

プルトニウム転換技術開発施設における  
硝酸プルトニウム溶液の安定化処理に係る分析業務報告  
(平成 26年 4月～平成 27年 12月)

Report on Analytical Activities in Potentially Hazardous Materials Mitigation Measures  
at the Plutonium Conversion Development Facility  
(2014.4~2015.12)

堀籠 和志 鈴木 久規 鈴木 快昌 石橋 篤  
田口 茂郎 稲田 聡 久野 剛彦 駿河谷 直樹

Kazushi HORIGOME, Hisanori SUZUKI, Yoshimasa SUZUKI, Atsushi ISHIBASHI  
Shigeo TAGUCHI, Satoshi INADA, Takehiko KUNO and Naoki SURUGAYA

バックエンド研究開発部門  
核燃料サイクル工学研究所  
再処理技術開発センター  
施設管理部

Technical Services Department  
Tokai Reprocessing Technology Development Center  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

December 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発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大字白方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, 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, 2016

プルトニウム転換技術開発施設における  
硝酸プルトニウム溶液の安定化処理に係る分析業務報告  
(平成 26 年 4 月～平成 27 年 12 月)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門  
核燃料サイクル工学研究所 再処理技術開発センター  
施設管理部

堀籠 和志、鈴木 久規、鈴木 快昌  
石橋 篤、田口 茂郎、稲田 聡  
久野 剛彦、駿河谷 直樹

(2016 年 10 月 6 日受理)

東海再処理施設のプルトニウム転換技術開発施設では、平成 26 年 4 月から硝酸プルトニウム溶液を安定な形態のウラン・プルトニウム混合酸化物に転換し、硝酸プルトニウム溶液が有する水素発生などの潜在的ハザードを低減するための安定化処理を実施してきた。本処理を円滑に進めるため、同分析設備では、ウラン・プルトニウム混合酸化物粉末及びその原料となる硝酸ウラン溶液、硝酸プルトニウム溶液を試料とした各種の分析業務を実施してきた。

本報告書は、平成 26 年 4 月から平成 27 年 12 月までに実施した約 3,500 件の分析及び分析設備の保守・点検などの関連する業務の実績についてまとめたものである。

Report on Analytical Activities in Potentially Hazardous Materials Mitigation Measures  
at the Plutonium Conversion Development Facility  
(2014.4~2015.12)

Kazushi HORIGOME, Hisanori SUZUKI, Yoshimasa SUZUKI,  
Atsushi ISHIBASHI, Shigeo TAGUCHI, Satoshi INADA,  
Takehiko KUNO and Naoki SURUGAYA

Technical Services Department, Tokai Reprocessing Technology Development Center  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 6, 2016)

In order to mitigate potential hazards of storage plutonium in solution such as hydrogen generation, conversion of plutonium solution into MOX powder has been carried out since 2014 in the Plutonium Conversion Development Facility. With respect to the samples taken from the conversion process, about 3500 items of plutonium/uranium solutions and MOX powders have been analyzed for the operation control in the related analytical laboratories at the Tokai Reprocessing Plant.

This paper describes the reports on analytical activities and related maintenance works in the analytical laboratories conducted from April 2014 to December 2015.

Keywords : Plutonium Conversion Development Facility , Analytical Activities

目 次

1. はじめに	1
2. プルトニウム転換技術開発施設における分析の概要	1
2.1 MOX 粉末製造工程に係る分析	1
2.2 廃気・廃液処理工程に係る分析	4
2.3 分析の実績	4
3. プルトニウム転換技術開発施設分析設備の保守・点検	4
3.1 分析設備の概要	4
3.2 分析設備の保守・点検の実績	4
3.3 廃棄物の発生量	5
4. 分析機器の校正・整備	5
4.1 分析機器の校正の実績	5
4.2 分析機器の整備	6
5. 分析法の検討	6
5.1 導電率測定法による硝酸プルトニウム溶液等の酸濃度分析	6
5.2 MOX 粉末等のウラン、プルトニウム分析のための IDMS 用スパイクの調製	6
6. 分析員の分析技能認定	6
7. まとめ	7
謝辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis in PCDF	1
2.1 Overview of analysis in conversion process of MOX powder	1
2.2 Overview of analysis in waste management process	4
2.3 Analytical works in April 2014-December 2015	4
3. Maintenance and checking of analytical laboratory in PCDF	4
3.1 Overview	4
3.2 Maintenance and checking	4
3.3 Amount of radioactive waste from analytical work	5
4. Calibration and upgrade of analytical instrument	5
4.1 Calibration	5
4.2 Upgrade	6
5. Study on analytical method	6
5.1 Measurement of acidity in plutonium nitrate solution by conductivity measurement	6
5.2 Preparation of spike for the determination of Pu and U in MOX powder by IDMS	6
6. Skill certification of analytical operator	6
7. Conclusion	7
Acknowledgments	7
References	7

表リスト

表 1	MOX 粉末製造工程における分析項目及び分析方法	8
表 2	各分析項目（分析方法）の報告管理基準	10
表 3	廃液処理工程における分析項目及び分析方法	11
表 4	計量管理及び工程管理分析実績	11
表 5	分析機器校正方法、管理基準及び頻度	12
表 6	プルトニウム溶液中の酸濃度の従来法との比較分析結果	13
表 7	プルトニウム・ウラン混合溶液中の酸濃度の従来法との比較分析結果	13
表 8	IDMS 用スパイクの値づけデータ	13
表 9	分析技能認定に係る分析対象項目及び管理(評価)基準	14

図リスト

図 1	MOX 粉末製造工程概要図	15
図 2	MOX 粉末製造工程における分析項目毎の分析件数(計量管理)	16
図 3	MOX 粉末製造工程における分析項目毎の分析件数(工程管理・品質管理)	17
図 4	廃液処理工程における分析項目毎の分析件数	18
図 5	PCDF 機器分析室 分析設備配置概要図	19
図 6	PCDF 工程分析室 分析設備配置概要図	20
図 7	分析所 機器分析準備室 分析設備配置概要図	21
図 8	分析所 質量分析室 分析設備配置概要図	21

List of table

Table 1	Analyte and method in MOX product process	8
Table 2	Quality criteria	10
Table 3	Analyte and method in waste treatment process	11
Table 4	Number of analytical sample for material control and process control	11
Table 5	Frequency and quality control criteria for calibration	12
Table 6	Comparison of analytical results of acidity in plutonium solution with the conventional method	13
Table 7	Comparison of analytical results of acidity in plutonium and uranium mixed solution with the conventional method	13
Table 8	The value of IDMS use Spike	13
Table 9	Acceptance criteria of analytical skill test	14

List of figure

Figure 1	MOX production process	15
Figure 2	The number of analytical sample for material control in MOX product process	16
Figure 3	The number of analytical sample for process control in MOX product process	17
Figure 4	The number of analytical sample in waste treatment process	18
Figure 5	Location map of analytical instruments in analytical laboratory (PCDF room A227)	19
Figure 6	Location map of analytical instruments in analytical laboratory (PCDF room A230)	20
Figure 7	Location map of analytical instruments in analytical laboratory (TRP/CB room G124)	21
Figure 8	Location map of analytical instruments in analytical laboratory (TRP/CB room G129)	21

## 1. はじめに

東海再処理施設で保有している硝酸プルトニウム溶液は、臨界の防止、崩壊熱除去及び水素掃気を継続的に行うことにより、安全に管理されてきているが、激甚災害等においてはそれらの安全機能が喪失する可能性があり、潜在的な危険性があると指摘されている。このため、同施設内のプルトニウム転換技術開発施設（以下、「PCDF」という）では、施設内の貯槽に保有している硝酸プルトニウム溶液を安定な形態のウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）粉末に転換する処理を平成 26 年 4 月より開始した<sup>1)</sup>。

本安定化処理を円滑に実施するために転換工程の各プロセスを制御することが重要であり、迅速かつ信頼性のある分析データの取得が必要とされる。再処理施設の分析設備では、これに対応するため、ウラン及びプルトニウムをはじめとする核物質試料を主とした工程管理と品質管理に必要な分析業務を実施した。また、計量管理に対応するためのウラン濃度、プルトニウム濃度及び同位体組成の分析を実施し、安定化処理における保障措置上の要件にも対応した。

本報告では、硝酸プルトニウム溶液を硝酸ウラニル溶液と混合し、MOX 粉末に転換する処理に係る分析及び分析設備の保守点検など分析関連業務の実績（平成 26 年 4 月 28 日～平成 27 年 12 月 9 日）について報告する。

