



## TRU 廃棄物処分に係る核種移行データ

—セメント硬化体の間隙水を用いたプルトニウムの溶解度試験結果—

Data on Migration Analysis for TRU Waste Disposal  
-Results of Plutonium Solubility Experiments in Porewater of Cement Hydrates-

須黒 寿康 西川 義朗 綿引 聖 加川 昭夫

Toshiyasu SUGURO, Yoshiaki NISHIKAWA, Takashi WATAHIKI and Akio KAGAWA

東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所  
環境技術管理部

Waste Management Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center

October 2013

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

TRU 廃棄物処分に係る核種移行データ  
—セメント硬化体の間隙水を用いたプルトニウムの溶解度試験結果—

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部

須黒 寿康、西川 義朗\*、綿引 聖\*、加川 昭夫

(2013年 4月 23日受理)

TRU 廃棄物処分の安全評価上不可欠なプルトニウム (Pu) について、セメント硬化体の間隙水中における溶解度データを取得する試験を実施した。試験で使用したセメント混和剤は、TRU 廃棄物処分場で使用される可能性のあるポリカルボン酸系化合物を選定した。Pu の初期添加濃度は  $10^{-6}$  M とし、液相には、普通ポルトランド、脱イオン交換水、セメント混和剤を混練して硬化させたセメント硬化体から採取した間隙水と比較のため、セメント混和剤を添加しないで硬化させたセメント硬化体から採取した間隙水の 2 種類を使用した。その他の溶解度試験条件として、試験期間は最大で 154 日、常温 ( $298 \pm 5$  K) の Ar 雰囲気中 ( $O_2$  濃度 1 ppm 以下) とし、バッチ式溶解度試験を行った。

その結果、試験期間 154 日目の間隙水中の Pu 濃度は、セメント混和剤の有無に係わらず  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup> オーダーであった。

また、Pu(IV)の高 pH 条件における溶解度 (約  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup>) と比べても同等程度であり、セメント混和剤による Pu 溶解度への影響は見られなかった。

Data on Migration Analysis for TRU Waste Disposal  
- Results of Plutonium Solubility Experiments in Porewater of Cement Hydrates -

Toshiyasu SUGURO, Yoshiaki NISHIKAWA\*, Takashi WATAHIKI\*  
and Akio KAGAWA

Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 23, 2013)

For safety assessment of TRU waste disposal, solubility of plutonium was investigated under hardened cement paste porewater condition. Polycarboxylic acid compound, which have the possibility to be used for the TRU waste disposal, was selected as the cement admixture for the experiment. Initial concentration of Pu was  $10^{-6}$  M in the experiment. The porewater of hardened cement paste was obtained by squeezing out the kneading of ordinary portland cement and deionized water with the cement admixture. The porewater of hardened cement paste without cement admixture is also used for the experiment. The maximum experimental period was 154 days. The experiment was carried out at room temperature ( $298 \pm 5$  K) under argon atmosphere, in which oxygen concentration was lower than 1 ppm.

Pu concentration in the porewater of hardened cement paste with or without the cement admixture were in the order of  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup> after 154 days. This value is comparable to the solubility of Pu(IV) under high pH condition, suggesting that the solubility of Pu was not affected by the cement admixture in hardened cement paste.

Keywords : TRU Waste Disposal, Plutonium, Solubility

---

\* Inspection Development Co.Ltd.

目 次

1. はじめに .....	1
2. 試験方法 .....	1
2.1 薬品類 .....	1
2.2 セメント硬化体の作製方法及び間隙水の採取方法 .....	2
2.3 試験方法 .....	3
3. 分析方法 .....	4
3.1 水素イオン濃度指数 (pH) 及び酸化還元電位 (Eh) 測定 .....	4
3.2 $\alpha$ 線スペクトロメトリーの測定方法及び検出下限値 .....	4
4. 試験結果 .....	5
4.1 混和剤有抽出水の試験結果 .....	5
4.2 ブランク抽出水の試験結果 .....	5
5. 考察 .....	6
6. おわりに .....	6
謝辞 .....	7
参考文献 .....	7

Contents

1. Introduction ..... 1

2. Experiment ..... 1

    2.1 Materials ..... 1

    2.2 Squeezing of porewater from hardened cement paste ..... 2

    2.3 Experimental procedure ..... 3

3. Analysis ..... 4

    3.1 pH-value and redox potential ..... 4

    3.2 Procedure of alpha-ray spectrometry measurement and its detection limit · 4

4. Results ..... 5

    4.1 Pu solubility in the porewater with cement admixture ..... 5

    4.2 Pu solubility in the porewater without cement admixture ..... 5

5. Discussions ..... 6

6. Conclusion ..... 6

Acknowledgement ..... 7

References ..... 7

表リスト

表 2.1-1	OPC の化学成分及び物理特性	8
表 2.1-2	Pu の同位体組成比	8
表 2.2-1	混和剤有抽出水の組成	9
表 2.3.1-1	セメント抽出水系溶解度試験条件	10
表 3.1-1	ORP の Eh (vs.SHE) への補正值	11
表 3.2-1	$\alpha$ スペクトロメトリーの検出下限値確認結果	11
表 4.1.1-1	セメント抽出水 (混和剤有抽出水) 系試験結果 (pH・Eh)	12
表 4.1.2-1	セメント抽出水 (混和剤有抽出水) 系試験結果 (Pu 濃度)	13
表 4.2.1-1	セメント抽出水 (ブランク抽出水) 系試験結果 (pH・Eh)	14
表 4.2.2-1	セメント抽出水 (ブランク抽出水) 系試験結果 (Pu 濃度)	15

図リスト

図 2.3.1-1	セメント抽出水系溶解度試験手順	16
図 4.1.1-1	セメント抽出水 (混和剤有抽出水) 系溶解度試験結果 (pH の推移)	17
図 4.1.1-2	セメント抽出水 (混和剤有抽出水) 系溶解度試験結果 (Eh の推移)	17
図 4.1.2-1	セメント抽出水 (混和剤有抽出水) 系溶解度試験結果 (試料別)	18
図 4.1.2-2	セメント抽出水 (混和剤有抽出水) 系溶解度試験結果 (平均)	18
図 4.2.1-1	セメント抽出水 (ブランク抽出水) 系溶解度試験結果 (pH の推移)	19
図 4.2.1-2	セメント抽出水 (ブランク抽出水) 系溶解度試験結果 (Eh の推移)	19
図 4.2.2-1	セメント抽出水 (ブランク抽出水) 系溶解度試験結果 (試料別)	20
図 4.2.2-2	セメント抽出水 (ブランク抽出水) 系溶解度試験結果 (平均)	20
図 5-1	154 日目の Pu 濃度の比較 (平均)	21
図 5-2	Pu の Eh-pH 線図と試験における Eh-pH 実測値との関係	22

This is a blank page.

## 1. はじめに

再処理施設及び MOX 燃料加工施設の核燃料サイクル施設から発生する超ウラン (TRU) 核種を含む放射性廃棄物は TRU 廃棄物と呼ばれている。TRU 廃棄物の特徴の一つとしてセメント、有機物、金属等を含み性状が多種多様であることが挙げられる。このため、TRU 廃棄物処分の安全評価のためには、これまでに得られた高レベル放射性廃棄物処分の安全評価からの知見のほかに、TRU 廃棄物に特有な条件に着目したデータ取得を進める必要がある。

TRU 廃棄物処分技術検討書<sup>1)</sup>によると、セメント系材料は、処分坑道の支保工、構造躯体、充填材や廃棄体容器内の充填材として使用される可能性がある。このセメント系材料の中にはセメント混和剤が用いられる。セメント混和剤の主たるものは施工性を高めるために添加する薬剤 (減水剤) であり、この中には有機物が含まれる。この有機物がアクチノイド元素等と錯体を形成する可能性があり、錯生成の程度によっては、放射性核種の溶解度に影響を及ぼす。

これまで、セメント混和剤 (原液) を使用した Pu の溶解度試験<sup>2)</sup>により、混和剤が存在すると、Pu の溶解度が 2~3 桁上昇する傾向が示された。

