

セリウム媒体電解酸化法を用いた TRU廃棄物除染に係る基礎試験

Basic Study on Decontamination of TRU Wastes
with Cerium Mediated Electrolytic Oxidation Method

石井 淳一 小林 冬実 内田 昇二 住谷 正人
木田 孝 白橋 浩一 梅田 幹 櫻庭 耕一

Junichi ISHII, Fuyumi KOBAYASHI, Shoji UCHIDA, Masato SUMIYA
Takashi KIDA, Koichi SHIRAHASHI, Miki UMEDA and Koichi SAKURABA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
安全試験施設管理部

Department of Criticality and Fuel Cycle Research Facilities
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

March 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

セリウム媒体電解酸化法を用いたTRU廃棄物除染に係る基礎試験

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

原子力科学研究所 安全試験施設管理部

石井 淳一・小林 冬実^{*1}・内田 昇二^{※1}・住谷 正人・木田 孝

白橋 浩一・梅田 幹・櫻庭 耕一

(2009年12月17日 受理)

燃料サイクル安全工学研究施設（NUCEF）では、再処理施設等から発生する TRU 廃棄物の発生量低減化方策として、セリウム媒体電解酸化法による除染技術に着目し、TRU 廃棄物をクリアランスレベルまで除染できる技術の開発を行っている。セリウム媒体電解酸化法は、硝酸溶液中で Ce^{4+} を強力な酸化剤として使用し、除染対象物である TRU 廃棄物の金属材表面の酸化物層及び金属材表面を溶解する技術である。

本研究では、硝酸溶液を用いたセリウム媒体電解酸化法の技術的な実用化に向けて、TRU 廃棄物を溶解する目標速度（ $2\sim 4\mu\text{m}/\text{h}$ ）を達成するために溶液条件の最適化を図ることを目的とし、 Ce^{3+} 初期濃度及び硝酸濃度をパラメータとした試験を実施した。パラメータ試験結果より選定した溶液条件において模擬廃棄物を溶解する廃棄物溶解コールド試験を実施した結果、溶解時間 90 時間までの平均溶解速度は、 $3.3\mu\text{m}/\text{h}$ であった。以上のことから、クリアランスレベルまで除染するのに必要な金属材表面の溶解深さを $20\mu\text{m}$ と仮定すると、その除染時間は約 6 時間であり、1 バッチ/日の廃棄物除染が十分に可能であること及び 1 回分の除染液で 15 バッチの繰り返し処理が可能であることを確認した。

**Basic Study on Decontamination of TRU Wastes
with Cerium Mediated Electrolytic Oxidation Method**

Junichi ISHII, Fuyumi KOBAYASHI*¹, Shoji UCHIDA※¹, Masato SUMIYA, Takashi KIDA,
Koichi SHIRAHASHI, Miki UMEDA and Koichi SAKURABA

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

(Received December 17, 2009)

At Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility (NUCEF), the cerium mediated electrolytic oxidation method which is a decontamination technique to decrease the radioactivity of TRU wastes to the clearance-level has been developed for the effective reduction of TRU wastes generated from the decommissioning of a nuclear fuel reprocessing facility and so on. This method corrodes the oxide layer and the surface of metallic TRU metal wastes by the strong oxidation power of Ce^{4+} in nitric acid.

In this study, parameter tests were conducted to optimize the solution condition of Ce^{3+} initial concentrations and nitric acid concentrations. The target corrosion rate of metallic TRU wastes set to be 2~4 μ m/h for the practical use of this method. Under the optimized solution condition, a dissolution test of stainless steel simulating wastes was carried out. From the result of the dissolution test, the average corrosion rate was 3.3 μ m/h during the test time of 90 hours. Based on the supposition that the corrosion depth of metallic TRU wastes was 20 μ m enough to achieve the clearance-level, the treatment time for the decontamination was about 6 hours. It was confirmed from the result that the decontamination could be performed within one day and the decontamination solution could repeatedly reuse 15 times.

Keywords: TRU Wastes, Electrolytic Oxidation, Clearance-level, Decontamination, Ce^{4+} , Nitric Acid, Corrosion Rate

* 1 on loan to Secretariat of Nuclear Safety Commission of Japan, Japanese Cabinet Office

※1 Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. パラメータ試験	2
2.1 概要	2
2.2 試験方法	2
2.2.1 試験装置	2
2.2.2 試験条件	3
2.2.3 試験操作及び分析	3
2.3 試験結果及び考察	4
2.3.1 Ce^{3+} 初期濃度依存性試験	4
2.3.2 硝酸濃度依存性試験	4
2.3.3 溶液条件の最適化	4
3. 廃棄物溶解コールド試験	7
3.1 概要	7
3.2 試験方法	8
3.2.1 試験装置	8
3.2.2 試験条件	8
3.2.3 試験操作及び分析	8
3.3 試験結果及び考察	9
4. おわりに	11
謝辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Parameter Experiments	2
2.1 Summary	2
2.2 Experimental	2
2.2.1 Experimental Equipments	2
2.2.2 Experimental Conditions	3
2.2.3 Experimental Procedure and Analysis	3
2.3 Results and Discussion	4
2.3.1 Effect of Ce^{3+} Initial Concentration	4
2.3.2 Effect of Nitric Acid Concentration	4
2.3.3 Determination of Optimum Solution Condition	4
3. Simulated Wastes Dissolution Experiments	7
3.1 Summary	7
3.2 Experimental	8
3.2.1 Experimental Equipments	8
3.2.2 Experimental Conditions	8
3.2.3 Experimental Procedure and Analysis	8
3.3 Results and Discussion	9
4. Conclusion	11
Acknowledgments	12
References	12

1. はじめに

再処理施設等から発生する超ウラン核種を含む放射性廃棄物（以下「TRU 廃棄物」という。）は、非常に長い期間にわたり放射線を放出するため、放射能レベルに応じて浅地中処分から地層処分までの幅広い処分方法が検討されている。このため、TRU 廃棄物の処理処分費用低減化の観点から、発生する TRU 廃棄物の量を低減することや、含有する TRU 核種濃度を低減する（除染する）ことが必要である。

燃料サイクル安全工学研究施設（以下「NUCEF」という。）では、再処理施設等から発生する TRU 廃棄物の発生量低減化方策として、セリウム媒体電解酸化法による除染技術に着目し、TRU 廃棄物をクリアランスレベル¹⁾まで除染できる技術の開発を行っている。

セリウム媒体電解酸化法は、硝酸溶液中で Ce^{4+} を強力な酸化剤として使用し、除染対象物である TRU 廃棄物の金属材（母材）表面の酸化物層及び金属材表面を溶解する技術である。除染に伴って減少する Ce^{4+} は電解により連続的に再生し再利用できることから、二次廃棄物の発生量が少ないという特徴を有している。

Ce^{4+} を用いた除染技術における除染液には、原子炉施設の機器除染に適している $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-Ce}^{4+}$ 溶液（以下「SC 溶液」という。）と再処理施設の機器除染に適している $\text{HNO}_3\text{-Ce}^{4+}$ 溶液（以下「NC 溶液」という。）の 2 種類がある²⁾。SC 溶液を用いた除染法は、ベルギー原子力研究所^{3) 4)} 及び旧日本原子力研究所^{2) 5) 6)} において、原子炉施設の一次冷却系機器の除染に用いられた実績がある。一方、NC 溶液を用いた除染法は、フランス・イギリスを除く欧米各国で核燃料の再処理を断念した等の背景から、再処理施設の機器除染に関する実績は乏しく、関連する報告も少ない。このため、NC 溶液を用いた金属材の腐食（溶解）速度及び溶液条件がセリウムの電解酸化反応に及ぼす影響については、不明な点が多い。そこで、本試験では、NC 溶液を用いたセリウム媒体電解酸化法の技術的な実用化に向けて、溶液条件の最適化を図ることを目的として、パラメータ試験を実施した。パラメータ試験では、セリウムの電解酸化反応に影響を及ぼす因子であり、かつ、溶液の初期条件として容易に操作可能な因子である Ce^{3+} 初期濃度及び硝酸濃度をパラメータとした。パラメータ試験の結果から Ce^{3+} 初期濃度及び硝酸濃度がセリウムの電解酸化反応に与える影響を明らかにするとともに、目標溶解速度を満足する最適な溶液条件を選定した。さらに、選定した最適溶液条件において、模擬廃棄物を溶解する廃棄物溶解コールド試験を行い、模擬廃棄物の溶解速度及び 1 回分の除染液によって処理可能な金属廃棄物のバッチ数について評価した。

