

簡素化溶媒抽出法による U, Pu 及び Np 共回収

—抽出段の高硝酸濃度化に伴う Np の抽出挙動への影響評価—

U, Pu and Np Co-recovery in Simplified Solvent Extraction Process

- Extraction Behavior of Np Using High HNO₃ Concentration at Extraction Section -

中原 将海 佐野 雄一 小泉 務

Masaumi NAKAHARA, Yuichi SANO and Tsutomu KOIZUMI

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
サイクル工学試験部

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

October 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

簡素化溶媒抽出法による U, Pu 及び Np 共回収
— 抽出段の高硝酸濃度化に伴う Np の抽出挙動への影響評価 —

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 サイクル工学試験部
中原 将海, 佐野 雄一, 小泉 務

(2008 年 7 月 25 日受理)

先進湿式再処理プロセスに関連して, U, Pu 及び Np 共回収を目的とした簡素化溶媒抽出法の研究が行われている。本研究では, 低 HNO_3 濃度のフィード溶液及び高 HNO_3 濃度の洗浄液を採用することにより, 抽出段を高 HNO_3 濃度に調整し, Np の抽出挙動に及ぼす影響を評価する。本試験は, 2007 年 9 月 5 日から 2007 年 10 月 4 日にかけて高レベル放射性物質研究施設において, 「常陽」Mk-I 及び Mk-II 照射済炉心燃料溶解液をフィード溶液として用いた。フィード溶液中の Pu の原子価は NO_x ガスを吹き込むことにより Pu(IV)に調整した。また, フィード溶液及び洗浄液の HNO_3 濃度を 3.9M 及び 10M に調製し, 抽出段において Np(V)から Np(VI)への酸化反応の促進を試みた。抽出段における HNO_3 濃度の増加により, 押出運転後における Np の物質収支については, ラフィネートへ 6.3%リークし, プロダクトへ 91.2%回収された。この結果より, 抽出段の高 HNO_3 濃度化は, Np の回収において有効であることを確認した。また, プロダクト中の U, Pu に対する total- γ の除染係数は, 5.1×10^4 であり, 過去の試験とほぼ同等の値を示した。定常時におけるサンプリングより, 抽出段の U, Pu 及び Np の段効率は 98.5%, 100%及び 78%, 逆抽出段の U, Pu 及び Np の段効率は 96%, 100%及び 94.5%の値が得られた。

U, Pu and Np Co-recovery in Simplified Solvent Extraction Process
— Extraction Behavior of Np Using High HNO₃ Concentration at Extraction Section —

Masaumi NAKAHARA, Yuichi SANO and Tsutomu KOIZUMI

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

(Received July 25, 2008)

Concerning the advanced aqueous reprocessing system, we have been investigating a simplified solvent extraction process using TBP as an extractant for U, Pu and Np co-recovery. In this study, the counter current experiment was carried out with low HNO₃ concentration in the feed solution and high HNO₃ concentration in the scrubbing solution, which was expected to bring a high HNO₃ concentration into the extraction section and the efficient Np oxidation and extraction in this section. This experiment had been conducted with the dissolver solution of “JOYO” Mk-I and Mk-II irradiated MOX fuel at CPF from 5th September to 4th October 2007. The Pu valence was adjusted to Pu(IV) by bubbling NO_x gas into the feed solution. It was attempted to oxidize Np(V) to Np(VI) in the extraction section by adjusting HNO₃ concentration of the feed and scrubbing solutions to about 3.9M and 10M, respectively. After operation, the Np leakage to the raffinate could be kept under about 6.3%. The decontamination factor of total-γ was 5.1×10^4 in this experiment, which meant that U and Pu product solution could be decontaminated as good as the previous work. The stage efficiencies for these elements were estimated by fitting the concentration profiles calculated by MIXSET-X into the experimental ones. The stage efficiencies of U, Pu and Np were evaluated as 98.5%, 100% and 78% in the extraction section, 96%, 100%, 94.5% in the stripping section, respectively.

Keywords : NEXT Process, Neptunium, Simplified Solvent Extraction Process, Stage Efficiency, MIXSET-X, Centrifugal Contactor

目次

1. 序論	1
2. 目的	1
3. 試験	1
3.1 試験場所	1
3.2 使用機器	2
3.3 使用試薬	2
3.3.1 照射済燃料溶解液	2
3.3.2 原子価調整	2
3.3.3 溶媒抽出試験	2
3.4 試験期間	2
3.5 試験方法	3
3.5.1 フィード溶液	3
3.5.2 供給試薬温度	3
3.5.3 供給試薬フロー	3
3.5.4 運転時間	3
3.5.5 分析	3
4. 結果及び考察	4
4.1 分析結果	4
4.2 物質収支	4
4.3 除染係数	5
4.4 濃度プロファイル	5
4.5 HNO_3 による Np の酸化反応	6
4.6 Np 回収における HNO_2 の影響	7
4.7 段効率	7
5. 結論	7
6. 今後の予定	8
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Objects	1
3. Experimental	1
3.1 Experimental Place	1
3.2 Equipment	2
3.3 Reagent	2
3.3.1 Dissolver Solution of Irradiated MOX Fuel	2
3.3.2 Adjusted to Pu Valence in Feed Solution	2
3.3.3 Reagents in Simplified Solvent Extraction	2
3.4 Experimental Term	2
3.5 Experimental Method	3
3.5.1 Feed Solution	3
3.5.2 Temperature of Supplied Reagent	3
3.5.3 Reagent Supply Flow	3
3.5.4 Operation Time	3
3.5.5 Analysis	3
4. Results and Discussion	4
4.1 Results of Analysis	4
4.2 Mass Balance	4
4.3 Decontamination Factor	5
4.4 Concentration Profiles	5
4.5 Np Oxidation by HNO ₃	6
4.6 Effect of HNO ₂ for Np Co-recovery with U and Pu	7
4.7 Stage Efficiency	7
5. Conclusions	7
6. Further Research Problems	8
References	9

List of Figures

Figure 1	Apparatus for adjusting Pu valence in the feed solution	10
Figure 2	Flow sheet	11
Figure 3	Reagent supply line system	12
Figure 4	Reagent flow system	13
Figure 5	Absorption spectrum of the feed solution after adjusting Pu valence	14
Figure 6	Concentration profiles of U in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 98.5% and 100% stage efficiency, respectively)	15
Figure 7	Concentration profiles of U in the stripping section (Calculation was carried out with 96% stage efficiency)	15
Figure 8	Concentration profiles of Pu in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 100% and 100% stage efficiency, respectively)	16
Figure 9	Concentration profiles of Pu in the stripping section (Calculation was carried out with 100% stage efficiency)	16
Figure 10	Concentration profiles of Np in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 78% and 98.5% stage efficiency, respectively)	17
Figure 11	Concentration profiles of Np in the stripping section (Calculation was carried out with 94.5% stage efficiency)	17
Figure 12	Concentration profiles of FPs in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 100% and 100% stage efficiency, respectively)	18
Figure 13	Concentration profiles of FPs in the stripping section (Calculation was carried out with 100% stage efficiency)	18
Figure 14	Temperature profiles in the centrifugal contactor	19
Figure 15	Leakage ratio of Np to the raffinate with HNO ₂ concentration in the feed solution	19

List of Tables

Table 1	Composition of the irradiated MOX fuel	20
Table 2	Composition of the feed solution (calculated value)	21
Table 3	Analysis plan	22
Table 4	Results of analysis	23
Table 5	Mass balances of actinide elements and FPs	24
Table 6	Abundance ratios of actinide elements and FPs	24
Table 7	Decontamination factors of FPs and total- γ for U and Pu product	24

1. 序論

照射済高速炉燃料を対象とした先進湿式再処理法は、New Extraction System for Transuranium (TRU) Recovery (NEXT)プロセス[1]と名付けられ、照射済高速炉燃料の溶解液より余剰のウラン(U)を回収する晶析法、U、プルトニウム(Pu)と共にネプツニウム(Np)を共回収する簡素化溶媒抽出法及びU、Pu及びNpを回収した後のラフィネートから抽出クロマトグラフィーによりアメリシウム(Am)及びキリウム(Cm)を回収するプロセスから構成されている。

NEXTプロセスの中核をなす簡素化溶媒抽出法は、従来使用されているPUREX法のPu分配工程及びU、Pu精製工程を削除し、U、Pu及びNpを一括回収するため、核拡散抵抗性の向上が期待されている。高レベル放射性物質研究施設(CPF)ではこれまでに同フローシート中でのNpの抽出挙動を中心に研究を行っている。これまでの研究では、フィード溶液を比較的高硝酸(HNO_3)濃度である5M程度に調整し、フィード溶液中のNpの原子価をリン酸トリブチル(TBP)に抽出性であるNp(VI)へ酸化させることにより溶解液中からのNpの回収を図っている[2]。これにより、約99%のNpがプロダクト中に回収され、ラフィネートへのリークが1%程度に押さえられていることを確認している。一方、抽出の前工程である晶析工程においてPu-Cs複塩析出の観点から、溶解液の低 HNO_3 濃度化が有効とされており、この場合、抽出工程におけるフィード溶液の HNO_3 濃度が低下する。また、簡素化溶媒抽出法において、低 HNO_3 濃度フィード溶液におけるNpの挙動においては検討されておらず、フィード溶液の低 HNO_3 濃度におけるNpの挙動を評価することは今後の研究開発においても重要である。フィード溶液の HNO_3 濃度が低い場合には、溶液中においてNpの酸化が十分でないことが懸念される。しかし、この場合においても抽出段を高 HNO_3 濃度に調整することにより遠心抽出器内にてNpの酸化及び抽出が期待できる。

本試験では、抽出段の高 HNO_3 濃度化によるNp回収率向上の可能性について評価を行うため、低 HNO_3 濃度フィード溶液及び高 HNO_3 濃度洗浄液の採用により抽出段の高 HNO_3 濃度化を図り、抽出段におけるNpの濃度プロファイル及びNp回収率に及ぼす影響について検討を行う。

2. 目的

フィード溶液及び洗浄液の HNO_3 濃度を3.9M及び10Mとした場合のプロダクトにおけるU、Pu及びNpの回収率、核分裂生成物(FP)のプロダクトに対する除染係数を評価する。さらに、定常時におけるこれらの元素の濃度プロファイルを取得し、これにより段効率を算出する。

