

## エマルションフローを利用した液・液抽出法による ウラン廃液処理試験

The Uranium Waste Fluid Processing Examination  
by Liquid and Liquid Extraction Method Using the Emulsion Flow Method

菅田 信博 大天 正樹 遠藤 裕治 吉田 英明  
美田 豊 長縄 弘親 永野 哲志 柳瀬 信之

Nobuhiro KANDA, Masaki DAITEN, Yuji Endo, Hideaki YOSHIDA  
Yutaka MITA, Hirochika NAGANAWA, Tetsushi NAGANO and Nobuyuki YANASE

バックエンド研究開発部門  
人形峠環境技術センター  
環境保全技術開発部

Environmental Research and Development Department  
Ningyo-toge Environmental Engineering Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

March 2015

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2 番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2015

## エマルションフローを利用した液・液抽出法によるウラン廃液処理試験

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門  
人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部

菅田 信博, 大天 正樹, 遠藤 裕治, 吉田 英明, 美田 豊,  
長縄 弘親<sup>+</sup>, 永野 哲志<sup>+</sup>, 柳瀬 信之<sup>+</sup>

(2015年2月5日 受理)

日本原子力研究開発機構人形峠環境技術センターのウラン濃縮施設において、ウラン濃縮技術開発に使用してきた使用済遠心分離機を保管している。

遠心分離機処理は希硫酸及び水による超音波洗浄等の湿式除染により部品表面へ付着した放射性物質を分離処理するものである。除染処理に伴う放射性廃液を処理することにより中和生成物(澱物)が発生する。澱物処理作業の効率化及び低減化を目的として、放射性廃液よりウランを取り除くことにより澱物中の放射性濃度を低減させる技術の適用性を検討してきた。その一環として、平成19年度より原子力基礎工学研究部門との連携協力により、エマルションフロー法(原子力基礎工学研究部門により理論提唱された技術)によるウラン抽出分離技術の開発を進めてきている。

本報では、エマルションフロー法を利用した試験装置により、希硫酸及び水の実廃液を用いて実施した実用性確認試験の状況を報告する。

## **The Uranium Waste Fluid Processing Examination by Liquid and Liquid Extraction Method Using the Emulsion Flow Method**

Nobuhiro KANDA, Masaki DAITEN, Yuji Endo, Hideaki YOSHIDA, Yutaka MITA,

Hirochika NAGANAWA<sup>+</sup>, Tetsushi NAGANO<sup>+</sup> and Nobuyuki YANASE<sup>+</sup>

Environmental Research and Development Department  
Ningyo-toge Environmental Engineering Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management  
Japan Atomic Energy Agency  
Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received February 5, 2015)

Spent centrifuges which had used for the development of the uranium enrichment technology are stored in the uranium enrichment facility located in Ningyo-toge Environmental Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Our technology of the centrifugal machine processing are supposed to separate the radioactive material adhered on surface of inner parts of centrifuges by the wet way decontamination method using the ultrasonic bath filled dilute sulfuric acid and water, and it is generated the neutralization sediment (sludge) by the processing of the radioactive waste fluid with the decontamination. JAEA had been considering the applicability of a streamlining and reduction of the processing of the sludge by decreases radioactive concentration including the sludge through the removes uranium from the radioactive waste fluid. As part of considerations, JAEA have been promoting technological developments of the uranium extraction separation using The Emulsion Flow Extraction Method (a theory propounded by JAEA-Nuclear Science and Engineering Center) in close coordination and cooperation between with JAEA-Nuclear Science and Engineering Center and Ningyo-toge Environmental Center from 2007 fiscal year. This report describes the outline of the application test using actual waste fluid of dilute sulfuric acid and water by developed the examination system introducing the emulsion flow extraction method.

**Keywords:** Continuous Extraction, Emulsion Flow Extractor, Uranium, Gas Centrifuge, Effluent Processing, Uranium-containing Liquid Waste, Uranium Extraction

---

<sup>+</sup> Nuclear Science and Engineering Center, Sector of Nuclear Science Research

## 目 次

1. はじめに	1
2. 遠心分離機の除染廃液の処理	2
3. エマルションフロー法の概要	3
3.1 エマルションフロー法	3
3.2 エマルションフロー法の技術背景と特徴	3
4. 試験項目	5
4.1 エマルションフロー装置による性能確認試験	5
4.2 黒色の浮遊物分析	5
4.3 吸光度測定による破過モニターとしての適用性試験	5
5. 試験方法	6
5.1 エマルションフロー装置による性能確認試験	6
5.1.1 供試廃液	6
5.1.2 抽出剤	6
5.1.3 試験機材	6
5.1.4 試験方法	7
5.2 黒色の浮遊物分析	7
5.2.1 分析条件	7
5.2.2 分析機材	8
5.2.3 分析方法	8
5.3 吸光度測定による破過モニターとしての適用性試験	9
5.3.1 試験条件	9
5.3.2 試験機材	9
5.3.3 試験方法	9
6. 試験結果	11
6.1 エマルションフロー装置による性能確認試験	11
6.1.1 エマルションフロー装置のウラン抽出率	11
6.1.2 目視観察状況	11
6.2 黒色の浮遊物分析	12
6.2.1 黒色の浮遊物分析結果	12
6.2.2 硫酸ピッチの発生確認	12
6.3 吸光度測定による破過モニターとしての適用性試験	12
6.3.1 TnOA 系抽出剤の吸光度測定	12
6.3.2 D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定	13
6.3.3 ウランの mol 吸光係数の導出	13

7. 考察 .....	15
7.1 黒色の浮遊物の発生要因の推定 .....	15
7.2 ウラン抽出率 .....	15
8. 結論 .....	16
参考文献 .....	17

Contents

1. Introduction .....	1
2. Processing of the decontamination waste fluid of a centrifuge .....	2
3. The outline of the emulsion flow method .....	3
3.1 The emulsion flow method .....	3
3.2 The technical background and the feature of the emulsion flow method .....	3
4. The test items .....	5
4.1 The performance check examination by emulsion flow equipment .....	5
4.2 Suspended solids analysis of black .....	5
4.3 Applicability examination as a breakthrough monitor by measuring absorbance .....	5
5. Test method .....	6
5.1 The performance check examination by emulsion flow equipment .....	6
5.1.1 Waste fluid used for an examination .....	6
5.1.2 Extract agent .....	6
5.1.3 Apparatus and materials which are used for an examination .....	6
5.1.4 Test method .....	7
5.2 Suspended solids analysis of black .....	7
5.2.1 Analysis conditions .....	7
5.2.2 Apparatus and materials which are used for analysis .....	8
5.2.3 Methods of analysis .....	8
5.3 Applicability examination as a breakthrough monitor by measuring absorbance .....	9
5.3.1 Test condition .....	9
5.3.2 Apparatus and materials which are used for an examination .....	9
5.3.3 Test method .....	9
6. Test results .....	11
6.1 The performance check examination by emulsion flow equipment .....	11
6.1.1 The uranium extraction rate of emulsion flow equipment .....	11
6.1.2 Visual observation situation .....	11
6.2 Suspended solids analysis of black .....	12
6.2.1 Suspended solids analysis results of black .....	12
6.2.2 The occurrence check of sulfate pitch .....	12
6.3 Applicability examination as a breakthrough monitor by measuring absorbance .....	12
6.3.1 Measuring absorbance of a TnOA group extract agent .....	12
6.3.2 Measuring absorbance of a D2EHPA group extract agent .....	13

6.3.3 Resolution of the molar extinction coefficient of uranium.....	13
7. Consideration.....	15
7.1 Presumption of occurrence factor of suspended solids of black.....	15
7.2 Uranium extraction rate.....	15
8. Conclusion .....	16
References .....	17

## 図リスト

図 1	エマルションフロー装置とその仕組み	18
図 2	エマルションフローと従来の抽出装置との比較	18
図 3	エマルションフロー装置による性能確認試験フロー	19
図 4	連続抽出中の各廃液のウラン濃度推移	19
図 5	連続抽出中の TnOA 系抽出剤による各廃液のウラン抽出率	20
図 6	連続抽出中の D2EHPA 系抽出剤による混合洗浄廃液のウラン抽出率	20
図 7	連続抽出中の TnOA 系抽出剤のウラン濃度推移	21
図 8	FT-IR でのスペクトル分析結果	21
図 9	黒色の浮遊物の XPS Wide-Scan (定性) 分析結果	22
図 10	ガラス製の焼結フィルター材に付着した黒色の付着物の XPS Wide-Scan (定性) 分析結果	22
図 11	XPS ナローズキャンによる黒色の浮遊物の分析結果	23
図 12	XPS ナローズキャンによるガラス製の焼結フィルター材に付着した黒色の付着物の分析結果	23
図 13	使用済 TnOA 系抽出剤の吸光度測定結果	24
図 14	未使用 TnOA 系抽出剤の吸光度測定結果	24
図 15	使用済 D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定結果	25
図 16	未使用 D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定結果	25
図 17	TnOA 系抽出剤の吸光度とウラン濃度の関係	26
図 18	D2EHPA 系抽出剤の吸光度とウラン濃度の関係	26
図 19	TnOA 系抽出剤によるケーシング処理廃液及び回転胴処理廃液のウラン抽出率比較	27
図 20	TnOA 系抽出剤によるその他の金属部品処理廃液及び混合処理廃液のウラン抽出率比較	27
図 21	D2EHPA 系抽出剤による洗浄廃液のウラン抽出率比較	28

表リスト

表 1	供試廃液の組成	29
表 2	高周波誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) の仕様	29
表 3	フーリエ変換赤外分光分析装置 (FT-IR) の仕様	30
表 4	X線光電子分光分析装置 (XPS) の仕様	30
表 5	分光光度計の仕様	31
表 6	エマルションフロー装置による性能確認試験結果一覧	31
表 7	廃液種類毎のエマルションフロー装置による性能確認試験結果	32
表 8	吸光度測定に使用した溶媒のウラン分析結果とウラン濃度	33
表 9	各抽出剤の mol 吸光計数の導出結果	33

写真リスト

写真 1	エマルションフロー装置	34
写真 2	分析用サンプル	34
写真 3	ケーシング処理廃液のエマルション層 (中期)	35
写真 4	ケーシング処理廃液のエマルションフロー状況	35
写真 5	回転胴処理廃液のエマルション層 (中期)	36
写真 6	回転胴処理廃液のエマルションフロー状況	36
写真 7	混合処理廃液のエマルション層 (中期)	37
写真 8	混合処理廃液のエマルションフロー状況	37
写真 9	ケーシング処理廃液の黒色浮遊物発生状況	38
写真 10	回転胴処理廃液の黒色浮遊物発生状況	38
写真 11	混合処理廃液の黒色浮遊物発生状況	39
写真 12	硫酸廃液吸入部のフィルター部黒色付着物	39
写真 13	洗浄廃液のエマルションフロー状況	40
写真 14	洗浄廃液のエマルション層 (中期)	41
写真 15	CCD による黒色浮遊物観察結果	42
写真 16	CCD によるフィルター材黒色付着物観察結果	42
写真 17	5wt%硫酸とケロシンの浸透状況	43

List of Figures

Figure1	Emulsion flow device and how it works .....	18
Figure2	Comparison of the emulsion flow and conventional extraction equipment .....	18
Figure3	Performance check test flow by emulsion flow equipment.....	19
Figure4	Uranium concentration transition of each effluent in continuous extraction.....	19
Figure5	Uranium extraction rate of each effluent by TnOA group extraction agent in the continuous extraction.....	20
Figure6	Uranium extraction rate of mixing cleaning effluent by D2EHPA group extraction agent in the continuous extraction .....	20
Figure7	Uranium concentration transition of TnOA group extraction agent in the continuous extraction.....	21
Figure8	Spectrum-analysis result in FT-IR.....	21
Figure9	XPS Wide-Scan analysis of suspended solids of black (qualitative) .....	22
Figure10	XPS Wide-Scan of black deposits adhering to the material sintered glass filter analysis (qualitative).....	22
Figure11	Analysis of suspended solids of black by XPS narrow scan .....	23
Figure12	XPS narrow scan analysis result of black adhesion thing adhering to glass sintered filter material .....	23
Figure13	Absorbance measurement result of used TnOA group extract agent.....	24
Figure14	Absorbance measurement result of new TnOA group extract agent .....	24
Figure15	Absorbance measurement result of used D2EHPA group extract agent .....	25
Figure16	Absorbance measurement result of new D2EHPA group extract agent .....	25
Figure17	Relationship between absorbance and concentration of uranium extraction agent group TnOA .....	26
Figure18	Relationship between absorbance and concentration of uranium extractant D2EHPA group.....	26
Figure19	Comparison uranium extraction rate of the casing processing effluent and the rotor processing effluent by extraction agent group TnOA .....	27
Figure20	Comparison uranium extraction rate of the processing effluent and mixed with other metal parts of extractive agent group TnOA .....	27
Figure21	Comparison of uranium extraction rate by extraction agent cleaning effluent group D2EHPA .....	28

List of Tables

Table1	Composition of the effluent test	29
Table2	Specifications (ICP-MS) inductively coupled plasma mass spectrometer	29
Table3	Specifications (FT-IR) Fourier transform infrared spectrometer	30
Table4	Specification (XPS) X-ray photoelectron spectroscopy	30
Table5	Specification of the spectrophotometer	31
Table6	Performance test results list by emulsion flow device	31
Table7	Performance test results by the device for each type emulsion effluent flow	32
Table8	Analysis of uranium and uranium concentration of solvent used in the spectrophotometric measurement	33
Table9	Derivation of the counting result of each extractant molar extinction	33

Photos list

Photo1	Emulsion flow equipment	34
Photo2	Samples for analysis	34
Photo3	Emulsion layer of casing processing effluent (medium term)	35
Photo4	Emulsion flow situation of the casing processing effluent	35
Photo5	Emulsion layer of the rotor processing effluent (medium term)	36
Photo6	Emulsion flow situation of the rotor processing effluent	36
Photo7	Emulsion layer of mixing processing effluent (medium term)	37
Photo8	Emulsion flow situation of mixing processing effluent	37
Photo9	Black suspended solids occurrence of casing processing effluent	38
Photo10	Black suspended solids occurrence of rotor processing effluent	38
Photo11	Black suspended solids occurrence of mixing processing effluent	39
Photo12	Filter part black deposits of sulfuric acid waste liquid intake section	39
Photo13	Emulsion flow situation of cleaning effluent	40
Photo14	Emulsion layer of cleaning effluent (medium term)	41
Photo15	Black suspended solids observations by the CCD	42
Photo16	Filter material black deposits observations by the CCD	42
Photo17	Situation of penetration of sulfuric acid and kerosene 5wt%	43

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」と略する）人形峠環境技術センターのウラン濃縮施設において、ウラン濃縮技術開発に使用してきた使用済遠心分離機を保管している。この遠心分離機は原料の六フッ化ウラン（UF<sub>6</sub>）ガスの供給により遠心分離機の部品表面に放射性物質が付着しているため、遠心機処理設備を使用して遠心分離機の分解及び放射性物質の分離処理を実施している。<sup>[1], [2], [3]</sup> 放射性物質を除去した金属製の主な部品は放射性廃棄物として扱う必要のないクリアランス物として再利用する計画である。<sup>[4], [5], [6]</sup>

遠心分離機処理は希硫酸及び水による超音波洗浄等の湿式除染により部品表面へ付着した放射性物質を分離処理するものである。除染処理に伴う放射性廃液を処理することにより中和生成物（澱物）が発生する。澱物処理作業の効率化及び低減化を目的として、放射性廃液よりウランを取り除くことにより澱物中の放射性濃度を低減させる技術の適用性を検討してきた。その一環として、平成 19 年度より原子力基礎工学研究部門との連携協力により、エマルションフロー法（原子力基礎工学研究部門により理論提唱された技術）によるウラン抽出分離技術の開発<sup>[7], [8], [9], [10]</sup>を進めてきている。

