

ホットラボにおける照射後試験装置に関する提案

A Proposal for the Post Irradiation Examination Apparatuses
in Hot Laboratories

照射後試験検討グループ

Working Group for Post Irradiation Examination

福島研究開発部門

原子力科学研究所

福島技術開発試験部

Department of Fukushima Technology Development

Nuclear Science Research Institute

Sector of Fukushima Research and Development

March 2015

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 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration 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, 2015

ホットラボにおける照射後試験装置に関する提案

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門
原子力科学研究所 福島技術開発試験部
照射後試験検討グループ

(2014年12月16日受理)

東京電力福島第一原子力発電所の原子炉廃止措置に向けた研究開発のため、放射性物質の分析・研究施設（以下、「分析・研究施設」という。）を建設する計画が国の依頼を受け、独）日本原子力研究開発機構によって進められている。同施設では、デブリ試料や汚染水処理後の二次廃棄物等の多種多様な試料の性状把握や処理・処分技術の開発等が実施される予定である。照射後試験技術の向上を目的として設置された、原子力科学研究所福島技術開発試験部照射後試験検討グループでは、今後の照射後試験のあり方を学ぶために、分析・研究施設の試験機器や化学分析設備について調査・検討を行うとともに、海外を含む最近の照射後試験の動向調査結果に基づき、次世代の照射後試験装置について検討した。本報告書は、その検討結果をまとめたものである。

A Proposal for the Post Irradiation Examination Apparatuses in Hot Laboratories

Working Group for Post Irradiation Examination

Department of Fukushima Technology Development
Nuclear Science Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 16, 2014)

The governmental program is progressed to build a new hot laboratory, which is called “active examination laboratory”, for the development of decommissioning techniques for the nuclear reactors. Many kinds of samples, such as the fuel debris samples and the secondary wastes after contaminated water treatment, will be examined for their disposal and characterization in the laboratory. A working group for Post Irradiation Examination (PIE) was formed in our department to improve the PIE techniques and discussed to study the direction of PIE for next stage which conducted in the new laboratory and PIE apparatus for future generation based on the survey of recent needs in domestic and foreign hot laboratories. In this report, the outline of the PIE and the apparatus discussed in the working group are summarized. This report describes the some proposals and the results of our review.

Keywords: Post Irradiation Examination, Nuclear Power Station, Hot Laboratory

目 次

1. はじめに	1
2. 分析・研究施設	1
2.1. 背景	1
2.2. 調査・検討	2
2.3. 試料調製時の作業効率の向上案	3
2.4. デブリ試料観察のためのマイクロトロンを用いた高精度小型 3 次元-X 線 CT 装置	5
2.5. 化学分析設備案	7
2.6. まとめ	13
3. 次世代照射後試験装置	13
3.1. 背景	13
3.2. 核燃料開発の動向	13
3.3. PIE ニーズについて	14
3.4. 次世代 PIE 装置	14
3.5. 3 次元アトムプローブ	14
3.6. 3 次元電子線後方散乱回折分析装置	18
3.7. その他の 3 次元試験装置	21
3.8. まとめ	21
4. あとがき	22
参考文献	23

Contents

1. Introduction	1
2. Active Examination Laboratory	1
2.1. Background	1
2.2. Survey and Review	2
2.3. Proposal for Improvement of Sample Preparation Work	3
2.4. High Performance 3 Dimension X-ray Computed Tomography with Microtron	5
2.5. Proposal for Chemical Analysis System	7
2.6. Conclusion	13
3. The Apparatus of Post Irradiation Examination for Future Generation	13
3.1. Background	13
3.2. Trend of Nuclear Fuel Development	13
3.3. Review of PIE Needs	14
3.4. Apparatus of PIE for Future Generation	14
3.5. 3 Dimension Atom Probe	14
3.6. 3 Dimension - Electron Backscatter Diffraction	18
3.7. Other field of 3 Dimension Apparatus	21
3.8. Conclusion	21
4. Concluding Remarks	22
References	23

This is a blank page.

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（以下、「1F」という。）の原子炉廃止措置に向けた研究開発のため、国の依頼を受け、放射性物質の分析・研究施設（以下、「分析・研究施設」という。）の建設が独）日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）によって進められている。分析・研究施設では、デブリ試料や二次廃棄物等（汚染水や瓦礫等）に関する試験を行う予定である。一般的に、研究炉や実用炉で照射された燃料・材料等、高放射性物質を取り扱う試験施設は、ホットラボと呼ばれ、コンクリートや鉛で遮へいを施したセル内で試験が行われる。JAEA 原子力科学研究所・福島技術開発試験部では、3つの大型のホットラボ（燃料試験施設、廃棄物安全試験施設及びホットラボ）を管理・運用してきており、これまで研究炉や実用炉の燃料・材料の照射後試験（Post Irradiation Examination: 以下、「PIE」という。）が行われてきた。

こうした状況に鑑み、福島技術開発試験部では、若手技術者を中心とした照射後試験検討グループを発足し、海外施設の状況も含めた PIE 関連技術情報の調査を行うとともに、分析・研究施設に設置する照射後試験装置、及びその仕様等について検討を行った。具体的な目標は、分析・研究施設で有効と思われる試験機器、及び海外を含む最近の PIE ニーズ調査結果に基づく、次世代の PIE 装置についての調査・検討とした。本報告書は、その検討結果をまとめたものである。

2. 分析・研究施設

2.1. 背景

東京電力株式会社は、福島第一原子力発電所 1～4号機の事故によって当該発電所の廃止措置を進めている。廃止措置に当たっては、多くの困難な技術的課題があり、それらの課題を克服するための研究・技術開発が必要とされている。そのため、JAEA は、国の依頼を受けて、これら廃止措置に必要な照射後試験・技術開発を実施するための分析・研究施設を整備する計画を進めている。分析・研究施設では、主にデブリ試料と放射性廃棄物中の核種分析手法の開発、またデブリ試料と二次廃棄物等の性状把握及び処理・処分技術の開発等が行われる予定である。

その中で、炉心内の核燃料が熔融後固化した燃料デブリは、1Fの廃炉作業の中で最も処理・処分が困難だと考えられる廃棄物である。この燃料デブリの取出作業計画を策定するために、様々な形状の多量の試料を用いた試験を実施し、デブリ特性に関する詳細かつ精度の高いデータを取得する必要がある。そのため、分析・研究施設においては、デブリ試料に関する試験の効率化、及び高精度の試験データを得ることが重

要な課題であると言える。また、汚染水や瓦礫等の様々な廃棄物等の分析に関しても高いニーズがある。本報告書では、分析・研究施設において効率的な照射後試験を実施し、より詳細かつ高精度のデータを得るために必要な、装置・機器、分析設備の等について議論・提案を行う。

2.2. 調査・検討

照射後試験検討グループでは、最初に、1F 事故以前に実用炉で炉心熔融事故を起こした原子炉であるスリーマイル島原子力発電所 2 号炉（以下、「TMI-2」という。）のデブリ試料に関する事故処理時に実施された試験の目的、方法、結果について調査した¹⁾。TMI-2 のデブリ試料に対して実施された物理的試験の調査結果をまとめた表を Table 1 に示す。これらの調査結果から、廃炉作業においてデブリ試料に関する重要な物理的試験の目的は、主に TMI-2 炉心デブリや燃料撤去作業のための治具開発とその作業時の安全性の確認であり、実施された試験は、主に密度試験、金相試験、走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope : SEM）及び電子線マイクロアナライザー（Electron Probe Micro Analyzer : EPMA）試験といった破壊試験であったことがわかった。TMI-2 事故では、熔融燃料が全て圧力容器内にとどまっており、周辺環境への放射性物質の放出はほとんどなかったことから、事故後の試験は、圧力容器から熔融燃料を取り出すための技術開発に必要なデータ採取を主な目的とした。一方、1F の事故では、建家の水素爆発による瓦礫の飛散や、環境への放射性物質の放出による、土壌や樹木の汚染等幅広い事象が起こったことから、分析・研究施設では、廃炉技術開発に必要なデブリ性状分析に加えて、環境試料中放射能分析等の化学分析が必須となる。

これらの調査及び検討結果を基に、試料調製時の作業効率の向上案、デブリ試料観察のためのマイクロトロンを用いた高精度小型 3 次元-X 線 CT（Computed Tomography）装置（以下、「3D-X 線 CT」という。）、及び分析用設備・装置等の提案について述べる。

試料調製時の作業効率の向上案については、分析・研究施設では、1F 1～3 号機から取り出された年間数十個の試料の試験が想定されており、早急にデータ提出が求められることが予想されるので、金相試験等に用いる小さな試料を効率的に調製する技術・方法を検討した。具体的な案としては、ハンドリングシステムとして、先端部が、5 指型のマニピュレータを提案する。従来、ホットラボで使用されている 2 指型で指先サイズが大きいマニピュレータに比べて、小さな試料の取り扱いが、格段に容易になると考えられる。

デブリ試料観察用のマイクロトロンによる高精度小型 3D-X 線 CT は、非破壊で試験試料の性状等を把握可能で、試験すべき試料の選別が容易になることから、破壊試験の効率の大幅向上に寄与することができる。これにより、現在、必要と考えられて

いる多種多様なデブリ試料試験が可能となる。

また、原子炉本体以外の事故廃棄物や環境試料中放射能分析においては、試料数量の多さ、性状や放射線量が多様であること等が課題となっている。これらの多種多様な分析対象物に対し、効率的かつ臨機応変に対応していくために、分析・研究施設における分析設備や装置等についても検討した。

2.3. 試料調製時の作業効率の向上案

2.3.1. 序論

分析・研究施設では、1F炉心から取り出したデブリ試料、材料試料及び環境試料等の形状や硬さの異なる多数の試料を迅速に試験する必要があることが予想される。

従来、ホットラボで使用されている先端部が2指型のマニピュレータは、指先サイズが比較的大きく、微小試料の取り扱いが困難である。このため、長時間の試料調製（細切断、埋め込み、研磨）等を必要とし、ホットラボにおける試料の年間処理数が限定される主要因の一つとなっている。さらに、作業者に一定の熟練度が必要であること、複雑な構造でメンテナンスが困難であること、輸入品であるための部品調達時間やコストの問題等がある。

そこで、微小試料の取り扱いに関する作業性を向上するため、ピンセットやドライバー等の汎用工具等を用いることが可能となる新たなハンドリングシステムを提案する。システムの開発に当たっては、作業者が初期段階から係ることが重要であり、各部の構造を理解するとともに、容易に部品交換できる構造にすることで、メンテナンス性の向上や部品調達を効率的に実施することが可能となる。

2.3.2. ハンドリングシステムの構成

ハンドリングシステムの構成概念図を Fig. 1 に示す。システムの構成要素は新型マニピュレータ、移動用レール、ブラインドセル²⁾、モニタ・カメラ、操作席である。操作者は、モニタでセル内の情報を観察し、操作席に設置されたコントローラを用いて新型マニピュレータを操作する。

2.3.3. ブラインドセル

従来型のように大きな鉛ガラスの窓を設置せず、点検用の窓のみ設置する。その他の壁および天井はすべてコンクリート壁で覆う。マニピュレータを水平方向の任意位置に移動させるために、セル上部にマニピュレータ走行用レールを設置する。

2.3.4. カメラ・モニタ

耐放射線性を考慮した光学カメラ及びセル内線量率を確認できる γ 線カメラを設置し、各カメラの情報をモニタ上に表示させる。

2.3.5. 新型マニピュレータ

1) 新型マニピュレータ（マスター側）

新型マニピュレータは、現在、ホットラボで使用されているハンドルによる操作ではなく、スティックタイプ、又はグローブタイプのコントローラを用いる。新型マニピュレータ(マスター側)のスティックタイプコントローラの構造概念図を Fig. 2 に示す。作業効率の向上及び細かな作業への対応を考慮し、作業者が着座してマニピュレータを操作を行うため、コントローラは操作席の肘掛部に設置される。

2) 新型マニピュレータ（スレーブ側）

Fig. 3 に新型マニピュレータ（スレーブ側）構造概念図に示す。新型マニピュレータのショルダー部、エルボー部、リスト部の機構はすでに民間の製造工場等で用いられているロボットに使われている既存の技術で製作することが可能であると考えられる。これに対しハンド部は、今後、国内外の開発状況を調査し、新型マニピュレータでの要求性能に達する技術開発ポイントを抽出し、その検証を行う予定である。Fig. 4 にハンド部の構成概念図を示す。新型マニピュレータのハンド部には、手のひらと指を備える人間の手とほぼ同様な構造を有する 5 指型を採用すべきと考える。

5 指型マニピュレータ導入の利点は、汎用工具等を特別な治具なしで使用できることである。人間が使う道具として作られた工具等は手のひらを含めた 5 指で取り扱うことが前提となっているため、2 指型マニピュレータでこれらの道具を使う際には、2 指型による持ち方・扱い方等について作業毎に取扱い方法をイメージする必要がある。このため、作業者の熟練度により作業効率が大きく異なり、2 指型での細かな作業を滞らせる原因の一つとなっている。そこで、5 指型とすることで、人間の手と同様のイメージで直感的にマニピュレータを使えることから、作業性が向上し、作業時間の短縮化が図れると考えられる。

5 指型ハンド部の開発における課題・仕様等を以下に列記する。

- ・ ハンド部に要求される可動範囲

一般的な工具・機器等を用いることを想定して、ハンド部の可動範囲について検討した。開発されるハンド部の可動範囲や自由度は PIE で使用する可能性のある道具を想定する。工具・機器類、及びそれらの難易度を Fig. 5 に示す。工具の難易度は、現行のマニピュレータの使用実績から 2 指型で使用可能なもの、5 指型を開発することで取扱いが可能になるもの、人間が取り扱えるものに分類した。

- ・ ハンド部に要求される駆動方式

関節を駆動させるアクチュエータは電動モータ、ワイヤー、空気圧等の様々なタイプがあるので、耐放射線性、メンテナンス性、駆動制御等を総合的に考慮して駆動方式を決定する。

- ・ マニピュレータ操作時の反応速度・追従性を満たす条件

反応速度とは、操作入力してからマニピュレータが動作するタイムラグの

ことで、追従性とは、操作入力に対応した動作をマニピュレータが正確に動作するかということである。反応速度と追従性は、微小試料・不定形の試料等を取り扱う際に、重要な性能と言える。そのため、反応速度や追従性を定量的に制御できるシステム等を開発する必要があると考えられる。

- ・ 耐放射線性

ハンド部に多くの駆動機構やセンサーを用いることとなる 5 指型では、それら部品の耐放射線性を考慮し、部品交換頻度等を現行の 2 指型と同様にするための工夫が必要となる。そのため、各部をモジュール化し、容易に交換可能なシステムをするとともに、各部について耐放射線性を十分に検証する必要がある。

2.3.6. 結論

5 指型を採用することで、ホットセル内での燃料デブリや環境試料の調製等の細かな作業において使用できる工具が大幅に増えることから作業効率が格段に向上し、かつ精密な試料調製が実現できると考えられる。しかし、従来のものより多数のセンサー等を使用することが考えられること、動作システムが複雑化しメンテナンスが困難となること等の課題もある。これらの課題を克服するために、各部の耐放射線性能及び構成部品をユニット化させたシステムの構築等の検討が必要である。

