

N, N-di-(2-ethyl)hexylbutanamideによる
U-Pu 抽出分離プロセスの検討
-簡易計算コードによるUおよびPuの分離挙動解析-
Study on Extraction Process for U-Pu Separation
using N,N-di-(2-ethyl)hexylbutanamide
-Analysis of Separation Behavior of U and Pu by a Simple Calculation Code-

伴 康俊 朝倉 俊英 森田 泰治
Yasutoshi BAN, Toshihide ASAKURA and Yasuji MORITA

原子力基礎工学研究部門
湿式分離プロセス化学研究グループ
Research Group for Aqueous Separation Process Chemistry
Nuclear Science and Engineering Directorate

November 2006

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

N,N-di-(2-ethyl)hexylbutanamide による U-Pu 抽出分離プロセスの検討

- 簡易計算コードによる U および Pu の分離挙動解析 -

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット

伴 康俊、朝倉 俊英、森田 泰治

(2006 年 10 月 13 日受理)

N,N-di-(2-ethyl)hexylbutanamide(D2EHBA)を U と Pu の分離に適用した場合における、ミキサセトラ型抽出器での U および Pu の抽出挙動を簡易計算コードにて解析した。解析は U および Pu の分配比の硝酸濃度依存性および元素濃度依存性を考慮して行い、Pu の還元剤を用いることなく硝酸濃度調節による U と Pu の分離を可能とするフローシートを得た。このフローシートに基づくと、Pu 溶液における U/Pu 比は 1.06 であり、ラフィネートおよび Pu 溶液側へ移行する Pu の割合は、それぞれ 0.1%未満および 99.9%以上と計算された。

本フローシートでは、U 回収溶媒あるいは Pu 逆抽出液の流量が-10% ~ +10%の範囲で変化しても U 溶液側へ移行する Pu の割合は 0.1%未満である。また、フィード液に含まれる Pu の濃度範囲が 1 ~ 30 g(Pu)/dm³ の場合、Pu 逆抽出液の流量あるいは硝酸濃度を調節することによって Pu 溶液中の U 量を適切に調節できる。

これらの結果は、D2EHBA を抽出剤として用いる再処理プロセスに基本的成立性があることを示している。

Study on Extraction Process for U-Pu Separation using N,N-di-(2-ethyl)hexylbutanamide
- Analysis of Separation Behavior of U and Pu by a Simple Calculation Code -

Yasutoshi BAN, Toshihide ASAKURA and Yasuji MORITA

Division of Fuels and Materials Engineering
Nuclear Science and Energy Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 13, 2006)

Extraction behavior of U and Pu by N,N-di-(2-ethyl)hexylbutanamide (D2EHBA) in a mixer-settler type extractor was analyzed by a simple calculation code. Analysis was carried out with the consideration of acid and element concentration effects on the distribution ratios of U and Pu. A flow-sheet that gives the separation of U and Pu by adjusting nitric acid concentration without the use of Pu reductant was obtained. According to the analysis based on this flow sheet, U/Pu ratio in the Pu product stream, the ratio of Pu in raffinate, and the ratio of Pu in the Pu product stream were 1.06, less than 0.1%, and more than 99.9%, respectively.

The ratio of Pu in the U product stream kept less than 0.1% when the flow rate of U recovering solvent or Pu scrub solution changed in the range of -10% to +10%. Furthermore, the U concentration in the Pu product stream is appropriately adjustable in the cases of Pu concentration in feed is within the range of 1 to 30 g(Pu)/dm³ by changing the flow rate and/or the nitric acid concentration of Pu scrub solution.

These results indicate the feasibility of reprocessing process where D2EHBA is used as an extractant.

Keywords: Reprocessing, Extraction, Mixer-settler, Simulation Code, N,N-dialkyl Monoamide, U, Pu

目 次

1 . 緒言	1
2 . 解析方法	2
2.1 計算コード	2
2.2 Easy Code の概要	3
2.3 想定プロセスおよび分配比計算式	4
3 . 解析結果	6
3.1 抽出器 1 の検討	6
3.2 抽出器 2 の検討	7
3.2.1 U-Pu 分離部段数依存性	7
3.2.2 U 回収部段数依存性	7
3.3 U 回収溶媒流量および Pu 逆抽出液流量依存性	8
3.4 高濃度 Pu フィード液への対応	8
4 . 結言	9
謝辞	9
参考文献	10

Contents

1 . Introduction	1
2 . Analytical method	2
2.1 Calculation code	2
2.2 Outline of “Easy Code”	3
2.3 Assumed process and distribution ratio	4
3 . Results	6
3.1 Discussion on extractor 1	6
3.2 Discussion on extractor 2	7
3.2.1 Dependencies on U-Pu separation stage number	7
3.2.2 Dependencies on U recovery stage number	7
3.3 Dependencies on the flow rates for U recovery and Pu back extraction	8
3.4 Measures for the feed solutions of high Pu content	8
4 . Conclusions	9
Acknowledgements	9
References	10

1. 緒言

PUREX プロセスのように、抽出法を主要な分離手法に採用した湿式再処理プロセスでは、抽出剤の特性がプロセスの性能を決定する大きな因子となる。このため、抽出法による湿式再処理プロセスの高度化および合理化(例えばプロセスの簡素化、装置規模の縮小、廃棄物の発生量低減など)を図るための手段の一つとして、TBP よりも優れた特性を持つ抽出剤の適用が考えられる。

TBP と同様に 4 価および 6 価のアクチノイドに対して高い抽出特性を持ち、再処理プロセスにおける抽出剤として着目されている化合物の一つに N,N-ジアルキルモノアミド(モノアミド)がある。モノアミドは TBP と同等あるいはそれ以上の耐放射線性を持ち、放射線劣化物として生成するアミンあるいはカルボン酸は抽出分離プロセスに対して大きな影響を及ぼさないことが示されている^{1),2)}。また、リンを含まないモノアミドは焼却等による完全ガス化分解が可能であり、TBP とは異なりリンを含む廃棄物を生成しない。さらに、後述するようにモノアミドの U および Pu に対する抽出特性の酸濃度依存性を活用すれば、再処理プロセスの簡素化および取り扱い物質量低減の可能性もある。

このような理由から、TBP の代替抽出剤としてモノアミドが提案されており、U(VI)、Th(IV)、および Pu(IV)等に対する種々のモノアミドの抽出特性³⁾⁻¹³⁾、量子化学計算に基づく抽出特性の電子密度および立体因子依存性^{14),15)}、モノアミドの二量化および水和特性¹⁶⁾、線照射が抽出特性に与える影響^{1),9),17)}等に関する研究が行われている。

分子内に枝分かれ鎖のあるアルキル基を持つモノアミドは、錯体形成時における立体障害の影響から 4 価よりも 6 価の金属イオンに対する分配比が比較的高くなる^{13),18)}。このようなモノアミドを用いることによって、再処理プロセスにおいて取扱量が最も多い元素である U(VI)をプロセスの初期段階で粗分離し、その後の工程の負担を軽減する抽出分離プロセスが提案されている^{19),20)}。抽出分離法は他の U の粗分離法、例えば晶析法²¹⁾、フッ化物揮発法²²⁾、および沈殿法²³⁾などと比べると装置規模の小型化は難しいが、高い除染係数が得られるという特徴がある。また、U(VI)に対する選択的抽出特性の高さを活用し、U 粗分離だけでなくトリウム燃料における U(VI)と Th(IV)の分離にもモノアミドの適用が検討されている^{8),24)-26)}。

モノアミドの U(VI)および Pu(IV)に対する分配比は、比較的硝酸濃度の濃い条件(3 ~ 5 M 程度)では高く、硝酸濃度が薄い条件(0.01 ~ 1 M 程度)では低い値を示す。これらの分配比は、モノアミド分子の窒素あるいはカルボニル炭素に結合しているアルキル基の種類によって変化し、比較的硝酸濃度の薄い条件における Pu(IV)に対する分配比が、U(VI)に対する分配比の 10 分の 1 から 100 分の 1 程度の値を示すモノアミドも合成されている^{2),24),27),28)}。このように分配比が特徴的な硝酸濃度依存性を示すモノアミドを用いることにより、硝酸濃度の高い条件で U および Pu を抽出し、その後適当な濃度の希硝酸で Pu を逆抽出すれば、Pu の還元剤を必要としない U-Pu 相互分離プロセス構築の可能性もある。Pu の還元は U(IV)あるいは硝酸ヒドロキシルアミンのよ

うな還元剤を添加する手法が用いられている場合が多く、いずれもプロセス内で取り扱う物質を増加させる。従って、モノアミドの適用により硝酸濃度調整でUとPuを分離することができれば、特にPu濃度の高い燃料を再処理する場合、U-Pu分離工程における取り扱い物質の削減効果が大きく、再処理の経済性向上につながる。これまでにミキサセトラによる連続抽出系においてN,N-di(2-ethylhexyl)hexanamide [(C₄H₉CH(C₂H₅)CH₂)₂NCOC₅H₁₁]²⁾、およびN,N-di(2-ethylhexyl)isobutanamide [(C₄H₉CH(C₂H₅)CH₂)₂NCOCH(CH₃)₂]とN,N-di(2-ethylhexyl)butanamide [(C₄H₉CH(C₂H₅)CH₂)₂NCOC₃H₇] (D2EHBA)の混合溶媒²⁹⁾を適用した試験が行われており、共抽出部を経てU-Pu分離部に移行したPuのうち95.5%、および99.994%がPu溶液側に回収されることが示されている。さらに、N,N-di(n-butyl)n-octanamide [(C₄H₉)₂NCOC₇H₁₅]を用いた連続抽出系におけるUとPuの共抽出試験、およびUとPuの分離試験も行われている。このうち、UとPuの共抽出試験では、UおよびPuの抽出率として99.99%以上および97.59%以上の値がそれぞれ得られている。また、UとPuの分離試験におけるPuの逆抽出率は93.86%である³⁰⁾。

