

遠隔操作型イオンミリング装置の開発

Development of Remote Controlled Ion Milling Device

本田 順一 松井 寛樹 原田 晃男 小畑 裕希
富田 健

Junichi HONDA, Hiroki MATSUI, Akio HARADA, Hiroki OBATA
and Takeshi TOMITA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
ホット試験施設管理部

Department of Hot Laboratories and Facilities
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

July 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

遠隔操作型イオンミリング装置の開発

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
原子力科学研究所 ホット試験施設管理部

本田 順一・松井 寛樹・原田 晃男・小畑 裕希・富田 健

(2012年5月14日受理)

我が国において発電コスト及び放射性廃棄物の低減を目的とした軽水炉燃料の高度利用が進められている。電力事業者は、更なる高燃焼度化、高出力化に対応するための改良型燃料の開発を進めてきており、国は、これら改良型燃料の申請に係る安全規制を行う上で必要とされる安全基準、指針等を整備するために、常に最新の技術的知見を蓄積することが重要となる。日本原子力研究開発機構では、これらの燃料材料の結晶方位解析をするにあたり必要な試料調製をするためにイオンミリング装置を開発した。本装置は、高放射性物質を対象試料として使用するため、遠隔操作型とし、設置する施設の規制及び放射性物質取扱上の観点から耐震性を考慮した構造とした。本報告書は、照射後試験装置として開発した遠隔操作型イオンミリング装置の仕様、改造内容及び特性試験結果をまとめたものである。

Development of Remote Controlled Ion Milling Device

Junichi HONDA, Hiroki MATSUI, Akio HARADA,
Hiroki OBATA and Takeshi TOMITA

Department of Hot Laboratories and Facilities
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 14, 2012)

The advanced utilization of Light Water Reactor (LWR) fuel is progressed in Japan to save the power generating cost and the volume of nuclear wastes. The electric power companies have continued the approach to the burnup extension and to rise up the thermal power of the commercial fuel. The government should be accumulating the detailed information of the newest technologies to make the regulations and guidelines for the safety of the advanced nuclear fuels. The remote controlled ion milling device has been developed in Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to prepare the metallographic examination samples for the observation of crystal orientation of cladding tube. The commercial model of ion milling device has been modified to have the function of remote control and the performance of earthquake resistant in compliance with the safety regulation by the government for handling the high radioactive elements. This paper describes the specification of the device which were specialised for post irradiation examination and the test results of the cold mock-up to confirm their performances and reliabilities.

Keywords: Remote Control, Ion milling, Post Irradiation Examination, High Burn-up Fuel

目次

1. はじめに.....	1
2. 装置設計概念.....	1
3. 装置仕様・改造部.....	2
3.1 装置本体.....	2
3.1.1 イオンミリング機能部.....	2
3.1.2 カーボンコータ機能部.....	3
3.2 操作盤.....	3
3.3 耐震評価.....	4
3.4 放射性気体廃棄物評価.....	4
4. 特性試験.....	4
4.1 試料.....	4
4.2 試料装着.....	4
4.3 試験条件.....	4
4.4 試験結果.....	5
5. まとめ.....	5
謝辞.....	5
参考文献.....	5
付録1 耐震評価.....	15
付録2 放射性気体廃棄物評価.....	17

Contents

1. Introduction.....	1
2. Design Concepts.....	1
3. Specifications • Alteration	2
3.1 Main unit of Apparatus	2
3.1.1 Ion Milling Function Part.....	2
3.1.2 Carbon Coater Function Part.....	3
3.2 Control Panel.....	3
3.3 Seismic Evaluation.....	4
3.4 Radioactive Gaseous Waste Assessment	4
4. Characterization Examination.....	4
4.1 Specimens	4
4.2 Installation of Specimens.....	4
4.3 Tests Condition	4
4.4 Test Result	5
5. Summary	5
Acknowledgement.....	5
References	5
Appendix1 Seismic Evaluation.....	15
Appendix2 Radioactive Gaseous Waste Assessment	17

1. はじめに

我が国において、発電用軽水炉のさらなる安全性向上及び放射性廃棄物の低減等を目的とした燃料の利用及び開発が進められている。発電用軽水炉燃料に係る安全規制を行うために、国として常に最新のデータ及び技術的知見を取得、蓄積していくことが重要である。

(独)日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、発電用軽水炉で照射された燃料を対象にした反応度事故模擬実験(RIA試験)を原子炉安全性研究炉(NSRR)において、RIA試験前後の燃料に関する照射後試験及び冷却材喪失事故模擬試験(LOCA試験)を燃料試験施設においてそれぞれ実施し、発電用軽水炉燃料の事故時挙動に関するデータ及び知見を取得してきている。炉内長期使用に伴う燃料材料の微細組織変化及び近年開発が進められている燃料材料における微細組織変更が燃料の事故時挙動に及ぼす影響についてさらに評価を進めるにあたり、後方散乱電子回折法(EBSD)による燃料材料の結晶方位解析が有益な情報を与えると考えられることから、原子力機構では照射済燃料の分析が可能なEBSD付遠隔操作型EPMAを開発した⁽¹⁾。EBSDによる分析では、試料観察面の研磨状態や平滑度が結果に大きな影響を及ぼすため、試料の調製には注意が必要である。そこで、照射済燃料から採取した試料についても平滑な試料表面を得られるよう、イオンミリングを原理とし、遠隔操作が可能な研磨装置(遠隔操作型イオンミリング装置)を開発、整備した。本報告書は、遠隔操作型イオンミリング装置の設計、仕様及び特性試験結果をまとめたものである。

2. 装置設計概念

イオンミリング装置では、運動エネルギーを有する不活性ガスイオン(Ar⁺イオン等)を試料表面に照射した際に試料表面の原子がはじき飛ばされる「スパッタリング現象」を利用する。スパッタリング現象は試料の硬さの影響を受けにくいことから、硬さの違う材料が混在した試料でも凹凸の少ない研磨を行えることがイオンミリング装置の特長の一つである。また、研磨面に与える負荷が機械研磨に比べ小さく、機械研磨では困難な研磨面近傍のひずみの除去が可能であることから、EBSD分析用試料の作製に向けた研磨方法でもある⁽²⁾。