このため、セメント硬化体の間隙水中に存在する有機成分が核種の溶解度に影響を及ぼすかを確認する必要があり、作製したセメント硬化体から圧搾抽出により採取した間隙水 (以下、「セメント抽出水」という。) を使用した Pu の溶解度試験を実施した。

## 2. 試験方法

### 2.1 薬品類

試験に使用した薬品類のメーカー等を以下に示す。

- ・セメント混和剤：TRU 廃棄物処分場で使用される可能性のあるポリカルボン酸系化合物 (BASF ポゾリス社製：レオビルド SP8LS、以下「レオビルド」という。)<sup>3)</sup>を用いた。
- ・セメント：普通ポルトランドセメント (以下、「OPC」という。) を用いた。OPC の化学成分及び物理特性を表 2.1-1 に示す。
- ・Pu：2 mol/dm<sup>3</sup> の硝酸溶液で、原液の Pu 濃度は 10<sup>-3</sup> mol/dm<sup>3</sup> を用いた。Pu の同位体組成比を表 2.1-2 に示す。
- ・試薬類：そのほかの試薬類については、全て特級のものをを用いた。

## 2.2 セメント硬化体の作製方法及び間隙水の採取方法

セメント硬化体の作製及びセメント硬化体から間隙水の採取は、業務委託により実施した。委託報告書によるセメント硬化体作製方法及び間隙水の採取方法を以下に示す。

なお、セメント混和剤の影響を確認するため、間隙水については、混和剤を添加し作製したセメント硬化体から採取したセメント抽出水（以下、「混和剤有抽出水」という。）と、混和剤を添加せずに作製したセメント硬化体から採取したセメント抽出水（以下、「ブランク抽出水」という。）の2種類とした。採取した混和剤有抽出水のフィルターろ過後の組成を表 2.2-1 示す。

### 2.2.1 セメント硬化体作製方法

#### 2.2.1.1 混練、打設

水セメント比を 55 %、混和剤セメント比を 1.0 %として、セメントペーストの混練を行った。混練は 303 K の恒温室で行い、ブリーディングの発生を抑制するために、30～60 分に 1 回の練り返しを実施した。ブリーディングがほぼ無くなり、適当な粘性となった時点で  $\phi 5 \times 10$  cm のプラスチック製型枠に打設した。打設時には、型枠面より高く（多め）に打設した。

#### 2.2.1.2 端面仕上げ、養生

硬化し始めたタイミングで、温度 293 K の部屋に移し、型枠面より高い部分をモルタルナイフで削って端面が平滑となるよう成形した。その後、型枠上に同じ内径の亚克力パイプ（長さ 3 cm 程度）をシリコンシーラント材により接着し、3～5 mm 程度の水位までイオン交換水を加え、上面を密封して材齢 28 日まで養生を行った。養生温度は 293 K とした。

### 2.2.2 間隙水の採取方法

#### 2.2.2.1 圧搾抽出

直前に脱型した  $\phi 5 \times 10$  cm のセメントペースト硬化体を、高圧容器を用いて間隙水の採取を行った。鋼製ピストンにより最大 60 t の一軸荷重を載荷し、間隙水を圧搾抽出し、シリンジにより採取した。1 本の硬化体から採取した液量は 6～9 mL 程度であった。

### 2.2.2.2 間隙水の処理

シリンジに採取した間隙水は、アルゴンガス雰囲気グローブボックス内で 1 つに混合し、0.45 ミクロンのフィルターでろ過した。

## 2.3 試験方法

試験はセメント混和剤の影響を確認するため、①混和剤有抽出水及び②ブランク抽出水を液相としたバッチ式溶解度試験を実施した。試験環境は、雰囲気制御グローブボックス内で、常温 ( $298 \pm 5$  K)、アルゴン雰囲気 (酸素濃度 1 ppm 以下) により実施した。

### 2.3.1 セメント抽出水系溶解度試験

試験条件を表 2.3.1-1 に、試験フローを図 2.3.1-1 に示す。

試験は  $n=4$  で行い、30 mL のテフロン (PFA) 容器を用い、ここに全体液量が 10 mL (1 つは、pH 等測定用に 20 mL) となるよう試験液類を添加した。

採取したセメント抽出水に Pu (Pu 濃度  $10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> の 2 mol/dm<sup>3</sup> 硝酸溶液) を初期 Pu 濃度  $10^{-6}$  mol/dm<sup>3</sup> となるように添加し試験を開始した。

試験期間中、容器は静置して試験開始後 7 日、14 日、28 日、56 日、98 日及び 154 日にサンプリングを行った。サンプリングは、人手で試験容器を 10 秒程度振とうし、代表サンプルの pH 及び ORP (Oxidation-reduction potential) を測定した後、300  $\mu$ L を採取し、孔径 0.45  $\mu$ m の遠心フィルター (ミリポア社製 Ultrafree-MC) によりろ過した。なお、28 日、98 日及び 154 日のサンプリングについては、コロイドの影響を確認するため、孔径 0.45  $\mu$ m の遠心フィルター及び分画分子量 (MWCO) 10,000 の遠心フィルター (ミリポア社製 Ultrafree-MC) を用いてろ過を行った後、ろ液 200  $\mu$ L をポリプロピレン (PP) 製サンプリングジャグに採取し、容器の壁面へ Pu が付着することを防ぐため、濃硝酸 (HNO<sub>3</sub>) を 10  $\mu$ L 添加した。

### 3. 分析方法

#### 3.1 水素イオン濃度指数 (pH) 及び酸化還元電位 (Eh) 測定

サンプリング時に実施した試験液の pH 及び ORP の測定は、ガラス複合電極 (TOA GST-5721C、PST-5721C) 及び pH-イオンメーター (TOA Ion mater IM-55G) を用いて測定した。測定した ORP の Eh (vs SHE) への変換は、表 3.1-1 に示す各温度における補正値を加えて求めた。なお、本 pH 及び ORP の測定は、測定によるコンタミを避けるため代表サンプルのみ測定を実施した。

#### 3.2 α線スペクトロメトリーの測定方法及び検出下限値

サンプリングした液中の Pu の濃度は、α線スペクトロメトリーにより測定した。なお、測定及びα線測定用の試料作製は、サンプリングした溶液を雰囲気制御グローブボックスから搬出し大気雰囲気中で実施した。また、サンプリングした溶液は、有機物等の影響を軽減するため 100 倍に希釈した。希釈後、50 μL のマイクロピペッターを用いて直径 2 cm 厚さ 1 mm のステンレス (SUS304) 製の皿に滴下し、高周波加熱装置 (タカノ電子工業製 THF-400) により焼付け固定し、α線測定用の試料とした。なお、α線測定用の試料は n=2 で作製した。

α線の測定は、イオン注入型低バックグラウンド検出器 (ORTEC BU-020-450-AS)、α線測定モジュール (ORTEC SOLOIST) 及びマルチチャンネルアナライザー (ORTEC ETHERNIM 920E) を用いて行った。

本試験に用いたα線スペクトロメーターの検出下限値は、以下に示す 3σ法に従って求めた。

$$l_d = \frac{9}{2t_{S+B}} + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{9}{t_{S+B}^2} + 4n_B \left( \frac{1}{t_{S+B}} + \frac{1}{t_B} \right)} = \frac{3}{2} \left\{ \frac{3}{t_{S+B}} + \sqrt{\frac{9}{t_{S+B}^2} + 4n_B \left( \frac{1}{t_{S+B}} + \frac{1}{t_B} \right)} \right\}$$

$$\left[ \begin{array}{l} t_{S+B} : \text{試料の計数時間} \\ t_B : \text{バックグラウンドの計数時間} \\ n_B : \text{バックグラウンドの計数率} \end{array} \right.$$

上式を用いて、試料の計数時間、バックグラウンドの計数時間にそれぞれの測定時間を、バックグラウンドの計数率には実際にバックグラウンド計数により得られたカウント数を代入して、各検出器の検出下限値を得た。なお、バックグラウンドの測定は約 3 日間行った。各検出器の検出下限値を表 3.2-1 に示す。