バッチ法で得られたU(VI)およびPu(IV)の分配比^{27),29)}によると、硝酸濃度調整によるUとPuの相互分離はD2EHBAを単独で用いた場合でも行える可能性がある。本研究では分配比が特徴的な硝酸濃度依存性を示すモノアミドとしてD2EHBAに着目し、D2EHBAを適用した再処理プロセスの基本的成立性の評価、およびプロセスの設定条件が分離特性に与える影響を把握するために、UおよびPuの移行挙動解析を行った。

2. 解析方法

2.1 計算コード

現在多数存在している抽出プロセスの解析コードは、詳細かつ吟味された種々の基礎データに基づいて、溶解工程や抽出分離工程の元素挙動を多面的に解析している。このような解析コードは、例えばTBP-硝酸水溶液系のように十分な基礎データが提供されている系については有効である。

一方、本報告で扱うモノアミド系には上述のような解析コードの実行に必要な基礎データが必ずしも十分に揃えられていない。このような状況においても、現象の初期段階の評価を簡易的に実施できる計算コードがあれば、分配挙動データが十分に得られていない新しい抽出剤を適用したプロセスの基本的成立性を評価できる。本研究では分配比、元素濃度、および段数等の基本的なパラメータ設定に基づいて、定常状態におけるミキサセトラ内の元素の濃度分布解析を行う簡易計算コード「Easy Code」を使用した。

2.2 Easy Code の概要

Easy Code はミキサセトラ型抽出器を評価対象とし、定常状態における濃度分布を解析する計算コードである。入力項目は抽出器の数、各抽出器の段数、抽出器内の溶液流量、各供給液に含まれる元素の種類と濃度、分配比計算式、および段効率である。各抽出器は、前の抽出器の右端から排出される有機相によって次の抽出器の任意段に接続され、各抽出器の任意段に有機相あるいは水相を供給できる(図 1)。なお、化学反応およびエントレインメントは考慮しない。

入力項目には下記のような制限事項がある。

- ・ 抽出器の最大数：6 器
- ・ 各抽出器の最大段数：30 段
- ・ 抽出器内の溶液流量：供給液に対する比で 0.05 ~ 20
- ・ 供給液中に含まれる元素の種類数の最大数：50 種

各段は、ミキサ部とセトラ部から構成されるとしている。ただし、セトラ部は濃度計算に対して影響を与えないため、各段はミキサ部のみからなると考えても本質的には同じである。

i 段目の分離段に出入りする溶液の量および濃度を図 2 に示す。この図において B 、 W 、 X 、および Y は、それぞれ有機相流量、水相流量、着目成分の水相濃度、および着目成分の有機相濃度である。また、添え字 i および f は、それぞれ段数および供給溶液を示す。

エントレインメントがない場合、 i 段目のマスバランスは(1)式で与えられる。

$$W^i \cdot X^i + B^i \cdot Y^i = W_f^i \cdot X_f^i + B_f^i \cdot Y_f^i + W^{i+1} \cdot X^{i+1} + B^{i-1} \cdot Y^{i-1} \quad (1)$$

水相および有機相における着目成分の抽出平衡到達濃度をそれぞれ X^* および Y^* 、平衡分配比を D とおくとその定義から次式が成り立つ。

$$Y^* = D \cdot X^* \quad (2)$$

実際は単位分離段で完全に抽出平衡に到達することはないため、段効率を考慮する必要がある。本コードではマーフリー(Murphree)の段効率を使用している。

有機相を基準とした場合、マーフリー(Murphree)の段効率 E^i は(3)式で与えられる。

$$E^i = \frac{Y^i - Y_{in}}{Y_i^* - Y_{in}} \quad (3)$$

ここで、 Y_i^* は水相濃度 X^i に対する有機相の平衡濃度であり、 i 段目の平衡時の分配比を D^i とすると、(4)式で与えられる^{31),32)}。

$$Y_i^* = D^i \cdot X^i \quad (4)$$

また、 Y_{in} は(5)式で与えられる。

$$Y_{in} = \frac{B^{i-1}Y^{i-1} + B_f^i \cdot Y_f^i}{B^i} \quad (5)$$

なお、本コードでは有機相および水相共に体積変化がないとしているので、 $B^i = B^{i-1} + B_f^i$ である。

(3)および(4)式から(6)式を得る。

$$Y^i = E^i \cdot D^i \cdot X^i + (1 - E^i) \cdot Y_{in} \quad (6)$$

(1)、(5)、および(6)式より、(7)式を得る。

$$X^i = \frac{W_f^i \cdot X_f^i + B_f^i \cdot E^i \cdot Y_f^i + W^{i+1} \cdot X^{i+1} + B^{i-1} \cdot E^i \cdot Y^{i-1}}{W^i + B^i \cdot E^i \cdot D^i} \quad (7)$$

(6)および(7)式に基づいて、ミキサセトラ各段の元素濃度を計算する。

分配比計算式は下記 2 種類の手法を各元素に対して選択する。

あらかじめ組み込まれた 20 種類程度の分配比計算式の中からひとつを指定して、それに必要な係数を入力する手法

抽出剤濃度、着目元素あるいは他の元素の濃度およびそれらの濃度の和をパラメータとして分配比計算式を作成する手法（これをインタープリター機能と呼ぶ）

のインタープリター機能を利用することにより、必要データが十分に揃わない状況でも、基礎試験の結果から推定した分配比計算式、あるいは任意に設定した分配比計算式を用いて定常状態における元素の移行挙動が計算できる。

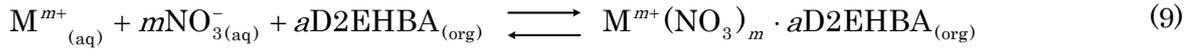
2.3 想定プロセスおよび分配比計算式

本研究では、図 3 に示すように 2 器の抽出器からなるプロセスの解析を行う。抽出器 1 は U-Pu 抽出部と FP 洗浄部、抽出器 2 は U 回収部と U-Pu 分離部から構成されている。抽出器 1 の 1 段目からラフィネートが排出され、抽出器 1 の最終段から排出される有機相が抽出器 2 に供給される。抽出器 2 の 1 段目、および最終段から排出される水相溶液、および有機相溶液をそれぞれ Pu 溶液、および U 溶液とする。

平衡状態において、有機相および水相に存在する化学種 M の濃度をそれぞれ $[M_{(org)}]$ および $[M_{(aq)}]$ とおくと、分配比 D_M は次式で与えられる。

$$D_M = \frac{[M_{(org)}]}{[M_{(aq)}]} \quad (8)$$

D2EHBA が水相に存在する m 価 ($m > 0$) の化学種 M を有機相に抽出する系を考える。この時、(9)式に示す抽出反応の平衡定数を K_M とすると、 K_M は(10)式で表される。



$$K_M = \frac{[M(NO_3)_m \cdot aD2EHBA_{(org)}]}{[M^{m+}_{(aq)}] \cdot [NO_{3(aq)}^-]^m \cdot [D2EHBA_{(org)}]^a} \quad (10)$$

ここで、 a は配位数、 $[\]$ は各化学種の濃度を示している。

着目した反応系において、(9)式以外の抽出反応が起こらないと仮定すると、 $[M_{(org)}]$ および $[M_{(aq)}]$ は近似的に(11)および(12)式で与えられる。

$$[M_{(org)}] = [M(NO_3)_m \cdot aD2EHBA_{(org)}] \quad (11)$$

$$[M_{(aq)}] = [M^{m+}_{(aq)}] \quad (12)$$

これより、(13)式が得られる。

$$D_M = K_M \cdot [NO_{3(aq)}^-]^m \cdot [D2EHBA_{(org)}]^a \quad (13)$$

D2EHBA 濃度が $1 \text{ mol/dm}^3(\text{M})$ の条件における U および Pu の分配比の硝酸濃度依存性が調べられており²⁷⁾、その結果に基づくと(14)および(15)式が得られる。

$$D_U = 1.546[HNO_{3(aq)}]^{1.700} \quad (14)$$

$$D_{Pu} = 5.156 \times 10^{-2} [HNO_{3(aq)}]^{2.699} \quad (15)$$

ここで、 $[HNO_{3(aq)}]$ は水相の硝酸濃度である。(14)および(15)式から求めた D2EHBA の U および Pu に対する分配比の硝酸濃度依存性を図 4 に示す。

U および Pu に対する D2EHBA の配位数は報告されていないが、同じモノアミド化合物である N,N-dioctyloctanamide と N,N-dioctyl(2-ethyl)hexanamide の U(VI) および Pu(IV) に対する配位数は共に 2 である⁵⁾。この結果に基づき、本研究では U および Pu に対する D2EHBA の配位数を 2 と仮定した。このとき D_U および D_{Pu} はそれぞれ次式で表される。

$$D_U = 1.546[HNO_{3(aq)}]^{1.700} \left(\frac{[D2EHBA_{(org)}]}{[D2EHBA_{dat}]} \right)^2 \quad (16)$$

$$D_{Pu} = 5.156 \times 10^{-2} [HNO_{3(aq)}]^{2.699} \left(\frac{[D2EHBA_{(org)}]}{[D2EHBA_{dat}]} \right)^2 \quad (17)$$

