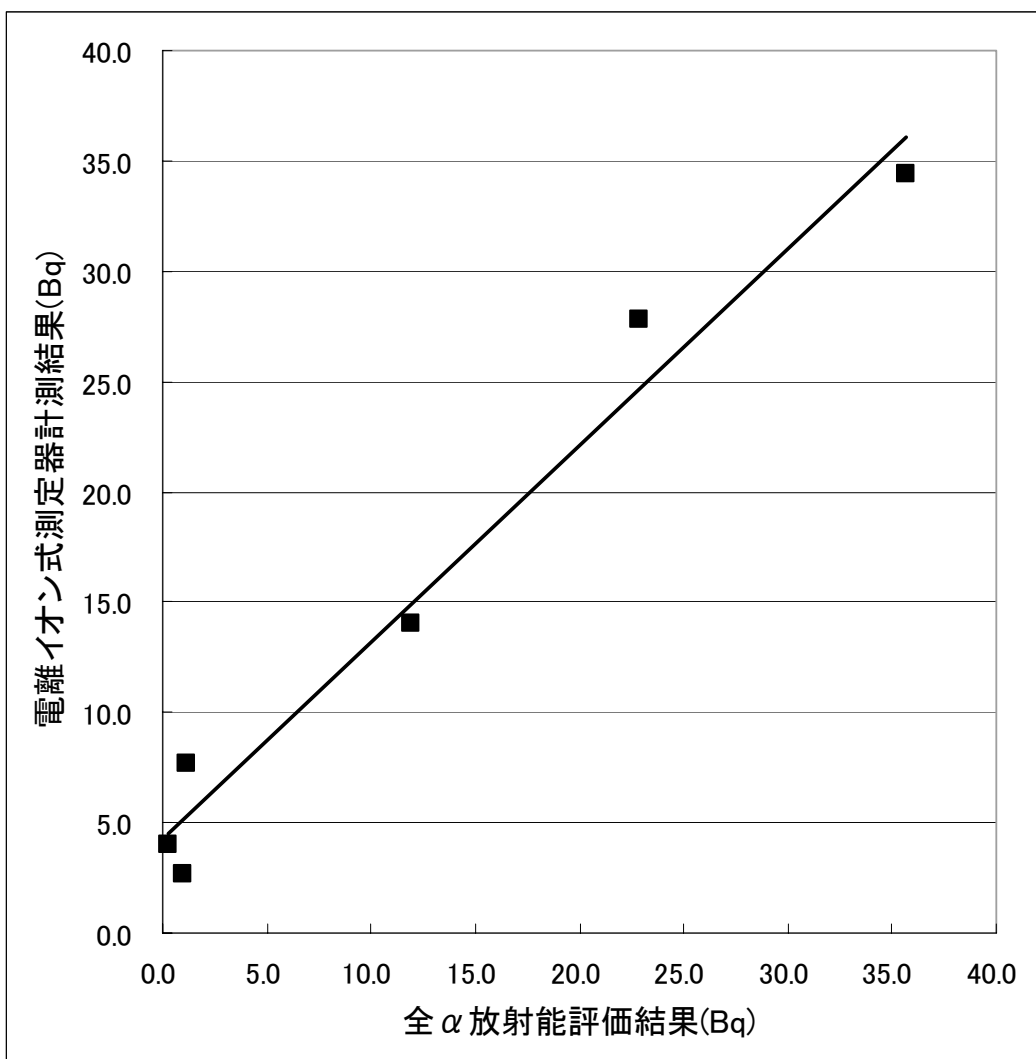


Figure23 Quality assessment result of Ionized Air Type Measurement