本報告書は、NC 溶液を用いたセリウム媒体電解酸化法について、溶液条件の最適化を図

るために実施したパラメータ試験の結果及び選定された最適溶液条件において実施した廃棄物溶解コールド試験の結果についてまとめたものである。以下では、第 2 章でパラメータ試験について、第 3 章で廃棄物溶解コールド試験について、第 4 章で全体のまとめについて、それぞれ述べる。

2. パラメータ試験

2.1 概要

セリウム媒体電解酸化法の原理の概要を Fig.2.1 に示す。NC 溶液を用いたセリウム媒体電解酸化法において、強力な酸化剤である Ce^{4+} は、再処理施設等の硝酸溶液中において強い耐腐食性能を有するステンレス鋼 (SUS304) について金属材表面の酸化物層及び金属材表面の両方を溶解する (除染する) ことができる。除染に伴って減少する Ce^{4+} を電解酸化することによって再生し、 Ce^{4+} 濃度を一定に維持することにより高い除染効果を維持できる。したがって、硝酸溶液中における Ce^{3+} から Ce^{4+} への電解酸化反応を効率よく進めることは本除染技術の開発にとって非常に重要な課題である。

パラメータ試験では、 Ce^{3+} から Ce^{4+} への電解酸化反応速度 (Ce^{4+} 生成速度) に影響を及ぼす因子であり、かつ、溶液の初期条件として容易に操作可能な因子である Ce^{3+} 初期濃度及び硝酸濃度に着目し、電解酸化反応を効率的に進めるために最適な溶液条件を選定した。

2.2 試験方法

2.2.1 試験装置

本試験に用いた試験装置全体の概略を Fig.2.2 に示す。試験装置は、除染槽、温度制御用恒温槽、電解槽、陰極液供給槽、直流電源装置、 NO_x 洗浄塔等から構成される。

除染槽は、チタン製で、容量は 17ℓ である。除染液は、恒温槽を用いることにより温度が一定となるように制御した。また、除染液の温度は、温度計を用いて定期的に監視した。電解槽は、テフロン製であり、ニッカトー (株) 製セラミック隔膜により陽極室と陰極室に分かれている。電解槽の電極は、陽極及び陰極ともにチタンに白金めっきを施したもので、その表面積はそれぞれ 108cm² である。電極は、直流電流を印加するため、直流電源装置に接続される。電解槽において、電解酸化の際に、陽極ガス (主に酸素ガス) 及び陰極ガス (主に NO_x ガス) の発生があるため、前者は除染槽から、後者は陰極液供給槽からいずれも水を張った NO_x 洗浄塔を通して処理できる装置とした。

2.2.2 試験条件

(1) Ce^{3+} 初期濃度依存性試験

Ce^{3+} 初期濃度依存性試験の試験条件を Table2.1 に示す。 Ce^{4+} 生成速度は、電解槽の電極に接触する Ce^{3+} 濃度に依存し、除染液量には依存しない。そのため除染液量は、試験廃液発生量低減を考慮して 5ℓ とした。除染液の攪拌は、機械的な攪拌は行わず、除染液の循環のみにより行った。陰極の硝酸濃度は、電解により硝酸濃度が低下するため、除染液（陽極液）よりも高くなるように選定した。また除染液温度については、本除染法における除染廃液処理の際に TRU 核種を溶媒抽出することが考えられ、これらの抽出器等と除染槽等が近接して設置される場合を考慮して、有機溶媒の引火の防止の観点から 60℃とした（ドデカンの引火点：74℃）。

(2) 硝酸濃度依存性試験

硝酸濃度依存性試験の試験条件を Table2.2 に示す。陰極液の硝酸濃度は、セラミック隔膜を通しての硝酸イオン移動による除染液（陽極液）の硝酸濃度変化を抑えるために、除染液と同じ濃度とした。その他の試験条件（温度、攪拌方法等）については、 Ce^{3+} 初期濃度依存性試験と同様とした。

2.2.3 試験操作及び分析

パラメータ試験は、以下の操作により行った。

まず、除染液及び陰極液をそれぞれ規定量注入した後、除染液及び陰極液を循環させた。次に、加熱器及び恒温槽の電源を入れ除染液を 60℃まで昇温した。除染液の昇温確認後、直流電源装置の電源を入れ、パラメータ試験を開始した。試験中は、定期的に温度、電流及び電圧の監視並びに除染液及び陰極液のサンプル採取（10ml）を行った。

サンプルの分析に関して、除染液中の Ce^{4+} 濃度は、電位差滴定法によって分析を行った。除染液中及び陰極液中の硝酸濃度は、中和滴定法によって分析を行った。除染液中のセリウムの濃度（ Ce^{3+} 及び Ce^{4+} 全濃度）は、ICP 発光分光分析法で測定した。なお、電位差滴定及び中和滴定については、東亜ディーケーケー（株）製の自動滴定装置（型式：AUT-701）によって、ICP 発光分光分析については、（株）日立製作所製の ICP 発光分光分析装置（型式：P-4010）によってそれぞれ行った。また、電位差滴定には、関東化学（株）のしゅう酸ナトリウム溶液を、中和滴定には、関東化学（株）の水酸化ナトリウム溶液を使用した。

2.3 試験結果及び考察

2.3.1 Ce^{3+} 初期濃度依存性試験

Ce^{3+} 初期濃度と Ce^{4+} 生成速度の関係を Fig.2.3 に示す。 Ce^{4+} 生成速度は、 Ce^{3+} 初期濃度の増加とともに単調に増加する。これは、 Ce^{3+} 初期濃度が増加することにより、電極表面に接触する Ce^{3+} イオン数が増加し、 Ce^{3+} から Ce^{4+} への酸化反応が起こりやすくなるためである。

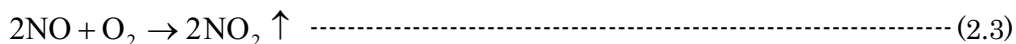
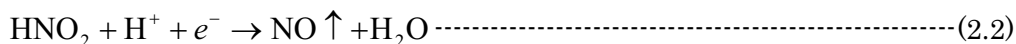
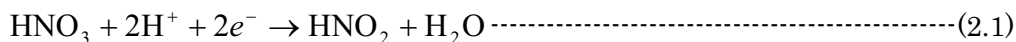
また、除染液中の Ce^{4+} の安定性を検討するため、 Ce^{3+} 初期濃度が 0.2 mol/l の除染液において、 Ce^{3+} 全量を Ce^{4+} に酸化させた後、除染槽を常温 ($25^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$) にて放置し、適宜除染液のサンプル採取 (10ml) を行い、 Ce^{4+} 濃度を測定した。 Ce^{4+} 濃度の経日変化を Fig.2.3 に示す。Fig.2.4 に示すとおり、 Ce^{4+} 濃度は、電解終了直後を基点として、7 日後においても約 10%の減少であった。つまり、 Ce^{4+} は、除染液中においてほとんど還元されず、安定であることが確認された。除染液中の Ce^{4+} 安定性は、処理終了時の Ce^{4+} 濃度が翌日以降においても維持されることになるため、本除染法が実用化された場合、廃棄物の日単位のバッチ処理を行うに当たり、非常に有益である。

2.3.2 硝酸濃度依存性試験

硝酸濃度と Ce^{4+} 生成速度の関係を Fig.2.5 に示す。

Fig.2.4 に示すとおり、 Ce^{4+} 生成速度は、硝酸濃度の増加とともに減少する傾向にある。これは、硝酸濃度が高くなると電極表面における NO_3^- イオンの存在割合が増加することにより、電極表面に接触する Ce^{3+} イオン数が減少するため、 Ce^{4+} 生成速度は減少すると考えられる。