ここで、 $[D2EHBA_{dat}]$ は(14)および(15)式を求めた際の D2EHBA 濃度 (すなわち 1M) である。 D_U および D_{Pu} の D2EHBA 濃度依存性を考慮するために $[D2EHBA_{(org)}]$ を $[D2EHBA_{dat}]$ で規格化した。

U および Pu に対する D2EHBA の配位数が 2 の場合、抽出反応の進行に伴う D2EHBA 濃度の減少を考慮すると D_U および D_{Pu} はそれぞれ次式で表される。

$$D_U = 1.546[\text{HNO}_{3(\text{aq})}]^{1.700} \left(\frac{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}]}{[\text{D2EHBA}_{\text{dat}}]} \right)^2 \left\{ \frac{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}] - 2([\text{U}_{(\text{org})}] + [\text{Pu}_{(\text{org})}])}{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}]} \right\}^2 \quad (18)$$

$$D_{\text{Pu}} = 5.156 \times 10^{-2} [\text{HNO}_{3(\text{aq})}]^{2.699} \left(\frac{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}]}{[\text{D2EHBA}_{\text{dat}}]} \right)^2 \left\{ \frac{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}] - 2([\text{U}_{(\text{org})}] + [\text{Pu}_{(\text{org})}])}{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}]} \right\}^2 \quad (19)$$

ここで、 $[\text{U}_{(\text{org})}]$ および $[\text{Pu}_{(\text{org})}]$ はそれぞれ有機相のUおよびPu濃度を示す。

$[\text{D2EHBA}_{\text{dat}}]$ が1 Mであることから²⁷⁾、(18)および(19)式を整理し、着目系における硝酸の濃度がUおよびPuよりも十分高いと仮定すると、それぞれ(20)および(21)式が得られる。

$$D_U = 1.546[\text{HNO}_3]^{1.700} \{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}] - 2([\text{U}_{(\text{org})}] + [\text{Pu}_{(\text{org})}])\}^2 \quad (20)$$

$$D_{\text{Pu}} = 5.156 \times 10^{-2} [\text{HNO}_3]^{2.699} \{[\text{D2EHBA}_{(\text{org})}] - 2([\text{U}_{(\text{org})}] + [\text{Pu}_{(\text{org})}])\}^2 \quad (21)$$

本研究では、(20)および(21)式に示した分配比に基づいて、解析を実施した。

3 解析結果

3.1 抽出器1の検討

図5に示すフローシートに基づき、効率的なUおよびPuの抽出に必要なU-Pu抽出部の段数、および抽出剤の流量を把握するために、表1に示す設定値に基づいた計算を行い、ラフィネート側へのUおよびPuの移行率を評価した。

フィード液の硝酸濃度が3.0、4.0、および5.0 Mの条件における、ラフィネート側へのPuの移行率(Puリーク率)の抽出剤流量ならびにU-Pu抽出部の段数依存性を図6、7、および8にそれぞれ示す。これらの図は、U-Pu抽出部の段数、抽出剤の流量、およびフィード液硝酸濃度の増加がPuリーク率の抑制につながることを示している。

フィード液硝酸濃度が3.0 Mの場合、Puリーク率を0.1%以下とするには、抽出剤流量を200 cm³/h、U-Pu抽出部の段数を13に設定する必要がある(図6)。一方、フィード液硝酸濃度が4.0 Mの場合、抽出剤流量を150 cm³/h、U-Pu抽出部の段数を12に設定すればPuリーク率を0.1%以下に抑えられる(図7)。抽出溶媒流量の増加に伴って二次廃棄物の発生量が増すことを考えると、フィード液硝酸濃度を4 M以上に設定し、抽出剤流量を150 cm³/h以下とするのが適当と思われる。

フィード液硝酸濃度を5.0 M、抽出剤流量を150 cm³/hとすれば、U-Pu抽出部の段数が8の場合でもPuリーク率を0.1%以下に抑えられる(図8)。ただし、濃度の高い硝酸がプロセスに与える負荷を考えると、硝酸濃度は可能であれば低く抑えるのが望ましい。

なお、どの条件においてもラフィネート側へ移行する U の割合は 10^{-5} %未満であり、実質的に全ての U が抽出される。これらの結果から、U-Pu 抽出部の段数を 12、硝酸濃度を 4.0 M、および抽出剤流量を $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ とした場合、段数と抽出剤流量を比較的抑えられると共に、十分に高い回収率で U および Pu が抽出される。

U-Pu 抽出部の段数を 12、抽出剤流量を $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ に設定した場合について、Pu リーク率のフィード液硝酸濃度および抽出剤濃度依存性を図 9 に示す。抽出剤濃度が 1.0 M の場合、フィード液硝酸濃度が 4 M であれば Pu リーク率は 0.1 %未満となるが、これよりも硝酸濃度が薄くなると、Pu リーク率は 0.1 %以上となる。フィード液硝酸濃度の変動に対してある程度の裕度を持たせるためには、抽出剤濃度を高くする必要がある。例えば、抽出剤濃度を 1.2 M 以上にすれば、フィード液硝酸濃度が 3.0 M に低下したとしても Pu のリーク率を 0.1 %未満に抑制できる。

3.2 抽出器 2 の検討

3.1 の結果に基づくと、比較的効率的に Pu リーク率を 0.1 %以下に抑制するための設定条件の一例として、抽出溶媒流量を $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ 、D2EHBA 濃度を 1.2 M、フィード液硝酸濃度を 4.0 M、U-Pu 抽出部段数を 12 とすることが考えられる。次に、抽出器 2 の条件設定を行うために、図 10 および図 11 に示すフローシートに基づく計算を行った。

抽出器 2 は U 回収部と U-Pu 分離部から構成され、Pu 逆抽出液としてフィード液よりも薄い濃度の硝酸を使用して U と Pu の相互分離を行う。図 10 に示すフローシートでは U-Pu 分離部の段数と Pu 逆抽出液硝酸濃度、図 11 に示すフローシートでは U 回収部の段数と Pu 逆抽出液硝酸濃度が U および Pu の分離に与える影響の把握を目的としている。

3.2.1 U-Pu 分離部段数依存性

図 12 に計算結果を示す。Pu 逆抽出液硝酸濃度が 2.0 M の場合、Pu の逆抽出は効率的に進行せず、U-Pu 分離部を 9 段としても約 2%の Pu が U 溶液側へ移行する。一方、Pu 逆抽出液硝酸濃度を 1.0 M とした場合、U-Pu 分離部を 5 段以上に設定すれば Pu のリーク率は 0.1 %以下になる。ただし、Pu 逆抽出液硝酸濃度を 1.0 M にすると U の逆抽出も相当進行するため、U-Pu 分離部が 5 段の場合、U 溶液への U 移行率が約 90 %にとどまる。Pu 逆抽出液硝酸濃度が 1.5 M の場合、U-Pu 分離部を 8 段にすれば、Pu のリーク率は 0.1%以下となる。

3.2.2 U 回収部段数依存性

図 13 に計算結果を示す。Pu 逆抽出液硝酸濃度が 1.0 M の場合、Pu 溶液側に移行する U の割合はかなり高く、U と Pu の分離はほとんど行われぬ。従って、Pu 逆抽出液硝酸濃度は 1.5 M 以上が適当と思われる。U と Pu の分離度は、製造する燃料、使用する炉、およびコスト等、様々

な要因に基づいて判断されるため、本研究の結果だけでは最適値を示すことはできない。ただし、必要とする U/Pu 比が与えられれば、図 13 から U 回収部の段数を設定することができる。例えば、フィード溶液における U の濃度が Pu の濃度の 100 倍である本系の場合、U/Pu 比を 1 とするには U の Pu 溶液への移行率が 1 % となれば良く、図 13 から U 回収部の必要段数は 4 となる。

3.3 U 回収溶媒流量および Pu 逆抽出液流量依存性

3.1 および 3.2 の結果に基づくと、下記 3 項目の条件を満足するフローシートは図 14 となる。

- ・ ラフィネート側への Pu 移行率が 0.1 % 以下
- ・ Pu 溶液側への Pu 移行率が 99.9 % 以上
- ・ U 溶液側への Pu 移行率が 0.1 % 以下

この条件における抽出器 1 および抽出器 2 の各段の U 濃度、Pu 濃度、および各溶液へ移行する U と Pu の割合を図 15、図 16、および表 2 にそれぞれ示す。なお、この時の Pu 溶液における U/Pu 比は 1.06 である。

図 14 に示したフローシートを基本条件として、U 溶液側への Pu 移行率の U 回収溶媒流量変化率、および Pu 逆抽出液流量変化率依存性を図 17、および図 18 にそれぞれ示す。図 17 および図 18 には、Pu 溶液における U/Pu 比の流量変化率依存性も示した。U 溶液側への Pu 移行率は、U 回収溶媒および Pu 逆抽出液のどちらかが $\pm 10\%$ 変動したとしても、常に 0.1 % 以下を維持している。さらに、この変動領域における U/Pu 比の最小値は 0.64 であり Pu の単離も行われていない。なお、この変動範囲において Pu の逆抽出が最も起こりにくい条件（U 回収溶媒の流量の 10 % 増加、かつ Pu 逆抽出液の流量の 10% 減少）では、U 溶液側への Pu 移行率、および U/Pu 比はそれぞれ 0.12 %、および 0.47 となる。ただし U-Pu 分離部の段数を 1 段増加させれば、U 溶液側への Pu 移行率および U/Pu 比はそれぞれ 0.054 % および 0.47 となり、Pu 単離の回避と共に十分な Pu 回収率が得られる。

