



JP0150378

JAERI-Research

2001-026



劣化溶媒に対する ブチルアミン洗浄剤の性能試験

2001年3月

亀井 一成・伊東 芳紀・宝徳 忍・朝倉 傑英
渡辺 真樹男・峯尾 英章・内山 軍藏

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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

劣化溶媒に対するブチルアミン洗浄剤の性能試験

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部

亀井 一成・伊東 芳紀・宝徳 忍・朝倉 俊英

渡辺 真樹男・峯尾 英章・内山 軍藏

(2001年2月19日受理)

使用済燃料の再処理・抽出で発生した劣化溶媒を用いて、ブチルアミン系化合物洗浄剤による溶媒洗浄試験を行った。溶媒洗浄にはグローブボックス内に設置した小型ミキサセトラを用い、洗浄は各4段毎に分けて二つの工程（計8段）とした。洗浄剤の種類またはpHを変化させたものを組み合わせ、四つの条件について試験を行った。

DBPはpH 1.5以上で洗浄効果が確認された。また、全 α 線および全 β 線放出核種に関しても洗浄効果が確認された。除染係数は全 α 線放出核種が120～1,100、全 β 線放出核種が54～100であった。個々の核種については、 ^{241}Am 、 $^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$ 、 ^{137}Cs が、数十～数百のオーダーの除染係数であったのに対して、 ^{106}Ru 、 ^{95}Nb 、 ^{95}Zr の場合、十前後の除染係数であった。

ミキサセトラ各段の水相におけるpH値を洗浄剤単体と比較し、その違いを溶媒に含まれる硝酸成分の影響と、炭酸水素ブチルアミンからの炭酸水素基の遊離・分解によって説明を試みた。DBP、放射性核種の洗浄メカニズムに関しては、過去の文献に述べられた分配のpH依存性および洗浄過程における錯体形成をもとに反応式を提示した。

The Washing Tests of Degraded Solvent with Butylamine Compounds

Kazushige KAMEI, Yoshinori ITOH, Shinobu HOUTOKU, Toshihide ASAKURA,
Makio WATANABE, Hideaki MINEO and Gunzo UCHIYAMA

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 19, 2001)

The solvent washing tests were carried out with butylamine compound for solvent washing reagents. A small size mixer-settler having 8 stages in the glove box was used in the tests. The solvent washing process under development consists of 2 washing steps. In the washing tests, 4 stages of the mixer-settler were used for each washing step. The solvent washing behaviors were studied under 4 flow sheet conditions such as butylamine compounds and pH in aqueous phase.

DBP in the solvent was washed effectively under the conditions of pH of more than 1.5. Also total alpha and total beta nuclides in the solvent were washed by the decontamination factors of 120 ~ 1,100 and 54 ~ 100, respectively. The decontamination factors for ^{241}Am , $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ and ^{137}Cs were of the orders of several 10s and 100s, while those for ^{106}Ru , ^{95}Nb and ^{95}Zr were about 10.

Comparing pH of aqueous phase of each stage with that of washing reagents, the difference was explained by the influence of nitric acid in the solvent and of dissolving of hydrogencarbon. As for the solvent washing mechanism of DBP and radionuclides, some reaction formulae were presented based on the information of the previous papers about the pH dependence of partition and the complex formation in the washing process.

Keywords : Degraded Solvent, Butylamine, Solvent Washing, Mixer-settler, DBP, Radionuclides

目 次

1. はじめに -----	1
2. 試験 -----	1
2. 1 試験装置 -----	1
2. 2 試験溶液の調整 -----	2
2. 3 試験方法 -----	3
2. 4 分析方法 -----	3
3. 結果 -----	4
3. 1 D B Pに対する洗浄効果 -----	4
3. 2 α 線および β 線放出核種に対する洗浄効果 -----	4
3. 3 α 線および γ 線スペクトルにみる放射性核種に対する洗浄効果 -----	5
4. 考察 -----	6
4. 1 洗浄剤の違いによるpHの変化 -----	6
4. 2 D B Pおよび放射性核種の洗浄メカニズム -----	6
4. 2. 1 D B Pの洗浄 -----	6
4. 2. 2 放射性核種の洗浄 -----	8
5. まとめ -----	9
謝 辞 -----	10
参考文献 -----	10

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	1
2.1 Equipment	1
2.2 Preparation of Test Solution	2
2.3 Experimental Procedure	3
2.4 Analytical Method	3
3. Results	4
3.1 Washing Effect to DBP	4
3.2 Washing Effect to Total Alpha and Total Beta Nuclide	4
3.3 Washing Effect to Nuclides Appeared on Alpha and Gamma Spectra	5
4. Discussion	6
4.1 Change of pH by Washing Reagent	6
4.2 Washing Mechanism of DBP and Radionuclides	6
4.2.1 Washing of DBP	6
4.2.2 Washing of Radionuclides	8
5. Conclusions	9
Acknowledgements	10
References	10

1. はじめに

日本原子力研究所では、再処理プロセス安全性研究の一環として、軽水炉燃料の高燃焼度化などに対応した再処理プロセスの高度化研究を行っている。そのひとつであるソルトフリー技術においては、再処理工程から排出される含塩廃棄物の発生量を抑えるために、長寿命核種であるネプツニウムやプルトニウム等を原子価制御するための酸化還元試薬や、抽出工程で劣化した有機溶媒を再生するための溶媒洗浄剤に、ガス化分解可能な有機試薬を用いる技術¹⁻⁵⁾を研究している。溶媒洗浄のソルトフリー技術については多くの研究が行われているが⁶⁻¹¹⁾、内山らは洗浄剤にブチルアミン化合物（炭酸水素塩あるいはシュウ酸塩）を用いる方法を開発した⁴⁾。この洗浄剤は、従来のナトリウム化合物とは違って電気化学的に二酸化炭素、窒素酸化物および水にガス化分解が可能であること¹²⁻¹⁴⁾、ヒドラジン化合物のような爆発性のアジ化水素が発生しないこと等を特徴とする。

ブチルアミン化合物溶媒洗浄剤の開発では、これまで模擬劣化溶媒内のDBPや金属元素に対する洗浄効果を確認してきた⁴⁾。また、使用済燃料（燃焼度：8,000 MWd/tU）からのウラン抽出によって発生する劣化溶媒（以降、実劣化溶媒と呼ぶ）に対する溶媒洗浄試験では、低いpHと高いpHのブチルアミン化合物を組み合わせて、放射性核種に関する洗浄性能を確認した¹⁵⁾。

今回は、第2回使用済燃料試験（燃焼度：29,000 MWd/tU）における一連の抽出試験で発生した実劣化溶媒を対象に、NUCEF実験棟グローブボックス内に設置した小型ミキサセトラを使って、ブチルアミン化合物溶媒洗浄剤による洗浄試験を行った。洗浄方法は、異なる洗浄剤を用いた2つの洗浄工程（各4段の計8段）とし、各工程2種類の洗浄剤の組み合わせによる4つの条件とした。ミキサセトラ運転終了後、各段の有機相および水相から溶液を採取し、DBP、 α 線および β 線放出核種、 γ 線放出核種の濃度分布を調べることにより各々の除染係数を算出した。

2. 試験

2. 1 試験装置

装置の概要をTable 1に示す。試験には、本体がアクリル製、駆動部および攪拌翼がステンレス製のミキサセトラ（ミキサ部：6 ml、セトラ部：17 ml）を用いた。実劣化溶媒は、グローブボックス内に設置したプランジャー式マイクロポンプを用いて、流量200 ml/hでミキサセトラに供給した。洗浄剤は、グローブボックス外から放射線防護を施した隔壁を通る試薬供給管を経て、流量40 ml/hでミキサセトラに供給した。