2.4. デブリ試料観察のためのマイクロトロンを用いた高精度小型 3 次元-X 線 CT 装置

2.4.1. 序論^{3,4)}

3D-X 線 CT は、対象物内を X 線照射し、吸収等による透過 X 線強度の違いを利用して内部構造等を調べる方法であり、物体の様々な方向から X 線を照射して透過光を撮影し、コンピュータ内でその撮影データを再構成処理することによって物体の内部構造等を非破壊的に 3D 画面上で評価することが可能である。そのため、ウラン燃料や原子炉構造材が混在したものである、デブリ試料やコンクリートを含む瓦礫等の内部状況の確認が非破壊で行える有用な装置である。

現在、3D-X 線 CT は、ホットラボ施設において、燃料集合体、及び燃料棒などの非破壊試験に有効活用されており、分析・研究施設においても導入を検討している。セラミック化したデブリ試料をより高精度に測定するため、さらに限られたセル内スペースを有効利用するため、より小型にする目的から、従来の線形加速器等ではなく、一様な磁場でエネルギーを周回させるマイクロトロン型加速器を用いた 3D-X 線 CT を提案する。

2.4.2. X線発生原理⁵⁾

X線を発生するための装置は、マイクロトロン型加速器と蓄積リングにより構成される。マイクロトロンは電子を発生させ、設定されたエネルギーまで電子を加速する。その加速電子は、蓄積リングへ入射・蓄積され、蓄積リング内を周回する電子の軌道の上にターゲットをおくことによりX線を発生させる仕組みである。

1) マイクロトロン

マイクロトロンは、定常・均一な磁場中を電子が周回しながら、一定周波数の高周波加速空洞で加速する装置である。周回する各軌道は、加速空洞の位置で接する円軌道になる。線形加速器の場合、直線的に電子を加速するためエネルギー分散が約10%となり、集束マグネットを用いたとしてもエネルギー収差により焦点サイズが大きくなるため、発生するX線の光子密度及び透過能が低く、高精度での測定が困難となる。一方、一様な磁場で電子を周回し加速するマイクロトロンは、位相のそろった単一エネルギーを持つことで、X線焦点サイズも0.1mm単位で容易に制御することが可能であり、高い画像分解能での測定が可能となる。またシステムの簡素化も比較的容易で、小型化とコストダウンが可能という特徴もある。Fig. 6にマイクロトロンの概略イメージを示す。

2) 蓄積リング

蓄積リングは、電子線を蓄えるため磁場で円軌道を描くように周回運動をさせるものである。電子軌道全周にわたり磁場を作るために、一対の弱収束型電導電磁石を使用している。その結果、電子軌道は完全円形となっている。

2.4.3. システム構成

加速器で発生したX線は、数 μm 以内の微小焦点から放射されコーン状に拡がりながら試料を透過する。試料を透過したX線強度データは(X線管の焦点から検出器間距離)÷(X線管の焦点から試料間距離)の幾何学倍率で検出器に収集される。収集された投影データは変換機を介して、主演算制御部CPUに送られる。主演算制御部CPUの処理によって透視画像、2次元CT画像及び3次元CT画像が得られる。また、新たな画像解析システムを導入することでデブリ試料に関して重要な知見である、空孔率及び密度についても同時測定することが出来る。Fig. 7にシステム図を示す。

2.4.4. 対象試料

測定対象試料は、主に UO_2 ペレットとジルカロイ被覆管が熔融後固化した燃料デブリである。燃料デブリは、炉心内での位置や冷却・固化条件の差により様々な形状や、密度であることが予想される。高精度のX線像を得るためには、均等な厚さの試料を作成することが重要である。

2.4.5. 装置概要

3D-X線CTは、CTスキャナ、X線発生部、試料台、X線検出器、コリメータ等から構成される。大型のデブリ試料を分析する場合は、およそ10MeV以上の高電圧を必要とすると思われる。また、試料台については回転可能テーブルとし、様々な形状のデブリ試料をチャックするために鋭利な針のようなものを使用し、複数個所を点で固定する試料ホルダが必要である。また、メンテナンスを安易及び小型化を図るため、電子機器を少なくし、試料のセットなど基本的にはマニピュレータを使用することを想定して、配線については脱着可能なものとする。

3D-X線CTを導入することで、デブリ試料やコンクリートを含む瓦礫等の内部状況の確認や計量管理のための測定が短時間で行えることが期待される。一方で課題もあり、測定対象デブリ試料毎の形状や密度を考慮した試料の固定方法等についての検討が必要である。さらに、デブリ試料は多孔質と推測されるため、その孔に水分が入り込んでいると観察に大きく影響を与える可能性がある。特に3Dスキャンについてはその影響が大きく現れると考える。今後は、試料の固定方法等について、更なる検討をしていきたい。

2.5. 化学分析設備案

2.5.1. 序論

分析・研究施設では、廃止措置に向けて、デブリ試料や事故廃棄物等の処理・処分技術の研究開発及び分析を行っていく予定である。対象試料は瓦礫や汚染水処理二次廃棄物等、比較的low線量のものから、原子炉建屋の解体廃棄物やデブリ試料等、大型もしくは高線量のものまで、その性状や放射線量が、多岐にわたることが予想される^{6,7,8)}。これらの試料に対し、効果的な研究開発を行うとともに効率良く分析を行っていくためには、当該施設における分析設備及び装置等の整備が重要となる。本項では、当該施設で取り扱うと予想される事故廃棄物等試料の情報及び分析項目を整理し、必要とされる分析設備や装置等について検討する。

2.5.2. 分析内容

分析・研究施設で行われると予想される処理・処分技術の研究開発及び分析内容について、「東京電力(株)原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」(以下、「中長期ロードマップ」という。)に掲げられた項目に基づきTable 2に整理した⁷⁾。

2.5.3. 分析対象の線量及び取扱設備検討

Table 2に示した分析対象物について、経済産業省及び東京電力等によるこれまで

の調査結果を参考に、予想される分析対象物の表面線量を Table 3 に示す^{6,7,8)}。

伐採木や土壌等の環境試料の線量はバックグラウンド（以下、「BG」という。）レベルであることが多いが、1～4号機周辺から採取された試料においては高線量のものもある^{6,7,9)}。これまで JAEA で分析を実施してきた試料のうち、原子炉周辺の空間線量率が高いエリアから採取された環境試料は、その外側で採取された試料に比べて輸送される試料量が少なく、必然的に分析できる核種数が少なくなっていた^{6,7)}。しかし、原子炉周辺から採取された環境試料は、量が少ない分、放射能レベルはそれほど高くなく、試料の受け入れや保管、作業に伴う試料移動等が容易になる。原子炉周辺及びその外側から採取された環境試料は、これまで混積載で搬入されており、輸送試料全体での放射能レベルはさほど問題にはならなかったため高線量試料の少量化は非常に有効であると考えられる。試料を少量化するということは、取扱いの上では便利であるが、分析に供する試料量が少なくなるという欠点があり、これまでに報告された JAEA による環境試料の分析結果を確認すると、一部の試料に関しては、分析対象核種が少ないことがわかる^{6,7)}。しかし、実際に定常分析を行う場合、個々の分析においては、試料は少量でも可能である^{9,10,11)}。従って、今後 1F サイト内の汚染分布が明らかになっていくにつれて分析対象核種を絞っていくことができると考えられるため、試料量が少なくとも必要な放射性物質のデータを取得していくことは可能であると思われる。よって、環境試料等の線量が BG レベルを含む広い範囲に及んでいても、高線量試料は少量化して放射能レベルを低くすることにより、取扱設備への試料輸送や分析作業に関して、これらの線量の違いは問題にならず、一様に取り扱うことができると判断する。

一方、解体廃棄物及び汚染水処理二次廃棄物に関しては、Cs 等の γ 線放出核種による汚染の他、⁹⁰Sr 等の β 線放出核種による汚染も考えられる^{12,13)}。さらに、これまで JAEA で分析された滞留水試料の中には、⁹⁰Sr 濃度が高いもののほか、 α 線放出核種である Pu が検出されたものもあり、これらの試料の取り扱いに際しては遮へいや遠隔作業等の被ばく低減措置を考慮する必要がある⁷⁾。

以上をまとめると、試料数量が多く、定常分析を行うと予想される環境試料や淡水化処理水等は、比較的低線量であることからフードでの取り扱いが可能であると考えられる。フード等開放系設備での作業は、試料搬送等の作業効率も良く検出下限の低減が比較的容易なことから、低線量試料に対する放射能分析には適している。

一方、スラッジ等の汚染水処理二次廃棄物や炉内構造物は基本的に高線量である上に、 α 線及び β 線放出核種による汚染が予想されることから、セルやグローブボックス（以下、「GB」という。）等の密閉型設備での取り扱いが想定される。しかし、これらの試料は採取方法の検討を行う必要があるものが多く、その方法次第ではその後の分析手法の選定に影響すると考えられる。また、性状の不明確な試料を不定期に取り扱うことが想定されることから、セルや GB を様々な分析に対応できるよう整備する必要がある。

以上のことから、各分析対象物と受入設備案について Table 4 にまとめる。

2.5.4. 必要な分析装置と設置検討

試料の受入及び取扱設備は、各分析対象物の線量により選別されるが、これらの化学分析に必要とされる分析装置の種類はほぼ同じである。分析・研究施設で実施される化学分析において必要となると想定される主な分析装置を、Table 5 に示す。これらの装置のほとんどは、JAEA において簡易フードや GB 内への設置・使用実績があり、約 1mSv/h 程度の試料であれば問題なく取り扱うことができる。これらの装置のうち、これまで装置の検出部が大型であることから作業室内を占有することの多かった誘導結合プラズマ発光分光分析装置（Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer：以下、「ICP-AES」という。）については、従来の波長分光型ではなく、近年では CCD（Charge Coupled Device）検出器を用いたコンパクトで高感度な卓上型仕様のもが増えている。従って、装置の仕様によっては作業スペースを広く持つことができ、より効率的に作業を進めることができる。

一方で、GB やセルでの取り扱いが想定される高線量試料の分析では、装置を GB やセル内に設置しなければならないという問題がある。分析装置を GB やセルで扱う際に、まず問題となるのが装置の大きさである。燃料調製や再処理を行う設備では、比較的大きな GB が整備されているが、容量の大きい GB は、多くの場合は広範囲の作業に対応するために多数のグローブポートが整備されており、その数に応じた保守管理における労力や設備、作業室の規模等が必要である。このため、大型の GB に、装置全体を搬入して設置・使用することは効率的ではない。Table 5 の装置のうち、ほとんどの測定装置は前述のとおり GB への設置実績があり、イオンクロマトグラフや ICP-AES 等の溶液試料の測定装置は、送液部等を GB 内、制御部等は GB 外に設置する等の改造措置をとっているが、開放系での使用に比べて測定感度が低下するケースが多く、装置のメンテナンスや修理・更新の際に手間がかかる。さらに、セル内の使用においても、セル内部に設置した装置では、メンテナンスや修理の際に除染が必要になることが想定されるため、装置の搬入部分は比較的小型で除染が容易である方が望ましい。

その他、セル内への装置の設置に伴い考慮すべき項目として、線量の問題がある。先に述べたような CCD 検出器を用いた ICP-AES は、小型であるためセル内でもそれほどスペースを取ることなく移動も容易であることから、設備の汎用性向上には適している。しかし、セル内で取り扱う試料は高線量のものも多く、これら試料からの放射線による CCD 検出器の劣化の問題がある。CCD 検出器が劣化する度に部品を交換すれば問題ないが、交換の都度除染が必要であり、作業も一度ストップしなければならない。ランニングコスト等も考慮すると、装置の維持・管理に手間のかかる CCD 検出器を用いたタイプの装置ではなく、放射線劣化の心配が比較的少ない従来の大型な分光部を持つ波長分光型の装置を、試料導入部のみセル内に設置した仕様となると想定される。このような問題に対する技術として、集束イオンビーム（Focused Ion Beam：以下、「FIB」という。）等を用いた微小試料加工技術がある。この技術は元々、微細加工や微小領域観察のための技術だが、この加工技術を利用することで試料を少

量化して線量を低減し、セルで受け入れた高線量試料を開放系等で測定することが可能となる。しかし、高線量試料に対するマイクロサンプリングの実績はほとんどなく、FIB等の加工装置は、微小試料の作製において非常に有効である一方、比較的大型なためセル内への設置は難しい。従って、遮へいを十分に施すことで、ある程度微小化した試料をセル外、もしくは簡易フード等での取り扱いを可能にすることにより、このような加工技術の使用も可能と考える。

以上を踏まえて、海外のホットラボ施設で使用されている装置を調べたところ、分析装置をGBもしくはセル内での使用が可能ないように改造しており、国内施設と同様に、必要最低限の部分のみGB・セル内へ設置していた。装置の分割設置により懸念される測定感度の低下に関しては、試料表面をレーザー照射することで測定対象を高密度に微粒子化することができ、試料前処理がほとんど必要ないレーザーアブレーション装置を組み合わせることで、検出感度の向上や妨害元素の低減により高精度化を図る等の工夫が見られた。一方、メンテナンスや修理に関しては、保守専用のセルを設けること、セル自体の除染を行うこと等、国内での処置とほとんど変わりはない。

以上のことから、分析装置のGB・セル対応への改造については、メンテナンス性を考慮して、除染セル等を整備することにより保守していく必要があると考える。また、測定感度の低下に関しては、分析手法の組み合わせによる改善例があることから、工夫次第ではGBやセル内での分析作業においても高い分析精度を求めることができる。従って、GB・セル内への分析機器の設置は、求められる分析精度を得るための工夫を施しつつ、装置のメンテナンス性を最優先に考慮して行うべきであると考えられる。メンテナンス性を最優先とした場合、上述の放射線劣化が著しい装置や大型装置のセル内設置は難しいと考えられ、装置の分割設置が主流となると考えられる。

2.5.5. 取扱設備の設計について

分析対象物の性状が多岐にわたり、その線量範囲が広いため、汚染の拡大防止や各取扱設備の設置、管理等の観点から、測定対象物の線量に応じて、個別の建家の設置、測定室・測定機器・装置等の配置を工夫することで、作業の効率化を図ることができると考える。定常分析を行うと予想される低線量試料は数量が多く、搬出入の回数も多いため、高線量試料を取り扱う作業場とは分離する方が望ましい。また、高線量試料においても、デブリ試料や解体廃棄物は、その取り扱いの難しさや作業場の区分け等の点から、他試料と分離することが望まれる。以上より、分析・研究施設では分析対象物の線量に応じて、作業場所あるいは建屋そのものを分けた構造となると想定した上で、GBやセル等の設備整備について検討する。

ある試料に対して、ある項目に関する分析作業を実施する場合、一つの建屋内で試料の前処理から測定までを一続きで行える方が効率的である。滞留水試料のように、比較的高線量ではあるが定常分析も行うと想定される試料については、試料搬送装置を付属した、一続きのGBでの作業が適していると考えられる。一続きのGBは、粉