3. 試験

3.1 試験場所

CPF 研究棟 CA-3 セル

3.2 使用機器

- CPF 型遠心抽出器
 - ロータ径(内径):27mm
 - ロータ回転数:2500-3500rpm
 - インベントリー:25mL/段 (ロータ内 15mL, ハウジング部 10mL)
 - 段数:16 段/1 バンク
- 定量ポンプ
- 熱電対
- ヒーター
- 温度調節器

3.3 使用試薬

3.3.1 照射済燃料溶解液

2007 年度溶解及び晶析試験より得られた「常陽」Mk-I 燃料及び「常陽」Mk-II 燃料溶解液を対象とした。溶液調整により、以下に示す重金属量の照射済燃料溶解液を用いた。試験に使用した燃料仕様を Table 1 に示す。

- 「常陽」Mk-I 燃料溶解液 U:194g, Pu:16g
- 「常陽」Mk-II 燃料溶解液 U:5.83g, Pu:1.97g

3.3.2 原子価調整

原子価調整に使用した試薬を以下に示す。

- 5M HNO₃ (NO_x ガス発生)
- 4M 亜硝酸ナトリウム(NaNO₂) (NO_x ガス発生)

3.3.3 溶媒抽出試験

溶媒抽出試験に使用した試薬を以下に示す。30 vol%TBP/ノルマルドデカン(*n*-DD)は、アルカリ-酸洗浄後に使用した。

- 10M HNO₃ (洗浄液)
- 3.9M HNO₃ (模擬フィード溶液)
- 3M HNO₃ (HNO₃ 濃度調整液)
- 0.02M HNO₃ (逆抽出液)
- 30 vol%TBP/*n*-DD (抽出溶媒)
- *n*-DD (溶媒洗浄液)

3.4 試験期間

2007.9.5 - 2007.10.4

3.5 試験方法

3.5.1 フィード溶液

「常陽」Mk-I 及び Mk-II 燃料溶解液を混合し、フィード溶液として用いた。また、4M NaNO₂ と 5M HNO₃ を混合し NO_x ガスを発生させ、フィード溶液に吹き込むことにより Pu の原子価を Pu(IV) に調整した。この溶液の ORIGEN2.1[3] の計算による FP 及びアクチノイド元素の組成を Table 2 に、また原子価調整装置を Figure 1 に示す。

3.5.2 供給試薬温度

逆抽出液(0.02M HNO₃)の供給温度は、60°C に調整されたセル内恒温槽中を通過させることにより約 45°C とした。なお、試験を通じ、供給温度は逆抽出部 16 段目において約 45°C であることを確認した。他の試薬は全てセル内温度にて供給した。

3.5.3 供給試薬フロー

本試験において運転を実施したフローシートを Figure 2 に示す。また、セル内外における試薬供給設備接続ライン及び試薬供給フローを Figure 3, 4 に示す。

3.5.4 運転時間

試験は、以下に示す順序で実施した。

- ・酸－溶媒平衡運転 2 時間
- ・本運転 2.7 時間
- ・押出運転 1.5 時間
- ・溶媒押出運転 0.5 時間

酸－溶媒平衡運転終了後、プロダクト受容器を交換し、本運転及び押出運転を行った。また、酸－溶媒平衡運転及び押出運転では模擬フィード溶液として 3.9M HNO₃ を用いた。

3.5.5 分析

フィード溶液は調整前後において、予め U, Pu, Np, FP, 亜硝酸(HNO₂)及び HNO₃ 濃度測定を行うとともに、分光光度計測定により Pu(VI)(830nm 付近)の存在の有無を確認した。

本運転開始 120 分を目安に、廃溶媒出口、プロダクト出口、ラフィネート出口、逆抽出部 9, 8, 7 及び 6 段目有機相、抽出部 4, 5, 6 及び 7 段目水相よりサンプリングを行った。さらに、押出運転終了後、ラフィネート受容器、プロダクト受容器及び廃溶媒受容器よりサンプリングを実施した。U, Pu 及び HNO₂ 濃度については比色分析(日本分光(株), V-570DS), Pu 濃度の濃度が低いと予想される箇所についてはα線スペクトル分析(ORTEC, CU017-450-100, 920-8MCA), Np 濃度はα線スペクトル分析, FP(total-γ)濃度はγ線スペクトル分析(ORTEC, GEN10; セイコー・イージーアンドジー(株), 92XMCA), HNO₃ 濃度は中和滴定分析(平沼産業(株), COM-2500)を行った。各サンプルに

対する分析項目を Table 3 に示す。

4. 結果及び考察

4.1 分析結果

HNO₃ 濃度及び Pu 原子価を調整した後、Pu(VI)の有無を確認するためフィード溶液について分光光度計測定を実施した。得られたスペクトルを Figure 5 に示す。Pu(VI)による 830nm 付近の鋭い吸収ピーク[4]はみられず、フィード溶液中に Pu(VI)が存在していないことを確認した。本スペクトルからは Np の原子価は明らかではないが、フィード溶液中に過剰の NO_x ガスを供給したことを考慮すると Np は Np(V)に調整されたと考えられる。

本試験で得られたサンプルの分析結果を Table 4 に示す。本運転開始 120 分後に実施したラフィネート出口、抽出部水相 4 段目及び廃溶媒出口のサンプル中における比色分析による結果、U 濃度は検出下限値未満であった。一方、Pu についてはラフィネート出口、抽出部水相 4-7 段目、逆抽出部有機相 6-9 段目及び廃溶媒出口においては、比色分析の検出下限値未満であったが、 α 線スペクトル分析を並行して行い、比色分析の検出下限値以下における詳細な濃度プロファイルを取得した。Np は、逆抽出部有機相 6-8 段目及び廃溶媒出口において α 線スペクトル分析の検出下限値未満であった。押出運転後において、U は、ラフィネート受容器及び廃溶媒受容器において検出下限値未満であった。Pu は、ラフィネート受容器及び廃溶媒受容器において比色分析での検出下限値未満であったものの、 α 線スペクトル分析により、評価を実施した。また、Np は廃溶媒受容器においては検出下限値未満であった。

4.2 物質収支

物質収支の評価にあたっては(1), (2)式より収率を計算した。120 分後における収率 Y_{120} は

$$Y_{120} = \frac{C_{i,j} \times v_i}{C_{F,j} \times v_F} \quad (1)$$

で計算し、押出後の収率 Y_{SB} については

$$Y_{SB} = \frac{C_{i,j} \times V_i}{C_{F,j} \times V_F} \quad (2)$$

により評価した。ここで、 $C_{i,j}$ は出口箇所 i における元素 j の濃度、 v_i は出口箇所 i における出口流量、 $C_{F,j}$ はフィード溶液における元素 j の濃度、 v_F はフィード溶液の供給流量、 V_i は出口箇所 i の液量、 V_F はフィード溶液の液量とする。

定常及び押出運転終了時の分析結果より算出された U, Pu, Np 及び FP の各出口に対する物質収支を Table 5 にまとめる。また、各出口に対する存在比を Table 6 に示す。本試験において供給したフィード溶液における各元素及び核種の総量を 100%としたとき、本運転開始 120 分後のプロダクトにおける収率は U で 114.5%、Pu に関しては 104.1%となった。これに対し、押出運転後におけるプロダクト中の U 及び Pu の収率は、それぞれ 108.7%、110.0%であった。一方、120 分後及び押

出運転後においては、U、Pu とともにラフィネート及び廃溶媒へのリークは、0.1%以下であった。Np に関しては、本運転開始 120 分後のプロダクトの収率は 74.3%、ラフィネートは 4.8%、廃溶媒は検出下限値未満であった。また、押出運転後における Np のプロダクトへの収率は 91.2%、ラフィネート及び廃溶媒へのリークは 6.3%、廃溶媒では検出下限値未満であった。各出口における収率の合計値は 100%前後の数値であるがこれらは分析上の誤差範囲内であると考えられるため、今回の試験においては、U 及び Pu については損失なくプロダクトへ回収できたと思われる。Np については、低 HNO₃ 濃度フィード溶液においても高 HNO₃ 洗浄液の採用により押出運転後に 90%以上の Np がプロダクト中へ回収可能であった。

4.3 除染係数

分析結果よりプロダクト中の U 及び Pu に対する FP の除染係数 $DF_{P,j}$ を求めた。なお、除染係数は(3)式より算出した。

$$DF_{P,j} = \frac{\frac{C_{F,j}}{C_{F,U+Pu}}}{\frac{C_{P,j}}{C_{P,U+Pu}}} \quad (3)$$

ここで、 $C_{F,j}$ はフィード溶液中の元素 j の濃度、 $C_{F,U+Pu}$ はフィード溶液中の U+Pu の濃度、 $C_{P,j}$ はプロダクト中の元素 j の濃度、 $C_{P,U+Pu}$ はプロダクト中の U+Pu の濃度である。

Table 7 にプロダクトに対する FP の除染係数を示す。セシウム(¹³⁷Cs)、ユウロピウム(¹⁵⁴Eu 及び ¹⁵⁵Eu)の除染係数は 5.0×10^4 、 $>2.8 \times 10^3$ 及び $>4.9 \times 10^3$ となり、total- γ の除染係数は 5.1×10^4 であった。これは、2005 年度に実施した簡素化溶媒抽出試験の除染係数とほぼ同じ値である[2]。

4.4 濃度プロファイル

フィード溶液供給 120 分後に各段よりサンプリングした U、Pu、Np 及び FP の濃度プロファイルを図 Figure 6-13 に示す。また、この分析結果より抽出計算コード MIXSET-X[5]にて段効率を算出し、この計算結果も実験値と併せて示している。MIXSET-X の計算条件としては、カールスルーエ原子力研究所(KfK)の分配係数計算式を用い、逆抽出液を 45°C にて供給した際の抽出器内の温度勾配については過去に行ったコールド試験の結果(Figure 14)を参考にした。なお、MIXSET-X における FP のフィード溶液の組成として ORIGEN2.1 の計算より得られたジルコニウム(Zr)、テクネチウム(Tc)、ルテニウム(Ru)、Cs、ガドリニウム(Gd)を使用した。また、Tc に対する分配係数計算式はフランス原子力庁(CEA)により得られたものを用いた。なお、120 分後での各段における γ 線スペクトル分析は、Cs のみ有意値を示し、他の元素は分析下限値未満であった。

