

JAERI-Research
98-025



群分離法の開発：DIDPAの精製

1998年4月

渡邊雅之・森田泰治・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。
入手の問合わせは、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）で複写による実費頒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
印 刷 いばらき印刷(株)

群分離法の開発：D I D P Aの精製

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

渡邊 雅之・森田 泰治・久保田益充

(1998年4月1日受理)

現在開発を行っている4群群分離プロセスでは、高レベル廃液からジイソデシルリン酸 (DIDPA) を用いて、超ウラン元素を溶媒抽出により分離することに成功している。溶媒抽出の際、DIDPAは放射線による放射線分解、酸による加水分解をし、劣化する。この劣化生成物のうち、主要なものはモノイソデシルリン酸 (MIDPA)であるが、従来これを除去するために、エチレングリコールによる溶媒抽出法が使われてきた。しかし、エチレングリコールは比較的粘性が高く、分相に時間がかかること、使用後のエチレングリコールを再生しリサイクルできないことなどの問題があった。本研究では、エチレングリコールを用いる方法で分相の速さを改善する方法として、アセトンまたはメタノールを20%ほど添加することで分相を促すことを見いだした。さらに、メタノール、アセトン水溶液を用いた新たな精製法を考案し、エチレングリコールを用いる方法に匹敵する優れた方法であることを示した。

Development of Partitioning Process: Purification of DIDPA

Masayuki WATANABE, Yasuji MORITA and Masumitsu KUBOTA

Department of Chemistry and Fuel Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 1, 1998)

The partitioning process has developed and demonstrated that the solvent extraction with diisodecylphosphoric acid(DIDPA) can successfully separate transuranium elements from a high-level liquid waste. In the solvent extraction, DIDPA is decomposed by radiolysis and hydrolysis. The main degradation product is monoisodecylphosphoric acid(MIDPA). Ethylene glycol has been used for removing the product by a solvent extraction method. However this method has two drawbacks that two phases separate slowly and the used ethylene glycol is not regeneratable. First it was found that the addition of acetone or methanol with 20 volume % improved the phase separation. Then a new purification method was developed by using an aqueous solution of methanol or acetone. The new purification method is as excellent as the ethylene glycol method for the removal of MIDPA.

Keywords: DIDPA, MIDPA, Partitioning Process, Solvent Extraction, Purification

目 次

1. はじめに	1
2. 有機リン酸系抽出剤の精製法	2
2.1 溶媒抽出法	2
2.2 結晶化法	3
3. 実験	4
3.1 試薬、分析機器、測定	4
3.2 精製法の比較	4
4. 結果と考察	5
4.1 エチレングリコールを用いた方法	5
4.1.1 添加剤による相分離の改善	5
4.1.2 添加剤による分離性能への影響	5
4.2 アセトン、メタノールを用いた方法	7
5. まとめ	8
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Purification of Organophosphoric Acid	2
2.1 Solvent Extraction	2
2.2 Crystallization	3
3. Experimental	4
3.1 Reagent, Apparatus and Measurement	4
3.2 Purification	4
4. Results and Discussion	5
4.1 Purification with Ethylene glycol	5
4.1.1 Improvement of Phase Separation	5
4.1.2 Effect of Additive on Purification Efficiency	5
4.2 Purification with Acetone and Methanol	7
5. Conclusion	8
Reference	9

This is a blank page.

1.はじめに

現在開発中の4群群分離プロセスでは、使用済み燃料の再処理に伴って発生する高レベル廃液 (HLW) 中の元素を半減期、放射能毒性、有用性を考慮した上で、図1に示すように超ウラン(TRU)元素群、Cs-Sr群、Tc-白金元素群、その他の元素群の4つのグループに分離する。分離することによって、高レベル廃液の安全でかつ合理的な処分、さらには有効利用が期待できる。なかでも長寿命核種を含む超ウラン元素群を効率良く分離することは、これらを消滅処理し、合理的に処分する上でも最重要課題である。

これまでの研究開発の結果、ジイソデシルリン酸 (DIDPA) が超ウラン元素の抽出分離において、優れた性能を有していることを報告してきた¹⁾。4群群分離プロセスにおいて、超ウラン元素の分離は、高レベル廃液からランタノイド、超ウラン元素を分離するDIDPA溶媒抽出プロセスと、抽出されたランタノイドと超ウラン元素をジエチレントリアミン五酢酸 (DTPA) 等を用い、逆抽出分離する選択的逆抽出プロセスにより行われる。