末試料等を扱う場合には汚染拡大のリスクがあるが、滞留水のような液体試料を扱う場合は、粉末のように GB 内換排気の気流に乗って別の GB に汚染が拡大する可能性は低い。有機溶剤のような揮発性の高い試薬を用いて放射性物質を分離・抽出する場合は、揮発した放射性物質を含む有機溶剤が汚染を広げてしまうが、負圧管理が必要となる GB 内で揮発性の高い試薬を大量に使用することは考えにくい。また、分析に必要となる試料量はそれほど多くないと考えられることから、大量の汚染水を GB 内に搬入する可能性も低いと考えられる。従って、液体試料による汚染は、試料取扱い時の飛沫や少量のこぼし等によるものであり、ウェス等でふき取ることで局所的な汚染に留めることができる程度であると考えられる。一方、定常分析を行わない高線量試料については、汚染拡大防止のため試料調製用 GB と測定用 GB をそれぞれ独立したボックスとし、GB 間の試料移動はキャニスタやビニルバッグによるバッグイン・アウトにより行う方が望ましい。さらに、建屋の階層移動や、搬入先の GB までの距離がある場合は気送設備による試料移動を提案する。これらの設備は国内の原子炉施設等でも実績があり、当該施設においても有効であると考えられる。

セルについても同様に、大型のセル内で幾つかの作業を行うのではなく、小型のセルを複数使用の方が除染を行う上で効率的と言える。また、複数の小型セルの使用は、試料間のコンタミ防止やセルのメンテナンス時の作業中断を防ぐ観点からも、高稼働率化に資すると思われる。海外では、セル内にボックスを持つ「インナーボックスタイプ」のセルや、メンテナンス性を考慮してモジュラー型のセルを使用している施設も多く、分析・研究施設においてもこれらの導入を検討すべきと考えられる。

その他、分析作業を円滑に進捗させるために、分析作業等に伴い発生する廃液や腐食性気体の処理設備についても検討したい。GB やセル内に、分析廃液や分析後の試料等を廃棄できずに保管する場合、作業性を低下させるとともに、不慮の事故の発生の原因となることも懸念される。廃棄物や廃液の量を可能な限り低減するとともに、発生した廃液や廃棄物等を速やかに処理し、施設内に溜めない措置を図ることや GB やセル内での腐食性気体の処理設備を整備することは、設備の長期使用を可能にする観点で極めて重要と言える。

2.5.6. 分析作業の効率化

低線量試料における定常分析作業においては、膨大な数量の試料を効率良く、かつ人的誤差を小さく分析することが重要である。一方、高線量試料の分析においては、メンテナンス性・操作性の向上の他、作業者の被ばく量の低減が求められる。こうした観点から、低線量・高線量のどちらの試料においても分析作業の自動化が極めて有効であると考えられる。実際、海外の工程管理用の分析所等では、試料調製のみ手作業で行い、以降の分析作業は自動化している施設もある。分析・研究施設では、現在 JAEA で行われているように、非破壊による表面分析や放射能測定等を実施した後、破壊分析による測定を行うと予想される。従って、非破壊測定においてはサンプルチェンジャーを使用して長時間測定の効率化を図り、破壊分析においては、試料を前処理した

後の工程を自動化することで被ばく低減を図ることができると考える。

以上を踏まえて、まずβ線源となる⁹⁰Srに対しては、「カスケード濃縮分離内蔵型 ICP-QMS システム」による⁹⁰Srの自動分離測定方法を提案する¹⁴⁾。これは、福島大学等の研究グループで開発されている技術であり、誘導結合プラズマ質量分析装置 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer : ICP-MS) に核種分離装置を接続したものである¹⁴⁾。この技術により、従来困難であった⁹⁰Sr分析を迅速に行うことが可能となるだけでなく、分離作業中や測定時の放射性同位体使用による作業者の被ばくを低減することができると考える。その他、遠隔・自動化技術として前処理溶液の分離操作を簡便化できる「キャピラリー電気泳動法」や、固体試料に適用できる質量分析法として「レーザー共鳴電離質量分析法」を提案する^{11,15-21)}。これらの技術は分析工程を簡素化することができ、測定装置も比較的小型であることから、著しい作業効率化が期待できる。また、分析に必要な試料量が極少量であることから、高線量試料への適用も可能であると考え。特に、「レーザー共鳴電離質量分析法」に関しては、測定装置への導入過程において選択性を有しているため、前処理過程での分離作業をある程度簡易化できる。さらに、固体試料の直接測定が可能であるという特徴から、マイクロサンプリング技術が確立すれば、瓦礫等の高線量試料の直接測定といった技術開発も期待できると考える。

2.5.7. 結論

分析・研究施設で行う研究開発及び分析作業において、取り扱う試料の多さや線量の高さから、施設の高稼働率化、作業の効率化、及び作業者の被ばく低減を考慮する必要がある。このような観点から、装置や設備の整備に関して、最も重要となる課題は、高線量試料を取り扱う設備の部分であると言える。これらの設備のメンテナンス性や稼働率を可能な限り向上させることが、作業の効率化、ひいては作業者の被ばく低減につながると見込めることから、メンテナンス時の除染や分析装置の保守管理を比較的容易に行うことができるモジュラー型やインナーボックスタイプのセルの導入検討を提案する。しかし、これらの設備は、現在、国内におけるホットラボ施設への導入実績がなく、これまで国内の各ホットラボ施設を使用していた作業者が分析・研究施設でこれらの設備を利用する際に、従来設備との違いから操作技術の習得に時間を要することが考えられる。また、メンテナンス性に優れているとはいえ、従来設備の方が作業上で適していることや従来設備では生じなかった事象等もあり得る。そのため、これらの実績のない設備の導入に際しては、導入実績のある国外施設の作業者の意見と、従来設備を使用している国内外施設の作業者の、双方の意見を慎重に取り入れてそれぞれの設備の長所短所を正確に把握して選定する必要があり、今後分析・研究施設を稼働させるにあたっては、施設を使用する作業者が、設備や装置の取り扱いに習熟する期間等も考慮して作業工程を検討する必要があると考える。

一方、低線量試料に関しては、膨大な量の試料を効率良く、滞りなく分析して処理・処分を行うことが求められている。このことから、前項に取り上げたような分析工程

の自動化による効率化が、作業者の安全面（被ばくの低減）も含めて、非常に有効であると考えられる。今後、より多くの自動化・迅速化技術の調査を行い、当該施設に求められる分析項目に適した装置や技術について更なる検討を実施していきたい。

2.6. まとめ

今回、分析・研究施設の装置、機器及び設備を検討するにあたり、研究テーマ、分析対象物及び施設の規模など未確定のことが多いため、この施設における最も重要な技術ニーズを考えることが困難であった。その中で調査を進めていくと、分析・研究施設で実施予定の試験や分析は、現在のホットラボで行われているものと何ら変わらないことがわかった。しかし、施設の運用予定は 2021 年であることを考えると、現在では困難と思われる技術であっても、運用開始時に実用化できる可能性がある。今後は、さらに視野を広げた試験技術検討を行い、将来、分析・研究施設等で利用可能な技術について検討を進めていく予定である。

3. 次世代照射後試験装置

3.1. 背景

照射後試験（PIE）は、核燃料のふるまいの解明、核燃料や原子炉材料の健全性評価、及び新規材料の開発等を行う上で必要不可欠なものである。新たな PIE ニーズに柔軟に対応するためには、明確なビジョンを持ち、新規の機器・装置整備や技術開発・高度化を継続的に実施することが重要となる。照射後試験検討グループでは、PIE ニーズ及び既存のホットラボに関するこれまでの調査結果²²⁾を基に、今後、ホットラボ施設に求められる機器・装置等について検討を行った。

3.2. 核燃料開発の動向

エネルギー戦略の選択肢には、原子力エネルギーをベースとしたエネルギーインフラの構築が考えられ、原子力エネルギーへの関心が高まれば、軽水炉や高速炉等における次世代の核燃料開発のきっかけと繋がる。最近の軽水炉用燃料開発の傾向は、稼働率の向上、燃焼度の増加である。稼働率の向上と燃焼度の増加は、廃棄物の取扱量及び処分量を軽減させることが期待できる。しかし、稼働率の向上及び燃焼度の増加は、リム組織の生成、破損を引き起こす可能性のある被覆管腐食、及び水素化物の生成といった、燃料の健全性に大きく影響を及ぼす組織・欠陥等を発生させる。次世代

の燃料開発におけるこれらの問題を解決するためには、従来の工学的性能評価から最先端の材料科学を導入する必要がある、理論、実験、モデリング及びシミュレーションを結びつけ、核燃料のふるまいに関する基礎的な解明をより効率的に実施してゆく必要がある。

3.3. PIE ニーズについて

現在の PIE は、同時に起こっている複数の現象の集合、巨視的現象として、理解しており、根本的な核燃料のふるまいの理解には、より短い時間で微細な領域で起きている微視的現象を解明する必要がある。そのためには、より微細な測定を可能とする装置や技術に加え、大規模なシミュレーションや原子レベルのモデリング等の計算科学が求められている。しかし、技術的、予算的にも、こうした技術開発や機器・装置整備等を JAEA だけで実施することは、極めて困難であることから、国内における他機関との連携構築・強化に留まらず、国際協力を積極的に推し進め、情報共有等を図りつつ、PIE、及び技術開発を進めることが重要と考える。

3.4. 次世代 PIE 装置

今後、求められる次世代 PIE 装置の選定にあたり、現状における試験装置について調査を行い、試験項目毎にまとめた²³⁻²⁹⁾。調査結果を Table 6 に示す。近年の PIE ニーズは、より微細な領域での核燃料等のふるまいに関する解明が求められており、試験装置の調査結果から、それらを可能とする装置として 3次元アトムプローブ、及び 3次元電子線後方散乱回折分析装置の 2 装置を提案する。

3.5. 3次元アトムプローブ

3.5.1. 序論

近年、燃料被覆管は現在使用されているジルカロイ-2(Zry-2)やジルカロイ-4(Zry-4)といった既存の燃料被覆管以外にも新たな燃料被覆管を開発する動きが見られている。原子炉を運転するうえで、より安全裕度の優れた燃料被覆管が求められており、これらの材料開発は今後の原子力発電において必要不可欠なものである。また、燃料被覆管以外の原子炉で使用される構造材料等に対しても、安全性の確認のために更なる調査を進めていくことが必要とされている。開発された燃料被覆管や構造材料の健全性は、一般的に、引張強度や疲労限度等の機械的強度の安全率から評価される。しかし、実際に原子炉で使用するにあたって考慮すべき課題として、材料の照射脆化がある。原子炉内では中性子照射により、空孔や析出物等の照射損傷が生じ、脆化の要因の一

つになると考えられている。また、被覆管においては、水素脆化も大きな問題となっている。水素脆化は、水素の吸収によって、金属内部に水素化物等が形成し、材料が脆くなる現象である。軽水炉用燃料被覆管の場合、炉心の冷却材である水との反応により被覆管は徐々に酸化していくが、この時生じる水素の一部が被覆管に吸収され、水素化物を形成する。この水素化物は、被覆管表面の外周部に形成されることが多く、燃料被覆管の破損の要因となることが懸念されている。

また、燃料に関しては、近年では試験研究炉で使用しているシリサイド燃料の代替燃料として新たに開発された U-Mo 燃料や炉心溶融がしにくく水素爆発が起こりにくい高温ガス炉で使用される 3 重被覆層の Tri-Isotropic 型被覆燃料粒子(以下、「TRISO 燃料」という。)の開発や調査が進められてきている。しかし、どちらもまだ改善の余地が残されている。U-Mo 燃料に関しては、シリサイド燃料と比べて性能が低下しにくく、再処理可能な燃料とされているが、照射中における異常なスウェリングの発生など未知の部分が多いため、更なる調査が求められている。また、TRISO 燃料に関しても、高燃焼度化に向けての開発に注目が集められている。

いずれの炉材料や燃料においても、これらのニーズを満たすうえでは原子レベルでの解析が必要不可欠になる。また、単純に解析できるだけでなく、より正確に原子の状態を把握するため、高分解能であることも求められる。これらの要件を満たす装置としてアトムプローブ装置 (Atom Probe : 以下、「AP」という。)について述べる。

3.5.2. AP の概要

AP は、1969 年にアメリカペンシルバニア州立大学の E.W.Muller 教授により開発された装置である。アトムプローブ電界イオン顕微鏡とも呼ばれ、電界イオン顕微鏡 (Field Ion Microscope : 以下、「FIM」という。)に飛行時間型質量分析器を取り付けたもので、試料表面の個々の原子を観察して同定することのできる局所分析装置である³¹⁾。対象の試料は、先端の曲率半径が 1000 Å 以下の針状の形状に加工したものを使用する。試料を電界蒸発させることにより、表面からイオン化される原子のうちプローブホールと呼ばれる分析用のアパーチャーを通り抜けた原子だけを選択的に検出する。電界蒸発したイオンは後方に取り付けられた質量分析器に入射するまでの時間とその時に印加した電圧から蒸発イオンを同定する原理となっている。実際には、FIM 像を観察しながら、スクリーンの中心にあけられたプローブホールが測定対象物の中心に来るように試料を移動させ、試料原子が電界蒸発するために必要な高電圧を試料に印加すると試料表面から原子がイオン化され、これがプローブホールを通り抜けて検出器に到達する。このような原子の電界蒸発を高圧パルスで行えば、原子がイオン化される瞬間からこれが加速されて検出器に到達するまでの飛行時間を測定することができる。イオンのエネルギーは印加電圧から導出されるので、飛行時間を測定することによりイオンの質量を同定することが可能となる。原子は電界蒸発により試料表面から 1 原子層ずつイオン化されていくのでプローブホールで覆った領域の深さ方向の濃度プロファイルが測定できる。また、AP はイオンを飛行時間測定により同

定しているため、イオンの検出効率が原理的には質量にかかわらず一定である。従って、水素や酸素、炭素などの実用材料で重要視される軽元素の分析をサブナノスケールの分解能で行うことが可能となる。

3.5.3. 3次元アトムプローブの概要

APでは、試料の深さ方向の原子の位置情報を測定できるが、原子の配列や分布の詳細なデータを得るのは非常に困難であった。しかし、Oxford大学のCerezoらが、XY軸方向の位置情報も加えることで3次元の原子マッピングを得ることが可能な3次元アトムプローブ（3 Dimensional Atom Probe：以下、「3DAP」という。）を開発した。Fig. 8で示すように、3DAPは、APで使用していたマイクロチャンネルプレートとアパーチャーに替えて、電界蒸発させて発生したイオンを位置敏感型検出器で直接検出する仕組みになっている。この位置敏感型検出器を採用したことにより、APの検出器と同様に、試料から電界蒸発した原子が検出器へたどり着くまでの飛行時間を測定することで原子の同定を行うとともに、測定原子の試料における2次元の位置情報も同時に測定することが可能となった。また、試料表面を1原子ずつ蒸発させることで深さ方向の組成分布を得られ、上記の2次元の位置情報と合わせ、原子分布の3次元情報も得られることになった。原子の3次元マップの例をFig. 9に示す。3次元マッピングデータはP原子によるものであり、微小な範囲ではあるがP原子の偏析している様子を容易に確認できる。