本報では、エマルションフロー法を利用した試験装置により、希硫酸及び水の実廃液を用いて実施した実用性確認試験の状況を報告する。

## 2. 遠心分離機の除染廃液の処理

原子力機構人形峠環境技術センターでは、ウラン濃縮施設が平成 13 年 3 月に運転を終了し、廃止措置と放射性廃棄物処理に必要な技術開発を行っている。遠心分離法によるウラン濃縮施設には、パイロットプラント及び原型プラントを含め、ウラン濃縮技術開発に使用した約数万台（約 6,000 ton）の遠心分離機が存在している。これらの遠心分離機は、ウラン濃縮施設の解体に伴い、除染処理され、さらに核不拡散に係わる機微情報消滅のために解体されて、再利用又は処分されることになっている。

パイロットプラントの使用済遠心分離機は、それぞれの部品毎に 5wt%希硫酸中で超音波洗浄により除染を行った後に部材表面に付着した硫酸分を除去するため、回転胴には水中での超音波洗浄と水ジェット洗浄が、ケーシングには水ジェット洗浄が行われる。湿式除染では、5wt%希硫酸を用いた除染工程からの廃液（以下「処理廃液」と略する）、水洗浄工程からの廃液（以下「洗浄廃液」と略する）が発生し、これら二つの廃液は廃液処理工程にて混合されて「混合廃液」となる。廃液処理工程では、混合廃液に凝集剤のポリ塩化アルミニウム（PAC）（Poly Aluminum Chloride,  $[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$ ）等を添加して、凝集沈殿処理が行なわれ、回収した汚泥は脱水機で脱水し、澱物となったものが保管・処分される。一方、凝集沈殿処理工程の上澄み液の「処理水」は、濾過処理して放流することになっている。発生する澱物は、発生量が数 10 ton で、ウラン濃度が数 mgU/g（放射能濃度は、天然ウランの比放射能換算で 100～200 Bq/g 程度）と予想されている。したがって、澱物のウラン濃度を低減して、処分するための作業の簡略化や経費の削減を目指している。

このため、澱物のウラン濃度を低減するため、廃液の段階でウランを分離・回収するエマルションフロー法を利用した液・液抽出法を検討している。

### 3. エマルションフロー法の概要

#### 3.1. エマルションフロー法

エマルションフロー法とは、原子力機構にて独自に開発された新しい抽出・分離手法のことである。簡便・低コスト・省スペース・高操作性などの特徴を有する新規手法として、原子力以外にも、さまざまな産業分野で注目されている。

以下に、エマルションフロー法を利用した装置の概要を記す。図1に、安定なエマルションの発生と高い抽出率を実現できる向流式エマルションフロー装置とその仕組みを示す。有機相は装置内を循環しており、そこに処理対象である廃液を水相として導入する。この方式では、粒子成分が混入しない有機相を微小液滴とし、水相の流れに向かって噴出させる。水相は上部ヘッド部、有機相は下部ヘッド部を通じてポンプにて送液され、下部ヘッド部は液体を微小液滴化する機能を持つ。カラム部で発生したエマルション（乳濁状態）の流れ“エマルションフロー”は、相分離部に到達すると、流速の急激な変化と流れの乱れにより、すみやかに消滅する（フローを利用した強制的な相分離）。

#### 3.2. エマルションフロー法の技術背景と特徴

エマルションフロー法は液・液抽出法の一つである。液・液抽出法とは、水に含まれる目的成分を水と混ざらない有機溶媒（灯油など）に選択的に抽出する方法のことで、液と液の界面を通じての物質移行を促進するために水相と有機相を混合してエマルション（乳濁状態）とした後、混じりあった2つの液相を相分離することで1つの抽出操作が完了する。従来技術では、2液相の混合に攪拌・振とうなどの機械的外力を用いる（たとえば、攪拌式のミキサーセトラー、振とう式のシェーカー）。また、相分離は、ミキサーセトラー等では重力のみにたよるものだが、ミキサーセトラーの発展型である遠心抽出機では、さらに遠心力を利用して相分離を迅速化する（コストはミキサーセトラーよりも大きい）。いずれにせよ、従来技術では、機械的外力を利用することで連続的な液・液抽出を行うが、簡便性・コスト・操作性・コンパクトさの点では不利となる。一方、吸着剤・イオン交換樹脂をカラムに充填して用いるカラム法は、送液のみで目的成分を回収できるので、簡便性・操作性・コンパクトさの点で有利であるが、その反面、大量の水溶液を迅速に処理することができないうえにイオン交換樹脂の処分コスト的な問題もある。

エマルションフロー法は、カラム法と同様に、送液のみで液・液抽出を可能にする点に大きな特徴がある。すなわち、液・液抽出法の利点である大量水溶液の迅速な処理能力に加えて、カラム法の利点である簡便・高操作性・コンパクトさを合わせ持つ画期的な手法である。しかも、効率的な2液相混合に加えて、フローを利用して強制的に2液相分離する仕組みを持っていることから、相分離を重力のみにたよる方法よりも格段に迅速な処理が可能であり、従来の抽出装置（ミキサーセトラーなど）よりも性能が高い。図2に、エマルションフローと従来の抽出装置（ミキサーセトラー、遠心抽出機）を比

較して示す。攪拌・遠心力などの機械的外力を必要としないエマルションフローは、3つの抽出装置の中で最も低いコスト（初期コスト，ランニングコスト，メンテナンスコスト）を実現し，かつ，フローを利用した強制相分離により，迅速さとコンパクトさも合わせ持つ。このように，コスト面だけではなく，性能面でも従来装置を凌駕する。

## 4. 試験項目

パイロットプラントの使用済遠心分離機の除染に使用した処理廃液には、300mM トリノルマルオクチルアミンに 318mM 1-オクタノールと希釈溶剤にケロシン<sup>1</sup> (以下、「TnOA 系抽出剤」と略する) を使用し、除染に使用した洗浄廃液には、10mM ビス(2-エチルヘキシル)リン酸と希釈溶剤にケロシン<sup>1</sup> (以下、「D2EHPA 系抽出剤」と略する) を使用してエマルションフロー装置の性能を確認した。このエマルションフロー装置の性能確認において TnOA 系抽出剤と処理廃液の境界面に黒色の浮遊物が発生したことから、発生した黒色の浮遊物の分析を行った。また、TnOA 系の抽出剤及び D2EHPA 系抽出剤の吸光度を測定し、吸光度による抽出剤の破過モニターとしての適用性を確認した。

### 4.1. エマルションフロー装置による性能確認試験

遠心分離機の除染に使用した実廃液の処理廃液及び洗浄廃液を供試廃液として、エマルションフロー装置のウラン抽出率等の性能を確認した。

### 4.2. 黒色の浮遊物分析

エマルションフロー装置による性能確認試験において、TnOA 系の抽出剤と処理廃液の境界面に発生した黒色の浮遊物の元素分析を行った。また、A 重油や灯油には識別剤としてクマリン<sup>2</sup>、<sup>[1]</sup>が添加されているため、硫酸とケロシンの浸透試験を行い、硫酸ピッチが発生するかを確認した。

### 4.3. 吸光度測定による破過モニターとしての適用性試験

ウラン回収に用いる回収媒体である TnOA 系抽出剤及び D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定を行い、吸光度測定法が回収媒体のウランの破過点を判断するモニター方法として適用するかを判断した。

---

<sup>1</sup> 灯油はケロシンから作られる石油製品であることから、ここでいうケロシンは 1 号灯油のことをいう。

<sup>2</sup> クマリン (coumarin) は化学式  $C_9H_6O_2$  で表される有機化合物。ラク톤の一種。常温では無色の結晶または薄片状の固体

## 5. 試験方法

### 5.1. エマルションフロー装置による性能確認試験

#### 5.1.1. 供試廃液

パイロットプラントの使用済遠心分離機の除染に使用した処理廃液として、回転胴の処理廃液（以下「回転胴処理廃液」と略する）、ケーシングの処理廃液（以下「ケーシング処理廃液」と略する）、その他の部品の処理廃液（以下「その他の金属部品処理廃液」と略する）及びそれらを混合した混合処理廃液（以下「混合処理廃液」と略する）の 4 種類と洗浄廃液 1 種類を供試廃液として使用した。

供試廃液の組成を表 1 に示す。供試廃液の種類ごとに金属成分の含有量が多い順に並べると以下になる。

多い ← 含有量 → 少ない

- ・ケーシング処理廃液：U>Al>Fe>Ni>Mg>Co>Cr>Ti>Mo>Mn>Cu
- ・回転胴処理廃液：Fe>Ni>Co>U>Mo>Ti>Al>Mn>Cr>Cu>Mg
- ・その他の金属部品処理廃液：Fe>Ni>Co>Al>U>Cr>Ti>Mo>Mg>Mn>Cu
- ・混合処理廃液：Fe>Ni>Co>U>Al>Mo>Ti>Cr>Mg>Cu>Mn
- ・洗浄廃液：Mo>Fe>Ni>Mg>Co>Al>Ti>U>Cr>Cu, Mn

処理廃液の中で回転胴処理廃液、その他の部品処理廃液及び混合処理廃液は、Fe, Ni 成分が多く、中でも回転胴処理廃液の Fe 成分は 2066.5mg/l と突出して多くなっており、U 成分も回転胴処理廃液が 100.9mg/l と多い。又、Mg, Cu 及び Mn の含有量は少ない特徴を持った処理廃液である。処理廃液の中のケーシング処理廃液は、U が 65.7mg/l 及び Al が 42.8mg/l と多くなっている一方 Mg, Cu の含有量は極めて少ない処理廃液である。

洗浄廃液は全体的に金属成分の含有量は少ないが、その中でも比較的多いものとして Mo が 3.8mg/l と多く、Fe が 3.4 mg/l 及び Ni が 2.9 mg/l の順となっている。pH 値は処理廃液で 0.29～0.40、洗浄廃液は 2.62 で強酸性となっている。

#### 5.1.2. 抽出剤

平成 19 年度の連携融合研究（以下「連携融合研究」と略する）において、使用した抽出剤は酸濃度が低い pH が 2 以上の洗浄廃液の場合はリン系抽出剤である DEHPA 系抽出剤、酸濃度が高い pH が 2 以下の処理廃液の場合はアミン系抽出剤である TnOA 系抽出剤が効率的かつ、高選択的にウランを抽出することが判明した<sup>[12]</sup>ため、これらの抽出剤を使用した。

#### 5.1.3. 試験機材

連携融合研究での成果として、処理廃液のウラン抽出率は希釈溶剤にイソオクタンを

使用した TnOA 系抽出剤を使用し、抽出装置 1 台でウラン抽出率 90%前後を確認している。また洗浄廃液は希釈溶剤にイソオクタンを使用した DEHPA 系抽出剤を使用し、抽出装置 1 台でウラン抽出率が 85～90%であった。<sup>[12]</sup>

試験に使用するエマルションフロー装置は連携融合研究においてウラン抽出率を確認した装置を使用する。

廃液中の金属成分の元素分析に使用する高周波誘導結合プラズマ質量分析装置（以下「ICP-MS」と略する）は、溶液試料中の多元素の濃度を ppt オーダー（ $1 \times 10^{-12} \text{g-E/ml}$ ）で同時定量することが可能な装置であり、仕様を表 2 に示す。

#### 5.1.4. 試験方法

エマルションフロー装置は、廃水をポンプで送液して装置上部から中央のカラム部の上部ヘッド部から廃液を抽出剤の混合層へテフロン製チューブの側面に空けた微細の数多くの穴から噴出させる。抽出剤は上部の相分離部からポンプにより装置下部を通して中央のカラム部の下部ヘッド部（ガラス製の焼結フィルター）から噴出させる。中央のカラム部でエマルションの流れ（乳濁流）が発生し、ウラン等が抽出剤に抽出され、処理された廃水は下部の相分離部から排水される。

エマルションフロー装置は装置内部が 4 台の抽出装置（カラム）で構成され、抽出装置としては最大 4 台を直列に接続することができる。本試験では、3 台の抽出装置（カラム）をテフロン製チューブにより、直列に接続して性能確認試験を行う。写真 1 はエマルションフロー装置の外観写真を示したものである。また、図 3 にエマルションフロー装置の概略フロー図を示す。

試験に使用する供試廃液の処理量は供試廃液毎にそれぞれ 100ℓ以上とする。試験中はエマルションフロー装置の出口側（排水側）で一定時間ごとに排水試料を採取し、金属成分の定量結果によりウラン抽出率を求める。また、目視によりエマルション生成状況を観察する。

## 5.2. 黒色の浮遊物分析

### 5.2.1. 分析条件

#### 1) サンプル分析

分析に使用するサンプルは以下のものとする。（写真 2）

サンプル 1：性能確認試験においてケーシング処理時に発生した黒色の浮遊物と廃液資料の中から採取した固形物試料

サンプル 2：性能確認試験においてケーシング処理時に発生した黒色の浮遊物と廃液資料の中から採取した固形物の上部試料

サンプル 3：性能確認試験においてケーシング処理時に発生した黒色の浮遊物と廃液資料の中から採取した固形物の下部試料

サンプル 4：未使用 TnOA 系抽出剤試料

サンプル 5：ケーシング処理廃液（5wt%希硫酸）

サンプル 6：遠心分離機の軸受油（高性能フッ素オイル）

サンプル 7：供試廃液側の吸入部フィルター（ガラス製の焼結フィルター）に付着した  
 黒色の付着物試料

### 5.2.2. 分析機材

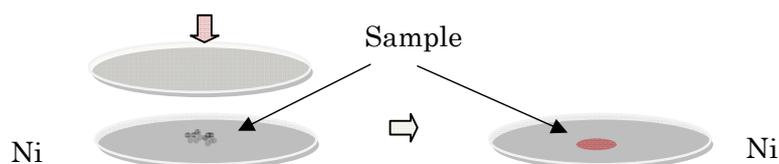
元素の定性分析には表 3 のフーリエ変換赤外分光分析装置（FT-IR）（以下、「FT-IR」と略する）及び表 4 の X 線光電子分光分析装置（XPS）（以下、「XPS」と略する）を使用した。

### 5.2.3. 分析方法

#### 1) サンプル分析

- ① サンプル 1 の黒色の浮遊物の固形物をピペットで濾紙に採取し、その上から未使用の TnOA 系抽出剤を濾紙によく吸収させ、黒色の浮遊物をメタノールで溶いて、IR カードに塗布した状態で FT-IR により IR スペクトルを測定した。
- ② サンプル 2～サンプル 6 を上記の方法と同様の方法で未使用の TnOA 系抽出剤、未使用のケーシング処理廃液及び採取した黒色浮遊物サンプルの IR スペクトルを測定した。
- ③ サンプル 1 の黒色の浮遊物とサンプル 7 の黒色の付着物とフィルター材（ガラス）をニッケル板に圧縮固定し、XPS によるアルゴンエッチング 5 秒を行った表面を定性分析し、CCD により表面を観察した。

（成 形）採取した試料は、乾燥した後 Ni 板に挟み油圧プレスで加圧成型



（前処理）試料表面を清浄化させるため Ar イオンによる 5sec エッチング

（観 察）XPS（X 線光電子分光分析装置）による分析及び CCD 観察

#### 2) 硫酸ピッチの発生確認

- ① 未使用の 1 号灯油 25ml 及び未使用の 5wt%硫酸 25ml を分液ロートに入れて、一定時間よく攪拌させ、黒色の浮遊物が発生するかを目視で確認した。
- ② 未使用のケロシン 25ml 及び 5wt%硫酸 25ml を分液ロートに入れて、一定時間よく攪拌させ、黒色の浮遊物が発生するかを目視で確認した。

