

JAERI-Research

98-046



群分離法の開発：小規模実験による4群群分離プロセスにおける
テクネチウム挙動の確認

1998年8月

森田泰治・溝口研一*・山口五十夫・藤原 武・久保田益充

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

群分離法の開発：小規模実験による4群群分離プロセスにおける テクネチウム挙動の確認

日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部

森田 泰治・溝口 研一*・山口五十夫・藤原 武・久保田益充

(1998年7月23日受理)

4群群分離プロセスにおけるTcの挙動について、これまで各工程個別に行ってきました研究の結果を、マクロ量のTcを加えた模擬高レベル廃液を用いてフラスコスケールの小規模実験により、プロセス全体を通して総合的に確認する試験を実施した。4群群分離プロセスは、前処理工程、DIDPA抽出工程、Tc-白金族元素分離のための活性炭吸着工程又は脱硝沈殿工程、及び無機イオン交換体吸着工程に分けられる。本研究では、これらすべての工程と脱硝沈殿工程で生じた沈殿からのTc溶出操作における、Tc及びその他の元素の挙動を調べた。

前処理工程の試験では、加熱・脱硝操作及びコロイド除去操作いずれにおいても、Tcの沈殿への移行率は約0.2%と非常に低いことがわかった。Tcは、DIDPA抽出工程においても抽出されず、ほぼ定量的に抽出ラフィネートへ移行する。この抽出ラフィネートを用いた活性炭によるバッチ吸着試験の結果、Tcの分配係数は100ml/g以上と十分高いことが再確認された。同時に、共存するMoの影響も大きいことも明らかになった。脱硝沈殿工程においては、Tcの沈殿率として98.2%が得られた。この沈殿からのH₂O₂によるTc溶出では、1回の操作で84.6%の溶出率が得られた。H₂O₂は、白金族元素をわずかに溶出するのみで、Tcに対する選択性が高い。無機イオン交換体吸着工程では、Tcは吸着されない。

以上の成果をもとに、H₂O₂溶出液を群分離プロセスからのTc製品としてその組成を推定したところ、高レベル廃液中で2.3wt%にすぎないTcをTc製品中で少なくとも約50wt%にまで高められることがわかった。Tc製品への主な混入元素はCr、Ni、Sr、Ba、Mo及びPdであるが、これらの元素の混入率低減を主目的としたプロセス最適化は今後の課題である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* 石川島播磨重工業株式会社

Development of Partitioning Method : Confirmation of Behavior of Technetium
in 4-Group Partitioning Process by a Small Scale Experiment

Yasuji MORITA, Kenichi MIZOGUCHI*, Isoo YAMAGUCHI,
Takeshi FUJIWARA and Masumitsu KUBOTA

Department of Materials Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 23, 1998)

The separation behavior of Tc in the whole of 4-Group Partitioning Process was examined by a flask-scale experiment using simulated high-level liquid waste containing a macro amount of Tc, in order to confirm the reproducibility of the results obtained in previous studies on the Tc behavior at each step of the process. The 4-Group Partitioning Process consists of pre-treatment step, extraction step with diisodecylphosphoric acid (DIDPA), adsorption step with active carbon or precipitation step by denitration for the separation of Tc and platinum group metals (PGM), and adsorption step with inorganic ion exchangers. The present study deals with the behavior of Tc and other elements at all the above steps and additional step for Tc dissolution from the precipitate formed by the denitration.

At the pre-treatment step, the ratio of Tc precipitated was very low (about 0.2%) at both operations of heating-denitration and colloid removal. Tc was not extracted with DIDPA and was contained quantitatively in the raffinate from the extraction step. Batch adsorption with active carbon directly from the raffinate showed that distribution coefficient of Tc was more than 100ml/g, which is high enough for the separation. It also revealed much effect of coexisting Mo on the Tc adsorption. At the precipitation step by denitration, 98.2% of Tc were precipitated. At the Tc dissolution from the precipitate with H₂O₂, 84.2% of Tc were selectively dissolved in a single operation. Tc was not adsorbed with inorganic ion exchangers.

From these results, composition of Tc product (as a dissolved solution with H₂O₂) from the partitioning process was estimated. The weight ratio of Tc in the Tc product can be increased to about 50% at least. Main contaminating elements are Cr, Ni, Sr, Ba, Mo and Pd. Process optimization to decrease their contamination should be performed in a next study.

Keywords : Partitioning, Technetium, Platinum Group Metals, Simulated High-level Liquid Waste, Denitration, Extraction, Precipitation, Adsorption,

* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験	3
2.1 テクネチウム溶液	3
2.2 試薬	3
2.3 実験操作	3
2.4 分析	5
3. 結果と考察	8
3.1 前処理工程	8
3.2 抽出工程	8
3.3 活性炭吸着工程	9
3.4 脱硝沈殿工程	9
3.5 Tc溶出工程	10
3.6 無機イオン交換体吸着工程	11
3.7 Tc製品混入元素	11
4. 結論	16
謝辞	16
参考文献	17

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	3
2.1 Technetium Solution	3
2.2 Reagents	3
2.3 Procedure	3
2.4 Analysis	5
3. Results and Discussion	8
3.1 Pretreatment Step	8
3.2 Extraction Step	8
3.3 Adsorption Step with Active Carbon	9
3.4 Precipitation Step by Denitration	9
3.5 Tc Dissolution Step	10
3.6 Adsorption Step with Inorganic Ion Exchangers	11
3.7 Elements Contaminating the Tc Product	11
4. Conclusion	16
Acknowledgment	16
References	17

1. はじめに

群分離研究室では、使用済核燃料の再処理により発生する高レベル廃液をより合理的に処分すること及び廃液中に存在する有用な元素を回収利用することを目的として、高レベル廃液中の元素を、その化学的性質や放射能毒性に応じて分離する群分離プロセスの開発を進めている^(1,2)。現在、超ウラン元素(TRU)群、Tc-白金族元素(PGM)群、Sr-Cs群及びその他の元素群の4群に分離するプロセス(4群群分離プロセス)を開発しており、Fig. 1.1にそのブロックフローを示す。

4群群分離プロセスの開発に当たって、Tcは、最も重要な分離対象元素として位置付けられ⁽³⁾、Fig. 1.1に示すように、ジイソデシルリン酸(DIDPA:diisodecylphosphoric acid)による抽出プロセスからのラフィネートより白金族元素と共に分離するという方針を探った。そして、その分離法として、脱硝による沈殿法⁽⁴⁾と、活性炭を用いる吸着法⁽⁵⁻⁷⁾を並行して研究してきた⁽⁸⁾。