また、すべての条件において、試験終了後の陰極液の硝酸濃度は、試験開始前の濃度より約 0.1 mol/l 減少した。これは、陰極において硝酸が次式の反応式で電気分解されるためである。



2.3.3 溶液条件の最適化

溶液条件の最適化に当たっては、まず除染対象として想定しているステンレス鋼の目標溶解速度を設定した。次に、溶解するステンレス鋼の金属量及びステンレス鋼溶解に費や

される Ce^{4+} 消費速度から、設定した目標溶解速度を維持するために必要な Ce^{4+} 生成速度を算出した。この Ce^{4+} 生成速度を満足する溶液条件をステンレス鋼の除染における最適な溶液条件として選定した。

(1) 目標溶解速度

ステンレス鋼の除染において目標とする溶解速度（単位時間当たりの腐食厚さ： $\mu\text{m}/\text{h}$ ）は、Ponnet らの報告³⁾をもとに設定した。Ponnet らは、「SC 溶液中におけるステンレス鋼の除染について一般的に汚染レベルの比較的高い試料（放射能濃度約 $100\text{Bq}/\text{g}$ ）でも除染液温度 80°C 、溶解速度 $2\sim 4\mu\text{m}/\text{h}$ で金属材表面を $10\mu\text{m}$ 程度溶解すれば汚染層を完全に除去し、クリアランスレベル（放射能濃度約 $0.1\text{Bq}/\text{g}$ ）にすることができる。」という報告をしている。

上記の報告を参考にクリアランスレベルまで除染するのに必要な金属材表面の溶解深さを保守的に $20\mu\text{m}$ と仮定すると、除染対象物の 1 バッチの処理を $5\sim 10$ 時間（ $1\sim 2$ 日）で終了するために必要な溶解速度は $2\sim 4\mu\text{m}/\text{h}$ であるため、これをステンレス鋼の除染における目標溶解速度とした。

(2) 目標 Ce^{4+} 生成速度

本除染法では、 Ce^{4+} は除染で消費されて Ce^{3+} になり、除染液の酸化力が減少し、ステンレス鋼の溶解速度も低下する。したがって、目標溶解速度 $2\sim 4\mu\text{m}/\text{h}$ を維持するためには、 Ce^{3+} を Ce^{4+} に電解酸化することにより再生し、除染液中の Ce^{4+} 濃度を一定に維持することが重要である。そこで、ここでは、まず溶出金属量と Ce^{4+} の消費速度を算出した。次に、除染液中の Ce^{4+} 濃度を一定に維持するため、 Ce^{4+} の消費速度を上回る Ce^{4+} 生成速度を目標値として設定した。なお、それぞれの値の算出において、必要に応じて第 3 章で述べる廃棄物溶解コールド試験の模擬廃棄物の値を使用した。

(i) 溶出金属量の算出

廃棄物溶解コールド試験における単位時間あたりの溶出金属量は、以下の式で与えられる。

$$W = S \times Rc \times \rho \times 10^{-4} \quad \text{-----}(2.4)$$

ここで、

W : 溶出金属量 (g/h)

S : 除染対象物表面積 (cm^2)

Rc : 溶解速度 ($\mu\text{m/h}$)

ρ : 金属の密度 (SUS304 の密度 = 7.93 g/cm^3)

上記 (2.4) 式によれば、廃棄物溶解コールド試験で想定する 1 バッチの模擬廃棄物表面積 1260 cm^2 、目標溶解速度上限値 $4\mu\text{m/h}$ に対して、溶出金属量は、 4.0g/h となる。

(ii) Ce^{4+} 消費速度の算出

Ce^{4+} は、以下の式に示すように、硝酸溶液中においてステンレス鋼 (SUS304) の金属材料表面を溶解することができる。



このとき、ステンレス鋼 (SUS304) を構成する成分を $\text{Fe} : \text{Cr} : \text{Ni} = 7 : 2 : 1$ とすると、 Ce^{4+} 消費速度は以下の式で与えられる。

$$C = W \times \left(\frac{a \times 0.7}{M_{\text{Fe}}} + \frac{b \times 0.2}{M_{\text{Cr}}} + \frac{c \times 0.1}{M_{\text{Ni}}} \right) \quad \text{-----}(2.8)$$

ここで、

C : Ce^{4+} 消費速度 (mol/h)

W : 溶出金属量 (g/h)

M_{Fe} : Fe のモル質量 (55.8g/mol)

M_{Cr} : Cr のモル質量 (52.0g/mol)

M_{Ni} : Ni のモル質量 (58.7g/mol)

a, b, c : Fe, Cr, Ni 各 1mol を溶解するのに理論上必要な Ce^{4+} の物質質量

$$(a = 3, b = 6, c = 2)$$

上記 (2.8) 式に、「(i) 溶出金属量の算出」で求めた 4.0g/h を代入すると、 Ce^{4+} 消費速度は、 0.26mol/h となる。

(iii) Ce^{4+} 生成速度の目標値の設定

ステンレス鋼 (SUS304) の構成元素である Fe、Cr、Ni は、様々な価数をとる。例えば Fe は 2 価、3 価の価数を取り、除染液循環中における Fe^{2+} への還元及び Ce^{4+} 電解酸化における Fe^{3+} の生成が起こるため、電解電流を浪費する。このように、ステンレス鋼 (SUS304)

の溶解に伴う溶出金属イオンが除染液中に高濃度化した場合、 Ce^{4+} の電解酸化による再生を妨げ、 Ce^{4+} 生成速度を低下させる要因となる。

このため廃棄物溶解コールド試験の Ce^{4+} 生成速度の設定値は、「(ii) Ce^{4+} 消費速度の算出」で求めた値 0.26mol/h に、溶出金属イオンの効果による Ce^{4+} 生成速度の低下を考慮して、 $0.3\sim 0.4\text{mol/h}$ とした。

(3) 溶液条件の選定

第 2.3.1 及び 2.3.2 節で述べたパラメータ試験の結果より、ステンレス鋼の除染における最適な溶液条件を選定した。ステンレス鋼の除染における最適な溶液条件としては、上記「(iii) Ce^{4+} 生成速度の目標値の設定」で述べた $0.3\sim 0.4\text{mol/h}$ の範囲を満足するものとして、 Ce^{3+} 初期濃度 0.2 mol/l 、硝酸濃度 1 mol/l を選定した。選定理由を以下に述べる。なお、最適な溶液条件の選定に当たっては、二次廃液の発生量及び処理を考慮し、 Ce^{3+} 初期濃度及び硝酸濃度については、出来る限り低濃度に抑えることが望ましい。

硝酸濃度と生成速度の関係は、Fig.2.4 に示すとおり、いずれの条件においても硝酸濃度が 0.5mol/l のとき Ce^{4+} 生成速度は最大となる。しかし、電解の進行に伴って硝酸濃度が 0.5mol/l 以下まで低下すると、電解電流のうち水の電気分解に使われる割合が大きくなるため、 Ce^{4+} 生成速度が低下することが予想される。そこで、廃棄物溶解コールド試験では、硝酸を適宜追加することにより、電解に伴う硝酸濃度の低下を考慮しても、陰極の硝酸濃度が $0.5\sim 1.0\text{ mol/l}$ の範囲を維持できるように最適な硝酸濃度として 1 mol/l を選定した。

Ce^{3+} 初期濃度については、硝酸濃度 1 mol/l において、 Ce^{4+} 生成速度の目標値である $0.3\sim 0.4\text{mol/h}$ の範囲を満足するものとして、 0.2 mol/l を選定した。

3. 廃棄物溶解コールド試験

3.1 概要

本試験は、選定した最適溶液条件において、模擬廃棄物の溶解速度を確認した。また、金属廃棄物の溶解が進行すると溶出した金属イオンの影響により溶解速度は低下するが、除染に伴う廃液処理の観点からは、除染液を可能な限り繰り返し使用した方が得策である。このため、1 回分の除染液 (17l) によって処理可能な金属廃棄物のバッチ数を推定する必要があることから、1 回分の除染液によって処理可能な金属廃棄物のバッチ数を評価した。試験結果より、目標とする溶解速度が達成できることを確認し、1 回分の除染液によって処