### 5.3. 吸光度測定による破過モニターとしての適用性試験

#### 5.3.1. 試験条件

ウラン回収に用いる回収媒体である TnOA 系抽出剤及び D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定を行った。使用したウラン吸着済の TnOA 系抽出剤及び D2EHPA 系抽出剤は、エマルジョンフロー装置の性能確認試験で使用したものである。

#### 5.3.2. 試験機材

吸光度測定に使用する分光光度計の仕様を表 5 に示す。

#### 5.3.3. 試験方法

##### 1) TnOA 系抽出剤の吸光度測定

- ①ウラン吸着済の TnOA 系抽出剤に未使用の TnOA 系抽出剤で 2 倍, 3 倍及び 4 倍に希釈したサンプル（以下「使用済 TnOA 系抽出剤」と略する）を 1cm 角の石英セルへ充填し、吸光度 ( $D$ ) を測定した。
- ②TnOA 系抽出剤に吸着した金属成分 (Fe 及び Mo 等) の吸光度 ( $D$ ) への妨害影響を評価するために、未使用の TnOA 系抽出剤と調整したウラン溶液を良く攪拌し、ウランを吸着させた後、未使用の TnOA 系抽出剤で 2 倍, 4 倍及び 10 倍に希釈したサンプル（以下「未使用 TnOA 系抽出剤」と略する）を 1cm 角の石英セルへ充填し、吸光度 ( $D$ ) を測定した。
- ③①の試験で使用済 TnOA 系抽出剤のウラン濃度が低く、吸光度 ( $D$ ) にピークを示さない場合は、調整したウラン溶液と使用済 TnOA 系抽出剤を良く攪拌し、ウランを吸着させた後、未使用の TnOA 系抽出剤で 2 倍, 4 倍及び 10 倍に希釈したサンプル（以下「ウラン再吸着 TnOA 系抽出剤」と略する）を 1cm 角の石英セルへ充填し、吸光度 ( $D$ ) を測定した。

##### 2) D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定

- ①ウラン吸着済の D2EHPA 系抽出剤に TnOA 系抽出剤と同様に未使用の D2EHPA 系抽出剤で 2 倍, 3 倍及び 4 倍に希釈したサンプル（以下「使用済 D2EHPA 系抽出剤」と略する）を 1cm 角の石英セルへ充填し、吸光度 ( $D$ ) を測定した。
- ②TnOA 系抽出剤と同様に D2EHPA 系抽出剤に未使用の D2EHPA 系抽出剤と調整したウラン溶液を良く振ってウランを吸着させた後、未使用の D2EHPA 系抽出剤で 2 倍, 4 倍及び 10 倍に希釈したサンプル（以下「未使用 D2EHPA 系抽出剤」と略する）を 1cm 角の石英セルへ充填し、吸光度 ( $D$ ) を測定した。
- ③①の試験で使用済 D2EHPA 系抽出剤のウラン濃度が低く、吸光度 ( $D$ ) にピークを示さない場合は、調整したウラン溶液と使用済 D2EHPA 系抽出剤を良く振ってウランを吸着させた後、未使用の D2EHPA 系抽出剤で 2 倍, 4 倍及び 10 倍に希釈したサンプル（以下「ウラン再吸着 D2EHPA 系抽出剤」と略する）を 1cm 角の石英セルへ充填し、吸光度 ( $D$ ) を測定した。

3) 抽出剤中のウラン濃度測定

- ①各抽出剤をピペットにより 0.1ml ほど白金ビーカーへ取り，白金ビーカーをガスバナーで加熱し，灰化させる。
- ②白金ビーカーへ純水 2ml と硝酸（68%） 1ml を加え常温で灰化物を溶解させる。
- ③溶解液を 50ml フラスコにメスアップし，それぞれの溶液に合った倍率で希釈を行った後，検量線法（スタンダード： $1 \times 10^{-8} \text{g-U/ml}$ ,  $2 \times 10^{-8} \text{g-U/ml}$ ）を用いた ICP-MS によるウランの定量分析を行う。

## 6. 試験結果

### 6.1. エマルションフロー装置による性能確認試験

#### 6.1.1. エマルションフロー装置のウラン抽出率

エマルションフロー装置の性能確認におけるウラン抽出率は、水相と有機相濃度に基づく次式により求めた。<sup>[13]</sup>

$$\text{抽出率 (\%)} = \{(Co - Cc) / Co\} \times 100 \quad (1)$$

ここで、

$Co$  : 抽出前の初期の水相濃度

$Cc$  : 抽出後の排水中の濃度

#### 1) ウラン抽出率

パイロットプラントの使用済遠心分離機の除染に使用した実廃液でのウラン抽出率の結果については、TnOA系抽出剤を用いた処理廃液では、抽出剤の破過<sup>3</sup>によるウラン抽出率の低下がみられた混合処理廃液を除き、回転胴処理廃液が最大95.7%であり、ケーシング処理廃液及びその他の金属部品処理廃液は90%前後の抽出率であった。平均抽出率はその他の金属部品処理廃液が90.9%と高く、その他の処理廃液も全体的に87.5%以上であった。

D2EHPA系抽出剤を用いた洗浄廃液のウラン抽出率は試験初期に条件設定のためウラン抽出率の低下がみられたものの最大98.3%であり、平均抽出率も88.4%であった。

(図4～図6, 表6, 表7)

混合処理廃液で確認されたTnOA系抽出剤のウラン抽出率の低下については、ウラン破過によるものである。この時のTnOA系抽出剤の処理量が350ℓ当たりでウラン濃度が約36g-Uで横ばいになっていることから、この時がウランの破過点と思われる。これにより、TnOA系抽出剤の1mol当たりの最大ウラン吸着量は約18g-U/mol-TnOAと思われる。(図7)

#### 6.1.2. 目視観察状況

ケーシング処理廃液、回転胴処理廃液及びその他の金属部品処理廃液はエマルションの粒度は粗かった。また、混合処理廃液はエマルションの粒度はやや細かく、処理廃液全般でエマルション生成範囲は狭い状態であった。(写真3～写真8, 表6)

処理廃液全般でTnOA系抽出剤はウラン抽出が進行するにつれて各カラムの抽出剤

<sup>3</sup> ある経過時間の後に、抽出剤が飽和して抽出能力をなくし、ウランがそのまま抽出剤を通過する状態をいう。

が黄色の着色が始まり、その後、徐々に濃くなり、抽出剤の境界面には黒色の浮遊物が発生した。また、処理廃液吸入部のフィルター部にも付着した黒色の付着物を確認することができた。(写真 9～写真 12)

洗浄廃液は、処理廃液に比べエマルションの粒度は細かく、エマルション生成範囲も処理廃液の試験時に比べ広い状態であった。D2EHPA 系抽出剤の境界面にはこれまでの処理廃液の試験時に発生していた黒色の浮遊物は確認されなかったが、カラムの底部に細かい粒状の沈殿物が溜まった。各カラムの抽出剤の色は試験開始前後で殆ど変化は見られなかった。(写真 13, 写真 14)

## 6.2. 黒色の浮遊物分析

### 6.2.1. 黒色の浮遊物分析結果

サンプル 1～サンプル 6 を FT-IR 分析した結果、図 8 に示すように IR スペクトルでは、サンプル 6 のフォンブリンオイルとサンプル 1 の黒色の浮遊物のスペクトルには共通な点は見られなかった。また、サンプル 5 のケーシング処理廃液とサンプル 1 の黒色の浮遊物も同様にスペクトルに共通な点は見られなかった。サンプル 1 の黒色の浮遊物とサンプル 4 の未使用 TnOA 系抽出剤においては、一部のスペクトルに同様のピークが確認された。

サンプル 1 の黒色の浮遊物及びサンプル 7 の黒色の付着物の XPS Wide-Scan (定性) 分析結果から見ると、黒色の浮遊物には試料板に含まれる Ni を除いた C 及び F が検出され、黒色残留物 (フィルター材含) には試料板及びフィルター材に含まれる Ni 及び Si を除いた C 及び F が検出されたが、ケーシング処理廃液に含まれる Al, U 及び S は、検出されなかった。(図 9, 図 10)

サンプル 1 の黒色の浮遊物及びサンプル 7 の黒色の付着物の XPS ナローズキャンの光電子エネルギースペクトルの分析結果から見ると、黒色の浮遊物及びフィルター材は、同様な元素及び化学形態物の C, CF<sub>2</sub> 及び CF<sub>3</sub> によって組成しているものと推定される。また、黒色の浮遊物とフィルター材の C に対する CF<sub>2</sub> 及び CF<sub>3</sub> の強度比は、黒色の浮遊物が大きくフィルター材が小さいことが判る。(図 11, 図 12)

サンプル 1 の黒色の浮遊物及びサンプル 7 の黒色の付着物を CCD による外観観察を行ったが、外観上の類似点は観察できなかった。(写真 15, 写真 16)

### 6.2.2. 硫酸ピッチの発生確認

写真 17 のように 1 号灯油及びケロシンと 5wt%硫酸との 7 時間浸透では、浸透前と浸透後の分液ロート内の 1 号灯油及びケロシンの状態は透明色で変化は見られず、黒色の浮遊物も発生しなかった。

## 6.3. 吸光度測定による破過モニターとしての適用性試験

### 6.3.1. TnOA 系抽出剤の吸光度測定

使用済 TnOA 系抽出剤及び未使用 TnOA 系抽出剤の吸光度測定結果を図 13 及び図 14

に示す。使用済 TnOA 系抽出剤及び未使用 TnOA 系抽出剤の試料はともに 422nm, 432nm, 445nm, 459nm, 474nm の波長に明瞭なウラン濃度に比例した吸光度 ( $D$ ) のピークが観測された。

希釈なし(1倍)の試料のウラン濃度(重量濃度)は、使用済 TnOA 系抽出剤が 2.04gU/l, 未使用 TnOA 系抽出剤 10.04gU/l であった。(表 8)

### 6.3.2. D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定

使用済 D2EHPA 系抽出剤の試料はウラン濃度が低く、吸光度 ( $D$ ) のピークを示さないため、ウラン再吸着 D2EHPA 系抽出剤の試料を用いて吸光度測定を行った。ウラン再吸着 D2EHPA 系抽出剤は、図 15 に示すように、希釈なし(1倍)の試料に 409nm, 422nm, 435nm の波長に少しブロードな吸光度 ( $D$ ) のピークが観察された。また、ウラン再吸着 D2EHPA 系抽出剤を希釈した試料は、413nm, 425nm, 438nm の波長に少しブロードなウラン濃度に比例した吸光度 ( $D$ ) のピークが観察された。

未使用 D2EHPA 系抽出剤の希釈なし(1倍)の試料は、図 16 に示すように、409nm, 421nm, 435nm の波長に少しブロードな吸光度 ( $D$ ) のピークが観察された。また、希釈した試料は、使用済 D2EHPA 系抽出剤と同様なスペクトルピークが観察された。

希釈なし(1倍)の試料のウラン濃度(重量濃度)は、ウラン再吸着 D2EHPA 系抽出剤が 0.86gU/l, 未使用 D2EHPA 系抽出剤 1.36gU/l であった。(表 8)

### 6.3.3. ウランの mol 吸光係数の導出

TnOA 系抽出剤と D2EHPA 系抽出剤の mol 吸光係数 ( $\epsilon$ ) については、各抽出剤の吸光度 ( $D$ ) を測定することで mol 吸光係数を導出する。

光束が吸収セル中の抽出剤に入射する場合、抽出剤に入射する前の入射光強さを  $I_0$ , 抽出剤から光がそのまま透過したときの透過光の強さを  $I$  として、反射などによる光の方向変更分は無視できるほど小さいと仮定すれば、入射光のセル中の物質による減衰は光の吸収に基づくものとなるので、ランベルト・ベール (Lambert-Beer) の法則<sup>[14]</sup>に従うものと考えられている。このことから、TnOA 系抽出剤及び D2EHPA 系抽出剤の mol 吸光係数を次式から導出する。

$$D \equiv \log_{10} (I_0 / I) = \epsilon l c \quad (2)$$

ここで、

$D$  : 吸光度 (absorbance  $\doteq$  Abs)

$I_0$  : 入射光強さ

$I$  : 透過光の強さ

$\epsilon$  : mol 吸光係数

$l$  : 抽出剤の厚さ (cm)

$c$  : 抽出剤のウラン濃度 (mol/l)

各抽出剤の吸光度 ( $D$ ) とウラン濃度の関係を図 17 から図 18 に示す。なお、波長はピークが高く観測された TnOA 系抽出剤では 445nm の測定結果を用いた。また、D2EHPA 系抽出剤では 425nm の吸光度 ( $D$ ) の測定結果を用いた。

TnOA 系抽出剤の吸光度 ( $D$ ) とウラン濃度の関係は、鉄等の金属成分を吸着した抽出剤も含めて全ての測定結果で 0 点を通る直線で近似できることから、ウラン濃度が  $2 \times 10^{-3}$  mol/l から  $4 \times 10^{-2}$  mol/l の範囲で金属成分の影響を受けることなく、ランベルト・ベールの法則に従うものと考えられることから、各抽出剤の吸光度 ( $D$ ) とウラン濃度の近似式で得られる吸光度 ( $D$ ) 及びウラン濃度をランベルト・ベールの法則より、ウランの mol 吸光係数を求めた。(表 9)

これにより、TnOA 系抽出剤と D2EHPA 系抽出剤の mol 吸光係数は、TnOA 系抽出剤が 12.1、D2EHPA 系抽出剤が 5.0 を導出することができた。

## 7. 考察

### 7.1. 黒色の浮遊物の発生要因の推定

黒色の浮遊物は、XPS 分析結果からフィルター材でトラップした物との組成物が一致したことから、硫酸廃液から発生したものと考えられる。

遠心分離機には高性能フッ素オイルを使用している。高性能フッ素オイルは、 $CF_2$  及び  $CF_3$  などのフッ素化合物で構成されていることが構造式で示されており、XPS 分析結果でも同化合物が検出されているため、黒色の浮遊物に高性能フッ素オイルが含まれる可能性がある。

また、黒色の浮遊物とケーシング処理廃液の FI-IR スペクトルに共通点あまり見られないことと、黒色の浮遊物とフィルター材の XPS 分析結果の C に対する  $CF_2$  及び  $CF_3$  の強度比に大きな差異があるため、TnOA 系抽出剤と処理廃液の反応により発生することも否定できない。

### 7.2. ウラン抽出率

連携融合研究で確認したウラン抽出率は処理廃液の場合、抽出装置 1 台で、溶液にイソオクタンを使用した TnOA 系抽出剤で 90%前後であった。また、洗浄廃液では溶液にイソオクタンを使用した DEHPA 系抽出剤で 85~90%を確認している。今回、使用済遠心分離機の除染に使用した実廃液によるホットでのウラン抽出試験は抽出装置を 3 台直列に接続して試験を行っているため、試験で得られたウラン抽出率は 3 台分のウラン抽出率である。

このため 1 台でのウラン抽出率を単純にバッチ抽出の式(3)の抽出式<sup>[5]</sup>から推定すると、処理廃液は抽出剤の破過によるウラン抽出率の低下が見られた混合処理廃液を除くと最大ウラン抽出率は 59.4%~69.7%であり、洗浄廃液の最大ウラン抽出率は 74.5%であったと推定される。