## 4. 試験結果

### 4.1 混和剤有抽出水の試験結果

#### 4.1.1 試験期間中の pH 及び Eh の推移

試験期間中における代表サンプル (K-1) の pH、Eh の試験結果を表 4.1.1-1 に示す。また、pH 推移のグラフを図 4.1.1-1 に、Eh 推移を図 4.1.1-2 に示す。

試験期間中の pH は 13~14、Eh は 40~140 mV<sub>SEH</sub> の間で推移し、ブランク抽出水と比べて大きな違いはなかった。

#### 4.1.2 溶液中の Pu の濃度

混和剤有抽出水の試験結果を表 4.1.2-1 に示す。また、試料別のグラフを図 4.1.2-1 に、平均のグラフを図 4.1.2-2 に示す。

孔径 0.45 µm のフィルターでろ過した試料の Pu 濃度は、時間経過とともに緩やかに減少し、試験期間 154 日では、 $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup> オーダーを示した。ただし、サンプル No.K-1 は、試験開始から減少傾向を示し、試験期間 154 日経過後も安定していない。

MWCO 10,000 のフィルターでろ過した試料の Pu 濃度は、試験期間を通して概ね  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup> を示した。

### 4.2 ブランク抽出水の試験結果

#### 4.2.1 試験期間中の pH 及び Eh の推移

試験期間中における代表サンプル (K0-1) の pH、Eh の試験結果を表 4.2.1-1 に示す。また、pH 推移のグラフを図 4.2.1-1 に、Eh 推移を図 4.2.1-2 に示す。

試験期間中の pH は 13~14、Eh は -40~160 mV<sub>SEH</sub> の間で推移し、混和剤有抽出水と比べて大きな違いはなかった。

#### 4.2.2 溶液中の Pu の濃度

ブランク抽出水の試験結果を表 4.2.2-1 に示す。また、試料別のグラフを図 4.2.2-1 に、平均のグラフを図 4.2.2-2 に示す。

試験期間中の Pu 濃度は、孔径 0.45 µm のフィルターでろ過した試料及び MWCO 10,000 のフィルターでろ過した試料ともに時間経過とともに緩やかに減少し、試験期間 154 日では、概ね  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup> を示した。

## 5. 考察

154 日目の混和剤有抽出水とブランク抽出水との Pu 濃度を比較した結果を図 5-1 に示す。混和剤有抽出水とブランク抽出水では Pu 濃度に大きな差は見られず、混和剤が Pu 溶解度に与える影響はほとんど見られない。

また、前回実施したセメント混和剤(原液)を使用した試験<sup>2)</sup>では、セメント混和剤が存在しない場合の Pu 濃度 (約  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup>) に対し、セメント混和剤が存在すると Pu 濃度は 2~3 桁上昇する傾向が示されたが、今回の混和剤有抽出水による試験では、試験期間 154 日目の Pu 濃度は  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup> オーダーとセメント混和剤による影響が見られなくなった。

これは、セメント混和剤(原液)中には Pu の溶解度に影響を及ぼす成分が含まれるが、セメント硬化後は、Pu 溶解度に影響を及ぼす成分は、液相から除去されたためと考えられる。Pu 溶解度に影響を及ぼす成分が液相から除去された理由としては、セメント硬化後の硬化体による収着・ろ過又は分解作用等によるものと考えられる。

参考として、混和剤有抽出水の溶解度試験における pH 及び Eh の試験結果を Eh-pH 線図にプロットし、Pu の支配的な溶存化学種を検討した。Eh-pH 線図の作成においては、JNC-TDB<sup>4)</sup> を用い、Pu 濃度を試験条件と同じ  $10^{-6}$  mol/dm<sup>3</sup> とした。結果を図 5-2 に示す。これより Pu の支配的な溶存化学種は IV 価の Pu であり、Pu(OH)<sub>4</sub>(aq) と推定された。

## 6. おわりに

本試験において、セメント混練時にセメント混和剤を添加し、硬化後のセメント固化体から間隙水を採取した混和剤有抽出水及びセメント混練時にセメント混和剤を添加せずに作製したセメント固化体から間隙水を採取したブランク抽出水を液相とした Pu の溶解度試験を実施し、それぞれの溶液中の Pu 濃度を比較した結果、ともに約  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup> オーダーであり、セメント混和剤の有無による影響は見られなかった。

また、セメント硬化体の間隙水中に存在する有機成分は、その全てが混和剤に由来するものとは限らないこと (セメントクリンカーの粉砕助剤など) が藤田ら<sup>5)</sup>によって指摘されているが、セメント硬化体から間隙水を抽出した本試験の結果と、TRU 廃棄物処分場で想定される高 pH、低 Eh 条件における Pu(IV) の溶解度 (約  $10^{-10}$  mol/dm<sup>3</sup>) を比較しても同等程度であることから、実際の処分環境においては、セメント系材料由来の有機物が Pu の溶解度に与える影響は小さいと推察される。

謝辞

本試験の計画および実施並びに評価にあたり、地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット TRU 廃棄物処分研究グループ本田明グループリーダーには、有益な助言を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構: “TRU 廃棄物処分技術検討書 ー第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー”, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
- [2] 須黒寿康ほか: “TRU 廃棄物処分に係る核種移行データ ー有機物 (セメント混和剤) 共存下におけるプルトニウムの溶解度試験結果ー”, JAEA-Technology-2010-048 (2011).
- [3] 三原守弘: セメント系材料に用いられている混和剤の核種移行への影響に関する知見と今後の進め方, 地層処分研究開発レポート, I-05-6-005.(2006).
- [4] Yui, M. et al: “JNC Thermodynamic Database for Performance Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal System”, JNC TN8400 99-070 (1999).
- [5] 藤田英樹ほか: セメントペースト硬化体の間隙水に残存する有機混和剤の挙動の評価, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.65-71. (2008).

表 2.1-1 OPC の化学成分及び物理特性

・化学分析(JIS R 5204:2002、JIS R 5202:1999)

化学成分(%)							
Ig.loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
0.74	0.13	21.07	5.40	2.77	64.62	1.74	2.09

化学成分(%)						全アルカリ(%)
Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cl	Na <sub>2</sub> Oeq
0.21	0.42	0.27	0.29	0.08	0.015	0.49

\* insol.および Cl は JIS R 5202 による。それ以外の化学成分は JIS R 5204 による。

・物理試験(JIS R 5201:1997)

密度 (g/cm <sup>2</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			安全性 (パット法)
		水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	
3.18	3370	28.7	2-22	3-50	良

強さ(N/mm <sup>2</sup> )					
圧縮			曲げ		
3日	7日	28日	3日	7日	28日
29.9	46.4	65.0	6.1	7.9	8.6

試験に供したセメントの分析結果

表 2.1-2 Pu の同位体組成比

質量数	238	239	240	241	242
組成比(wt%)	0.014	91.175	8.501	0.258	0.052

表 2.2-1 混和剤有抽出水の組成

OPC pore water	濃度 (ppm)							pH
	Ca	Si	Al	Na	K	S	TOC	
—	114	22	1.0	6670	2580	15	940	13.38

OPC pore water	濃度 (mmol/dm <sup>3</sup> )						濃度 (ppm)	pH
	Ca	Si	Al	Na	K	SO <sub>3</sub>	TOC	
—	2.9	0.78	0.04	290	66	0.47	940	13.38

W/C=55%、SP/C=1.0%、材齢 28d  
2008.10.1 圧搾

表 2.3.1-1 セメント抽出水系溶解度試験条件

	溶解度試験	
使用元素	Pu	
Pu 添加濃度	10 <sup>-6</sup> M	
液相	<ul style="list-style-type: none"> <li>・混和剤有抽出水</li> <li>・ブランク抽出水</li> </ul>	
試験容器	テフロン(PFA)製(30 mL)	
液量	10 mL(pH・ORP 測定用: 20 mL)	
温度	常温(298±5 K)	
雰囲気	アルゴンガス雰囲気(酸素濃度 1 ppm 以下)	
試験期間	7, 14, 28, 56, 98, 154(d)	
n数	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サンプルNo. K-1~4(混和剤有抽出水)</li> <li>・サンプルNo. K0-1~4(ブランク抽出水)</li> </ul>
固液分離	遠心ろ過(孔径 0.45 μm ろ過, 一部 MWCO 10,000 ろ過)	
分析項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ pH (代表サンプルのみ)</li> <li>・ Eh (代表サンプルのみ)</li> <li>・ 各固液分離後の Pu 濃度</li> </ul>	