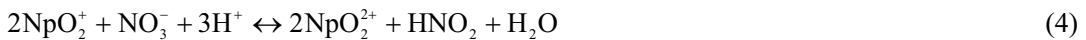
抽出部は、ラフィネート出口、水相 4-7 段目においてサンプリングを実施した。U はラフィネート出口及び水相 4 段目において検出下限値未満であった。U、Pu 及び Np における抽出段の濃度プロファイルでは、水相 4-7 段目の分析結果より抽出されている傾向がみられた。

逆抽出部は、プロダクト出口、有機相 6-9 段目及び廃溶媒出口においてサンプリングを実施し

た。U は廃溶媒出口において比色分析の検出下限値未満となった。U 及び Pu における逆抽出段の濃度プロファイルでは、有機相 6-9 段目の分析結果より逆抽出されている傾向がみられた。Np は、有機相 6-8 段目及び廃溶媒出口において検出下限値未満であった。

4.5 HNO₃ による Np の酸化反応

Np は、HNO₃ 溶液中において Np(IV)、Np(V)、Np(VI) の異なる原子価において存在する。このうち、TBP に対して Np(IV)、Np(VI) は抽出性であり、Np(V) は難抽出性である。簡素化溶媒抽出法においては Np を U、Pu と共に回収するため Np の原子価を 30 vol% TBP/n-DD に抽出可能な Np(VI) に調整する。HNO₃ 溶液中において Np は下記の式により Np(V) と Np(VI) の平衡関係が成立する。



また、この反応速度は、HNO₃ 濃度及び HNO₂ 濃度に依存し、下記の式により計算される[6]。

$$-\frac{d[\text{Np(V)}]}{dt} = \frac{1.8 \times 10^{-3} [\text{H}^+]^{1.3} [\text{NO}_3^-]^2 [\text{HNO}_2] [\text{Np(V)}]}{[\text{HNO}_2] + [\text{Np(V)}]} \quad (5)$$

(5) 式は、HNO₃ 濃度及び HNO₂ 濃度が高くなると、HNO₃ による Np(V) の酸化反応速度が上昇することを示している。一方、HNO₃ 濃度及び HNO₂ 濃度は(6)式の反応における平衡定数にも影響を及ぼす。(4)式のみかけの平衡定数はこれらの濃度及び Np(V)、Np(VI) 濃度により以下のように決定される[7]。

$$K_{\text{app}} = \frac{[\text{Np(VI)}] \cdot [\text{HNO}_2]^2}{[\text{Np(V)}] \cdot [\text{HNO}_3]^2} \quad (6)$$

Gourisse の研究[8]によると、HNO₃ 濃度を 1M から 4M に上昇させるとみかけの平衡定数 K_{app} は 3.2×10^{-4} から 9.3×10^{-4} に増加することが報告されている。また、高 HNO₂ 濃度では(4)式の反応式が左側に進み、Np(V) の酸化反応が抑制される。

本運転開始 120 分後においては、Np のラフィネートへのリークは僅かに 4.8% であった。洗浄液を 10M HNO₃ としたため、抽出部水相 4-7 段目における HNO₃ 濃度は約 7.5M に調整され、抽出段において Np(V) の酸化反応が十分に進行したと思われる。すなわち、フィード溶液の低 HNO₃ 濃度化においても洗浄液の高 HNO₃ 濃度化により遠心抽出器内にて(5)式で示した Np の酸化速度の向上及び(4)式で示した酸化反応の進行が十分に図られたものと考えられる。

高 HNO₃ 濃度フィード溶液の条件では、抽出段の HNO₃ 濃度は約 5.5M であり、ラフィネートへの Np リークは 1% に抑えられている。今回の試験では、抽出段の HNO₃ 濃度は約 7.5M に調整されたものの Np リークは 4.8% であった。フィード溶液の高 HNO₃ 濃度化の方が、抽出段の HNO₃ 濃度は約 5.5M であっても、フィード溶液内にて十分な酸化が進んでいるため、Np のリークが抑えられている。これらの研究により、Np の回収に関しては、フィード溶液における高 HNO₃ 濃度化の有効性が示された。

4.6 Np 回収における HNO_2 の影響

Np の酸化還元反応において、 HNO_2 が重要な役割を示すことが知られており、(4)式によると HNO_2 濃度が増加すると Np(V)の酸化反応が抑制される。本フローシートにおける HNO_2 濃度の影響を評価するため、フィード溶液中の HNO_2 濃度をパラメータとして MIXSET-X により計算を行った。この計算結果を Figure 15 に示す。また、比較のため HNO_3 濃度 5.2M のフィード溶液を採用したフローシート[2]における計算結果も併せて示す。両フローシートでは、フィード溶液中の HNO_2 濃度が増加するに従い、Np のラフィネートへのリーク率が増加することが示された。これは、(4)式において Np(VI)が HNO_2 濃度増加により還元され易くなるためである。また、フィード溶液の HNO_3 濃度が高い方が、Np のラフィネートへのリーク率が低い結果となった。Np 回収に関しては、高 HNO_3 濃度フィード溶液の方が HNO_2 の影響を受けにくいと思われる。CPF では、本試験において初めて HNO_2 濃度の分析を行ったため、 HNO_2 による影響を評価するためには試験データの更なる取得が必要である。

4.7 段効率

抽出部及び逆抽出部における分析結果より得られた U, Pu, Np 及び HNO_3 濃度プロファイルから、本試験における抽出部及び逆抽出部の段効率を MIXSET-X の計算値との比較から見積もった。なお、洗浄段における段効率は、2005 年の試験において得られた段効率の値を用いた。実験及び計算より得られた抽出部及び逆抽出部における U, Pu, Np 及び FP の濃度プロファイルを Figure 6-13 に示している。

抽出段の段効率は U が 98.5%, Pu は 100%, Np については 78%の値が得られた。2005 年度の試験では、抽出部水相 2-5 段目により評価を行ったため、検出下限値未満やテイリングが懸念されたが、本試験ではフィード溶液に近い段にてサンプリングを行い、より正確な段効率を算出できた。逆抽出部の段効率は、U 及び Pu については有機相 12 段目、Np については有機相 13 段目の値を基に算出した。逆抽出部における段効率は、U, Pu 及び Np についてそれぞれ 96%, 100% 及び 94.5%の値が得られた。このうち Np は、有機相 6-8 段目にて検出下限値未満となったため、より正確な評価を行うためにも、サンプリング及び分析方法について検討が必要である。

5. 結論

「常陽」Mk-I 及び Mk-II 燃料溶解液をフィード溶液とした簡素化溶媒抽出試験を実施した。本試験では、フィード溶液及び洗浄液の HNO_3 濃度を 3.9M 及び 10M の条件において、Np のラフィネートへのリーク防止を図った。押出運転後におけるプロダクト中への回収率は U が 108.7%, Pu が 110.0%, Np においては 91.2%であった。U 及び Pu は、ほぼプロダクト中へ回収され、Np は 6.3% がラフィネートへリークしたものの、残りはプロダクトへ回収された。また、本運転開始 120 分後にサンプリングを行い Np の濃度プロファイルを取得した。抽出段においては、Np が抽出される傾向がみられた。よって、低 HNO_3 濃度のフィード溶液においても洗浄液を高 HNO_3 濃度とすることにより、

抽出段での Np(VI)への酸化を促進でき、大部分の Np が回収可能であった。また、本条件と高 HNO₃ 濃度のフィード溶液において、Np 回収率及び HNO₂ の影響について検討し、フィード溶液における HNO₃ 濃度の重要性を示した。本試験により得られた濃度プロファイルにより抽出段における U, Pu 及び Np の段効率は、それぞれ 98.5%, 100%及び 78%となり、また逆抽出段における U, Pu 及び Np の段効率は、96%, 100%及び 94.5%と評価された。プロダクトに対する total-γの除染係数は 5.1×10^4 であり、2005 年度の簡素化溶媒抽出試験で得られた値とほぼ同じであった。本フローシートにおける Np の回収は、高速炉サイクル実用化研究開発(FaCT)の要求を満足しているが、短半減期核種の除染係数の評価、プロセスの最適化に向けた研究開発を今後も継続して実施する必要があると思われる。

6. 今後の予定

本試験において、逆抽出部における Np の殆どがα線スペクトル分析の検出下限値未満となり、正確な段効率が算出できなかった。よって、サンプリング及び分析方法を再度検討していく必要がある。

参考文献

- [1] T. Takata, Y. Koma, K. Sato, M. Kamiya, A. Shibata, K. Nomura, H. Ogino, T. Koyama and S. Aose : “Conceptual design study on advanced aqueous reprocessing system for fast reactor fuel cycle”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**(3), p.307 (2004).
- [2] 中原将海, 佐野雄一, 宮地茂彦, 小泉務, 小山智造, 青瀬晋一 : “簡素化溶媒抽出法による U, Pu 及び Np 共回収—フィード溶液及び洗浄液の高硝酸濃度化に伴う Np の抽出挙動への影響評価—”, *JAEA-Research 2006-030* (2006).
- [3] M. J. Bell : “ORIGEN-The ORNL isotope generation and depletion code”, ORNL-4628 (1973).
- [4] 中井敏夫, 斎藤信房, 石森富太郎編 : “無機化学全書 XVII-2 プルトニウム”, 丸善株式会社, (1976).
- [5] 内藤大志, 須藤俊幸, 麻川和裕, 柏木栄介 : “抽出計算コード(MIXSET-X)”, *JNC TN8400 99-005* (1999).
- [6] J. P. Moulin : “Oxidation-reduction kinetics of neptunium in nitric acid solution”, *Thèse Doctorat d'état, Rapport CEA-R-4912* (1978).
- [7] O. Tochiyama, Y. Nakamura, Y. Katayama and Y. Inoue : “Equilibrium of nitrous acid-catalyzed oxidation of neptunium in nitric acid-TBP extraction system”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**(1), p.50 (1995).
- [8] D. Gourisse : “Oxidation of neptunium(V) by aqueous solutions of nitric acid in the presence of nitrous acid”, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **33**, p.831 (1971).