脱硝沈殿法では、添加するギ酸の量を硝酸に対し2倍当量以上として脱硝を行うことで、脱硝後液のpHを2以上にし、Tcをほぼ定量的に白金族元素と共に沈殿させることができる。この際、被処理液中の白金族元素の濃度が、Rh及びPdの和として0.005M以上でなければならないことが指摘された⁽⁴⁾が、通常の高レベル廃液では、被処理液であるDIDPA抽出ラフィネートにおいてこの条件を十分満たすことができる。また、その後のプロセス最適化に関する研究⁽⁹⁾で、白金族元素を定量的に沈殿させるための、脱硝時の加熱条件、溶液条件(元素濃度、硝酸濃度)等を明らかにした。白金族元素を沈殿させることができればTcも沈殿する。この脱硝沈殿法には、過酸化水素を用いることでTcを沈殿より選択的に溶解できる⁽⁴⁾という利点もある。

活性炭吸着法は、 TcO_4^- の化学形で存在するTcを陰イオン交換的に吸着分離するもので、共存する白金族元素の濃度が低くても、容易な操作で高い回収率が得られるという特徴を持つ。しかし、白金族元素の分離度が高くないという欠点がある。

群分離研究室では、以上のようなTc-白金族元素の分離法の検証も含め、Fig.1.1に示した4群群分離プロセスについて実際の高レベル廃液を用いた試験を実施するため、NUCEFの α - γ セル内に群分離試験装置を設置した⁽¹⁰⁾。この装置は、2ℓの高レベル廃液を処理することができ、濃縮・脱硝装置、ろ過装置、抽出装置、カラム吸着装置等を備えている。硝酸を用いた装置性能試験⁽¹¹⁾を経て、模擬高レベル廃液による群分離試験及び少量の実高レベル廃液を添加した廃液を用いたセミホット試験を実施しており、平成10年度中に実高レベル廃液による本格的な群分離試験(ホット試験)を実施することとなっている。

ところで、前述したTc分離法についての研究では、当該分離工程についてのみ試験しており、群分離プロセス全般にわたっての試験はこれまでに実施していない。しかし、Tcは4群群分離プロセス開発に当たって新たに分離対象元素に加わったということもあり、NUCEFでのホット試験の前に群分離プロセス全体に及ぶTc挙動確認のための試験を実施しておく必要がある。本研究は、この必要性に対応して、Tcを添加した模擬廃液を用いて、フラスコスケールでの実験で、Tcの4群群分離プロセスでの挙動把握及び分離度確認のための試験を行ったものである。即ち、本研究は、Tcに関する群分離プロセス総合試験であり、ホット試験前の最終確認試験である。また、前述のTc沈殿分離法の研究では、 $Tc-95m$ のみをトレーサー量で使用しているため、 $Tc-99$ を用いてマクロ量のTcにより、沈殿挙動及び沈殿からの溶出挙動を確認する必要もある。これが本研究

のもう一つの目的である。

実験は、Tc-99及びTc-95mを添加した模擬廃液を用いて行ったが、これと並行してTcを添加しない模擬廃液による実験も行い、Tc以外の元素の本実験操作における挙動の把握も行った。

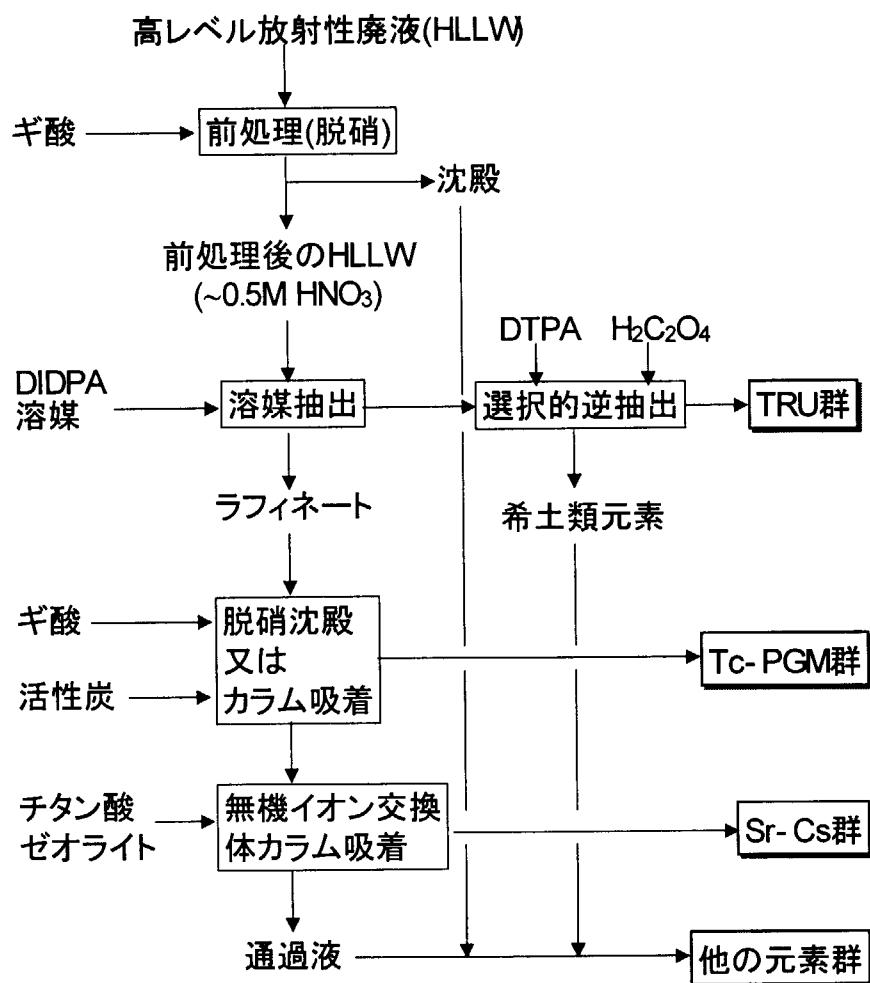


Fig. 1.1 4群群分離プロセスのブロックフロー

2. 実験

2.1 テクネチウム溶液

本実験では、Tcをマクロ量とするためのTc-99及びトレーサーとしての γ 線を放出するTc-95mと共に使用した。

Tc-99は、フランスDUPONT社より購入した 1.85×10^8 Bq入りの粉末試料を全量溶解した後、一部分取して用いた。この粉末は化学形が NH_4TcO_4 であるとされているが、水には全量を溶解させることができなかった。粉末の色は黒色であり、かなりの割合で酸化物($\text{TcO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)が含まれていることが推定された。溶解操作では、まず、Tc-99粉末を水約28mlで三角フラスコへ洗い出した後、アンモニア水を加え、0.1M NH_4OH 液とした。これをマグネチックスターラーで攪拌しながら穏やかに加熱し、10M H_2O_2 液を滴下した。加熱を開始してから約5分後、 H_2O_2 液を2滴加えたところで完全に溶解したことが確認された。この時の液温は、30~40°Cと推定される。その後、余分なアンモニアを除去するため、乾固するまで加熱を継続した。乾固の結果得られた粉末は白色であり、これは NH_4TcO_4 の化学形であることを示す。これを水で溶解し、12mlとした。このうち1.5ml、 2.31×10^7 Bqを実験に使用した。このTc量は、25mlとなったとき0.015Mの濃度となる量である。