3.5.4. 3DAPの課題と対策

原子の存在位置を格子間隔レベルの空間分解能で調べることができる3DAPだが、課題も幾つかある。まずは測定できる領域が非常に小さく、試料の先端部のみしか測定できないため、実際に測定したい部位を加工することが非常に困難であることが挙げられる。次にAPと比較して、広範囲で原子の位置を把握できるが、3DAPではエネルギー補償を行っていないため、質量分解能が十分でない場合があり、Mn等のピークは他の強い原子のピークと重なってしまい、試料中のMnを区別することができない場合がある。また、基本的には電界蒸発により発生したイオンを捉えるため、測定する試料は導電性物質であることが前提とされており、非導電性の試料の測定は不可能であることが課題として挙げられている。しかし、現状の3DAPではそれらの課題に対して対策が講じられている。

測定部位への加工の困難さに関しては試料作製に集束イオンビーム（Focused Ion Beam：以下、「FIB」という。）を用いることで解決した。観察目的である部位が試料先端に位置するように、微小なブロックをFIBによって切り出し、このブロックをマイクロマニピュレータによって針台座の上に運んでタングステン蒸着によって固定する。その後イオンビームにより角柱状に加工し、平行にリング状ビームを照射することで試料先端から100 nm以内に観察部位が位置するように加工可能となる³²⁾。

質量分解能が不十分と思われていた問題に関してはリフレクトロンエネルギー補

償器を装備させることでこれを解決した。この補償器は、試料が電界蒸発して直線飛行するイオンが飛行中にエネルギーロスしてしまうのに対して静電反射板を設けることでエネルギーを補償してくるものである。そのため高質量分解能を実現することができ、本来区別することができなかつた Mn などを検出可能とした。

非導電性の試料に関しては、短波長のレーザーを用いたレーザーアトムプローブによってこれを解決した。従来は導電性の試料に高い電圧をかけることで電界蒸発を起こしていたが、フェムト秒レーザーというフェムト秒レベルの間隔でパルス幅を発信するレーザーを用いることで、分子結合を切断して蒸発をさせることが可能となる。

3.5.5. PIE への対応

3DAP を PIE へ対応させることで燃料被覆管や構造材料、燃料等の物性をより詳細に把握することが可能となる。近年では福島事故と同様の事故が危惧されており、被覆管と水の酸素が反応して水素が発生することによる水素爆発の防止が重要な課題になっている。そこで水素爆発に寄与しない新たな被覆管の開発も進められている。現在の被覆管は、ジルコニウム合金であるが、その代替として SiC 複合材料の利用も検討されている。SiC はジルコニウム合金と比較し、酸化しにくいため水素の発生を抑えることができるとともに、放射線の影響を受けにくく、耐久性にも優れた材料である。こうした材料の化学的特性や耐放射線特性を評価する際に重要となるのが析出物である。析出物は酸化に影響を及ぼすと考えられており、脆化の原因の一つとしても知られている。この SiC 複合材では Fe, Cr が Zr への固溶限が低いため、Zr-FeCr 系の析出物が析出するが、Si は Fe や Cr と置換して存在するといわれている。これを原子レベルで分析し、析出物の位置や形状を明らかにすることは材料の物性を調査していく上で、非常に重要であるため 3DAP は有効であると考えられる。析出物に関しては、燃料被覆管のみだけでなく、そのほかの炉材料においても同様なことが期待される。炉材料も上述であるように中性子照射による析出物があり、これが材料の脆化につながると考えられている。そのためこれらを原子レベルで調べることも可能なこの装置は有効であると考えられる。

また、3DAP は、燃料被覆管の水素脆化のメカニズム解明においても重要な役割を果たすことが期待できる。燃料被覆管中の水素を見るための従来技術として、燃料被覆管の切断面をエッチング液により腐食することで水素化物の分布を顕微鏡で確認する手法があるが、エッチング処理による水素化物の金相観察の場合、観察面上、かつマクロ的な情報しか得られなかった。また、第 1 原理計算等のコードを使用している水素原子の位置を把握する手法などの場合は、理想的な構造を仮定しており、実材料における水素原子の正確な位置を特定するには不十分と言える。EPMA などの元素のマッピングに関しては、表面近傍の元素をのみとらえることが可能であり、原理的に水素のような軽元素の測定は困難である。3DAP は、原理上、水素の分析も可能であり、水素化物のミクロな視野における情報を 3 次元で取得できるため、これまで金相試験等で得られた任意の断面での水素化物分布に加え、深さ方向の分布情報を解析するこ

とで水素脆化のメカニズム解明において有効であると考えられる。

3DAP は、燃料の評価に関しても同様に威力を発揮することが期待される。近年注目されている U-Mo 合金燃料においては、上述したようにスウェリングが問題とされている。また、スウェリングは、U-Mo に限らず、軽水炉燃料や核融合材料においても問題になっており、その発生を抑制することは重要な課題となっている。スウェリングは核分裂時に発生した気体状放射性ガスにより燃料自身や燃料被覆管が膨張・変形してしまうことである。しかし、3DAP は非導電性の燃料においても測定が可能であるため、燃料の膨張を原子レベル観察することが可能であり、燃料中の気体状放射性ガスバブル周辺の原紙レベルの情報を収集することで、スウェリングのメカニズム解明をするにも有効であると考えられる。

3.5.6. 結論

3DAP を使用することにより、物質を原子レベルで 3 次元分析することが可能となる。これにより多くの材料の物性や現象の解明に関して非常に有益な情報が得られる。そのため、PIE においても、照射損傷、水素脆化に関する重要な情報を得ることができる装置であるといえる。さらに、扱う試料が微小であるため、装置への放射線の影響が非常に低いことが考えられ、装置に鉛等で遮へいも簡易なものでよいと考えられる。3DAP はこのように PIE において重要な情報が得られることや、放射線による機器の損傷が起こりにくく長期的な使用が期待されることから、次世代の測定手法として極めて有望であると言える。

3.6. 3 次元電子線後方散乱回折分析装置

3.6.1. 序論

燃料試験施設では、発電用軽水炉燃料の事故時挙動に関するデータを得るために、反応度事故（Reactivity Initiated Accident：以下、「RIA」という。）模擬試験前後の燃料について、PIE 及び冷却剤喪失事故模擬実験を行い、燃料の事故時挙動に及ぼす炉内長期使用に伴う燃料微細組織変化の影響を評価している³³⁾。RIA は、短時間で炉心に大きな負荷がかかると原子炉の出力が急上昇して燃料が破損または炉心が熔融する事故のことである。その評価方法として電子線後方散乱回折法（Electron Backscatter Diffraction：以下、「EBSD」という。）による結晶方位解析がある。燃料の微細組織変化を結晶方位から追うことが可能であるが、試料の表面のみのデータしか採取できないため、深さ方向での結晶の傾きやそれぞれの結晶の関連性の情報を得る事が出来なかった。しかし、近年、3 次元微細構造解析の技術開発が進められ、様々な材料組織の 3 次元情報が得られる試験装置が開発されている。その中の 1 つとして 3 次元電子線後方散乱回折分析装置（以下、「3D-EBSD」という。）がある。本稿では、3D-EBSD の PIE への適用に関して行った調査及び検討の結果を報告する。

3.6.2. EBSD の概要

エレクトロンチャネリングパターン (Electron Channeling Pattern : 以下、「ECP」という。) 法は、結晶方位解析法の一つで、通常、SEM を利用して測定を行うが、これを応用してミクロン領域の結晶解析を行うことが出来る方法が EBSD である。

EBSD は、SEM 試料室内において約 70° に傾けられた状態に設置された試料に電子線を入射する。照射された電子は、試料表面で後方散乱回折し、側方に設置された蛍光スクリーン上に Kikuchi 線の集まりである反射電子回折模様 (Electron Backscatter pattern : 以下、「EBSP」という。) として投影される。この模様は電子ビームに対してほぼ 90° の位置に設置された高感度 CCD カメラ (検出器) によって画像データとして取込まれる。試料の観察面を電子線が走査することで EBSP をデータとして取得する。その後データ処理をすることで、局所領域の結晶方位や結晶構造を解析する事ができる。ECP のように電子ビームを順次角度を変えて入射する特殊な電子光学系を必要とせず、試料の表面に電子ビームを一点入射することで材料組織の結晶方位を見ることができ、観察したい領域の結晶方位についても正確な情報を得る事ができる³⁴⁾。EBSD の結果から得られる菊池パターンと結晶方位マップを Fig. 10 に示す。また、装置の特徴の一つとして試料ステージにはユーセントリック傾斜機能が必要である。これは、 $0\sim 70^\circ$ の試料の傾斜中視野の逃げを防止する事と試料ステージ移動中の焦点のずれを起こさせないためである。EBSD 情報は、試料表面から $30\sim 50\text{nm}$ の浅いところから発生するといわれ試料表面を平滑にすることで良好なデータを得ることが出来る³⁵⁾。装置の概要を Fig. 11 に示す。

3.6.3. 3D-EBSD

3D-EBSD は、シリアルセクション法と EBSD を組み合わせた方法である。シリアルセクション法とは、研磨と観察の作業を交互に行い得られた連続断面画像から 3次元画像をコンピュータ上で再構築する技術のことである³⁶⁾。研磨方法として FIB 研磨と機械研磨がある。FIB 研磨は、機械研磨より分解能が高い結果が得られるが観察可能範囲は、 $50\times 50\times 50\mu\text{m}$ と限定されてしまうため、試料の広範囲の観察には機械研磨、試料の局部を観察する場合には、FIB 研磨など試験条件によって研磨方法を変える必要がある。3D-EBSD で観察することで、深さ方向の結晶の情報を得る事が出来るようになり、結晶粒界や亀裂の 3D 形態、多結晶粒の方位、粒界方位の情報を得ることが出来る。Fig. 12 にデータ例を示す。

3.6.4. PIE への適用

3D-EBSD は、発電炉用燃料の高燃焼度化に伴う燃料・材料の微細組織変化の観察に利用できる。主な用途を以下に示す。

1) 被覆管集合組織観察

燃料被覆管は、水素化物の析出方向制御や耐燃料-被覆管相互作用 (Pellet Cladding Interaction : 以下、「PCI」という。) 性を向上させるためにジルコニウム

の稠密六方晶の C 軸を半径方向に配向させてある。PCI とはペレットが熱変形によってつぶみ状になり、その結果ペレットが被覆管を内側から押し広げて被覆管の局部に応力が生じ、ペレットから放出されるヨウ素等の核分裂生成物（Fission Products：以下、「FP」という。）が重畳して応力腐食的な作用で被覆管に損傷を与えるものである。そのため、炉内長期使用時のジルカロイ組織変化や配向性への影響等に関する詳細なデータの取得が必要である。3D-EBSD によって、被覆管断面方向に加えて軸方向の組織変化に関する情報も取得できるため、有効であると考えられる。

2) 被覆管中の水素化物拡散挙動解明

ジルカロイ被覆管中の水素は拡散によって稠密六方晶底面（(0002)面）に水素化物を形成する。水素化物の集積とそれに起因する被覆管の脆化は被覆管の破損につながり、高燃焼度燃料では特に注意すべき現象である。そのため、被覆管中での水素の位置、結晶中での位置は、こうした脆化の要因を調べるために重要な知見であり、詳細に調査しておく必要がある。これまでは金相試験等により、被覆管断面方向の水素化物の分布状態をマクロ的に観察してきたのみであったが、EBSD、さらに 3D-EBSD を用いることにより、深さ方向の水素化物分布も観察可能となる。

3) 燃料ペレットのリム層観察

高燃焼度燃料では、ペレット外周部にリム層と呼ばれる、帯状の再結晶領域（微細粒）が形成される。この領域は、細かな結晶が集積したカリフラワー状組織になっており、気孔率も急激に増大している。リム層領域での結晶方位の観察や FP 元素の同定によって、これまでより詳細なデータが得られ、リム層生成メカニズムの解明に役立つと考えられる。また、3D-EBSD でのデータ取得によって、ペレット内の FP の位置や分布をより詳細に把握することが可能となる。

3.6.5. PIE の適用による課題

PIE での試験は、分析対象物が放射性物質なため試験装置をセルの中に設置してある。そのため、測定への放射線の影響を低減する必要があり、セル外でも操作できるように遠隔操作用に装置の改造等をしなくてはならない。こうした放射線の影響低減及び遠隔操作性の向上に関して、検討した事項を以下に列記する。

- 1) 回折パターンを検出器上に投影する蛍光スクリーンと CCD カメラの素子間に鉛ガラスを取り付けることで、放射線への耐性が小さい CCD カメラの使用寿命を延ばす。
- 2) 試料からの放射線の影響により、分析時に BG が上昇する。BG の上昇を低減させるために、試料室内に遮へい用シールドを設ける。
- 3) 放射性物質を扱うため、試料交換機構及び試料ホルダを遠隔操作対応型にする。
- 4) 耐震性の向上
- 5) 装置のメンテナンス性の改善

3.6.6. 結論

3D-EBSD を使用すると、金相試験や EBSD では確認することが出来なかった深さ方向での結晶の傾きやそれぞれの結晶の関連性の情報を PIE でも得ることが出来る事が分かったが、3次元の画像情報を得るためには何度も研磨をしなければいけない。なるべく傷をつけずに観察をしたい試料に対してはあまり有効ではない。しかし、PIE に有効な点、課題点はあるが今後の PIE にとって欠かすことのできない装置になると考え 3D-EBSD を次世代 PIE 装置として提案する。

3.7. その他の 3 次元試験装置

3D-EBSD の他に（独）物質・材料研究機構と（株）中山電機の共同で「縦型全自動シリアルセクションング 3D 顕微鏡」という装置も開発されている³⁷⁾。装置の概要として、総重量約 40 kg の卓上型で、観察、研磨、洗浄、エッチングの作業を全自動で繰り返して行う。その後は、3D-EBSD と同じように画像を再構築し材料の 3D 組織像を得る。しかし、3D-EBSD とは異なり結晶の方位を確認することが目的でないため、組織のみの像しか得ることはできないが、観察可能範囲が数百 μm ある。研磨から撮影までの所要時間は 1 サイクル当たり 10 分以下であり、100 枚の連続断面画像の撮影も 1 日以内で終わることが出来る。この装置を使用することによって、材料の組織を効率よく 3D で見る事ができる。また、材料の破壊機構解明などに利用でき、原子力発電所で問題となる応力腐食割れの発生起点の解明等にも利用されていくと考えられる。この装置を PIE 用に適用するにあたっては、遠隔操作性と遮蔽を考慮しなければならない。現在、燃料試験施設にある研磨機や顕微鏡は遠隔操作性を考慮し、マニプレータで簡単に操作、メンテナンスができるような構造に改良してある。これと同様な構造をこの装置にも適用する必要がある。また、この装置は研磨機と顕微鏡が隣接しているため、試料調製の段階で研磨機から高放射線が発生する恐れがある。そのため、耐放射線の小さい顕微鏡やカメラから放射線の影響を少なくなるため、研磨機と顕微鏡の間に遮蔽を設ける必要があると考える。