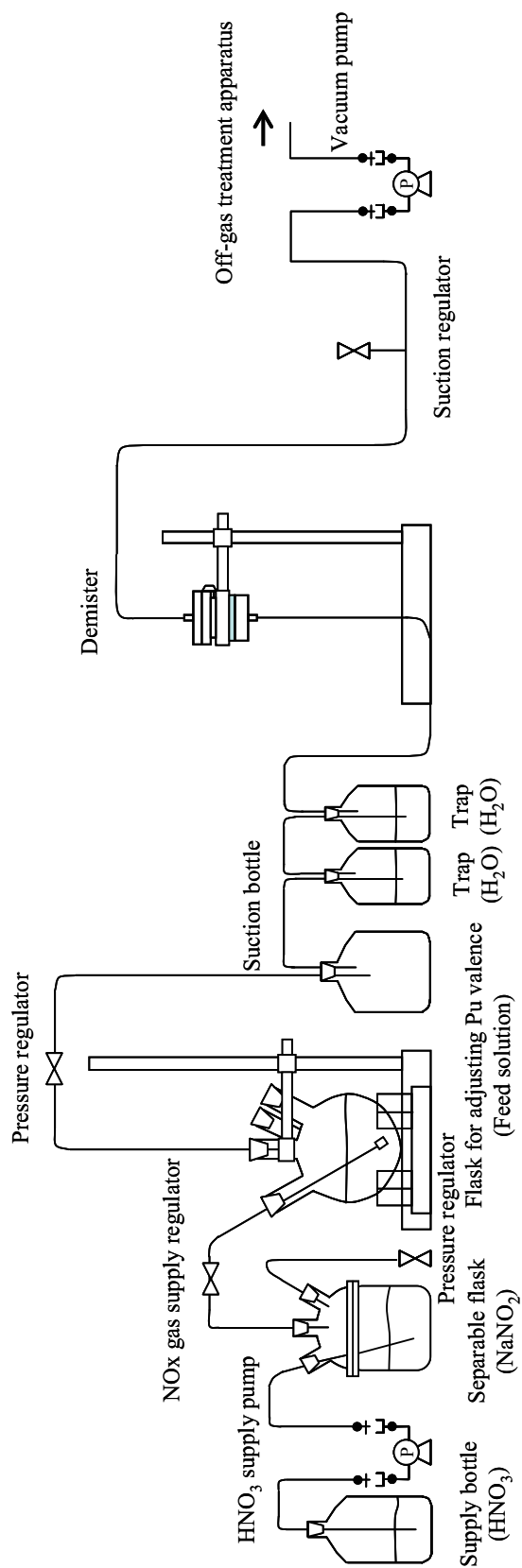


Figure 1 Apparatus for adjusting Pu valence in the feed solution

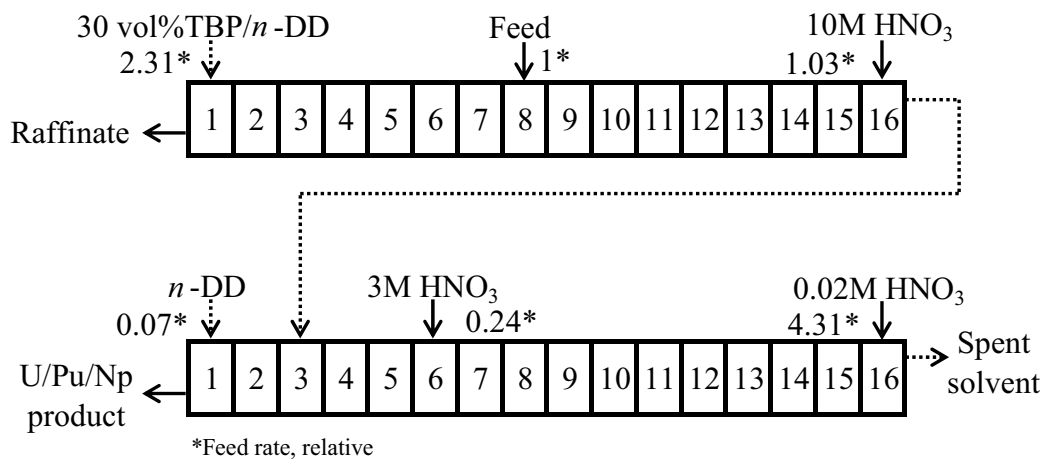


Figure 2 Flow sheet

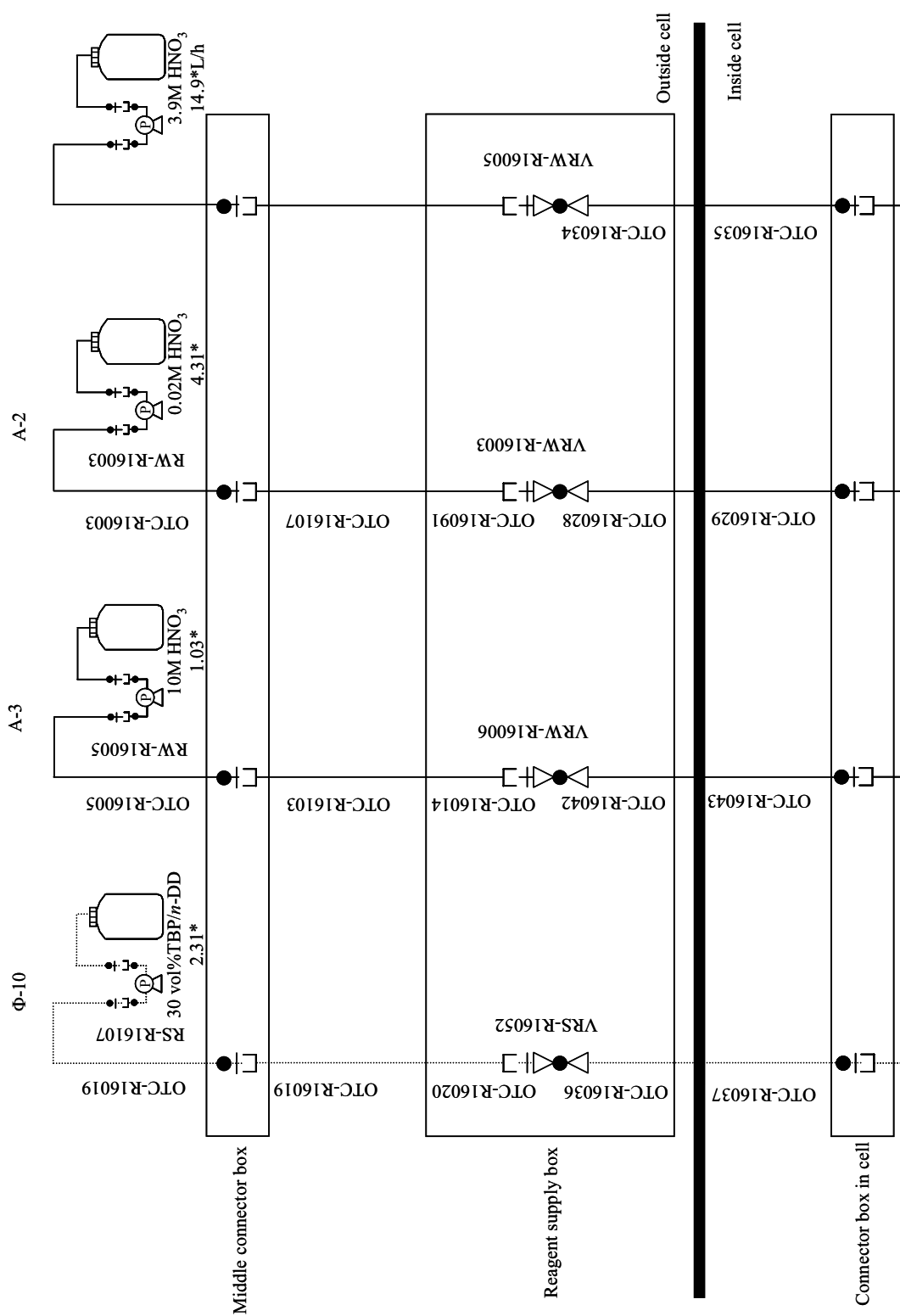


Figure 3 Reagent supply line system

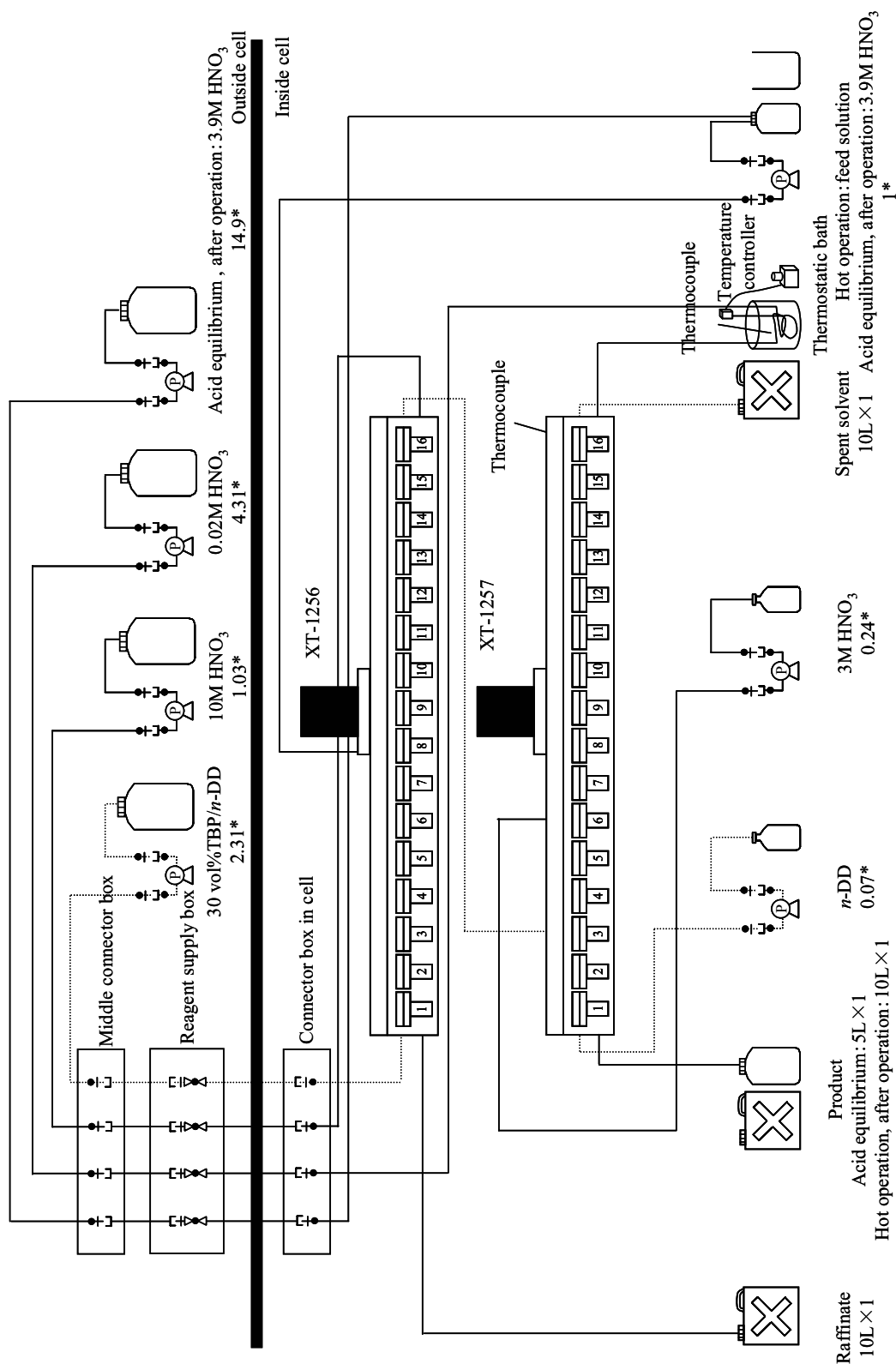


Figure 4 Reagent flow system

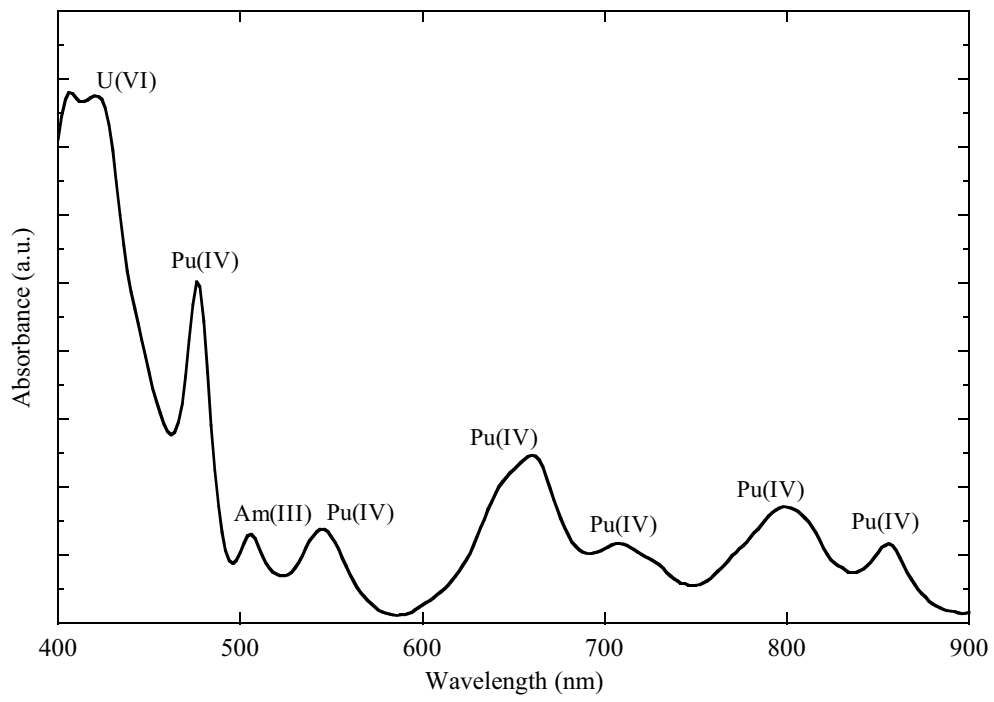


Figure 5 Absorption spectrum of the feed solution after adjusting Pu valence

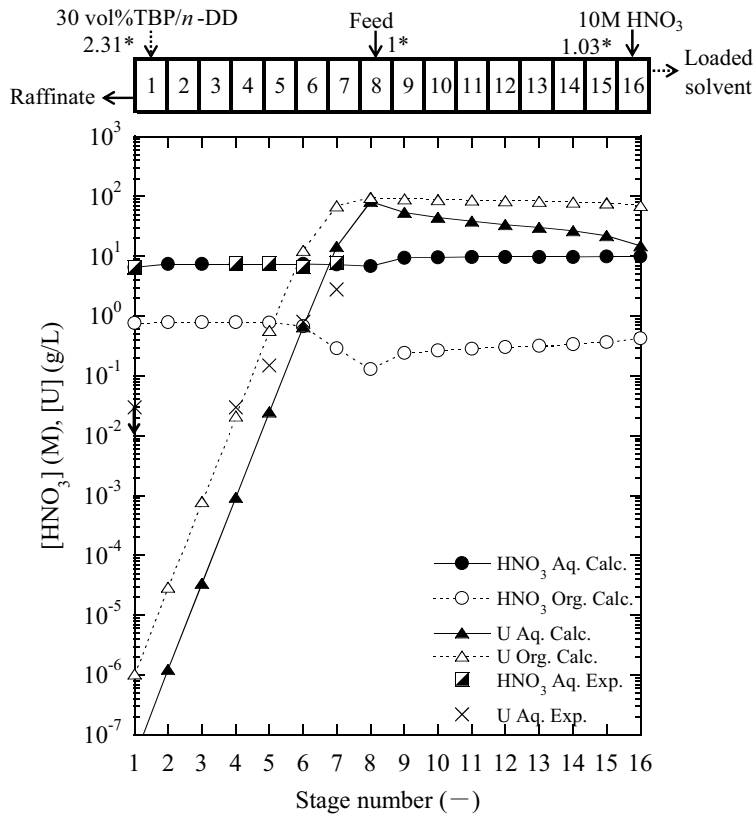