2. 2 試験溶液の調整

(1) 洗浄剤

試験に用いた n-ブチルアミンは分子量 73.1、密度 0.742、沸点 78 ℃の無色透明な液体で、アンモニアと同程度 ($K_b = 3.36$ at 25 ℃) の塩基性を示す安定した有機物質である¹⁶⁻¹⁸⁾。ブチルアミンは極性が強く、分子間水素結合を形成しやすいため、水に良く溶け、また、非極性溶媒にも溶ける性質を持つ¹⁷⁾。

アミン類の中から n-ブチルアミンを洗浄剤として選択した理由を以下に示す。ブチルアミンよりも低分子量のアミンであるメチルアミン、エチルアミンは低沸点物質であるため¹⁷⁾、洗浄剤として使用する場合、揮散による洗浄効果の減少や、油水分離後の溶媒中に混入して発熱する危険性が考えられる。プロピルアミンは、再処理工程で発生する亜硝酸により分解されるため、洗浄効果が影響を受けると考えられる¹⁸⁾。ブチルアミンより高分子量のものは、水溶性が乏しいため洗浄剤として用いることができないものが多い。また、水溶性があっても、分解時に二酸化炭素等の揮発成分が多くなり、望ましくない。ブチルアミンの 4 種類の異性体は、いづれの場合でも塩基性はほぼ等しいが、沸点の最も高い n-ブチルアミン (n-ブチルアミン : 78 ℃、iso-ブチルアミン : 68 ℃、sec-ブチルアミン : 63 ℃、tert-ブチルアミン : 46 ℃) が¹⁷⁾、溶液の温度変化に最も広く対応できると考えられる。

試験に用いる洗浄剤は以下のように調整した。試薬は、全て和光純薬社製の特級試薬を用いた。以下で、M は mol/L を示す。

① 2 M ブチルアミン $C_4H_9NH_2$ 溶液 (原液)

n-ブチルアミン 197.2 ml (146.3 g) をイオン交換水に溶解し、1,000 ml に定容した。

② 0.25 M 炭酸水素ブチルアミン $C_4H_9NH_2HCO_3$ 溶液 (実測 : pH=7.04)

①を 170 ml とり、イオン交換水で 1,350 ml としたものに、pH が一定 (約 7) となるまで二酸化炭素を供給 (ポンベ二次圧 : 0.5 kg/cm²、流量 : 1 L/min) した。

③ 0.25 M シュウ酸ブチルアミン $(C_4H_9NH_2)_2C_2O_4$ 溶液 (実測 : pH=7.99)

①を 500 ml とり、イオン交換水 1,000 ml を加え、シュウ酸 63.04 g を徐々に溶解した。その後、イオン交換水で 2,000 ml に定容した。

④ 0.25 M シュウ酸ブチルアミン $(C_4H_9NH_2)_2C_2O_4$ 溶液 (実測 : pH=1.99)

①を 300 ml とり、イオン交換水 500 ml を加え、これにシュウ酸 37.82 g を徐々に溶解した。シュウ酸溶解後、60 % 硝酸を加えて pH を 2 付近に調整し、イオン交換水で 1,200 ml に定容した。

(2) 実劣化溶媒

実劣化溶媒には、第 2 回使用済燃料試験 (燃焼度 : 29,000 MWd/tU)^{19, 20)}において、一連の抽出試験で発生したもの用いた。

2. 3 試験方法

洗浄工程フローを Fig. 1 に示す。予め 30 % TBP/n-ドデカンおよび各洗浄剤を張ったミキサセトラに、実劣化溶媒 200 ml/h、各洗浄溶液 40 ml/h で供給し、定常状態に達する 2.5 時間後まで運転した。

洗浄試験は 4 つの条件で行った。各条件における洗浄剤の組み合わせを Table 2 に示す。それぞれの洗浄は、各 4 段毎に 2 種類の洗浄剤を用いる 2 洗浄工程で行った。洗浄工程①では pH を酸性 ($\text{pH} \approx 2$) および弱アルカリ性 ($\text{pH} \approx 8$) に調整したシュウ酸ブチルアミンを洗浄剤として用いた。洗浄工程②では弱アルカリ性に調整したシュウ酸ブチルアミン ($\text{pH} \approx 8$) または炭酸水素ブチルアミン ($\text{pH} \approx 7$) を洗浄剤として用いた。

採取試料の内訳および分析項目の一覧を Table 3 に示す。各段のサンプリングはセトラ部の有機相および水相からそれぞれ約 8 ml を採取し、これらを各分析に用いた。

2. 4 分析方法

DBP 濃度は、イオンクロマトグラフ法により DX-500 (ダイオネクス製) を用いて分析した。DBP の分析前処理フローを Fig. 2 に示す。有機相試料は、イオンクロマトグラフに注入できるよう、水酸化ナトリウム溶液を添加して、水相中に DBP を抽出した。水相試料の場合、塩酸で pH 調整したものに四塩化炭素を加えて一度有機相に DBP を移し、その後、水酸化ナトリウム溶液で DBP を水相に抽出した。

α 線および β 線放出核種の放射能分析は、2 π ガスフローカウンター (BERTHOLD 社製 LB770 10ch α/β 低レベルカウンター) を用いて行った。0.025 ml の試料を、直径 25 mm のステンレス製試料皿に取り、赤外線ランプを用いて乾燥させた。この操作をさらに 2 回繰り返し、総量 0.075 ml 分の乾燥試料として 180 秒間測定した。

$^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ の放射能分析は Si 検出器による α 線測定を行った。5.16MeV に検出されたピークは ^{239}Pu および ^{240}Pu の α 線ピークが重なるため、その合計数として分析した。試料は、2 π ガスフローカウンターの測定に使用した試料を、さらに 250 °C のホットプレートで加熱し、その後、試料皿の裏からガスバーナーで加熱したものである。測定時間は 10,000 ~ 50,000 秒とした。

γ 線放出核種である ^{241}Am 、 ^{154}Eu 、 ^{137}Cs 、 ^{106}Ru 、 ^{95}Nb および ^{95}Zr の放射能分析は、Ge 検出器による γ 線測定を行った。洗浄前の溶媒 (Table 3 の①) およびセトラ部の有機相液 (②) については、試料 2 ml を共栓付きガラス瓶 (6 ml) にとり、n-ドデカン 1 ml を加え密栓したものを測定した。測定時間は 12,000 ~ 17,000 秒とした。

3. 結 果

3. 1 DBPに対する洗浄効果

試験条件AからDのおののについて、セトラ部における各段の有機相および水相のDBP濃度、水相のpH値を、Fig. 3～6に示す。4種類の試験条件について、フィード液のDBP濃度を最終段の有機相濃度で割った除染係数は5.1～7.9であった。

Fig. 3,4からわかるように、条件AおよびBの洗浄工程①では、水相のDBP濃度がpH \geq 1.5となった2段目以降で検出され始めたことから、DBPの洗浄効果はpH \geq 1.5で表れるものと思われる。しかし、有機相および水相のDBP濃度変化が小さく、pH 1.5付近における洗浄効果は小さい。洗浄剤のpHが高くなる洗浄工程②では条件AおよびB共にDBPの洗浄効果が大きくなつたが、洗浄剤の炭酸水素ブチルアミンとシュウ酸ブチルアミンの違いによる洗浄効果の違いはほとんどみられなかつた。

条件CおよびDでは、条件AおよびBとは異なり、Fig. 5,6からわかるように洗浄工程①において既にDBPの洗浄効果がみられ、ここでのpHが高いほどDBPに対して洗浄効果が上がる事が示された。洗浄工程②では、さらにpHは高くなるが、条件Cの7段目以降、条件Dの6段目以降で、水相中にDBPが検出されず、有機相中のDBP濃度もほとんど変化がなかつた。また、炭酸水素ブチルアミンおよびシュウ酸ブチルアミンの違いによる洗浄効果の違いも、条件AおよびB同様、ほとんどみられなかつた。