## 2. プルトニウム転換技術開発施設における分析の概要

### 2.1 MOX 粉末製造工程に係る分析

#### (1) 工程管理

MOX 粉末製造工程概要図を図 1 に示す。PCDF では、使用済燃料の再処理により分離・回収した硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液を受入れ、ウランとプルトニウムの重量比が約 1 : 1 になるように混合溶液を調製し、脱硝、焙焼還元、粉碎、混合等を経て、MOX 粉末を製造している。

工程管理のための分析は、粉末製造に係る各工程の状態の把握や次工程に移るために必要なデータの取得を目的としたものである。各工程における分析項目と分析方法及び各分析項目（分析方法）の報告管理基準を表 1、表 2 にそれぞれ示す。主な分析項目としては、ウラン及びプルトニウム濃度、酸濃度、放射能濃度などが対象となっている。分析精度は、10% 程度まで許容されるが、迅速な分析結果の提供が求められる。工程管理のための主な分析対象及び分析方法の概要を以下に示す。

#### ① 溶液試料中のウラン、プルトニウムの濃度分析

溶液試料中のウラン、プルトニウム濃度分析には、非破壊で迅速な分析結果が得られる蛍光エックス線分析法を適用している。蛍光エックス線分析法は、試料セルに封入された試料溶液に、X 線管球より照射されるエックス線により試料溶液中のウラン、プルトニウムを励起し、発生した特性エックス線（蛍光エックス線）を測定し、その強度と濃度の関係から試料中のウラン及びプルトニウムを定量する手法である<sup>2)</sup>。

本分析法には、グローブボックス内に設置したエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置（リ

ガク製 EDXL-300) を使用して、ウラン、プルトニウムの L 系列の蛍光 X 線を測定した。測定対象とする試料は、硝酸プルトニウム溶液、プルトニウム・ウラン混合溶液、MOX 粉末の溶解液であり、これらの試料は、検量線の濃度範囲 (0.02 g/L~1.2 g/L) に収まるように希釈した後、測定を行った。

## ② 溶液試料中の $\gamma$ 線核種濃度の分析

溶液試料中の  $\gamma$  線核種の濃度分析には、ゲルマニウム半導体検出器による  $\gamma$  線スペクトロメトリーを適用している。 $\gamma$  線スペクトロメトリー装置 (SEIKO EG&G 製 GC-1518) は、試料セルに封入された試料溶液より放出される  $\gamma$  線をゲルマニウム半導体検出器で検出した後、マルチチャンネルアナライザーを用いてエネルギーに応じた計数値を測定し、放出する核種の濃度を定量する手法である。

本分析法における測定対象試料は、硝酸プルトニウム溶液、硝酸ウラニル溶液、MOX 粉末の溶解液であり、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{241}\text{Am}$  などの主なものを含めて 16 核種を測定した。

## (2) 品質管理

品質管理のための分析は、製造された MOX 粉末が要求される仕様を満たしていることの確認を目的としたものである。主な分析項目は、金属不純物濃度、比表面積、水分含有率、酸素と重金属の比 (O/M) などである。品質管理のための主な分析対象及び分析方法の概要を以下に示す。

### ① MOX 粉末の比表面積の測定

比表面積の測定には、低温物理吸着法を適用している。操作としては、分析対象試料中に窒素-ヘリウム混合ガス (体積比 3 : 7) を通気し、液体窒素温度 ( $-195^{\circ}\text{C}$ ) で冷却することにより分子占有面積が既知の窒素 (占有面積 :  $16.2\text{\AA}^2 = 16.2 \times 10^{-20}\text{m}^2$ ) を物理吸着させ、平衡状態に達した後、室温に戻す。粉末の比表面積は、操作の中で試料粉末に吸着した窒素を脱着させたものを測定することにより算出する。

本分析法では、グローブボックス内に設置した物理吸着測定装置 (Micromeritics 製 FlowSorbIII2300) を使用して、MOX 粉末の比表面積を測定した。試料セルに採取した MOX 粉末を、真空中で  $300^{\circ}\text{C}$  まで加熱して MOX 粉末表面の脱ガス処理を行い、室温まで放冷した後、窒素-ヘリウム混合ガスを通気し、液体窒素で冷却して MOX 粉末表面に窒素を吸着させた。その後、試料セルを室温水に浸し、脱着した窒素量を熱伝導度検出器にて測定した。

### ② MOX 粉末中の酸素と重金属の比 (O/M) の分析

O/M の分析には、酸化還元重量法を適用している。酸化還元重量法は、分析対象試料を空気雰囲気中で加熱することで強制酸化した後、還元ガス雰囲気中で加熱することにより還元し、酸化・還元前後の重量変化から酸素と重金属の比を算出する手法である。

本分析法では、グローブボックス内に設置した電気管状炉及び電子天秤を使用して酸化・還元前後の重量を測定した。予め恒量化した白金カップに採取した MOX 粉末を、 $850^{\circ}\text{C}$

の空気雰囲気下で 2 時間加熱（酸化）した後、電気管状炉にて窒素－水素混合ガスを供給し、850℃で 4 時間加熱して試料を還元した。一昼夜放冷後、白金カップを正確に秤量し、加熱前の秤量値との差から、MOX 粉末の重量変化を求め、O/M を算出した。

### (3) 計量管理

計量管理のための分析は、核物質量の把握を目的としたものであり、極めて高い精度（0.1%～0.2% : International Target Value, (2 $\sigma$ )) が求められる。計量管理の対象となる試料は、分離精製工場から受入れた硝酸プルトニウム溶液、硝酸ウラニル溶液、プルトニウム・ウラン混合溶液及び MOX 粉末であり、主な分析項目は、ウラン及びプルトニウム濃度及び同位体組成である。計量管理のための主な分析対象及びその分析法の概要を以下に示す。

#### ① 溶液中のウラン濃度、プルトニウム濃度及び同位体組成の分析

ウラン濃度及びプルトニウム濃度分析には、同位体希釈質量分析法（Isotope Dilution Mass Spectrometry : IDMS）を適用している。IDMS は、一定濃度に希釈・調製した分析対象試料に、同位体組成の異なるスパイクと呼ばれる標準試料を既知量添加し、その同位体組成の変化を利用して、分析対象物の濃度を求める手法である。

本分析法では、表面電離型質量分析計（Thermo Fisher Scientific 製 TRITON, MAT262）を使用して各同位体比を測定した。MOX 粉末試料を対象とした IDMS では、三角フラスコに採取した MOX 粉末を硝酸（8mol/dm<sup>3</sup>）とフッ化水素酸（40～50 %）の混合溶液中において、120℃で 8 時間から 14 時間程度加熱して溶解した後、一部をスパイクに添加して正確に秤量した後、攪拌してスパイクと MOX 粉末溶解液を完全に混合した。次に、原子価調整用試薬を添加してプルトニウムの原子価を IV 価に調整した後、加熱・濃縮し、硝酸（8mol/dm<sup>3</sup>）で希釈して酸濃度を調整した。これを陰イオン交換樹脂（Bio-Rad 製 AG-1X2）によりウランとプルトニウムに逐次分離した後、プルトニウム溶液については、さらに固相抽出樹脂（Eichrom 製 TEVA-resin）を用いて混入しているウランを除去した。ウランとプルトニウムの各溶液は、乾固寸前まで蒸発・濃縮した後、硝酸（1 mol/dm<sup>3</sup>）で希釈して濃度を調整し、ウラン及びプルトニウムの各同位体比を測定した。

ウラン及びプルトニウムの同位体組成については、スパイクを添加していない試料に対して、上述と同様の前処理を行い、ウランとプルトニウムを相互分離した後、各同位体比を測定して同位体組成を算出した。

#### ② 硝酸ウラニル溶液中のウラン濃度分析

硝酸ウラニル溶液中のウラン濃度分析には、酸化重量法を適用している。酸化重量法は、硝酸ウラニルを空气中で 900℃に加熱し、ウランを八酸化三ウラン（U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>）とし、加熱前後の重量変化よりウラン濃度を求める手法である<sup>3)</sup>。PCDF にて取り扱う硝酸ウラニル溶液は、不純物含有量が極めて少なく加熱によるウラン以外の金属成分の重量変化は、無視できることから、IDMS より操作が簡便な酸化重量法を適用している。