Figure 6 Concentration profiles of U in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 98.5% and 100% stage efficiency, respectively)

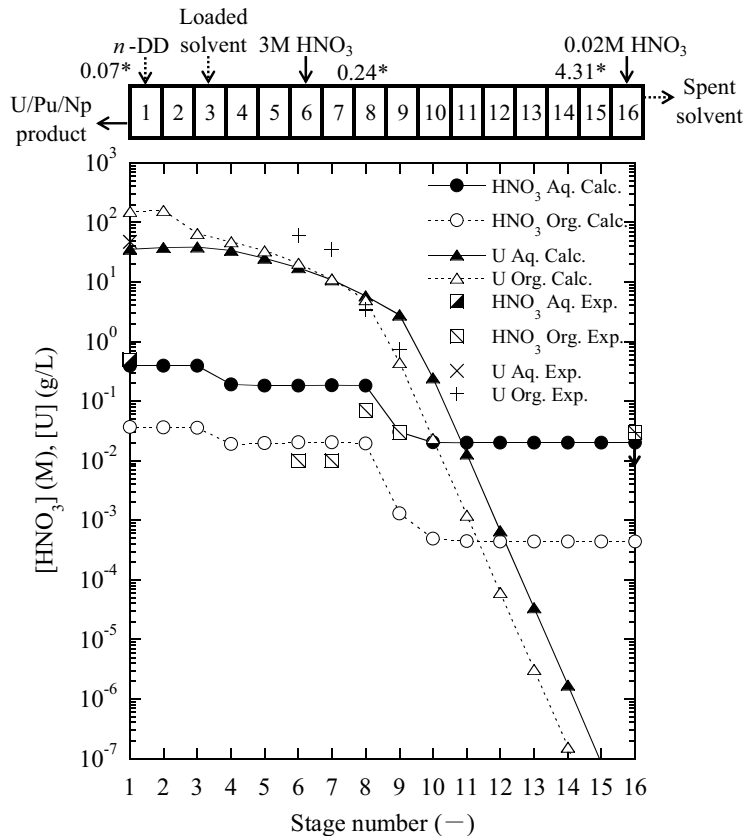


Figure 7 Concentration profiles of U in the stripping section (Calculation was carried out with 96% stage efficiency)

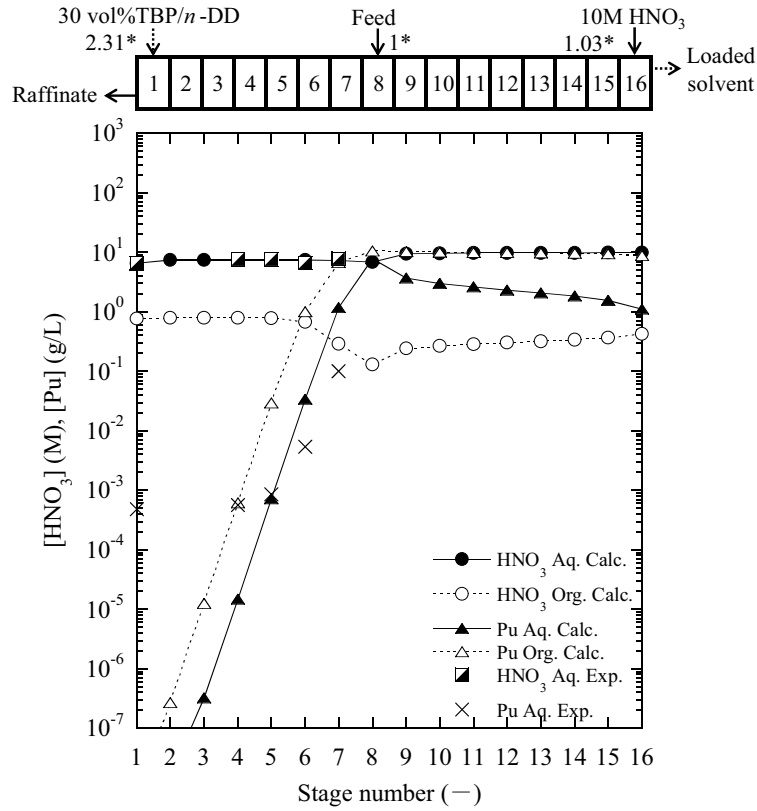


Figure 8 Concentration profiles of Pu in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 100% and 100% stage efficiency, respectively)