3. 2 α 線および β 線放出核種に対する洗浄効果

有機相中の α 線放出核種濃度の段方向変化をFig. 7に示す。洗浄工程①について、条件A、B(○、●)と条件C、D(△、▲)を比較すると、最初の段を除く各段において、 α 放射能濃度は、条件A、Bの方が、条件C、Dの場合よりも1桁小さい値であることがわかる。これは、酸性のシュウ酸ブチルアミンの洗浄効果が高いことを示している。一方、洗浄工程②では、ばらつきがあるものの、放射能濃度がゼロになつてないことから、洗浄効果はそれほど高くなつたと判断される。測定結果に見られるばらつきは、 α 線の測定が自己吸収の影響および検出限界に近いレベルでの測定であったためと思われる。除染係数は各条件で120～1,100となつた。

有機相中の β 線放出核種濃度の段方向変化をFig. 8に示す。 β 線放出核種の濃度変化は、 α 線放出核種とは異なり、各条件でほとんど同じ減少傾向を示した。また、洗浄工程①の1段目で、フィード液から1オーダー濃度が減少した後、洗浄工程②においても、濃度の減少が続き、さらに1オーダー近く値が下がつた。これから、 β 線放出核種の洗浄は、全体として、pH、ブチルアミンの塩の形態に左右されず、従つて、濃度変化の特徴は主にブチルアミンによるものと思われる。除染係数は54～100となつた。

3. 3 α 線および γ 線スペクトルにみる放射性核種に対する洗浄効果

Si 検出器による実劣化溶媒の α 線スペクトルを Fig. 9 に、洗浄後の溶媒の α 線スペクトルの一例を Fig.10 に示す。検出された 5.16MeV、5.49MeV のピークは、エネルギー値と γ 線スペクトルから ^{239}Pu (5.156MeV) + ^{240}Pu (5.168MeV) および ^{241}Am (5.485MeV) + ^{238}Pu (5.499MeV) と同定した。

Ge 検出器による実劣化溶媒の γ 線スペクトルを Fig.11、洗浄後の溶媒の γ 線スペクトルの一例を Fig.12 に示す。核種の同定は、 γ 線のエネルギー値によった。

採取試料の α 線スペクトルのピークから $^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$ 、 γ 線スペクトル中のピークから ^{241}Am 、 ^{154}Eu 、 ^{137}Cs 、 ^{106}Ru 、 ^{95}Nb および ^{95}Zr の放射能濃度を求めた。各条件における有機相中に含まれる核種毎の濃度変化を Fig.13 ~ 19 に示す。

^{241}Am に対する除染係数は、46 ~ 95 となった。洗浄剤の違いによる洗浄効果の差はほとんどなかった。

$^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$ に対する除染係数は、100 ~ 360 の値を示した。洗浄工程①においては、3段、4段で、酸性領域に調整した条件AおよびBでの放射能濃度が、条件CおよびDの場合より1オーダー低くなった。これは、酸性領域のシュウ酸ブチルアミンでの洗浄効果がより大きいことを示す。洗浄工程②では、どの条件でも放射能濃度の顕著な減少が見られず、また、条件AおよびC(炭酸水素塩)と条件BおよびD(シュウ酸塩)の洗浄効果の違いも見られなかった。

^{154}Eu に対しては、どの条件においても洗浄効果が認められなかった。劣化溶媒に含まれる ^{154}Eu の濃度が約 0.4Bq/mL と小さいため、洗浄が進まなかつたと思われる。

^{137}Cs については、除染係数が 160 ~ 880 と幅のあるものとなった。 ^{241}Am 同様に、洗浄剤の違いによる洗浄効果の差はほとんどなかつた。

^{106}Ru の除染係数は、2.3 ~ 3.5 と低いものであった。洗浄工程①では、条件の違いは見られなかつたが、洗浄工程②において、条件AおよびCが条件BおよびDより濃度の低い結果となつた。これは、シュウ酸ブチルアミンより炭酸水素ブチルアミンの Ru に対する洗浄効果が高いことを示す。

^{95}Nb および ^{95}Zr については除染係数が 10 前後であった。含有量が少ないと、および他の核種の妨害により欠測点が多いことから、洗浄剤の違いによる洗浄効果の差を把握するには至らなかつた。

最後に、今回の試験における洗浄効果のまとめとして、除染係数と洗浄後の各濃度(8段目の有機相)を Table 4 に示す。

4. 考 察

4. 1 洗浄剤の違いによる pH の変化

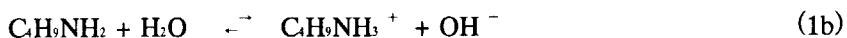
水相における pH の値が各成分の洗浄効果に影響することが知られている^{4, 10)}。ミキサセトラの水相の pH 値を、供給する洗浄剤の値と比較したものを Fig.20 ~ 23 に示す。洗浄工程①においては、どの条件でも水相の pH が洗浄剤より低い値を示した。さらに、洗浄工程②においても、条件 A の 5 段目および条件 B の 5 ~ 8 段、条件 D の 5 ~ 8 段で、水相は洗浄剤より低い pH 値を示している。

一方、洗浄工程②において、条件 A の 6 段目以降、および条件 C の 5 段目以降において、水相の pH 値は 7.8 ~ 8.5 を示し、炭酸水素ブチルアミンの値 (pH=7.04) を上回った。また、条件 A と B および条件 C と D の pH 値を比較すると、炭酸水素ブチルアミンの方がシュウ酸ブチルアミンより大きかった。

これらの pH 値について考察した結果を以下に述べる。

洗浄工程①でセトラ水相部の pH 値が洗浄剤より小さくなるのは、ミキサセトラを使った模擬劣化溶媒の洗浄試験と同じ現象であり⁴⁾、劣化溶媒に含まれる硝酸が洗浄されて水相の pH 値を下げたためと思われる。さらに、洗浄工程②でも、水相の pH 値が洗浄剤より低くなる現象が続いた（条件 A の 5 段目、条件 B および D）、洗浄工程①から移ってきた溶媒中にまだ硝酸が存在していたことを示唆する。

これとは逆に、条件 A および C の洗浄工程②で水相の pH 値が洗浄剤より高くなる現象が見られたのは、炭酸水素ブチルアミンから炭酸水素基が遊離して水と二酸化炭素に分解し、残ったブチルアミン基が再び水と反応して水酸化物イオンを発生させたことによるものと思われる。炭酸水素ブチルアミンが分解して水酸基が発生する反応式を以下に示す。



4. 2 DBP および放射性核種の洗浄メカニズム

4. 2. 1 DBP の洗浄

実劣化溶媒の DBP が洗浄されるに伴い、有機相および水相の DBP 濃度は、ミキサセトラの段数が大きくなるにつれて減少することが期待される。これに対して、条件 B、C および D において、有機相および水相中の DBP 濃度が前の段より増加する結果が得られた (Fig.4 ~ 6)。DBP の有機相中の濃度と水相中の濃度が最大の段番号とそこでの水相の pH を Table 5 に示す。

条件Aを除いて、有機相でのDBP濃度の最大がn段にみられた場合、水相ではn+1段にDBP濃度のピークが確認できた。また、有機相でのピークは水相のpHが2~3、水相でのピークはpH3~4の領域で発生している。

pHの高い洗浄剤を使った洗浄工程において、溶媒中（有機相）に含まれる硝酸が水相に接触して、pHは2~3に低下する。劣化溶媒からのDBP等の洗浄については、今までpH依存性、有機相から水相に移行するための化学反応（洗浄メカニズム）、シュウ酸イオンとの錯体形成の観点から、その特徴が研究されてきた^{4, 10)}。Table 6は、DBP、Pu、Ruの洗浄についての特徴を示したものである。DBPはpHの高いほど洗浄されやすい（水相に移りやすい）。このため、洗浄剤がミキサセトラに入つてからn+1段までに水相に抽出されたDBPの一部が、n段の有機相に再び抽出される。有機相と水相の間でおきるDBP移動の様子をFig.24に示す。