3.8. まとめ

今後、PIE を進める上で幾つかの課題がある。まず、JAEA のホットラボにおける現状の装置等では、核燃料等のふるまいをより詳細に評価するためには、更なる手法・装置の拡充やそれに伴う技術開発が必要な点である。特に、燃料のふるまいをより詳細に理解・解明するためには、より微細な観察・分析等が必要である。また、今回この報告書を作成するにあたって、様々な施設での研究成果を見てきたが、同じような内容の報告書が多数あることに気付いた。ある研究を一つの施設が独自に進めた場合と多施設が共同でその研究を進めることを比較すると、前者の方が研究にかかる時間

や費用もその分増加する結果となり、結果的に原子力科学技術の進歩が遅れてしまうことにつながる。新しい PIE 技術や装置の開発には多くの新しいアイデアやノウハウが求められるため、複数のホットラボ間で緊密に連携することにより、開発がよりスムーズに進み、より有用な技術が開発できると考えられる。そのため、こうした課題解決のための国際連携・協力を進めることも、今後の PIE にとって重要な課題となると考える。

4. あとがき

分析・研究施設と次世代 PIE 装置について、福島技術開発試験部の若手技術者が中心となって検討を行い、成果をまとめたのが本報告書である。

分析・研究施設については、福島研究開発部門福島廃炉技術安全研究所が概念設計を進めている段階であり未だ明確な青写真ができ上がっていないため、検討のベースとなる参考情報不足の中での検討となった。このため、具体的イメージがない中での検討を余儀なくされたが、逆に言えばフリーハンドの検討が出来たということであり、自由な発想が活かした検討を行えたことは幸いであった。今後、分析・研究施設の設計が進捗していくが、ホットラボ技術者として新規施設に対応できるよう常に海外の情報を含めた最新 PIE 技術に関する情報を収集しておくことが必要である。

次世代 PIE 装置については、海外の PIE ニーズ調査結果を踏まえて検討を行った結果、微細な領域の核燃料等のふるまいを可能とする装置を選択した。我が国の原子力開発の方向性が先行き不透明であるため、世界的視野に立てば将来やるべきことは多数あっても果たして我が国で実行出来るのか、確信が持てない中での検討であったが、本検討のような前向きの発想を今後も継続することによって、原子力開発の継承に導く努力をしていくことは重要であると思う。

本報告書は完成品ではなく、本検討に深見を与える作業が改めて必要であると感じている。今後は、本報告書を「原石」として、今後さらなる議論・経験を蓄積しながら本検討結果を磨いていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 原子力研究開発機構, 米国スリーマイル島 (TMI) 原発事故に関する文献情報, http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/ird/sanko/sanko_jyoho.html#02 (2014年12月16日参照)
- 2) 三木 安夫ほか, 両腕型サーボマニプレータの開発総括報告書(制御関連他)(業務報告), JNC TN8440 2000-001, 2000.
- 3) 永峯 剛ほか, 照射後試験用 X線 CT 検査装置の開発ー「常陽」使用済炉心燃料集合体を用いたホット試験ー(技術報告書), JNC TN9410 99-020, 1999.
- 4) 永峯 剛ほか, 照射後試験用 X線 CT 装置の開発ーデータ活用法の検討ー(技術報告), JNC TN9410 2001-022, 2002.
- 5) 株式会社 光子発生技術研究所「X線 CT 検査装置, マイクロトロン 関連情報」, <http://www.photon-production.co.jp/j/products/ct.htm> (2014年3月6日参照).
- 6) 経済産業省, 東日本大震災 関連情報, 廃止措置に向けた取組, <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning.html> (2014年3月3日参照).
- 7) 東京電力(株)
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/conference-j.html>
(2014年3月3日参照).
 - ・「原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」
 - ・「廃炉・汚染水対策チーム会合 事務局会議」報告資料
 - ・「汚染水処理対策委員会」報告資料
 - ・「廃炉・汚染水対策現地調整会議」報告資料
- 8) 栃山 修ほか, 福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分～研究開発課題の抽出と解決に向けた考え方～(報告書), 日本原子力学会, 2014.
http://www.aesj.or.jp/special/report/2012/s_jikohaikibutsu20130318.pdf
- 9) 前田 浩治ほか, 福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた 2-①-1 建屋内遠隔除染技術の開発; JAEA におけるサンプルの詳細分析結果, JAEA-Research 2013-025, 2014, 123p.
- 10) 亀尾 裕ほか, 研究施設等廃棄物に含まれる放射性核種の簡易・迅速分析法(分析指針), JAEA-Technology 2009-051, 2009, 81p.
- 11) 亀尾 裕ほか, 研究施設から発生する廃棄物に対する体系的な放射能分析法, 日本原子力学会和文論文誌, 10(3), 2011, pp.216-225.
- 12) 西原 健司ほか, 福島第一原子力発電所の滞留水への放射性核種放出, 日本原子力学会和文論文誌, 11(1), 2012, pp.13-19.
- 13) 西原 健司ほか, 福島第一原子力発電所の燃料組成評価, JAEA-Data/Code 2012-018, 2012, 190p.
- 14) Yoshitaka, T. et al., Sequential inductively coupled plasma quadrupole mass-spectrometric quantification of radioactive strontium-90 incorporating

- cascade separation steps for radioactive contamination rapid survey, The Royal Society of Chemistry Analytical Methods, 6(2), 2014, pp.355-362.
- 15) 佐藤 義行ほか, アクチノイド分析のためのキャピラリー電気泳動-レーザー励起蛍光検出用新規プローブの開発, 日本分析化学会第 62 回年会, 大阪, 2013.
 - 16) Masabumi, M. et al, Spectroscopy of laser-produced cerium plasma for remote isotope analysis of nuclear fuel, Applied Physics A, 101(1), 2010, pp.65-70.
 - 17) Masabumi, M. et al., Laser ablation absorption spectroscopy for remote analysis of uranium, Hyperfine Interactions, 216, 2013, pp.71-77.
 - 18) Masabumi, M. et al, Development of RIMS Apparatus for Isotope Analysis of Calcium in Nuclear Waste Materials, Journal of Nuclear Science and Technology, 43(4), 2006, pp.305-310.
 - 19) 赤岡 克昭ほか, レーザーブレイクダウン発光分光法によるウランスペクトルの測定 (受託研究), JAEA-Research 2009-029, 2009,49p.
 - 20) 赤岡 克昭ほか, カルシウムを添加したウランのレーザーブレイクダウン発光分光分析; 時間分解分光 (受託研究), JAEA-Research 2010-004, 2010,13p.
 - 21) 赤岡 克昭ほか, カルシウムを添加したウランのレーザーブレイクダウン発光分光分析; レーザー光強度依存性 (受託研究), JAEA-Research 2010-036, 2010,14p.
 - 22) Idaho National Laboratory, International Workshop on Characterization and PIE Needs for Fundamental Understanding of Fuels Performance and Safety.
 - 23) 株式会社 住化分析センター
http://www.scas.co.jp/principle/pdf/pa_28cro.pdf
 - 24) 一般社団法人 日本分析機器工業会, 「分析の原理」 21 高速液体クロマトグラフの原理と応用.
http://www.jaima.or.jp/jp/basic/pdf/basic_21.pdf
 - 25) 一般社団法人 日本分析機器工業会, 「分析の原理」 17 核磁気共鳴装置の原理と応用.
http://www.jaima.or.jp/jp/basic/pdf/basic_17.pdf
 - 26) 株式会社 東レリサーチセンター, 分析機能と原理 構造解析.
<http://www.toray-research.co.jp/kinougenri/kouzou/>
 - 27) 株式会社 東レリサーチセンター, 分析機能と原理 表面分析.
<http://www.toray-research.co.jp/kinougenri/hyoumen/>
 - 28) 日鉄住金テクノロジー株式会社, 物性評価 (物性測定),
 - 29) http://nsst.nssmc.com/research_support/bussei_Thermal_dannetsu.html
(2014 年 12 月 16 日参照)
 - 30) ヤマト科学株式会社, 融点測定器,
 - 31) <http://www.yamato-net.co.jp/product/advanced/analysis/melting/>
(2014 年 12 月 16 日参照)
 - 32) 藤井 克彦, 「原子力に係る先進的研究開発」 中性子照射による材料劣化機構の解明, 敦賀「原子力」夏の大学, 2006, 福井.
 - 33) 宝野 和博, アトムプローブ電界イオン顕微鏡 入門講座 分析試験法編-13, ふえらむ, 4, 1999, pp.474-481.

- 32) 高橋 淳ほか, 3次元アトムプローブによる鋼材解析技術の進展-鋼材中の特定領域の針試料作製技術の開発-, 新日鉄技報第 390 号, 2010, pp.20-27.
- 33) 本田 順一ほか, 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, 2012,35p.
- 34) 辻 伸泰, 材料技術者・研究者のための EBSD による局所方位解析技術の基礎と応用, 日本金属学会・鉄鋼協会関西支部 平成 20 年度材料セミナー, 大阪, 2008.11.28.
- 35) 日本電子株式会社, SEM による結晶解析 (EBSD) 例,
<http://www.jeol.co.jp/applications/detail/855.html>(2014 年 3 月 11 日参照)
- 36) 榎本正人, シリアルセクションングによる鋼鉄組織の 3 次元可視化と解析, 鉄と鋼, 90(4), 2004, pp.183-189.
- 37) (独) 物質・材料研究機構, 縦型シリアルセクションング 3D 顕微鏡 “Genus_3D” の開発 -材料学も 3D の時代へ-, プレスリリース, 2011.3.3.
<http://www.nims.go.jp/news/press/2011/03/201103030/p201103030.pdf>

Table 1 TMI-2 デブリ試料に対して実地された物理的試験の調査結果(1/2)

試験項目	目的	方法及び使用機器	結果
外観検査	治具開発、TMI-2 炉心デブリや燃料撤去作業時の安全性の確認	ペリスコープ	燃料ペレット片と溶融物の複合物が約 44%、燃料ペレット片が約 36%、多孔質な溶融物が約 17%、残りが被覆管及び金属性の溶融物
重量・密度	治具開発、TMI-2 炉心デブリや燃料撤去作業時の安全性の確認	バルクタップ密度測定 (40%程度の不確かさあり) 水浸法による密度測定	バルクタップ密度測定の結果は 3.5～5.0g/cm ³
粒径分布測定	治具開発、TMI-2 炉心デブリや燃料撤去作業時の安全性の確認	粒径 1000 μ m 以上の粒子の篩い分けには乾式法、粒径 1000 μ m 以下の粒子の篩い分けにはフレオンを用いた湿式法	<ul style="list-style-type: none"> ・ デブリ試料の約 81Wt%が粒径 1mm 以下、このうち 1～4mm が約 56Wt%、1mm 以下が 19Wt% ・ デブリ粒子の最大径は約 20mm ・ デブリ層の深部ほど粒径の小さなデブリ粒子のサンプル中での重量パーセントが増加する傾向あり

Table 1 TMI-2 デブリ試料に対して実地された物理的試験の調査結果(2/2)

試験項目	目的	方法及び使用機器	結果
磁性体試験	磁石によって取り出しができるか否かを検討する試験	磁石でサンプル中の磁性粒子の分離を行い、それぞれの粒径範囲に属する粒子の重量測定	デブリ層表面 8cm の深さの粒径 45 μ m 以下の粒子が磁性粒子全体の約 67Wt%を占め、デブリ層表面 56cm の深さの粒径 1~4mm 以下の粒子が磁性粒子全体の約 58.6Wt%を占めた。磁性粒子の占める重量パーセントは、デブリ層表面 8cm の深さの粒径は小さくなり、デブリ層表面 56cm の深さの粒径は大きくなった。デブリ層表面から 8cm、56cm にある粒径 4mm 以上の粒子は磁性を示さなかった。
サンプル燃焼試験	TMI-2 炉心デブリや燃料撤去作業時の安全性の確認	スパークテスト、プロパントーチテスト、高酸素濃度雰囲気下における打撃テスト	発火及び燃焼なし
金相試験	事故シナリオを明らかにするために、TMI-2 炉心の温度履歴を推定	UO ₂ 燃料の結晶粒の成長や溶融の有無、ジルカロイの相変化やジルカロイ-UO ₂ の反応の痕跡、デブリ試料に含まれる合金相や介在物の観察分析、燃料棒とそれ以外の炉心材との反応を調査(金属顕微鏡, SEM/EPMA, Auger Electron Spectroscopy : AES)	金相試験をしたサンプルのほとんどが UO ₂ /Zr 共晶反応 (1834°C)以上の温度に達し、これらの粒子の 42%がセラミック溶解(2537°C)以上の温度に達したことを示した。

Table 2 分析・研究施設における研究開発及び分析内容

研究開発・分析項目	目的	分析対象物
廃棄物の性状調査	環境試料の処理・処分方策の検討	瓦礫、伐採木、土壌等
	汚染水処理に伴う処理・処分方策の検討	淡水化処理水、低線量スラッジ・吸着材等
	解体廃棄物、炉内構造物等の性状調査	高線量瓦礫、コアボーリング試料等
廃棄体化技術の開発	汚染水処理二次廃棄物等の処理・処分技術の開発	高線量スラッジ、セシウム吸着塔等
	デブリ試料の処理技術開発	デブリ試料

Table 3 予想される分析対象物の表面線量

分析対象物		表面線量(μ Sv/h) [※]	試料採取場所等
環境試料	伐採木	BG ~ 100	原子炉周辺及びその外側
	枝葉		
	落葉		
	土壌		
汚染水処理	淡水化処理水	40 ~ 150	汚染水処理設備
	滞留水	360 ~ 3000	—
解体廃棄物等	撤去瓦礫	150 ~ 3000	1号機建屋
スラッジ、セシウム吸着塔		1 mSv/h ~ 10 mSv/h (保管容器もしくは吸着塔表面)	汚染水処理設備

※ 100g(もしくは100ml)当たり

Table 4 各分析対象物と受入設備案

分析対象物	推定線量	受入・取扱設備
環境試料	100 μ Sv/h 以下	フード
淡水化処理水	約 100 μ Sv/h	
滞留水	約 1 mSv/h	GB、フード
解体廃棄物等	約 1 mSv/h (炉内構造物では1mSv/h 以上と推定)	
スラッジ、セシウム吸着塔	1 mSv/h 以上	セル、GB、フード
デブリ試料	1 mSv/h 以上	

Table 5 分析・研究施設で必要となると想定される主な分析装置

分析装置	分析対象物の推定線量 (主な取扱設備)	100 μ Sv/h 以下 (フード)	約 1mSv/h (GB)	1mSv/h 以上 (セル)
Ge 検出器		○	○	○
イオンクロマトグラフ		○	○	○
誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (ICP-AES)		○	○	○
誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS)		○	○	○
表面電離型質量分析装置(TIMS)		○	○	—
液体シンチレーションカウンタ		○	—	—
β 線スペクトロメータ		○	△	△
α 線スペクトロメータ		○	△	△
X 線回折分析装置		○	○	△
SEM-EPMA		○	○	○
透過型電子顕微鏡(TEM)		○	△	×
電気炉		○	○	○
燃焼装置(石英管等)		○	—	—
マイクロ波加熱装置		○	△	△
集束イオンビーム加工観察装置(FIB)		○	×	×