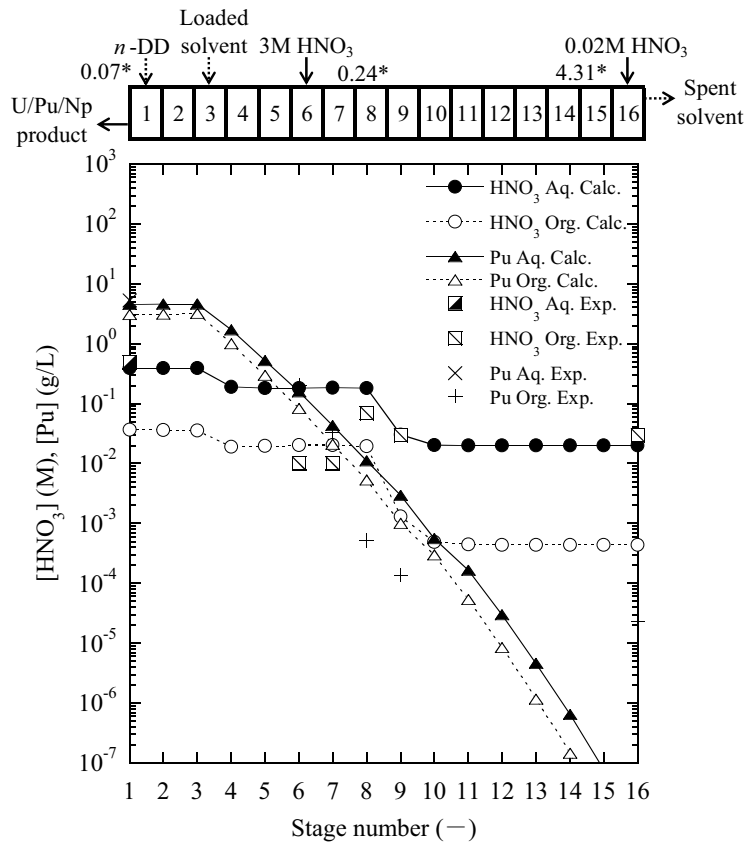


Figure 9 Concentration profiles of Pu in the stripping section (Calculation was carried out with 100% stage efficiency)

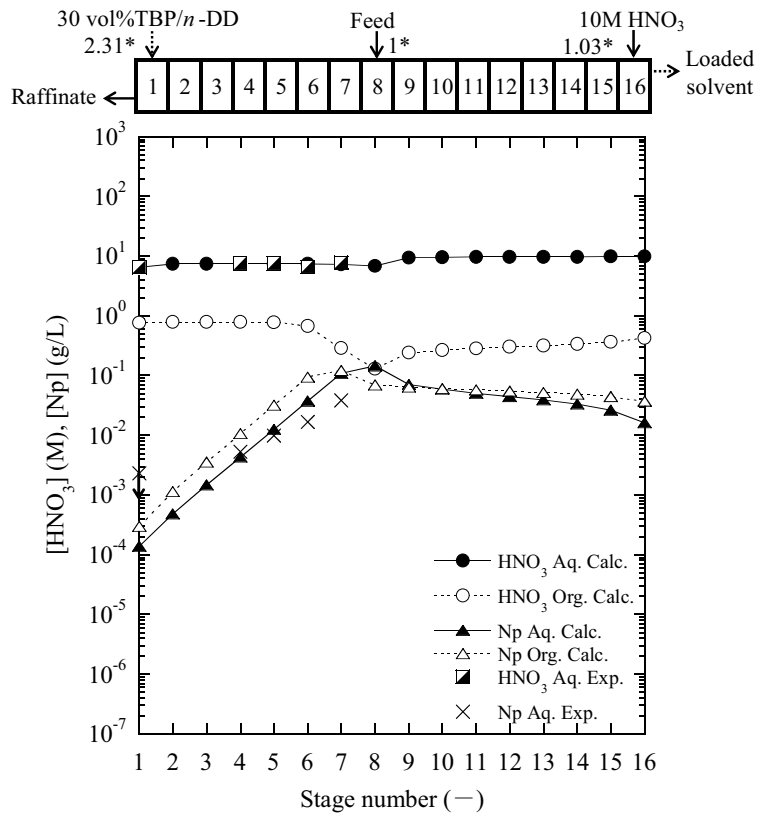


Figure 10 Concentration profiles of Np in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 78% and 98.5% stage efficiency, respectively)

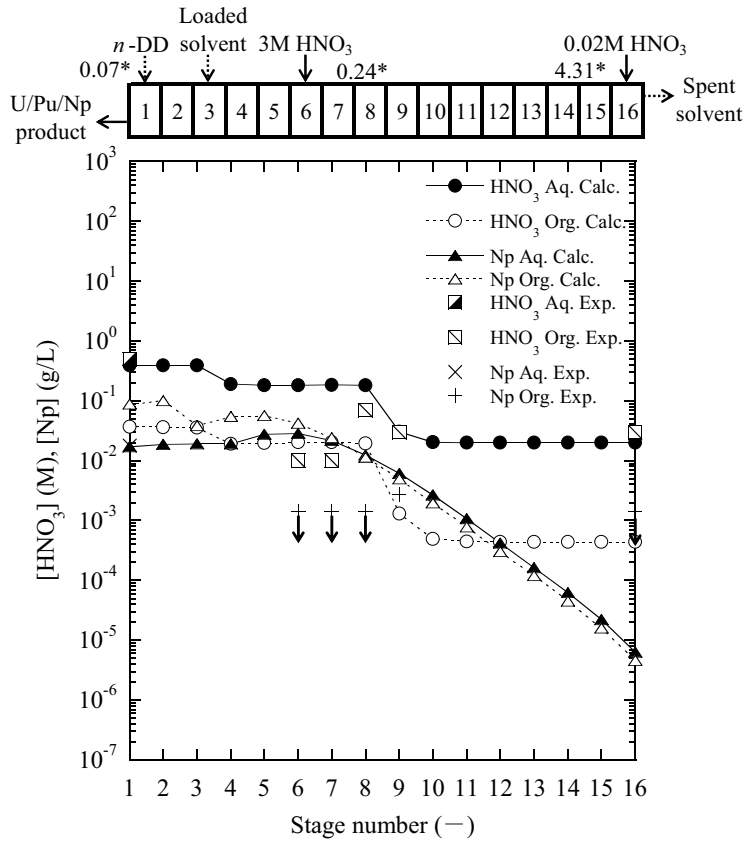


Figure 11 Concentration profiles of Np in the stripping section (Calculation was carried out with 94.5% stage efficiency)

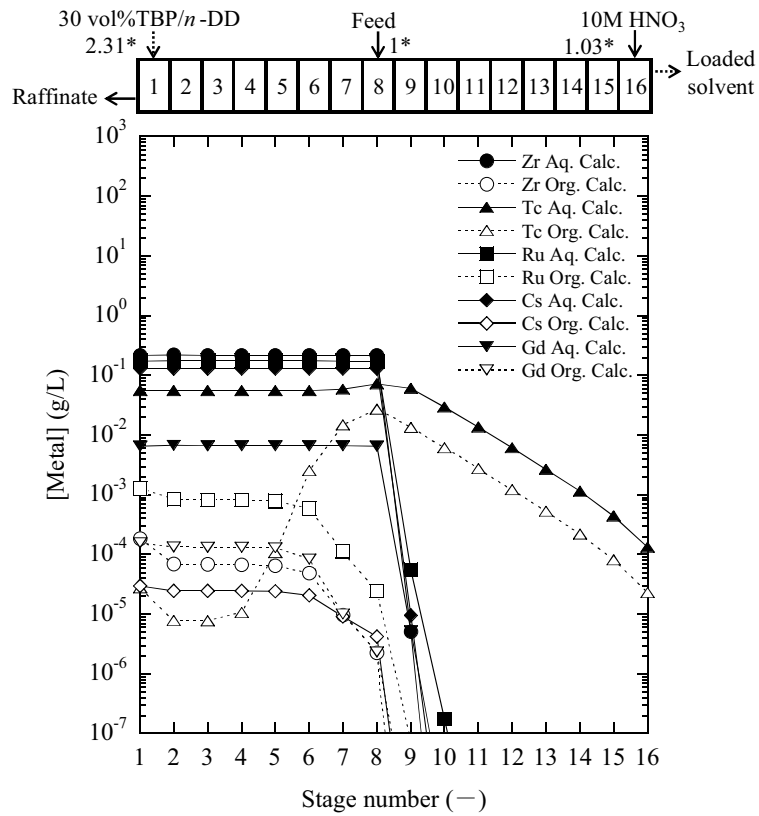


Figure 12 Concentration profiles of FPs in the extraction section and scrubbing section (Calculation was carried out with 100% and 100% stage efficiency, respectively)

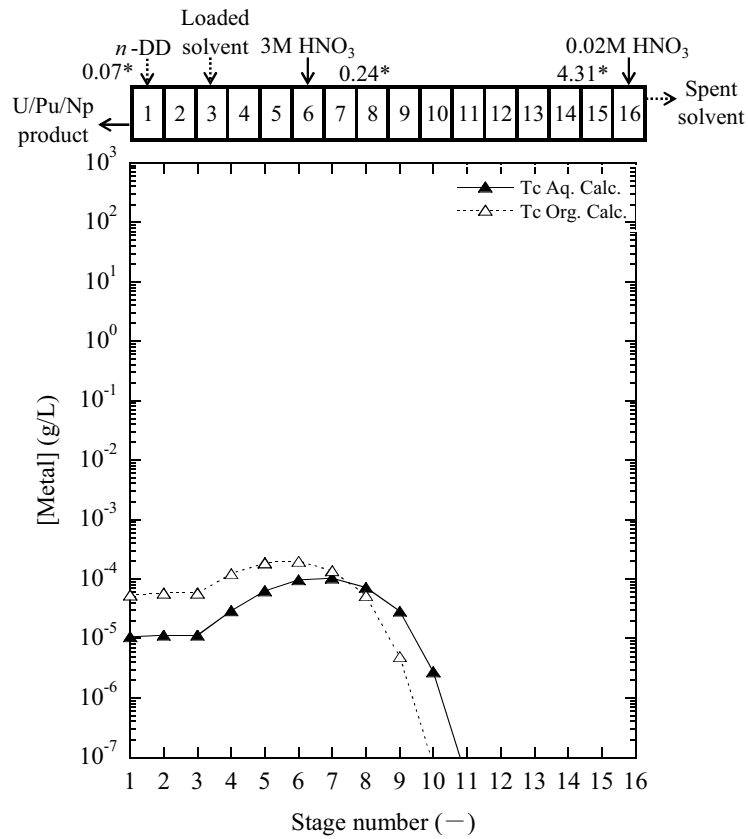


Figure 13 Concentration profiles of FPs in the stripping section (Calculation was carried out with 100% stage efficiency)