3.4 高濃度 Pu フィード液への対応

図 14 に示したフローシートの設定条件のうち、フィード液の Pu 濃度を 1 g/dm^3 から 30 g/dm^3 まで変化させても、U 溶液側への Pu 移行率は 0.1 % 未満の値を維持する。ただし、Pu 溶液における U/Pu 比はフィード液における Pu 濃度が 30 g/dm^3 の場合、0.045 まで減少するため Pu 単離につながる。ここでは、フィード液の Pu 濃度が高い場合における Pu の単離を避けるために、Pu 逆抽出液として用いる硝酸の濃度およびその流量が U/Pu 比に与える影響を解析した。

U/Pu 比を 1 とするのに必要な Pu 逆抽出液量のフィード液 Pu 濃度依存性を図 19 に示す。この図は、フィード液における Pu 濃度が 30 g/dm^3 であっても、Pu 逆抽出液の流量を $255 \text{ cm}^3/\text{h}$

とすれば、Pu 溶液における U/Pu 比が 1 となることを示している。なお、フィード液における Pu 濃度が 1 g/dm^3 の場合、U/Pu 比を 1 とするのに必要な Pu 逆抽出液の流量は $98 \text{ cm}^3/\text{h}$ である。すなわち、フィード液の Pu 濃度が 30 倍になっても Pu 逆抽出液量を 2.6 倍とすれば U/Pu 比を 1 とすることが可能であり、プロセス規模の縮小に対して有利な特性といえる。

また、Pu 溶液中の U/Pu 比のフィード液 Pu 濃度、および Pu 逆抽出液硝酸濃度依存性を図 20 に示す。この図に基づくと、フィード液 Pu 濃度が 1、3、10、および 30 g/dm^3 の場合、Pu 逆抽出液として使用する硝酸の濃度をそれぞれ 1.5、1.3、1.0、および 0.7 mol/dm^3 に設定すると U/Pu 比がほぼ 1 となる。また、フィード液中の Pu 濃度と必要とされる U/Pu 比から、Pu 逆抽出液として使用する硝酸濃度を図 20 から設定することが可能である。

このように図 14 に示すフローシートは、フィード液の Pu 濃度が高い場合でも、ミキサセトラの段数の変更や流量の大幅な増加を行うことなく、比較的軽微な条件変更によって適当な値の U/Pu 比を与える。

4. 結言

簡易計算コード「EasyCode」を用いて、D2EHBA をミキサセトラ型抽出器に適用した場合における U および Pu の移行挙動解析を行い、Pu の還元試薬を必要とせずに酸濃度調整によって U と Pu の相互分離を行えるフローシートを示した。このフローシートは Pu 富化度の高い燃料にも対応可能であると共に、供給溶液の流量変化に大きく依存しない安定した分離特性を持つことを確認した。これらの結果は D2EHBA を用いた再処理プロセスの基本的成立性を支持している。プロセス規模縮小のための最適化を検討するためには、分配比計算式の高精度化を達成し、さらに本解析で扱っていない因子（例えば抽出溶媒の劣化、U および Pu 以外の元素の存在、硝酸の抽出、化学反応など）を考慮した計算を行い、抽出剤濃度あるいはフィード液の U および Pu 濃度などがプロセスの分離特性に与える影響をより詳細に評価する必要がある。

謝辞

本レポートの作成にあたり、アクチノイド分離化学研究グループの鈴木伸一副主任研究員から有益な助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) P. B. Ruikar, M. S. Nagar, M. S. Subramanian, K. K. Gupta, N. Varadarajan, and P. K. Singh, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **196**, 171(1995)
- 2) C. Musikas, *Sep. Sci. and Technol.*, **23**, 1211(1988)
- 3) T. H. Siddall, III, *J. Phys. Chem.*, **64**, 1863(1960)
- 4) D. R. Prabhu, G. R. Mahajan, G. M. Nair, and M. S. Subramanian, *Radiochim. Acta*, **60**, 109(1993)
- 5) G. M. Nair, G. R. Mahajan, and D. R. Prabhu, *J. of Radioanal. and Nucl. Chem.*, **191**, 323(1995)
- 6) P. N. Pathak, L. B. Kumbhare, and V. K. Manchanda, *Radiochim. Acta*, **89**, 447(2001)
- 7) C. Yu, S. Guoxin, Z. Zhenwei, L. Yexin, and S. Sixiu, *Radiochim. Acta*, **93**, 287(2005)
- 8) P. N. Pathak, L. B. Kumbhare, and V. K. Manchanda, *Solv. Extra. and Ion Exch.*, **19**, 105(2001)
- 9) E. A. Mowafy, and H. F. Aly, *Solv. Extra. and Ion Exch.*, **19**, 629(2001)
- 10) K. K. Gupta, V. K. Manchanda, M. S. Subramanian, and R. K. Singh, *Solv. Extra. and Ion. Exch.*, **18**, 273(2000)
- 11) V. K. Manchanda, P. B. Puikar, S. Sriram, M. S. Nagar, P. N. Pathak, K. K. Gupta, R. K. Singh, R. R. Chitnis, P. S. Dhami, and A. Ramanujam, *Nucl. Technol.*, **134**, 231(2001)
- 12) V. K. Manchanda, and P. N. Pathak, *Sep. Sci. and Technol.*, **35**, 85(2004)
- 13) G. M. Gasparini, and G. Grossi, *Solv. Extra. and Ion Exch.*, **4**, 1233(1986)
- 14) C. Rabbe, C. Madic, and A. Godard, *Solv. Extra. and Ion Exch.*, **16**, 1091(1998)
- 15) C. Rabbe, C. Sella, C. Madic, and A. Godard, *Solv. Extra. and Ion Exch.*, **17**, 87(1999)
- 16) H. Nagaoka, Y. Ohta, and S. Tachimori, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **69**, 2869(1996)
- 17) B. Borong, S. Chaohong, B. Yizhi, W. Gaodong, Q. Jun, and C. Zhengbai, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **178**, 99(1994)
- 18) N. Condamines, and C. Musikas, *Solv. Extra. and Ion Exch.*, **10**, 69(1992)
- 19) 館盛勝一, *JAERI-Research*, 2001-048(2001)
- 20) 館盛勝一, 鈴木伸一, 佐々木祐二, *日本原子力学会誌*, **43**, 1235(2001)
- 21) K. Yano, A. Shibata, K. Nomura, T. Koizumi, and T. Koyama, GLOBAL 2005, Pap. No. 118(2005)
- 22) K. Hoshino, A. Sasahira, T. Fukasawa, and J. Yamashita, GLOBAL 2005, Pap. No. 436(2005)
- 23) Y. Morita, Y. Kawata, H. Mineo, N. Koshino, N. Asanuma, Y. Ikeda, K. Yamasaki, T. Chikazawa, Y. Tamaki, and T. Kikuchi, GLOBAL 2005, Pap. No. 159(2005)
- 24) G. M. Gasparini, and G. Grossi, *Sep. Sci. and Technol.*, **15**, 825(1980)

- 25) P.N. Pathak, D. R. Prabhu, and V. K. Manchanda, *Solv. Extra. and Ion Exch.*, **18**, 821(1999)
- 26) P. N. Pathak, R. Veeraraghavan, D. R. Prabhu, G. R. Mahajan, and V. K. Manchanda, *Sep. Sci. and Technol.*, **34**, 2601(1999)
- 27) S. Suzuki, Y. Sasaki, T. Yaita, T. Kimura, Atalante 2004, Pap. No. P1-63(2004)
- 28) S. Suzuki, K. Tamura, S. Tachimori, and Y. Usui, *Solv. Extra. Res. Devp. Jpn.*, **6**, 72(1999)
- 29) C. Musikas, N. Condamines, and C. Cuillerdier, *Anal. Sci. Suppl.*, **7**, 11(1991)
- 30) D. Carlini, M. Casarci, G. M. Gasparini, G. Grossi, and A. Moccia, *Proc. of Int. Meeting on Fuel Reprocessing and Waste Management*, **1**, 485(1984)
- 31) 藤田重文, 東畑平一郎(編), 化学工学 I, 東京化学同人, 355(1963)
- 32) 吉田文武, 森芳郎(編), 詳論化学工学, 朝倉書店, 378(1967)

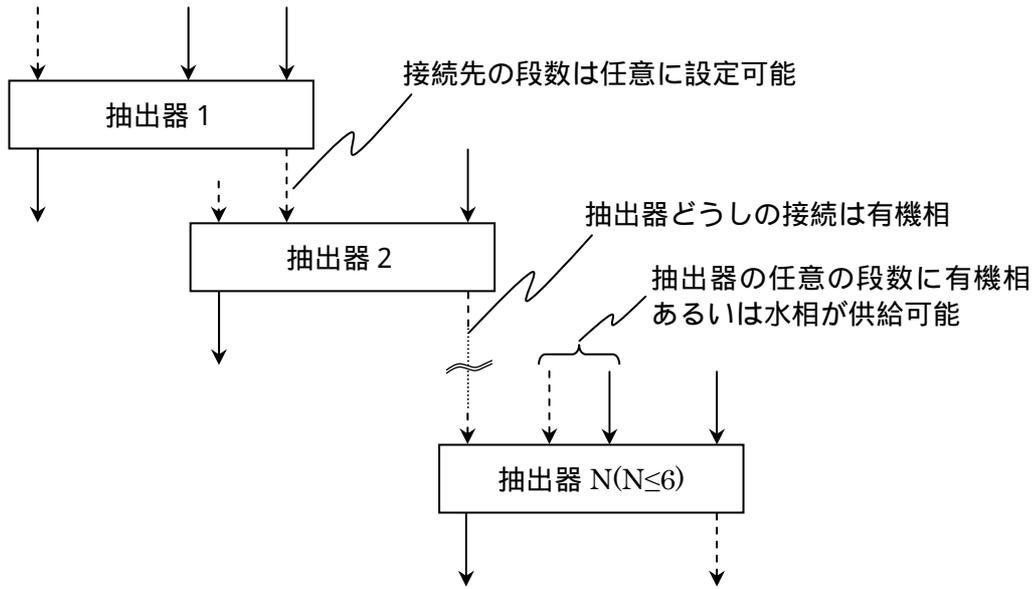


図1 EasyCode によって解析可能な分離系のモデル.