超ウラン元素の抽出分離プロセスでは、多量の放射性核種を含む硝酸酸性水溶液が対象であるため、溶媒の加水分解による劣化、放射線による劣化を考慮する必要がある。超ウラン元素をより高い効率で分離し、より廃棄物の少ない安全なプロセスを構築するという観点から、使用する化学薬品はリサイクル可能で、劣化生成物の除去が容易であることが望ましい。DIDPAのようなジアルキルリン酸による抽出では、主たる劣化生成物であるモノアルキルリン酸が存在することによって、ランタノイドの相互分離が悪くなることが報告されている²⁾。つまり、抽出剤の劣化生成物の除去は、TRU元素の分離効率を上げる上でも重要であるといえる。

従来、ジアルキルリン酸の精製はエチレングリコールを用いる溶媒抽出法で行われてきた(後述)。しかし、この方法には、二つの大きな問題がある。その第一が、エチレングリコールの持つ粘性に起因する有機相とエチレングリコール相との分相の悪さである。粘性が高く、分相のあまりよくない溶媒を用いることは、抽出装置を大型化させ、また、実際に抽出分離を連続で行う場合にエントレインメントを増大させるため、効率的な分離プロセスを構築できない。この方法を改良すべく、本研究では、水、メタノールなどの添加剤を加える事でエチレングリコール相の粘性を下げ、分相の改善がみられるかどうかを検討し、比較を行った。またそれらの系で精製を行い、添加剤が分離性能にどのような影響を与えるかを検討した。

第二の問題点は、主要副生成物であり、劣化生成物でもあるモノアルキルリン酸がエチレングリコール相中へ蓄積し、エチレングリコールの再利用ができないということである。そこで、抽出溶媒の簡便な精製法を開発すべく、溶媒抽出による従来にない精製法について検討し、従来の方法(次節)との比較を行った。新しい抽出溶媒は、1) アルキルリン酸のドデカン溶液と混和しないこと、2) アルキルリン酸と水素結合などの相互作用が可能な置換基を持っていること、という条件を満たす必要がある。本研究では、アセトン、メタノールを用いた方法を検討した。

2. 有機リン酸系抽出剤の精製法

現在までに有機リン酸系抽出剤の精製法については、大きく分けて溶媒抽出法と抽出剤の金属錯体を結晶化させる方法の2つの方法が知られている。以下にそれぞれについて概観する。

2.1 溶媒抽出法

もっとも古く有名な方法は、StewartとCrandallの方法で、モノアルキルリン酸とジアルキルリン酸を表1に示すように、有機相に種々のアルコール、エーテル、ケトン、水相に水、エチレングリコールを用い、それらを組み合わせて分離している³⁾。また、長鎖のアルキル基を持つものに対しては、水よりエチレングリコールを用いた方がよいとされている。Peppardらは、エチレングリコールを用いる方法によるモノアルキルリン酸とジアルキルリン酸の分離に加え、中性のピロリン酸エステルの分解を行った²⁾。また、Schmittらはジ(2-エチルヘキシル)リン酸(DEHPA)を使って、有機化合物の不純物だけでなく、金属不純物である鉄の除去についても検討し、総合的に精製を行った⁴⁾。図2にその手順を示す。Schmittの精製法は大きく分けて1) 不純物として含まれている金属の除去とピロリン酸エステルの分解、2) 中性の不純物の除去、3) モノエステルリン酸の除去の3つのステップからなる。つまり、ステップ3はStewartとCrandallの方法、ステップ2はPeppardの改良、ステップ1はSchmittらの改良ということになる。まず、ステップ1では、抽出剤の原液を濃塩酸と還流することにより、ピロリン酸エステルを分解し、鉄などの金属を除去する。塩酸の濃度、還流時間はリン酸の持つアルキル基の大きさにより異なり、置換基が大きいほど濃い塩酸を使い、還流も長く行う。ここで、還流により完全に鉄が除去できなかった場合、さらに濃い塩酸または、リン酸でスクラブする事により鉄を取り除く。次のステップ2では、抽出剤を水酸化ナトリウムで中和する。中和後、微量の水酸化ナトリウムを添加しpH=8から10程度に調整する。その後、石油エーテルで洗浄することにより中性不純物のアルコールなどを取り除く。仮にこの段階まで鉄が残留していても、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の沈殿となって取り除かれる。最後のステップで、中和された抽出剤を希塩酸と接触させて酸性化し、ジエチルエーテルで希釈した後、エチレングリコールを使ってモノアルキルリン酸を除去する。エーテル相中のエチレングリコールを水または薄い酸で洗浄することにより取り除く。最後に、エーテルを減圧下で取り除き純粋なジアルキルリン酸を得る。また、ここで得られたエチレングリコール相を同量の水で希釈し、ジエチルエーテルと振とうすることで、エーテル相にモノアルキルリン酸を抽出することが可能で、モノアルキルリン酸を単離する事もできる。

