JAEA-Technology
2017-008
DOI:10.11484/jaea-technology-2017-008

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27年12月～平成28年10月）

Report on Analytical Activities in Potentially Hazardous Materials Mitigation Measures at the Plutonium Conversion Development Facility (2015.12~2016.10)

堀籠 和志　田口 茂郎　石橋 篤　稲田 聡
久野 剛彦　駿河谷 直樹

Kazushi HORIGOME, Shigeo TAGUCHI, Atsushi ISHIBASHI, 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

May 2017
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

JAEA-Technology 2017-008

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 27 年 12 月～平成 28 年 10 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、田口　茂郎、石橋　篤、稲田　聡
久野　剛彦、駿河谷　直樹

（2017 年 3 月 15 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、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平成 26 年 4 月から開始し、平成 28 年 7 月に終了した。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ニル溶液、硝酸プルトニウム溶液等の分析を実施してきた。本報告書は、本処理に係わる平成 27 年 12 月から平成 28 年 10 月までに実施した約 2,200 件の分析業務及び分析設備の保守・点検などの関連業務の実績についてまとめたものである。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松 4-33

JAEA-Technology 2017-008

Report on Analytical Activities in Potentially Hazardous Materials Mitigation Measures at the Plutonium Conversion Development Facility (2015.12～2016.10)

Kazushi HORIGOME, Shigeo TAGUCHI, Atsushi ISHIBASHI,
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 March 15, 2017)

The plutonium solution has been converted into MOX powder to mitigate the potential hazards of storage plutonium solution such as hydrogen generation at the Plutonium Conversion Development Facility. The plutonium conversion operations had been started in April, 2014, and had been finished in July, 2016. With respect to the samples taken from the conversion process, about 2,200 items of plutonium/uranium solutions and MOX powders had 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 December, 2015 to October, 2016.

Keywords : Plutonium Conversion Development Facility , Analytical Activities

目　次

Contents

表リスト

図リスト

List of tables

List of figures

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、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）では、平成 26 年 4 月 28 日より施設内の貯槽に保有している硝酸プルトニウム溶液（約 3.5 m^3）の固化・安定化のための MOX 粉末化処理を開始し、平成 28 年 7 月 28 日に終了した [1),2)]。

本 MOX 粉末化処理を円滑に実施するためには、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なる。再処理施設の分析設備では、このニーズに対応するため、ウラン、プルトニウム濃度、酸濃度、金属不純物含有率を主とする工程管理・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、MOX 粉末化処理における保障措置上の要件にも対応した。

本報では、前報 [3)] に引き続き、平成 27 年 12 月 10 日から、MOX 粉末化処理に係わる主な分析が終了した平成 28 年 10 月末までの分析関連業務の実績について報告する。また、本報では、本安定化処理の全期間中（平成 26 年 4 月～平成 28 年 10 月）に実施された保障措置のための各種査察対応の実績についても併せて報告する。

2. プルトニウム転換技術開発施設における分析実績

PCDF の分析設備では、平成 27 年 12 月以降も引き続き、MOX 粉末化処理に係わる各種分析を実施した。分析項目と分析方法及び、分析項目とその管理基準について、それぞれ表 1、表 2 に示す。平成 26 年 4 月以降、分析項目、分析方法及びその管理基準に変更はない。分析方法の概要については前報 [3)] を参照されたい。

本期間の安定化処理に係る分析目的毎の分析件数の実績を表 3 に示す。工程管理・品質管理に係わる分析が約 1,700 件、計量管理に係わる分析が約 500 件であり、分析の総処理件数は約 2,200 件であった。工程管理・品質管理分析、計量管理分析の実績について、以下に要点をまとめる。

2.1 工程管理・品質管理分析

工程管理分析は、MOX 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り、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。品質管理分析は、製造された MOX 粉末が要求される製品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。工程管理・品質管理分析の対象試料は、MOX 粉末製造工程の受入工程、混合工程、粉末中間貯蔵工程、充填工程の各工程及び廃液処理工程から採取された試料が対象となる。MOX 粉末製造工程及び廃液処理工程の各工程