○：JAEA で各取扱設備への設置実績あり

△：JAEA で各取扱設備への設置実績がないが、設置・使用が可能と推測されるもの

×：JAEA で各取扱設備への設置実績がなく、設置・使用が難しいもの

—：未調査

Table 6 試験装置リスト(1/9)

定性分析
<p>・ガスクロマトグラフ (Gas Chromatograph : GC)</p> <p>移動相が気体であり、気化しやすい化合物の同定・定量に用いられる機器分析装置。</p>
<p>・ガスクロマトグラフ質量分析計²³⁾</p> <p>(Gas Chromatograph Mass Spectrometer : GC-MS)</p> <p>試料混合物を高分離能で分離できるガスクロマトグラフと高感度に化合物を同定する質量分析計を取り付けた複合装置。</p>
<p>・高速液体クロマトグラフ質量分析計</p> <p>(High Performance Liquid Chromatograph Mass Spectrometer : HPLC-MS)</p> <p>高速液体クロマトグラフと質量分析計を直結した装置を用いてそれぞれの能力を相乗的に活用して試料の高度な物質情報を高感度に得られる装置。</p>
<p>・高速液体クロマトグラフ (High Performance Liquid Chromatograph : HPLC)²⁴⁾</p> <p>液体の移動相をポンプなどによって加圧してカラムを通過させ、分析種を固定相及び移動相との相互作用の差を利用して高性能に分離して検出する装置。</p>
<p>・イオンクロマトグラフ (Ion Chromatograph : IC)</p> <p>イオン交換樹脂に対するイオンの吸着力の差を利用して分離・定量を行う装置。</p>
<p>・ICP 発光分析装置</p> <p>(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer : ICP-AES)</p> <p>高周波誘導結合プラズマを光源とする発光分光分析法である。試料溶液を霧状にして Ar プラズマに誘導し励起された元素が基底状態に戻る際に放出される光を分光して、波長から元素の定性、強度から定量を行う装置。</p>
<p>・ICP 質量分析装置/誘導結合プラズマ質量分析装置</p> <p>(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer : ICP-MS)</p> <p>Ar のプラズマをイオン化源とする質量分析法を用いた装置。</p>
<p>・原子吸光分析装置 (Atomic Absorption spectrometer : AA)</p> <p>高温に加熱して原子化した物質に光を照射したときに構成元素に固有の幅の狭い吸収スペクトルを示し、それを利用して試料に含まれる元素の定性と定量を行う装置。</p>

Table 6 試験装置リスト (2/9)

定性分析
<p>・蛍光 X 線分析装置 (X-Ray Fluorescence Spectrometer : XRF)</p> <p>検出される蛍光 X 線の波長を解析する事により存在する元素が分かり、X 線の強度から元素の含有量が分かる装置。</p>
<p>・元素分析装置 (Elemental Analyzer)</p> <p>有機化合物の主構成元素の H,C,N,S を完全燃焼分解して、H₂O、CO₂、N₂、SO₂ に変換する。各成分を測定し、試料の構成元素を測定する装置。</p>
<p>・核磁気共鳴装置 (Nuclear Magnetic Resonance : NMR)²⁵⁾</p> <p>強い磁場の中に試料を置き、核スピンの向きをそろえた分子にパルス状のラジオ波を照射し、核磁気共鳴させた後、分子が元の安定状態に戻る際に発生する信号を検知して、分子構造などを解析する装置。</p>
<p>・液体クロマトグラフ (Liquid Chromatograph : LC)</p> <p>互いに混じり合わない二つの相と、接しながら流動する相とで構成された系の中で、物質を分離する装置。</p>
<p>・電子線マイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA)</p> <p>微小部(～1 μm)～広域(100 μmφ)のサブ wt%程度の微量の元素組成分析が可能。 カラーマッピングによる組成分布(均一性、偏析、拡散など)測定が可能。 状態分析による化合物の簡易的な判定が可能(金属 or 酸化物、硫化物 or 硫酸塩など)。</p>
<p>・表面電離型質量分析装置 (Thermal Ionization Mass Spectrometer : TIMS)</p> <p>陽イオンクロマトクロマトグラフィーなどを用いて元素を抽出し、フィラメントオープンで脱ガスした金属フィラメントに塗布する。フィラメントを高真空条件で加熱し、試料をイオン化させ電場と磁場でイオン中の安定同位体を分離収束させた後、検出器で安定同位体の存在比を測定する。</p>

Table 6 試験装置リスト (3/9)

構造分析
<p>・赤外分光装置 (Infrared Spectroscope : IR)²⁶⁾</p> <p>振動スペクトルの解析から、組成・構造・官能基などの情報を得ることができ、ATR・透過法・反射法など種々の測定モードにより、極表面やバルクの情報が得られる。ポリマー・無機固体材料はもちろん、高感度なガス分析法としても有効である。</p>
<p>・ラマン分光装置 (Raman Spectroscope : Raman)²⁶⁾</p> <p>振動スペクトルの解析から、組成・構造・結晶性・配向性などの情報を得ることができ、顕微ラマンを用いることにより、約1μmの領域のスペクトルの測定ができる。その他、ポリマー・有機物、ガスから無機物・半導体まで幅広い測定対象に適用する。</p>
<p>・固体核磁気共鳴装置 (Solid-State Nuclear Magnetic Resonance Spectroscope : SSNMR)²⁶⁾</p> <p>有機化合物・医薬品・蛋白や無機化合物の構造解析、組成分析に幅広く利用される。定量分析も可能。固体NMRは不溶性材料の評価に有用。高次構造や結晶多形などの情報が得られる。緩和時間測定による分子運動性評価から結晶性などの相対評価が得られる。</p>
<p>・電子スピン共鳴装置 (Electron Spin Resonance Spectroscope : ESR)²⁶⁾</p> <p>ESRは、不対電子が磁場中に置かれた時に生じる準位間の遷移を観測する装置。ESRスペクトルの強度、g値、線幅、超微細構造などから、不対電子を有する欠陥や化学種の量、構造、運動性、反応に関する情報が得られる。</p>
<p>・可視・紫外分光光度計 (Ultraviolet-Visible Spectroscope : UV-VIS)²⁶⁾</p> <p>可視・紫外分光光度計は、原子核、あるいは分子を周回している電子が、エネルギーの低い軌道からよりエネルギーの高い軌道への遷移する際の光吸収を測定する装置。スペクトルから、物質の黄変(変色)、結晶や粉末の光学的バンドギャップ、吸収率、輻射率、分子配向などに関する情報が得られる。</p>
<p>・X線回折装置 (X-Ray Diffraction : XRD)²⁶⁾</p> <p>X線回折とは、X線が結晶格子によって回折される現象のことである。結晶の規則性は物質特有であり、X線を測定対象となる物質に入射させることで、その物質に特有な回折線が得られる。回折線の詳細な解析から、その物質の結晶構造が得られる。</p>
<p>・カソードルミネッセンス測定装置 (Cathodo Luminescence Spectroscope : CL)</p> <p>電子線照射により励起された電子のエネルギー準位変化に伴って放出される光を検出する手法。SEMやTEMを使用し、任意の場所の発光スペクトルや強度像を測定する。微小領域の評価に適しており、深さ方向の測定も可能。セラミック等の試料も測定可能であり、試料中の不純物や格子欠陥等の情報が得られることから、半導体や発光素子の評価等に用いられる。</p>
<p>・メスバウアー分光装置 (Mössbauer spectroscopy)</p> <p>原子核がγ線を共鳴吸収する現象を利用して、試料の吸収スペクトルを測定する。鉄の利用が多く、化合物中の鉄の価数、配位環境、磁性などの情報を選択的に得られる装置。</p>

Table 6 試験装置リスト (4/9)

表面分析
<p>・ X線光電子分光装置 (X-ray Photoelectron Spectroscope : XPS)</p> <p>最表面～数 nm における元素組成・化学状態の情報が得られ、イオンエッチングと併用することにより深さ方向の分析が可能となる。ポリマー・有機物から無機物・半導体まであらゆる固体材料の分析に適応可能。</p>
<p>・ オージェ電子分光装置 (Auger Electron Spectroscopy : AES)²⁷⁾</p> <p>Li 以上の元素の定性・半定量分析が可能で、一部元素では化学状態の情報も得られる。サブ μm 以下の空間分解能での微小領域の元素分析ができ、ライン分析や面分析も可能。Ar イオンエッチングを併用することで、深さ方向の元素分布分析が可能。</p>
<p>・ 二次イオン質量分析装置 (Secondary Ion Mass Spectrometer : SIMS) ²⁷⁾</p> <p>表面分析手法としては最も高感度で不純物分析や H 検出でき、極浅(数 nm)から深く(数 $10\mu\text{m}$)まで広い深さ範囲の評価が可能。半導体の他、金属、ガラス、セラミックス、樹脂など、ほとんどの固体試料に適応可能。</p>
<p>・ 飛行時間型質量分析装置 (Time of Flight Mass Spectrometer : TOF-MS)</p> <p>既知の電場により荷電粒子を加速させることで運動エネルギーを得る。それと加速された荷電粒子の飛行時間を計測することで、質量を測定することが可能な装置。</p>
<p>・ ラザフォード後方散乱分光装置 (Rutherford Backscattering Spectrometer : RBS)²⁷⁾</p> <p>後方散乱スペクトルの解析から、深さ方向の組成分布を得ることが可能。 チャネリング測定を用いることにより、結晶性・格子置換率・歪み評価が可能。 高分解能 RBS(High Resolution RBS : HR-RBS)測定により極薄膜の深さ方向組成分析が可能。</p>
<p>・ 水素前方散乱分析装置 (Hydrogen Forward scattering Spectrometer : HFS)、核反応解析装置 (Nuclear Reaction Analyzer : NRA)、粒子線励起 X 線分析装置 (Particle Induced X-ray Emission : PIXE)²⁷⁾</p> <p>HFS : 水素前方散乱スペクトルの解析から、試料中水素の深さ分布を得ることが可能。 NRA : 核反応により発生する α 線、γ 線を検出することにより、試料中軽元素の高感度定量が可能。 PIXE : イオン励起による特性 X 線を検出することにより、RBS では分離困難な近接重元素の定量分析が可能。</p>
<p>・ X 線吸収微細構造解析装置 (X-ray Absorption Fine Structure Analyzer : XAFS Analyzer)²⁷⁾</p> <p>着目元素の価数や局所構造などの情報が得られる。 粉末・液体・基板上薄膜などのあらゆる試料形態での分析が可能。 混合ガス流通下における加熱雰囲気下($\sim 1000^\circ\text{C}$)での測定(in situ XAFS)も可能。</p>

Table 6 試験装置リスト (5/9)

表面分析
<p>・透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope : TEM) 観察したい試料に対して電子ビームを照射して、透過してきた電子を結像して観察を行う電子顕微鏡であり、電子は試料と相互作用を及ぼすために非常に薄い試料を用いる必要がある。</p>
<p>・電子線微小分析装置 (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA) 樹脂から金属、無機材料に至る幅広い材料の表面・断面の組織・構造観察が可能。数十万倍程度(～数十 nm オーダー)の SEM 像(凹凸像)、反射電子像(組成像)観察が可能。サブ μm オーダーの領域について、構成元素の定性・定量分析が可能。</p>
<p>・レーザー顕微鏡 (Laser Microscope) サンプルの直接観察が可能で、従来の顕微鏡よりも凹凸の激しい表面の撮影が可能になっただけでなく、充実した表面粗さ測定機能や形状測定器機能を表面形状解析が可能。</p>
<p>・エネルギー分散型 X 線分析装置 (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDX) 電子線や X 線などの一次線を物体に照射した際に発生する特性 X 線または蛍光 X 線を半導体検出器などのエネルギー分散型検出器にて検出し、エネルギーと強度から物体を構成する元素と濃度を調べる装置。SEM や EPMA の付属機器として利用される。</p>
<p>・X 線光電子分析装置 (Electron Spectroscopy for Chemical Analyzer : ESCA) 試料に X 線を照射して、試料表面から放出される光電子を測定することで構成元素の組成、化学結合状態を測定する。</p>
<p>・走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : SEM) 樹脂から金属、無機材料に至る幅広い材料の表面・断面の組織・構造観察が可能。数十万倍程度(～数十 nm オーダー)の SEM 像(凹凸像)、反射電子像(組成像)観察が可能。サブ μm オーダーの領域について、EDX により構成元素の定性分析ができる。</p>
<p>・共焦点レーザー顕微鏡 (Confocal Laser Scanning Microscope : CLSM) 共焦点光学系を用いることで、高分解能な画像と高精度な試料表面の起伏情報が得られる。試料表面の起伏状態を非接触で評価が可能。 レーザー光によってダメージを受けないため、幅広い試料に適用する。</p>
<p>・金属顕微鏡 金属・合金・セラミックの組織や研磨面、電子部品などの不透明な試料を観察することができる。</p>

Table 6 試験装置リスト (6/9)

熱物性
<p>・熱拡散率測定装置 (Thermal Diffusivity Measurement)</p> <p>定常法、非定常法と 2 つの測定法がある。非定常法のレーザーフラッシュ法では、試料片面をレーザーで瞬間的に加熱し、反対面の温度上昇を計測して熱拡散率を測定する。</p>
<p>・比熱測定装置 (Specific Heat Measurement)²⁸⁾</p> <p>測定試料が周囲に対して断熱である状態を維持しながら一定の熱量を与えた際の試料温度上昇を計測することにより、直接的に試料の比熱を測定する。</p>
<p>・熱伝導率測定装置 (Thermal Conductivity Measuring Apparatus)</p> <p>パルスレーザー光を試料表面に照射し、試料の温度上昇と時間から温度履歴曲線を得る。これにより比熱、熱拡散率を求め、熱伝導率を測定する。</p>
<p>・示差走査熱量測定装置 (Differential Scanning Calorimeter : DSC)</p> <p>測定試料と基準物質との間の熱量の差を計測することで、融点やガラス転移点などを測定する。</p>
<p>・熱重量測定装置 (Thermo Gravimeter : TG)</p> <p>試料の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料の質量を温度の関数として測定する。</p>
<p>・融点測定器 (Melting Point Determination Measurement)²⁹⁾</p> <p>ガラス毛细管に固体試料を入れ、濃硫酸やシリコンオイルの温浴にて加熱し、目視や装置による自動測定で融点を測定する。</p>

Table 6 試験装置リスト (7/9)