この傾向が条件A（Fig.3）について確認できなかったのは、次の理由による。水相のpHが2~3の値となるところが、ちょうど洗浄剤の入れ替わる4段目と5段目の間であったため、水相から有機相にDBPが再抽出される前に、DBPを含んだ洗浄剤がミキサセトラ外へ放出されたと思われる。

模擬劣化溶媒の実験と比較すると洗浄後のDBP濃度は1オーダー大きく⁴⁾、まだ改善の余地がある。今後、pH、流量、温度、洗浄剤濃度を最適化することによって、実劣化溶媒での洗浄効果が高まることが期待される。

以上のDBPの濃度変化について、考えられる洗浄メカニズムを以下に示す。式中の化学記号の上に線があるのは、その物質が有機相中にあることを示す。

洗浄剤のブチルアミン化合物は塩であるため水溶液中で陽イオンと陰イオンに完全解離する。

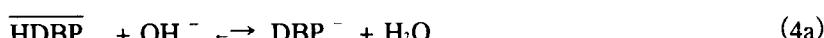


4つの試験条件におけるDBPの洗浄に関しては、洗浄工程①において洗浄剤のpHが高い方が洗浄効果が高かった。これは、過去の実験結果^{4, 10)}と同じである。しかし、さらにpHの高い洗浄工程②では、pHの低い洗浄工程①より洗浄の進むもの（条件AおよびB）と洗浄の進まないもの（条件CおよびD）に結果が分かれた。また、洗浄剤の陰イオン（シュウ酸イオンと炭酸水素イオン）の違いによる洗浄効果への影響は見られなかった。

pHが1.5付近の酸性領域の場合、DBPは有機相と水相に分配されることにより、実劣化溶媒から洗浄される。ただし、化学的結合を伴わないため分配による洗浄効果は小さい。



pHが4以上の中性から微アルカリ領域の場合、水酸化物イオンの作用でDBPは陰イオンに解離し^{4, 19)}、さらにブチルアミンイオンと反応して洗浄される。



DBPを含む中性から微アルカリ領域の洗浄剤が、酸濃度の高い段（劣化溶媒の供給口および酸性に調整された洗浄剤の供給口に近い段）に流入したとき、液性は再びpH2~3の酸性となる。そのため、DBPイオンの一部は式(4a)および(4b)の逆の反応をたどり、プロトンを供与さ

れ分子型となり、式(3)のような有機相と水相の間の分配によって有機相に再抽出される。次の式(5a)から(5c)までが、この反応を示している。



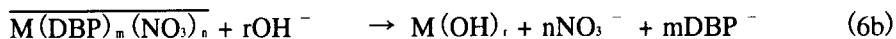
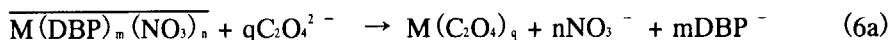
4. 2. 2 放射性核種の洗浄

放射性核種の洗浄結果から、Am、Pu および核分裂生成物に関して、推定される洗浄のメカニズムを次に示す。ただし、洗浄効果が認められなかった ¹⁵⁴Eu、欠測点が多く洗浄剤の違いによる洗浄効果を把握できなかった ⁹⁵Nb、⁹⁵Zr を除いた。二つの洗浄工程別の除染係数と条件の違いによる核種毎の特徴を Table 7 に示す。

(1) Am、Pu および Cs

Am、Pu および Cs は、洗浄工程①（酸性領域）での除染係数が、洗浄工程②（中性・微アルカリ領域）より 1～2 オーダー大きい。Pu では、洗浄工程①で pH の小さい条件 A および B の洗浄効果が条件 C および D より大きく、酸性域での優位性をさらに増すものとなった。この領域では、金属元素 (Zr および Pu) が溶媒中で DBP イオンや硝酸イオンと錯体を形成していること、シュウ酸は金属元素に対して錯形成作用を持っていることから⁴⁾、主に式(6a)の反応で各元素が洗浄されていると思われる。式中の M は金属元素 (Am、Pu および Cs) を表す。

水相の pH が中性・微アルカリ領域になる洗浄工程②では、洗浄工程①ほどではないが、洗浄効果が見られる。また、塩の違いによる洗浄効果への影響が見られない。この領域では、式(6b)のように水酸化イオンがシュウ酸イオンの役割をすると考えられており⁴⁾、DBP イオン、硝酸イオンが解離されて各元素が水相に移ると思われる。

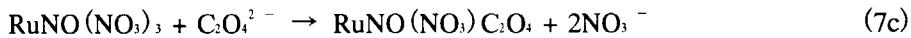
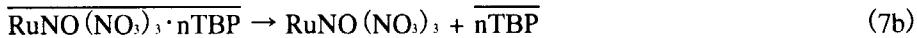


(2) Ru

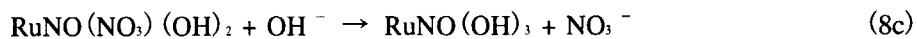
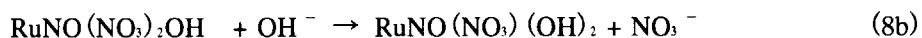
二つの洗浄工程における ¹⁰⁶Ru の除染係数は、酸性領域と中性・微アルカリ領域でほぼ等しく、これは、pH の高い領域での洗浄効果の優位性を示した過去の実験結果^{4, 19)} と異なる。

洗浄工程①（酸性領域）では、pH の小さい条件 A および B とそれより pH の大きい条件 C および D とでは洗浄効果に違いがない。実劣化溶媒中の Ru は DBP 錯体の形態をほとんどとることなく、[RuNO(NO₃)₃] 錯体の形態をとっている^{4, 10)}。この [RuNO(NO₃)₃] 錯体は TBP によって溶媒和している²¹⁾。その状態に硝酸が混在すると、TBP は硝酸を抽出する性質も持つ²²⁾ことから、条件 A および B のように硝酸を含む酸性領域ではフリーな TBP の濃度に減少が生じるため、[RuNO(NO₃)₃] は溶媒和できなくなり水相に移行すると思われる。この移行の様子は式(7a)およ

び(7b)のように示される。また、酸性領域では Ru に対してシュウ酸が錯化剤の機能を有することから⁴⁾、これによる洗浄効果も考えられる。これを式(7c)に示す。



洗浄工程②（中性・微アルカリ領域）では、条件AおよびCの Ru 濃度が条件BおよびDより低くなった。Ru の洗浄は pH の高い領域の方が有利であり、陰イオンの種類に依存しないことから^{4, 10)}、この差は条件AおよびCでの pH が高いことによる。中性から微アルカリ領域では、[RuNO(NO₃)₃]錯体中の硝酸イオンが水酸化物イオンに置き換わって水相に移行し、式(8a)～(8c)の反応が進行して、Ru が洗浄されると考えられる^{4, 10)}。



5. まとめ

ブチルアミン化合物溶媒洗浄剤の開発にあたり、実劣化溶媒（第2回使用済燃料試験、燃焼度：29,000MWd/tU）を対象に、シュウ酸ブチルアミンおよび炭酸水素ブチルアミンの溶媒洗浄剤について洗浄性能を確認する試験を4つの条件で行った。

試験の結果得られた除染係数は、DBP が 5～8 と小さく、また残留濃度も数 10mg/L となり、抽出再利用に必要な溶媒の性能を満足しなかった。放射性核種に対する除染係数は、 α 線放出核種が 120～1,100 で、 β 線放出核種が 54～100 と大きな数値となった。放射線スペクトルから分析した個々の核種に対する除染係数は、²⁴¹Am が 46～95、²³⁹Pu+²⁴⁰Pu が 100～360、¹³⁷Cs が 160～880 となったのに対して、そのほかは、¹⁰⁶Ru が 2～4、⁹⁵Nb が 14、⁹⁵Zr が 4 と小さかった。また、¹⁵⁴Eu に対しては、洗浄効果が認められなかった。⁹⁵Nb、⁹⁵Zr、¹⁵⁴Eu の場合、劣化溶媒中における含有量が少ないと、および他の核種の妨害により欠測点の多いことが原因で、洗浄効果を把握できなかった。