Tc-95mは、同じくDUPONT社より購入したものであり、 NaTcO_4 の水溶液となっている。これを水で8mlに希釈した後、一部分取して実験に使用した。Tc-95mとしての使用量は、実験開始時点で約 1×10^5 Bqである。

2.2 試薬

Table 2.1に本研究で使用した模擬高レベル廃液の組成と添加した試薬の化学形を示す。この組成は、燃焼度28000MWd/tの使用済燃料の再処理によって発生する高レベル廃液が、燃料1t当たり500Lであるとしたときのものである⁽¹²⁾。この模擬廃液25mlに、Tc-99液及びTc-95m液を加え、28mlとした後、実験を開始した。従って、実験開始時の廃液中の元素濃度は、Table 2.1の値の25/28倍である。Tcの濃度は、表中に示したように0.015M(25mlであるとして)であるが、これも上記条件の高レベル廃液の組成に一致する。

抽出試験に用いたDIDPA溶媒は、0.5M DIDPA - 0.1M TBP - n-ドデカン溶液である⁽¹³⁾。

2.3 実験操作

(1) 概要

Fig. 2.1に本研究における実験操作のフローを示す。この操作は、前処理工程、抽出工程、活性炭吸着工程、脱硝沈殿工程、Tc溶出工程及び無機イオン交換体吸着工程からなり、4群群分離プロセスのすべての工程を含む。さらに、前処理工程でのTcの共沈率を求めるため、生じた沈殿の溶解操作も加えた。なお、Tc以外の元素の挙動を把握するため、Tcを加えない模擬廃液による実

験(コールド試験)も、Tcを加えた模擬廃液による実験(Tc試験)と並行して実施した。

(2) 前処理工程

前処理工程の試験では、まず、模擬廃液(28ml)を加熱し、7時間沸騰状態に保った。この加熱は、次の脱硝操作後に分離すべき沈殿を易ろ過性にするために必要な操作である⁽¹⁴⁾。一旦冷却した後、ギ酸を被処理液中の硝酸量に対して1.5倍当量添加し、加熱して脱硝操作(7時間)を加えた。加熱・脱硝で生じた沈殿を遠心法により分離し、上澄み液を分取してこれを脱硝後液とした。その後、沈殿を0.5M硝酸3mlで3回洗浄し、この洗浄液は脱硝後液に混合した。

脱硝後液には、Zrを主体とするコロイドが存在する⁽¹⁵⁾。これを、Mo添加後、加熱(6時間)し、沈殿物として除去した。このコロイド除去操作は、新たに前処理工程に加わったものであり、ここでのTc挙動を把握する意義は大きい。ここで生じた沈殿は、脱硝後と同様に分離、洗浄した。

加熱操作は、すべて環流冷却器付きの100ml三角フラスコを用いて行い、加熱面をフラスコ底面のみとした。また、加熱器具としては、いわゆるホットスターを用い、突沸防止のため、攪拌しながらの加熱とした。

前処置工程で生じた沈殿に対しては、シュウ酸による溶解操作⁽¹⁶⁾を加えた。脱硝沈殿及びコロイド除去沈殿をそれぞれ0.5Mシュウ酸水溶液50mlで三角フラスコへ洗い出し、加熱した。1~2時間の加熱で、沸騰状態に達する前に、沈殿全量を溶解することができた。

(3) 抽出工程

次の抽出工程の操作は、抽出、スクラブ、ドデカン洗浄を含むが、いずれもバッチ操作である。まず、この時点での51mlとなった前処理後液にH₂O₂を0.5Mの濃度となるよう添加した。これにDIDPA溶媒50mlを加えて、スターを用いた搅拌を約2分行った。静置後有機相のみをピペットを用いて除去し、新たなDIDPA溶媒を加え、再び抽出操作を行った。この抽出操作は都合4回行ったが、これは、希土類元素等の抽出工程で分離される元素を本来のプロセスと同様に分離除去するためである。抽出操作で得た有機相はすべて混合し(200ml)、これに0.5M HNO₃-0.5M H₂O₂液20mlにて2回のスクラブ操作を加えた。スクラブ液(水相)は抽出後の水相と混合し、この混合液に対し、ドデカン25mlによる洗浄操作を3回加えた。この洗浄操作は、本実験におけるビーカー内のスター搅拌-静置-ピペットによる有機相の除去という方法では溶媒の除去が十分でないため、行ったものである。ドデカン洗浄後の水相即ち抽出工程ラフィネートは95mlとなり、前処理工程及び抽出工程で除去されない元素の濃度はTable 2.1の値の0.23倍となった。これは4群群分離プロセスで想定する1/4倍濃度にほぼ一致させた結果である。

(4) 活性炭吸着工程

活性炭吸着工程の試験もバッチ法によった。ここでは、1回目の吸着として、抽出工程ラフィネート14mlに活性炭0.35gを加え(液固比40ml/g)、ウェーブローターで3時間搅拌した。搅拌後、遠心分離して上澄み10mlを分取、これに新たに活性炭0.25gを加え(液固比は同一)、再度3時間の吸着操作を行った。

(5) 脱硝沈殿工程

脱硝沈殿工程の試験では、抽出ラフィネート60mlを使用した。なお、ここでの脱硝を、前処理工程での脱硝と区別するため、以下ではPGM脱硝と記す。まず、環流冷却器を取り外した加熱装置で、ラフィネートを加熱し、液量が約1/4になるまで濃縮した。この濃縮操作により、次のPGM脱硝において白金族元素を確実に沈殿とすることができる⁽⁹⁾。一旦冷却後、濃縮前の硝酸量に対し2.2倍当量のギ酸を加え、脱硝(7時間)した。脱硝後液を観察したところ沈殿の生成が不十分と考えられたので再度3.5時間加熱した。脱硝・加熱後液中の沈殿は遠心法により分離し、沈殿を水4mlで2回洗浄した。洗浄液は遠心上澄み液と混合し、この混合液、即ちPGM脱硝後液を無機イオン交換体吸着工程の試験にそのまま使用した。