全ての廃液において、連携融合研究で確認したウラン抽出率を満足することができなかった。原因としては、連携融合研究で確認した廃液に比べ実廃液の水素イオン濃度が低いことや、有機相と水相の界面に黒色の浮遊物が発生したことにより、エマルション生成を阻害したため、ウラン抽出に影響を与えたものと思われる。(図 19~図 21)

$$w_n = w (v/s + v)^n \quad (3)$$

$w_n$  :  $n$ 回抽出後の溶質の量 (g)

$w$  : 溶質の量 (g)

$v$  : 溶液の量 (ml)

$s$  : 溶媒の量 (ml)

$n$  : 抽出回数

## 8. 結論

技術開発を進めているエマルションフロー法を利用した液・液抽出法による廃液中のウラン抽出について、処理廃液及び洗浄廃液を用いて性能が得られるかを確認した。その結果、全ての廃液において、連携融合研究で確認したウラン抽出率を満足することができなかった。原因としては、連携融合研究で確認した廃液に比べ実廃液の水素イオン濃度が低かったことや、有機相と水相の界面に黒色の浮遊物が発生したことにより、エマルション生成を阻害したため、ウラン抽出に影響を与えたものと思われる。しかし、抽出装置を3台直列に接続した抽出率が90%前後を観測したことから、エマルションフロー法によるウラン抽出は、澱物処理の削減や澱物のトレンチ処分への可能性を十分に示したものと考えられる。

TnOA系抽出剤のウラン抽出で発生した黒色の浮遊物はXPSの分析結果から構成元素がC及びF、形態はC、CF<sub>2</sub>及びCF<sub>3</sub>と同一であることが判った。

発生原因として、遠心分離機処理廃液に含まれる微量の高性能フッ素オイルの可能性が高いこと、また、連携融合研究では黒色の浮遊物の発生はなかったことから、連携融合研究では溶液にケロシン（灯油）を使用していなかったため、灯油に含まれる識別剤（クマリン）と硫酸廃液の反応により発生することも否定できない。このため、ビーカー試験等により確認する必要がある。また、遠心分離機処理廃液からのウラン抽出は、廃液処理に伴うスラッジの廃棄区分軽減による経済効果や廃液処理条件の軽減による負荷軽減が期待されることから、今回の試験結果に基づく効果評価や廃液性状等に適した条件の検討等によるウラン抽出率の向上が必要である。

エマルションフローによる遠心分離機処理廃液からのウラン回収に用いる回収媒体の抽出剤（有機溶媒）のウランの吸光度は、抽出剤中に同時に吸着された金属成分の影響を受けることなく、ランベルト・ベールの法則に従いmol吸光係数を導出できたことから、吸光度測定法により回収媒体の破過点を判断するモニター方法として適用性があるものと判断できる。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会：「平成 14 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書，評価課題「人形峠環境技術センターにおける環境保全技術開発—製錬転換施設とウラン濃縮施設における廃止措置及び放射性廃棄物処理に関する技術開発—」」、JNC TN1440 2003-001（2003）。
- [2] 遠藤裕治，片岡忍，山中俊広，美田豊：「ウラン濃縮プラントにおける遠心機処理技術の開発—放射性廃棄物減容技術の開発—」，サイクル機構技報，No.7，pp.31-37（2006）。
- [3] 美田豊，遠藤裕治，山中俊広，大橋祐介：「ウラン濃縮遠心分離機の化学除染法の開発」，サイクル機構技報，No.14，pp.85-91（2002）。
- [4] 安念外典，石森有，江間晃，高信修，長安孝明，美田豊，“NINGYO-TOGE 核燃料施設廃止措置と廃棄物処理技術の体系化を目指して!，” JNC TN6400 2003-001，核燃料サイクル開発機構（2003）。
- [5] 遠藤裕治，片岡忍，山中俊広，美田豊，“ウラン濃縮プラントにおける遠心機処理技術の開発，” サイクル機構技報，No.7，pp.31-37，核燃料サイクル開発機構（2000）。
- [6] 原子力安全委員会，“ウラン取扱施設におけるクリアランスレベルについて(了承)”，（2009）。
- [7] N. Yanase, H. Naganawa, T. Nagano, J. Noro, “New apparatus for liquid-liquid extraction, “Emulsion Flow” extractor,” Analytical Sciences, 27, pp.171-176 (2011).
- [8] N. Yanase, H. Naganawa, T. Nagano, J. Noro, “Counter current “Emulsion Flow” extractor for continuous liquid-liquid extraction from suspended solutions,” Analytical Sciences, 27, pp.325-328 (2011).
- [9] 長縄弘親，柳瀬信之，永野哲志：「エマルションフローを利用した連続液-液抽出法とその装置」，特願 2007-136496（2007）。
- [10] 三田村久吉，長縄弘親，永野哲志 他：「人形峠模擬ウラン廃液からのウランの抽出分離」，JAEA-Research 2008-113（2009）,27p.
- [11] 菅谷和寿：「不正軽油製造に伴う廃棄物中のクマリンの定量」，Bunseki Kagaku Vol.59, No.5, pp.405-409（2010）。
- [12] 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究部門：私信。
- [13] 田中元治，赤岩英夫：「溶媒抽出化学」，裳華房，p.13（2001）。
- [14] 高田芳矩：「吸光光度法の実際」，講談社，pp.1-7（1982）。
- [15] 田中元治：「溶媒抽出」，共立出版，p.7（1977）。

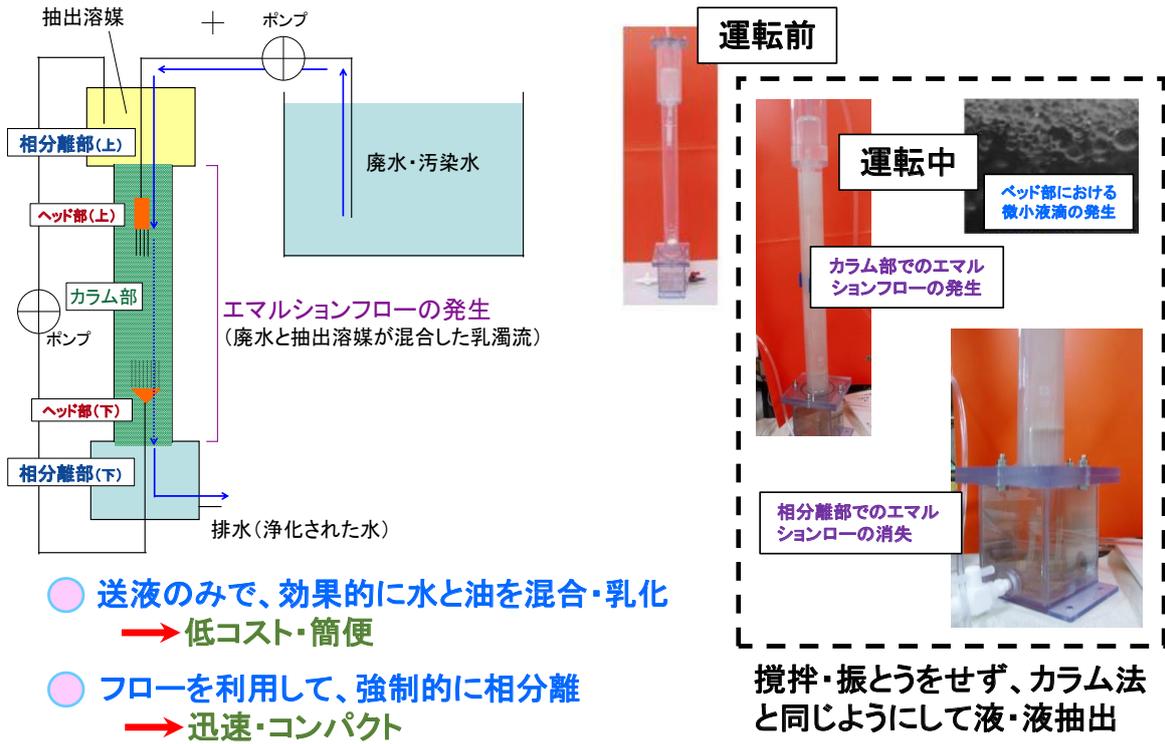


図1 エマルションフロー装置とその仕組み  
(Figure1 Emulsion flow device and how it works)

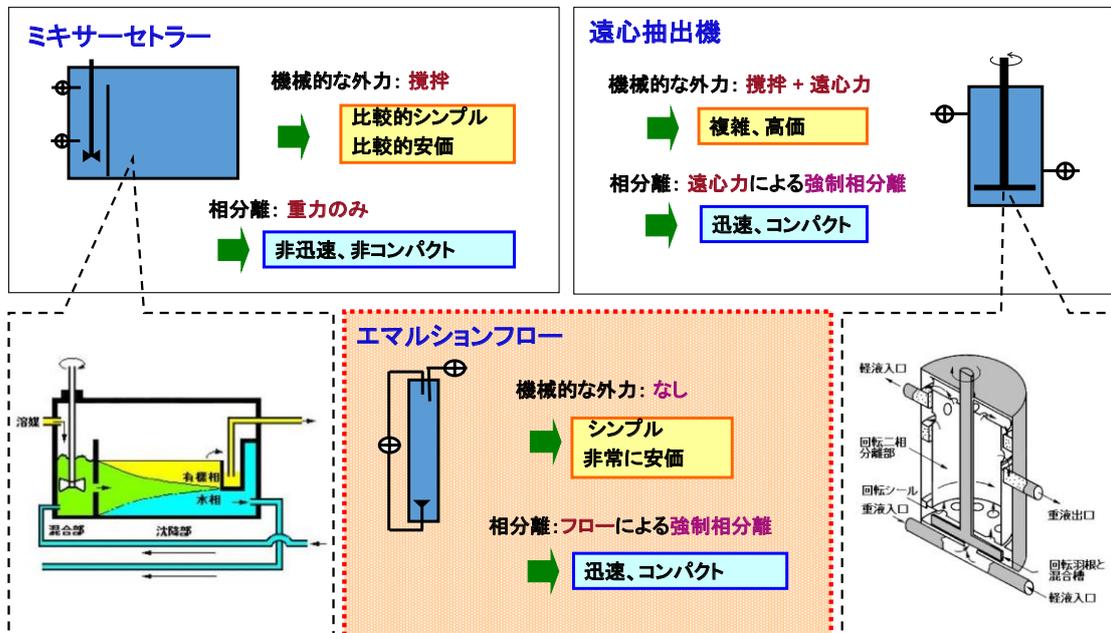


図2 エマルションフローと従来の抽出装置との比較  
(Figure2 Comparison of the emulsion flow and conventional extraction equipment)

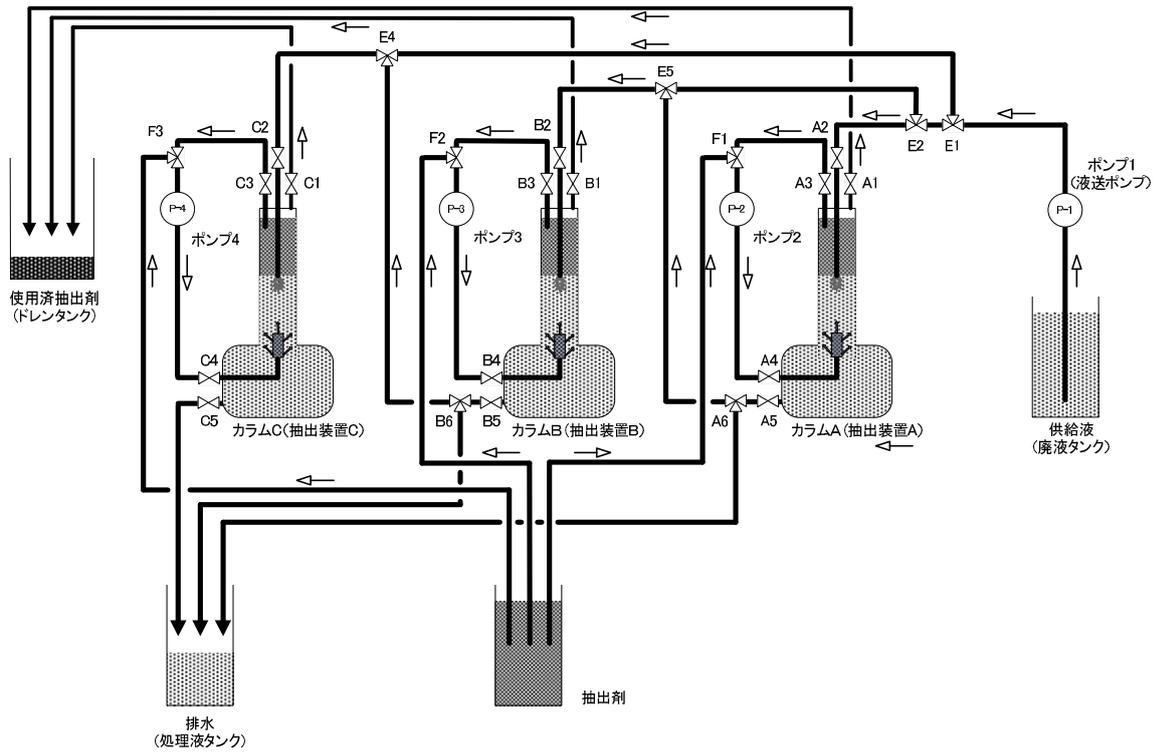


図3 エマルションフロー装置による性能確認試験フロー  
 (Figure3 Performance check test flow by emulsion flow equipment)

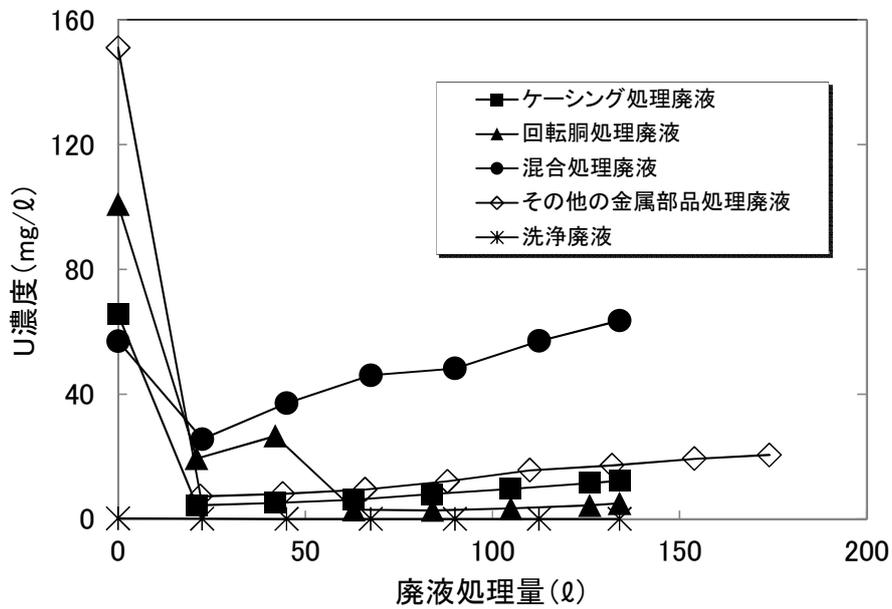


図4 連続抽出中の各廃液のウラン濃度推移  
 (Figure4 Uranium concentration transition of each effluent in continuous extraction)