2.2 結晶化法

Partridgeらは抽出剤の銅錯体の再結晶を行うことにより精製できることを見いだしている⁹⁾。DEHPAをベンゼン、四塩化炭素、シクロヘキサン、ジエチルエーテル、メタノールのいずれかに溶解した約1 Mの溶液と、 $\text{Cu}(\text{SO}_4)$ 水溶液にNaOHを添加して作った $\text{Cu}(\text{OH})_2$ の飽和水溶液とを混合し、激しく攪拌する。水相を取り除いた後、アセトンをゆっくり添加し銅錯体の沈殿を得る。濾過後、得られた沈殿をアセトンで洗浄、風乾し、同じ溶媒を用いて再結晶する。最後に得られた結晶を希塩酸と接触させて純粋な抽出剤を得る。他の金属(Na,Zn,Ni,Co,Fe,Cr,Ce,Nd,U)ではうまくいかないと報告されている。

3.実験

3.1 試薬、分析機器、測定

DIDPA(Diisodecyl phosphoric acid)は、大八化学(株)より得たものを、その他の試薬は、市販の試薬特級のものをそのまま使用した。なお、市販のDIDPAには、不純物として、MIDPA(Monisodecyl phosphoric Acid)が約5%、アルコールなど中性不純物が約5%含まれている。即ち、0.5M DIDPAドデカン溶液中にMIDPAは0.04M程度含まれていることになる。

滴定では、平沼産業社製 Comtite 2000を使用した。純度の決定およびジアルキルリン酸、モノアルキルリン酸の定量は、ジアルキルリン酸、モノアルキルリン酸の溶液の一定量を80%イソプロパノール水に溶解し、0.1M水酸化ナトリウム水溶液で室温で滴定して行った。

3.2 精製法の比較

精製法の比較のために行った実験は、ピロリン酸、鉄などの金属を除去していないDIDPAを用いて行った。また、結晶化法による精製法については比較のための実験は行わなかった。0.5Mに調整したDIDPAのドデカン溶液2mlを10ml遠沈管にいれ、同量のメタノール水、アセトン水もしくはエチレングリコールを加え、30分間振とうした。そのまま静置し、分相の速さの比較を行った後、3000rpmで5分間遠心分離した。両相を取り分け、それぞれの相を上述の方法で滴定した。結果を次式により計算し分配比を求めた。

$$D = \frac{[\overline{\text{Extractant}}]}{[\text{Extractant}]}$$

ここで $[\overline{\text{Extractant}}]$ は有機相中の抽出剤濃度、 $[\text{Extractant}]$ は水相またはエチレングリコール相中の抽出剤濃度をあらわす。

4. 結果と考察

4.1 エチレングリコールを用いた方法

4.1.1 添加剤による相分離の改善

エチレングリコールの分相を改良するために様々な添加剤を用いて精製を行ったときの、分相の状況の結果を表2に示す。用いた添加剤は、エチレングリコールとよく混和し、粘性が低いものを選んだ。分相の状況は、定量的に評価することが難しいが、今回は、振とう直後から二つの相が完全に分離するまでの時間を測定し、平均で3分から5分程度のものを△、2、3分のを○、1分程度のを◎の記号を使って示した。まず、添加量を10%にして行ったが、どの添加剤の場合でも10%程度の少量では、相分離を速めるには至らなかった。そこで、添加量を増やし20%とすると、エタノールでは改善はみられなかったものの、水、メタノール、アセトンを追加したケースでは、わずかながら分相が速まることがわかった。さらに添加量を増やすと、水を用いた場合では、添加量が約30%を越えたところで、エマルジョン化した。アセトン、メタノールでは、添加量を増加させるに伴い、分相はかなり改善されたが、エタノールでは大きく改善されることはなかった。しかし、アセトンを追加した系については、添加量を増加させていくと、アセトンが有機相に移り、振とう後のO/A比は1より大きくなる。50%アセトン-エチレングリコールの時、O/A比は1.5であった。これは添加したアセトンのうち40%程度が有機相中に抽出されたことに相当する。