(6) Tc溶出操作

PGM脱硝で生じた沈殿に対してはTc溶出試験を行った。1回目の溶出では、すでに性能が明らかとなっているH₂O₂⁽⁴⁾を用いた。沈殿全量を水15mlで洗い出して三角フラスコに入れ、環流冷却器を取り付けた上で攪拌しながら11.7M H₂O₂液を1.0ml/minの流速で都合35ml注入した。さらに配管内のH₂O₂を洗い出すため水10mlを同じ流速で注入した。この溶出操作では、気泡の発生が激しく、発熱反応が進行しているため、環流冷却器が必要である。H₂O₂溶出後は遠心法により残留する沈殿を分離した。沈殿は水3mlで3回洗浄し、この洗浄液を溶出液と混合した上で、Tcの溶出量を測定した。

2回目の溶出では、アンモニアアルカリ性でH₂O₂を加えるという方法を試験した。これは、H₂O₂の酸化力が強くなる条件とすることでTcの溶出率を高めることができるのでないかという期待によるものである。具体的には、H₂O₂溶出後の沈殿を0.17M NH₄OH液15mlにてフラスコへ洗い出し、これにH₂O₂溶出試験時と同様にH₂O₂を加えるという方法によった。

3回目の溶出試験は、2回の溶出試験の後におおむね沈殿中に残留するTcを、沈殿を全量溶解することで、分析するという意図で実施したものである。沈殿を4M硝酸中で加熱(沸騰状態、3時間)したが、結果として沈殿を完全に溶解することはできなかった。

(7) 無機イオン交換体吸着工程

無機イオン交換体吸着の試験も活性炭吸着と同様のバッチ吸着法によった。但し、吸着操作は、1回とし、液固比を100ml/g、吸着時間を25時間とした。無機イオン交換体は、ゼオライト(天然モルデナイト)とバインダ造粒のチタン酸⁽¹⁷⁾とを1:8の割合で混合したものである。

2.4 分析

Tc濃度は、Tc-95mの放出するγ線の測定により決定した。コールド試験におけるサンプル中の元素濃度は、アルカリ金属については炎光光度法により、その他の元素についてはプラズマ発光分析法により測定した。

酸濃度の測定は、シュウ酸アンモニウムを錯形成剤として加える方法⁽¹⁵⁾で行った。

Table 2.1 模擬廃液の組成と添加した試薬の化学形

元素	濃度(M)	添加した試薬の化学形
HNO ₃	2.0	HNO ₃
Na	0.076	NaNO ₃
Cr	0.0091	Cr(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O
Fe	0.038	Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O
Ni	0.0060	Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O
Rb	0.0074	RbNO ₃
Sr	0.0165	Sr(NO ₃) ₂
Y	0.0084	Y(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Zr	0.069	ZrO(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O
Mo	0.069	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O
Ru	0.034	RuNO(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Rh	0.0080	Rh(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Pd	0.018	Pd(NO ₃) ₂ 硝酸溶液
Te	0.0068	H ₂ TeO ₄ ·2H ₂ O
Cs	0.0371	CsNO ₃
Ba	0.0207	Ba(NO ₃) ₂
La	0.0147	La(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Ce	0.0330	Ce(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Pr	0.0137	Pr(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Nd	0.0446	Nd(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Sm	0.0086	Sm(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Eu	0.0019	Eu(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Gd	0.0010	Gd(NO ₃) ₃ 硝酸溶液
Tc	0.015	NH ₄ TcO ₄ , NaTcO ₄