理可能な金属廃棄物のバッチ数を評価した。

3.2 試験方法

3.2.1 試験装置

本試験に用いた除染槽の概略図を Fig.3.1 に示す。除染槽は、パラメータ試験に用いた除染槽を改良して、模擬廃棄物を投入するバスケット及び溶液を攪拌する超音波振動装置を設置できる構造とした。その他の機器（電解槽等）及び系統については、Fig.2.2 に示すパラメータ試験と同様とした。

3.2.2 試験条件

パラメータ試験で選定した最適溶液条件において、模擬廃棄物を溶解する廃棄物溶解コールド試験を実施した。廃棄物溶解コールド試験の試験条件を Table3.1 に、模擬廃棄物の仕様を Table3.2 にそれぞれ示す。また、模擬廃棄物の外観を Fig.3.2 に示す。

なお、廃棄物溶解コールド試験の開始前準備として、除染液中の Ce^{4+} 濃度を所定の濃度にする必要がある。これは、溶解開始と同時に高い溶解速度を得るために重要である。Ponnet らの SC 溶液における溶解速度と濃度の関係式³⁾ から、除染液温度 60℃において目標溶解速度 (2~4 μ m/h) を達成するために必要な Ce^{4+} 濃度は、0.039~0.078 mol/l である。選定された最適溶液条件において、上記 Ce^{4+} 濃度にするための通電時間は、約 110~220 分と見積もられたことから、試験開始前準備操作における通電時間は 180 分とした。ここでは、SC 溶液における溶解速度と Ce^{4+} 濃度の関係式が、NC 溶液においても成立すると仮定した。この仮定の妥当性については、第 3.3 節に述べる。

3.2.3 試験操作及び分析

(1) 試験開始前準備

試験開始前準備の操作を以下に示す。

- (i) 除染液、陰極液をそれぞれ規定量注入した。
- (ii) 除染液及び陰極液を循環させた。
- (iii) 加熱器及び恒温槽の電源を入れ、除染液を 60℃まで昇温した。
- (iv) 恒温槽、超音波振動装置、直流電源装置の電源を入れ、電解を開始した。
- (v) 電解開始から 180 分経過後、電解を終了し、除染液及び陰極液サンプル採取(10ml)を行った。

(2) 廃棄物溶解コールド試験

廃棄物溶解コールド試験の操作を以下に示す。

- (i) 除染液及び陰極液を循環させた。
- (ii) 加熱器及び恒温槽の電源を入れ、除染液を 60℃まで昇温した。
- (iii) 模擬廃棄物を除染槽に投入し、超音波振動装置、直流電源装置の電源を入れ、廃棄物溶解コールド試験を開始した。
- (iv) 試験開始から 2.5 時間経過後、電解を一時中断し、模擬廃棄物の重量測定及び除染液のサンプル採取 (10ml) を行った。
- (v) 重量測定の終了した模擬廃棄物を除染槽に再投入し、電解を再開した。
- (vi) 電解再開から 2.5 時間経過後、電解を終了し、模擬廃棄物の重量測定並びに除染液及び陰極液のサンプル採取 (10ml) を行った (廃棄物溶解コールド試験 1 日目終了)。

なお、試験中は、定期的に温度、電流及び電圧の監視を行った。また、陰極液の硝酸濃度の低下を抑制するため、5 時間毎に硝酸溶液 (60%) の補充 (約 100 ml) を行った。

2 日目以降は、上記 (2) の (i) ～ (vi) と同様の操作を行い、廃棄物溶解コールド試験は、合計 100 時間 (20 日間) 行った。

サンプルの分析に関しては、パラメータ試験時と同じ方法 (除染液中の Ce^{4+} 濃度：電位差滴定法、除染液中及び陰極液中の硝酸濃度：中和滴定法、除染液中のセリウム濃度：ICP 発光分光分析法) を用いた。

3.3 試験結果及び考察

廃棄物溶解コールド試験における溶解速度の経時変化を Fig.3.3 に示す。

溶解速度は、定められた時間に模擬廃棄物の重量測定を行い以下の式により算出した。

$$Rc = \frac{W}{\rho \times A \times t} \times 10^4 \quad \text{-----(3.1)}$$

ここで、

Rc : 溶解速度 ($\mu\text{m/h}$)

W : 溶解時間 (t) における模擬廃棄物の重量変化量 (g)

ρ : 模擬廃棄物の密度 (SUS304 の密度 = 7.93 g/cm^3)

A : 模擬廃棄物の総表面積 (cm^2)

t : 溶解時間 (h)

溶解初期（溶解時間 0～20 時間）の溶解速度は、4.5～5.0 $\mu\text{m}/\text{h}$ であった。これは、本試験では、溶出金属イオンの影響を考慮して Ce^{4+} 生成速度を少し高めに設定しているため、溶出金属イオンの影響が少ない溶解初期では、 Ce^{4+} 消費速度より Ce^{4+} 生成速度が大きくなり、溶解速度は目標溶解速度上限値を上回ったためである。溶解速度が大きくなると金属表面の粗さが増すことにより、除染終了後の金属廃棄物の取出し時に、溶出した TRU 核種の再付着が増加することによる除染係数の低下が懸念される。このため、効率的な除染のための溶解速度の上限が存在すると考えられる。溶解速度が除染効率に与える影響については、今後の調査により効率的な除染が可能な溶解速度の範囲を把握する必要がある。

溶解時間が 20 時間を経過すると、溶出金属イオンの影響が徐々に表れ始め、溶解速度も減少を始めた。90 時間を経過すると、溶出金属イオンが除染液中に高濃度化し、 Ce^{4+} 生成速度を低下させ、溶解速度は目標溶解速度下限値である 2.0 $\mu\text{m}/\text{h}$ を下回り始めた。なお、溶解開始前の Ce^{4+} 濃度は 0.054 mol/l、溶解 0～90 時間における平均溶解速度は、3.3 $\mu\text{m}/\text{h}$ であった。クリアランスレベルまで除染するのに必要な金属材表面の溶解深さを 20 μm と仮定すると、その除染時間は約 6 時間であり、1 バッチ/日の廃棄物除染が十分に可能であると考えられる。

次に 1 回分の除染液 (17 ℓ) によって処理可能な金属廃棄物のバッチ数について考察する。

廃液処理の観点からは、除染液を可能な限り繰り返し使用した方が得策である。この除染液の再利用の限界は、溶出金属イオン濃度と放射能濃度に主として支配される。本試験では、放射能濃度は評価できないため溶出金属イオン濃度のみの評価になるが、90 時間までは溶解速度 2 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上を達成し、その平均溶解速度が 3.3 $\mu\text{m}/\text{h}$ であったことから、1 バッチの金属廃棄物の溶解深さを 20 μm と仮定すると、除染液 17 ℓ で 15 バッチ分の金属廃棄物（総重量：36.9kg 相当、総表面積：1.8 m^2 相当）をクリアランスレベルまで除染できることが示された。

除染液の組成 (Fe, Cr, Ni) の経時変化を Fig.3.4 に示す。グラフからわかるとおり、除染液の組成は Fe : Cr : Ni = 7 : 2 : 1 となっている。これは SUS304 の組成比とよく一致しており、選択的な溶解が起こらないことが確認された。

除染液のセリウム濃度の経時変化を Fig.3.5 に示す。除染液中のセリウムイオンは、時間の経過とともにセラミック隔膜を通して陰極液へ移動するため、徐々に減少する。しかし、除染液のセリウム濃度は、100 時間後においても 0.17mol/l を維持しており、セラミック隔膜による陽極と陰極の隔離性能は、十分であることが確認された。

なお、第 3.2.2 節において、「SC 溶液における溶解速度と Ce^{4+} 濃度の関係式が、NC 溶液においても成立する」ということを仮定し、試験開始前準備操作における通電時間を設定