今回開発する遠隔操作型イオンミリング装置の研磨対象は、原子炉で照射された燃料ペレット、燃料被覆管及び燃料被覆管の表面酸化膜が同一面上に分布した試料である。燃料被覆管は金属、燃料ペレット及び被覆管表面酸化膜は酸化物であり、導電性が互いに大きく異なることから、場所によって不活性ガスイオンの照射量に差が生じ平滑な研磨面が得られない可能性がある。このような導電性の差が表面研磨状態に及ぼす影響を低減させるには、試料表面全体にわたって導電物質を蒸着させる等の前処理が有効と考えられるため、装置本体内にアーク放電原理のカーボンコータ機能を組み込んだ⁽³⁾。また、本装置の研磨対象物が放射性物質であることから、作業員に対する放射線被ばく防護及び放射性物質の外部への漏洩を考慮しなければならない。そこで放射線に対し十分

なしゃへい能力を有し、かつ、負圧管理された環境が整備され、高放射性物質を安全に取り扱うことのできるホットセルを本装置の設置場所に選定した。

燃料試験施設内には、コンクリートしゃへい体で構成された大型のセル（コンクリートセル）8基及び鉛しゃへい体で構成された小型のセル（鉛セル）5基がある。コンクリートセルのうち2基並びに鉛セルのうち2基は、 α 核種を安全に取り扱うことのできる閉じ込め機能を有している。将来 Pu 系燃料の分析試験前処理にも対応できるよう、今回開発する遠隔操作型イオンミリング装置は α 核種対応の気密型コンクリートセル（ α γ コンクリート No.1セル。内寸法 4m×3m×4.5m）に設置することとした。

装置を設置する施設の規制及び放射性物質取扱い上の対応を考慮し、以下を装置設計の基本概念とした。

- ・本装置は、 α γ コンクリート No.1セル内に取り付けられた架台上に設置することとする。本装置は核燃料物質取り扱い時のしゃへい及び閉じ込め機能はセルで担保できること及び核燃料取り扱い時の危険性が低いいため、装置本体をセル内架台にボルトで取り付け際には、耐震 C クラスの安全を確保すること。
- ・放射性物質を微量ながら切削することから、放射性気体廃棄物の放出に対する評価を行うこと。
- ・セル内に設置することから、試料の着脱等、装置の取扱いはマニプレータを用いた遠隔操作で容易に行えること、またセル内の限られたスペースに、コンパクトに設置できること。
- ・放射線によるダメージを受けるような電子部品はセル外へ移設するなどして装置に対する故障リスクを低減させ、長期的に安定した装置性能が確保できるようにすること。

3. 装置仕様・改造部

本装置の外観を Photo.1-1 に、基本仕様を Table.1 に示す。本装置は、大きく分けてセル内へ設置する装置本体とセル外へ設置する操作盤から構成される。以下にそれぞれの仕様・改造部について記述する。

3.1 装置本体

本装置は、市販のイオンミリング装置及びカーボンコータ装置の機能を1台の装置に集約するとともに、当該施設で通常実施している試験前処理に必要な事項を満足するものとした。装置集約の概念を Photo.1-2 に示す。また、そのための改造部及び主な仕様を下記に記す。

3.1.1 イオンミリング機能部

- 1) イオンガンを Photo.2-1 に示す。方式は、直流マグネトロン放電型で、加速電圧は最大 8kV、照射電流は最大 400 μ A、ビーム径は ϕ 4mm である。市販品では、イオンミリングの際に試料を傾けることで最大 ϕ 8mm であったが、イオンガンと試料研磨面との距離を変更することにより、照射範囲を最大 ϕ 12mm とした。
- 2) 試料ステージを Photo.2-2 に示す。試料ステージの形状については、当該施設で

一般的に使用される試料埋込管（ $\phi 32\text{mm} \times \text{H}25\text{mm}$ ）を、セル付属のマニプレータによる遠隔操作で容易に着脱できるよう改造した。具体的には、マニプレータで試料を試料ステージに着脱できるよう、試料ステージの開口部を大きくした。また、試料ステージの外周 4 箇所にリーフスプリングを取り付けることにより、マニプレータでの試料の着脱を容易にするとともに、試料ステージを傾け回転させながらイオンミリング処理を行う場合に試料が容易に外れないようにした。

イオンミリングを実施する際には、イオンガンと試料研磨面とを一番効率の良い距離に保つことが重要である。しかしながら、試料が固定された試料埋込管の高さは、前処理である機械研磨をどの程度行うかによって変わるため、常に一定とは限らない。そこで、試料ステージの位置を電動で調整できる構造とし、試料埋込管の高さが 25mm（未研磨状態の高さ）から 20mm（5mm 研磨した場合の高さ）の範囲で試料研磨面とイオンガンとの距離が最適値に保持できるようにした。

- 3) 試料の傾き角度は最大 85° 、試料回転速度は 15rpm とした。
- 4) チャンバーの内寸法は $\phi 160\text{mm} \times \text{H}140\text{mm}$ 、チャンバーに接続されたロータリーポンプ（RP）及びターボ分子ポンプ（TMP）の排気能力はそれぞれ 100 L/min 及び 50 L/sec、到達真空度は $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 台とした。RP 及び TMP の外観を Photo.2-3 に示す。
- 5) Ar ガスの流量調整については、真空度からフィードバックする自動モードと任意の流量が設定できる手動モードを設け、必要に応じ選択できるようにした。

3.1.2 カーボンコータ機能部

- 1) コーティングは、カーボン棒を用いたアーク放電によるものとした。使用するカーボン棒は脆弱なためマニプレータでの取扱いが困難なことから、カーボン棒をホルダに取り付けそれを装置に着脱する構造とした。カーボンコータの操作系外観を Photo.2-4 に、カーボン棒を取り付けるホルダ（カーボンホルダ）を Photo.2-5 に示す。