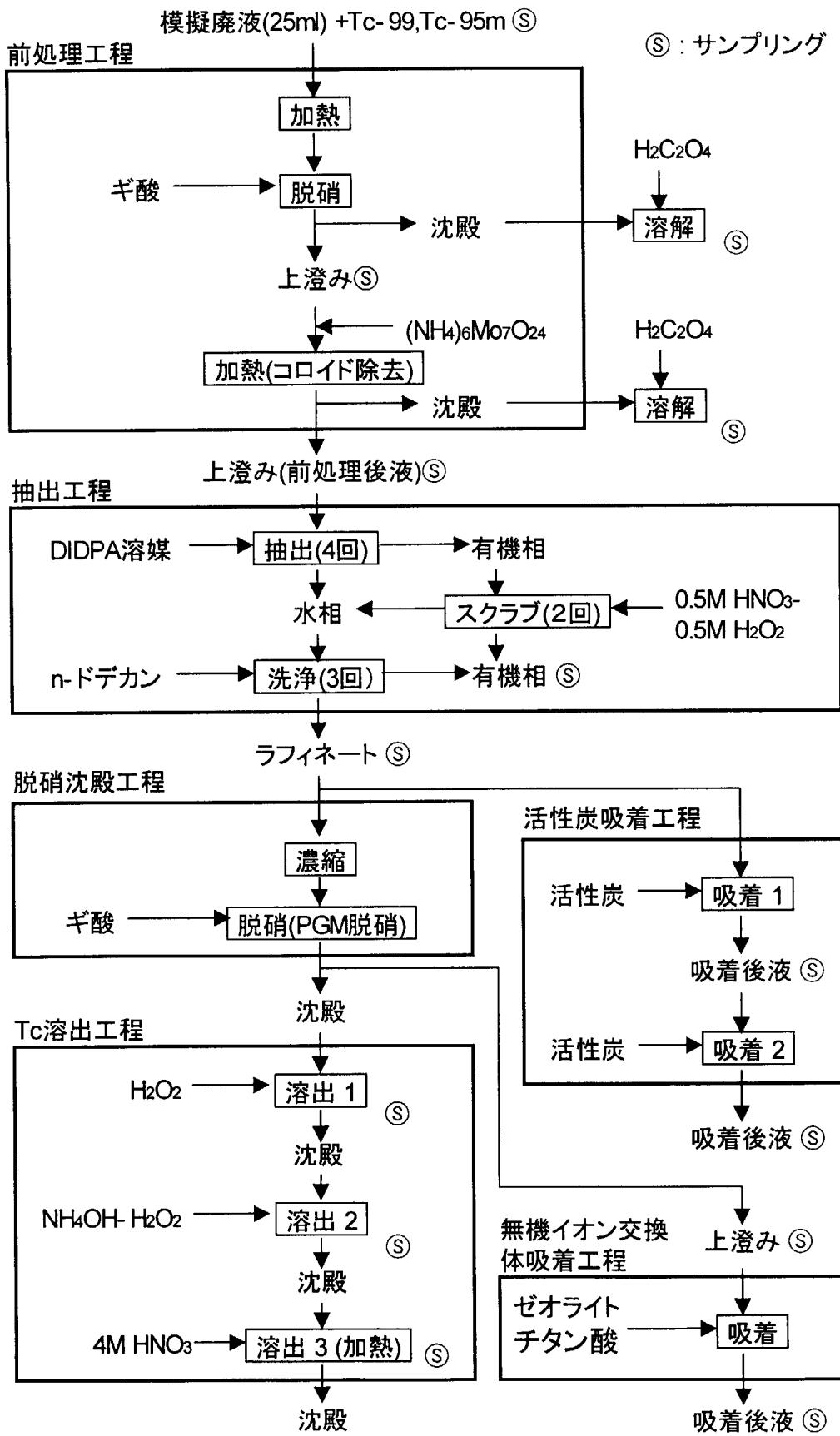


Fig. 2.1 実験操作のフロー

3. 結果と考察

3.1 前処理工程

前処理工程は、加熱・脱硝操作とコロイド除去操作とに分けられる。加熱・脱硝操作における元素の挙動をTable 3.1に示す。この操作では、溶液(加熱・脱硝後液)と沈殿との2つのフラクションが生じるが、沈殿中の元素量はシュウ酸による溶解操作で得られた溶解液の分析によって求めた。両フラクションに見出された元素量の和に対する各フラクション中の元素量の比が表中のフラクションへの分配(%)であり、操作前の元素量に対する両フラクションに見出された元素量の和の比率がマスバランス(%)である。

以下すべての結果に共通であるが、Tcの挙動はTc入り模擬廃液による試験(Tc試験)より、Tc以外の元素の挙動はTcを加えない模擬廃液を用いた試験(コールド試験)より求めている。両試験は、Tc添加を除きすべて同じ実験操作で実施しているが、元素挙動以外の点で多少異なる結果が得られた場合もある。これについてはその都度記述する。

加熱・脱硝操作では、脱硝後の酸濃度がTc試験で0.33M、コールド試験で0.39Mであった。両試験とも目標とする0.5Mに比べ低い値となってしまったが、これはギ酸が添加量算出時のミスにより本来の値より4%程多かったためである。しかし、これが元素の挙動に大きく影響を及ぼすことはないと考えられる。

元素挙動では、Tcの共沈率が、Table 3.1に示すように0.23%と非常に低いことが確認された。また、よいマスバランスが得られた。他の元素についてもこれまでの試験結果^(14,18)によく一致した。

コロイド除去操作におけるTcの沈殿への移行率も0.21%と低い値であった。Table 3.2に元素挙動の結果を示す。やはりよいマスバランスが得られ、他の元素の沈殿挙動も以前の結果⁽¹⁵⁾に一致した。ここで、Moのマスバランス算出に当たってはコロイド除去のため添加したMoも考慮している。本実験でのMo添加量は、脱硝時のZr沈殿率から求めた残留するZr量に対し約2.4倍量であった。コロイド除去後液中に存在するMoの濃度は、初めの模擬廃液中の濃度と比較して、前処理工程で沈殿しない元素が約46%であるのに対し約20%であった。

重要な結論は、新たに前処理工程に加わったコロイド除去操作においてもTcの共沈率は非常に低いこと、前処理工程総合してもTcの共沈は無視できる程の量であることの2点である。

3.2 抽出工程

抽出工程の試験で得られた元素挙動の結果をTable 3.3に示す。Tcの抽出率は0.07%と低く、ほとんどすべてのTcがラフィネート中に見出された。この結果から、4回の抽出と2回のスクラブとで分配比が一定であったと仮定して求めたTcの分配比は0.013であった。分配比がこのように低ければ、連続抽出操作におけるTcの抽出率はさらに低くなる。

Tc以外の元素の挙動算出では、DIDPA溶媒中の元素濃度を測定しなかつたため、フィード液(前処理後液)に対するラフィネート中の元素量の比としてラフィネートへの移行率を求めた。

Table 3.3に示すように、Fe及び希土類元素の抽出率はあまり高くなかった。これは、本操作における抽出とスクラブの組み合わせ法に起因するものである。例えば、本来スクラブ液は抽出部に入るが、本操作ではそのままラフィネートへ混合した。即ち、得られた抽出率そのものにはあまり意味がない。抽出工程での元素挙動は連続抽出試験で評価されなければならない。NUCEFにおける模擬廃液試験⁽¹⁹⁾では、抽出部7段の連続操作でNdの抽出率として99.99%以上が得られている。

抽出工程で得たラフィネートの硝酸濃度は、Tc試験、コールド試験とともに0.52Mであった。このラフィネートをそのまま活性炭吸着工程及び脱硝沈殿工程の試験に用いた。

3.3 活性炭吸着工程

Table 3.4に活性炭による2回の吸着操作における主な元素の吸着率と分配係数の結果を示す。Tcの分配係数としては、十分大きい100ml/g以上が得られたが、1回目の吸着操作における値の方が2回目のそれに比べ約半分と小さかった。これは、Tcより吸着されやすいMoの共存の影響によるものと考えられる。以前の活性炭吸着に関する研究⁽⁷⁾では、Moの存在は想定していなかったが、コロイド除去工程の追加によりMoの共存は避けられなくなった。活性炭吸着工程の群分離プロセスに適用するならば、Moの影響を考慮した上でプロセスの設計及び運転方法の確立を行うか、活性炭吸着の前にMoを分離除去することを考えなければならない。(但し、もしDIDPA抽出工程でH₂O₂を用いなければ、MoはDIDPAに抽出され、分離・除去される。)しかし、現時点では、脱硝沈殿法の方がTcの回収率の点でやや劣るものの白金族元素の十分な分離が同時に見えることから優れていると判断され、これを主たるプロセスとし、活性炭吸着法をTc回収率を高める必要があるときのためのバックアップとして位置付けることが妥当であろうとの考えもある。

Pdについては、1回目によく吸着され、2回目にはほとんど吸着されないという結果が得られた。これは、Pdが少なくとも2種類の化学形で存在し、そのうちの1種類が、これまでの研究では観察されなかつた活性炭に吸着されない形であることを示す。その後の予備的検討で、このような化学形のPdは硝酸濃度が0.5Mといった低い溶液において徐々に形成されることがわかつた。これは、Pdの加水分解反応の進行^(20,21)によるものと推定されるが、さらに詳しい検討が必要である。

3.4 脱硝沈殿工程

Tc試験において、脱硝沈殿工程のPGM脱硝後液のpHは8.8となり、Tcの沈殿率として98.2%が得られた。マクロ量のTcに対しても本手法によりTcを沈殿として分離できることが確認され、本研究の重要な目的の一つが達成された。コールド試験においてはPGM脱硝後液のpHは7.5となつた。主な元素の沈殿率をTable 3.5に示す。Ruの沈殿率はやや低かったが、Rh及びPdの沈殿率としてはほぼ十分な値が得られた。Table 3.5の右側に示したように、本試験に比べ元素濃度がわずかに高かったことを除きほぼ同じ条件でPGM脱硝を行った文献(9)の結果では、さらに高い白金族元素の沈殿率が得られている。