ミキサセトラ各段の水相における pH 値と洗浄剤単体のものとの違いを、溶媒に含まれる硝酸成分の影響と洗浄剤の特性によって説明を試みた。セトラ水相部の pH 値が洗浄剤より小さくなるのは、劣化溶媒に含まれる硝酸が洗浄されて水相の pH 値を下げたためと思われる。これとは逆に、水相の pH 値が洗浄剤より高くなる現象が見られ、炭酸水素ブチルアミンから炭酸水素基が遊離して水と二酸化炭素に分解し、残ったブチルアミン基が再び水と反応して水酸化物イオンを発生させたことによるものと思われる。

DBP に関しては、pH 1.5 以上で洗浄効果が確認されたが、酸性領域より中性から微アルカリ領域に調整した方が洗浄効果が高かった。DBP のミキサセトラ各段における濃度は、劣化溶媒が流れ込む最初の段ではなく途中の段で最大となった。これは溶媒から洗浄剤への硝酸成分の

流入の影響で、水相の pH が低下させられ (3 ~ 4)、水酸化物イオンの作用で陰イオンに解離する性質を持つ D B P が有機相に再抽出されたことによる。

放射性核種毎の洗浄効果においては、Am、Pu、Cs が酸性領域での除染係数が、中性・微アルカリ領域より大きく、これらの元素とシュウ酸イオンとの錯体形成を示唆している。除染係数が小さい Ru については、酸性領域、中性・微アルカリ領域における除染係数がほぼ等しかった。酸性領域では、溶媒和している T B P の解離やシュウ酸の錯体としての機能、中性・微アルカリ領域では、水酸化物イオンの硝酸イオンとの置換反応が提示された。

今回の実劣化溶媒には放射性成分が少なかったために濃度変化が不明確なものも多く、洗浄剤の違いによる洗浄効果の違いを把握しにくい状況であった。D B P 以外の放射性核種の詳細な洗浄メカニズムについても溶媒洗浄の開発の観点から興味深いことから、この点については今後検討を重ねていく必要がある。

謝　　辞

本試験の実施にあたり、原子力エンジニアリング（株）の樺村次夫氏、萩谷弘通氏、柳田佳徳氏、石崎洋一氏および（財）放射線振興協会の佐藤真人氏、澤田睦氏、吉田悟氏、正路卓也氏のご協力を頂いた。さらに、プロセス安全研究室員の方々から種々のご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Uchiyama G., Fujine S., Hotoku S., Maeda M. : "New separation process for neptunium, plutonium, and uranium using butyraldehydes as reductants in reprocessing ", Nucl. Technol., 102, 341 (1993).
- 2) Fujine S., Uchiyama G., Kihara T., Asakura T., Maeda M., Sakurai T. : "Development of process technology for reprocessing which reduces the environmental impact ", Proc. of 10th Pacific Basin Nuclear Conference, 1125 (1996).
- 3) Uchiyama G., Asakura T., Hotoku S. and Fujine S. : "Long-lived nuclides separation techniques for advancing PUREX process" , Proc. of 6th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM97, 225 (1997).
- 4) Uchiyama G., Fujine S. and Maeda M. : "Solvent washing process using butylamine in fuel reprocessing ", Nucl. Technol., 120, 41 (1997).
- 5) 原子力安全性研究の現状・平成 8 年度, 日本原子力研究所, 61 (1996).
- 6) 大型再処理施設安全試験研究（廃溶媒処理試験）平成 3 年度成果報告書, 日本原子力研究所, 70 (1992).

- 7) 鷺谷忠博, 上田吉徳, 河田東海夫 : 「ソルトフリー電解酸化槽工学試験」, 動燃技報, No.83 (1992).
- 8) Hamasaki A., Kamishima N., Murasawa K. and Hujimoto K. : "Solvent cleanup system using hydrazine carbonate", RECOD'91, 1140 (1991).
- 9) 小沢正基, 鷺谷忠博, 岸本洋一郎 : 「ソルトフリー試葉電解酸化基礎試験(Ⅱ) - パラメータ試験による電解条件の最適化の検討」, 日本原子力学会 1989 年会 L 3 9 (1989).
- 10) 植竹直人, 他 : 「再処理溶媒再生工程における放射性廃棄物低減技術の開発 - ソルトフリー溶媒洗浄剤の洗浄性能と洗浄機構 -」, 日本原子力学会誌, 33, 96 (1991).
- 11) Ozawa M., Tamura N., Yamamoto R., Kawata T. and Hayashi S. : "Application of salt-free technology to the PUREX process for FBR fuel reprocessing", ISEC 1990, Kyoto, 603 (1992).
- 12) 水野三郎 : 「低級アルキル (C₁ - C₅) 第 1 級アミンとそのN-アルキルコハク酸アミドの電解酸化」電気化学, 29, 28 (1961).
- 13) Almon A. C. and Dewberry R. A. : "Small scale electrolytic destruction of spent tributylphosphate extractant", WSRC-RP-89-1229 (1989).
- 14) Uchiyama G., Fujine S. : "Destruction of butyraldehyde isomers using silver catalyzed electrochemical oxidation", J. Radioanal. Nucl. Chem., 230, 105 (1998).
- 15) 亀井一成, 他 : 「ブチルアミン化合物を用いたソルトフリー溶媒洗浄法の開発 - 実劣化溶媒を用いた溶媒洗浄試験 -」, 日本原子力学会 1999 年秋の大会 K 5 7 (1999).
- 16) 日本化学会 (編) : 「改訂 4 版 化学便覧 基礎編」, 丸善, II-320 (1993).
- 17) Morrison R. T. and Boyd R. N. : 「有機化学 (中) 第 6 版」, 東京化学同人, 1037 (1994).
- 18) 化学大辞典編集委員会編 : 「化学大辞典」, 共立出版, (1987).
- 19) 峯尾英章, 他 : 「使用済燃料溶解試験 (1)」, 日本原子力学会 2000 年秋の大会 I 2 7 (2000).
- 20) 宝徳忍, 他 : 「ミキサセトラを用いた抽出分離工程の使用済燃料試験」, 日本原子力学会 2000 年春の年会 J 2 9 (2000).
- 21) Bond W. D. : "Light Water Reactor Nuclear Fuel Cycle ; Chapter 4 PUREX SOLVENT EXTRACTION CHEMISTRY", CRC Press, Boca Raton, 103 (1981).
- 22) 高島洋一, 他 : 「核燃料再処理」, ISU, 65 (1977).

Table 1 溶媒洗浄試験装置概要

装置名	設置場所	用途	備考
ミキサセトラ	GB内	溶液混合 ・抽出分離	本体材質：アクリル製 攪拌翼材質：ステンレス製 ミキサ部容量：6 ml/段 セトラ部容量：17 ml/段 攪拌翼回転数：1300 rpm
液送ポンプ	GB内	実劣化溶媒用	プランジャー式マイクロポンプ 最大流量：約 500 ml/h
	GB外	洗浄剤用(2台)	プランジャー式マイクロポンプ 最大流量：約 90 ml/h

Table 2 洗浄剤組合せ

	洗浄剤(工程①)	洗浄剤(工程②)
条件A	pH 2 シュウ酸ブチルアミン	pH 7 炭酸水素ブチルアミン
条件B	pH 2 シュウ酸ブチルアミン	pH 8 シュウ酸ブチルアミン
条件C	pH 8 シュウ酸ブチルアミン	pH 7 炭酸水素ブチルアミン
条件D	pH 8 シュウ酸ブチルアミン	pH 8 シュウ酸ブチルアミン

Table 3 採取試料の分析項目

分析項目	分析方法	分析試料数 ^(注)			
		①	②	③	計
pH	pHメーター	—	—	32	32
DBP濃度	付シクロマトグラフ法	1	32	32	65
Pu·FP濃度等	2πガスクロ-カウンタ- Si検出器 Ge検出器	1 1 1	32 32 32	— — —	33 33 33