なお、操作の容易さを考え、当初はカーボンコータの操作系をセル外の操作盤に組み込むことを計画したが、既存のセル内の配線がコーティング時の電流に対し容量不足であったため、装置本体内に組み込むこととした。

- 2) カーボンコーティングの厚さは可変とした。また、1 回あたりのカーボンコーティング厚さは、イオンミリング時の導通確保を目的としたため、最小厚さを市販品の約 2 倍の 6nm、最大厚さを 114nm とした。

3.2 操作盤

操作盤には、電源ボタン、EVAC（真空開始）ボタン、Ar ガス流入ボタン、加速電圧制御、照射電流制御、イオンミリング時間制御、試料高さ調整、Ar ガス流量制御等の機器が組み込まれている。電子部品等をセル内の本体から極力セル外の操作盤へ組み込むことにより、放射線による装置故障のリスクを低減させるとともに、手元での操作性の向上を図った。操作盤内の主な名称を記載した外観写真を Photo.2-6 に示す。

3.3 耐震評価

セル内に設置する装置本体は、セル内架台とボルト及びナットにて固定される。核燃料物質取り扱い時のしゃへい及び閉じ込め機能はセルで担保できること及び核燃料取扱時の危険性が低いことから水平震度 0.24 で計算した結果、地震によりイオンミリング装置が移動・転倒することはない。これらに関する参考資料を付録 1 に示す。

3.4 放射性気体廃棄物評価

本装置を設置するにあたり、MOX 燃料の現行評価（プルトニウム富化度 5W/o (^{239}Pu , ^{241}Pu) 燃焼度 56GWd/t) で、イオンミリング 1 回による研磨 10 μm 、年間実施回数を 5 回で評価したところ、排気口における気体廃棄物の濃度と濃度限度との比の総和は、 3.4×10^{-6} であり、試験に伴い発生する気体廃棄物は現行の障害対策書の評価値 (2.9×10^{-1}) に比べ十分に低い値であり、現行評価に包括される。これらに関する参考資料を付録 2 に示す。

4. 特性試験

本装置は、メーカーでの製作後、性能を確認するための試験検査を経て α γ コンクリートセル内に設置したが、当施設での使用環境（振動、磁場等）において所定の性能が得られるかどうかを確認しておく必要がある。そこで、コールドの試料を用いて、本装置の性能及び操作性を確認するための特性試験を実施した。

4.1 試料

特性試験用試料として、SUS316 及びジルカロイ-2 を用いた。試料は真鍮製の試料埋込管にエレクトロンワックスを用いて固定し、通常のマクロ組織試験の試料前処理と同様に、SiC 研磨紙の #1200、#2400、#4000 で粗研磨を、3 μm 及び 1 μm のダイヤモンドペーストで精研磨を実施した。その後、試料と真鍮製埋込管の導通を得るため、エレクトロンワックスをアセトンにて洗浄し真鍮製埋込管にドータイトを塗布した後、試料を固定した。Photo.3-1 に機械研磨後の試料の外観を示す。

4.2 試料装着

装置本体の試料ホルダへの試料装着からチャンバー内への搬入、研磨角度設定、イオンミリング後の試料取り外しまでの一連動作をセル付属のマニプレータを用いて行い、セル外より遠隔で円滑に操作できることを確認した。

4.3 試験条件

加速電圧 6kV、照射電流 210 μA とした。

SUS316 試料について 7 時間、14 時間、21 時間、28 時間研磨し、EBSD により研磨経過を観察した。ジルカロイ-2 試料については、連続で 28 時間研磨した後、EBSD による分析を行った。

4.4 試験結果

Photo.3-2～Photo.3-5 に、SUS316 試料の菊池パターン及び結晶方位マップを、Photo.3-6 にジルカロイ-2 の菊池パターンを示す。

SUS316 試料では、21 時間研磨後に鮮明な菊池パターン及びサブミクロンサイズの結晶方位マップが得られた。ジルカロイ-2 試料においても 28 時間研磨後に菊池パターンが得られた。従って、これらの試料については、本装置により 20～30 時間研磨することにより、機械研磨に起因する試料表面のひずみを除去できると考えられる。

なお、前処理段階である機械研磨での研磨面状態によってイオンミリングによる最適の研磨時間は増減することに注意する必要がある。

5. まとめ

ホットセル環境に対応させた遠隔操作型イオンミリング装置を開発した。本装置はイオンミリング及びカーボンコータからなる装置本体と操作盤から構成されており、装置本体についてはホットセル内に設置された。設置にあたっては、装置に係る耐震計算や試料研磨時に放出される放射性気体廃棄物の評価を実施し、施設側の規制で要求される安全性を確保した。また、イオンミリングとカーボンコータの機能を 1 台に集約したことにより、省スペース化を実現した。

SUS316 試料及びジルカロイ-2 試料を用いた特性試験を実施し、ホットセル設置後も所定の装置性能が得られていることを確認した。

以上のことから、本装置は高い安全性及び遠隔操作性並びに優れた研磨性能を有していることが確認された。今後、照射された燃料を対象とした金相観察時の試料研磨、EBSD分析前の試料表面処理等に活用される。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有益な助言をホット試験施設管理部 金澤浩之技術副主幹から、また安全研究センター 燃料安全研究グループ 天谷政樹研究主幹には、本装置の開発・製作にご協力を頂きました。以上、記して謝意を示します。

参考文献

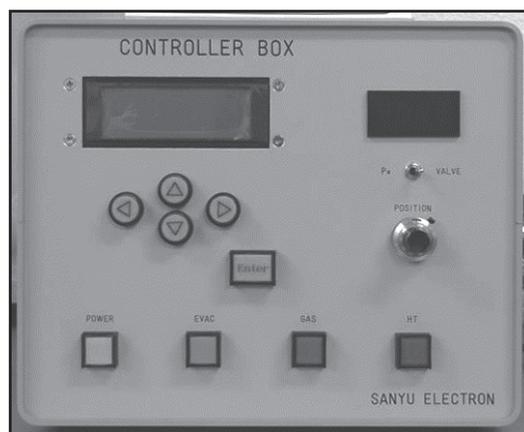
- 1) 本田順一、松井寛樹、原田晃男、他、「結晶方位解析装置付遠隔操作型電子プローブマイクロアナライザの開発」、JAEA-Technology、2012-022
- 2) 鈴木清一、EBSD 読本 OIM を使用するにあたって、2009
- 3) 福井宗利、実装プロセスの信頼度向上に貢献する荷電ビーム応用技術、2009