以上の結果から、精製にエチレングリコールを用いる場合、アセトン、メタノールによって分相の速さを促進させ得ることが分かった。また、添加剤の添加量の増加に伴い、分相の速さが増すことも確認された。ただ、アセトンを用いると、アセトン自体が有機相に抽出されるため、分相を改善するためにはメタノールを用いることが一番適しているといえる。

4.1.2 添加剤による分離性能への影響

分相の促進のために加えられる添加剤が、DIDPAの精製をおこなう際与える影響を評価するため、DIDPA溶液からMIDPAをエチレングリコール相へ抽出（以下非ドデカン相への抽出を逆抽出と記す）した結果を表3に示す。水を添加した系では、DIDPAの逆抽出は見られませんが、添加量の増加に伴いMIDPAの逆抽出分配比は大きくなる。水を加えなかった場合と水を20%加えた場合の逆抽出後の有機相中のMIDPA濃度を比較してみると、無添加の時MIDPA濃度は0.08Mであるのに対し、20%添加時には0.018Mで2倍強も有機相中に残留し、分離性能を落としてしまう。アセトン、メタノール、エタノールを加えた系では、添加量の増加に伴い、MIDPAは逆抽出されやすくなる。アセトンを加えた系で逆抽出後の有機相中のMIDPA濃度を比較すると、たとえば10%の添加で0.007M、50%で0.0024Mとなり、添加量を増やすことでMIDPAを逆抽出しやすくなる。メタノール、エタノールを加えた系でも同じような傾向が見られ、50%添加するとMIDPAの残留量はメタノールで0.0046M、エタノールで0.0055MでMIDPAの逆抽出能を向上させている。このように添加量の増加に伴いMIDPAが逆抽出しやす

くなる反面、DIDPAも同時に逆抽出されやすくなる。アセトン、メタノール、エタノールをそれぞれ添加した場合、同時に逆抽出されるDIDPAの濃度を比較してみると、アセトンでは20%添加してもDIDPAはほとんど逆抽出されないが、50%添加した系で0.01M、メタノールでは20%の添加で0.005M、50%ではさらにその量は増え、0.046Mと約10%ものDIDPAが逆抽出される。エタノールではメタノールの系よりもDIDPAの逆抽出量は増え、たとえば50%添加したとき0.089M、20%弱のDIDPAが逆抽出され、分離能はメタノールよりも悪くなる。このように分離能力としては、アセトンの添加がもっとも良いといえるが、アセトン自身の抽出されてしまうという問題がある。そこで、アセトンのアルキル基の側鎖をかえた2-ブタノン、3-メチル-2-ブタノンについて実験を行った。しかしこれらを添加しても、DIDPAは逆抽出されやすくなることはないばかりか、3-メチル-2-ブタノンを添加するとDIDPAの逆抽出も0.033Mとなる。以上の結果から、添加量に関してはさらに詳しく検討する必要があるものの、メタノールの添加が分相の改良にはもっとも適しているといえる。

4.2 アセトン、メタノールを用いた方法

エチレングリコールを用いた精製法に替わる方法として、新たにアセトン、メタノールを用いた精製法について検討した。エチレングリコールを用いる方法では、分相の悪さが問題となっていたが、表4に示すように、アセトン、メタノールを用いる方法では、分相は非常によかった。ただ、どちらを用いた場合でもアセトン、メタノール自身が有機相に抽出されてしまうことがわかった。アセトンの場合、水の添加がないときにはすべて有機相中に溶解してしまい2相とならない。そこで、有機相への溶解を防止するために水を添加しても、水10%を添加しても振とう後のO/A比は、1.5さらに水を添加して20%とすると1.2になり、添加する水の量を増やすことで有機相への溶解をいくぶん減らすことができたが、添加する水の量が30%をこえると、今度はエマルジョンが生成してしまうことがわかった。メタノールでは有機相中への溶解はいくぶん低く、100%メタノールで振とう後のO/A比は、1.2、10%水を添加した溶液で1.1となり、添加量を20%に増やすと、有機相中へのメタノール溶解は抑制することができた。しかし、メタノールの場合でも添加する水の量が30%を超えるとエマルジョンの生成が起こることが確認された。