本分析法では、マッフル炉及び電子天秤を使用して酸化前後の重量を測定した。予め恒量化したルツボ（インコネル製）に硝酸ウラニル溶液を正確に一定量採取し、試料の飛散を

防止するため、粉末ろ紙を添加した後、マッフル炉内において 150 °C で 1 時間加熱した。さらにマッフル炉の一部を開放して空気が循環する状態にして、900 °C で 1 時間加熱してウランを  $U_3O_8$  に酸化した。マッフル炉内から取り出したルツボは、水分の吸湿を防ぐため、シリカゲルを入れたデシケーター内で室温まで放冷した後、ルツボを正確に秤量して、予め加熱前に測定しておいた秤量値との差から、 $U_3O_8$  重量を求めた。

## 2.2 廃気・廃液処理工程に係る分析

PCDF の稼働に伴い発生する廃気及び廃液は、同施設の廃気・廃液処理工程で処理される。廃気処理に係る工程については、サンプリングして分析・確認する項目はない。廃液処理工程における分析項目及び分析方法を表 3 に示す。廃液処理に係る分析は、次工程へ送るためのデータ取得を目的とした分析であり、主な分析項目は、ウラン及びプルトニウム濃度、酸濃度、全アルファ濃度、全ベータ濃度、全ガンマ濃度などである。

## 2.3 分析の実績

運転期間(平成 26 年 4 月～平成 27 年 12 月)における分析の総処理件数は、約 3,500 件である。分析目的毎の依頼件数を表 4 に示す。MOX 粉末製造工程(依頼元：受入れ工程、混合工程、充填工程)における計量管理に係る分析は、約 1,000 件であった。また、工程管理に係る分析については、約 2,800 件であり、このうち品質管理を含む MOX 粉末製造工程(依頼元：受入れ工程、混合工程、粉末中間貯蔵工程、充填工程)からのものが、約 2,000 件で、廃液処理工程からは、約 800 件であった。分析項目毎の分析件数を MOX 粉末製造工程における計量管理、工程管理・品質管理、廃液処理工程について図 2～図 4 にそれぞれ示す。計量管理に係る分析は、主にウラン濃度、プルトニウム濃度及びウラン、プルトニウム同位体組成分析であった。また、工程管理・品質管理に係る分析については、不純物濃度分析が主であり、廃液処理工程は、放射能分析が主なものであった。

## 3. プルトニウム転換技術開発施設分析設備の保守・点検

### 3.1 分析設備の概要

PCDF における分析対象試料は、大部分がプルトニウムを含むものであることから、分析機器のほとんどは、グローブボックス内に設置されており、分析対象試料は、PCDF の機器分析室、工程分析室及び分析所の機器分析準備室、質量分析室グローブボックス内で取り扱われている。グローブボックス等の配置を図 5～図 8 にそれぞれ示す。機器分析室及び工程分析室には、グローブボックス 39 台、ヒュームフード 4 台が設置されている。また、機器分析準備室及び質量分析室には、グローブボックス 9 台、ヒュームフード 2 台が設置されている。

### 3.2 分析設備の保守・点検の実績

グローブボックス、ヒュームフード、分析機器については、以下の通り、定期的に点検・

保守を行い、健全な状態で管理した。

#### (1) グローブボックス

作業開始前後に外観の異常の有無及びグローブボックス内の負圧が、室内の圧力に対して  $-300 \pm 50 \text{Pa}$  の範囲にあることを確認した。また、使用後には、グローブボックス前面（作業面）の表面線量率測定を実施し、表面線量率の上昇の有無について点検した。月例、6ヶ月定期点検においては、グローブボックスの給気・排気フィルター、分析試料の気送設備について、外観、表面密度、表面線量率の点検を実施し、異常のないことを確認した。

グローブ及びビニールバッグについては、使用の都度（作業前、終了後）に  $\alpha$  シンチレーションサーベイメータによる直接サーベイを行い、汚染のないことを確認した。また、グローブについては、使用前に外観点検（ピンホール、劣化によるひび割れの有無等）を実施した。

グローブ及びビニールバッグについては、設置後の使用期限を定めた定期交換と使用状況による劣化を考慮した予防保全により、グローブ 190 本、ビニールバッグ 72 本の交換を実施した。なお、グローブ及びビニールバッグの設置後の使用期限は、再処理技術開発センターの「グローブボックス取扱い基本要領書」に従い、グローブは 4 年、ビニールバッグは 5 年で管理している。

#### (2) ヒュームフード

ヒュームフードについては、外観の異常の有無及び風向を日常点検において確認した。また、月例、6ヶ月定期点検において、排気ダクト、ヒュームフード開口部の表面密度、表面線量率の測定を行い、年次点検においては、風速及びダクト接続部のボルトの緩みなどの確認を行い、異常のないことを確認した。

### 3.3 廃棄物の発生量

平成 26 年 4 月から平成 27 年 12 月までの期間内に実施した分析及び保守業務に伴い、可燃性固体廃棄物（20 リットルカートン）27 個、難燃性個体廃棄物（20 リットルカートン）35 個、不燃性固体廃棄物（20 リットルカートン）20 個が発生した。

## 4. 分析機器の校正・整備

### 4.1 分析機器の校正の実績

分析に用いる分析機器の校正については、再処理技術開発センター規則(教育・訓練管理規則及び検査・試験管理規則)に従い、指名された校正担当者が、分析品質保証要領書（Pu 転換編）に基づき分析機器の校正を実施した。分析機器校正方法、頻度及び管理基準を表 5 に示す。校正は、天秤のように使用の都度校正する機器、毎月、3ヶ月に1回及び6ヶ月に1回校正する機器があり、それぞれの機器について定められた頻度で実施した。また、これらの記録は、分析機器名称、機器番号、設置場所、校正周期、校正方法を記載した校正管理台帳を作

成して管理した。

#### 4.2 分析機器の整備

分析機器の整備としては、15年に渡る長期間の使用により、分光・検出部が劣化し、補修が困難となった蛍光エックス線分析装置の更新を行った。更新前の装置は、大型であったため分光・検出部をグローブボックス内に、エックス線発生部、計数部等をグローブボックス外部に設置する構成に改造を行ったが、更新した蛍光エックス線装置は、従来の機器よりも性能が向上し、外形寸法が小型化したため、従来装置で行ったエックス線発生部と分光・検出部を分離して、分光・検出部をグローブボックス内に設置する等の改造が不要となった。そのため、装置全体をグローブボックス内に設置することが可能となり、装置の改造に伴う性能低下の問題が解決された。

### 5. 分析法の検討

#### 5.1 導電率測定法による硝酸プルトニウム溶液等の酸濃度分析

従来の硝酸プルトニウム溶液等の酸濃度分析は、マスキング剤（硫酸アンモニウム溶液、フッ化カリウム溶液）を添加し、ウラン及びプルトニウムをそれぞれ  $\text{UO}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{K}_2\text{PuF}_6$  錯体とした後、水酸化ナトリウム溶液を用いて遊離酸を滴定分析するアルカリ中和－電位差滴定法により行われていた。しかし、廃液処理上、好ましくないマスキング剤を使用していることから、マスキング剤等の試薬添加を必要としない導電率測定法に着目し、代替法として導電率の適用を検討した。導電率測定法は、溶液中を流れる電気量が電解質濃度に依存する性質を利用して、溶液の導電率を測定し、溶液中のウラン濃度及びプルトニウム濃度による補正を行い、酸濃度を算出する方法である<sup>4)</sup>。従来のアルカリ中和－電位差滴定法と導電率測定法により求めた酸濃度の比較結果を表 6、表 7 にそれぞれ示す。従来法であるアルカリ中和－電位差滴定法との比較分析の結果が良好であったことから、本分析法を従来法に代わる酸濃度分析法として適用した。

#### 5.2 MOX 粉末等のウラン、プルトニウム分析のための IDMS 用スパイクの調製

MOX 粉末等の IDMS 用のスパイクとして、MOX 粉末溶解液のウランとプルトニウムの濃度及びその同位体組成に合わせ、同位体比測定の不確かさが最小となる組成を評価し、ウランとプルトニウムの各認証標準物質（CRM-116、CRM-126）を用いて調製した。調製したスパイクは、バイアルに約 1 mgU ( $^{235}\text{U}$  含有率約 93%)、約 2 mgPu ( $^{239}\text{Pu}$  含有率約 98%) となるように分取し、液体状で保管して使用した。本スパイクの値付けデータを表 8 に示す。

### 6. 分析員の分析技能認定

PCDF の分析業務を行うにあたり、分析値の品質管理を目的に分析員の技能を評価するため、分析作業に携わる分析員の技能認定を実施した。分析技能認定は、分析設備、機器等の取扱い及