Table 1 遠隔走査型イオンミリング装置の性能及び仕様

◎イオンミリング機能部	
1.イオンガン部	
方式	: マグネトロン放電型
加速電圧	: 1~8kV
照射電流	: ~400 μ A
ビーム径	: ϕ 4mm
照射範囲	: ϕ 4~12mm
ビーム軸調整	: 手動式
2.試料ステージ、チャンバー部	
Z 軸可動範囲	: 5mm
チルト範囲	: 85°
回転角度	: 360°
回転速度	: 15rpm
チャンバーサイズ	: ϕ 160mm×H140mm
真空計	: ペニング真空計、ピラニー真空計
到達真空度	: 10 ⁻⁴ Pa 台
3.ガスコントロール部	
供給ガス	: Ar ガス (高純度推奨)
接続チューブ	: ナイロンチューブ (内径 ϕ 4mm)
コントロール	: 手動モード 自動モード (真空度フィードバック型コントロール)
4.排気系	
RP ポンプ	: 100L/min
TMP	: 50L/sec
◎カーボンコート機能部	
1.カーボンコート部	
カーボンホルダ	: カートリッジタイプ
コーティング回数	: ~19 回 (手動設定)
コーティング時間	: 0.3sec/回
コーティング方式	: アーク放電
コーティング操作	: 手動モード、自動モード
チャンバーサイズ	: イオンミリング機能部に準ずる
排気系	: 同上
◎装置本体寸法	: W741mm×H275mm×D360mm
◎操作盤寸法	: W260mm×H210mm×D280mm