した。本試験では Ce^{4+} 消費速度と Ce^{4+} 生成速度が平衡となるように溶液条件を選定しており、溶解開始前 Ce^{4+} 濃度は本試験中においてほぼ一定に維持されていると考えられる。そこで、試験中の Ce^{4+} 濃度として試験開始前の Ce^{4+} 濃度を用いて本試験の結果と理論値を比較してみると、本試験の試験結果（ Ce^{4+} 濃度：0.054 mol/l（溶解開始前）、平均溶解速度：3.3 $\mu\text{m}/\text{h}$ ）は、Ponnet らの式による計算値（ Ce^{4+} 濃度：0.039～0.078 mol/l、溶解速度：2～4 $\mu\text{m}/\text{h}$ ）に包含されることが確認された。したがって、「SC 溶液における溶解速度と Ce^{4+} 濃度の関係式が、NC 溶液においても成立する」という仮定は、妥当であったと判断できる。

4. おわりに

HNO_3 - Ce^{4+} 溶液（NC 溶液）を用いたセリウム媒体電解酸化法の技術的な実用化に向けて溶液条件の最適化を図ることを目的とし、 Ce^{3+} 初期濃度及び硝酸濃度をパラメータとした試験を行った。パラメータ試験の結果から Ce^{3+} 初期濃度及び硝酸濃度がセリウムの電解酸化反応に与える影響を明らかにするとともに、ステンレス鋼の除染において目標溶解速度を満足する最適な溶液条件を選定した（ Ce^{3+} 初期濃度 0.2 mol/l、硝酸濃度 1mol/l）。

さらに、選定した最適な溶液条件において、廃棄物溶解コールド試験を行った結果、溶解時間 90 時間までは、溶解速度 2 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上を達成した。なお、溶解 0～90 時間における平均溶解速度は、3.3 $\mu\text{m}/\text{h}$ であった。クリアランスレベルまで除染するのに必要な金属材表面の溶解深さを 20 μm と仮定すると、その除染時間は約 6 時間であり、1 バッチ/日の廃棄物除染が十分に可能であると考えられる。

また、1 回分の除染液（17l）によって処理可能な金属廃棄物のバッチ数は、廃棄物溶解コールド試験の結果等（溶解速度 2 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上を達成した時間：90 時間、平均溶解速度：3.3 $\mu\text{m}/\text{h}$ 、仮定した 1 バッチの金属廃棄物の溶解深さ：20 μm 、除染時間：6 時間）から、15 バッチ分（金属廃棄物の総重量：36.9kg 相当、総表面積：1.8 m^2 相当）と評価された。

以上のことより、本除染法は TRU 廃棄物の除染に十分適用できると考えられる。今後、再処理施設等からの TRU 廃棄物を用いて本除染法による除染効果及び溶解速度が除染効率に与える影響、並びに本除染法の経済性について評価・検討する必要がある。

謝辞

本研究を計画・実施するにあたり、御助言及び御協力を頂いた燃料技術課の方々に深く感謝いたします。また、本書を作成するに当たって適切なコメントを頂いた三好慶典 安全試験施設管理部長、原稿を査読して頂いた超ウラン元素燃料高温化学研究グループ 柴田裕樹氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) “原子炉施設及び核燃料施設使用施設の解体等に伴って発生するもののうち放射性物質のとして取り扱う必要のないものの放射能濃度について”原子力安全委員会（平成16年）
- 2) 諏訪武、後藤覚司、五来健夫、栗林伸英、根元吉則、星三千男、佐川千明、米沢仲四郎、中原勇、宮崎一郎、安中秀雄、立川圓造：“硫酸-セリウム（IV）溶液を用いた原子炉解体用化学除染法の開発”日本原子力学会誌 vol.30,No.11,pp60-69(1988)
- 3) Mathieu Ponnet,Michel Klein,Andre Rahier,Gerand Aleton: “ Chemical Decontamination MEDOC Using Cerium and Ozone From Laboratory and Pilot Tests to Industrial operations”WM’00 Conference(2000)
- 4) E.Cantrel,M.Ponnet,V.Massaut,G.Aleton: “IN-SITU Chemical Decontamination of a PWR Primary Loop Large Components With the MEDOC Process”SEFN(2003)
- 5) 諏訪武、栗林伸英、安宗武俊：“汚染金属廃棄物に関する化学除染法の開発 硫酸・セリウム系化学除染法”デコミッショニング技報 No.2,pp29-40(1990)
- 6) 諏訪武、栗林伸英、石毛洋一、後藤覚司、安宗武俊、立川圓造：“硫酸-セリウム（IV）系化学除染法（SC 法）の開発”JAERI-M 92-133(1992)

Table2.1 Ce³⁺初期濃度依存性試験条件

		case 1	case 2	case 3	case 4
除染液	Ce ³⁺ 初期濃度 (硝酸セリウム濃度)	0.05 mol/l	0.2 mol/l	0.3 mol/l	0.5 mol/l
	硝酸濃度	4 mol/l			
	液量	5 l			
陰極液	硝酸濃度	7 mol/l			
	液量	5 l			
除染液温度		60 °C (±3°C)			
通電時間		60 分			
電解電流		20 A			
超音波出力		0 W (除染液の循環による攪拌)			
除染液循環流量		70 l/h			
陰極液循環流量		70 l/h			

Table2.2 硝酸濃度依存性試験条件

		case 1	case 2	case 3	case 4
除染液	硝酸濃度	0.5 mol/l	1 mol/l	4 mol/l	7 mol/l
	液量	5 l			
陰極液	硝酸濃度	0.5 mol/l	1 mol/l	4 mol/l	7 mol/l
	液量	5 l			
除染液温度		60 °C (±3°C)			
通電時間		60 分			
電解電流		20 A			
超音波出力		0 W (除染液の循環による攪拌)			
除染液循環流量		70 l/h			
陰極液循環流量		70 l/h			

上記条件において、Ce³⁺初期濃度を 0.1mol/l、0.2mol/l、0.3mol/l、0.5mol/l として試験を行った。

Table3.1 廃棄物溶解コールド試験条件

除染液	Ce ³⁺ 初期濃度 (硝酸セリウム濃度)	0.2 mol/ℓ
	硝酸濃度	1 mol/ℓ
	液量	17 ℓ
陰極液	硝酸濃度	1 mol/ℓ
	液量	7 ℓ
除染液温度		60 °C (±3°C)
電解電流		20 A
超音波出力		300 W
除染液循環流量		70 ℓ/h
陰極液循環流量		70 ℓ/h
廃棄物溶解時間		100 時間

Table3.2 廃棄物溶解コールド試験の模擬廃棄物仕様

		板状試験片 1	板状試験片 2	板状試験片 3	配管状試験片
材質		SUS304			
寸法	縦	8.8 cm	8.8 cm	17.6 cm	—
	横	12.5 cm	12.5 cm	12.5 cm	—
	長さ	—	—	—	15.6 cm
	外径	—	—	—	3.9 cm
表面積		220 cm ²	220 cm ²	440 cm ²	382 cm ²
総表面積		1262 cm ²			
重量		503.8 g	504.8 g	997.9 g	457.2 g
総重量		2463.7 g			