び放射性物質の取扱い経験が半年以上を有する者に対し、各々の分析項目について分析方法の原理、分析（測定）技術に係る基礎及び応用についての筆記試験を行った。筆記試験で正解 8 割以上の者は、引き続き分析操作及び分析結果（精度、確度）の妥当性を評価する実技試験を受験した。分析操作については、分析設備、機器の取扱い、試料採取方法、コンタミネーションに対する注意の払い方等の作業について評価を行った。実技試験については、試験用試料を実際に分析し、その表示値に対して分析結果が管理基準値以内であることを合格の基準とした。分析技能認定に係る分析対象項目及び管理（評価）基準を表 9 に示す。

分析技能の認定の有効期間は、分析技能認定要領に基づき、各々の分析項目について、技能認定後 3 年間としている。また、再認定する場合は、対象となる分析項目について、過去 1.5 年間以内に実際に従事した分析の結果が分析報告の管理基準値以内である場合は、分析技能が維持されていると判断し、筆記試験のみで技能評価を行った。その結果、全ての受験者が認定基準を満足しており、十分な分析技能を有していることが確認された。

## 7. まとめ

平成 26 年 4 月から平成 27 年 12 月までに実施した PCDF における硝酸プルトニウムの安定化処理に対応するための核物質等の分析、分析設備・機器の点検・保守等の実績をまとめた。

平成 28 年も硝酸プルトニウムの安定化処理が予定されていることから、引き続き設備の保守・管理及び分析技能の維持向上に努め、分析の品質を担保するとともに円滑な分析データの提供により、同施設における安定化処理による潜在的ハザードの低減に寄与していくことが重要であると考えられる。

## 謝 辞

分析業務及び分析設備の維持管理にご協力いただきました検査開発(株)の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構，プルトニウム転換技術開発施設の運転について，<http://www.jaea.go.jp/02/press2014/p14042401/>（参照 2016 年 3 月 29 日）。
- 2) 馬場祐治他，エネルギー分散型蛍光 X 線分析法による溶液中のウラン及びプルトニウムの定量，分析化学 32(8)，1983，pp.T99-T104。
- 3) 日本原子力研究所 核燃料・炉材料等分析委員会，二酸化ウランの分析，JAERI-4053，1971，p.1。
- 4) 北川修他，導電率測定による高濃度のプルトニウム、ウランを含む硝酸溶液の酸濃度の定量，JAEA-Technology 2006-031，2006，29p。

表1 MOX 粉末製造工程における分析項目及び分析方法 (1/2)

工程	対象試料	分析項目	分析方法(分析装置)
受入工程	硝酸プルトニウム溶液	P u 濃度	同位体希釈質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		P u 同位体組成	質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		γ 線核種濃度	γ 線核種濃度分析法 (γ 線核種濃度分析装置)
		<sup>241</sup> Am 含有率	
		全 γ 放射能濃度	直接 γ 線計測法 (γ 放射能測定装置)
		酸濃度	導電率測定法 (導電率計)
		密度	振動式密度測定法 (振動式密度計)
金属不純物元素含有量 (Al, B, Ca, Cd, Cr, Fe, Ni, Mg, V, Na, Cu, Zn, Si, Ag, Mn, Mo, Pb, Sn)	発光分光分析法 (直流アーク放電発光分光分析装置)		
受入工程	硝酸ウラン溶液	U 濃度	同位体希釈質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		U 同位体組成	質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		U 濃度	酸化重量法 (マッフル炉、電子天秤)
		γ 線核種濃度	γ 線核種濃度分析法 (γ 線核種濃度分析装置)
		<sup>241</sup> Am 含有率	
		全 γ 放射能濃度	直接 γ 線計測法 (γ 放射能測定装置)
		酸濃度	導電率測定法 (導電率計)
		遊離酸濃度	電位差滴定法 (滴定装置)
		密度	振動式密度測定法 (振動式密度計)
金属不純物元素含有量 (Al, B, Ca, Cd, Cr, Fe, Ni, Mg, V, Na, Cu, Zn, Si, Ag, Mn, Mo, Pb, Sn)	発光分光分析法 (直流アーク放電発光分光分析装置)		
混合工程	混合溶液	P u, U 濃度	同位体希釈質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		P u, U 同位体組成	質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		P u, U 濃度	蛍光エックス線分析法 (蛍光エックス線分析装置)
中間貯蔵工程	MOX 粉末	P u, U 含有量	同位体希釈質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		P u, U 含有率	蛍光エックス線分析法 (蛍光エックス線分析装置)
		P u, U 同位体組成	質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		O/M比	酸化還元重量法 (電気管状炉、電子天秤)
			酸化重量法 (電気管状炉、電子天秤)
		水分含有率	加熱重量法 (差動型示差熱天秤)
金属不純物元素含有量 (Al, B, Ca, Cd, Cr, Fe, Ni, Mg, V, Na, Cu, Zn, Si, Ag, Mn, Mo, Pb, Sn)	発光分光分析法 (直流アーク放電発光分光分析装置)		

表1 MOX 粉末製造工程における分析項目及び分析方法 (2/2)

工程	対象試料	分析項目	分析方法(分析装置)
粉末充填工程	MOX粉末製品 (製品仕様)	Pu, U含有量	同位体希釈質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		Pu, U同位体組成	質量分析法 (表面電離型質量分析計)
		O/M比	酸化還元重量法(電気管状炉、電子天秤)
		水分含有率	加熱重量法(差動型示差熱天秤)
		<sup>241</sup> Am含有率	γ線核種濃度分析法(γ線核種濃度分析装置)
		金属不純物元素含有量 (Al, B, Ca, Cd, Cr, Fe, Ni, Mg, V, Na, Cu, Zn, Si, Ag, Mn, Mo, Pb, Sn)	発光分光分析法 (直流アーク放電発光分光分析装置)
		塩素含有量	イオンクロマトグラフ法 (イオンクロマトグラフィー)
		フッ素含有量	
		窒化物成分含有量	不活性ガス融解-熱伝導度法 (窒素分析装置)
		全窒素含有量	
		比表面積	低温物理吸着法(物理吸着測定装置)
		平均粒子径	レーザー回折・散乱法(粒度分布測定装置)
		かさ密度	タップデンサー法(粉末密度測定器)
		タップ密度	

表2 各分析項目（分析方法）の報告管理基準

No.	分析項目 (分析方法)	管理基準
1	密度分析 (振動式密度測定法)	水の測定 at25°C : $0.995324 \leq \text{測定値} \leq 0.995364$ (g/cm <sup>3</sup> )
		n=2 測定の差 : $\leq 0.1\%$
2	全 $\alpha$ 放射能及びプルトニウム濃度分析 (直接 $\alpha$ 線計測法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
3	全 $\beta$ 放射能濃度分析 (直接 $\beta$ 線計測法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
4	全 $\gamma$ 放射能濃度分析 (直接 $\gamma$ 線計測法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
5	$\gamma$ 線核種濃度分析 ( $\gamma$ 線核種濃度分析法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
6	遊離酸濃度分析 (電位差滴定法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
7	ウラン・プルトニウム濃度分析 (蛍光エックス線分析法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
8	フッ素及び塩素含有量分析 (イオンクロマトグラフ法)	標準試料の表示値と測定値の差 : 表示値 $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
9	金属不純物元素含有量分析 (発光分光分析法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 1\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
10	窒素含有量分析 (不活性ガス融解-熱伝導度法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 3\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 3\%$
11	比表面積測定 (低温物理吸着法)	標準試料の測定 : $24 \leq \text{測定値} \leq 26$ (m <sup>2</sup> /g)
		n=2 測定の差 : $\leq 1\%$
12	平均粒子径測定 (レーザー回折・散乱法)	標準試料の測定 : $2.137 \leq \text{測定値} \leq 2.779$ ( $\mu$ m)
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
13	かさ密度・タップ密度測定 (タップデンサー法)	標準分銅による天秤校正
		基準分銅の測定 : $1.9 \leq \text{測定値} \leq 2.5$ (g/cm <sup>3</sup> )
		基準分銅の測定 : $3.4 \leq \text{測定値} \leq 4.0$ (g/cm <sup>3</sup> )
14	水分含有率分析 (加熱重量法)	標準試料の測定 : $10.64 \leq \text{測定値} \leq 10.73$ (wt%)
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
15	O/M分析 (酸化重量法または酸化還元重量法)	標準分銅による天秤校正
		n=2 測定の差 : $\leq 1\%$
16	ウラン及びプルトニウム濃度分析 (同位体希釈質量分析法)	n=2 測定の差 : $\leq 0.5\%$
17	ウラン及びプルトニウム同位体組成分析 (質量分析法)	n=2 測定の差 : $\leq 0.5\%$
18	酸濃度分析 (導電率測定法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 1\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 5\%$