装置本体



操作盤

Photo.1-1 遠隔操作型イオンミリング装置 外観

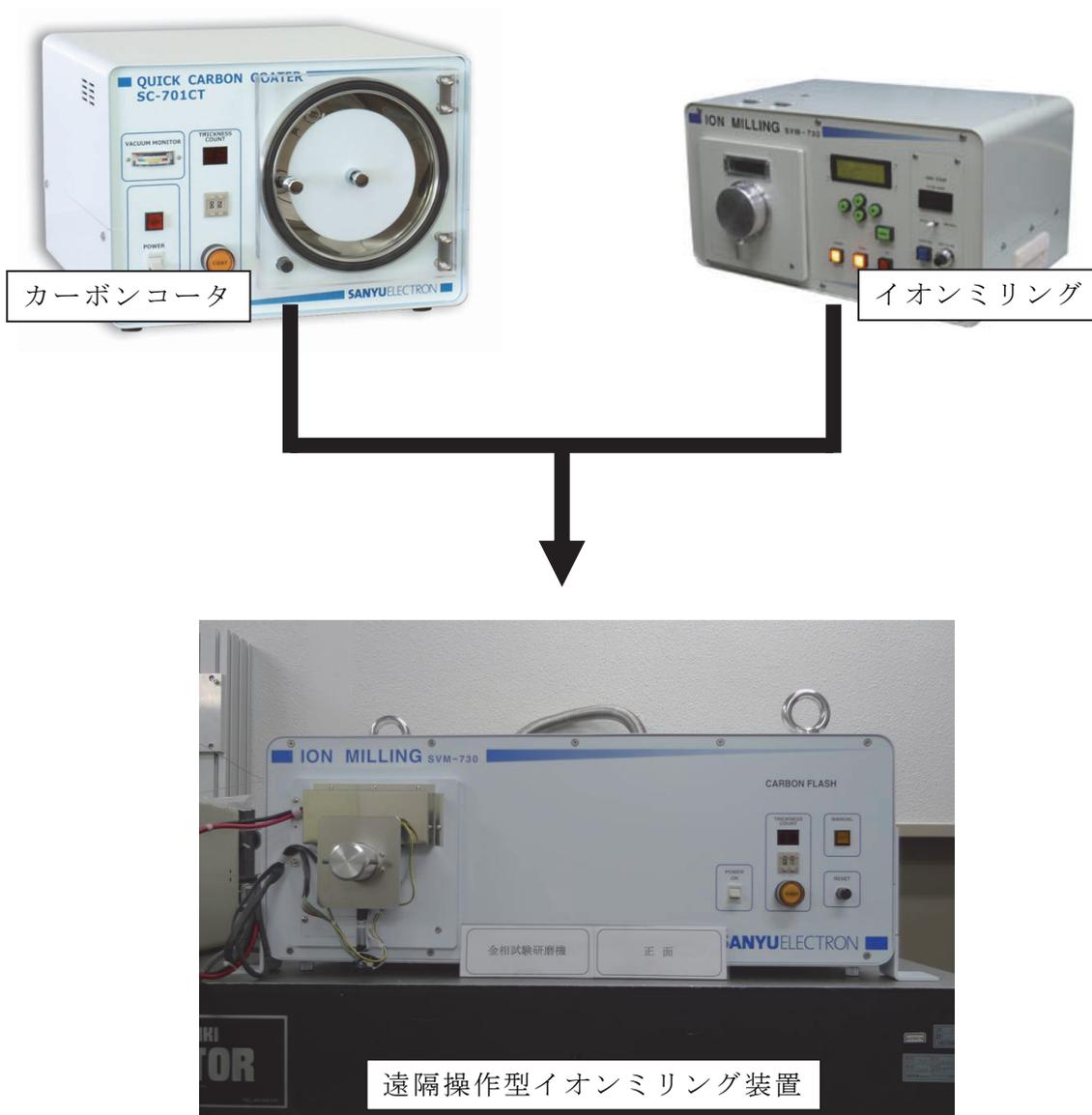


Photo.1-2 一体型装置



Photo.2-1 イオンガン



Photo.2-2 試料ステージ

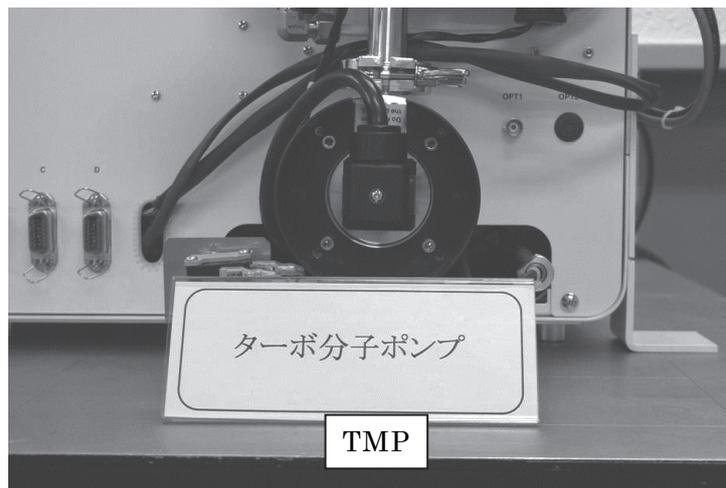
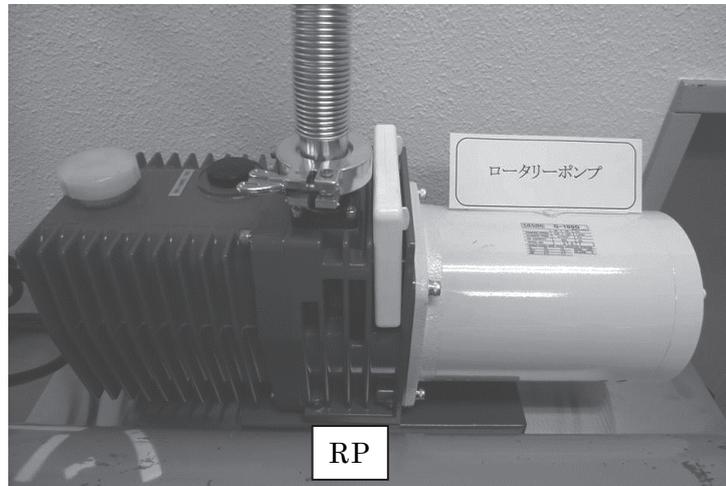