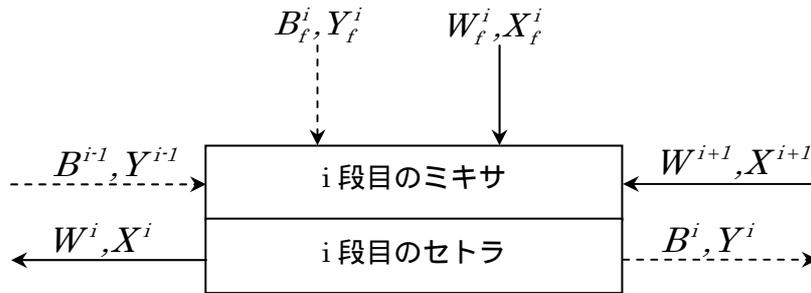


図2 i 段目の分離段に出入りする溶液の量および濃度.
 B:有機相の流量, W:水相の流量, X:着目成分の有機相濃度, Y:着目成分の水相濃度.

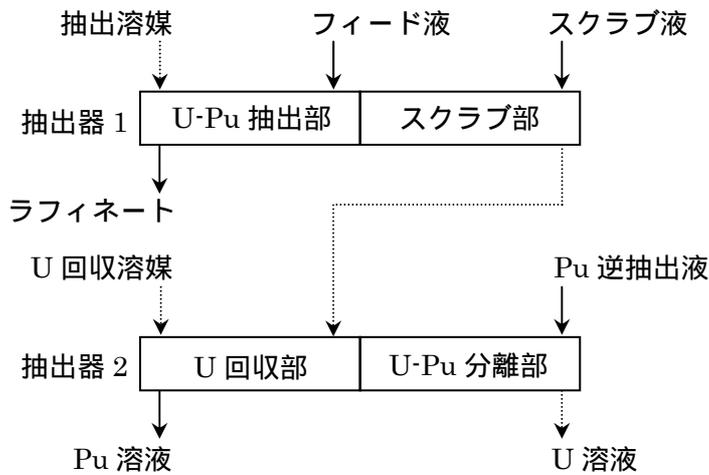


図3 解析対象としたプロセスのモデル.
 実線および点線はそれぞれ水相および有機相の流れを示す.

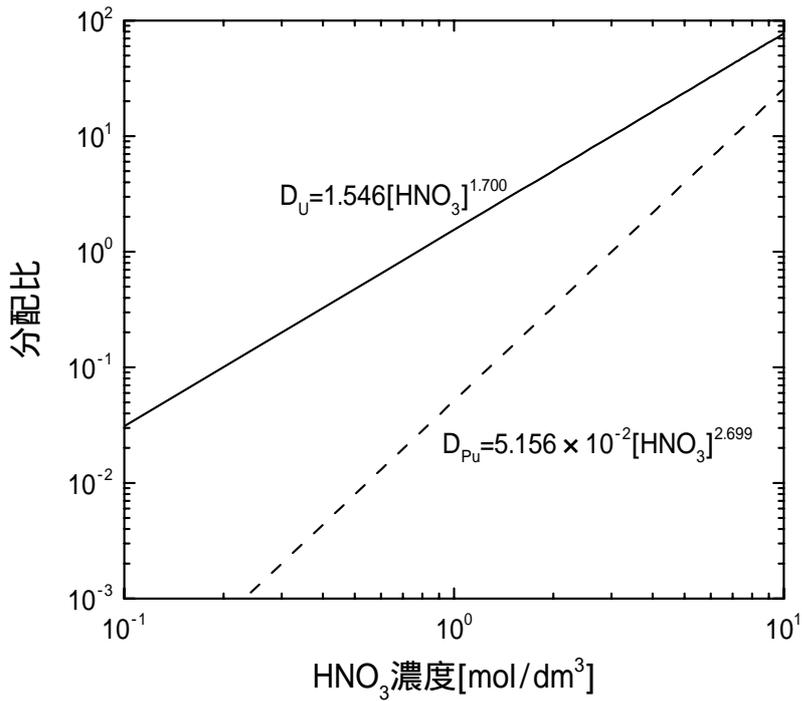


図4 D2EHBA濃度が1.0 Mの条件における,UおよびPuに対する分配比の硝酸濃度依存性.

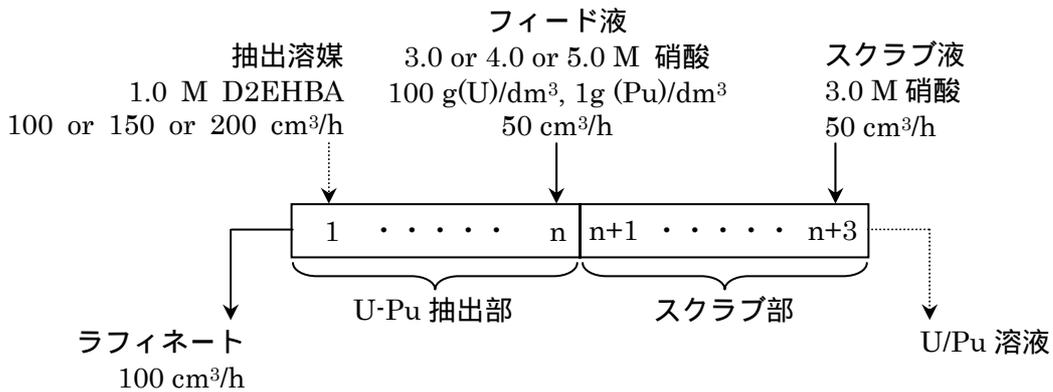


図5 抽出溶媒流量, フィード液硝酸濃度, および U-Pu 抽出部段数効果解析用フローシート.

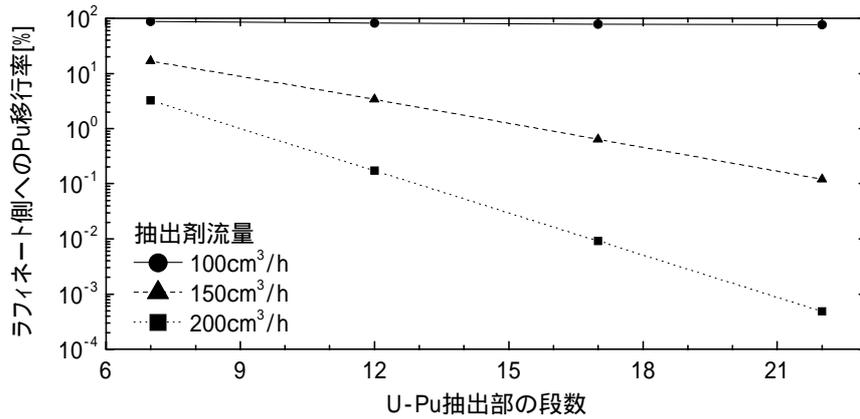


図 6 フィード液の硝酸濃度が3.0 Mの場合における、ラフィネートへのPu 移行率の抽出剤流量、および段数依存性。
スクラブ部段数:3, フィード液流量:50 cm³/h, スクラブ液流量:50 cm³/h

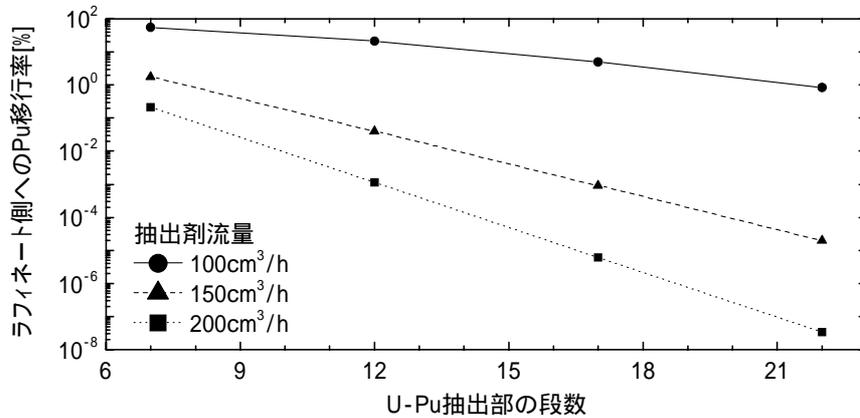


図 7 フィード液の硝酸濃度が4.0 Mの場合における、ラフィネートへのPu 移行率の抽出剤流量、および段数依存性。
スクラブ部段数:3, フィード液流量:50 cm³/h, スクラブ液流量:50 cm³/h