表 3 廃液処理工程における分析項目及び分析方法

工程	対象試料	分析項目	分析方法(分析装置)
廃液処理工程	工程内廃液	Pu, U含有量	蛍光エックス線分析法 (蛍光エックス線分析装置)
		遊離酸濃度	アルカリ中和-電位差滴定法 (滴定装置)
		全 $\alpha$ 放射能濃度 Pu含有量	直接 $\alpha$ 線計測法 ( $\alpha$ 放射能測定装置)
		全 $\beta$ 放射能濃度	直接 $\beta$ 線計測法 ( $\beta$ 放射能測定装置)
		全 $\gamma$ 放射能濃度	直接 $\gamma$ 線計測法 ( $\gamma$ 放射能測定装置)

表 4 計量管理及び工程管理分析実績

分析対象(工程)	分析件数
計量管理分析 (受入、混合、充填)	975
工程管理・品質管理分析 (受入、混合、中間貯蔵、充填)	1959
工程管理分析 (廃液処理)	795

表5 分析機器校正方法、管理基準及び頻度

No.	機器	方法 (測定)	管理基準	頻度
1	電子天秤	重量測定 (基準分銅)	基準器交差内	使用の都度
2	振動式密度計	相対的標準偏差 (n=10)	$\leq 0.003\%$	毎月
3	$\alpha$ 放射能測定装置	プラトー長 $\Delta V$	150V 以上	毎月
		プラトー傾斜 $\theta$	5%/100V 以下	
		計数効率	20%~40%	
		前回との差	$\pm 5\%$	
4	$\beta$ 放射能測定装置	プラトー長 $\Delta V$	150V 以上	毎月
		プラトー傾斜 $\theta$	10%/100V 以下	
		計数効率	20%~40%	
		前回との差	$\pm 5\%$	
5	$\gamma$ 放射能測定装置	プラトー長 $\Delta V$	150V 以上	毎月
		プラトー傾斜 $\theta$	10%/100V 以下	
		計数効率	5%~20%	
		前回との差	$\pm 5\%$	
6	$\gamma$ 線核種濃度分析装置	標準線源ピークエネルギー	$\pm 2\text{KeV}$	6ヶ月に1回
		ピーク検出効率	$\pm 10\%$	
		標準線源測定	$\pm 10\%$	
7	電位差滴定装置	pH 標準液測定	$\pm 0.02$	3ヶ月に1回
		標準溶液	$\pm 5\%$	
8	蛍光エックス線分析装置	検量線相関係数	$\geq 0.999$	6ヶ月に1回
		相対的標準偏差 (n=5)	$\leq 5\%$	
		標準溶液	$\leq \pm 10\%$	
9	イオンクロマトグラフィー	検量線相関係数	$\geq 0.999$	6ヶ月に1回
		相対的標準偏差 (n=5)	$\leq 5\%$	
		標準溶液	$\leq \pm 5\%$	
10	直流アーク放電 発光分光分析装置	検量線相関係数	$\geq 0.995$	使用の都度
		標準試料	$\pm 15\%$	
11	窒素分析装置	検量線相関係数	$\geq 0.999$	6ヶ月に1回
		相対的標準偏差 (n=5)	$\leq 3\%$	
		標準試料	$\leq \pm 3\%$	
12	物理吸着測定装置	ゼロ校正	$\pm 0.02$	使用の都度
		キャリブガス	0.02m <sup>2</sup>	
		標準ガス	1m <sup>2</sup> /g	
13	粒度分布測定装置	標準試料	$\pm 3\sigma$	使用の都度
14	差動型示差熱天秤	標準試料	$\pm 3\sigma$	使用の都度
15	表面電離型質量分析計	標準偏差	0.1%	毎月
		有意差水準	5%	
16	導電率計	標準溶液 (セル定数)	10 $\pm$ 1.50cm <sup>-1</sup>	6ヶ月に1回
		相対的標準偏差 (n=5)	$\leq 3\%$	
17	粉末密度測定装置	ダンピング時間	60 秒 $\pm$ 5 秒 / 120 回	6ヶ月に1回
18	電気管状炉	昇温作動	設定温度 $\pm 3^\circ\text{C}$	6ヶ月に1回
		警報作動	設定温度 $\pm 10^\circ\text{C}$	

表6 プルトニウム溶液中の酸濃度の従来法との比較分析結果

試料	Pu 濃度 (g/L)	導電率 (mS/cm)	アルカリ中和-電位差滴定法 (従来法) 濃度 (M)	導電率測定法 (本法) 濃度 (M)	従来法との差 (%)
A	5.900	66.6	4.45	4.34	-2.5
B	6.867	77.8	5.27	5.28	0.2
C	6.867	75.4	5.02	5.29	5.4
D	7.300	80.1	5.45	5.61	2.9
E	6.533	75.2	5.15	5.00	-2.9
F	6.833	73.6	5.27	5.27	0.0

表7 プルトニウム・ウラン混合溶液中の酸濃度の従来法との比較分析結果

試料	Pu 濃度 (g/L)	U 濃度 (g/L)	アルカリ中和-電位差滴定法 (従来法) 濃度 (M)	導電率測定法 (本法) 濃度 (M)	従来法との差 (%)
G	3.943	4.107	2.86	3.07	7.3
H	4.143	4.237	2.90	2.94	1.4
I	4.100	4.190	3.05	3.11	2.0
J	8.200	8.380	3.05	2.96	-3.0
K	8.240	8.540	3.07	2.98	-2.9
L	4.020	4.100	3.24	3.12	-3.7
M	8.040	8.200	3.24	2.99	-7.7
N	3.993	4.030	3.21	3.15	-1.9
O	7.987	8.060	3.21	3.01	-6.2
P	5.600	13.533	2.04	2.11	3.4
Q	2.800	6.810	2.22	2.19	-1.4
R	2.830	6.480	2.47	2.30	-6.9

表8 IDMS 用スパイクの値づけデータ

元素	濃度	同位体比	
ウラン	1.0530±0.0008 mg/g (k=2)	234/238	0.1846028
		235/238	17.265125
		236/238	0.0798960
プルトニウム	2.0046±0.0019 mg/g (k=2)	238/239	0.0000322
		240/239	0.0209261
		241/239	0.0000417
		242/239	0.0000105

表9 分析技能認定に係る分析対象項目及び管理(評価)基準

No.	分析項目 (分析法)	管理基準
1	密度分析 (振動式密度測定法)	水の測定 at25℃ : $0.995324 \leq \text{測定値} \leq 0.995364$ (g/cm <sup>3</sup> )
		n=2 測定の差 : $\leq 0.1\%$
2	全α放射能及びプルトニウム濃度分析 (直接α線計測法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
3	全β放射能濃度分析 (直接β線計測法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
4	全γ放射能濃度分析 (直接γ線計測法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
5	γ線核種濃度分析 (γ線核種濃度分析法)	標準線源の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
6	遊離酸濃度分析 (電位差滴定法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
7	ウラン・プルトニウム濃度分析 (蛍光エックス線分析法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
8	フッ素及び塩素含有量分析 (イオンクロマトグラフ法)	標準試料の表示値と測定値の差 : 表示値 $\leq 5\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
9	金属不純物元素含有量分析 (発光分光分析法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 1\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
10	窒素含有量分析 (不活性ガス融解-熱伝導度法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 3\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 3\%$
11	比表面積測定 (低温物理吸着法)	標準試料の測定 : $24 \leq \text{測定値} \leq 26$ (m <sup>2</sup> /g)
		n=2 測定の差 : $\leq 1\%$
12	平均粒子径測定 (レーザー回折・散乱法)	標準試料の測定 : $2.137 \leq \text{測定値} \leq 2.779$ (μm)
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
13	かさ密度・タップ密度測定 (タップデンサー法)	標準分銅による天秤校正
		基準分銅の測定 : $1.9 \leq \text{測定値} \leq 2.5$ (g/cm <sup>3</sup> )
		基準分銅の測定 : $3.4 \leq \text{測定値} \leq 4.0$ (g/cm <sup>3</sup> )
14	水分含有率分析 (加熱重量法)	標準試料の測定 : $10.64 \leq \text{測定値} \leq 10.73$ (wt%)
		n=2 測定の差 : $\leq 10\%$
15	O/M分析 (酸化重量法または酸化還元重量法)	標準分銅による天秤校正
		n=2 測定の差 : $\leq 1\%$
16	ウラン及びプルトニウム濃度分析 (同位体希釈質量分析法)	n=2 測定の差 : $\leq 0.5\%$
17	ウラン及びプルトニウム同位体組成分析 (質量分析法)	n=2 測定の差 : $\leq 0.5\%$
18	酸濃度分析 (導電率測定法)	標準試料の表示値と測定値の差 : $\leq 1\%$
		n=2 測定の差 : $\leq 5\%$