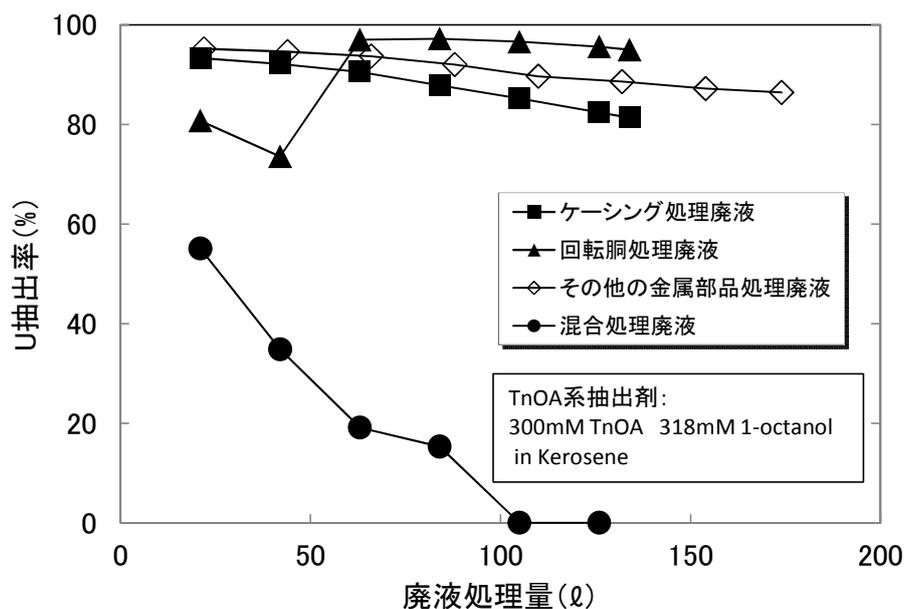


図 5 連続抽出中の TnOA 系抽出剤による各廃液のウラン抽出率  
(Figure5 Uranium extraction rate of each effluent by TnOA group extraction agent in the continuous extraction)

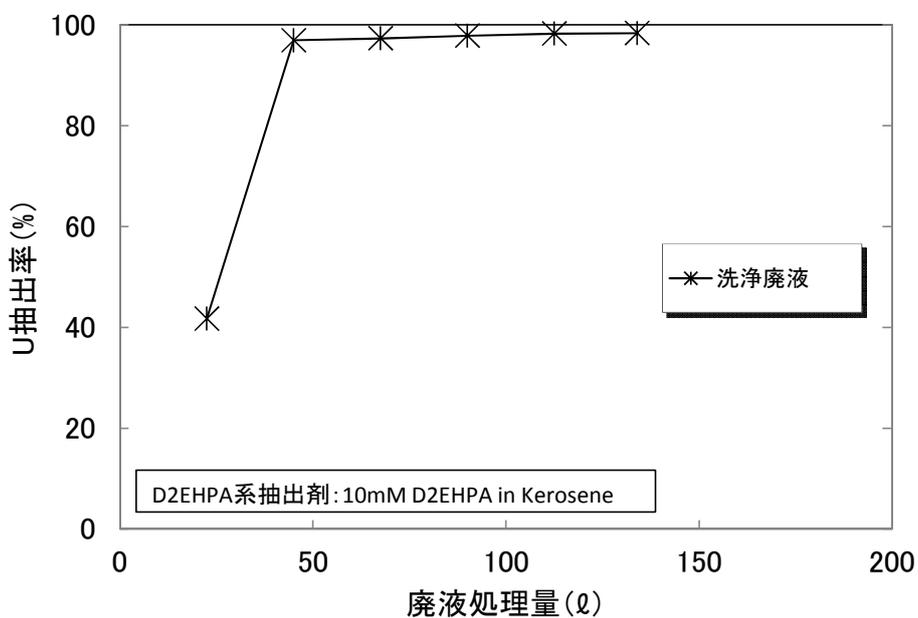
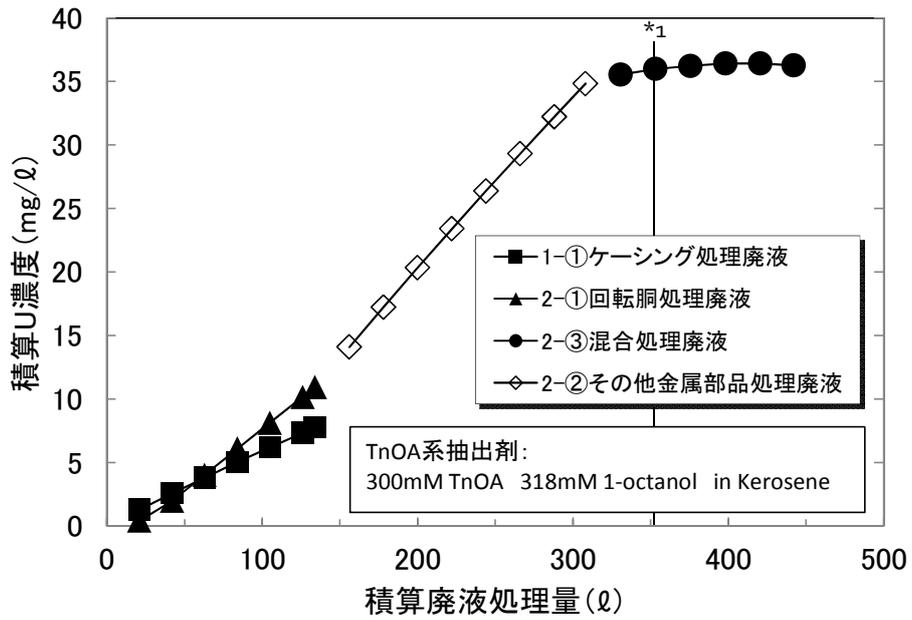


図 6 連続抽出中の D2EHPA 系抽出剤による混合洗浄廃液のウラン抽出率  
(Figure6 Uranium extraction rate of mixing cleaning effluent by D2EHPA group extraction agent in the continuous extraction)



\*1 : 36g-U/2.0mol-TnOA  $\doteq$  18g-U/mol-TnOA

図7 連続抽出中の TnOA 系抽出剤のウラン濃度推移

(Figure7 Uranium concentration transition of TnOA group extraction agent in the continuous extraction)

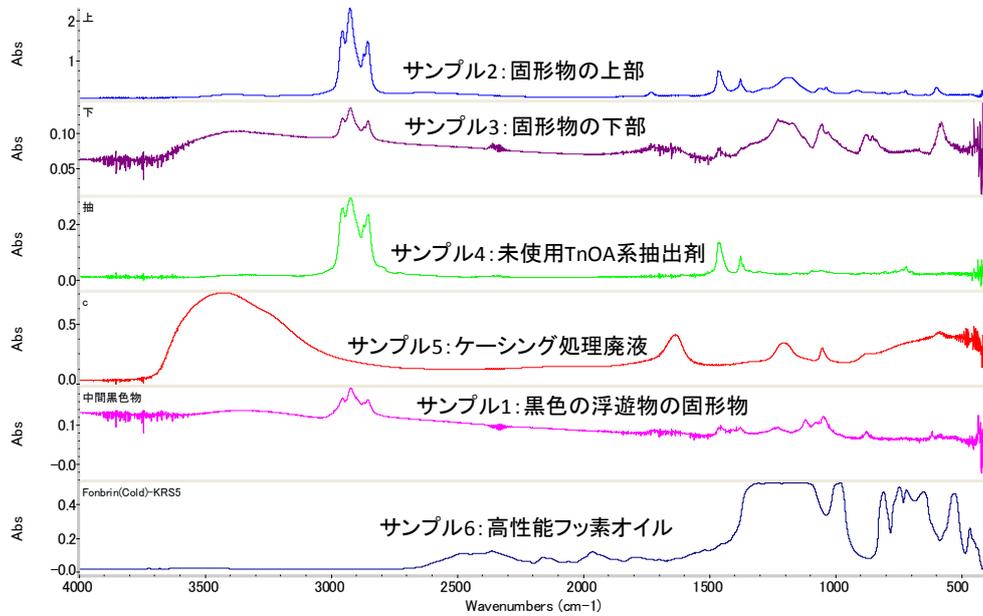


図8 FT-IR でのスペクトル分析結果

(Figure8 Spectrum-analysis result in FT-IR)

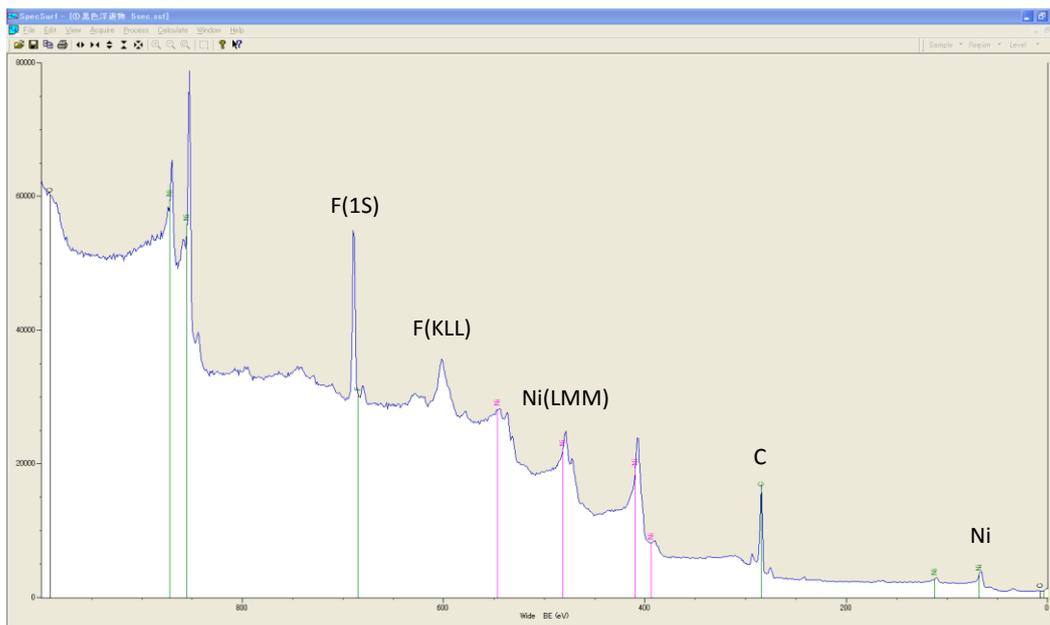


図 9 黒色の浮遊物の XPS Wide-Scan (定性) 分析結果  
 (Figure9 XPS Wide-Scan analysis of suspended solids of black (qualitative))

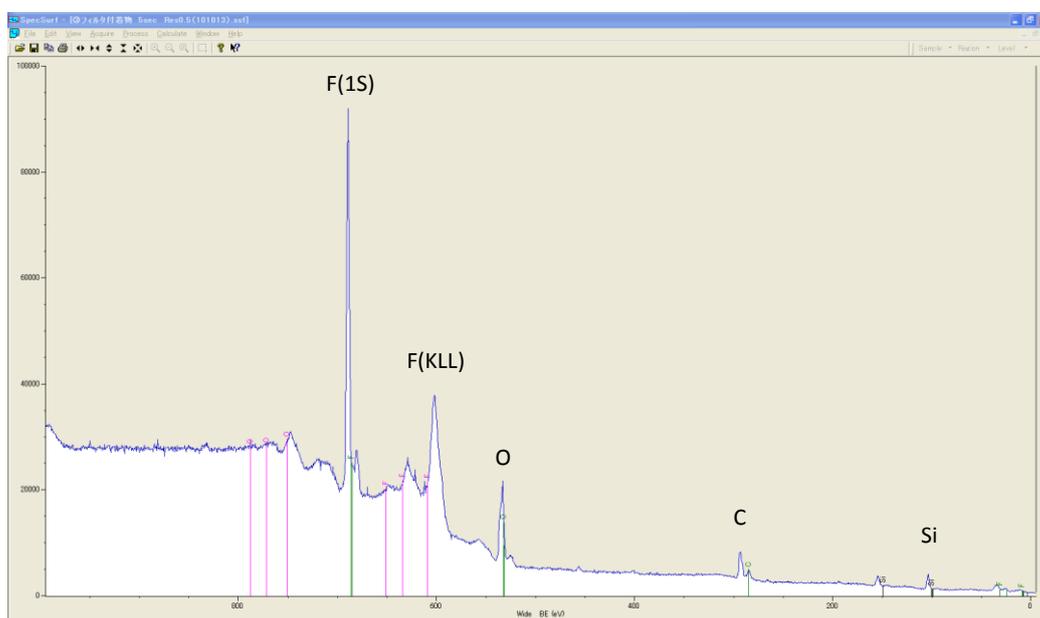


図 10 ガラス製の焼結フィルター材に付着した黒色の付着物の XPS Wide-Scan (定性) 分析結果  
 (Figure10 XPS Wide-Scan of black deposits adhering to the material sintered glass filter analysis (qualitative))

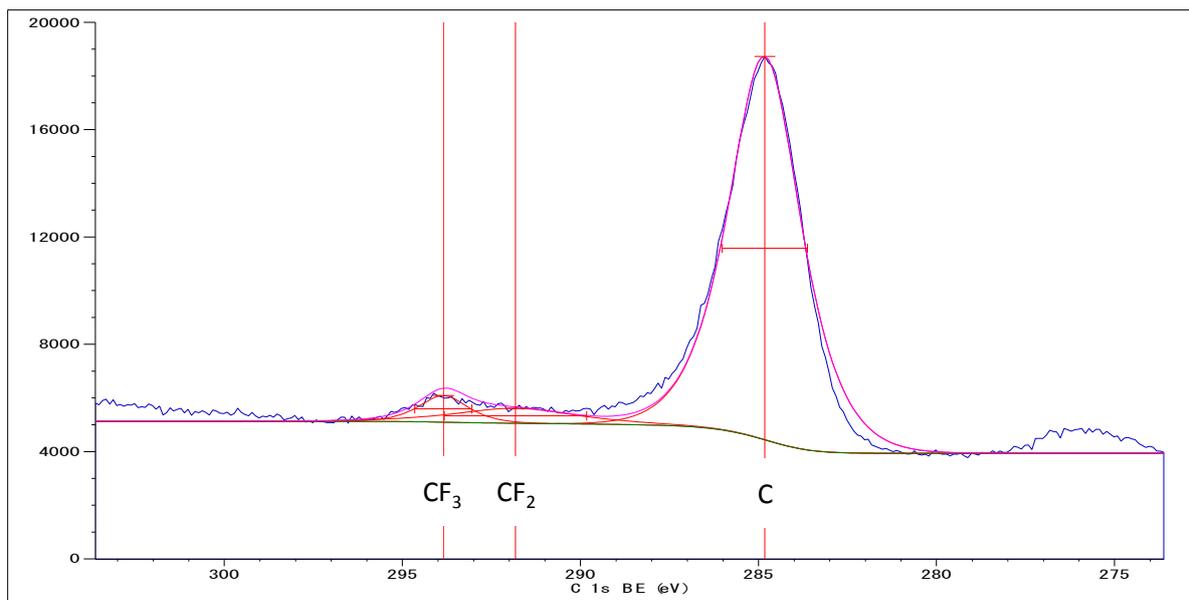


図 11 XPS ナROWSキャンによる黒色の浮遊物の分析結果  
 (Figure11 Analysis of suspended solids of black by XPS narrow scan)