別に整理した分析項目と分析件数を、それぞれ図 1、図 2 に示す。MOX 粉末製造工程における分析項目は、ウラン濃度、プルトニウム濃度、密度、酸濃度、放射能濃度、金属不純物含有率、水分含有率、酸素と重金属の比（O／M 比)、比表面積であり、約 1,100 件の分析を実施した。金属不純物含有率は、MOX 粉末を製造する過程において、MOX 製品の品質を決定する重要なパラメータであるとともに、最終製品である MOX 粉末の品質を確認するうえでも重要となる。そのため、金属不純物含有率は、受入工程、混合工程、中間貯蔵工程及び充填工程の各段階で、バッチ毎に 18 金属成分の含有率を確認しているため、MOX 粉末製造工程における工程管理・品質管理分析件数全体の約 7 割と分析の大半を占めている。廃液処理工程における分析項目は、ウラン濃度、プルトニウム濃度、酸濃度、放射能濃度であり、約 560 件の分析を実施した。主な分析項目は、放射能分析であり、その件数は廃液処理工程における分析件数全体の約 5 割を占めた。

MOX 粉末製造工程及び廃液処理工程に係わる工程管理・品質管理分析の総実施件数は約 1,660 件であった。期間あたりの分析実施件数は、前報での報告対象期間と同等であった。

2.2 計量管理分析

計量管理分析は、工程内の核物質の在庫の量を厳密・正確に管理するためのデータ取得を目的としたものであり、極めて高い精度（0.1%～0.2% at 2σ：国際目標値 International Target Value）での分析が求められる。計量管理分析の対象工程は、MOX 粉末製造工程（受入工程、混合工程、充填工程）であり、対象試料は、分離精製工場から受入れた硝酸ウラニル溶液、硝酸プルトニウム溶液、これらの混合溶液及び MOX 粉末である。分析項目ごとの分析件数を図 3 に示す。計量管理に係わる主な分析項目は、ウラン，プルトニウム濃度及び同位体組成であり、約 480 件の分析を実施した。

3. 査察対応に係わる分析

本安定化処理期間中、PCDF では、IAEA の保障措置の要件に対応するための各種査察が実施された。同分析設備では、これら査察に対応するための査察試料の非破壊測定（以下、NDA：Non-Destructive Assay）及び査察試料を査察側の分析施設へ輸送するための収去処理（以下、DA 処理）を実施した。平成 26 年 4 月から平成 28 年 10 月の期間における、本安定化処理に係わる NDA 及び DA 処理の件数を図 4 に示す。NDA への対応は 57 件、DA 処理は、Fixed-day RII が 16 件、プルトニウム受入検認査察が 7 件、New-lot 査察が 22 件、PIV の対応が 7 件、その他、5 件の計 57 件であった。

中間在庫検認査察（Fixed-day RII）では、受入工程、混合工程の各貯槽から採取された硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラン・プルトニウム混合溶液について、IAEA が実施する NDA の助勢作業を実施した。収去処理の対象試料については、試料の希釈、ガラスバイアルへの分取・秤量、加熱乾固、SVSC（Secure Vial Sealing Container）への取付け等の DA 処理を実施し、試料を査察側の分析施設へ搬出した。また、分離精製工場から PCDF への硝酸プルトニウム溶

液の移送では、PCDF のプルトニウム受入貯槽でのプルトニウム量を検認するための査察（プルトニウム受入検認査察）が実施された。本査察では、Fixed-day RII と同様の NDA 及び DA 処理を実施した。MOX 粉末製品は、貯蔵庫に入庫した段階で、そのウラン、プルトニウム量を検認するための査察（New-lot 査察）が実施された。本査察では、MOX 粉末製品を加熱溶解した後、Fixed-day RII と同様の DA 処理を行った。

査察に係わる操作は、全て査察試料の真正を担保するため、査察官立ち合い下で実施された。査察官の非立ち合い時は、SSVU（Short Surveillance Video Unit）または XCAM（Next Generation Surveillance System）と呼ばれる監視カメラのもとで実施した。

4. プルトニウム転換技術開発施設分析設備の保守・点検

4.1 分析設備

本安定化処理に係わる分析設備については、平成 26 年 4 月以降、設備の増設、更新などは行っておらず、本運転に係わる分析対応は、PCDF の機器分析室及び工程分析室に設置されているグローブボックス 39 台、ヒュームフード 4 台及び、分析所の機器分析準備室及び質量分析室に設置されているグローブボックス 9 台、ヒュームフード 2 台を用いて実施した。

4.2 保守・点検の実績

グローブボックス、ヒュームフード及び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、本安定化処理期間中、故障などは発生せず健全な状態を維持した。