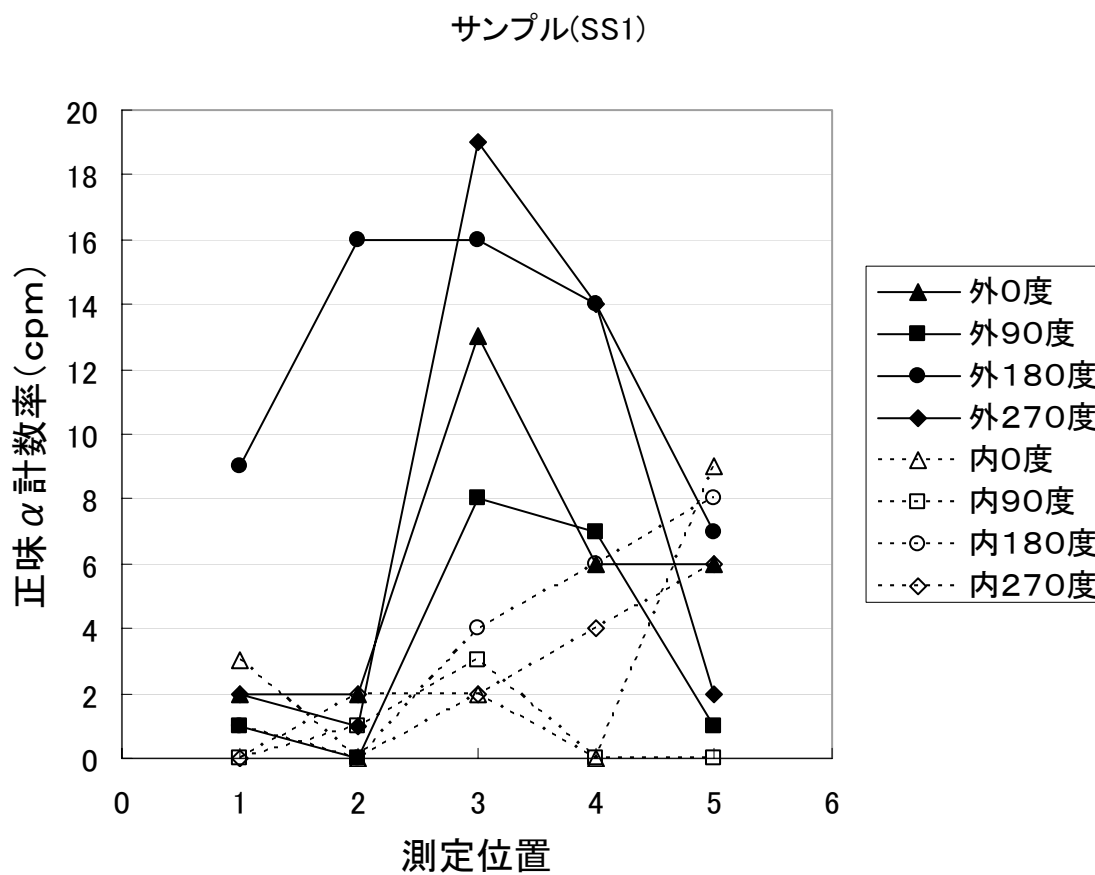


Figure24 The radioactivity measurement result by a direct survey (SS1)

サンプル(LA1)