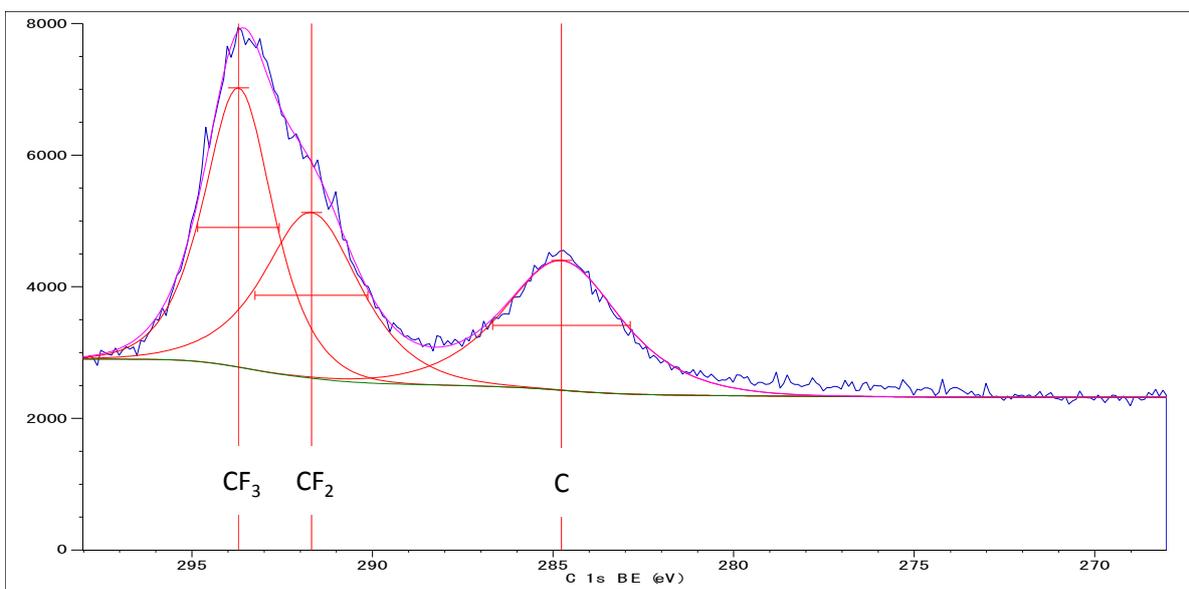


図 12 XPS ナROWSキャンによるガラス製の焼結フィルター材に付着した黒色の付着物の分析結果  
 (Figure12 XPS narrow scan analysis result of black adhesion thing adhering to glass sintered filter material)

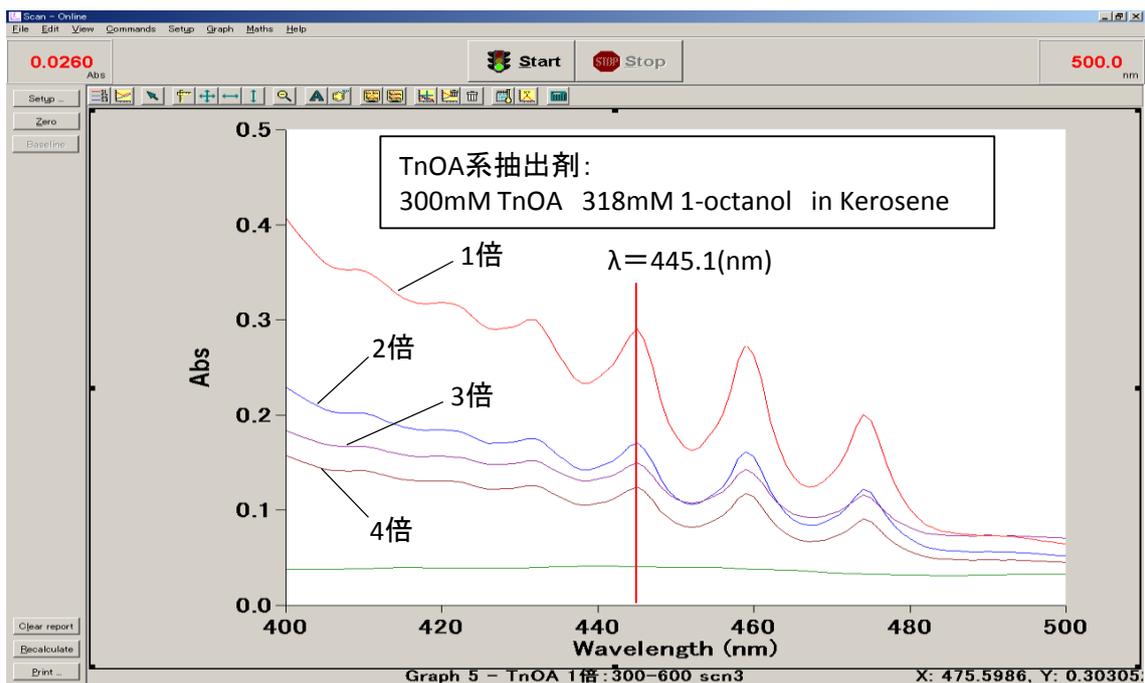


図 13 使用済 TnOA 系抽出剤の吸光度測定結果

(Figure13 Absorbance measurement result of used TnOA group extract agent)

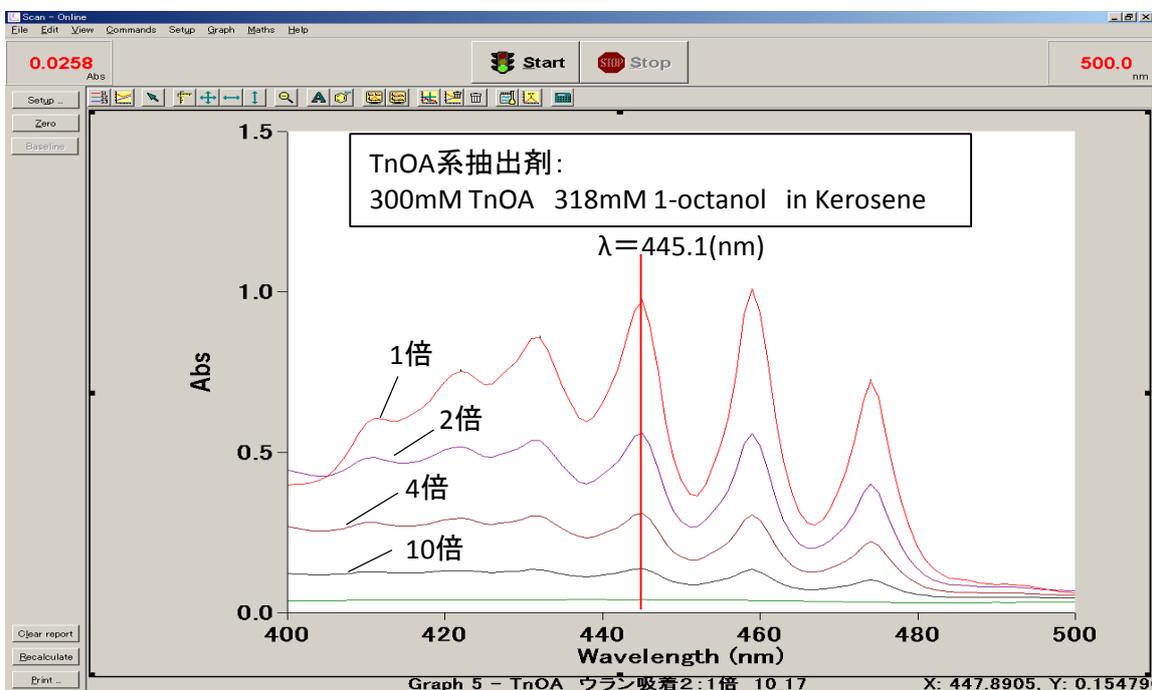


図 14 未使用 TnOA 系抽出剤の吸光度測定結果

(Figure14 Absorbance measurement result of new TnOA group extract agent)

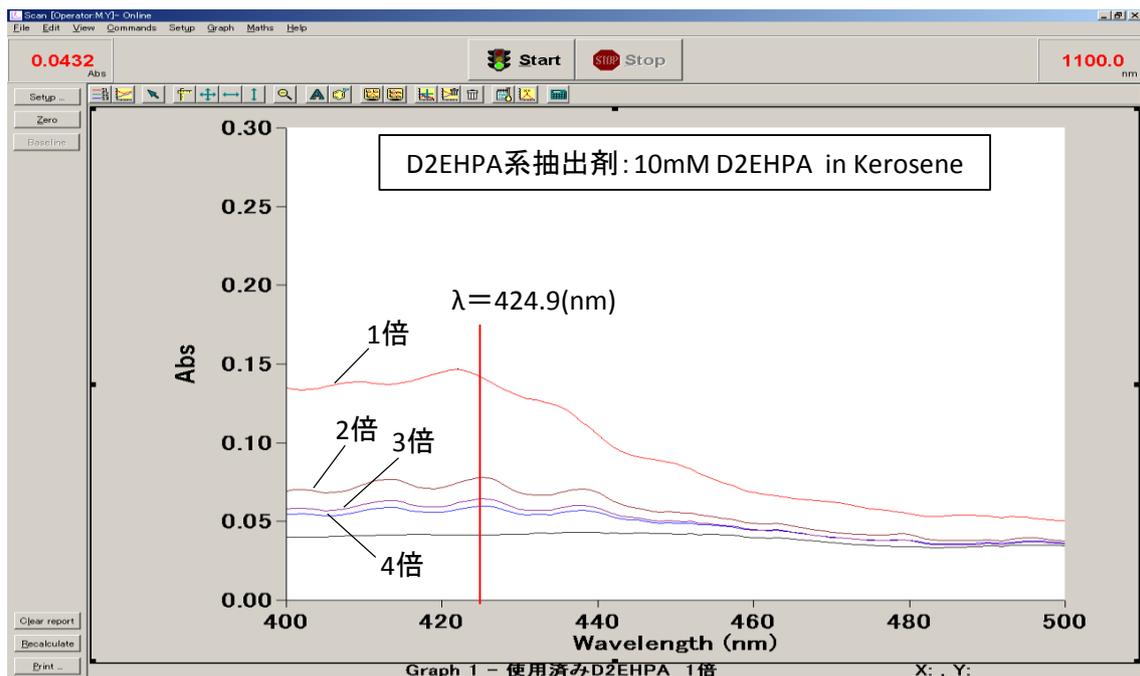


図 15 使用済 D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定結果

(Figure15 Absorbance measurement result of used D2EHPA group extract agent)

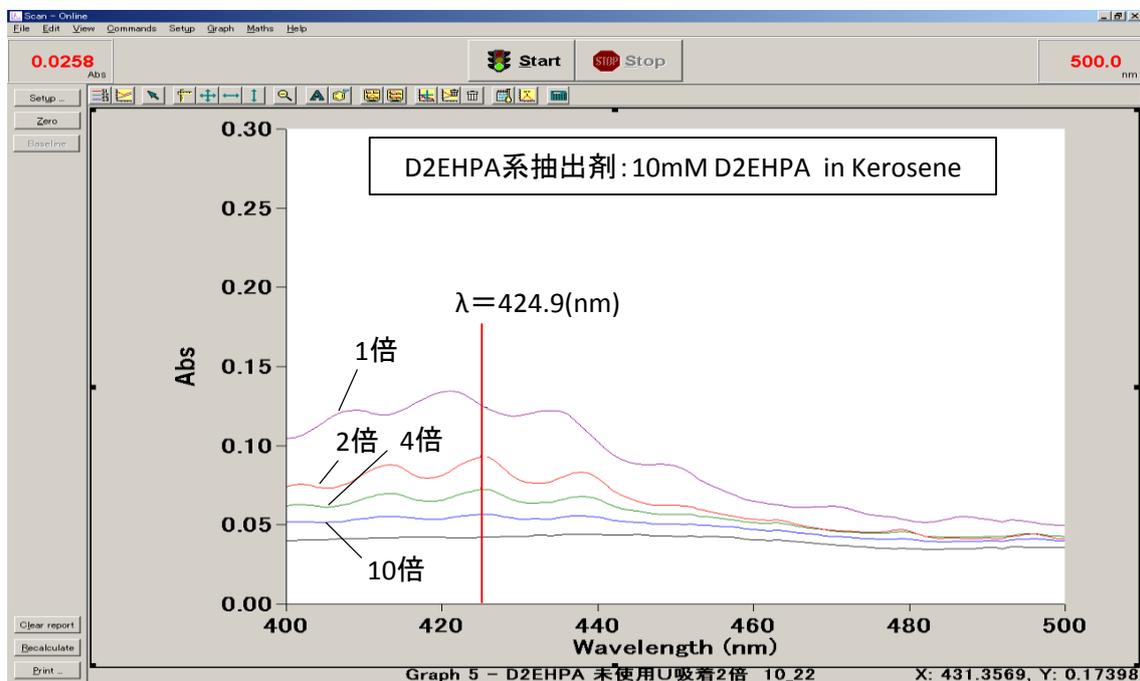


図 16 未使用 D2EHPA 系抽出剤の吸光度測定結果

(Figure16 Absorbance measurement result of new D2EHPA group extract agent)

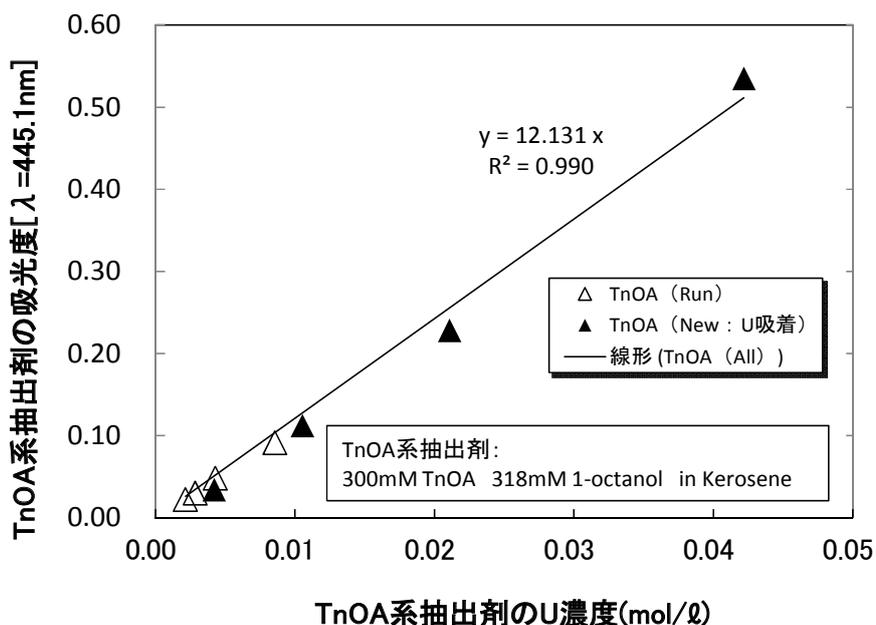


図 17 TnOA 系抽出剤の吸光度とウラン濃度の関係

(Figure17 Relationship between absorbance and concentration of uranium extraction agent group TnOA)

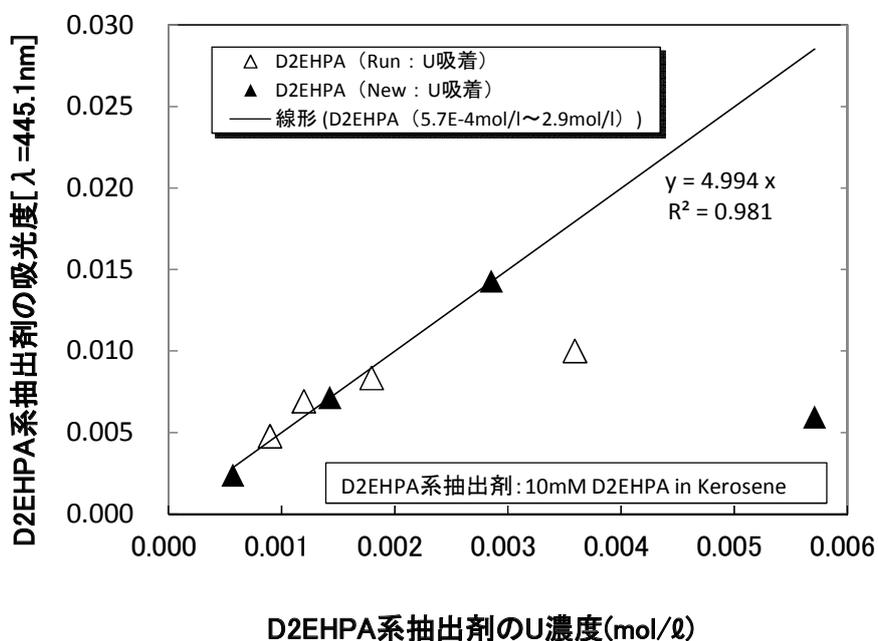


図 18 D2EHPA 系抽出剤の吸光度とウラン濃度の関係

(Figure18 Relationship between absorbance and concentration of uranium extractant D2EHPA group)