(注) ①: 洗浄前溶媒 ②: 各セトラ部の有機相液 ③: 各セトラ部の水相液

Table 4 除染係数および洗浄後の濃度

項目	除染係数	洗浄後濃度
D B P	5.1 ~ 7.9	24 ~ 37mg/L
α 線放出核種	120 ~ 1,100	0.66 ~ 6.0Bq/mL
β 線放出核種	54 ~ 100	6.0 ~ 11
^{241}Am	46 ~ 95	0.065 ~ 0.13
$^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$	100 ~ 360	0.57 ~ 2.0
^{154}Eu	(洗浄効果が認められなかった)	0.23 ^(注)
^{137}Cs	160 ~ 880	0.99 ~ 5.52
^{106}Ru	2.3 ~ 3.5	1.81 ~ 2.82
^{95}Nb	14 ^(注)	0.11 ^(注)
^{95}Zr	3.8 ^(注)	0.15 ^(注)

(注) 条件A～Dのうち、8段目の結果が得られた条件B (^{154}Eu 、 ^{95}Nb)、条件D (^{95}Zr) の値を示す。

Table 5 D B P 最大濃度の段番号と水相pH

	有機相D B P濃度最大		水相D B P濃度最大	
	段番号	水相pH	段番号	水相pH
条件A	1	1.22	5	3.76
条件B	5	2.85	6	3.97
条件C	1	1.98	2	3.13
条件D	1	1.94	2	3.26

Table 6 これまでの研究における洗浄の特徴

対象	内山ら ⁴⁾	植竹ら ¹⁰⁾
D B P	(1) pHが高いほど洗浄される (2) OH ⁻ によるイオン化解離作用で水相に移行する	(1) pHが高いほど洗浄される (2) OH ⁻ によるイオン化解離作用で水相に移行する (3) シュウ酸塩では、低 pH でも洗浄される
P u	(1) (pHが低いほど洗浄される) (2) DBP ⁻ 、NO ₃ ⁻ と錯体を形成し、これらがOH ⁻ と置換して水相に移る (3) 酸性溶液中でC ₂ O ₄ ²⁻ と錯体を形成し、水相に移る	-----
R u	(1) pHが高いほど洗浄される (2) RuNO(NO ₃) ₃ 錯体を形成し、NO ₃ ⁻ がOH ⁻ と置換して水相に移る (3) pHが低い場合、シュウ酸の錯体により洗浄される	(1) pHが高いほど洗浄される (2) RuNO(NO ₃) ₃ 錯体を形成し、NO ₃ ⁻ がOH ⁻ と置換して水相に移る (3) シュウ酸等の錯化剤の影響を受けない

Table 7 工程別の除染係数と条件の違いによる特徴

核種	洗浄工程① (酸性領域)	洗浄工程② (中性・微アルカリ領域)
²⁴¹ Am	・除染係数 27 ・条件A、Bと条件C、Dの違いなし	・除染係数 2.7 ・条件A、Cと条件B、Dの違いなし
²³⁹ P u + ²⁴⁰ P u	・除染係数 430 ・条件A、Bの方が条件C、Dより洗浄効果が大きい	・除染係数 0.83 ・条件A、Cと条件B、Dの違いなし
¹³⁷ C s	・除染係数 280 ・条件A、Bと条件C、Dの違いなし	・除染係数 2.6 ・条件A、Cと条件B、Dの違いなし
¹⁰⁶ R u	・除染係数 1.7 ・条件A、Bと条件C、Dの違いなし	・除染係数 1.7 ・条件A、Cの方が条件B、Dより洗浄効果が大きい