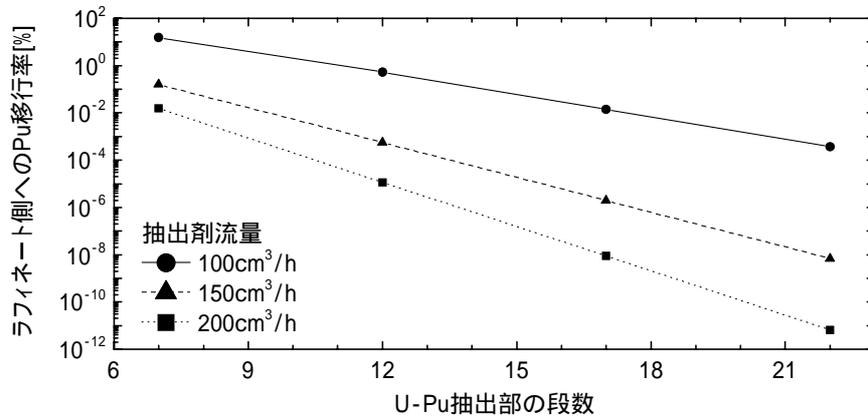


図 8 フィード液の硝酸濃度が5.0 Mの場合における、ラフィネートへのPu 移行率の抽出剤流量、および段数依存性。
スクラブ部段数:3, フィード液流量:50 cm³/h, スクラブ液流量:50 cm³/h

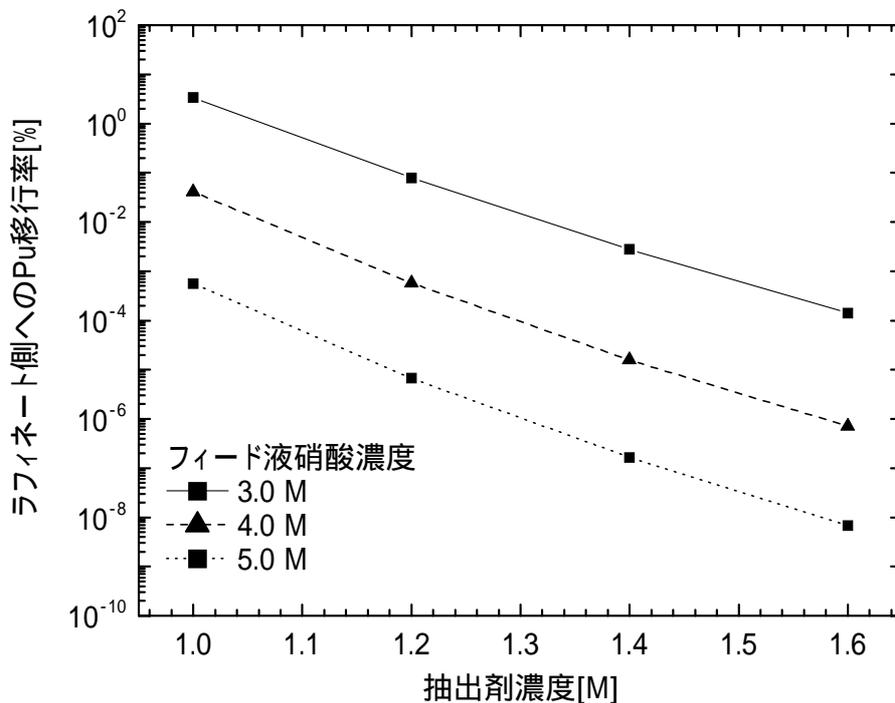


図9 抽出溶媒流量が $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ の場合における、ラフィネートへの Pu 移行率のフィード液硝酸濃度、および段数依存性。U-Pu 抽出部段数:12, スクラブ部段数:3, フィード液流量: $50 \text{ cm}^3/\text{h}$, スクラブ液流量: $50 \text{ cm}^3/\text{h}$

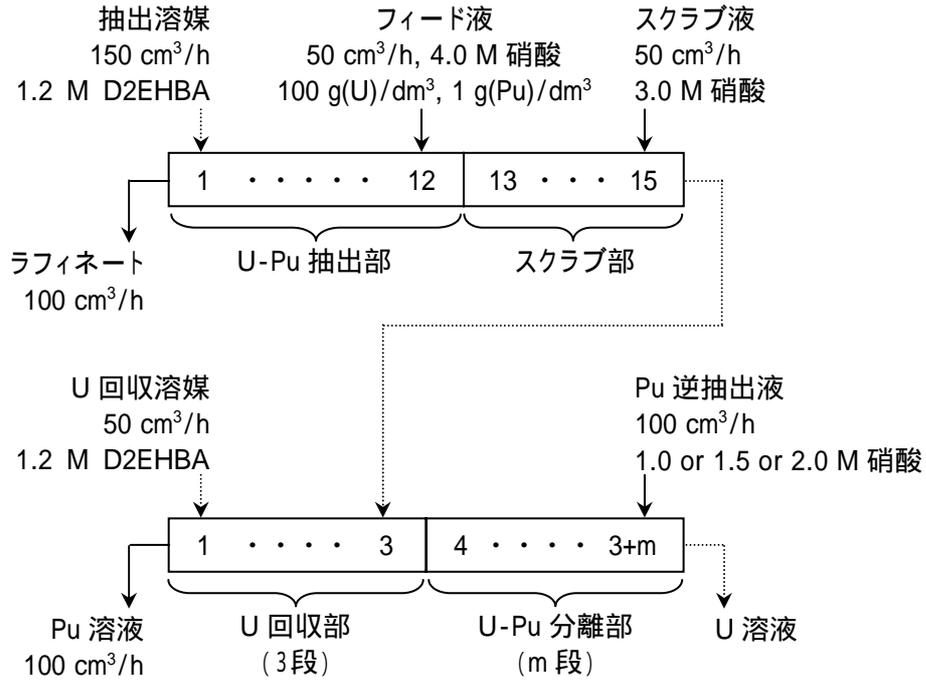


図 10 U および Pu 移行挙動の U-Pu 分離部段数ならびに Pu 逆抽出液硝酸濃度依存性解析用フローシート。
 実線および点線の矢印は、それぞれ水相および有機相の流れを示す。

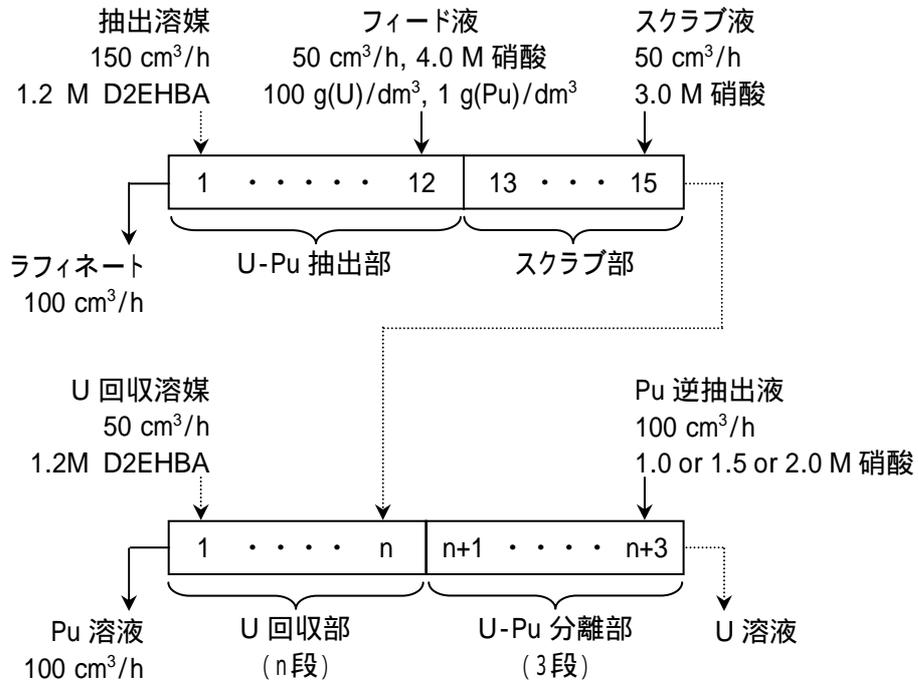


図 11 U および Pu 移行挙動の U 回収部段数ならびに Pu 逆抽出液硝酸濃度依存性解析用フローシート。
 実線および点線の矢印は、それぞれ水相および有機相の流れを示す。