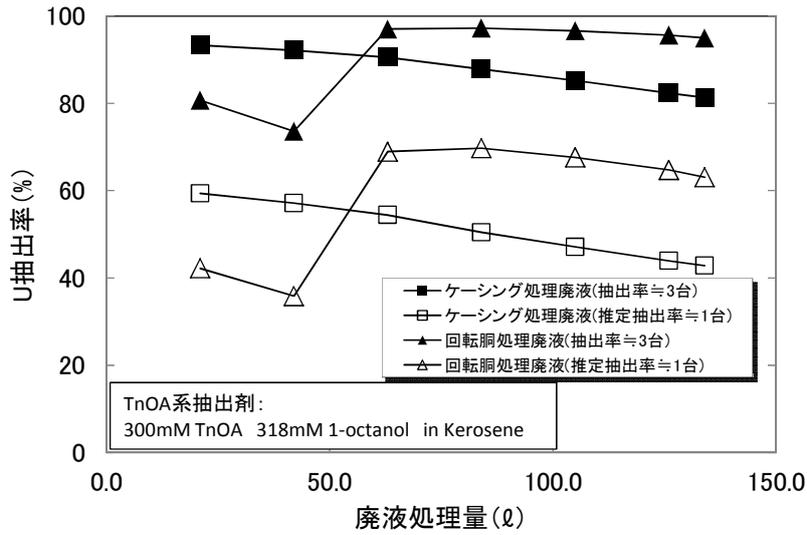


図 19 TnOA 系抽出剤によるケーシング処理廃液及び回転胴処理廃液のウラン抽出率比較

(Figure19 Comparison uranium extraction rate of the casing processing effluent and the rotor processing effluent by extraction agent group TnOA)

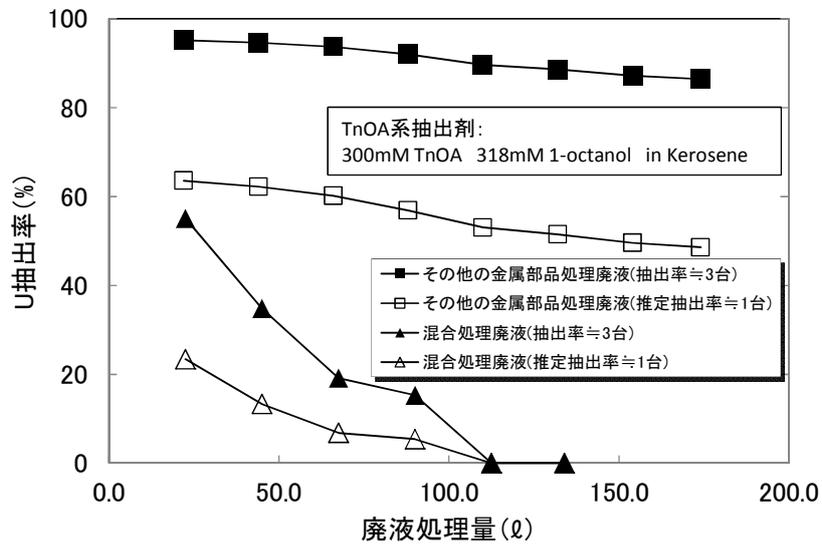


図 20 TnOA 系抽出剤によるその他の金属部品処理廃液及び混合処理廃液のウラン抽出率比較

(Figure20 Comparison uranium extraction rate of the processing effluent and mixed with other metal parts of extractive agent group TnOA)

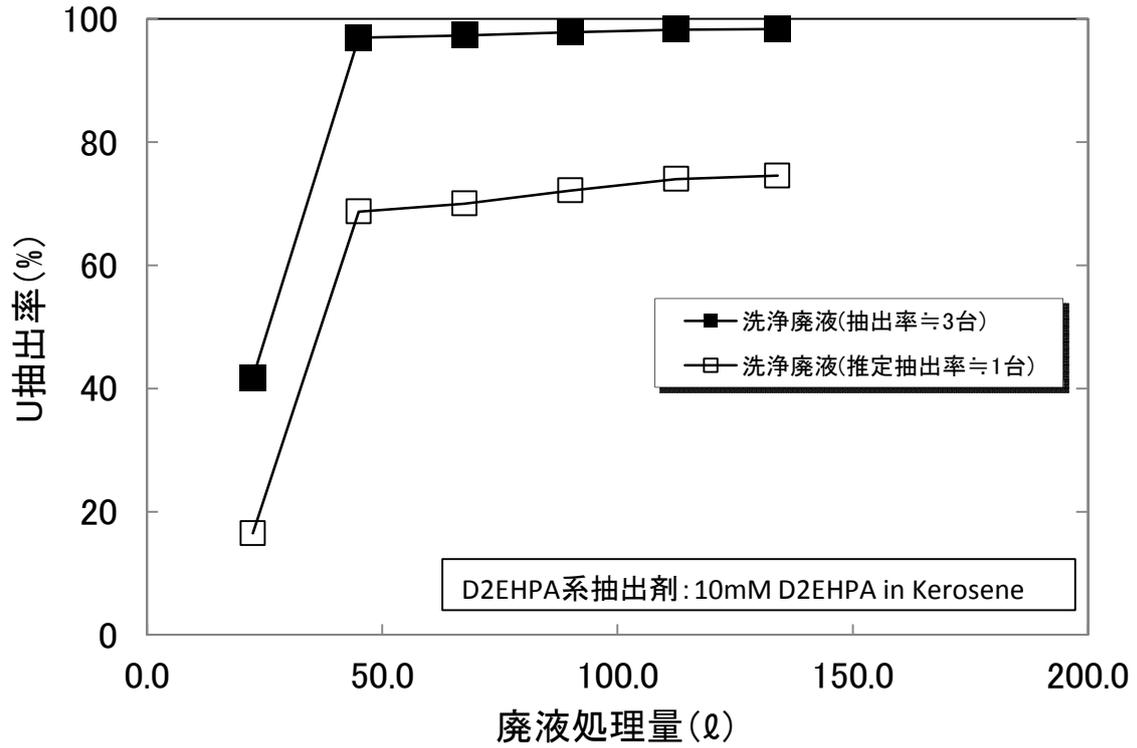


図 21 D2EHPA 系抽出剤による洗浄廃液のウラン抽出率比較

(Figure21 Comparison of uranium extraction rate by extraction agent cleaning effluent group D2EHPA)

表 1 供試廃液の組成  
(Table1 Composition of the effluent test)

成分	硫酸廃液 (mg/l)				洗浄廃液 (mg/l)
	ケーシング 処理廃液	回転胴 処理廃液	その他の金属部 品処理廃液	混合 処理廃液	
Ni	7.1	473.8	30.7	177.0	2.9
Cu	0.1	0.1	0.1	1.6	3.6E-02
Mo	1.4	30.9	2.2	14.5	3.8
Cr	2.6	1.5	6.3	5.0	0.1
U	65.7	100.9	15.1	57.0	0.2
Al	42.8	4.6	16.4	20.6	0.6
Co	3.6	312.6	17.8	113.0	1.0
Mg	4.5	— <sup>*1</sup>	2.1	1.9	1.1
Mn	0.6	3.7	0.6	0.9	1.2E-02
Ti	2.5	23.0	2.9	9.9	0.3
Fe	32.4	2066.5	132.6	617.3	3.4
pH	0.29	0.40	0.31	0.37	2.62

<sup>\*1</sup> 検出限界値以下

表 2 高周波誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) の仕様  
(Table2 Specifications (ICP-MS) inductively coupled plasma mass spectrometer)

用途	ウラン濃度測定
分析機器	誘導結合型質量分析装置 (ICP-MS)
型 式	: パーキンエルマー-ELAN 6000 DRC II
分 類	: 無機分析
質量分離部型式	: 四重極型質量分析計
質量範囲	: 1~270amu
仕 様	スキャンスピード : 2400amu/sec
	検 出 器 : 2ステージディスクリート形
	ネ ブ ラ イ ザ ー : 同軸型
	ス プ レ ー チ ャ ン バ ー : サイクロン型
	検 出 限 界 値 : $1 \times 10^{-12}$ g-E/ml

表 3 フーリエ変換赤外分光分析装置 (FT-IR) の仕様  
 (Table3 Specifications (FT-IR) Fourier transform infrared spectrometer)

用途	元素の定性分析
分析機器	フーリエ変換赤外分光分析装置 (FT-IR)
仕 様	分 類 : 構造分析 最 高 分 解 能 : $1\text{cm}^{-1}$ 検 出 器 : DTGS/KBr窓検出器 ( $12500 \sim 350\text{cm}^{-1}$ ) 最大拡張測定波数範囲 : $25000 \sim 20\text{cm}^{-1}$ リニアースキャン速度 : $0.158 \sim 5.06\text{cm}/\text{秒}$ ( $2.5\text{kHz} \sim 80\text{kHz}$ ) S / N 比 : 25000 : 1 以上

表 4 X線光電子分光分析装置 (XPS) の仕様  
 (Table4 Specification (XPS) X-ray photoelectron spectroscopy)

用途	元素の定性分析
分析機器	X線光電子分光分析装置 (XPS)
仕 様	分 類 : 表面分析 装 置 : JPS 9000MC 日本電子(株)製 X線出力 : 加圧電圧 $0 \sim 12\text{kV}$ (エミッション電流 $0 \sim 50\text{Ma}$ Mg- $\text{ka}$ $350\text{cm}^{-1}$ ) エッチング : $800\text{V} \cdot 20\text{mA}$ (Etching Rate $0.02 \sim 0.06\mu/\text{min}/\text{Sio}_2$ ) 分解領域 : $6\text{mm}\phi$ 到達圧力 : $7 \times 10^{-9}\text{Pa}$ ( $5 \times 10^{-10}\text{Torr}$ )以下

表 5 分光光度計の仕様  
(Table5 Specification of the spectrophotometer)

用途	吸光度測定
分析機器	分光光度計
型 式	: VARIAN Cary 50
モノクロメータ	: レシオビーム、250nmツェルニターナ型
グレーティング	: 1,200本/mm、ブレード角8.6°/240nm
波長範囲	: 190~1,100nm
仕様光源	: キセノン(蛍光灯の一万倍の明るさ)
検出器	: Siフォトダイオードアレイ
UV/VIS波長分解能	: <1.5nm
測光精度	: 0.005Abs (吸光度1 : NIST930D フィルター使用)

表 6 エマルションフロー装置による性能確認試験結果一覧  
(Table6 Performance test results list by emulsion flow device)

供試廃液 廃液名	使用抽出剤	供試廃液				抽出試験結果						
		廃液 種類	ph	U濃度 (mg/l)	処理量 当りの U量 <sup>*1</sup> (g)	処理量 (l)	抽出 速度 (l/h)	U抽出率(%)			エマル ション の質 <sup>*2</sup>	U 抽出量 (g)
				ave	max	min						
ケーシング 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	希硫酸	0.29	65.7	8.80	134	48.0	87.5	93.3	81.3	◇	7.76
回転胴 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	希硫酸	0.40	100.9	13.52	134	48.0	85.9	95.7	59.4	◇	12.23
その他の 金属部品 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	希硫酸	0.31	151.0	26.28	174	48.0	90.9	95.2	86.4	◇	23.90
混合 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	希硫酸	0.37	57.0	7.64	134	48.0	18.7 <sup>*3</sup>	55.0 <sup>*3</sup>	11.6 <sup>*3</sup>	△	1.45
洗浄廃液	10mM D2EHPA in Kerosene	洗浄水	2.62	0.2	0.03	134	37.8	88.4	98.3	41.7 <sup>*4</sup>	○	0.03

<sup>\*1</sup>U濃度と処理量の積

<sup>\*2</sup>エマルションの質 (○ : 良好、△ : ほぼ良好(界面に浮遊物)、◇ : 粗い(界面に浮遊物))

<sup>\*3</sup>抽出剤の破過によるウラン抽出率の低下

<sup>\*4</sup>試験初期は条件設定に時間を要したことによるウラン抽出率の低下

表 7 廃液種類毎のエマルションフロー装置による性能確認試験結果

(Table7 Performance test results by the device for each type emulsion effluent flow)

廃液種類	使用抽出剤	抽出剤 使用状態	積算廃液 処理量 (ℓ)	抽出速度 (ℓ/min)	U濃度 (mg/ℓ)	U抽出率 (%)	U除去量 (g)
ケーシング 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	new	0.0	-	65.7	-	-
			21.0	0.80	4.4	93.30	1.287
			42.0	0.80	5.2	92.14	1.271
			63.0	0.80	6.2	90.53	1.249
			84.0	0.80	8.0	87.83	1.211
			105.0	0.80	9.7	85.22	1.175
			126.0	0.80	11.6	82.37	1.136
			134.0	0.80	12.3	81.32	0.427
			平均	合計	87.53	7.756	
			回転胴 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	new	0.0	-
21.0	0.80	19.5				80.72	1.711
42.0	0.80	26.7				73.59	1.559
63.0	0.80	3.0				97.00	2.056
84.0	0.80	2.8				97.22	2.060
105.0	0.80	3.4				96.61	2.047
126.0	0.80	4.4				95.61	2.026
134.0	0.80	5.1				94.97	0.767
平均	合計	90.82				12.226	
その他の 金属部品 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	回転胴 処理廃液 に使用				0.0	-
			22.0	0.80	7.3	95.16	3.162
			44.0	0.80	8.2	94.60	3.143
			66.0	0.80	9.5	93.69	3.113
			88.0	0.80	12.1	91.99	3.056
			110.0	0.80	15.7	89.63	2.978
			132.0	0.80	17.2	88.59	2.943
			154.0	0.80	19.4	87.19	2.897
			174.0	0.80	20.5	86.40	2.610
			平均	合計	90.91	23.902	
混合 処理廃液	300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	回転胴 処理廃液 及び その他 金属部品 処理廃液 に使用	0.0	-	57.0	-	-
			22.5	0.80	25.6	55.05	0.706
			45.0	0.80	37.2	34.82	0.447
			67.5	0.80	46.1	19.14	0.245
			90.0	0.80	48.3	15.31	0.196
			112.5	0.80	57.1	-0.20	-0.003
			134.0	0.80	63.6	-11.64	-0.143
			平均	合計	18.75	1.449	
洗浄廃液	10mM D2EHPA in Kerosene	new	0.0	-	0.2297	-	-
			22.5	0.63	0.1338	41.74	0.0022
			45.0	0.63	0.0070	96.93	0.0050
			67.5	0.63	0.0062	97.30	0.0050
			90.0	0.63	0.0050	97.83	0.0051
			112.5	0.63	0.0040	98.24	0.0051
134.0	0.63	0.0038	98.35	0.0049			
平均	合計	88.40	0.027				

表 8 吸光度測定に使用した溶媒のウラン分析結果とウラン濃度  
 (Table8 Analysis of uranium and uranium concentration of solvent used in the spectrophotometric measurement)