Photo.2-3 RP 及び TMP

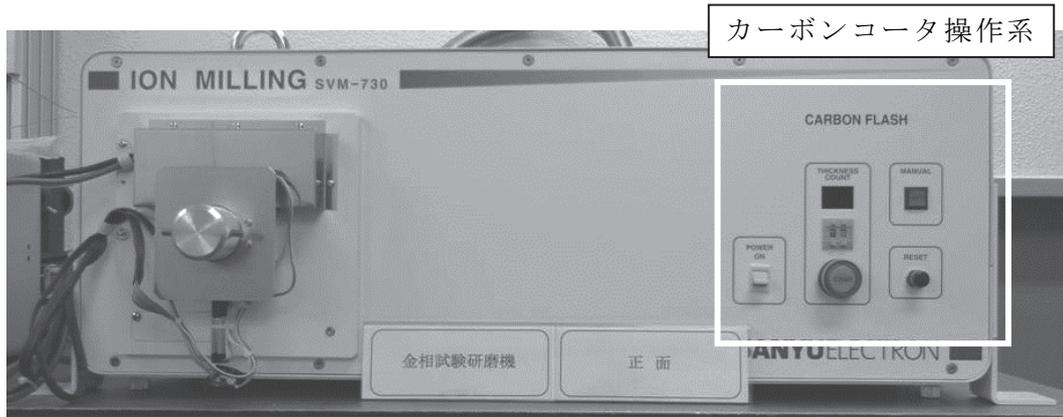


Photo.2-4 カーボンコータ操作系

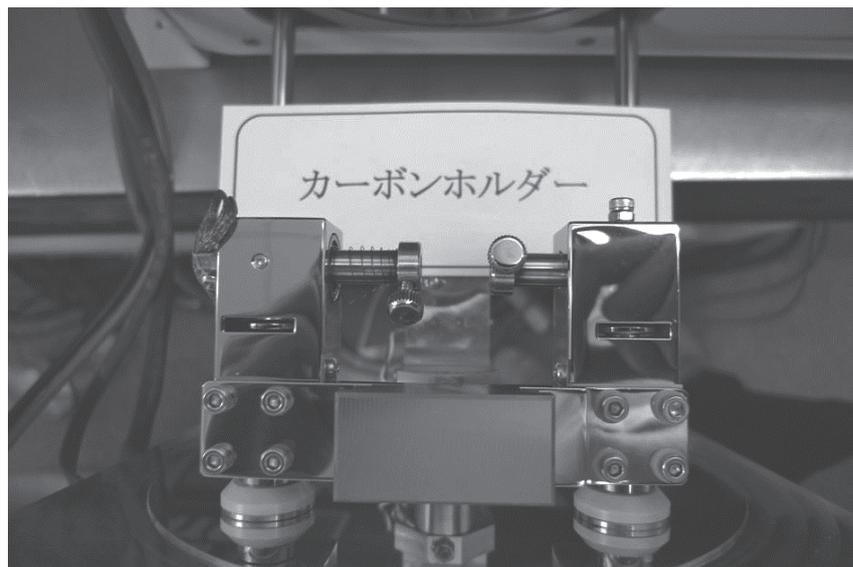


Photo.2-5 カーボンホルダ

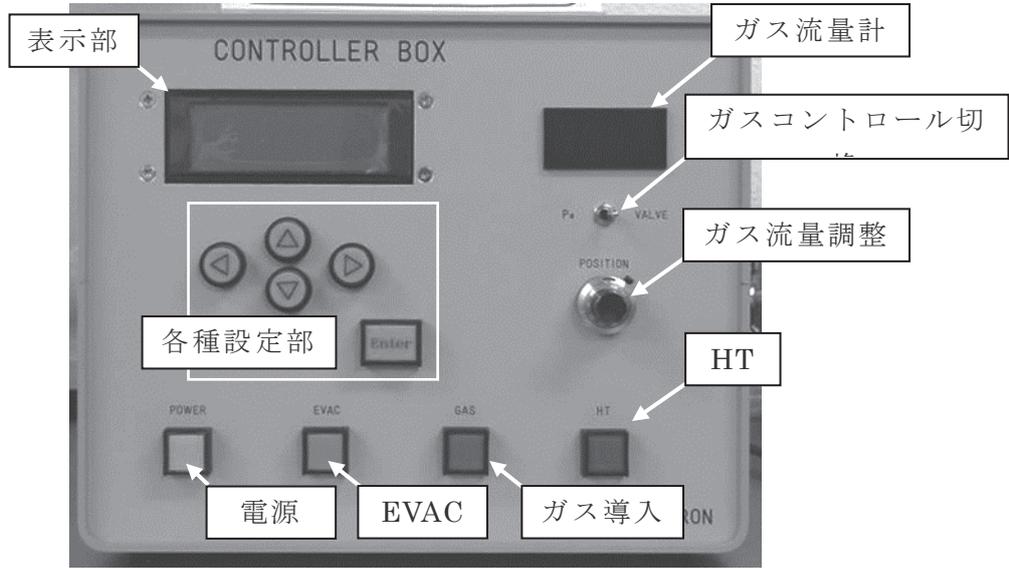


Photo.2-6 操作盤

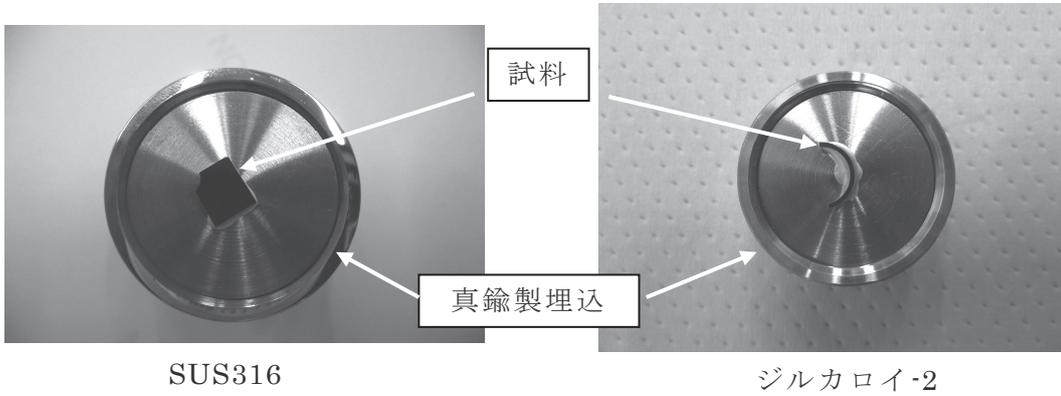


Photo.3-1 研磨後試料

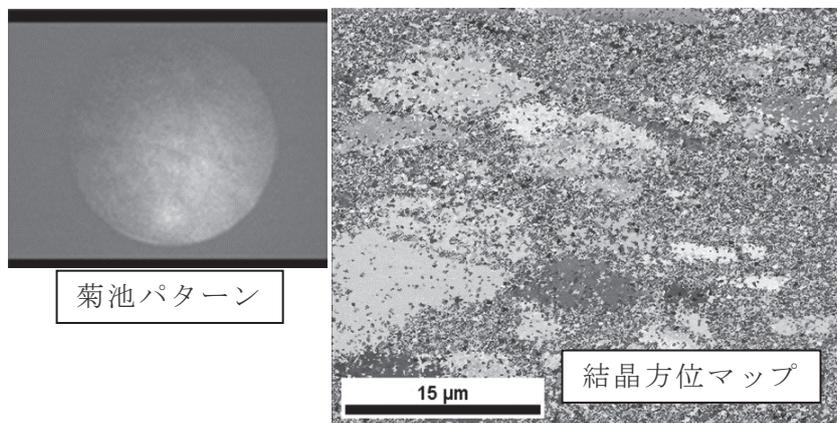


Photo.3-2 7時間研磨後(SUS316)

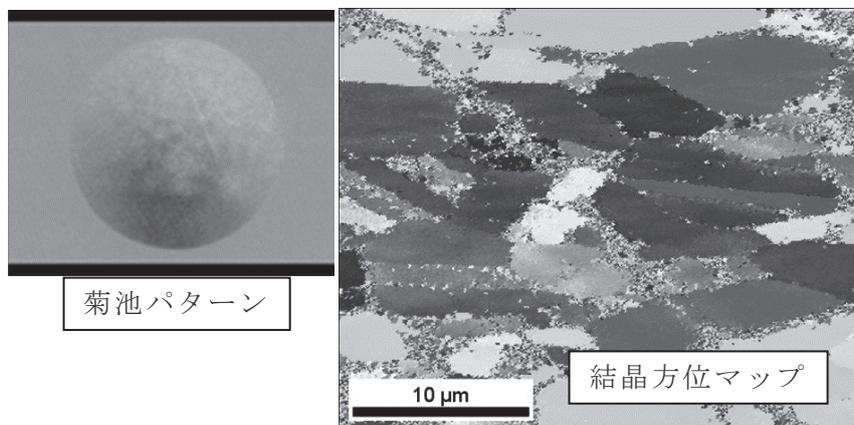


Photo.3-3 14時間研磨後(SUS316)