表 3.1-1 ORP の Eh(vs. SHE) への補正值

温度(K)	補正值(mV)
283	217
288	214
293	210
298	206
303	203
308	199

東亜ディーケーケー株式会社  
酸化還元(ORP)電極取扱説明書より

表 3.2-1  $\alpha$  スペクトロメリーの検出下限値確認結果

・3 $\sigma$ 法により算出、表 2.1-2 の Pu 組成及び焼付量は 50  $\mu$ L を想定。

検出器 No.	バックグラウンド 測定時間(s)	バックグラウンド カウント数	検出効率	検出下限値 (mol/dm <sup>3</sup> )
1	182,206	6	0.258	1.22E-11
2	182,206	1	0.261	8.17E-12
3	182,206	1	0.271	7.87E-12
4	154,917	2	0.274	1.03E-11
5*1	—	—	—	—
6	182,206	3	0.275	9.52E-12
7	182,206	11	0.265	1.45E-11
8	182,206	0	0.257	6.99E-12
9	182,206	2	0.256	9.36E-12
10	182,206	1	0.249	8.57E-12
11*1	—	—	—	—
12	182,207	1	0.249	8.59E-12
13	182,207	1	0.251	8.52E-12
14	182,207	2	0.265	9.05E-12
15	182,207	0	0.259	6.96E-12
16	182,207.2	1	0.263	8.12E-12

\*1: 検出器No.5, 11 は故障中のため未測定

表 4.1.1-1 セメント抽出水(混和剤有抽出水)系試験結果(pH・Eh)

	pH/Eh	開始時	7日目	14日目	28日目	56日目	98日目	154日目
K-1	pH	13.22	13.30	13.25	13.30	13.52	13.25	13.35
	Eh(mV <sub>SHE</sub> )	41	128	107	124	133	118	76

表 4.1.2-1 セメント抽出水(混和剤有抽出水)系試験結果(Pu 濃度)

[Pu 濃度単位 : mol/dm<sup>3</sup>]

液組成	ろ過時の フィルタ	7日目		14日目		28日目		56日目		98日目		154日目	
		Pu 濃度	平均										
K-1	0.45 μm	3.21E-09	2.89E-09	1.91E-09	1.92E-09	6.00E-10	6.66E-10	3.67E-10	2.82E-10	1.19E-10	1.17E-10	4.63E-12	5.42E-12
		2.57E-09		1.93E-09		7.32E-10		1.96E-10		1.15E-10		6.21E-12	
K-2	0.45 μm	5.35E-09	5.08E-09	3.22E-09	3.44E-09	2.83E-10	2.24E-09	1.50E-09	1.63E-09	2.03E-11	1.14E-09	8.77E-10	8.50E-10
		4.80E-09		3.66E-09		1.83E-10		1.76E-09		1.95E-11		1.14E-09	
K-3	0.45 μm	4.98E-09	5.58E-09	6.21E-09	3.91E-09	9.18E-11	1.38E-10	1.55E-09	9.94E-10	1.09E-10	1.13E-10	6.38E-10	6.57E-10
		6.18E-09		4.17E-09		1.84E-10		4.37E-10		1.17E-10		9.54E-10	
K-4	0.45 μm	1.87E-09	1.23E-09	4.46E-10	1.42E-09	2.65E-10	3.12E-09	9.41E-10	1.02E-09	4.91E-10	4.79E-10	4.83E-10	4.54E-10
		5.99E-10		1.58E-09		8.46E-11		4.17E-09		4.66E-10		8.05E-11	
平均	0.45 μm		3.69E-09	3.16E-10	2.67E-09	3.04E-09	2.04E-10	9.80E-10	9.80E-10	3.79E-11	3.97E-11	1.89E-10	2.04E-10
				4.02E-11		4.02E-11		4.14E-11		6.72E-10		6.33E-11	
セメント抽出水(混和剤有抽出水)													

表 4.2.1-1 セメント抽出水(ブランク抽出水)系試験結果 (pH・Eh)

	pH/Eh	開始時	7日目	14日目	28日目	56日目	98日目	154日目
K0-1	pH	13.40	13.40	13.52	13.45	13.35	13.72	13.51
	Eh(mV <sub>SHE</sub> )	84	84	62	102	54	-43	157

表 4.2.2-1 セメント抽出水(ブランク抽出水)系試験結果(Pu 濃度)

[Pu 濃度単位 : mol/dm<sup>3</sup>]

液組成	ろ過時の フィルタ	7日目		14日目		28日目		56日目		98日目		154日目	
		Pu 濃度	平均										
K0-1	0.45 μm	6.23E-09	4.59E-09	1.56E-09	1.83E-09	2.25E-09	2.20E-09	2.14E-10	1.72E-10	1.42E-10	1.05E-10	5.47E-11	5.92E-11
		2.94E-09		2.09E-09		2.15E-09		1.29E-10		6.86E-11		6.37E-11	
K0-2	0.45 μm					2.63E-09	3.10E-09			6.93E-11	6.93E-11	6.42E-11	3.77E-11
						3.57E-09		2.60E-10	1.39E-11	1.11E-11			
K0-3	0.45 μm	5.24E-09	3.70E-09	2.74E-09	2.82E-09	2.99E-10	1.79E-10	2.78E-10	2.91E-10	2.60E-10	1.55E-10	1.39E-11	3.09E-11
		2.15E-09		2.90E-09		5.92E-11		3.03E-10		5.06E-11		4.79E-11	
K0-4	0.45 μm					9.81E-11	7.65E-11			1.50E-10	9.63E-11	2.46E-11	1.77E-11
						5.48E-11		4.26E-11	1.07E-11				
平均	0.45 μm	2.56E-09	3.04E-09	1.77E-09	1.75E-09	1.95E-09	1.82E-09	7.02E-10	7.33E-10	4.75E-10	5.36E-10	5.19E-10	4.78E-10
		3.52E-09		1.73E-09		1.68E-09		7.63E-10		5.96E-10		4.37E-10	
平均	0.45 μm					1.12E-09	1.17E-09			7.86E-11	7.65E-11	7.98E-11	1.27E-10
						1.21E-09		7.43E-11	1.74E-10				
平均	0.45 μm	2.68E-09	3.85E-09	2.15E-09	1.93E-09	1.51E-09	1.39E-09	6.98E-10	4.00E-10	4.21E-10	3.56E-10	2.79E-10	3.36E-10
		5.02E-09		1.70E-09		1.27E-09		1.01E-10		2.90E-10		3.92E-10	
平均	0.45 μm					4.48E-10	4.04E-10			1.58E-11	1.58E-11	1.14E-10	7.89E-11
						3.59E-10		4.38E-11					
平均	0.45 μm												
平均	MWCO10,000												
平均	MWCO10,000												
セメント抽出水(ブランク抽出水)													