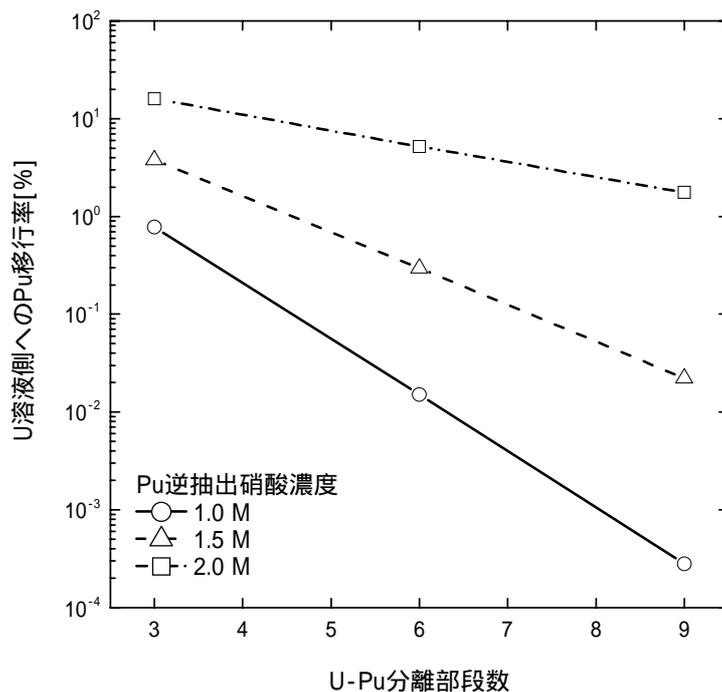


図 12 U 溶液側への Pu 移行率の U-Pu 分離部段数ならびに Pu 逆抽出液硝酸濃度依存性

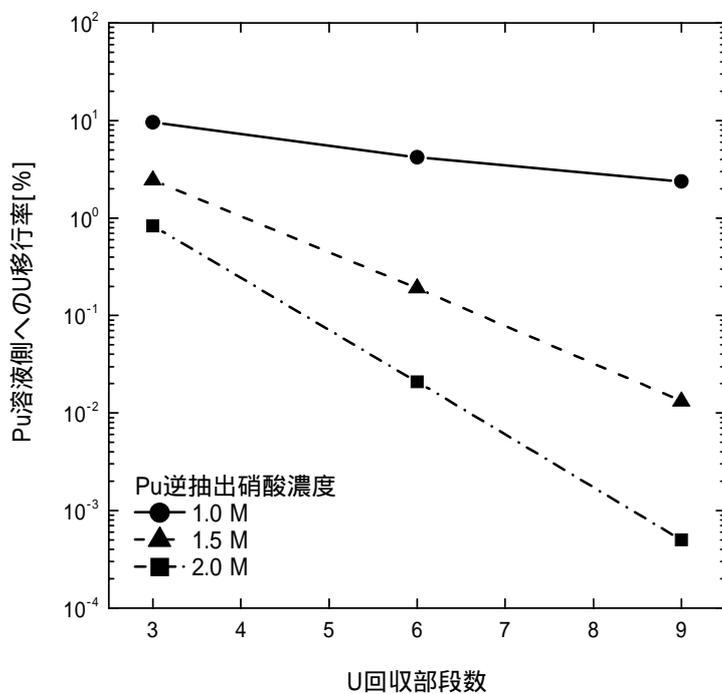


図 13 Pu 溶液側への U 移行率の U 回収部段数ならびに Pu 逆抽出液硝酸濃度依存性

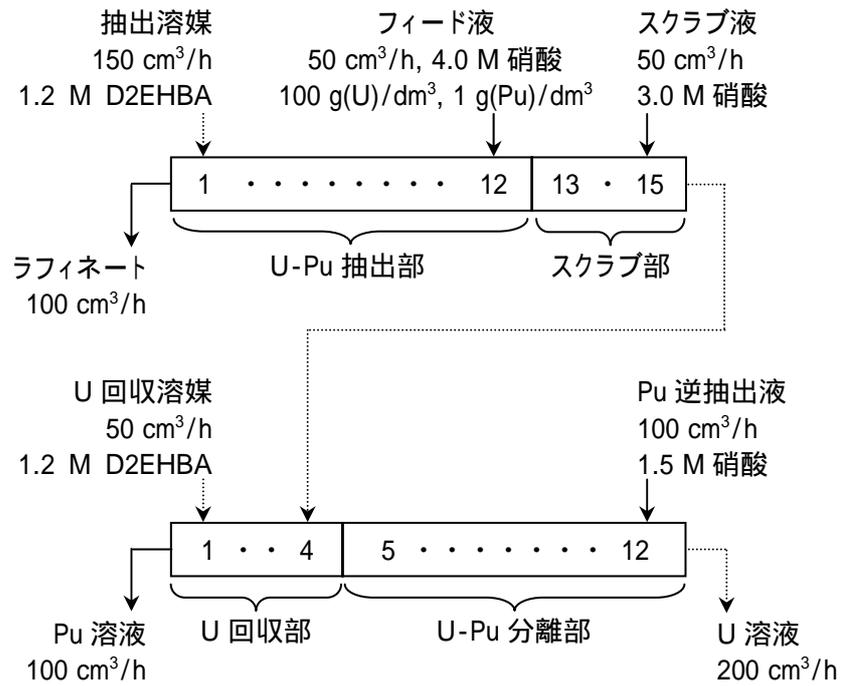


図 14 ラフィネート側への Pu 移行率 0.1%以下, Pu 溶液側への Pu 移行率が 99.9%以上, および U 溶液側への Pu 移行率が 0.1%以下の条件を満たすフローシート. 実線および点線の矢印は、それぞれ水相および有機相の流れを示す.