溶媒名	溶媒量 (ml)	焼却後のU分析				溶媒中のU濃度	
		溶液量 (ml)	希釈倍率 (倍)	U濃度 分析結果 (gU/ml)	U量 (gU)	重量濃度 (gU/l)	重量濃度 (mol/l)
使用済 300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	0.1	50	1,000	4.08E-09	2.04E-04	2.04	8.57E-03
未使用 300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	0.1	50	4,000	5.02E-09	1.00E-03	10.04	4.22E-02
使用済 10mM D2EHPA in Kerosene	0.1	50	1,000	1.71E-09	8.55E-05	0.86	3.59E-03
未使用 10mM D2EHPA in Kerosene	0.1	50	1,000	2.72E-09	1.36E-04	1.36	5.71E-03

表 9 各抽出剤の mol 吸光計数の導出結果  
 (Table9 Derivation of the counting result of each extractant molar extinction)

溶媒名	近似式	吸光度	U濃度 (mol/l)	mol吸光係数
300mM TnOA 318mM 1-octanol in Kerosene	y=12.131x	1	0.082	12.1
10mM D2EHPA in Kerosene	y=4.994x	1	0.200	5.0



抽出装置



抽出装置と移送ポンプ

写真1 エマルションフロー装置

(Photo1 Emulsion flow equipment)

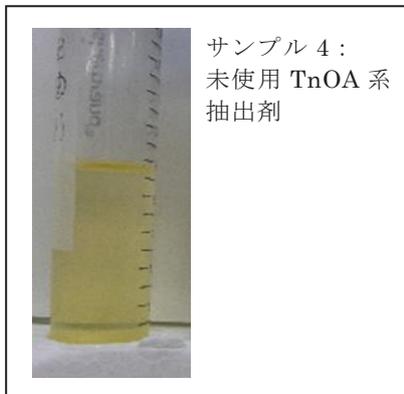
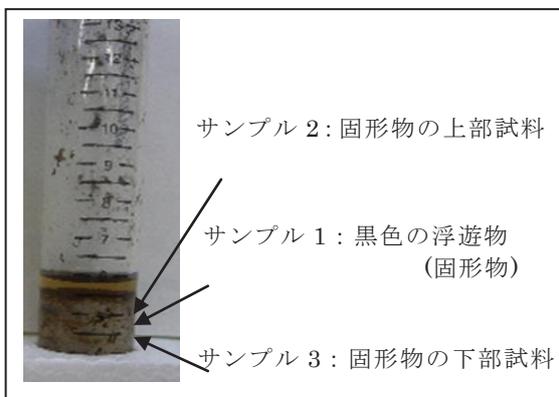


写真2 分析用サンプル

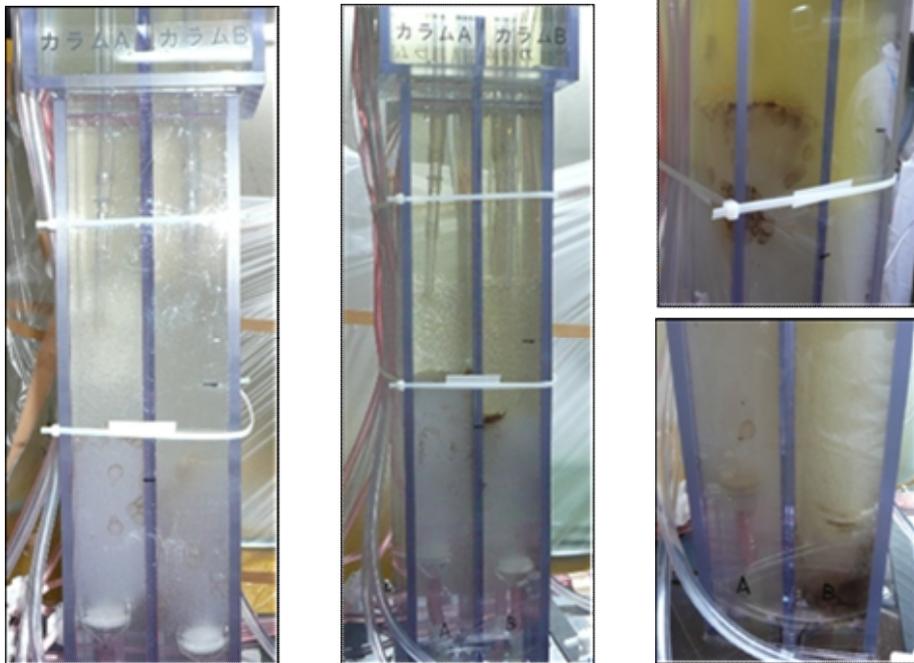
(Photo2 Samples for analysis)



エマルション層

写真3 ケーシング処理廃液のエマルション層（中期）

(Photo3 Emulsion layer of casing processing effluent (medium term))



初期

中期

終期

写真4 ケーシング処理廃液のエマルションフロー状況

(Photo4 Emulsion flow situation of the casing processing effluent)

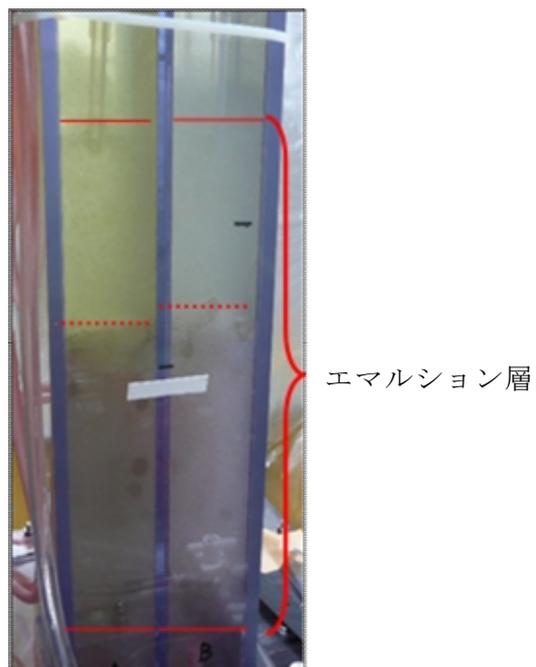


写真5 回転胴処理廃液のエマルション層（中期）

(Photo5 Emulsion layer of the rotor processing effluent (medium term))

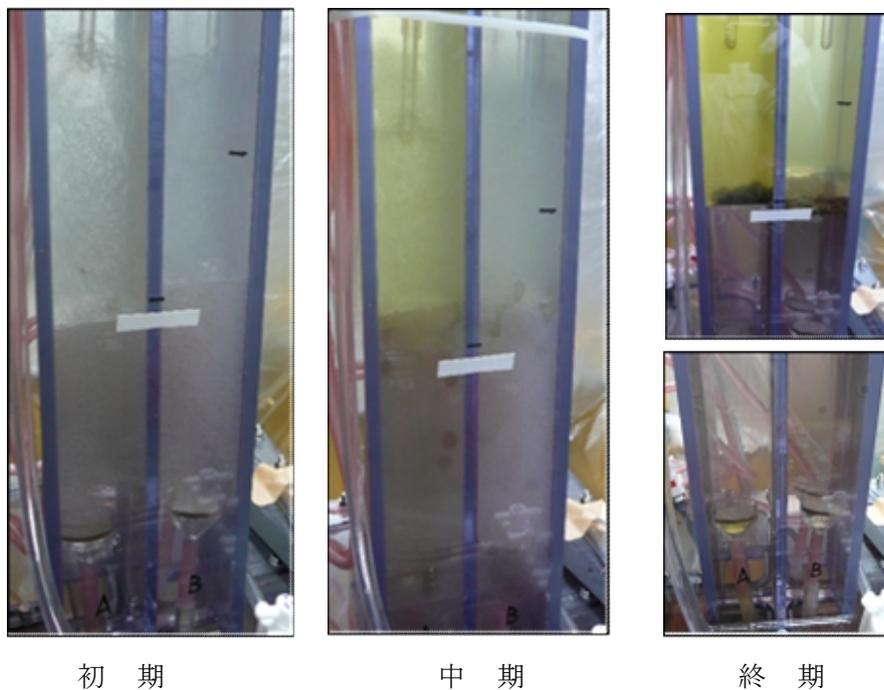
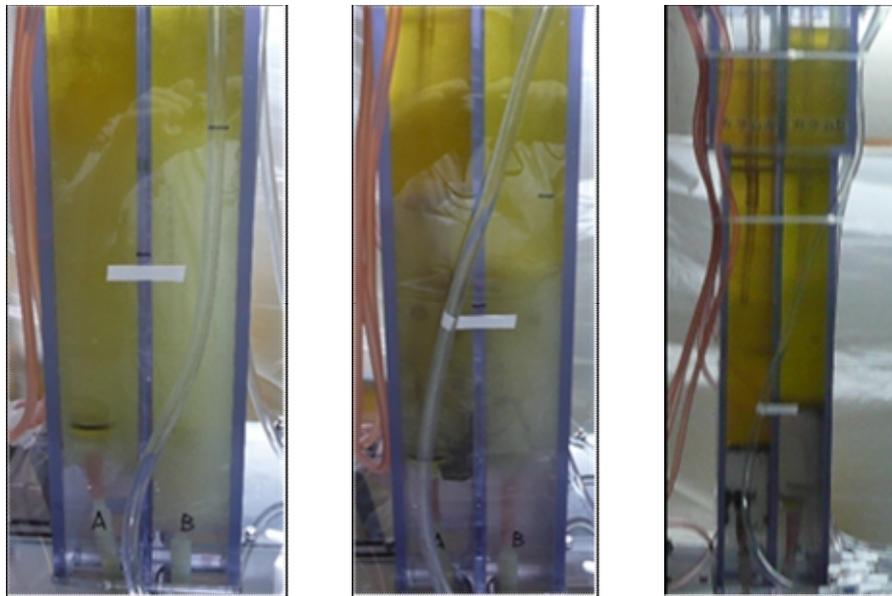


写真6 回転胴処理廃液のエマルションフロー状況

(Photo6 Emulsion flow situation of the rotor processing effluent)



写真7 混合処理廃液のエマルション層（中期）  
(Photo7 Emulsion layer of mixing processing effluent (medium term))



初 期                      中 期                      終 期

写真8 混合処理廃液のエマルションフロー状況  
(Photo8 Emulsion flow situation of mixing processing effluent)



写真 9 ケーシング処理廃液の黒色浮遊物発生状況  
(Photo9 Black suspended solids occurrence of casing processing effluent)

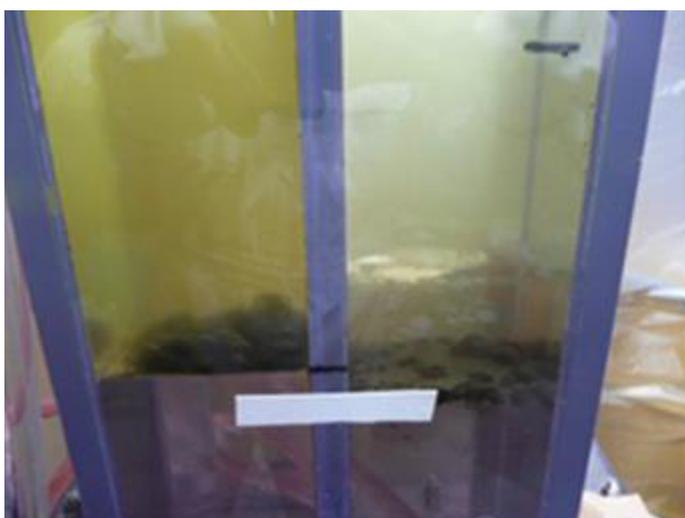


写真 10 回転胴処理廃液の黒色浮遊物発生状況  
(Photo10 Black suspended solids occurrence of rotor processing effluent)



写真 11 混合処理廃液の黒色浮遊物発生状況  
(Photo11 Black suspended solids occurrence of mixing processing effluent)



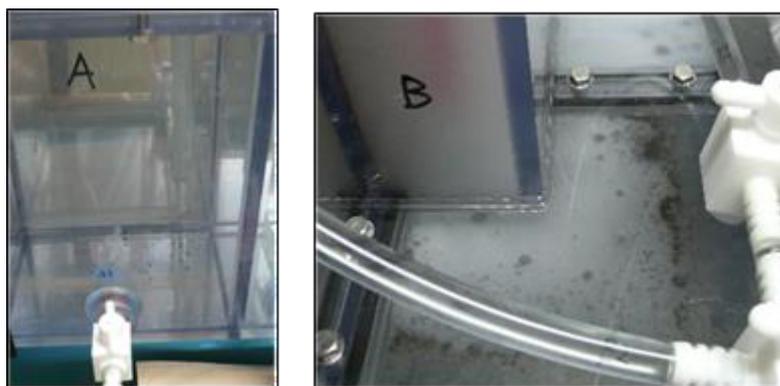
写真 12 硫酸廃液吸入部のフィルター部黒色付着物  
(Photo12 Filter part black deposits of sulfuric acid waste liquid intake section)



初期

中期

終期



試験後 3 時間後

写真 13 洗浄廃液のエマルジョンフロー状況  
(Photo13 Emulsion flow situation of cleaning effluent)



写真 14 洗浄廃液のエマルション層（中期）  
(Photo14 Emulsion layer of cleaning effluent (medium term))

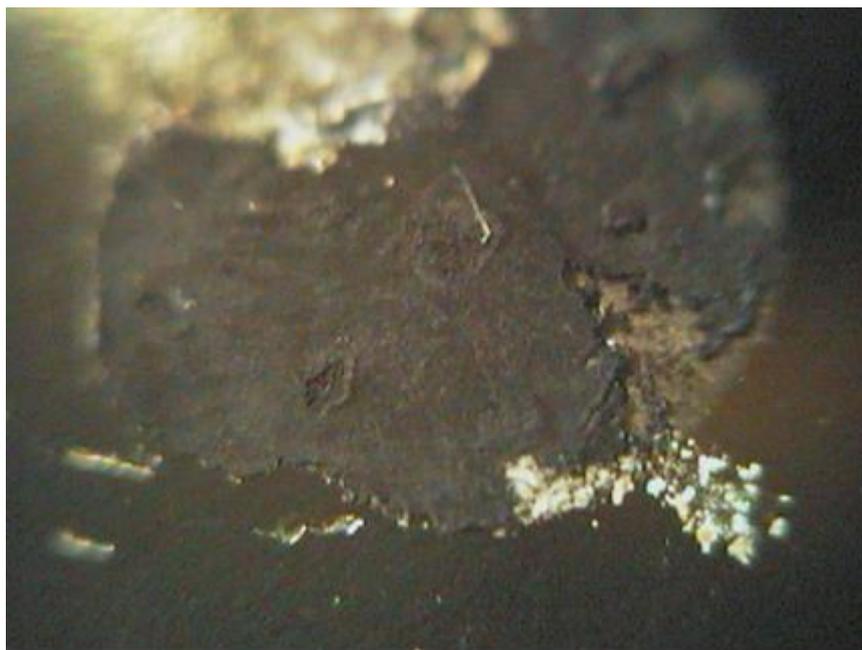


写真 15 CCD による黒色浮遊物観察結果  
(Photo15 Black suspended solids observations by the CCD)



写真 16 CCD によるフィルター材黒色付着物観察結果  
(Photo16 Filter material black deposits observations by the CCD)



浸透前

浸透後 (7 時間経過)

写真 17 5wt%硫酸とケロシンの浸透状況

(Photo17 Situation of penetration of sulfuric acid and kerosene 5wt%)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <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	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>(c)</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	ウエーバ	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
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</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間には1:1の関係がある。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>
電表面積	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	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
バイン	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。
ベール	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