機械特性
<p>・ (高速 高温・低温) 引張試験機 (Tensile Testing Machine) 材料の引張荷重の挙動を測定する試験で、伸び・弾性係数・引張強度等の特性が分かる。</p>
<p>・ 曲げ試験機 (Bend Testing Machine) 短冊状試験片を使用して曲げ強さ、曲げ弾性率を評価する。</p>
<p>・ 圧縮試験機 (Compression Testing Machine) 試験片を圧縮して、圧縮荷重下の材料の挙動を測定する。圧縮応力と圧縮ひずみを計算して、弾性限度・圧縮強度などを求めることが可能。</p>
<p>・ クリープ試験装置 (Creep Testing Machine) クリープや応力緩和を測定するための試験装置。</p>
<p>・ ビッカース硬さ試験機/マイクロビッカース硬さ試験機 (Vickers Hardness Testing Machine/Micro-Vickers Hardness Tester) 小さな試料での測定ができセラミックス材料やプラスチックにも用いられる。</p> <p>・ ロックウェル硬さ試験機/ロックウェルスーパーフィシャル硬さ試験機 (Rockwell Hardness Testing Machine/Rockwell Superficial Hardness Testing Machine) 鉄鋼材料の硬さ測定に用いられる。測定誤差が少ないのが特徴。基準荷重が 98.07N の試験がロックウェル硬さ、29.42N の試験をロックウェルスーパーフィシャル硬さという。</p> <p>・ ブリネル硬さ試験機 (Brinell Hardness Testing Machine) 大きな範囲を測定することができ金属組織が一樣でない場合に適している。</p> <p>・ ショア硬さ試験機 (Shore Hardness Testing Machine) ある一定の高さから鋼球を試験片に落下させ跳ね返り高さから硬さを求める。</p> <p>・ 高温硬さ(ビッカース)試験機 (High Temperature Hardness Testing Machine) 1200℃でのビッカース硬さ試験が可能であり高温強度評価に最適である。</p>
<p>・ 破壊靱性試験機 (Test Method For Fracture Toughness Machine) き裂先端開口変位(Crack Tip Opening Displacement :CTOD)試験は、構造物の破壊靱性を評価する試験の一つであり、亀裂が急速に進展する前のき裂開口量を測定する。</p>
<p>・ 衝撃試験機 (Impact Testing Machine) シャルピー衝撃試験機 (Charpy Impact Machine) 切り欠きの入った試験片に衝撃を与えて破壊し、破壊するのに要したエネルギーと試験片の靱性を評価する。</p> <p>落重試験機 (Load Test Machine) 試験片の上に落錘を自由落下させて、試験片が破断するか否かを調べて材料の脆性破壊特性の優劣を調べる。</p>
<p>・ 疲労試験機 (Fatigue Testing Machine) 引張圧縮疲労試験、内圧疲労試験、回転曲げ疲労試験、高温疲労試験、腐食疲労試験を行う装置。</p>

Table 6 試験装置リスト (8/9)

機械加工
<p>・放電加工機 (Electric Discharge Machine) アーク放電を用いて機械加工をする方法。放電加工機を用いると複雑な形状を作製することが出来るが、被加工物が導電性でなければならない。</p>
<p>・切断機 (Cutting Machine) ダイヤモンドカッター等の刃を用いて試料を切断する機械。</p>
<p>・研磨機 (Abrasive Machine) 材料の表面を磨いて平滑にしていく機械。</p>
<p>・集束イオンビーム加工装置 (Focused Ion Beam : FIB) 細く収束したイオンビームを試料上で動かすことで試料表面を加工することが出来る。</p>
<p>・イオンミリング装置 (Ion Milling) 収束していない Ar イオンビームを試料に照射し、スパッタリング現象を用いた断面作製装置。</p>
<p>・クロスセクションポリシャー (Cross Section Polisher : CSP) Ar イオンビームを用いた平滑な断面試料作製が可能である。結晶方位等の観察に有効である。</p>
照射後試験で実績のある装置
<p>・FP 放出挙動試験装置 (Fission Products Emission Behavior Testing Machine) 実際に照射した燃料を温度制御しながら熔融するまで加熱し、その際の FP 放出の様子を測定する。</p>
<p>・γ スキャニングシステム (Gamma Scanning System) 燃料棒と γ 線検出器との相対的位置関係を変化させて γ 線を測定する。</p>
<p>・レーザー寸法測定装置 (Laser Dimension Measurement Device) 非接触レーザースキャンマイクロメータを使用し、測定試料の外径や厚さ、高さなどの各位置の寸法や形状を測定する。</p>
<p>・渦電流探傷装置 (Eddy Current Crack Detection Device) 導電性のある試料表面に交流電流を流したコイルを近づけ、渦電流を発生させる。渦電流から発生する磁束の変化を読み取り表面の傷等を検出する。</p>
<p>・バースト試験機 (Burst Testing Apparatus) パイプなどの管内に水やガスを充填し、加圧することで管を破壊して強度を測定する。</p>
<p>・脱ミート装置(defueling device) 燃料被覆管内の燃料をダイヤモンドドリル等により削り出す装置。</p>

Table 6 試験装置リスト (9/9)

照射後試験で実績のある装置
<p>・ ロッドパンクチャー試験装置 (Rod Puncture Test Apparatus) 被覆管に穴をあけて FP ガスを捕集する。</p>
<p>・ 画像解析装置 (Image Analysis Apparatus) 顕微鏡などから得られた画像をもとに、様々な測定を行う。</p>
<p>・ オートラジオグラフィー (Autoradiography) 試料表面に乳剤乾板を密着させて露出を行い、試料中に存在する放射性同位元素の位置や量を測定する。</p>
<p>・ 密度測定装置 (Densitometer) アルキメデスの原理を用いて、流体中にある試料が押しのけた部分の流体の重さに等しい浮力が働くことにより密度を測定する。</p>
<p>・ X 線ラジオグラフィー (X-ray radiography) X 線を物質に照射し、透過撮影図や物質の内部構造を観察する。</p>
<p>・ リーク試験装置 (Leak Detector) 真空装置の漏れを測定するため、装置内をハロゲンガスで満たし、リークしたハロゲンガスを検出する。</p>
<p>・ 酸化試験装置 (Oxidizing Apparatus) 試料を炉内で水蒸気雰囲気中で高温保持して酸化させる。</p>
<p>・ オートクレーブ (Autoclave Device) 内部を高圧力にすることが可能な耐圧性の容器を用いて高温高圧化で試験を行う。</p>
<p>・ 膨張率測定 (Dilatometry) 試料を一定の温度で上げていき、その際に試料が膨張する大きさを測定する。</p>