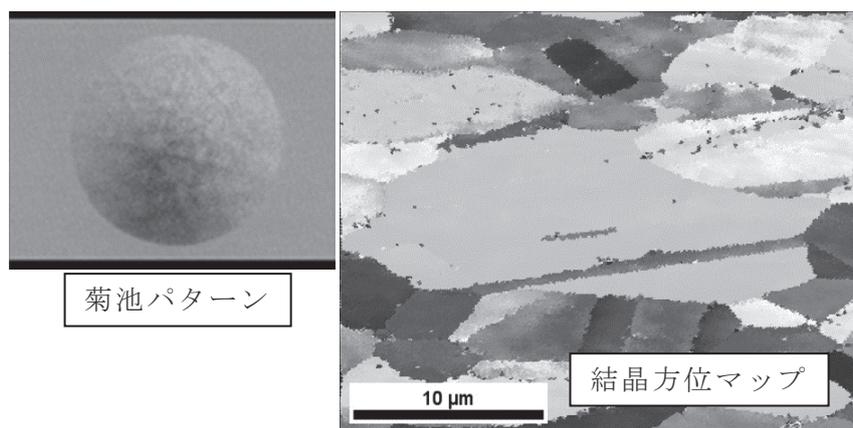


Photo.3-4 21 時間研磨後(SUS316)

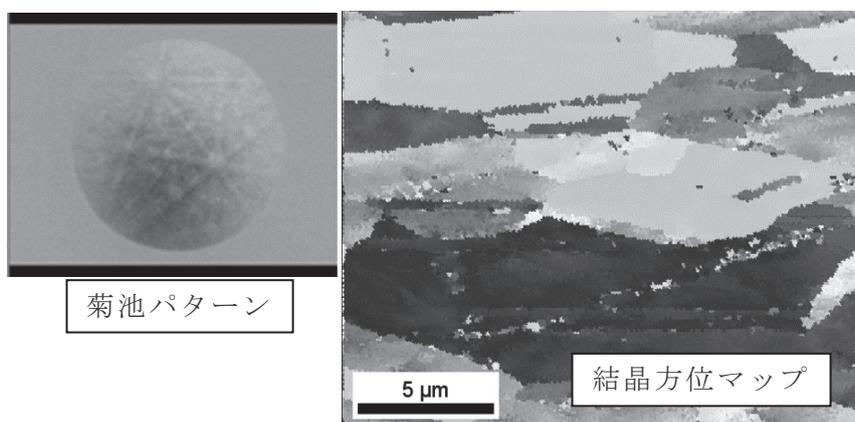


Photo.3-5 28 時間研磨後(SUS316)

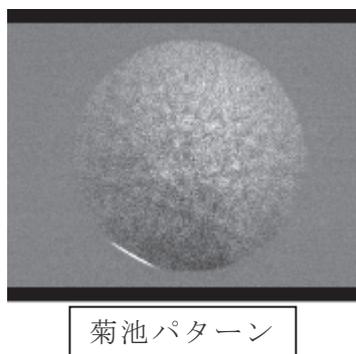


Photo.3-6 28 時間研磨後(ジルカロイ-2)

付録 1

耐震評価

1. 遠隔操作型イオンミリング装置に関する耐震評価

燃料試験施設 α γ コンクリート No.1セル内に設置する遠隔操作型イオンミリング装置に関する耐震強度計算及び評価を行った。

本装置は、 α γ コンクリート No.1 セル既設架台面に SUS304 固定ボルト(M4×4本)により固定される。耐震計算は、水平震度 0.24 で評価を行った結果、十分な耐震強度を有しており、地震により金相試験研磨機が移動・転倒することはない。

1.1 計算条件

- (1)計算は、耐震 C クラス機器として水平震度 0.24 で行う。
- (2)機器の重量は、重心に集中したものとする。
- (3)地震力は、水平方向から作用するものとする。
- (4)部材の材質及び許容応力値を Table A-1 に示す。
- (5)計算モデルを Fig. A-1 に示す。

Table A-1 部材の材質及び許容応力

部材	材質	許容せん断応力 f_s [MPa]
固定ボルト	SUS304	78

許容応力値は、社団法人日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」より下記の通り算出した。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = \frac{205}{1.5\sqrt{3}} = 78.9 \approx 78[\text{MPa}]$$

f_s : 許容せん断応力 [MPa]

F: 材料の設計降伏点または、材料の設計引張強さを 0.7 倍した小さい方の値 [MPa]

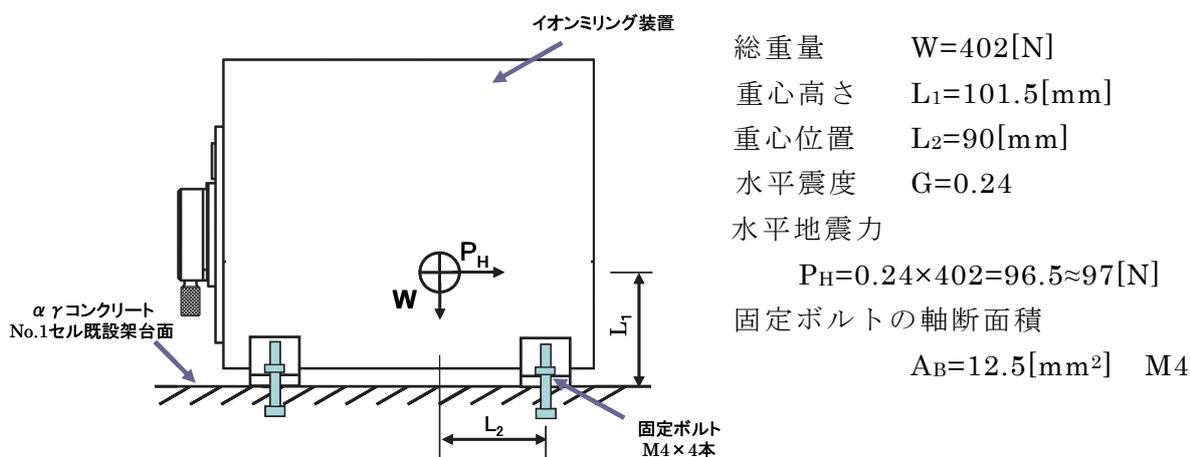


Fig. A-1 イオンミリング装置の計算モデル

1.2 固定ボルトに関する強度計算

金相試験研磨機の転倒モーメント Me 及び復元モーメント Re は

$$Me = P_H \times L_1 = 97 \times 101.5 = 9845.5 \approx 9.9[\text{kN} \cdot \text{mm}]$$

$$Re = W \times L_2 = 402 \times 90 = 36180 \approx 36.1[\text{kN} \cdot \text{mm}]$$