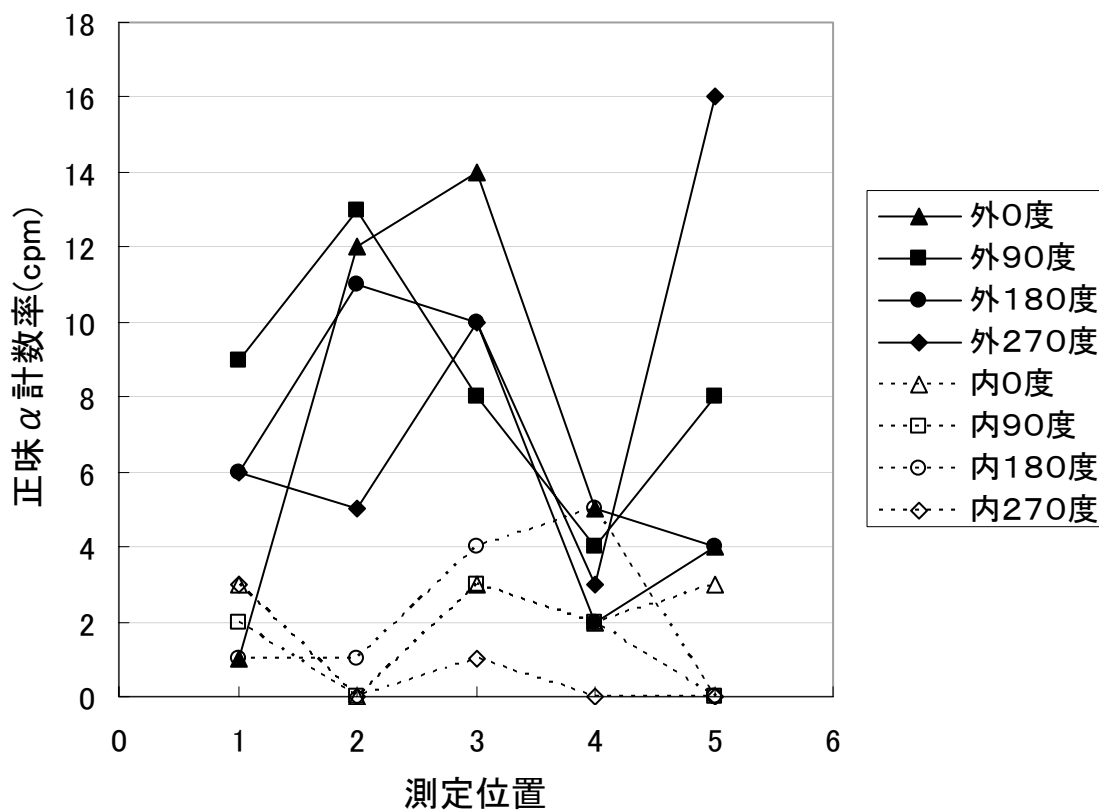


Figure25 The radioactivity measurement result by a direct survey (LA1)

サンプル(SA1)

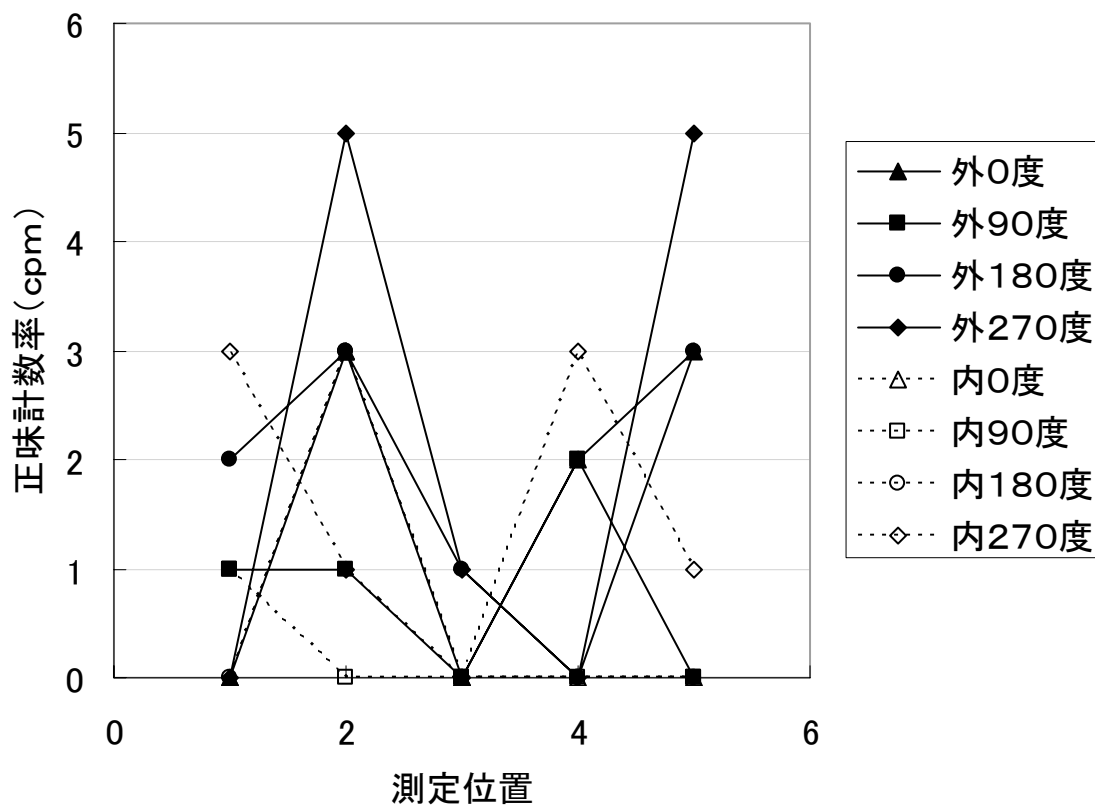


Figure26 The radioactivity measurement result by a direct survey (SA1)