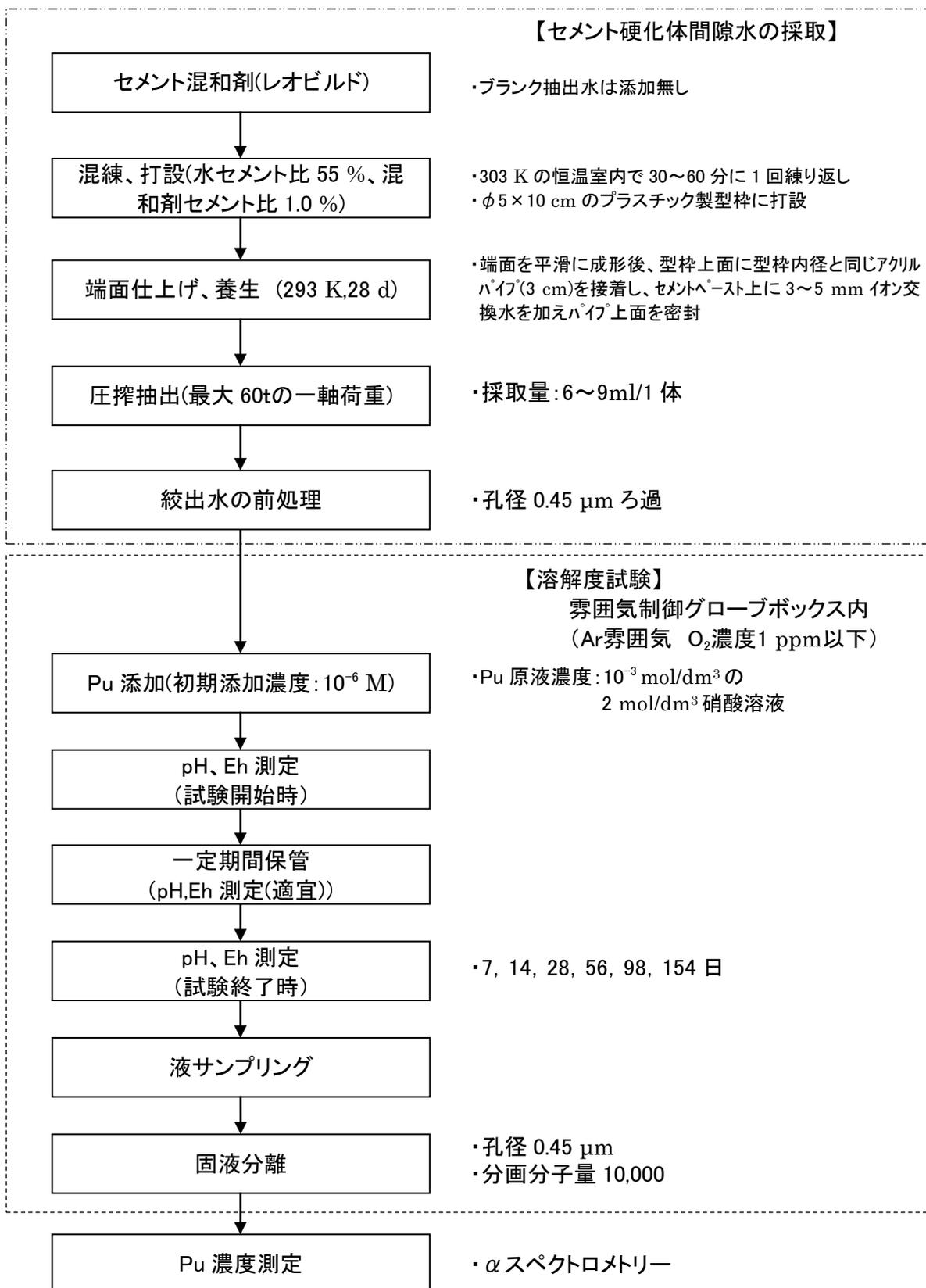


図 2.3.1-1 セメント抽出水系溶解度試験手順

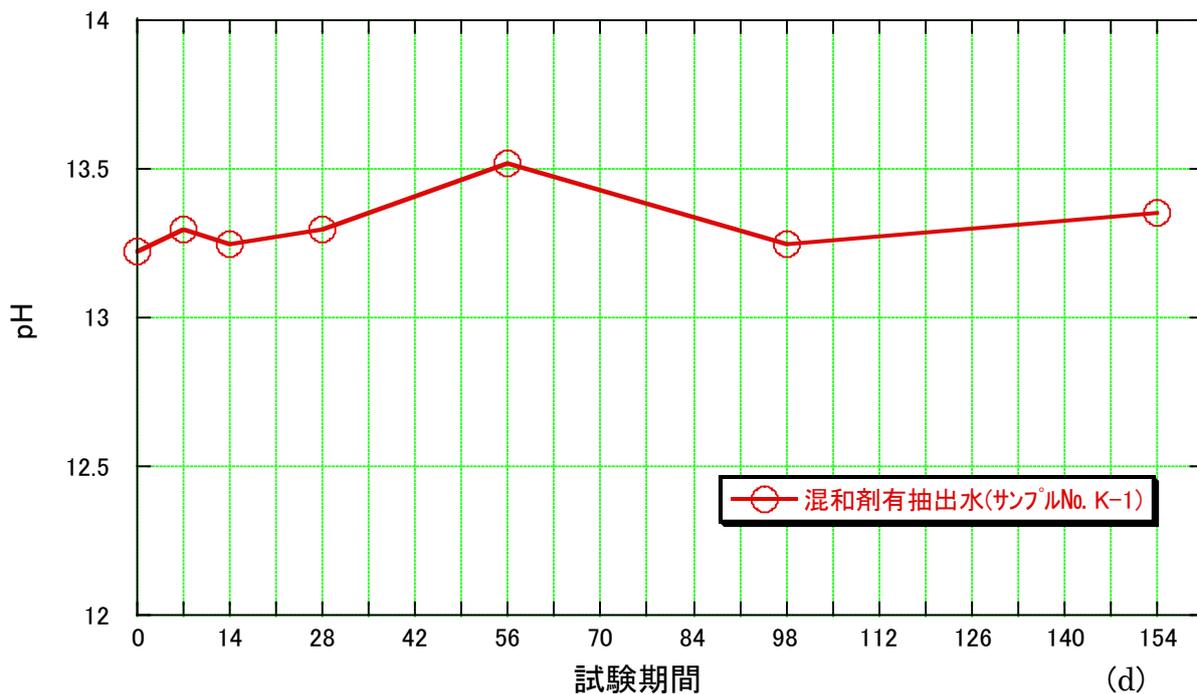


図 4.1.1-1 セメント抽出水(混和剤有抽出水)系溶解度試験結果(pH の推移)

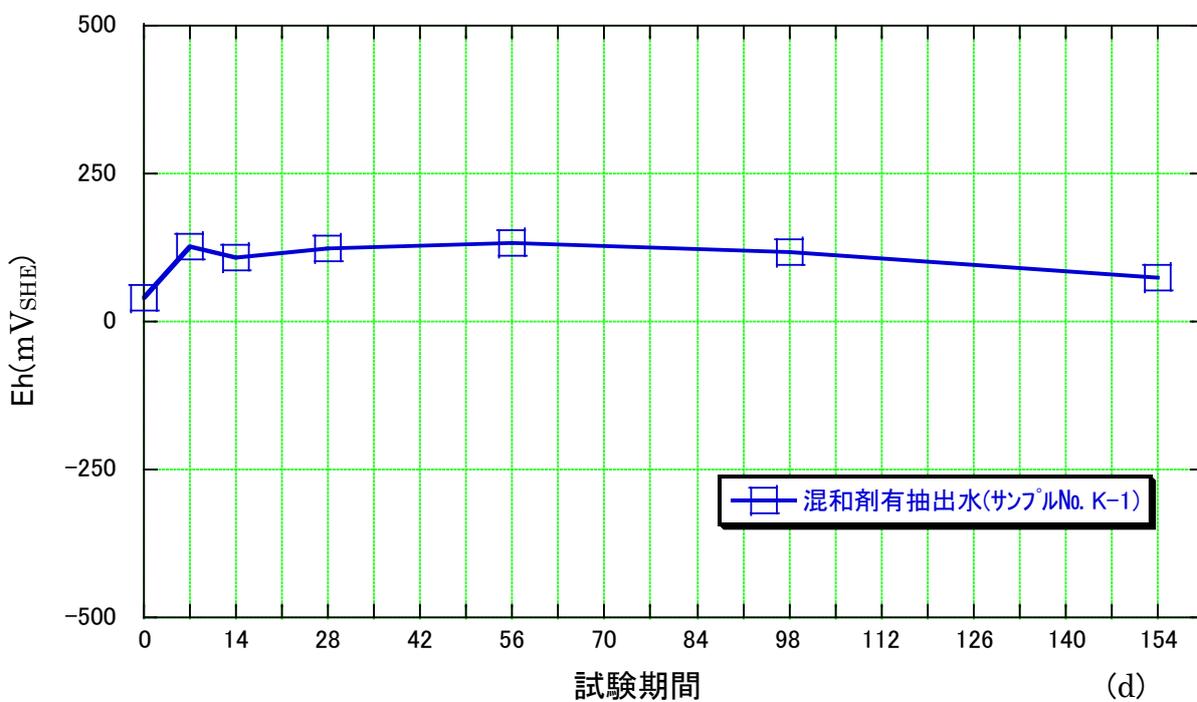


図 4.1.1-2 セメント抽出水(混和剤有抽出水)系溶解度試験結果(Eh の推移)