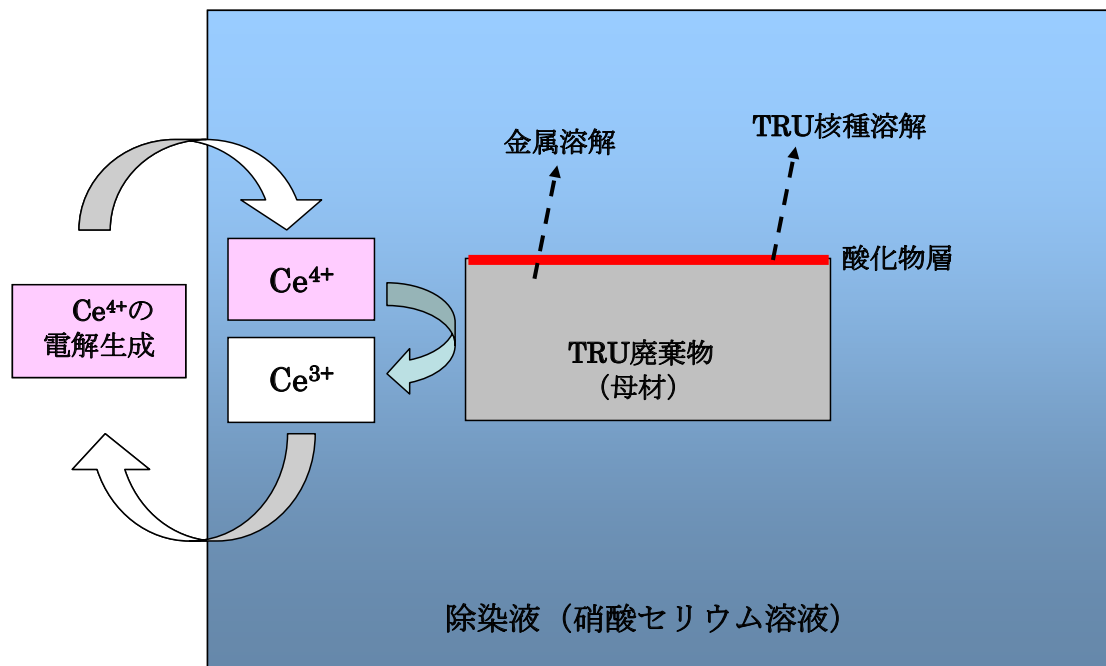


Fig.2.1 セリウム媒体電解酸化法の原理

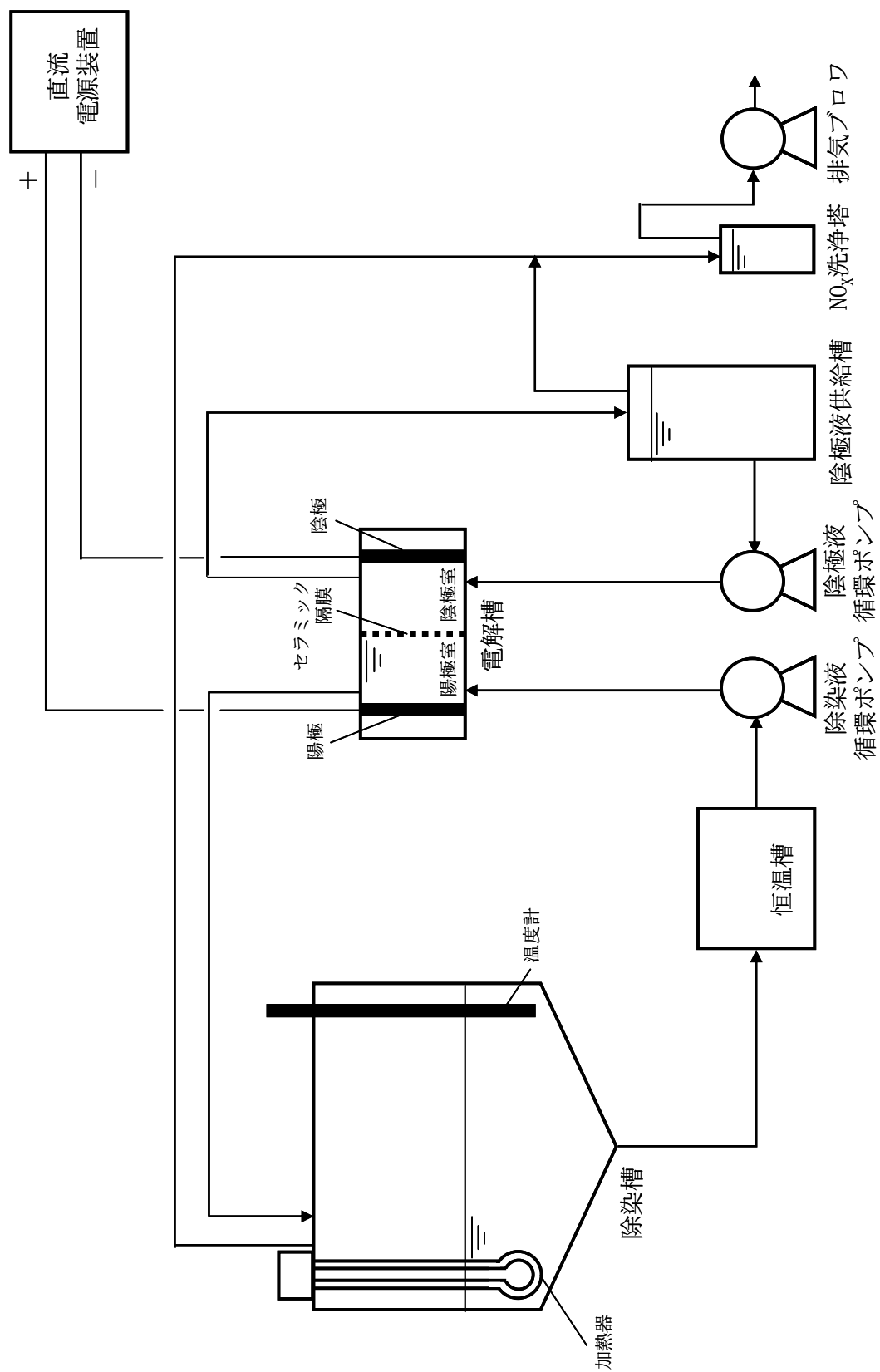


Fig.2.2 廃棄物除染試験装置概略図

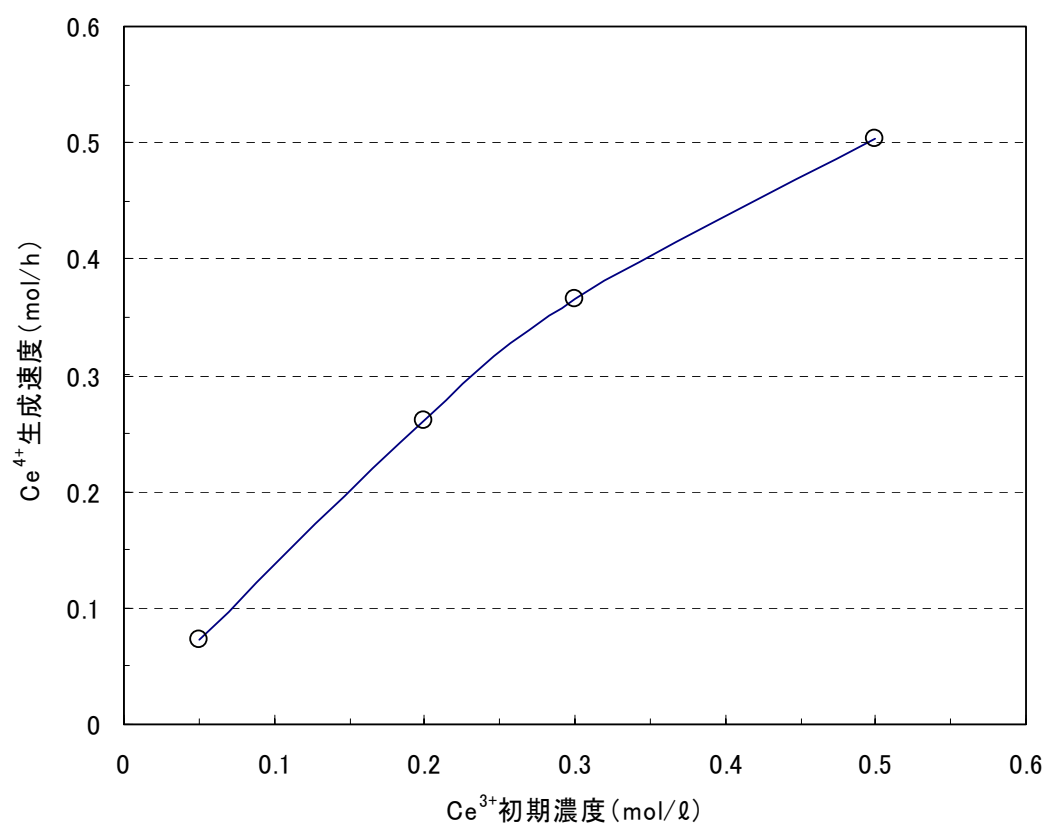


Fig.2.3 Ce^{3+} 初期濃度依存性試験結果

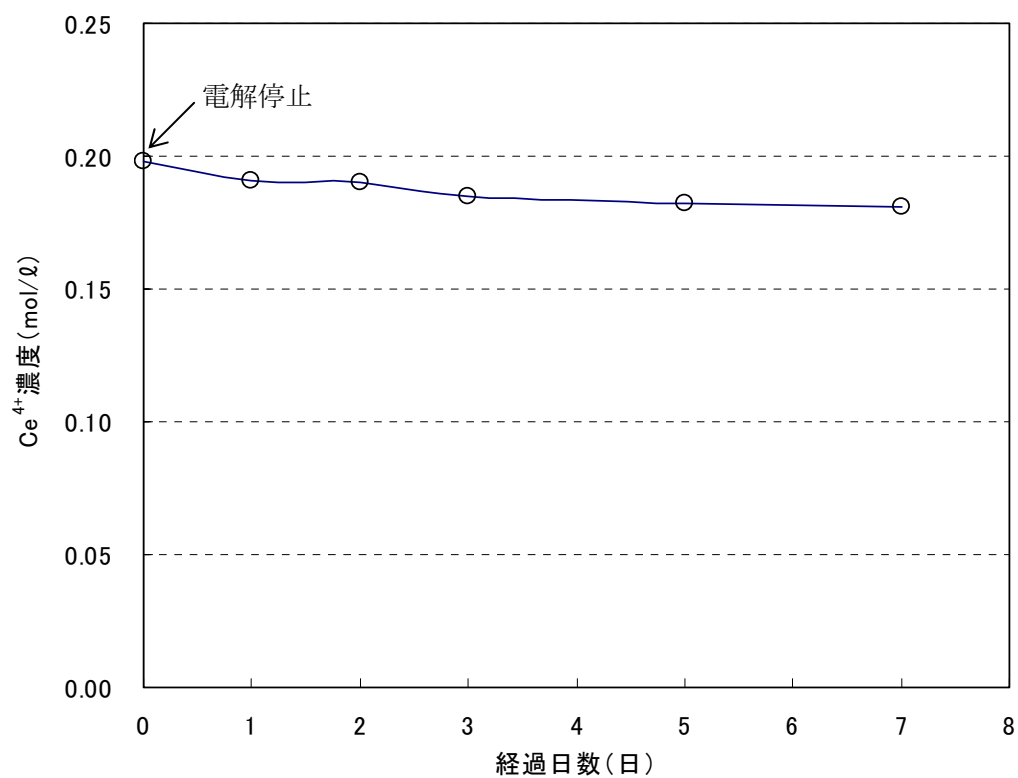


Fig.2.4 Ce^{4+} 濃度の経日変化

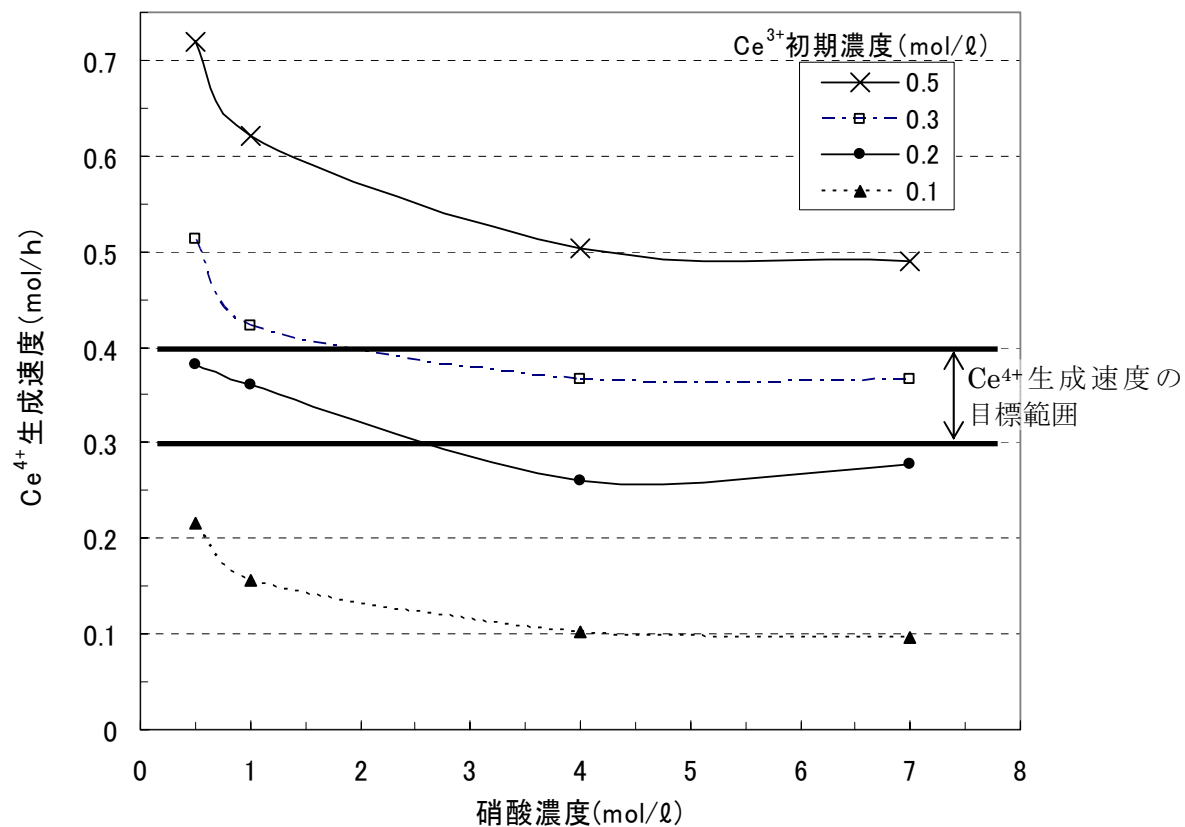


Fig.2.5 硝酸濃度依存性試験結果

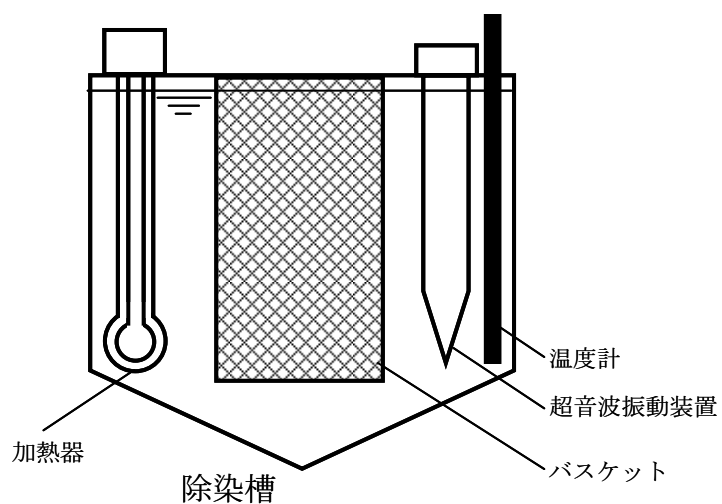


Fig.3.1 廃棄物溶解コールド試験に用いた除染槽概略図



Fig.3.2 模擬廃棄物の外観

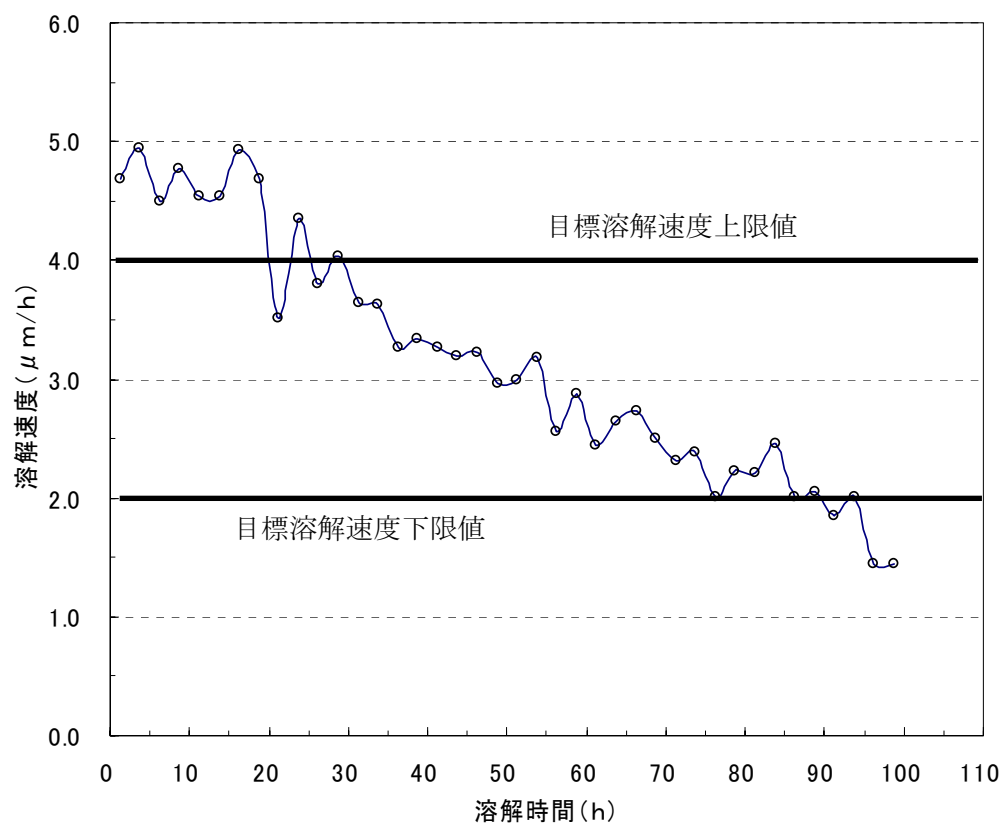


Fig.3.3 廃棄物溶解コールド試験結果

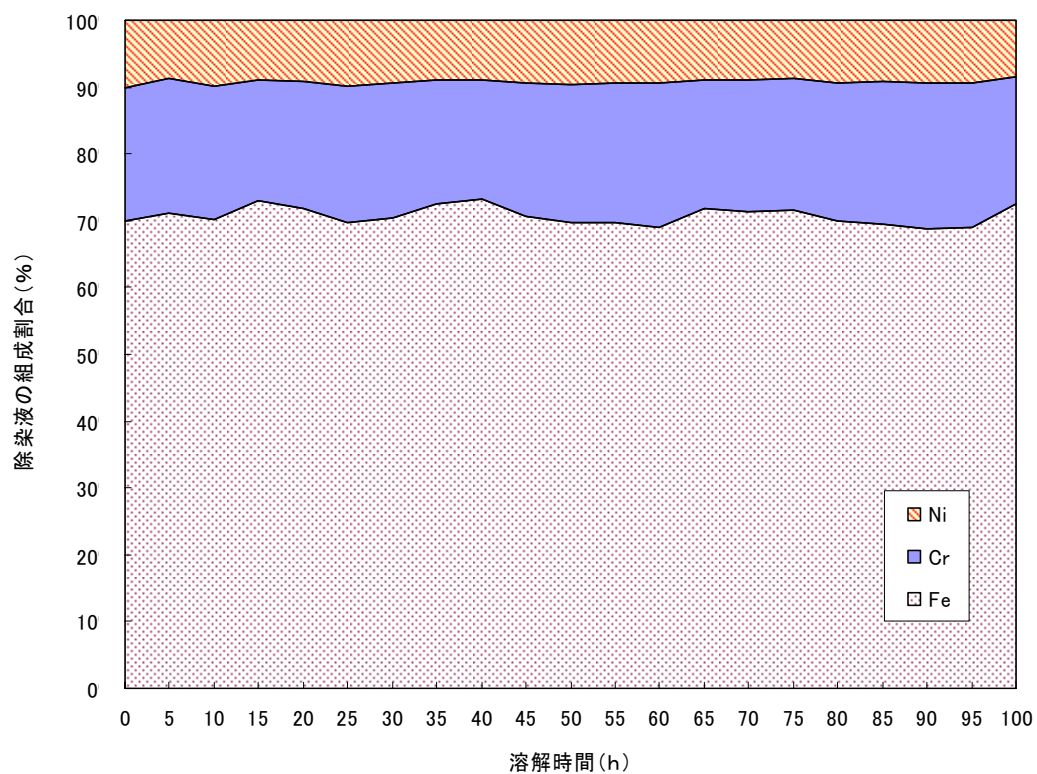


Fig.3.4 除染液の組成割合の経時変化

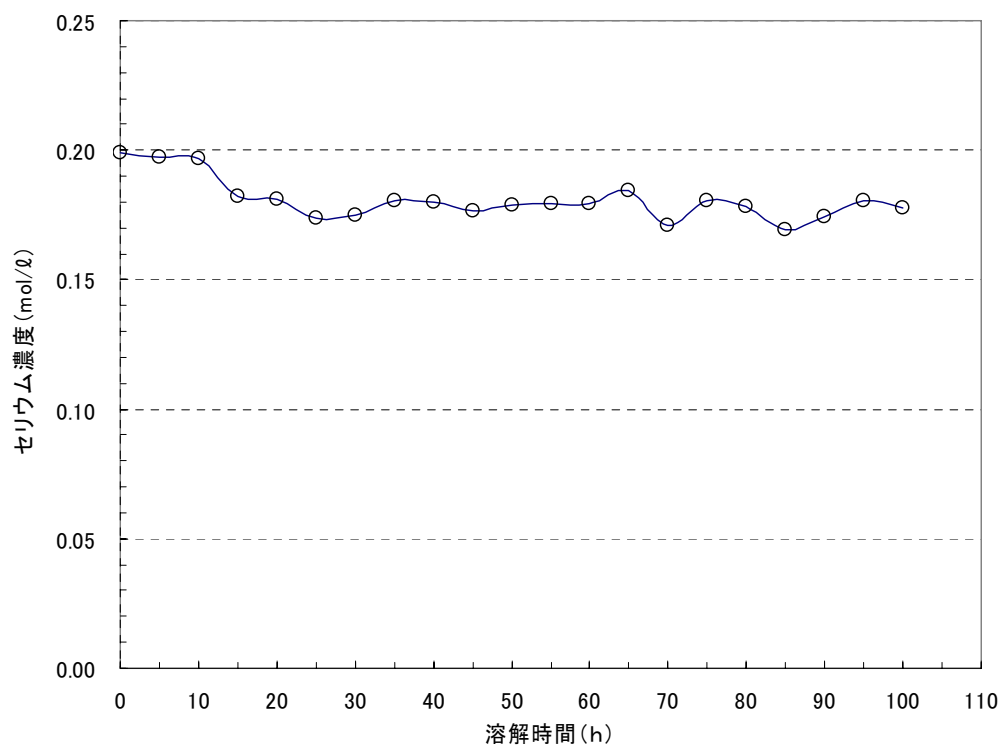


Fig.3.5 除染液中のセリウム濃度の経時変化

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	積	m ²
体積	立方メートル	積	m ³
速度	メートル毎秒	度	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	度	m/s ²
波数	毎メートル	数	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	密度	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	密度	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	積	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	密度	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	密度	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	濃度	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	濃度	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	度	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)		1
比誘磁率 ^(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	m ⁰
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²	m ² m ⁻²
周期	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²	m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻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	m ² kg s ⁻²
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	m ² kg s ⁻³
電荷、電気量	クーロン	C		s A	s A
電位差 (電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹	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	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	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹	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	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K	K
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	cd
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	m ⁻² cd
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²	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	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	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
粘り度	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 sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²		m ⁻² sA
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²		m ⁻² sA
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 sA
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	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 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 =2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エールグ	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
フォトル	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 元素の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 f=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℃」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