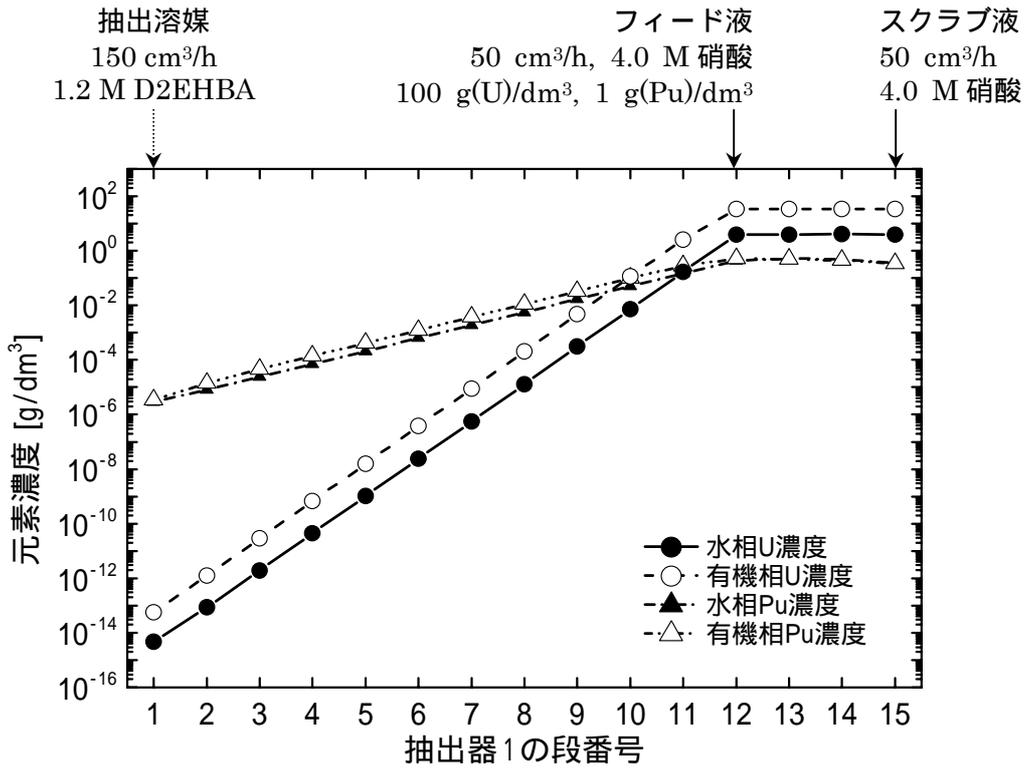


図 15 抽出器1の各段各相におけるUおよびPu濃度

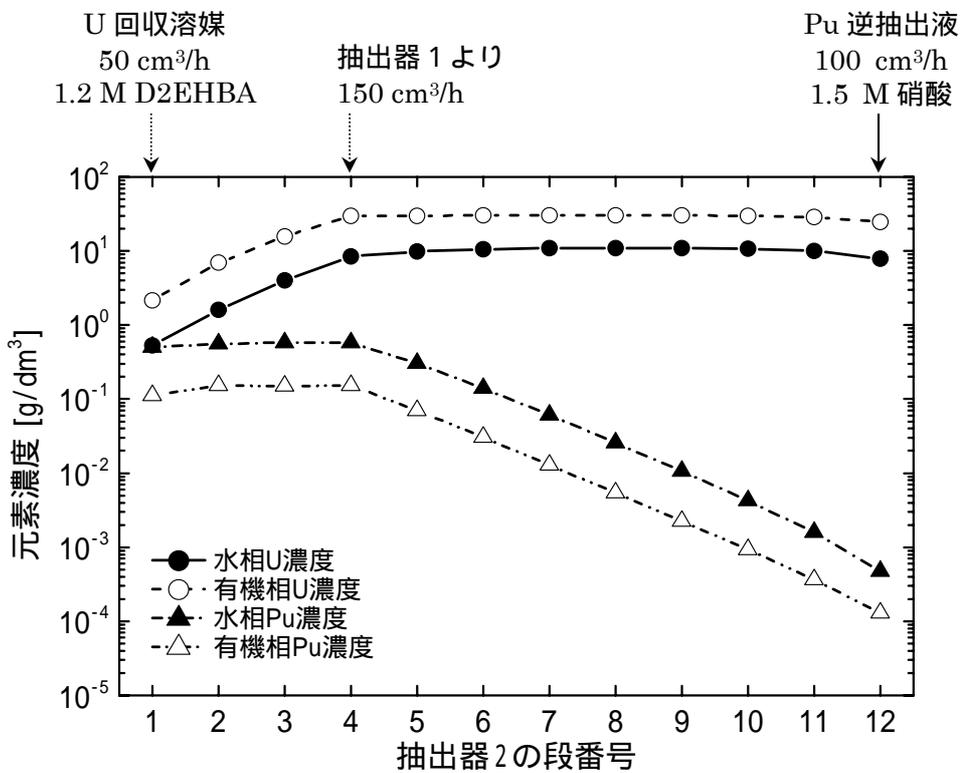


図 16 抽出器2の各段各相におけるUおよびPu濃度

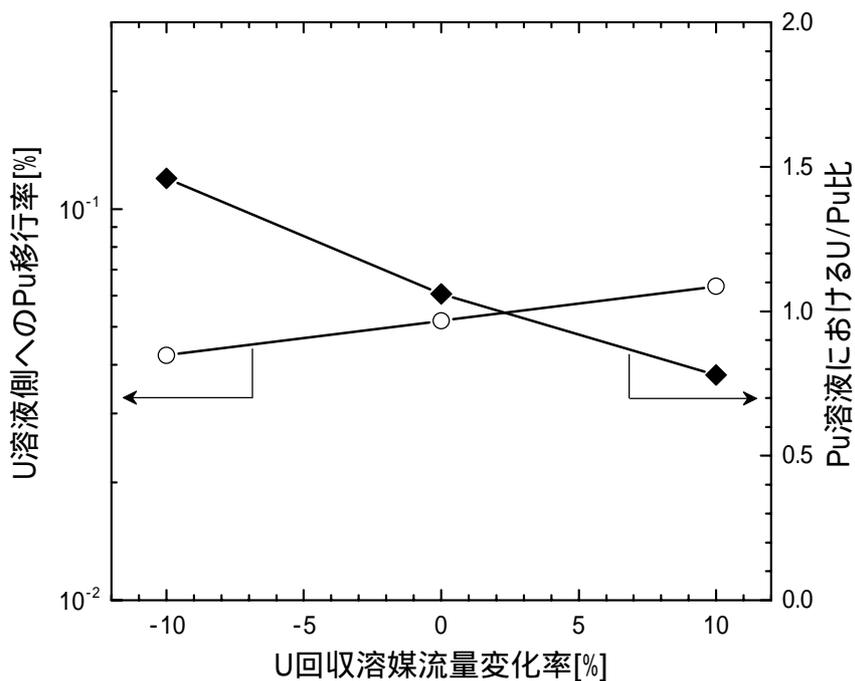


図 17 U 溶液側への Pu 移行率(), および Pu 溶液における U/Pu 比() の U 回収溶媒流量変化率依存性 .

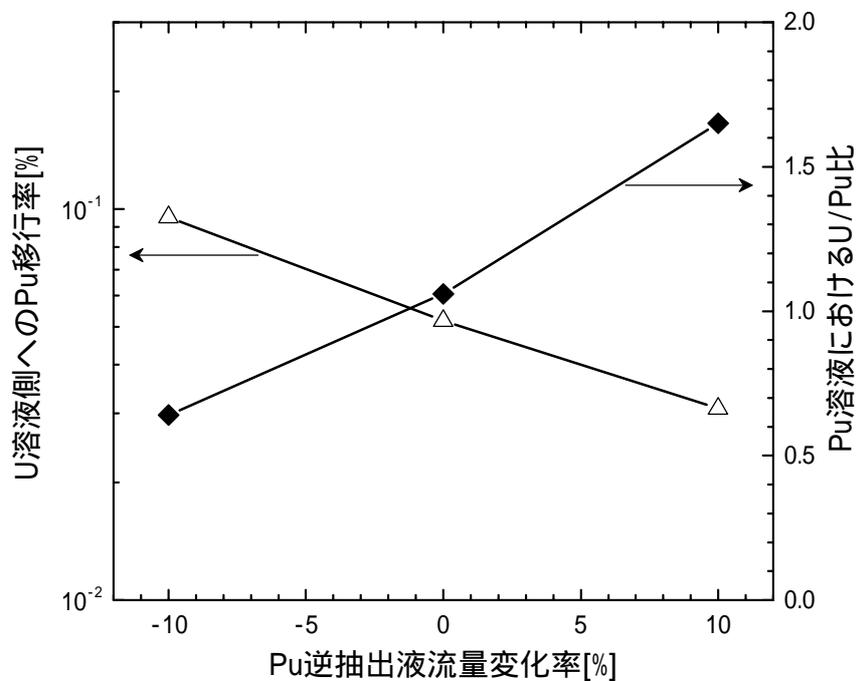


図 18 U 溶液側への Pu 移行率(), および Pu 溶液における U/Pu 比() の Pu 逆抽出液流量変化率依存性 .

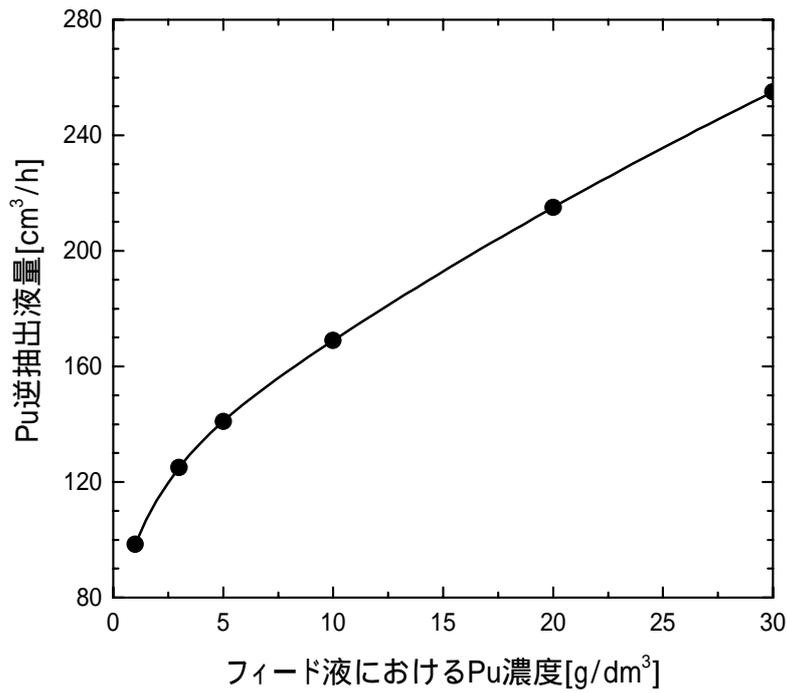


図 19 図 12 に示したフローシートにおいてフィード液 Pu 濃度が変化した場合、U/Pu 比を 1 とするのに必要な Pu 逆抽出液流量。

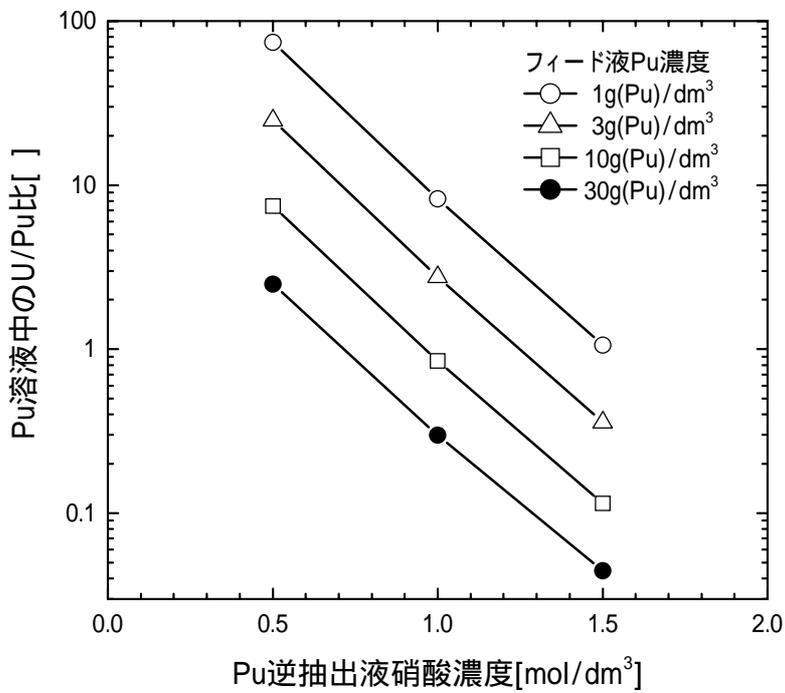


図 20 図 12 に示したフローシートにおけるフィード液 Pu 濃度、および Pu 逆抽出液硝酸濃度変化が Pu 溶液の U/Pu 比に与える影響。
 :1g(Pu)/dm³, :3g(Pu)/dm³, :10g(Pu)/dm³, :30g(Pu)/dm³ .

表1 U-Pu 抽出部段数および抽出剤流量依存性計算の設定値

設定項目	変数	定数
抽出溶媒	流量(100, 150, 200 cm ³ /h)	モノアミド濃度(1.0 M)
フィード液	硝酸濃度(3.0, 4.0, 5.0 M)	U 濃度(100 g/dm ³)、Pu 濃度(1 g/dm ³)、 流量(50 cm ³ /h)
スクラブ液	-	硝酸濃度(3.0 M)、流量(50 cm ³ /h)
U-Pu 抽出部	段数(7 ~ 22 段)	-
スクラブ部	-	段数(3 段)

表2 各溶液へ移行する U および Pu の割合[%]

	U	Pu
ラフィネート	9.44×10^{-15}	5.76×10^{-4}
U 溶液	98.9	5.18×10^{-2}
Pu 溶液	1.06	99.95

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	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
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 ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・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	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光度 (放射能)	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻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。組立単位を形作る際の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	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻¹	
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²	
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹	
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²	
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
熱伝導率	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹	
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²	
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹	
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A	
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A	
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²	
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²	
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・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 ¹ ・A	
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³	
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³	

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		1 海里=1852m
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
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

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 ¹¹ 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=1cSv=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	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	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	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