Table1 The list of the samples used for the test

部品名	サンプルNo.	ウラン密度 (gU/cm ²)
厚肉アルミニウム材	LA1	8.60E-08
	LA2	6.10E-08
	LA3	2.00E-08
	LA4	1.90E-08
薄肉鋼材	SS1	3.80E-08
	SS2	2.70E-08
	SS3	2.40E-08
	SS4	2.00E-08
	SS5	2.00E-08
	SS6	1.80E-08
	SS7	1.10E-08
	SS8	1.10E-08
	SS9	1.10E-08
	SS10	1.00E-08
	SS11	9.40E-08
	SS12	9.30E-08
薄肉ステンレス材	SA1	2.00E-08
	SA2	1.20E-08
	SA3	6.00E-09

Table2 Measurement data used for Ion current value formulate

測定No.	BG測定	実サンプル測定
	(A)	(A)
1	1.72E-12	
2	1.71E-12	
3	1.69E-12	
4	1.70E-12	
5		1.86E-12
6		1.85E-12
7		1.87E-12
8		1.84E-12
9	1.74E-12	
10	1.72E-12	
11	1.71E-12	
12	1.74E-12	

Table3 The radioactivity(Bq) evaluation result by Ionized Air Type Measurement

部品名	サンプルNo.	測定結果 (Bq)
厚肉アルミニウム材	LA1	34.4
	LA2	33.6
	LA3	26.7
	LA4	21.2
薄肉鋼材	SS1	23.3
	SS2	7.0
	SS3	11.7
	SS4	11.4
	SS5	6.1
	SS6	3.5
	SS7	3.3
	SS8	2.7
	SS9	4.0
	SS10	7.7
	SS11	11.8
	SS12	2.8
薄肉アルミニウム材	SA1	14.0
	SA2	14.1
	SA3	16.3

Table4 The radioactivity(Bq/g) evaluation result by Ionized Air Type Measurement

部品名	サンプルNo.	重量濃度 (Bq/g)
厚肉アルミニウム材	LA1	0.00170
	LA2	0.00166
	LA3	0.00132
	LA4	0.01179
薄肉鋼材	SS1	0.01944
	SS2	0.00583
	SS3	0.00975
	SS4	0.00947
	SS5	0.00505
	SS6	0.00293
	SS7	0.00277
	SS8	0.00221
	SS9	0.00337
	SS10	0.00645
	SS11	0.00986
	SS12	0.00234
薄肉ステンレス材	SA1	0.00779
	SA2	0.00783
	SA3	0.00908

Table5 Linearity evaluation data(Ionized Air Type Measurement)