(注) 洗浄工程①の除染係数はフィード液と4段目濃度の比、洗浄工程②の除染係数は4段目と8段目濃度の比で、条件A～Dの平均値とした。

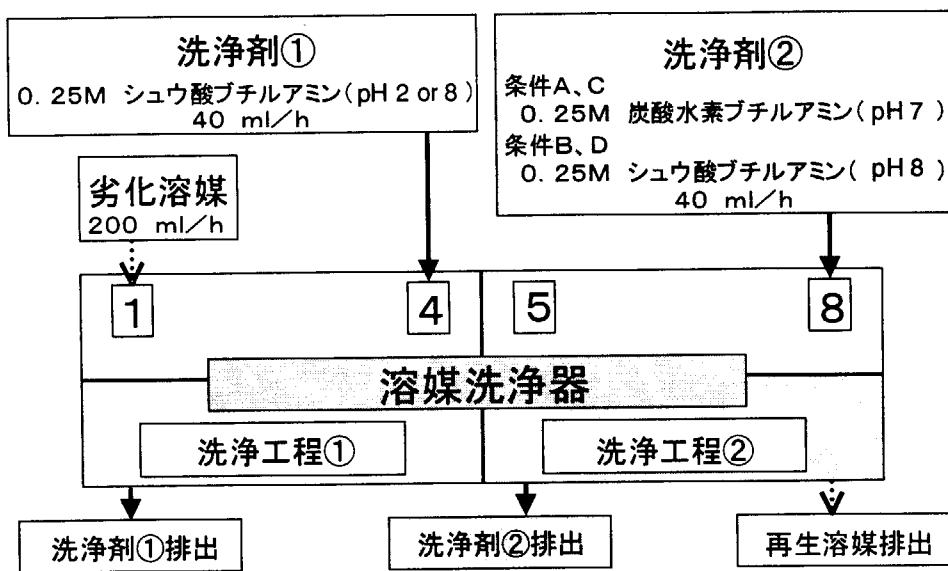


Fig. 1 溶媒洗浄工程フロー

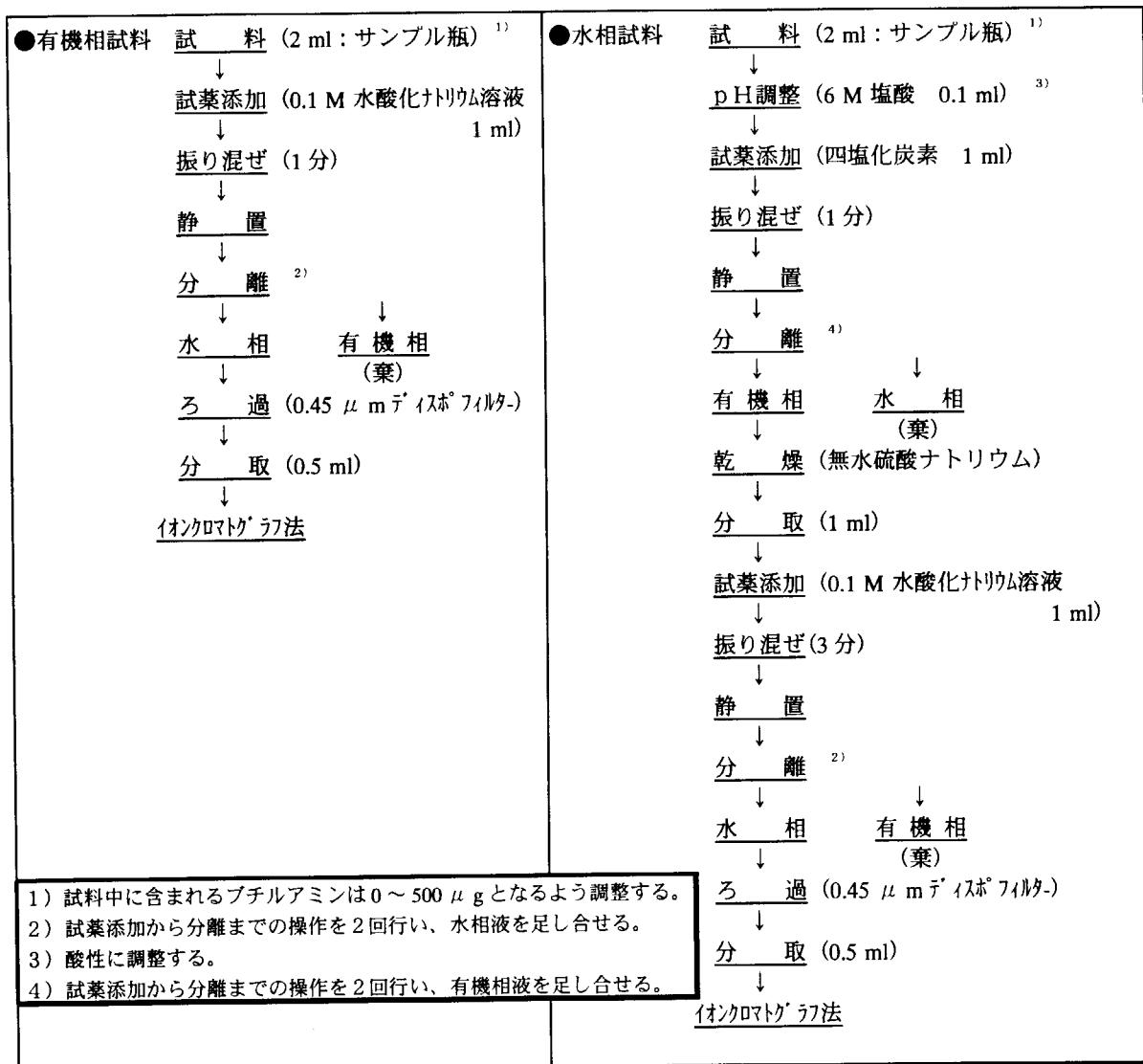


Fig. 2 D B P 分析前処理フロー

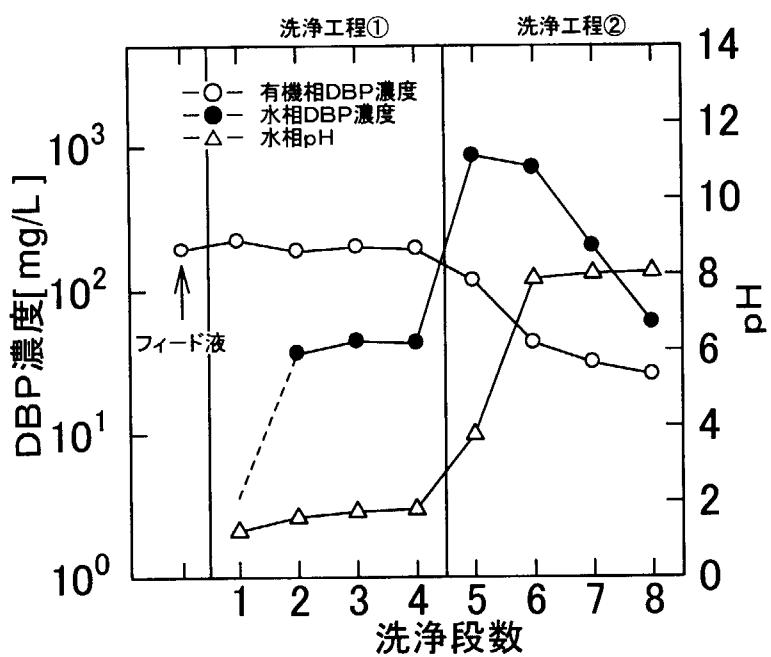


Fig. 3 有機相および水相中のD B P濃度、水相p Hの段方向変化（条件A）

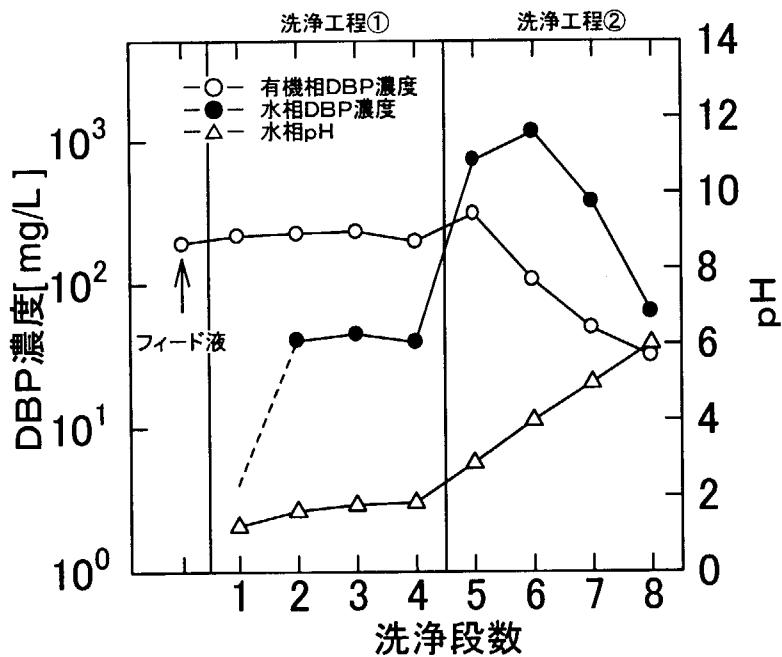


Fig. 4 有機相および水相中のD B P濃度、水相p Hの段方向変化（条件B）

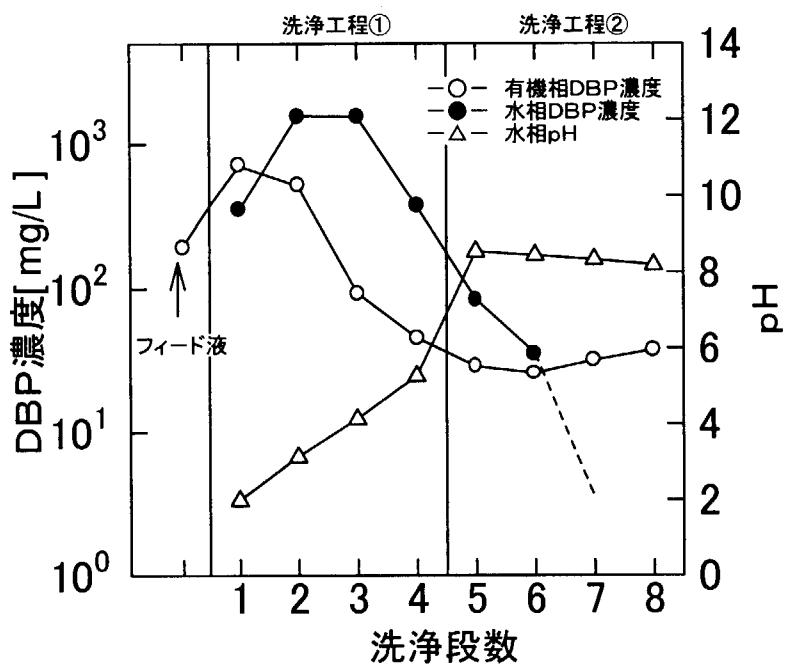