となり、 $Re > Me$ であるため転倒しない。したがって、固定ボルトには、せん断応力が作用するため、せん断応力に関して評価する。

固定ボルトに作用するせん断応力 τ は

$$F_s = \frac{P_H}{n_B} = \frac{97}{4} = 24.3 \approx 25[\text{N}]$$

F_s : せん断力[N]

P_H : 水平地震力[N]

n_B : 固定ボルト本数[本]

$$\tau = \frac{F_s}{A_B} = \frac{25}{12.5} = 2[\text{MPa}]$$

τ : せん断応力[MPa]

F_s : せん断力[N]

A_B : 固定ボルトの軸断面積[mm²]

となる。

よって

$$\tau = 2[\text{MPa}] < f_s = 78[\text{MPa}]$$

となり、固定ボルトに作用するせん断応力 τ は許容せん断応力 f_s より小さい。

1.3 まとめ

水平震度 0.24 で評価を行った結果、十分な耐震強度を有しており、地震により金相試験研磨機が移動・転倒することはない。

付録 2

放射性気体廃棄物評価

現在想定される最も厳しい条件でのイオンミリング(56G MOX 燃料 試料長 10mm)の粒子状放射性物質の評価を行う。イオンミリングにて 10 μ m の厚さを研磨する。これを年間 5 回行うので粒子状放射性物質の年間放出量は、Table A-2 の値となる。

Table A-2 粒子状放射性物質の年間発生量

核種	イオンミリングによる 粒子状放射性物質の 年間発生量 (Bq)	排気口濃度 a (Bq/cm ³)	濃度限度 b (Bq/cm ³)	a/b
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	1.12 \times 10 ⁸	1.70 \times 10 ⁻¹⁴	8 \times 10 ⁻⁷	2.1 \times 10 ⁻⁸
¹⁰⁶ Ru- ¹⁰⁶ Rh	1.75 \times 10 ⁹	2.65 \times 10 ⁻¹³	2 \times 10 ⁻⁶	1.3 \times 10 ⁻⁷
¹⁴⁴ Ce- ¹⁴⁴ Pr	1.50 \times 10 ⁹	2.27 \times 10 ⁻¹³	2 \times 10 ⁻⁶	1.1 \times 10 ⁻⁷
²³⁸ Pu	5.97 \times 10 ⁶	9.05 \times 10 ⁻¹⁶	3 \times 10 ⁻⁹	3.0 \times 10 ⁻⁷
²³⁹ Pu	6.75 \times 10 ⁵	1.02 \times 10 ⁻¹⁶	3 \times 10 ⁻⁹	3.4 \times 10 ⁻⁸
²⁴⁰ Pu	2.50 \times 10 ⁶	3.79 \times 10 ⁻¹⁶	3 \times 10 ⁻⁹	1.3 \times 10 ⁻⁷
²⁴¹ Pu	6.33 \times 10 ⁸	9.59 \times 10 ⁻¹⁴	2 \times 10 ⁻⁷	4.8 \times 10 ⁻⁷
²⁴¹ Am	1.69 \times 10 ⁶	2.56 \times 10 ⁻¹⁶	3 \times 10 ⁻⁹	8.5 \times 10 ⁻⁸
²⁴³ Am	1.29 \times 10 ⁵	1.95 \times 10 ⁻¹⁷	3 \times 10 ⁻⁹	6.5 \times 10 ⁻⁹
²⁴² Cm	1.92 \times 10 ⁸	2.91 \times 10 ⁻¹⁴	2 \times 10 ⁻⁸	1.5 \times 10 ⁻⁶
²⁴³ Cm	2.50 \times 10 ⁵	3.79 \times 10 ⁻¹⁷	4 \times 10 ⁻⁹	9.5 \times 10 ⁻⁹
²⁴⁴ Cm	2.11 \times 10 ⁷	3.20 \times 10 ⁻¹⁵	5 \times 10 ⁻⁹	6.4 \times 10 ⁻⁷
			合計	3.4 \times 10 ⁻⁶

また、Table A-2 から研磨に伴い発生する気体状放射性物質の排気筒出口における濃度 a を式(1)より算出し濃度限度 b との比の総和を求めると 3.4 \times 10⁻⁶であり、試験に伴い発生する気体状放射性物質は、現行の障害対策書の評価値 (2.9 \times 10⁻¹) に比べ非常に低い値である。燃料試験施設では、排気筒出口において、気体廃棄物の放射性物質の濃度を連続監視しており、放射性物質の濃度が上昇する場合は、核燃料物質の取扱い作業を調整することにより、放射性気体廃棄物濃度を管理している。装置設置後の金相試験においても設置前と同様の管理を実施する。したがって、現行障害対策書の評価に包括されるため、評価の変更は必要ない。

$$a = \frac{Py \times Sr \times (1 - Gr)}{Ey} \dots (1)$$

a : 排気口における気体廃棄物の濃度 (Bq/cm³)

Py : 粒子状放射性物質の年間発生量(Bq) ; 表 1 の数値

Gr : フィルタの捕集効率 ; 粒子状放射性物質 0.999

Sr : 気体廃棄物の移行率 ; 粒子状放射性物質 10⁻⁴

Ey : 年間排風量 (cm³) ; (6.6 \times 10¹⁴)

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	モル	mol
光	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
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	1	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	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	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	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
光照射度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線核種の放射能 ^(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
酸素活性炭	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に使用される。
 (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 (CF-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
粘り	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 m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m 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
比エントロピー	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 s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s 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 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 s 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 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
酵素活性化濃度	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=11=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
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) 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
ストルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォト	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 ³ /4π)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=1cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	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	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