他の元素ではSrが最も重要である。本研究では34%、pHが9.1と高かつた文献(9)の結果では73%

が共沈している。Srの共沈率は脱硝後液のpHが上がるほど高くなることがわかっているが、脱硝後液のpHをコントロールすることは困難である。従って、脱硝後液に酸等を加え、白金族元素及びTcが再溶解しない範囲でpHを下げ、Srのみを溶出するという方法を検討することが適当と考えられる。これは今後の課題である。

3.5 Tc溶出工程

以前の研究⁽⁴⁾で、PGM脱硝で生じた沈殿からH₂O₂によりTcを選択的に溶出できることを見出した。この時の結果は、沈殿1g当たり約6MのH₂O₂を30ml加えれば(H₂O₂量約0.18mol)、Tcの溶出率を80%程度にできるというものであった。また、Table 2.1に示した組成の高レベル廃液約6.6mlで1gの沈殿が生成することも明らかにした。1回の溶出操作でのTc溶出率は最高でも80%程度であったが、繰り返し溶出操作を加えることで総合のTc溶出率を高めることができる。

本研究での溶出操作では、Table 2.1の高レベル廃液14ml分から生じたPGM脱硝沈殿(約2.1gと計算される)に対し、11.7MのH₂O₂ 35ml (H₂O₂量0.41mol) を加えているが、これは上記のTcの溶出率として80%が得られるH₂O₂／沈殿比の条件を満たしている。実際得られたTc溶出率は84.6%であった。H₂O₂は、マクロ量のTcに対しても溶出に有効な試薬であることが確認された。Table 3.6に、コールド試験も含めて溶出試験の結果を示す。H₂O₂による溶出において白金族元素の溶解はわずかであり、H₂O₂溶出のTcに対する選択性は明らかである。Ni、Cr及びSrもある程度H₂O₂により溶出しているが、これは溶出液のpHに依存するものと考えられる。H₂O₂溶出液のpHは、Tc試験で5.5、コールド試験で4.9と測定されており、PGM脱硝後液のpHに比べ低かったので、これらの3元素は溶出する方向となる。

次のアンモニアアルカリ性におけるH₂O₂による溶出では、Tc溶出率として期待したような値が得られなかった。Table 3.6に示したNH₄OH-H₂O₂溶出での溶出率は、前のH₂O₂溶出後なお沈殿中に残る元素量に対するNH₄OH-H₂O₂で溶出した量の比である。沈殿中の元素量は、溶出液中に見出された量を減ずることによって求めているため、操作ステップが増えるほど誤差が大きくなることに注意しなければならない。NH₄OH-H₂O₂溶出において、Tcの溶出率は30%であり、Crを除き他の元素はほとんど溶出しなかった。Crが溶出した要因は不明である。NH₄OH-H₂O₂溶出液のpHは、Tc試験、コールド試験ともに9.5であった。

最後の4M硝酸による加熱溶解操作は、沈殿を全量溶解することを目指して実施したが、白金族元素は一部溶解したのみであった。沈殿を完全に溶解するには強い酸化力を持つ試薬が必要である。

Table 3.6の最も右のカラムに示した沈殿残留率は、以上の3回の溶解操作の後に依然沈殿に残る元素量の溶出操作前に沈殿中の量に対する比である。先に述べたようにこの数値の誤差は大きい。しかし、Tcのほとんどすべてが溶出したのに対し、白金族元素の大半が沈殿として残ったということは言えよう。Fig. 3.1に、この沈殿残留率を含め、各溶出液中の元素量の溶出前の沈殿中の量に対する比、即ち溶出操作全体における元素の分配を示す。

今回の実験では、H₂O₂による繰り返し溶出の試験は、その有効性は明らかであるとして実施しなかつたが、他の元素の挙動や最適溶出プロセスの確立の面で今後検討が必要である。繰り返し

溶出のプロセス設計において重要な点の一つは、繰り返すほど1回の操作当たりのTc溶出率が下がってくることである⁽⁴⁾。

3.6 無機イオン交換体吸着工程

無機イオン交換体吸着工程の試験では、Tc残留量が少なく誤差が大きいが、Tcの分配係数としてゼオライト-チタン酸混合体に対し6ml/gの値が得られた。Tcは無機イオン交換体には吸着されないと結論できる。なお、吸着平衡後の溶液のpHは、Tc試験で8.6、コールド試験で7.2であった。

3.7 Tc製品混入元素

群分離の結果得られるTc製品はTcとしての純度がなるべく高いことが望ましい。そこで、今後の研究の方向を知るため、本研究で得られたTcの分離度及び元素の挙動をもとに4群群分離プロセスにおけるTc製品の組成を算出してみた。ここでTc製品はPGM脱硝による沈殿からのH₂O₂による溶出液とした。Tcの沈殿への移行率は本研究の結果をもとにし(例えばPGM脱硝における沈殿率は98.2%)、沈殿からの溶出率は繰り返し溶出により98%まで高められるとした。総合のTc回収率は95.8%と計算される。他の元素の挙動も基本的に本研究の結果から推定したが、抽出工程については連続抽出試験の結果⁽¹⁹⁾を用い、H₂O₂による繰り返し溶出でのTc以外の元素の挙動は、本研究で得られた1回の溶出操作による溶出率で3回溶出されるとして求めた。Ni、Cr、Sr等の元素の溶出は溶液のpHに依存する溶解度で決定されると考えられるので、これは過大評価である。先にも述べたように、繰り返し溶出における元素の挙動の把握は今後の課題である。本研究では対象となっていないアクチノイドはDIDPA抽出工程で回収されるのでTc製品にはほとんど混入しない。

以上のような過程をもとに計算した結果、Tc製品の組成(重量%)はFig. 3.2のようになった。即ち、高レベル廃液(HLLW)中で2.3wt%にすぎないTcをTc製品中で約50wt%にまで高められることが示された。しかし、これは、最適化されたプロセスによるものではなく、あくまでTc製品に混入する元素の種類と量を知るためのものである。主な混入元素はCr、Ni、Sr、Ba、Mo及びPdである。このうちCr、Ni、Sr及びBaについては、PGM脱硝沈殿の洗浄方法の工夫によりTc溶出操作の前に沈殿より洗い出せる可能性が高い。残るのはMoと、H₂O₂によって他の白金族元素より溶出しやすいPdの2元素であるが、両者は活性炭に吸着されるという点でもTcに類似する。しかし、もし活性炭吸着法をTc製品の精製に適用するとしても吸着後の溶離時にある程度分離できよう。少なくともPdについてはこの分離が可能なことがすでに明らかとなっている^(7,8)。以上のような結果をもとに、Tcの単離精製についての研究が望まれる。