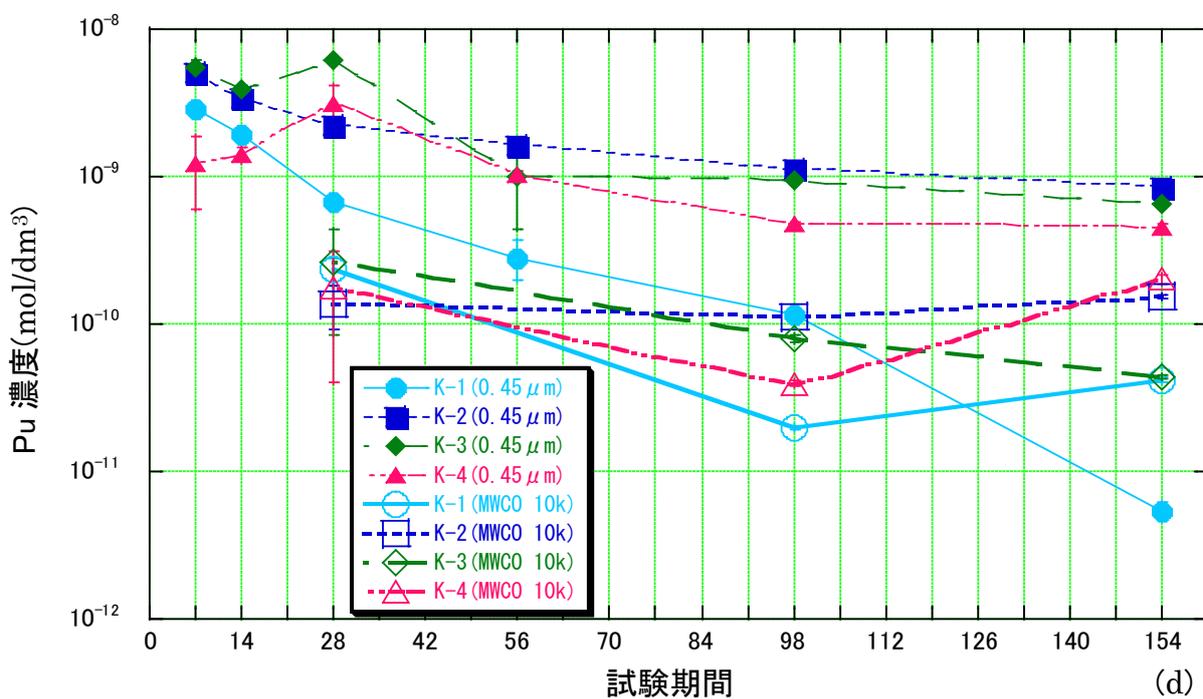


図 4.1.2-1 セメント抽出水(混和剤有抽出水)系溶解度試験結果(試料別)

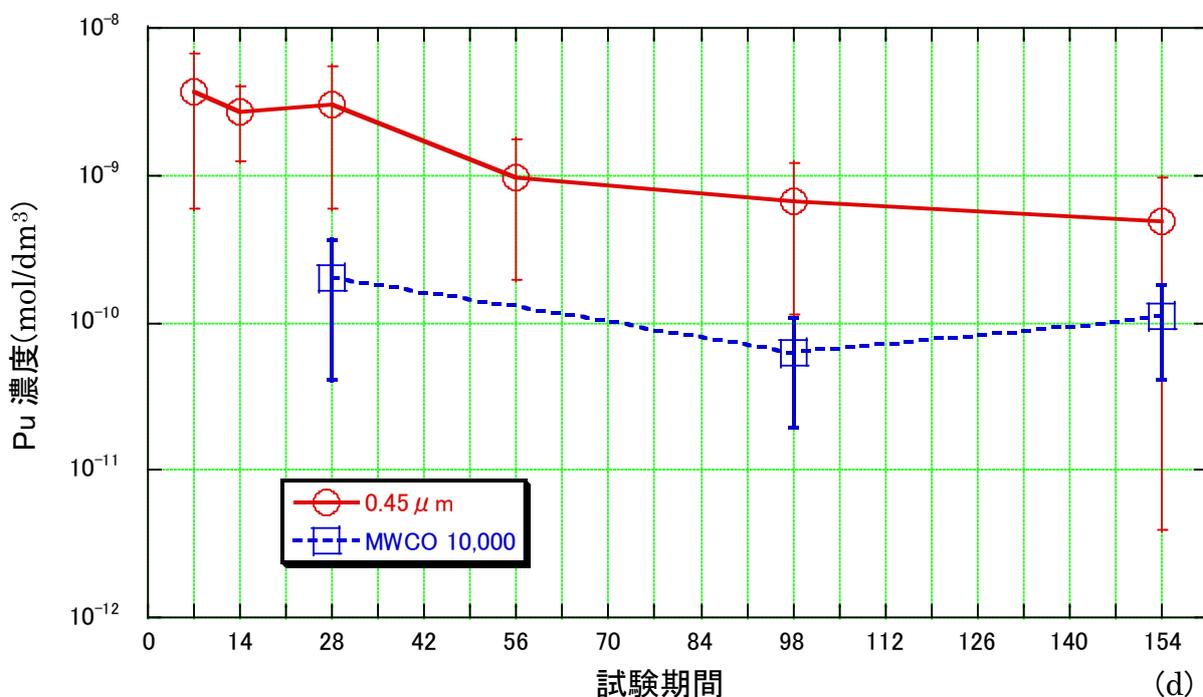


図 4.1.2-2 セメント抽出水(混和剤有抽出水)系溶解度試験結果(平均)

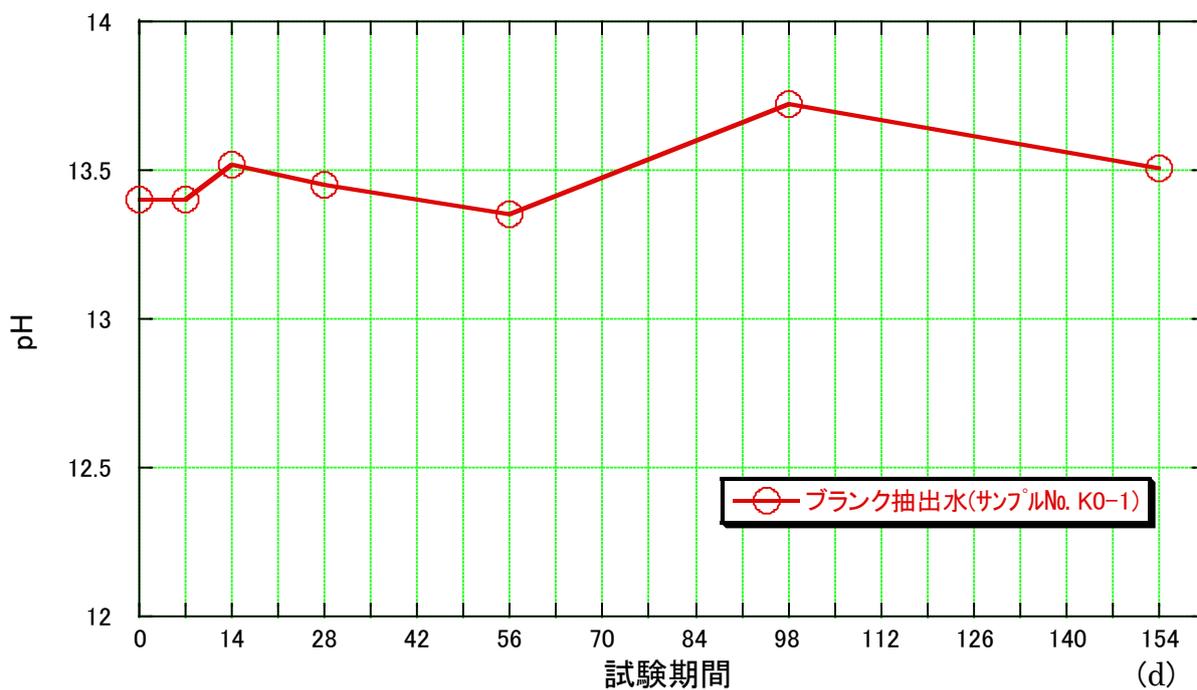


図 4.2.1-1 セメント抽出水(ブランク抽出水)系溶解度試験結果(pH の推移)