(1) グローブボックス

グローブボックスについては、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±50 Pa の範囲にあることを確認した。グローブ及びビニールバッグについては、使用開始前にα線用サーベイメータを用いる直接サーベイを行い、汚染のないことを確認するとともに、ピンホールの有無、劣化によるひび割れの有無の確認等を実施した。また、作業終了後には、グローブボックス前面（作業面）の表面線量率を測定した。グローブボックスの給気フィルタ、排気フィルタ、分析試料の気送設備等については、各月一回の頻度で点検を実施した。また、平成 28 年 1 月、4 月、7 月及び 10 月には、グローブボックス本体の外観、表面密度、表面線量率の測定を実施した。これらの点検により、グローブボックスに異常のないことを確認した。また、当期間中、取付けから 4 年経過したグローブ 127 本、5 年経過したビニールバック 9 本についてはグローブボックスの取扱い要領に基づき交換を実施した。

(2) ヒュームフード

ヒュームフードについては、日常点検として毎日、外観の異常の有無及び風向の点検を実施した。また、各月一回の頻度で排気ダクト、ヒュームフード開口部の表面密度、表面線量率の測定を実施した。平成 28 年 1 月には、風速及びダクト接続部のボルトの取付け

状態を確認し、異常の無いことを確認した。

4.3　廃棄物の発生量

平成 27 年 12 月から平成 28 年 10 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）が 29 個、難燃性固体廃棄物（20 リットルカートン）が 22 個、不燃性固体廃棄物（20 リットルカートン）が 15 個発生した。

5.　分析機器の校正・整備

5.1　分析機器の校正の実績

分析機器の校正方法、頻度及び管理基準については、前報の報告期間以降に変更はなく、各分析機器について、表 4 に示す管理基準、頻度での校正を実施した。その結果、本期間中、分析機器に異常は見られず、分析機器を健全な状態に維持した。

5.2　分析機器の保守点検

(1) 表面電離型質量分析計

表面電離型質量分析計は、ウラン、プルトニウムの同位体希釈分析及び同位体分析に使用する機器であり、計量管理を行う上での重要な分析機器の一つである。平成 28 年 2 月には、分析所に設置されている表面電離型質量分析計 3 台（サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社製 MAT262：2 台，TRITON：1 台）について、機器の保守点検並びに性能検査を製造メーカに依頼し、実施した。

真空系については、ロータリーポンプ、ターボ分子ポンプ、イオンポンプの各機器及び真空系配管の点検、並びに真空度の検査を実施した。また電気系各ユニットについては、主電源、高電圧系、磁場制御系、デジタルアナログコンバータ等についての検査を実施した。その他、イオンソース、フォーカス機能、フィラメント電流制御機能、マガジンモータ、ファラデーモーターの動作検査を実施した。MAT262 の 1 台については、イオンソースの付着物質に起因すると推定される放電が確認されたことから、イオンソースを取外しての超音波洗浄を行った。最終的に、標準試料の測定によるアンプの電気ノイズ、分解能、ピーク安定性、感度を評価した結果、3 台とも計量分析に求められる必要な性能を担保していることを確認した。

(2) 直流アーク放電発光分光分析装置

直流アーク放電発光分析装置は、主に MOX 粉末中の金属不純物分析に使用する機器であり、MOX 粉末の品質管理を行う上での重要な分析機器の一つである。平成 28 年 3 月には、PCDF の機器分析室に設置されている直流アーク放電発光分光分析装置（株式会社島津製作所製 GQM-1000S）の保守点検を株式会社島津アクセスに依頼して実施した。

発光スタンドの点検では、放電室の状態確認、電極駆動系の動作確認及び光軸確認等を実施した。測光部の点検では、暗電流、高圧電源の安定性及び発光強度の安定性を確認した。発光部の点検では、出力電流値、冷却系性能の確認及び電気回路の絶縁抵抗値の測定を行った。光学系については、グレーティングホルダーを用いて発光スタンドと分光器間の光軸、出口スリット位置及び集光ミラーの位置を調整する整備を行った。これら点検、整備の結果、品質管理分析に求められる所定の性能が担保されていることを確認した。

6. まとめ

本報告書では、平成 27 年 12 月から平成 28 年 10 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実績、並びに分析設備・機器の点検・保守等の実績をまとめた。

平成 26 年 4 月 28 日に開始された硝酸プルトニウム溶液の固化・安定化処理は平成 28 年 7 月 28 日をもって終了し、今後、PCDF は廃止措置に移行する。分析設備では、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、分析の品質を担保し、廃止措置において求められる分析ニーズに対応することで、同施設の円滑な廃止措置に寄与していくことが重要であると考える。

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式会社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) 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における保管プルトニウム溶液 固化・安定化処理の終了について（お知らせ）
http://www.jaea.go.jp/02/press2016/p16072901/（参照 2016 年 12 月 9 日）.