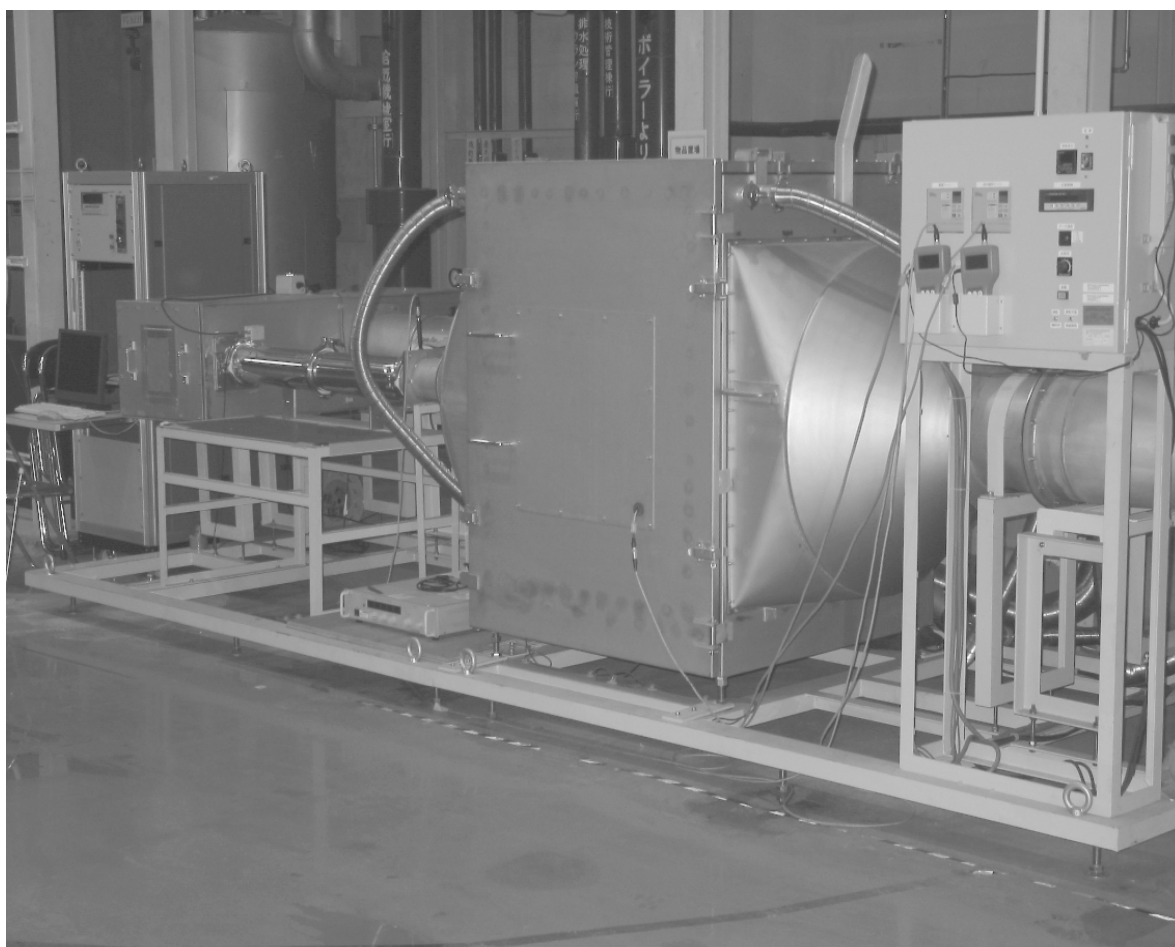
部品名	サンプルNo.	測定結果 (Bq)
厚肉アルミニウム材	LA1	34.4
薄肉鋼材	SS1	23.3
	SS8	2.7
	SS9	4.0
	SS10	7.7
薄肉ステンレス材	SA1	14.0

Table6 Linearity evaluation data(ICP-MS)

供試体		ウラン濃度				$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ (%)
部品名	サンプルNo.	溶液量 (ml)	分析値 (gU/ml)	希釈倍率 (倍)	ウラン量 (gU)	
厚肉アルミニウム材	LA1	10,000	6.8E-10	100	1.45E-03	0.642
		10,000	7.7E-10	100		
薄肉鋼材	SS1	10,000	1.6E-09	10	6.81E-04	1.117
		10,000	5.2E-09	10		
	SS8	10,000	1.4E-09	1	1.35E-05	2.960
	SS9	10,000	7.9E-10	1	7.88E-06	0.981
	SS10	20,000	1.5E-09	1	2.92E-05	1.413
薄肉ステンレス材	SA1	10,000	1.0E-08	1	1.05E-04	2.453
		10,000	9.7E-10	10	9.69E-05	

Table7 Quality assessment data

部品名	サンプルNo.	全 α 放射能評価結果 (Bq)
厚肉アルミニウム材	LA1	35.7
薄肉鋼材	SS1	22.9
	SS8	0.9
	SS9	0.2
	SS10	1.1
薄肉アルミニウム材	SA1	11.9



Ionized Air Type Measurement



detector



measurement box

Photo1 Ionized Air Type Measurement

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
質量体積 (比体積)	立法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
(物質質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

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3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射 (放射核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する際には記号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“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m 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 ² ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
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 ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・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 ² ・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 ・s ² ・A
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 ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポインズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≐ 10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≐ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≐ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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
X線単位	1X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	1 fermi	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