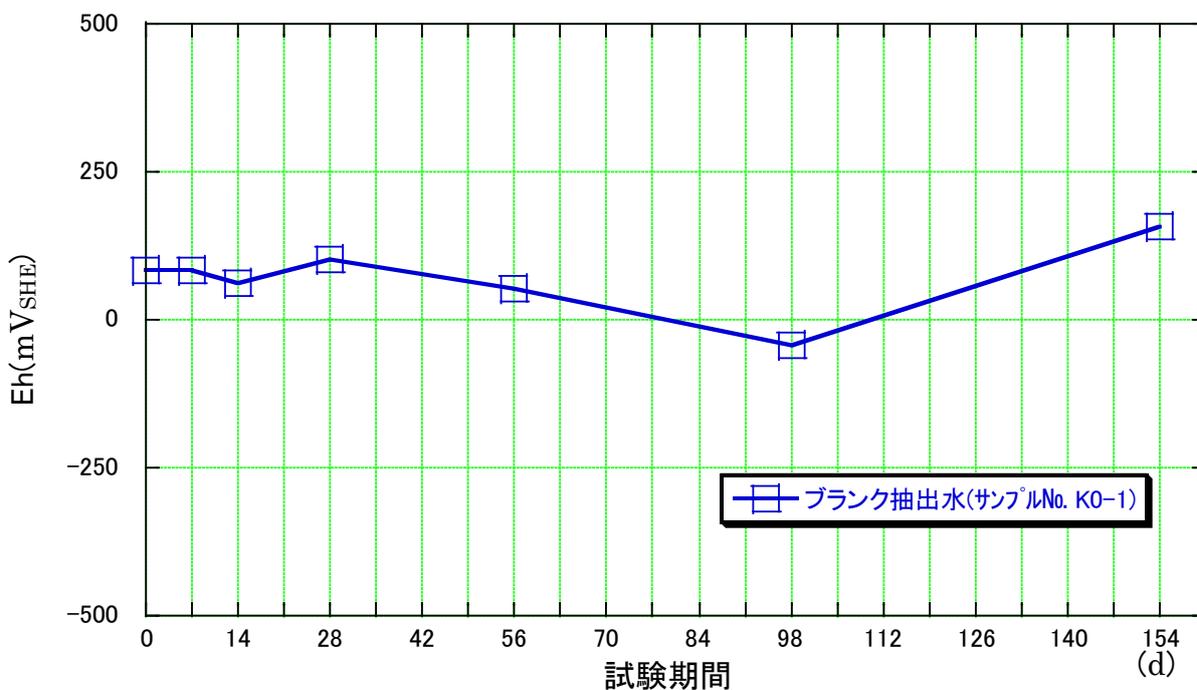


図 4.2.1-2 セメント抽出水(ブランク抽出水)系溶解度試験結果(Eh の推移)

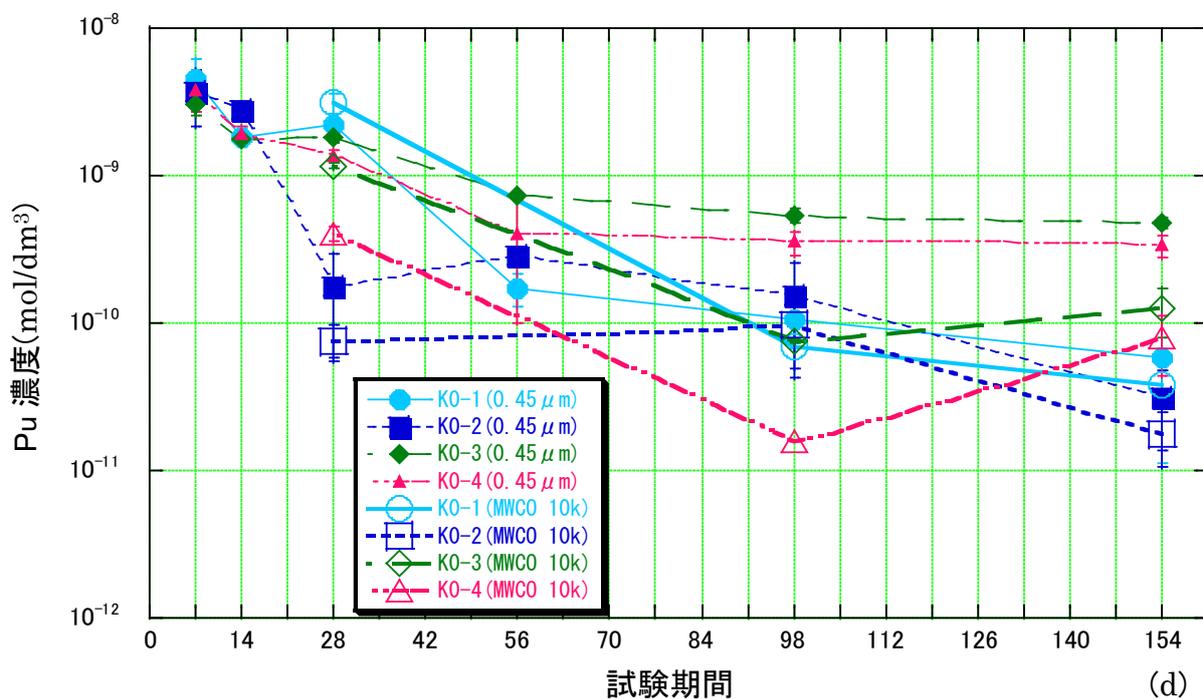


図 4.2.2-1 セメント抽出水(ブランク抽出水)系溶解度試験結果(試料別)

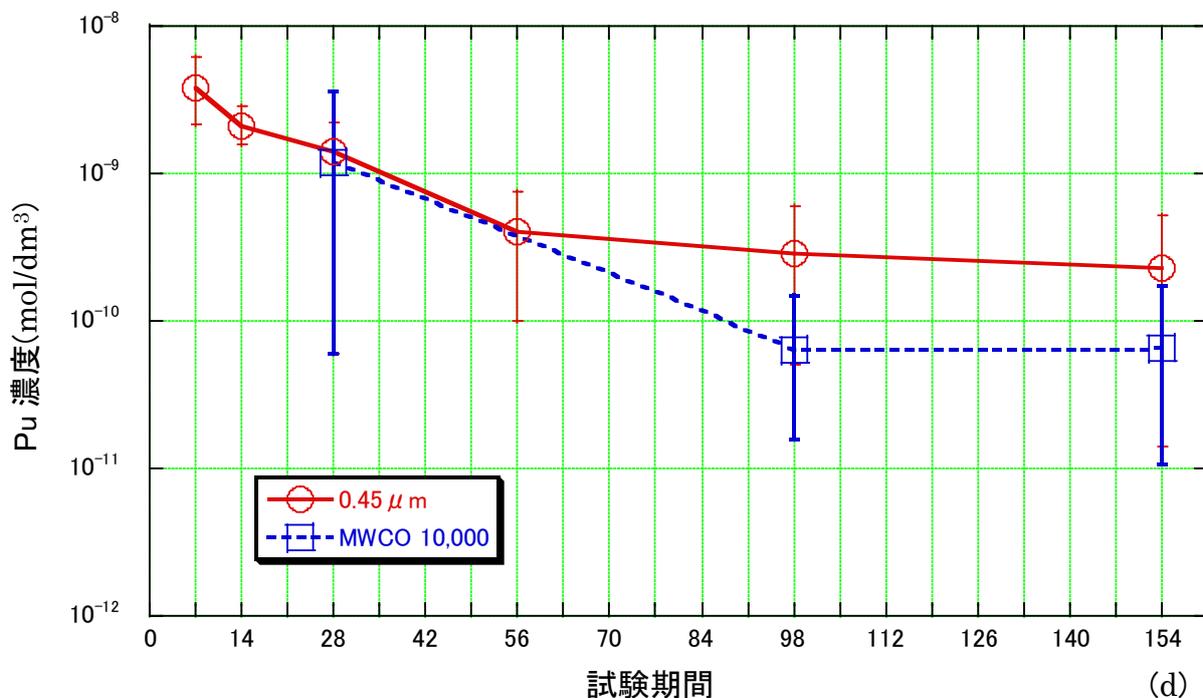


図 4.2.2-2 セメント抽出水(ブランク抽出水)系溶解度試験結果(平均)