表5にアセトン、メタノールを用いて行った抽出結果を示す。アセトン、メタノールを用いたいずれの方法もMIDPAを逆抽出でき、DIDPAの精製に有用であることが分かった。ただ、MIDPAの逆抽出と同時にDIDPAも逆抽出されるため、効率という面からも評価をしてみる必要がある。MIDPAの逆抽出は、アセトンを用いた系では、エチレングリコールを用いて行った結果と比べると、分配比にすると約3倍以上低下し、逆抽出後の有機相中の残留量に換算すると10%水を添加した場合0.016M、20%で0.02Mと2倍以上ものMIDPAが残留するのに対し、メタノールを用いた系では、含水量が10%程度まではエチレングリコールによる精製よりもMIDPAを逆抽出しやすく、ほとんど100%近くのMIDPAが逆抽出される。ただし、添加する水の量を増やし、20%とすると、今度はエチレングリコールよりも逆抽出しにくくなり、抽出率でも倍以上、有機相中のMIDPAの残留量も0.013Mと1.5倍以上残留することが分かった。同時に起こるDIDPAの逆抽出に関しては、アセトンを用いた系よりもメタノールを用いた系の方が逆抽出されやすく、20%添加した場合逆抽出されるDIDPAの量を比較すると、アセトンで0.007M、メタノールで0.023Mと3倍以上であった。

以上の結果から、アセトンを用いる方法は、有機相からMIDPAを除去するには優れた方法であるが、無視できない量のアセトンが有機相に溶け込み、これを除去する必要があるため、エチレングリコールを用いる方法に替わり得る方法とするにはさらに改善の余地がある。一方メタノールを用いる方法では、アセトンの場合と同様、メタノールの抽出はおこるが、20%程度水を添加することで、有機相中へのメタノールの溶解を防ぎ、同時におこるDIDPAの逆抽出も防ぐことが可能で、アセトンを用いる方法よりも有効な方法であるといえる。

5.まとめ

DIDPAの精製法について2種類の方法を比較検討した。まず、従来から知られているエチレングリコールを用いる方法では、これまで問題とされてきた分相の悪さを改善するため、いくつかの添加剤について検討した。次に、アセトン、メタノールを用いる新しい方法について調べた。

エチレングリコールを用いる方法では、分相を改善させるためには、水、アセトン、メタノール、エタノールを少なくとも20%以上添加することが必要である。しかし、アセトンやアルコールを添加すると、その添加量に比例して、DIDPAの逆抽出も同時に起こる。特にアセトンを用いた場合では添加量の増加に伴って、アセトンが有機相に抽出れやすくなる。そのため、分相を改善するにはメタノールを添加する方法がよりよい方法といえる。ただし、この場合添加量によっては、同時に逆抽出されるDIDPAの量が問題となる。実際、50%のメタノールを添加した場合、DIDPAの逆抽出量は全体の10%弱で無視できなくなる。メタノールの添加量を調整すれば、DIDPAの逆抽出を低く抑えることが可能であると予想されるため、添加量についてはさらなる検討が必要である。

今回新しく試みたメタノール水溶液、アセトン水溶液を用いる方法では、分相はきわめて速やかであった。アセトン、メタノールが有機相に溶解するという現象がみられたが、水を添加することで抑制することができることが分かった。水の添加量が30%を越えるとエマルジョンを生成してしまうため、水の添加量の調整が重要である。MIDPAの除去に関しては、アセトン、メタノールどちらの方法においてもMIDPAを除去できることが分かった。分離性能という点だけに着目すれば、エチレングリコールを用いた方法の方が多少よいのだが、分相の良さなど操作性の点も考慮すると、アセトン、メタノールを用いた方法の方がむしろ優れている。