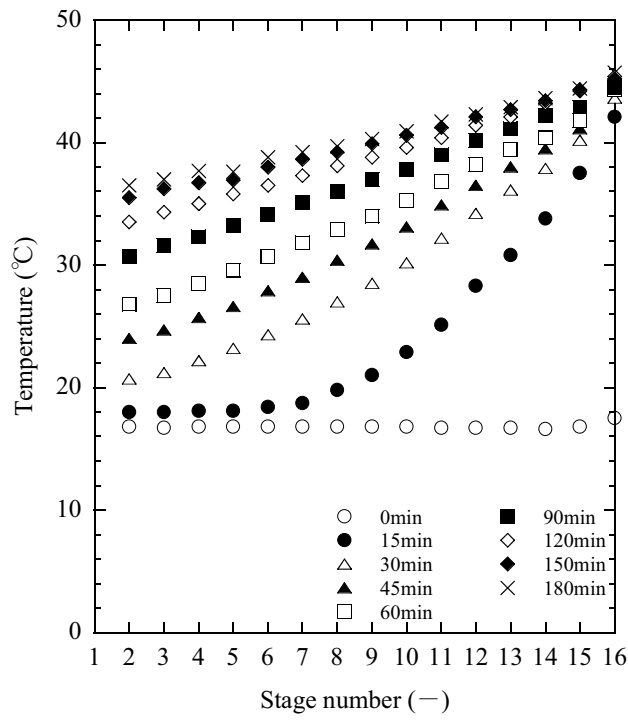


Figure 14 Temperature profiles in the centrifugal contactor

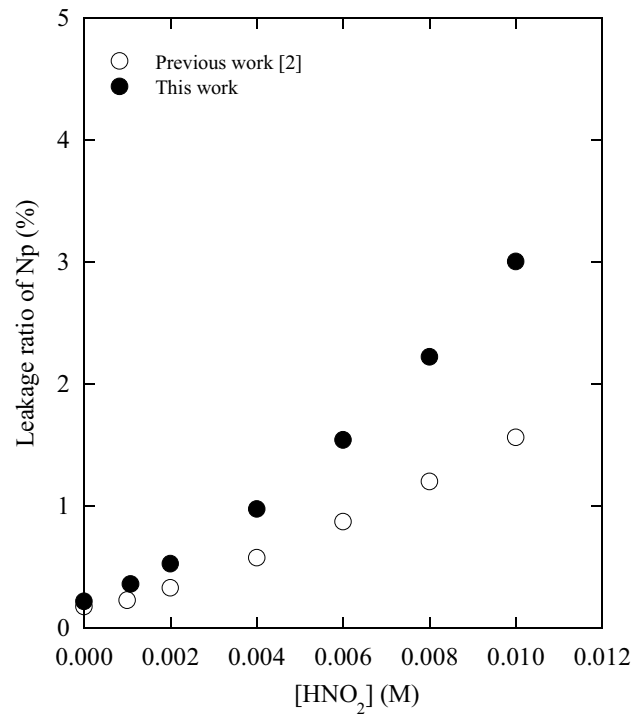


Figure 15 Leakage ratio of Np to the raffinate with HNO₂ concentration in the feed solution

Table 1 Composition of the irradiated MOX fuel

Experiment		Reprocessing experiment in 2007		
Fuel		“JOYO” Mk-I core fuel (FPPJX173)	“JOYO” Mk-II core fuel (FPFD209)	
Weight of element, Initial value	Pu (g)	~22	~22	
	Enriched U (g)	~103 [23.6 ^{*1}]	~57 [8.1 ^{*1}]	
	Depleted U (g)	~166 [0.4 ^{*1}]	~4	
	Natural U (g)	–	–	
Isotopic composition ^{*2}	Pu (%)	238	0.0 (0.0 ^{*3})	0.7 (0.7 ^{*3})
		239	76.7 (79.1 ^{*3})	68.4 (67.6 ^{*3})
		240	19.4 (19.6 ^{*3})	21.6 (26.0 ^{*3})
		241	3.3 (0.8 ^{*3})	6.8 (2.6 ^{*3})
		242	0.6 (0.5 ^{*3})	2.5 (3.1 ^{*3})
	U (%)	234	0.0 (0.0 ^{*3})	0.1 (0.2 ^{*3})
		235	8.9 (8.2 ^{*3})	13.4 (11.0 ^{*3})
		236	0.0 (0.2 ^{*3})	0.1 (0.8 ^{*3})
		238	91.1 (91.6 ^{*3})	86.4 (88.0 ^{*3})
		U enrichment		
– Initial value – (core, w/o)	23	13.4		
Pu enrichment				
– Initial value – (core, w/o)	18	29.1		
Burn up (MWd/t)	Ave. 13000	Ave. 54700		
Cooling time (day) ^{*4}	9813	6818		
Amount of radioactivity (TBq)	1.64	3.11		

*1 : Weight of ²³⁵U

*2 : Analysis value in fuel fabrication

*3 : Calculated value by ORIGEN2.1 after the cooling time

*4 : At May 7, 2007

Table 2 Composition of the feed solution (calculated value)

Element	Concentration (g/L)	Nuclide	Concentration (Bq/L)	Element	Concentration (g/L)	Nuclide	Concentration (Bq/L)
Ge	4.04×10^{-5}			U	1.48×10^2		
As	1.25×10^{-5}			Np	1.47×10^{-2}	^{237}Np	3.83×10^5
Se	1.59×10^{-3}			Pu	1.33×10^1		
Br	5.83×10^{-4}			Am	3.51×10^{-1}		
Rb	9.79×10^{-3}			Cm	4.74×10^{-5}		
Sr	2.29×10^{-2}	^{90}Sr	3.88×10^{10}				
Y	1.18×10^{-2}	^{90}Y	3.88×10^{10}				
		^{91}Y	0.00×10^0				
Zr	1.02×10^{-1}	^{95}Zr	0.00×10^0				
Nb	2.73×10^{-7}	^{95}Nb	0.00×10^0				
Mo	9.64×10^{-2}						
Tc	2.44×10^{-2}	^{99}Tc	1.53×10^7				
Ru	7.05×10^{-2}	^{106}Ru	5.78×10^5				
Rh	2.22×10^{-2}	^{106}Rh	5.78×10^5				
Pd	4.35×10^{-2}						
Ag	4.30×10^{-3}	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	3.54×10^0				
Cd	3.99×10^{-3}						
In	5.31×10^{-4}						
Sn	4.75×10^{-3}	^{123}Sn	1.75×10^{-7}				
Sb	1.13×10^{-3}	^{125}Sb	9.70×10^7				
Te	1.76×10^{-2}	$^{125\text{m}}\text{Te}$	2.37×10^7				
		^{127}Te	6.38×10^{-10}				
		$^{127\text{m}}\text{Te}$	6.51×10^{-10}				
Cs	9.65×10^{-2}	^{134}Cs	1.63×10^7				
		^{137}Cs	6.44×10^{10}				
Ba	5.41×10^{-2}						
La	3.57×10^{-2}						
Ce	6.60×10^{-2}	^{144}Ce	1.67×10^4				
Pr	3.39×10^{-2}	^{144}Pr	1.67×10^4				
Nd	1.13×10^{-1}						
Pm	2.47×10^{-5}	^{147}Pm	8.46×10^8				
Sm	3.01×10^{-2}	^{151}Sm	3.29×10^9				
Eu	2.81×10^{-3}	^{154}Eu	1.46×10^8				
		^{155}Eu	5.14×10^8				
Gd	2.30×10^{-3}						
Tb	144×10^{-4}						
Dy	8.19×10^{-5}						
Ho	3.14×10^{-6}						
Er	3.16×10^{-6}						

Table 3 Analysis plan

Process	Sampling		Concentration						Pu valence
	Point	Sample No.	U	Pu	HNO ₃	α	γ^{*4}	HNO ₂	Pu(IV)
Before Pu(IV) adjustment	Dissolver solution	19-F1-00-01A	○	○	○			○	○
After Pu(IV) adjustment	Feed solution	19-F1-00-02A	○	○	○	○*2	○	○	○
120 min after starting hot operation*1	Spent solvent	19-B16-120-01O	○	○	○	○*3	○		
	Product	19-B1-120-01A	○	○	○	○*2	○	○	
	Raffinate	19-A1-120-01A	○	○	○	○*3	○	○	
	Stripping section 9 th stage/Org.	19-B9-120-01O	○	○	○	○*3	○		
	Stripping section 8 th stage/Org.	19-B8-120-01O	○	○	○	○*3	○		
	Stripping section 7 th stage/Org.	19-B7-120-01O	○	○	○	○*3	○		
	Stripping section 6 th stage/Org.	19-B6-120-01O	○	○	○	○*3	○		
	Extraction section 4 th stage/Aq.	19-A4-120-01A	○	○	○	○*3	○	○	
	Extraction section 5 th stage/Aq.	19-A5-120-01A	○	○	○	○*3	○	○	
	Extraction section 6 th stage/Aq.	19-A6-120-01A	○	○	○	○*3	○	○	
	Extraction section 7 th stage/Aq.	19-A7-120-01A	○	○	○	○*3	○	○	
	Raffinate	19-A1-SB-02A	○	○	○	○*3	○		
After operation	Product (1)*5	19-B1-SB-02A1	○	○	○	○*2	○		
	Product (2)*5	19-B1-SB-02A2	○	○	○	○*2	○	○	
	Spent solvent	19-B16-SB-02O1	○	○	○	○*3	○		