3) 堀籠和志他， 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わる分析業務報告（平成 26 年 4 月～平成 27 年 12 月）, JAEA-Technology 2016-026, 2016, 21p.

表１　分析項目と分析方法一覧（1/2）

工程	対象試料	分析項目	分析方法(分析装置)
MOX 粉末製造工程 受入工程	硝酸プルトニウム溶液	Pu 濃度	同位体希釈質量分析法（表面電離型質量分析計）
		Pu 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）
		^{241}Ａｍ含有率	
		全γ放射能濃度	直接γ計測法 (NaI（Tl）シンチレーション検出器)
		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）
		金属不純物元素濃度 (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)
MOX 粉末製造工程 受入工程	硝酸ウラニル溶液	U 濃度	同位体希釈質量分析法（表面電離型質量分析計）
			酸化重量法（マッフル炉、電子天秤）
		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）
		^{241}Am 含有率	
		全γ放射能濃度	直接γ計測法 (NaI（Tl）シンチレーション検出器)
		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）
		金属不純物元素濃度 (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)
MOX 粉末製造工程 混合工程	混合溶液	Pu，U 濃度	同位体希釈質量分析法（表面電離型質量分析計）
			蛍光エックス線分析法（蛍光エックス線分析装置）
		Pu，U 同位体組成	質量分析法（表面電離型質量分析計）
MOX 粉末製造工程 中間貯蔵工程	MOX 粉末	Pu，U 含有量 Pu，U 含有率	同位体希釈質量分析法（表面電離型質量分析計）
			蛍光エックス線分析法（蛍光エックス線分析装置）
		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）
			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率 (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　分析項目と分析方法一覧（2/2）

工程	対象試料	分析項目	分析方法(分析装置)
MOX 粉末製造工程 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）
		^{241}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率 (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）
		カサ密度	タップデンサー法　（粉末密度測定器）
		タップ密度	
廃液処理工程	工程内廃液	Pu，U 濃度	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α放射能濃度 Pu 濃度	直接α線計測法 （α放射能測定装置）
		全β放射能濃度	直接β線計測法 （β放射能測定装置）
		全γ放射能濃度	直接γ線計測法 （γ放射能測定装置）

表２　分析項目（分析方法）と管理基準

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℃：0.995324≦測定値≦0.995364(g/cm^3) n＝2 測定の差：≦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：≦5% n＝2 測定の差：≦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：≦5% n＝2 測定の差：≦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：≦5% n＝2 測定の差：≦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：≦5% n＝2 測定の差：≦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：≦5% n＝2 測定の差：≦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：≦5% n＝2 測定の差：≦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：≦5% n＝2 測定の差：≦10%
9	金属不純物元素濃度分析 （直流アーク放電発光分光分析法）	標準試料の表示値と測定値の差：≦1% n＝2 測定の差：≦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：≦3% n＝2 測定の差：≦3%
11	比表面積測定 （低温物理吸着法）	標準試料の測定：24≦測定値≦26(m^2/g) n＝2 測定の差：≦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≦測定値≦2.779(μm) n＝2 測定の差：≦10%
13	カサ密度・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≦測定値≦2.5(g/cm^3) 基準分銅の測定：3.4≦測定値≦4.0(g/cm^3)
14	水分含有率分析 （加熱重量法）	標準試料の測定：10.64≦測定値≦10.73(wt%) n＝2 測定の差：≦10%
15	O/M 比分析 （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：≦1%
16	プルトニウム及びウラン濃度分析 （同位体希釈質量分析法）	n＝2 測定の差：≦0.5%
17	プルトニウム及びウラン同位体組成分析 （質量分析法）	n＝2 測定の差：≦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：≦1% n＝2 測定の差：≦5%