Table 3.1 前処理工程の加熱・脱硝操作における元素の挙動

元素	フラクションへの分配 (%)		マスバランス (%)
	加熱・脱硝後液	沈殿	
Tc	99.77	0.23	100.4
Mo	3.5	96.5	99.2
Zr	46.3	53.7	92.0
Te	77.3	22.7	88.5
Fe	96.4	3.6	92.5
Ru	98.0	2.0	95.2
Rh	>99.8	<0.2	99.3
Pd	99.8	0.2	97.9
Sr	>99.95	<0.05	93.9
Y	>99.98	<0.02	97.8
La-Gd	>99.98	<0.02	94 - 99
Na	99.5	0.5	93.2
Cs	>99	<1	92.6

Table 3.2 前処理工程のコロイド除去操作における元素の挙動

元素	フラクションへの分配 (%)		マスバランス (%)
	コロイド除去後液	沈殿	
Tc	99.79	0.21	97.7
Mo	39.1	60.9	98.6
Zr	1.7	98.3	97.9
Te	7.7	92.3	100.0
Fe	88.7	11.3	98.6
Ru	37.5	62.5	96.3
Rh	96.7	3.3	100.0
Pd	98.5	1.5	97.8
Sr	99.88	0.12	99.1
Y	>99.98	<0.02	97.8
La-Gd	>99.98	<0.02	96 - 99
Na	98.3	1.7	105.2
Cs	98.1	1.9	97.8

Table 3.3 抽出工程における元素の挙動

元素	フラクションへの分配 (%)		マスバランス (%)
	ラフィネート	DIDPA溶媒	
Tc	99.93	0.07	100.8
Fe	5.3	94.7	-
Y	0.05	99.95	-
La	8.2	91.8	-
Nd	3.6	96.7	-
Gd	1.6	98.4	-

Table 3.4 活性炭吸着工程における元素の挙動

元素	1回目		2回目	
	吸着率(%)	分配係数(ml/g)	吸着率(%)	分配係数(ml/g)
Tc	73.9	113	84.2	213
Mo	79.5	155	80.0	160
Ru	47.3	36	36.0	23
Rh	6.6	2.8	8.3	3.6
Pd	64.1	71	3.6	1.5
Sr	3.8	1.6	0.5	0.2

Table 3.5 脱硝沈殿工程における元素の挙動

元素	沈殿率(%)	
	本研究	文献(9)
Tc	98.2*	-
Ni	64.2	96.9
Cr	99.6	97.7
Ru	51.7	88.6
Rh	99.0	99.1
Pd	86.7	99.8
Sr	34.0	73.0
Cs	0.12	4.1
pH	7.5	9.1

* : Tc試験でのPGM脱硝後液のpHは8.8

Table 3.6 Tc溶出操作における元素の挙動

元素	各操作ごとの溶出率(%)			3回の溶出操作後の 沈殿残留率(%)
	H ₂ O ₂	NH ₄ OH-H ₂ O ₂	4M HNO ₃	
Tc	84.6	30.8	65.2	3.7
Ni	52.3	<0.1	76.1	11.4
Cr	11.1	48.3	71.0	13.3
Ru	<0.1	<0.1	26.3	73.7
Rh	0.4	3.8	12.4	84.0
Pd	11.3	<0.1	31.2	61.0
Sr	29.5	<0.1	12.6	61.7