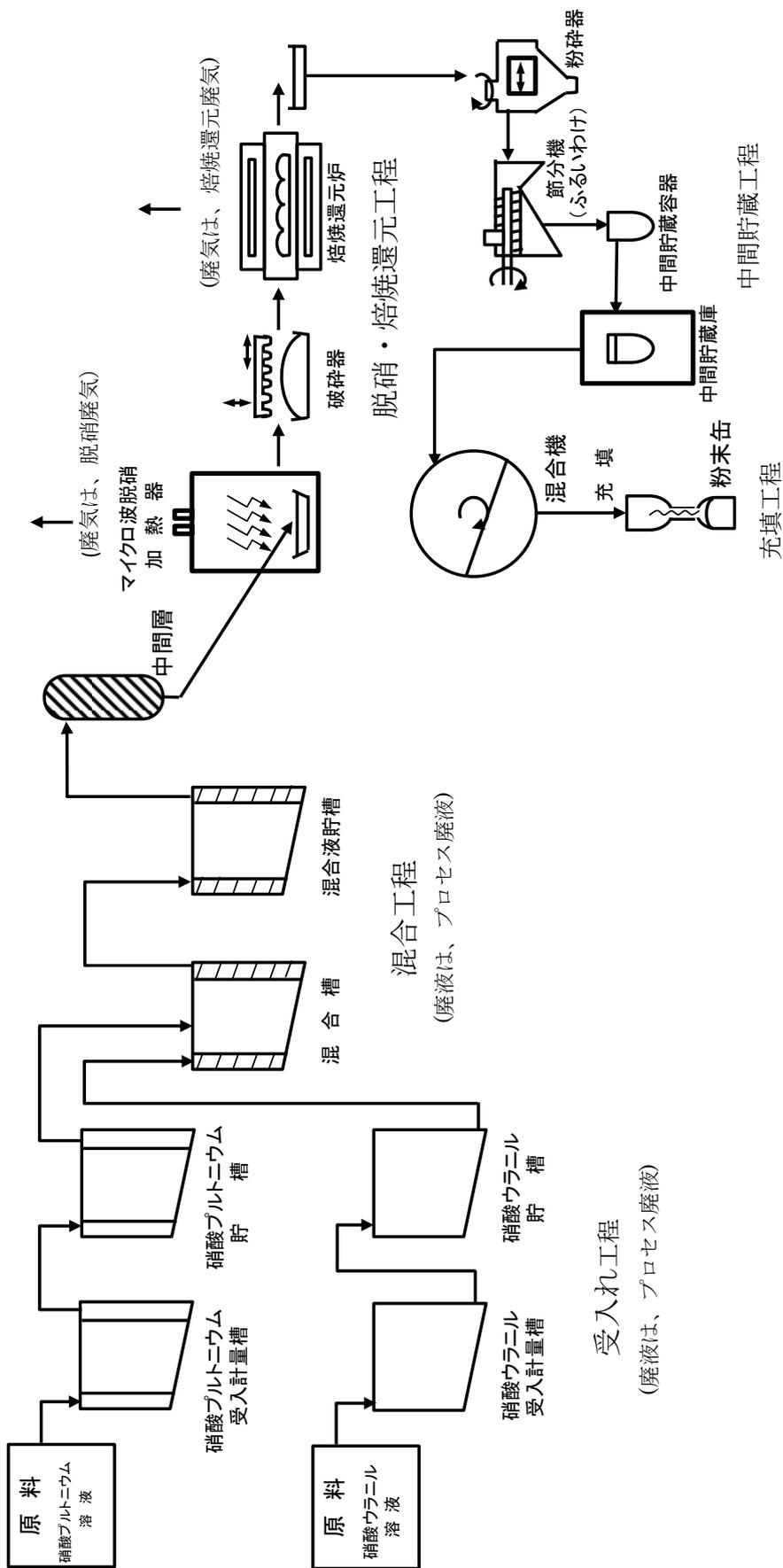


図1 MOX粉末製造工程概要図

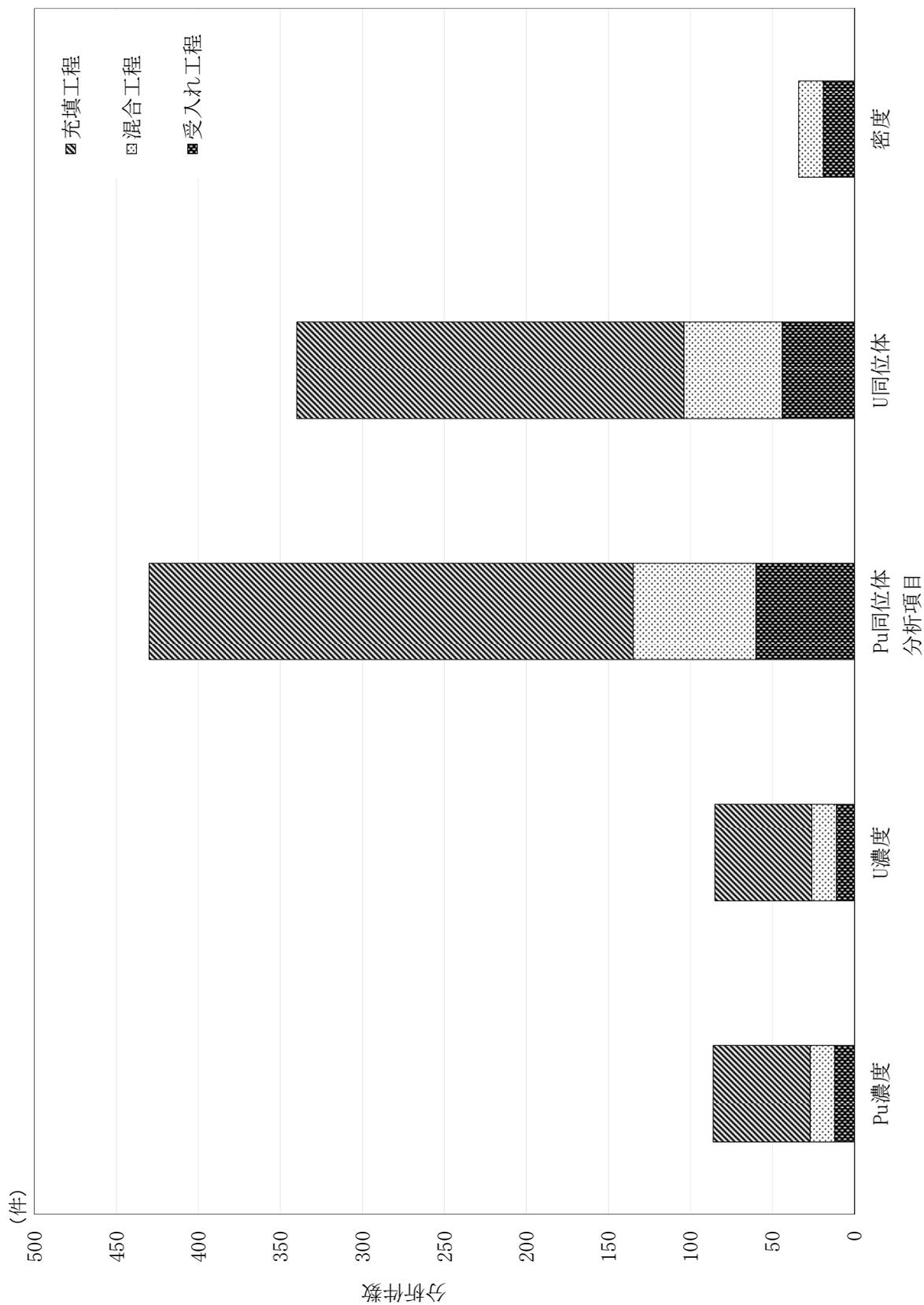


図2 MOX粉末製造工程における分析項目毎の分析件数(計量管理)