表３　分析実施件数

分析目的	対象工程	分析件数
工程管理・品質管理分析	受入、混合、中間貯蔵、充填	1,098
	廃液処理	557
計量管理分析	受入、混合、充填	475

表 4　分析機器校正方法一覧

No.	機器	校正方法（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)	≦0.003%	毎月
3	α放射能測定装置	プラトー長⊿V	150V 以上	毎月
		プラトー傾斜θ	5%/100V 以下	
		計数効率	20%～40%	
		前回との差	±5%	
4	β放射能測定装置	プラトー長⊿V	150V 以上	毎月
		プラトー傾斜θ	10%/100V 以下	
		計数効率	20%～40%	
		前回との差	±5%	
5	γ放射能測定装置	プラトー長⊿V	150V 以上	毎月
		プラトー傾斜θ	10%/100V 以下	
		計数効率	5%～20%	
		前回との差	±5%	
6	γ線核種濃度分析装置	標準線源ピークエネルギー	±2keV	6 ヶ月に 1 回
		ピーク検出効率	±10%	
		標準線源測定	±10%	
7	電位差滴定装置	pH 標準液測定	±0.02	3 ヶ月に 1 回
		標準溶液	±5%	
8	蛍光エックス線分析装置	検量線相関係数	≧0.999	6 ヶ月に 1 回
		相対的標準偏差(n=5)	≦5%	
		標準溶液	≦±10%	
9	イオンクロマトグラフィー	検量線相関係数	≧0.999	6 ヶ月に 1 回
		相対的標準偏差(n=5)	≦5%	
		標準溶液	≦±5%	
10	直流アーク放電 発光分光分析装置	検量線相関係数	≧0.995	使用の都度
		標準試料	±15%	
11	窒素分析装置	検量線相関係数	≧0.999	6 ヶ月に 1 回
		相対的標準偏差(n=5)	≦3%	
		標準試料	≦±3%	
12	物理吸着測定装置	ゼロ校正	±0.02	使用の都度
		キャリブガス	$0.02m^2$	
		標準ガス	$1m^2$／g	
13	粒度分布測定装置	標準試料	±3σ	使用の都度
14	差動型示差熱天秤	標準試料	±3σ	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）	$10±1.50cm^{-1}$	6 ヶ月に 1 回
		相対的標準偏差(n=5)	≦3%	
17	粉末密度測定装置	ダンピング時間	60 秒±5 秒／120 回	6 ヶ月に 1 回
18	電気管状炉	昇温作動	設定温度±3℃	6 ヶ月に 1 回
		警報作動	設定温度±10℃	