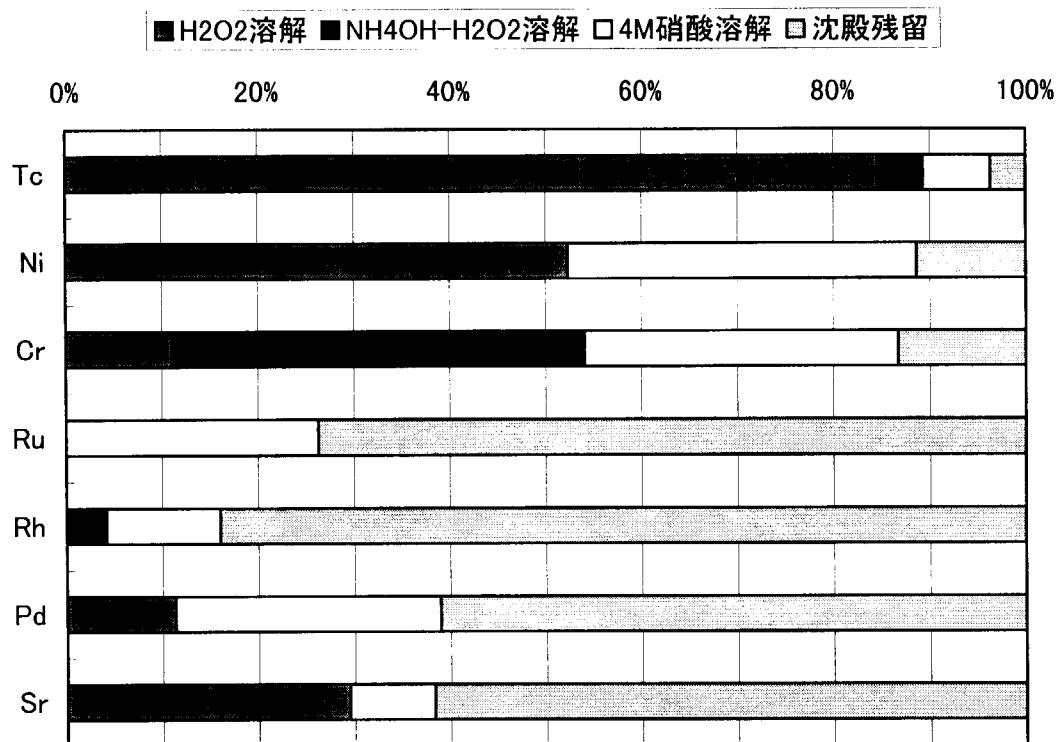


Fig. 3.1 PGM脱硝沈殿からの溶出操作における各元素の分配

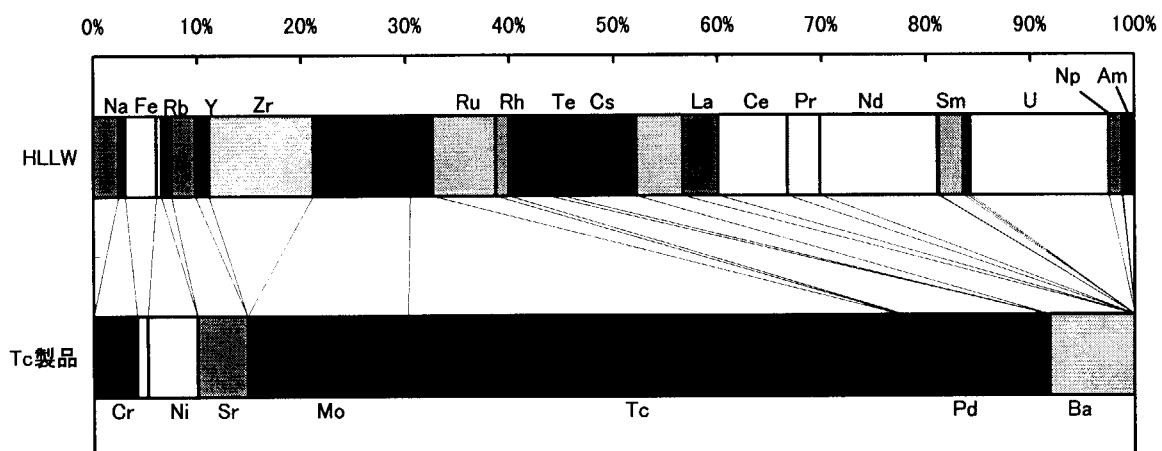


Fig. 3.2 Tc製品の推定組成(重量%)

4. 結 論

フラスコスケールでの実験により、4群群分離プロセスの各工程を一貫してTcの挙動を把握する試験を実施した結果、Tcはこれまでの各工程個々を対象とした研究で得られた結果に一致した挙動をとることが確認された。新たに加えられたコロイド除去工程においてもTcの共沈率は無視できるほどに低いことがわかった。Tc及び白金族元素分離のための脱硝沈殿工程においては、マクロ量のTcに対しても沈殿率は98.2%となった。H₂O₂による沈殿からのTc溶出では、1回の溶出操作で84.6%の溶出率が得られ、トレーサー量のTcによる実験結果を再現できた。この脱硝沈殿-H₂O₂溶出というTc分離法では、Tcの回収率として95%程度が得られることが推定された。本手法により分離されたTc製品の純度向上の点では、沈殿の洗浄方法の検討及び溶出操作の最適化が必要である。

謝 辞

Tc酸化物の溶解、活性炭吸着における元素挙動等に有益な助言をいただいた、物質科学部研究室の山岸 功氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) Kubota, M., Yamaguchi, I., Morita, Y., Kondo, Y., Shirahashi, K., Yamagishi, I., Fujiwara, T. : "Proc. of Int. Conf. and Technology Exposition on Future Nuclear Systems : Emerging Fuel Cycles and Waste Disposal Options (GLOBAL'93)", 588 (1993).
- (2) Kubota, M. :"4th Int. Conf. on Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management (RECOD'94)", Proc. Vol.I, Session 7A, Paper No.2 (1994).
- (3) 久保田益充, 中村治人 : JAERI-M 85-066, "高レベル廃液群分離技術の研究開発の成果と将来計画" (1985).
- (4) 山口五十夫, 久保田益充 : JAERI-M 87-034, "群分離法の開発 : テクネチウムの回収法ーその1" (1987).
- (5) Yamagishi, I., Kubota, M. : J. Nucl. Sci. Technol., 26, 1038 (1989).
- (6) Yamagishi, I., Kubota, M. : J. Nucl. Sci. Technol., 27, 743 (1990).
- (7) Yamagishi, I., Kubota, M. : J. Nucl. Sci. Technol., 30, 717 (1993).
- (8) Kubota, M. : Radiochim. Acta, 63, 91 (1993).
- (9) 溝口研一, 山口五十夫, 森田泰治, 藤原 武, 久保田益充 : JAERI-Research 97-071, "群分離法の開発 : 脱硝によるTc-白金族元素の最適沈殿分離プロセスの構築ー脱硝後の液の酸濃度に影響を与える諸因子及び反応の考察ー" (1997).
- (10) 山口五十夫, 龍ヶ江良三, 森田泰治, 近藤康雄, 白橋浩一, 山岸 功, 藤原 武, 藤本啓一, 谷津 修, 藤田民義, 黒羽根史朗, 青山三郎, 久保田益充 : JAERI-Tech 94-030, "群分離法の開発 : NUCEF内に建設した群分離試験施設" (1994).
- (11) 山口五十夫, 森田泰治, 近藤康雄, 山岸 功, 藤原 武, 渡邊雅之, 溝口研一, 龍ヶ江良三, 青山三郎, 久保田益充 : JAERI-Tech 96-009, "群分離法の開発 : NUCEF内群分離試験装置によるコールド試験(I)" (1996).
- (12) Kubota, M., Nakamura, H., Tachimori, S., Abe, T., Amano, H. :"Management of Alpha-Contaminated Wastes", 551 (IAEA-SM-246/24) (1981).
- (13) Morita, Y., Fujiwara, T., Shirahashi, K., Watanabe, M., Tatsugae, R., Kubota, M. : "Proc. of Int. Conf. on Evaluation of Emerging Fuel Cycle Systems (GLOBAL'95)", 1163 (1995).
- (14) 松村昌明, 近藤康雄, 久保田益充 : JAERI-M 93-009, "群分離法の開発 : 模擬高レベル廃液の脱硝により生成するスラリーのろ過特性" (1993).
- (15) 森田泰治, 山口五十夫, 藤原 武, 溝口研一, 久保田益充 : JAERI-Research 97-046, "群分離法の開発 : 群分離プロセス前処理工程におけるコロイドの生成防止及び除去" (1997).
- (16) Shirahashi, K., Kubota, M. : J. Nucl. Sci. Technol., 29, 559 (1992).
- (17) 溝口研一, 山口五十夫, 森田泰治, 山岸 功, 藤原 武, 久保田益充 : JAERI-Research 98-026, "群分離法の開発 : バインダで造粒したチタン酸へのSrの吸着挙動" (1998).
- (18) Kondo, Y., Matsumura, M., Kubota, M. : J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles, 177, 311 (1994).
- (19) Morita, Y., Yamaguchi, I., Fujiwara, T., Mizoguchi, K., Kubota, M. : "Proc. of 4th. Int. Information Exchange Meeting of Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation", 11-13 September,

- 1996, Mito, Japan, OECD/NEA, p.375 (1997).
- (20) Izatt, R. M., Eatough, D., Christensen, J. J. : J. Chem. Soc. (A), 1967, 1301 (1967).
- (21) Shorokhov, N. A., Vashman, A. A., Samsonov, V. E., Chuklinov, R. N., Shmidt, V. S. : Russ. J. Inorg. Chem., 27, 1773 (1982).

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	ボルト	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束密度	ジーメンス	S	A/V
磁束度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²
セルシウス温度	ヘンリー	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	°C	
光强度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m ²
吸収線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

群分離法の開発・小規模実験による4群群分離プロセスにおけるテクネチウム挙動の確認