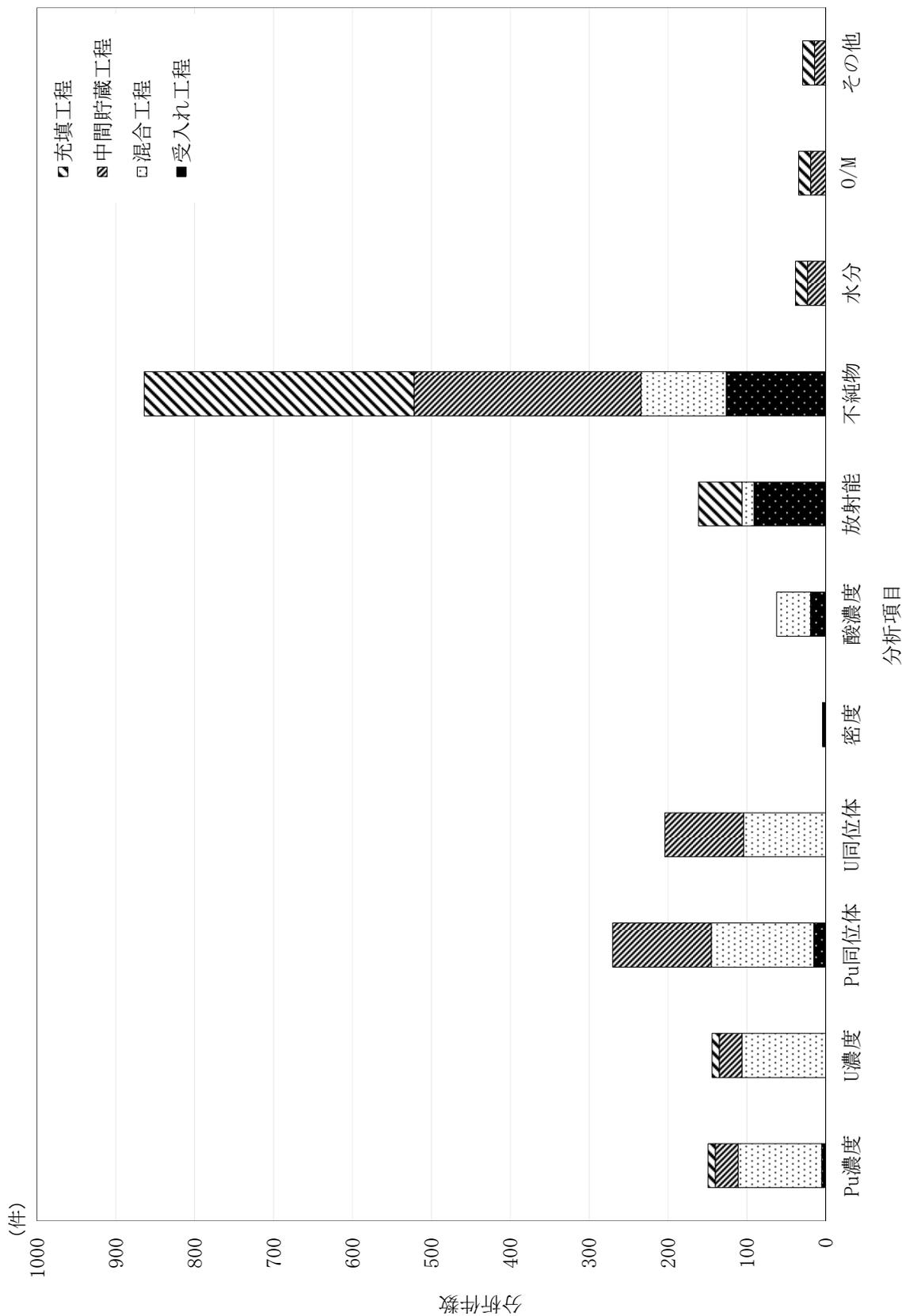


図3 MOX粉末製造工程における分析項目毎の分析件数(工程管理・品質管理)

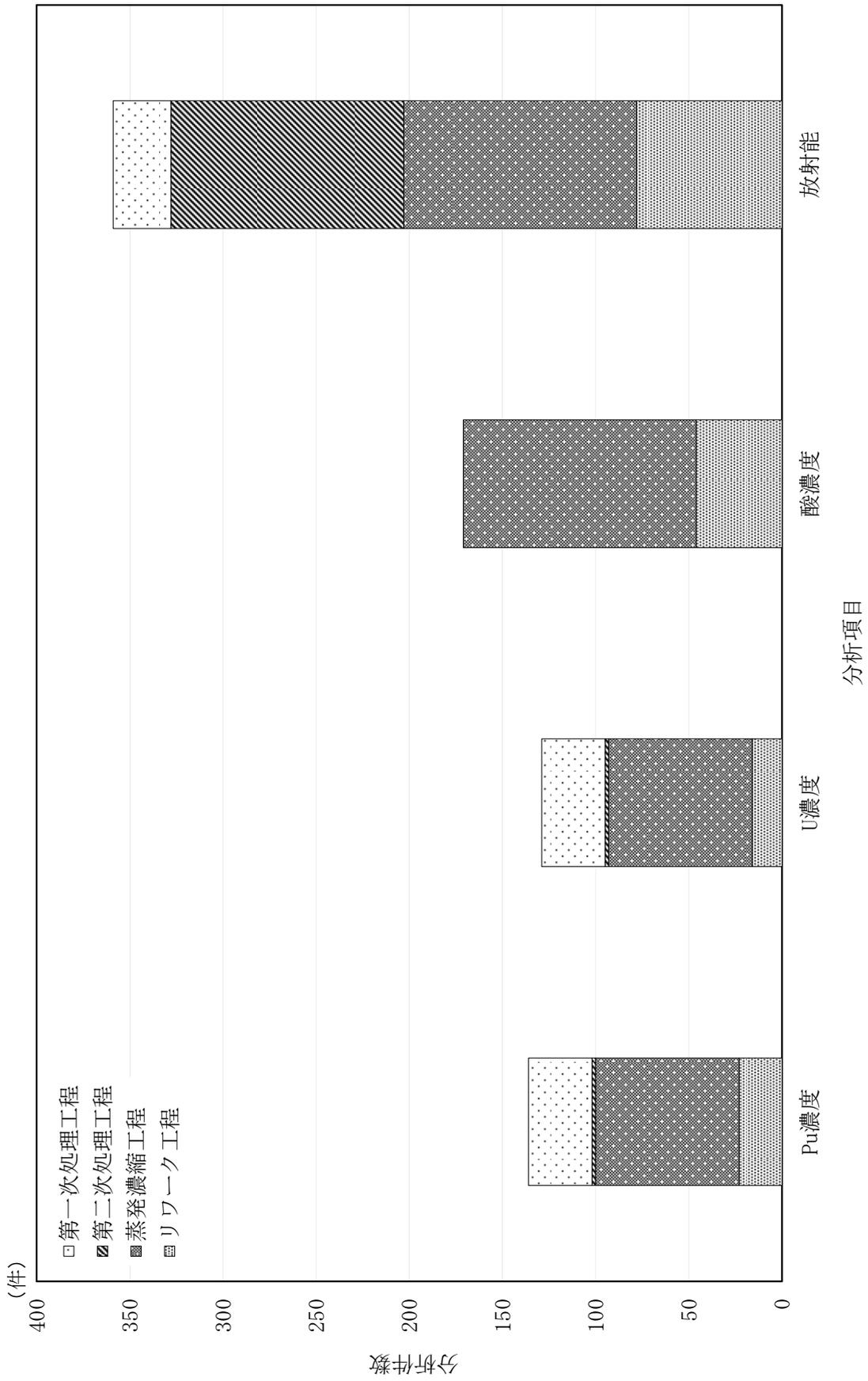
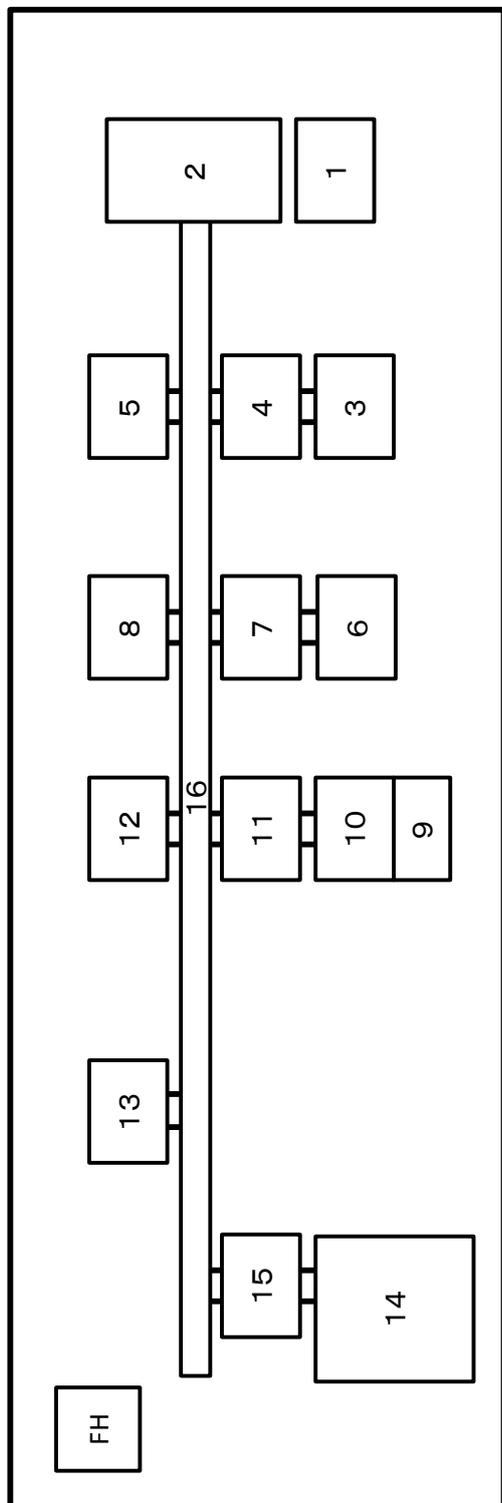
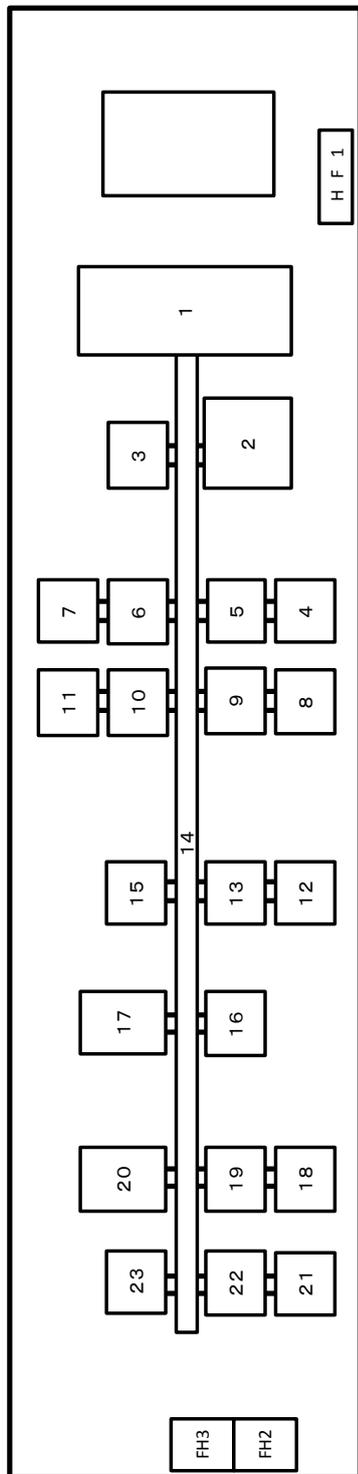