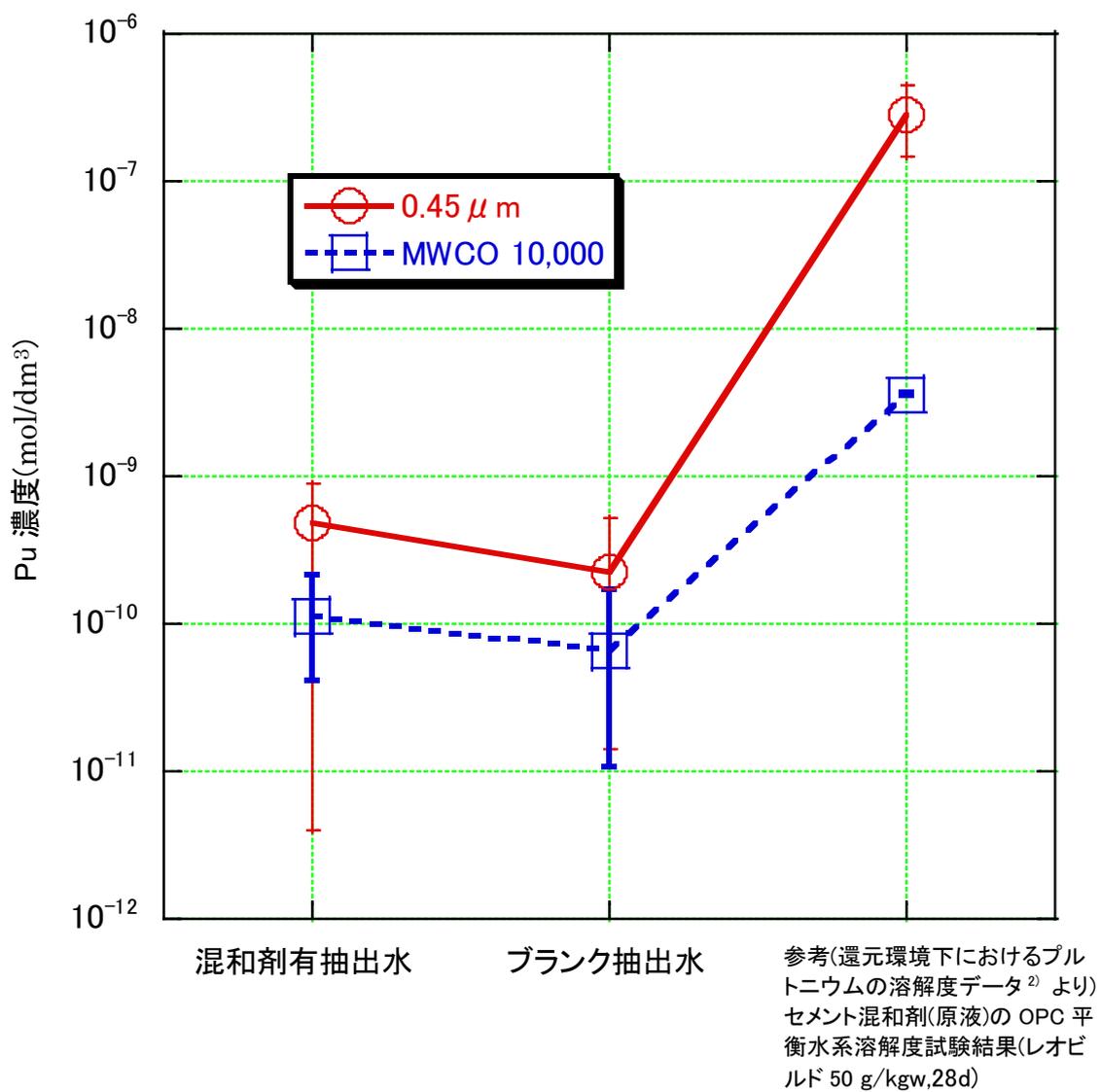
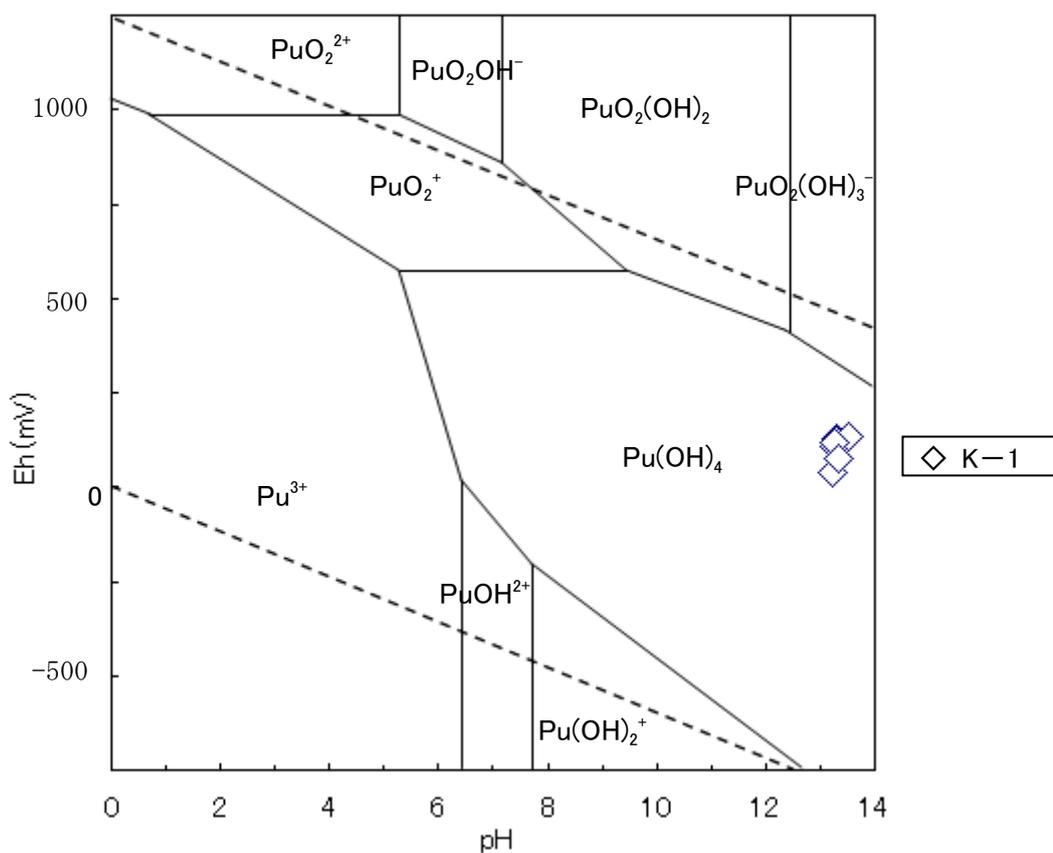


図 5-1 154日目の Pu 濃度の比較(平均)



JNC-TDB を基にしたプルトニウムの pH-Eh ダイアグラム

図 5-2 Pu の Eh-pH 線図と試験における Eh-pH 実測値との関係

# 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 <sup>2</sup>
体積	立法メートル	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
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</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>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
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
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
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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/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>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電表面電荷	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
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)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	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=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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> 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 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バトン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <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	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> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <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=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm 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=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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 <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=1 cGy=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=200 mg=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=4.1858 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 <sup>-6</sup> m