以上から、エチレングリコールを用いた方法では、利点としては、MIDPAの分離性能がよいこと、問題点としては、1)分相が悪いこと、2)分離後のエチレングリコールを再生利用が困難なこと、が挙げられる。分相の悪さについてはメタノールを添加することで、軽減が可能であることを示した。しかし、二番目の問題点については、現在のところ解決策はなく、今後さらなる研究が必要となる。一方、アセトン、メタノール水溶液を用いた方法では、相分離も速やかで操作性もよく、分離性能に関しても、エチレングリコールよりわずかに低いものの、十分にMIDPAの除去が可能である。また、使用後のアセトン、メタノールは容易に回収可能であるため、プロセスを構築する上で必要条件となる”リサイクル可能な閉じた系”で有ることを満たしている。以上のことから、今回新たに提案したアセトン、メタノールを用いる精製法は、エチレングリコールによる方法に匹敵する優れた方法であるといえる。

本研究では、アセトン、メタノールを用い精製をおこなったが、これらのほかにも、酢酸、ホルムアルデヒドなどを用いても精製できる可能性があり、今後検討を進める予定である。また、実プロセスへの適用を目指し、ミキサーセトラを用いた連続精製処理についても検討する計画である。

参考文献

- 1) Y. Morita, T. Fujiwara, K. Shirahashi, M. Watanabe, R. Tatsugae, M. Kubota, *Proc. Int. Conf. on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems (Global '95)*, p. 1163, Varsallies, France, Sep. 11-14, (1995)
- 2). D. F. Peppard, G. W. Mason, J. L. Maier, and W. J. Driscoll, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **4**, 334, (1957)
- 3). D. C. Stewart and H. W. Crandall, *J. Am. Chem. Soc.*, **73**, 1377, (1951)
- 4). J. M. Schmitt, C. A. Blake, Jr., *ORNL-3548*, (1964)
- 5). J. A. Partridge, R. C. Jensen, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **31**, 2587, (1969)