図 4 廃液処理工程における分析項目の分析件数



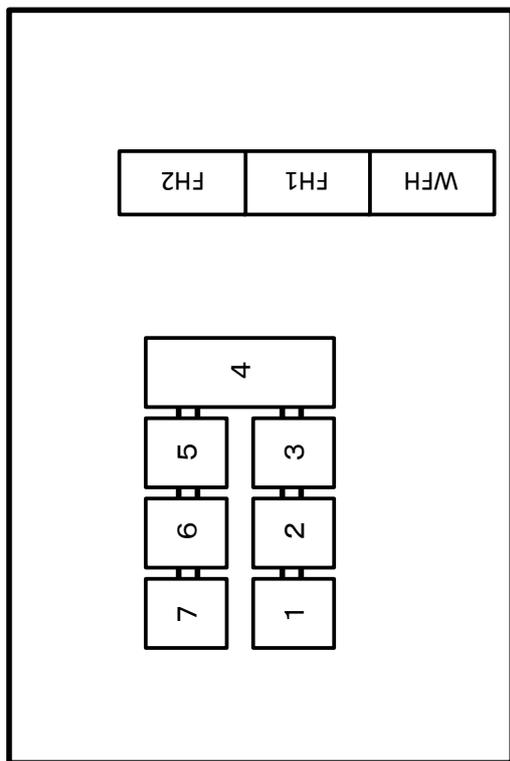
G.B	用途	分析装置名
1	MOX粉末の水分含有率分析	差動型示差熱天秤
2	試料の気送	試料気送装置
3	MOX粉末の比表面積分析	物理吸着測定装置
4	MOX粉末の平均粒子径分析	粒度分布測定装置
5	MOX粉末のカサ密度及びタツプ密度分析	粉末密度測定器
6	MOX粉末のO/M分析	電気管状炉
7	MOX粉末試料の秤量	電子天秤
8	試料中のフッ素、塩素分析	イオンクロマトグラフィー
9	試料の希釈・調製	—
10	試料の希釈・調製	—
11	試料の希釈・調製	—
12	試料の希釈・調製	—
13	試料のマイクロ波加熱溶解	マイクロ波加熱装置
14	金属不純物の分析	直流アーク放電発光分光分析装置
15	MOX粉末試料の溶解	加熱器 (ヒーター)
16	試料の搬送	試料搬送台車
FH	試料の希釈・調製	—

図5 PCDF 機器分析室 分析設備配置概要図



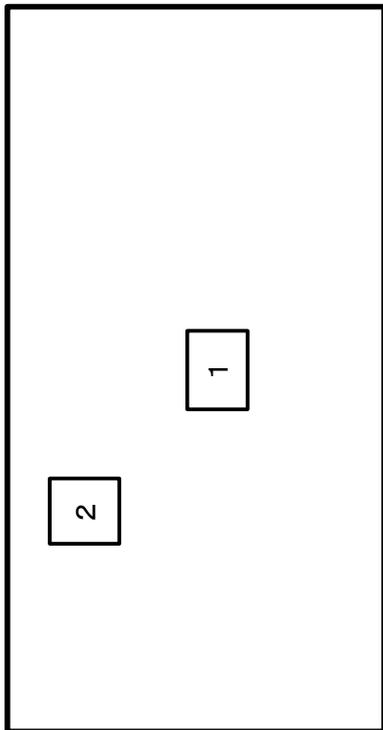
G. B. No	用途	分析装置名
1	試料の気送及びMOX粉末の秤量	電子天秤
2	廃液の廃棄用として使用 (転換工程廃液受け入れボックスへ)	—
3	溶液試料の秤量	電子天秤
4	試料の調製	—
5	試料の調製	—
6	溶液密度の測定	振動式密度計
7	試料の調製	—
8	試料の調製	—
9	X線試料の前処理	—
10	溶液試料の酸濃度分析	導電率計
11	試料の調製	—
12	MOX粉末の溶解	加熱器 (ヒーター)
13	試料の搬送	加熱器 (ヒーター)
14	試料の搬送	試料搬送台車
15	溶液試料の遊離酸濃度分析	滴定装置
16	$\gamma$ 核種の分析	$\gamma$ -スペクトロメリー
17	試料のPu, U分析	蛍光X線分析装置
18	溶液試料の全 $\gamma$ 分析	$\gamma$ 放射能測定装置
19	試料の調製	—
20	MOX粉末の窒素含有量分析	窒素分析装置
21	溶液試料の全 $\alpha$ 分析	$\alpha$ 放射能測定装置
22	全 $\alpha$ 試料前処理	—
23	査察試料の分析	—
FH1	ウラン試料の前処理	—
FH2	低放射性試料の全 $\alpha$ 分析、低放射性試料の全 $\beta$ 分析	$\alpha$ 放射能測定装置、 $\beta$ 放射能測定装置
FH3	低放射性試料の前処理	—

図6 PCDF 工程分析室 分析設備配置概要図



G. B. No	用途	分析装置名
1	試料の溶解・乾固	加熱器
2	試料の前処理(U、Pu分離)	カラム台
3	試料の塗布	試料塗布装置
4	試料の溶解、標準試料の調整	加熱器
5	試料の分取、秤量	電子天秤
6	標準試料の調製	電子天秤
7	標準試料の保管	—
FH1	試料の塗布	試料塗布装置
FH2	U試料の分析	電気炉
WFH	U試料の濃度分析	電子天秤

図 7 分析所 機器分析準備室 分析設備配置概要図



G. B. No	用途	分析装置名
1	U、Pu濃度及び同位体分析	表面電離型質量分析計
2	Pu濃度及び同位体分析	表面電離型質量分析計

図 8 分析所 質量分析室 分析設備配置概要図

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량	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組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> 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=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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	
デシベル	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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> 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=4.1858J (「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 <sup>-6</sup> m