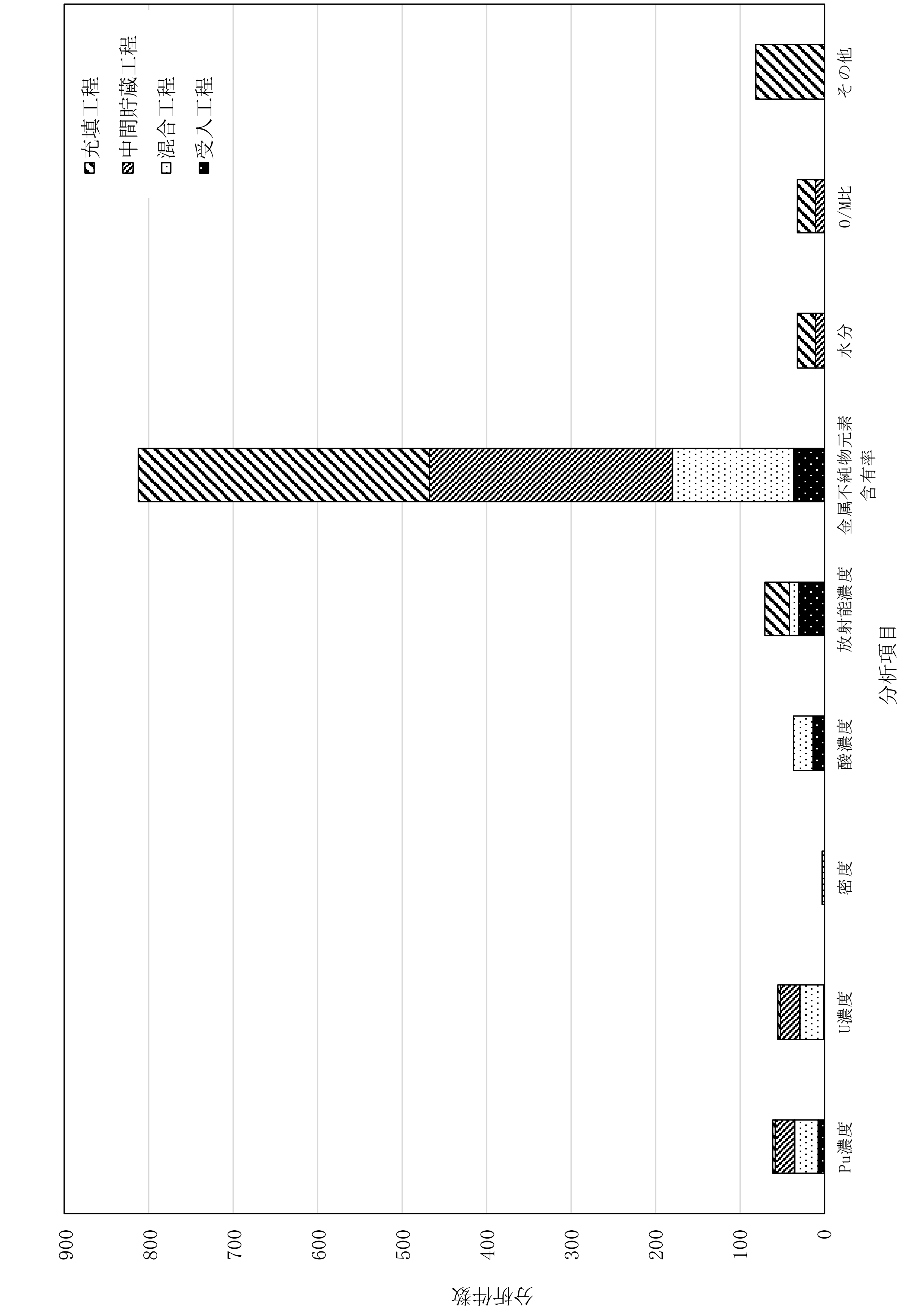

図１　工程管理・品質管理分析（MOX 粉末製造工程）の分析項目と分析件数

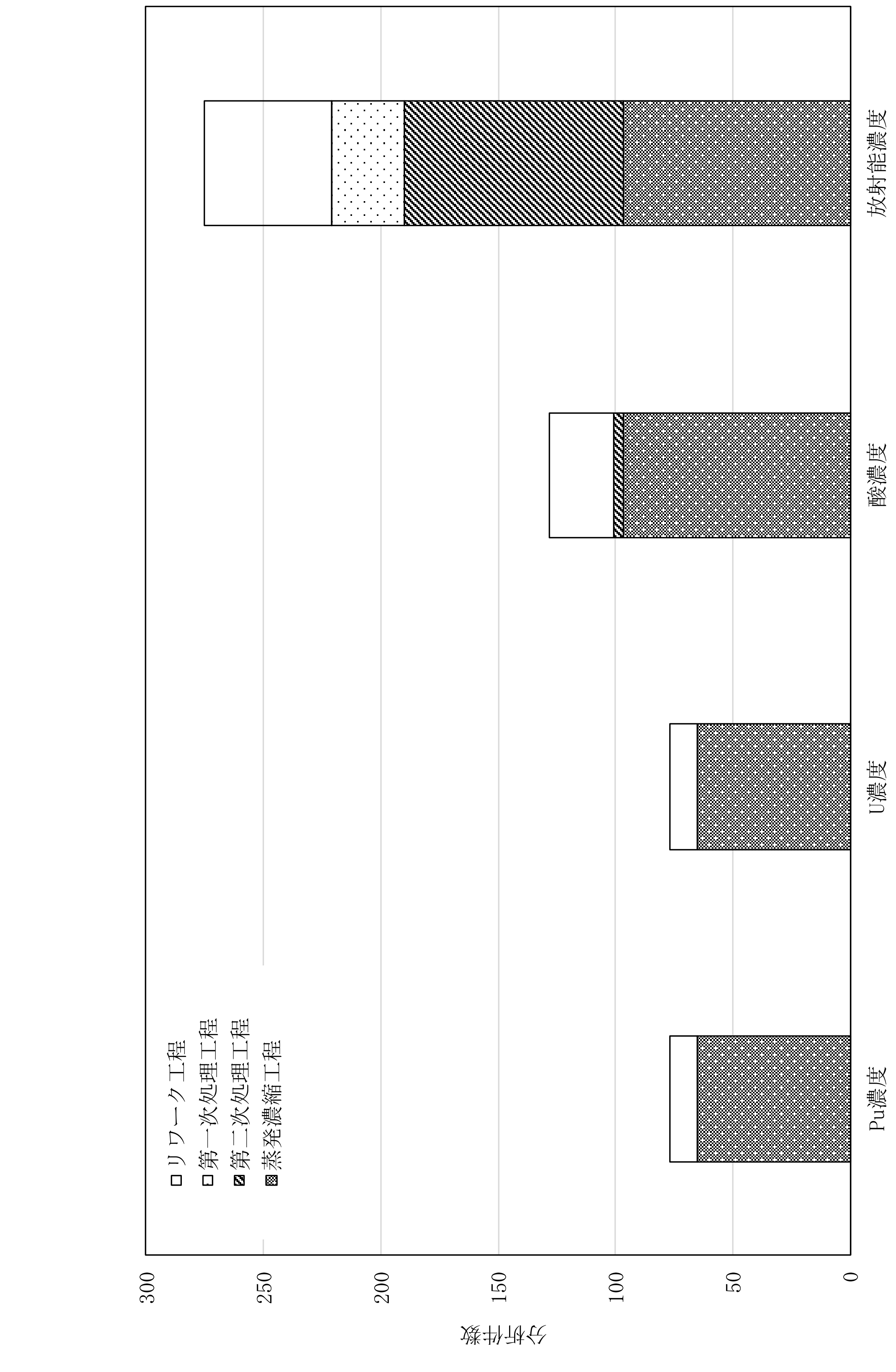

図２　工程管理・品質管理分析（廃液処理工程）の分析項目と分析件数

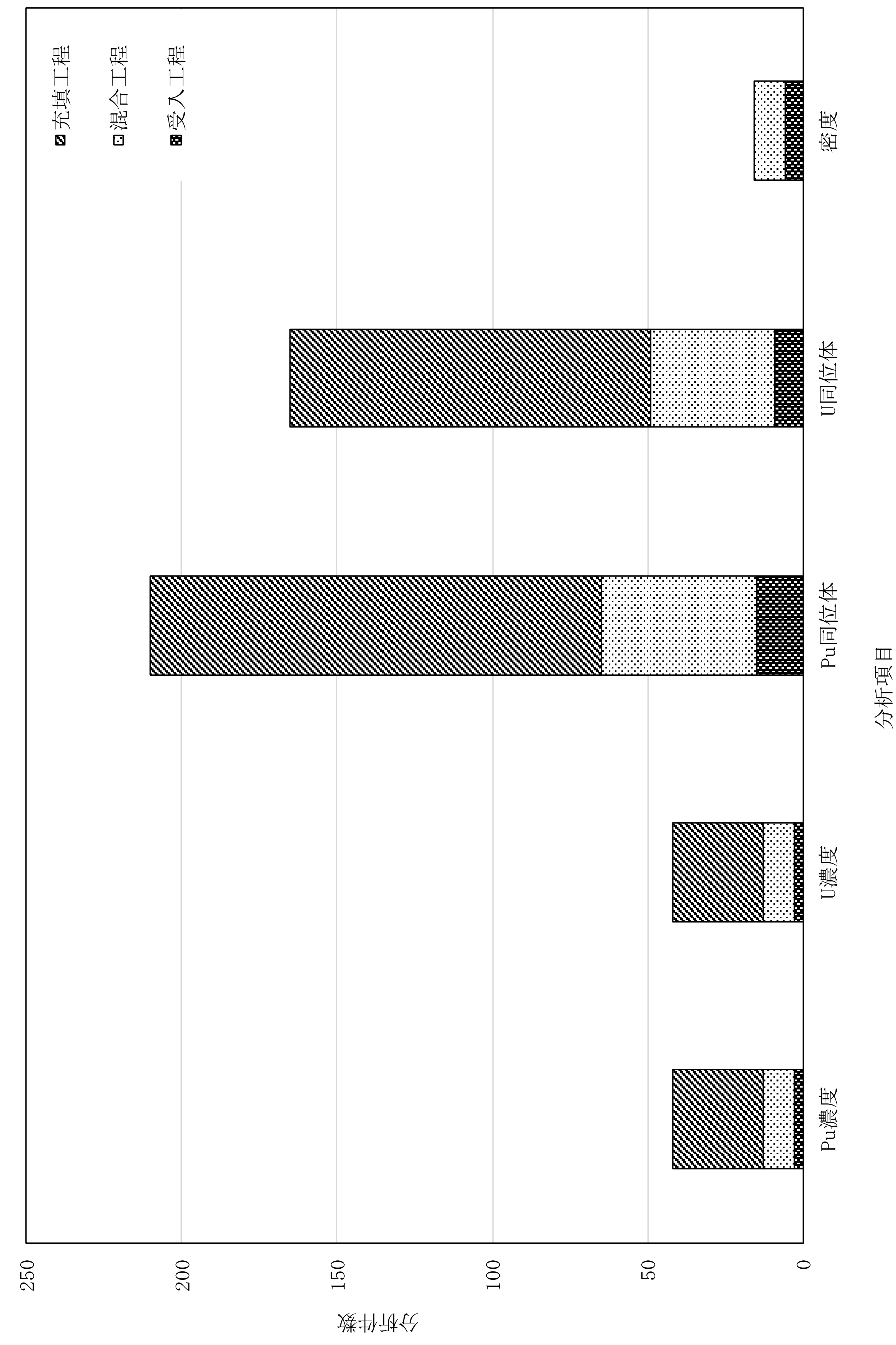

図 3　計量管理分析の分析項目と分析件数

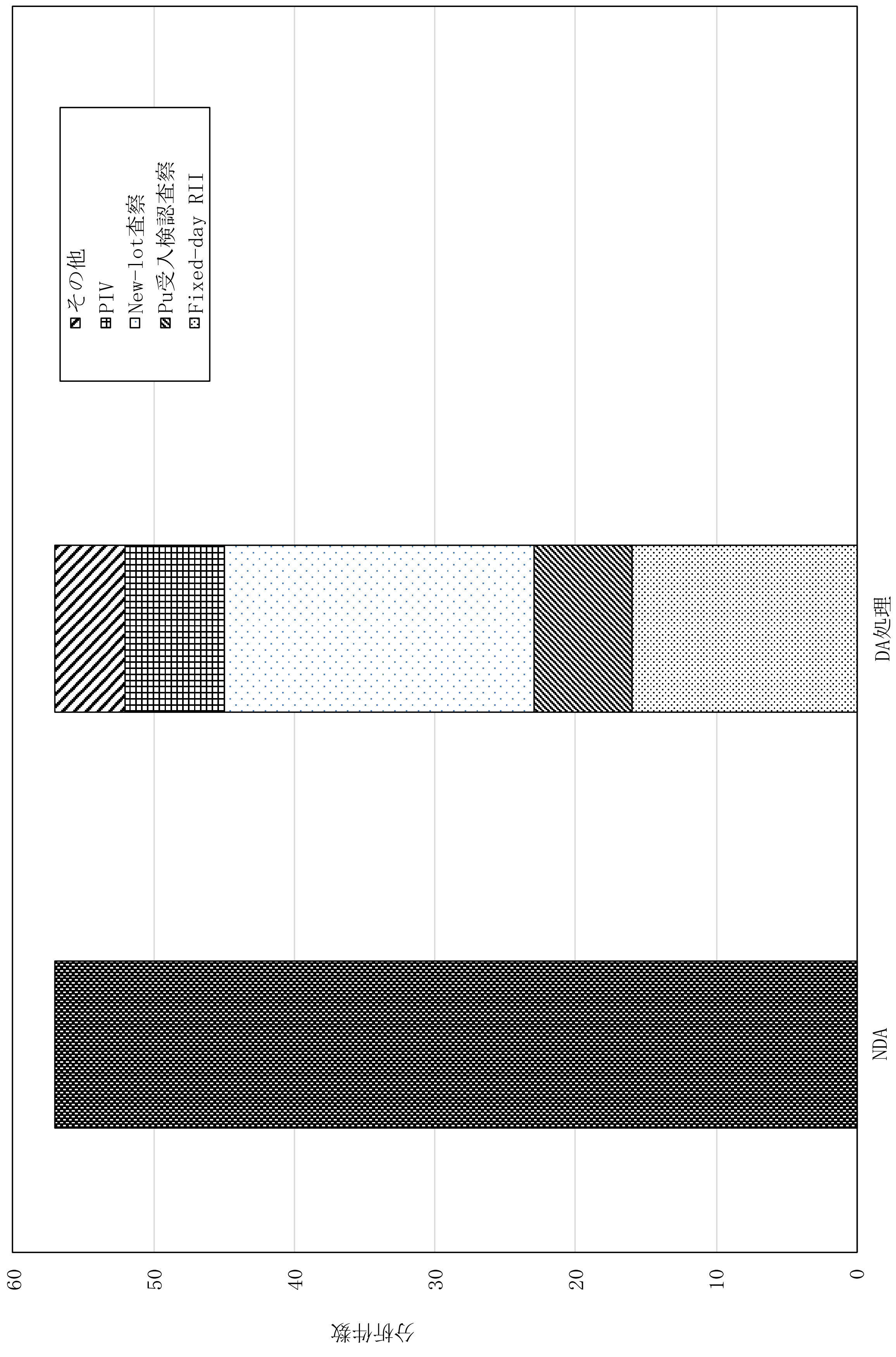

図 4　査察に係わる NDA 及び DA 処理実績

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，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	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		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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	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)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能 (f)	ベクレル (d)	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で”radioactivity”と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	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)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	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	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	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	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	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=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^2=$10^4 m^2$
リットル	L，l	1 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=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
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^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	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^{-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 =1$cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	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 (a)	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(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^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		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= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	µ	1 µ =1µm=10^{-6}m

（第8版，2006年）