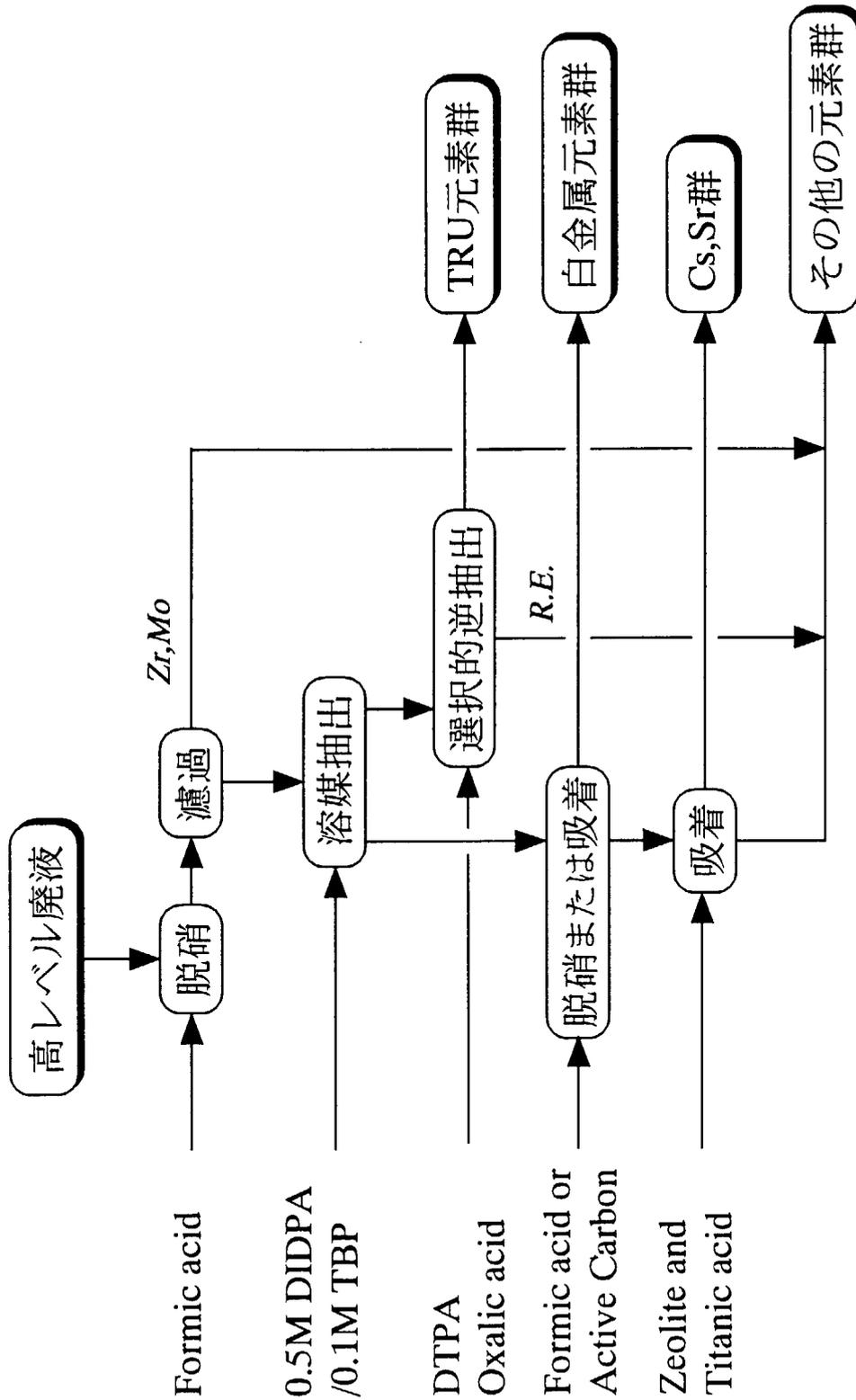


図1 4群分離プロセスのフロー

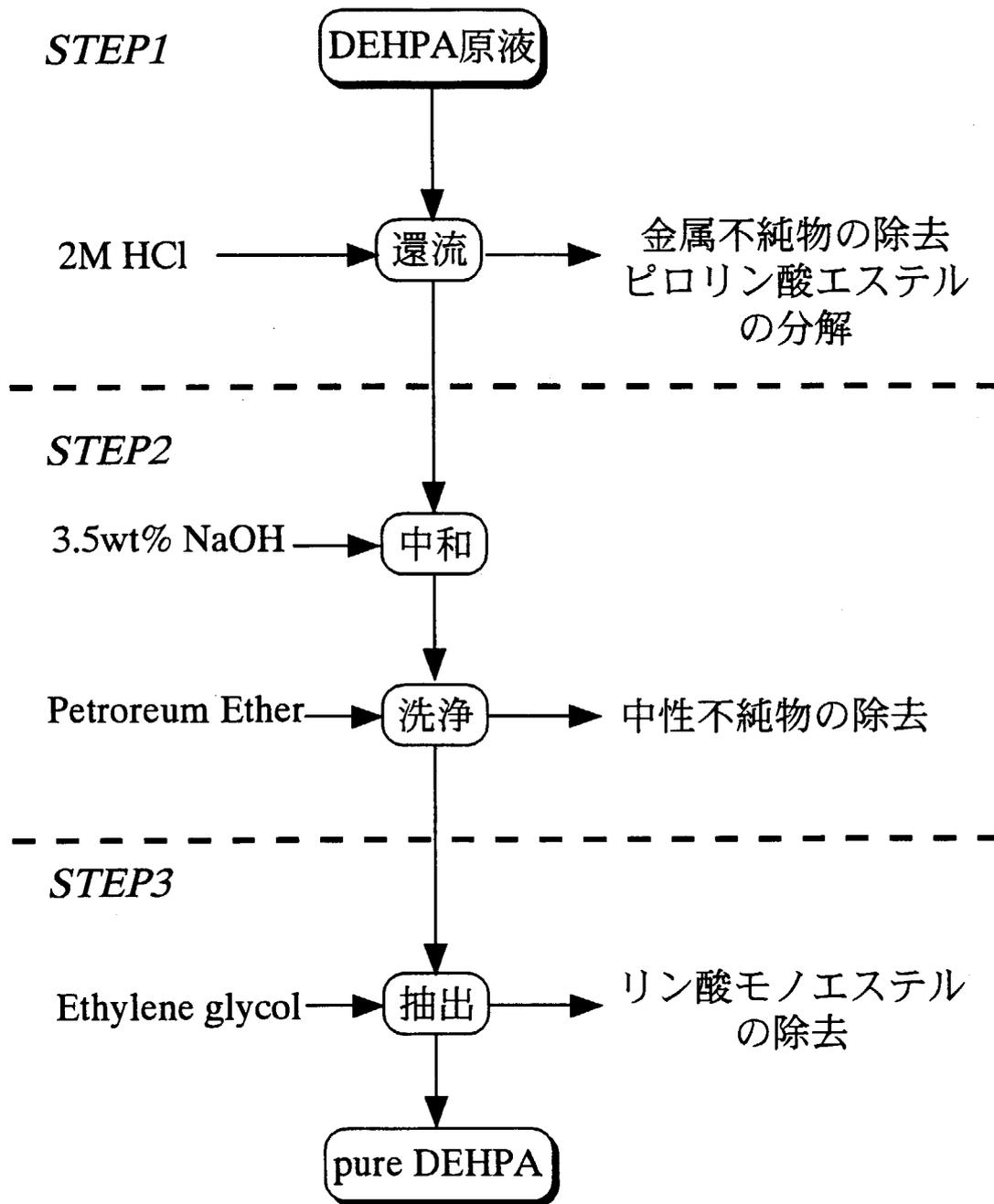


図2 Schmittの精製法

表 1 Stewart, Crandallが用いた溶媒の組み合わせ

有機相	水相
n-Primary amyl alcohol	H ₂ O
Dibutylcarbitol	H ₂ O
Diethylether	H ₂ O
Dibutylether	H ₂ O
Methylisobutylketone	H ₂ O
Diethylether	Ethyleneglycol

表 2 エチレングリコール抽出法における添加剤による分相の改善

添加剤	添加量 (体積%)	分相の状況	振とう後の O/A比
H ₂ O	10%	△	1.0
	20%	○	1.0
	30%	エマルジョン	-
Acetone	10%	△	1.0
	20%	○	1.0
	50%	◎	1.5
Methanol	10%	△	1.0
	20%	○	1.0
	50%	◎	1.0
Ethanol	10%	△	1.0
	20%	△	1.0
	50%	○	1.0
2-Butanone	10%	△	1.0
3-Methyl-2-butanone	10%	△	1.0

◎：きわめて良好、○：良好、△：改善なし

表3 エチレングリコールを用いた精製

添加剤	添加量(体積%)	分配比		逆抽出後の有機相中濃度(M)	
		D_M	D_{DI}	MIDPA	DIDPA
なし	0%	0.25	>1000	0.0080	0.500
	10%	0.47	>1000	0.0120	0.500
	20%	0.83	>1000	0.0180	0.500
H ₂ O	10%	0.22	>1000	0.0070	0.500
	20%	0.20	>1000	0.0067	0.500
	50%	0.063	40	0.0024	0.490
Acetone	10%	0.26	310	0.0083	0.498
	20%	0.23	91	0.0075	0.495
	50%	0.13	9.8	0.0046	0.454
Methanol	10%	0.24	450	0.0077	0.499
	20%	0.26	60	0.0083	0.492
	50%	0.16	4.6	0.0055	0.411
Ethanol	10%	0.28	>1000	0.0088	0.500
	10%	0.25	14	0.0080	0.467

表4 アセトン、メタノールを用いた精製における分相状況

	水の添加量 (体積%)	分相の状況	振とう後のO/A比
Acetone	0%	混和	-
	10%	◎	1.5
	20%	◎	1.2
	30%	エマルジョン	-
Methanol	0%	◎	1.2
	10%	◎	1.1
	20%	◎	1.0
	30%	エマルジョン	-

◎ : 相分離良好

表5 アセトン、メタノールを用いた精製

	水の添加量 (体積%)	分配比		逆抽出後の 有機相中濃度(M)	
		D_M	D_{DI}	MIDPA	DIDPA
Acetone	10%	0.64	6.5	0.016	0.433
	20%	1.0	70	0.02	0.493
Methanol	0%	<0.001	0.44	0.00	0.153
	10%	<0.001	4.2	0.00	0.404
	20%	0.49	21	0.013	0.477

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	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 同様の名称をもつ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
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光量	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	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 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

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
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

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、1eVおよび1u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, ヘクト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。
- E C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

粘度 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	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	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁷	1	8.59999×10 ³	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	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

1 cal= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15°C)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

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

群分離法の開発：DIDPAの精製