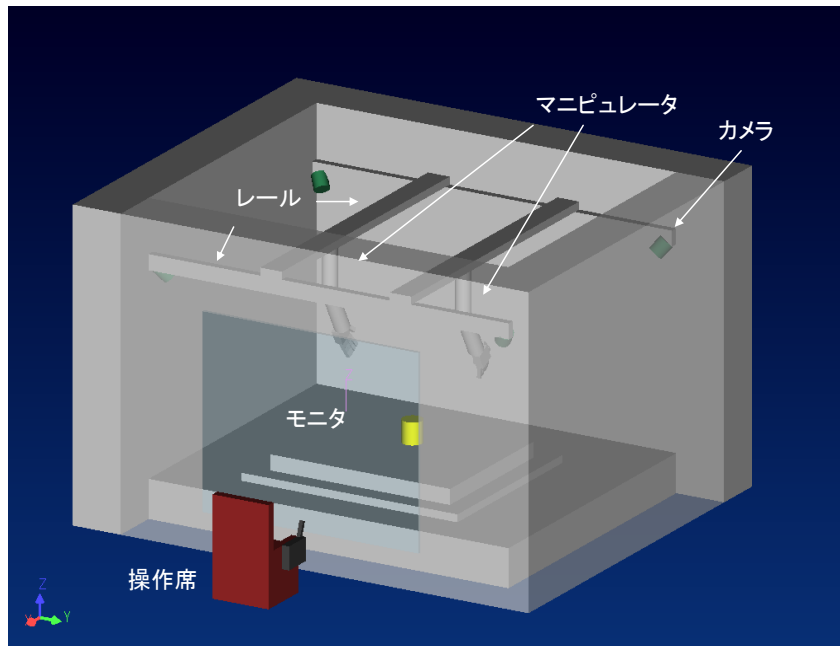


Fig. 1 ハンドリングシステムの構成概念図

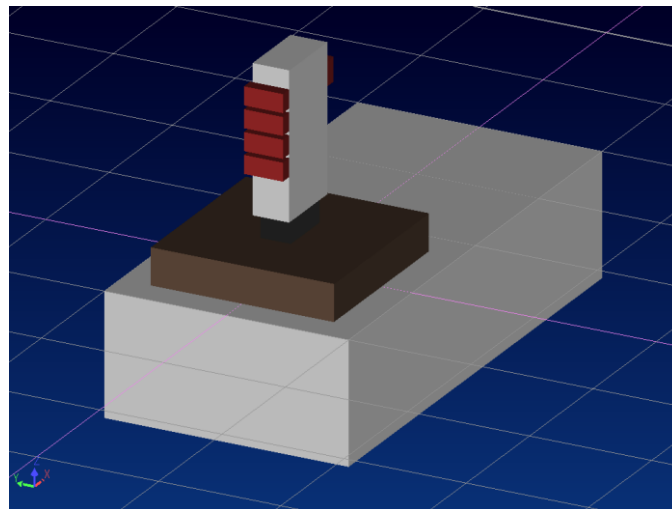


Fig. 2 新型マニピュレータ（マスター側）構造概念図

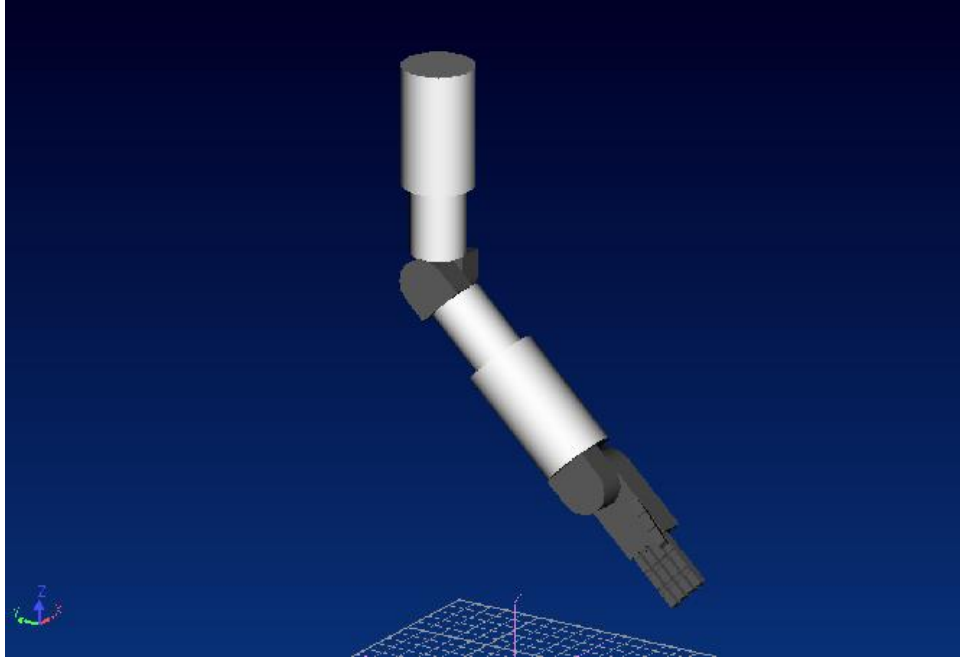


Fig. 3 新型マニピュレータ（スレーブ側）構造概念図

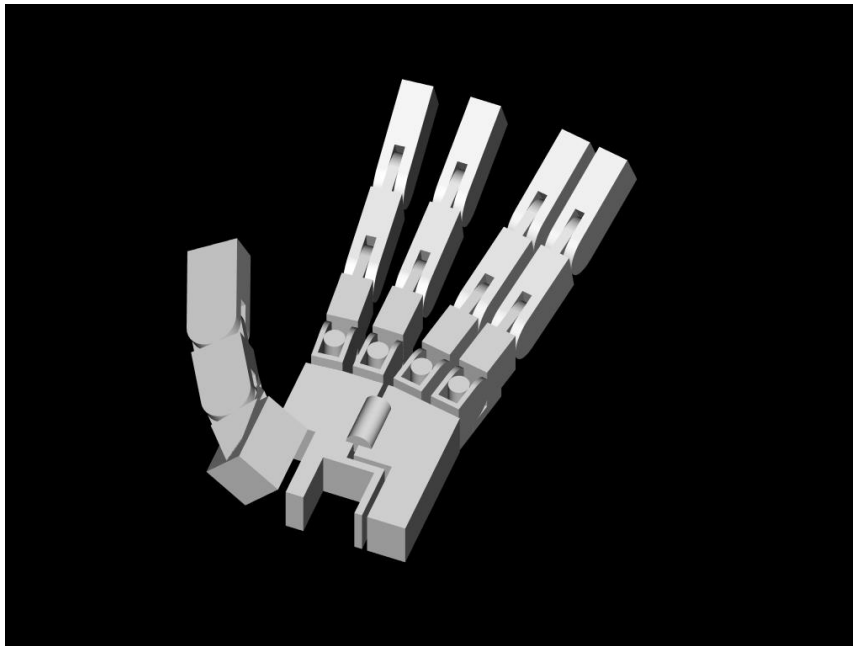


Fig. 4 ハンド部の構成概念図

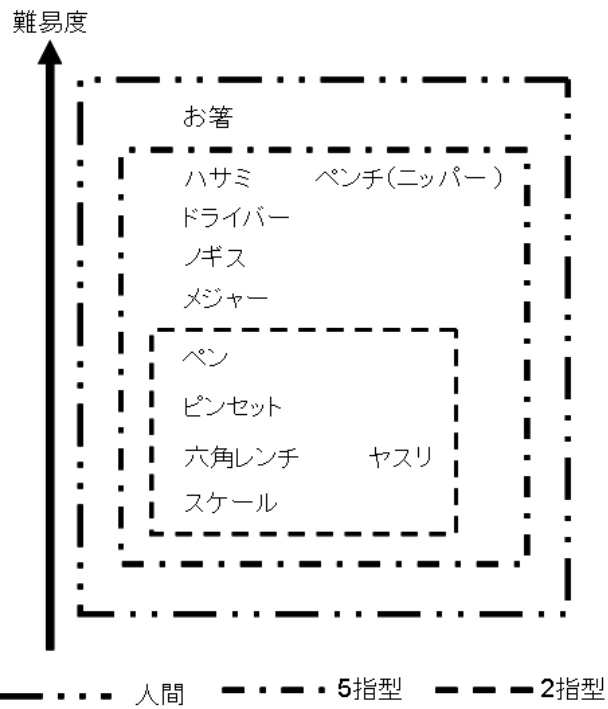


Fig. 5 PIE で使用する可能性のある道具及びそれらの難易度

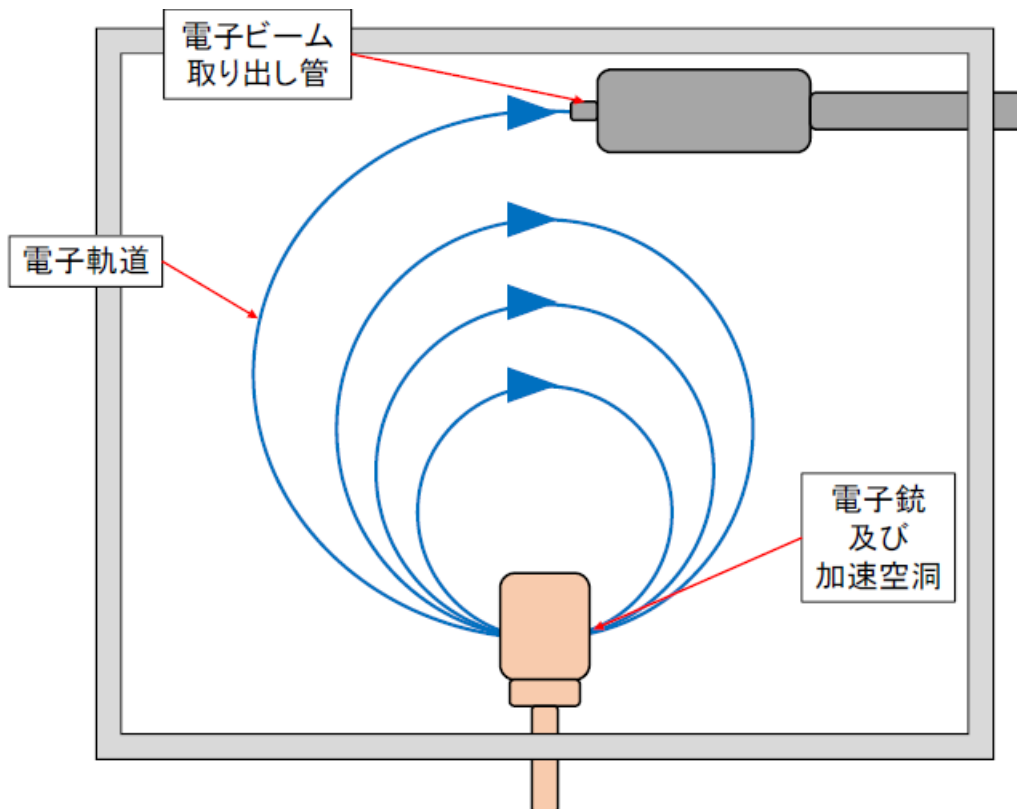


Fig. 6 マイクロトロン の概略イメージ

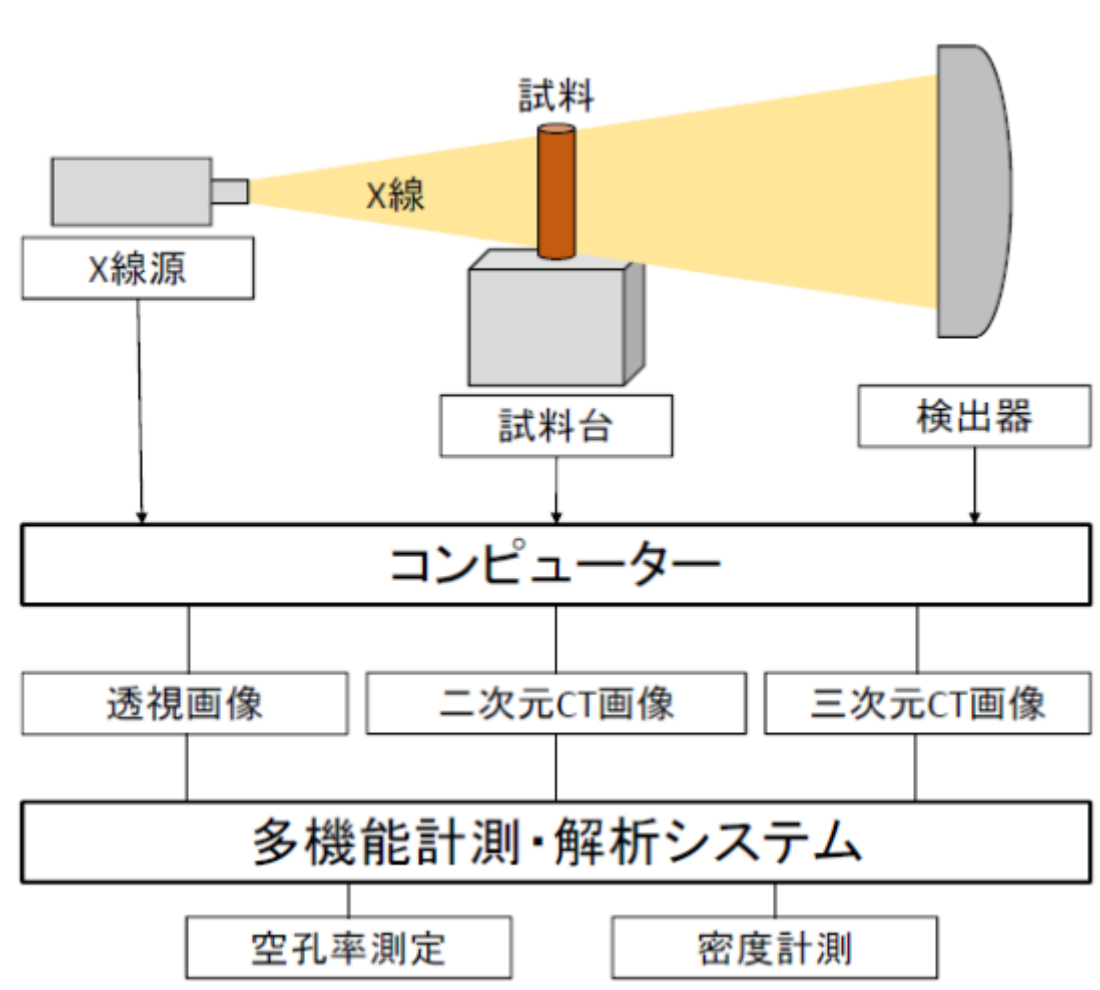


Fig. 7 システム図

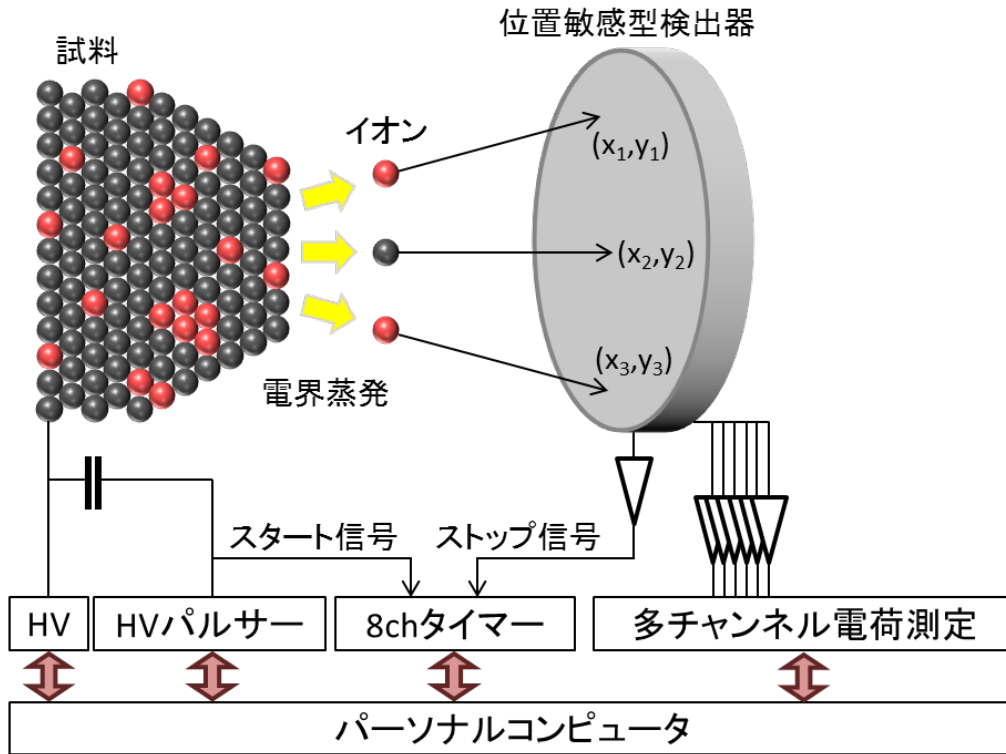


Fig. 8 3DAP 装置概要 ³¹⁾

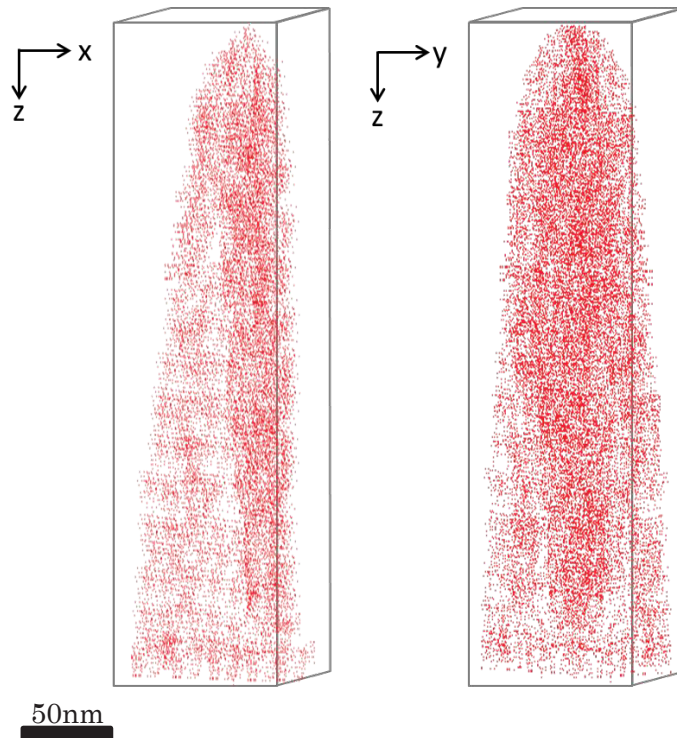


Fig. 9 3DAP 測定結果例

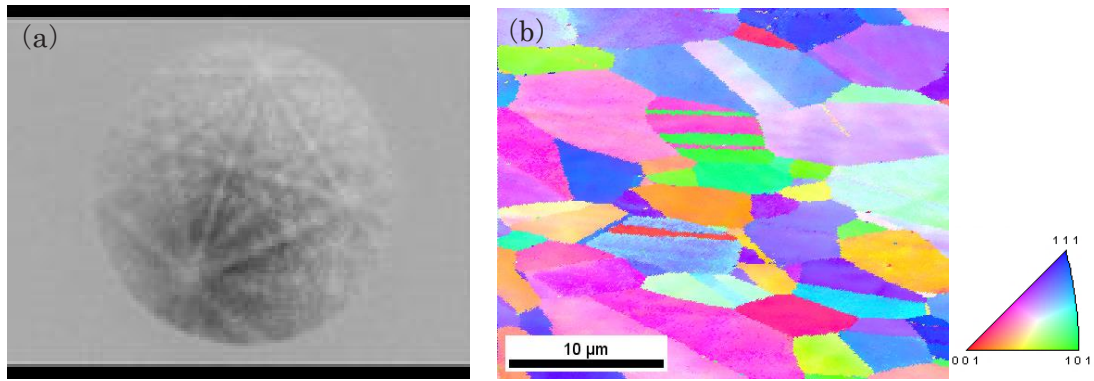


Fig.10 (a) 菊池パターンと (b) 結晶方位マップ

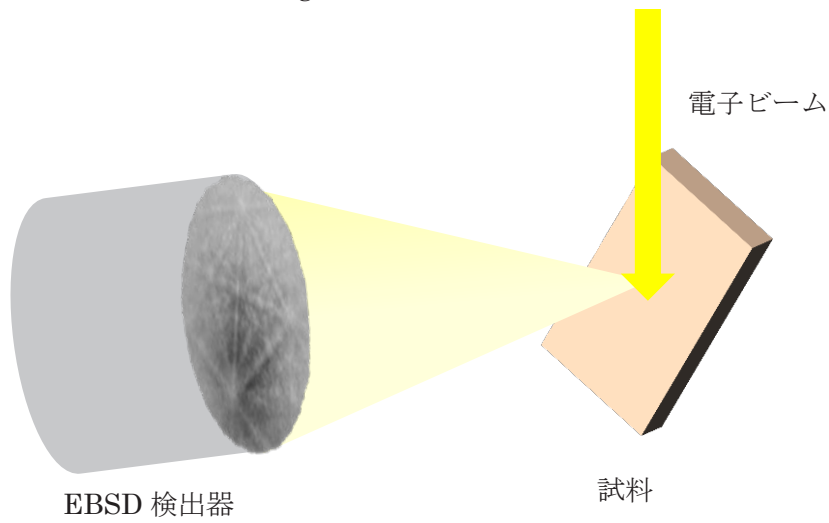


Fig. 11 EBSD 装置概要

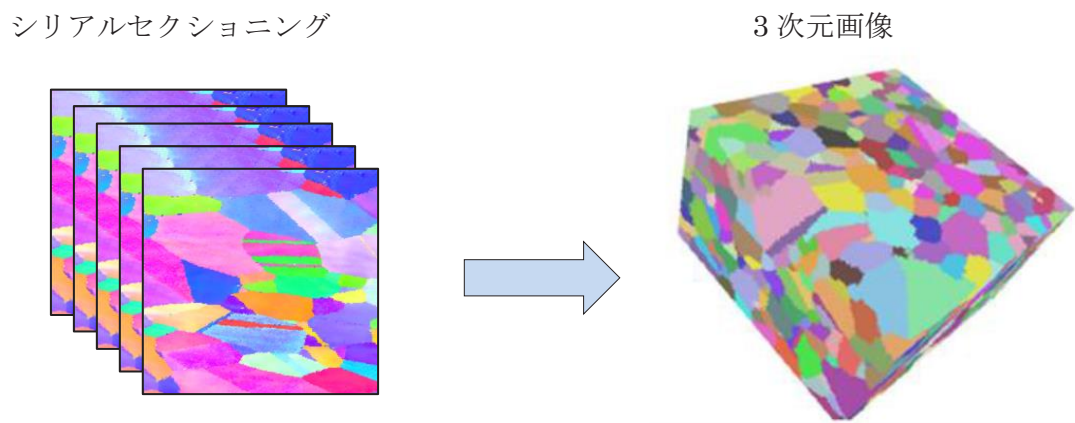


Fig. 12 3D-EBSD 測定データ例

照射後試験検討グループメンバー

分析・研究施設関連装置検討

○椎名 秀徳	福島技術開発試験部	未照射燃料管理課
豊川 琢也	福島技術開発試験部	実用燃料試験課
宮井 博充	福島技術開発試験部	実用燃料試験課
小澤 麻由美	福島技術開発試験部	分析技術課

次世代 PIE 装置検討

○松井 寛樹	福島技術開発試験部	計画管理課
遠藤 慎也	福島技術開発試験部	実用燃料試験課
上原 寛之	福島技術開発試験部	実用燃料試験課
小畑 裕希	福島技術開発試験部	実用燃料試験課
鈴木 美穂	福島技術開発試験部	実用燃料試験課

アドバイザー

遠藤 秀男	福島技術開発試験部
金沢 浩之	福島技術開発試験部

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
物質の量	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	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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	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
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	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	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 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	1 eV = 1.602 176 53(14) × 10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da = 1.660 538 86(28) × 10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u = 1 Da
天文単位	ua	1 ua = 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 = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm ² = (10 ¹² cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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 = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1 cm s ⁻² = 10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1 G cm ² = 10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G = 1 Mx 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 = 1 cGy = 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	cal	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