*1 Sampled in descending order

*2 ²³⁷Np

*3 ²³⁹Pu+²⁴⁰Pu, ²³⁸Pu+²⁴¹Am and ²³⁷Np

*4 Total- γ

*5 (1)Acid equilibrium, (2)Hot operation and after operation

Table 4 Results of analysis

Process	Point	Sample No.	Concentration											Total-γ (Bq/mL)				
			HNO ₃ (mol/L)	HNO ₂ (mol/L)	U (g/L)	Pu (g/L)	²³⁷ Np (Bq/mL)	²³⁹ Pu+ ²⁴⁰ Pu (Bq/mL)	²³⁸ Pu+ ²⁴¹ Am (Bq/mL)	⁹⁵ Zr (Bq/mL)	¹³⁴ Cs (Bq/mL)	¹³⁷ Cs (Bq/mL)	¹⁵⁴ Eu (Bq/mL)		¹⁵² Eu (Bq/mL)			
Before Pu(V) adjustment Alter Pu(V) adjustment	Dissolver solution	19-F1-00-01A	3.60×10 ⁰	9.00×10 ¹	1.80×10 ¹													
	Feed solution	19-F1-00-02A	3.90×10 ⁰	1.08×10 ⁻³	1.70×10 ²	2.10×10 ¹	2.57×10 ³	7.56×10 ⁷	1.45×10 ⁸	4.84×10 ⁴	5.88×10 ⁴	1.72×10 ⁸	6.14×10 ⁵	1.09×10 ⁶	1.74×10 ⁸			
120min after starting hot operation	Spent solvent	19-B16-120-01O	3.00×10 ⁻²	<3.00×10 ⁻²	2.33×10 ⁻⁵	8.09×10 ¹	5.43×10 ¹	<7.40×10 ¹	<7.40×10 ¹	9.43×10 ¹	9.43×10 ¹	<7.40×10 ¹	<7.40×10 ¹	<7.40×10 ¹	9.43×10 ¹			
	Product	19-B1-120-01A	5.00×10 ⁻¹	2.98×10 ⁻⁴	4.72×10 ¹	5.30×10 ⁰	4.63×10 ²	<3.70×10 ⁴	<3.70×10 ⁴	4.65×10 ²	4.65×10 ²	<3.70×10 ⁴	<3.70×10 ⁴	<3.70×10 ⁴	4.65×10 ²			
	Raffinate	19-A1-120-01A	6.50×10 ⁰	1.70×10 ⁻⁴	<3.00×10 ⁻²	4.83×10 ⁻⁴	6.00×10 ¹	1.68×10 ³	5.35×10 ⁷	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	9.61×10 ⁷	3.85×10 ⁵	5.73×10 ⁵	9.71×10 ⁷			
	Stripping section 9 th stage/Org.	19-B9-120-01O	3.00×10 ⁻²	7.40×10 ⁻¹	1.36×10 ⁻⁴	7.05×10 ¹	7.05×10 ¹	4.74×10 ²	1.17×10 ³	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	2.64×10 ²	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	2.64×10 ²			
	Stripping section 8 th stage/Org.	19-B8-120-01O	7.00×10 ⁻²	3.40×10 ⁰	5.23×10 ⁻⁴	1.82×10 ³	9.91×10 ²	1.82×10 ³	9.91×10 ²	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	8.20×10 ¹	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	8.20×10 ¹			
	Stripping section 7 th stage/Org.	19-B7-120-01O	<1.00×10 ⁻²	3.50×10 ¹	3.28×10 ⁻²	1.14×10 ⁵	5.96×10 ⁴	1.14×10 ⁵	5.96×10 ⁴	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	7.63×10 ¹	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	7.63×10 ¹			
	Stripping section 6 th stage/Org.	19-B6-120-01O	1.00×10 ⁻²	6.10×10 ¹	2.00×10 ⁻¹	6.97×10 ⁵	4.06×10 ⁵	6.97×10 ⁵	4.06×10 ⁵	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	4.80×10 ¹	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	4.80×10 ¹			
	Extraction section 4 th stage/Aq.	19-A4-120-01A	7.50×10 ⁰	1.96×10 ⁻⁴	<3.00×10 ⁻²	5.63×10 ⁻⁴	1.38×10 ²	1.96×10 ³	5.83×10 ⁷	3.76×10 ⁴	3.76×10 ⁴	9.27×10 ⁷	3.55×10 ⁵	5.30×10 ⁵	9.37×10 ⁷			
	Extraction section 5 th stage/Aq.	19-A5-120-01A	7.50×10 ⁰	1.45×10 ⁻⁴	1.50×10 ⁻¹	8.51×10 ⁻⁴	2.56×10 ²	2.96×10 ³	6.19×10 ⁷	<3.70×10 ⁴	<3.70×10 ⁴	9.64×10 ⁷	4.03×10 ⁵	7.97×10 ⁵	9.76×10 ⁷			
	Extraction section 6 th stage/Aq.	19-A6-120-01A	6.60×10 ⁰	1.23×10 ⁻⁴	8.00×10 ⁻¹	5.40×10 ⁻³	4.37×10 ²	1.88×10 ⁴	5.94×10 ⁷	<3.70×10 ⁴	<3.70×10 ⁴	9.71×10 ⁷	3.10×10 ⁵	8.70×10 ⁵	9.83×10 ⁷			
	Extraction section 7 th stage/Aq.	19-A7-120-01A	7.80×10 ⁰	2.77×10 ⁻⁴	2.80×10 ⁰	1.00×10 ⁻¹	9.97×10 ²	3.48×10 ⁵	5.76×10 ⁷	<3.70×10 ⁴	<3.70×10 ⁴	9.52×10 ⁷	4.19×10 ⁵	9.07×10 ⁵	9.66×10 ⁷			
	Raffinate	19-A1-SB-02A	5.40×10 ⁰	2.55×10 ⁻⁵	<3.00×10 ⁻²	5.58×10 ⁻⁴	5.35×10 ¹	1.94×10 ³	3.08×10 ⁷	<3.70×10 ⁴	<3.70×10 ⁴	5.27×10 ⁷	1.69×10 ⁵	4.56×10 ⁵	5.33×10 ⁷			
	Product (1)	19-B1-SB-02A1	6.00×10 ⁻¹	2.77×10 ⁻⁵	<3.00×10 ⁻²	<2.00×10 ⁻¹	<7.40×10 ⁰			<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	2.04×10 ³	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	2.04×10 ³			
	Product (2)	19-B1-SB-02A2	1.20×10 ⁰	2.11×10 ⁻⁴	2.80×10 ¹	3.50×10 ⁰	3.55×10 ²	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	5.69×10 ²	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	5.69×10 ²			
Spent solvent	19-B16-00-02A1	<1.00×10 ⁻²	<3.00×10 ⁻²	1.15×10 ⁻⁴	4.01×10 ²	2.41×10 ³	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	2.07×10 ²	<3.70×10 ¹	<3.70×10 ¹	2.07×10 ²				

Table 5 Mass balances of actinide elements and FPs

Process	Point	U (%)	Pu (%)	²³⁷ Np (%)	¹³⁷ Cs (%)	¹⁵⁴ Eu (%)	¹⁵⁵ Eu (%)
Before operation	Feed solution	1.00×10 ²	1.00×10 ²	1.00×10 ²	1.00×10 ²	1.00×10 ²	1.00×10 ²
120min after starting hot operation	Raffinate	<3.59×10 ^{-2*1}	4.68×10 ⁻³	4.75×10 ⁰	1.14×10 ²	1.27×10 ²	1.07×10 ²
	Product	1.15×10 ²	1.04×10 ²	7.43×10 ¹	1.12×10 ⁻³	<2.49×10 ^{-2*3}	<1.40×10 ^{-2*3}
	Spent solvent	<3.55×10 ^{-2*1}	2.23×10 ⁻⁴	<5.80×10 ^{-1*2}	1.10×10 ⁻⁴	<2.43×10 ^{-2*3}	<1.37×10 ^{-2*3}
After operation	Raffinate	<5.29×10 ^{-2*1}	7.97×10 ⁻³	6.25×10 ⁰	9.19×10 ¹	8.26×10 ¹	1.26×10 ²
	Product	1.09×10 ²	1.10×10 ²	9.12×10 ¹	7.83×10 ⁻³	<3.98×10 ^{-2*3}	<2.24×10 ^{-2*3}
	Spent solvent	<5.82×10 ^{-2*1}	1.81×10 ⁻³	<9.50×10 ^{-1*2}	3.97×10 ⁻⁴	<1.99×10 ^{-2*3}	<1.12×10 ^{-2*3}

*1: Under the analytical lower limit (<0.03g/L)

*2: Under the analytical lower limit (<7.4Bq/mL)

*3: Under the analytical lower limit (<37Bq/mL)

Table 6 Abundance ratios of actinide elements and FPs

Process	Point	U (%)	Pu (%)	²³⁷ Np (%)	¹³⁷ Cs (%)	¹⁵⁴ Eu (%)	¹⁵⁵ Eu (%)
120min after starting hot operation	Raffinate	<3.13×10 ^{-2*1}	4.49×10 ⁻³	5.96×10 ⁰	9.99×10 ¹	9.99×10 ¹	9.99×10 ¹
	Product	9.99×10 ¹	9.99×10 ¹	9.33×10 ¹	9.82×10 ⁻⁴	<1.95×10 ^{-2*3}	<1.31×10 ^{-2*3}
	Spent solvent	<3.10×10 ^{-2*1}	2.15×10 ⁻⁴	<7.28×10 ^{-1*2}	9.72×10 ⁻⁵	<1.90×10 ^{-2*3}	<1.28×10 ^{-2*3}
After operation	Raffinate	<4.87×10 ^{-2*1}	7.25×10 ⁻³	6.35×10 ⁰	9.99×10 ¹	9.99×10 ¹	9.99×10 ¹
	Product	9.99×10 ¹	9.99×10 ¹	9.27×10 ¹	8.52×10 ⁻³	<4.81×10 ^{-2*3}	<1.78×10 ^{-2*3}
	Spent solvent	<5.35×10 ^{-2*1}	1.64×10 ⁻³	<9.66×10 ^{-1*2}	4.32×10 ⁻⁴	<2.41×10 ^{-2*3}	<8.92×10 ^{-3*3}

*1: Under the analytical lower limit (<0.03g/L)

*2: Under the analytical lower limit (<7.4Bq/mL)

*3: Under the analytical lower limit (<37Bq/mL)

Table 7 Decontamination factors of FPs and total-γ for U and Pu product

	¹³⁷ Cs	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	Total-γ
Decontamination factor	5.0×10 ⁴	>2.8×10 ³	>4.9×10 ³	5.1×10 ⁴

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 ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

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3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ² ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェブエー	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルクス	lx	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー当量, カーマン線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 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“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・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 ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	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 ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb = 1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 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
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