Fig. 5 有機相および水相中のDBP濃度、水相pHの段方向変化（条件C）

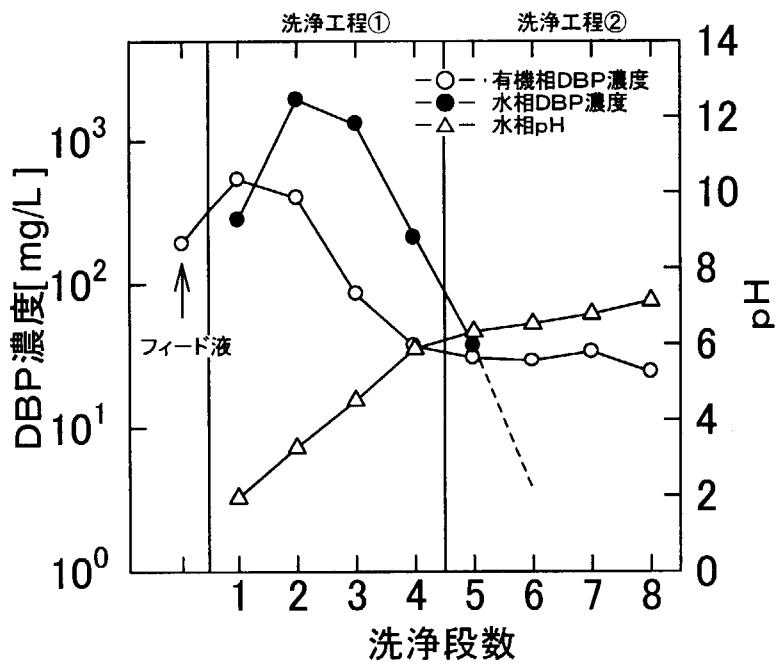
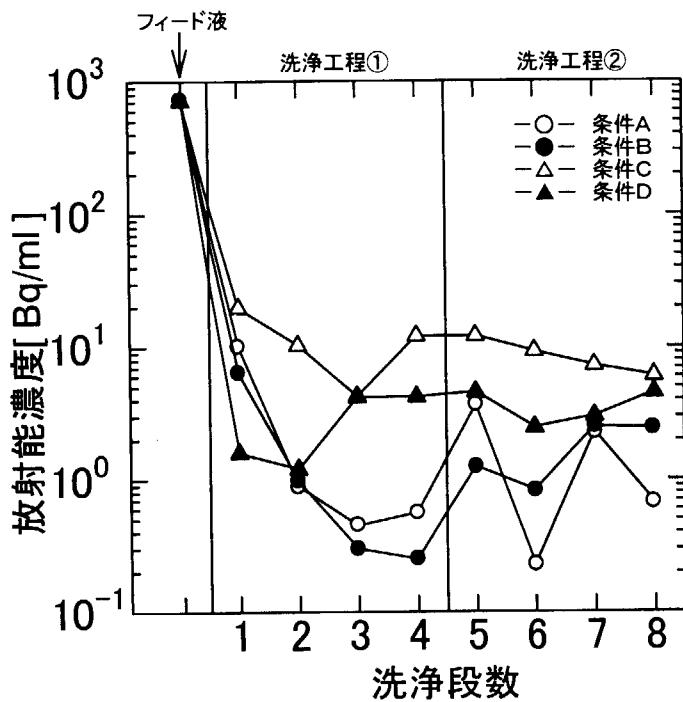
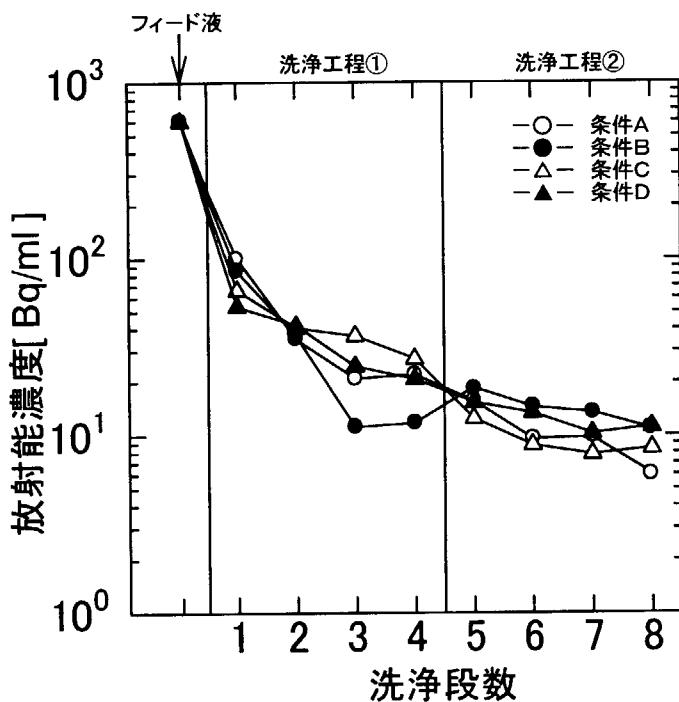


Fig. 6 有機相および水相中のDBP濃度、水相pHの段方向変化（条件D）

Fig. 7 α 線放出核種濃度（有機相）の段方向変化Fig. 8 β 線放出核種濃度（有機相）の段方向変化

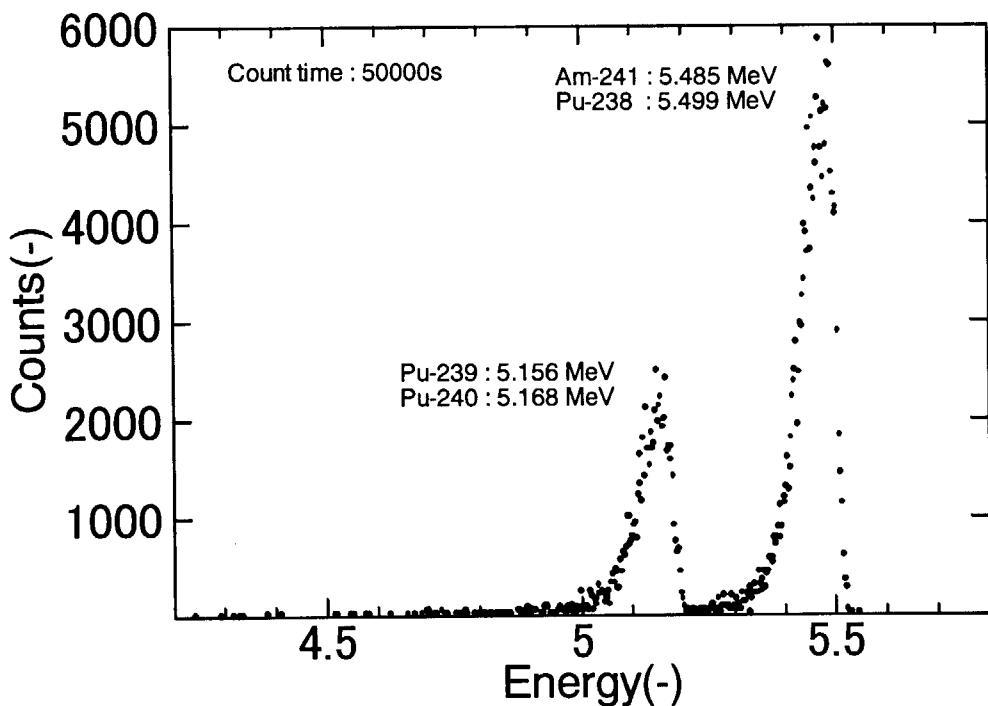


Fig. 9 実劣化溶媒の α 線スペクトル

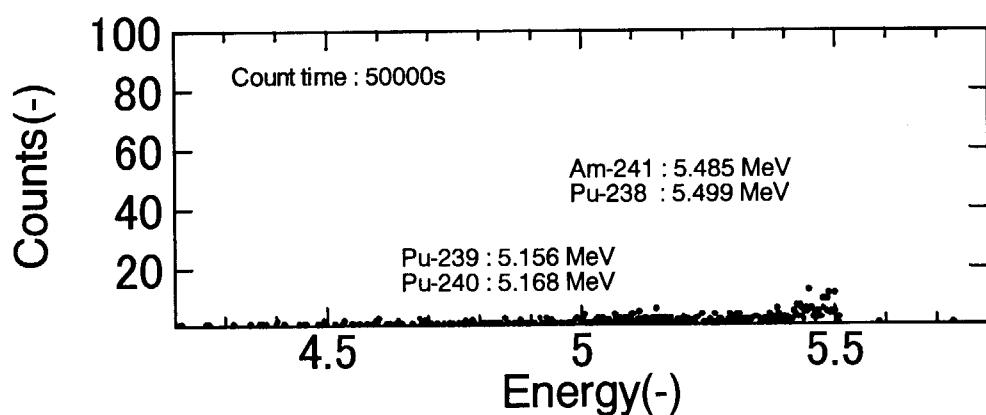
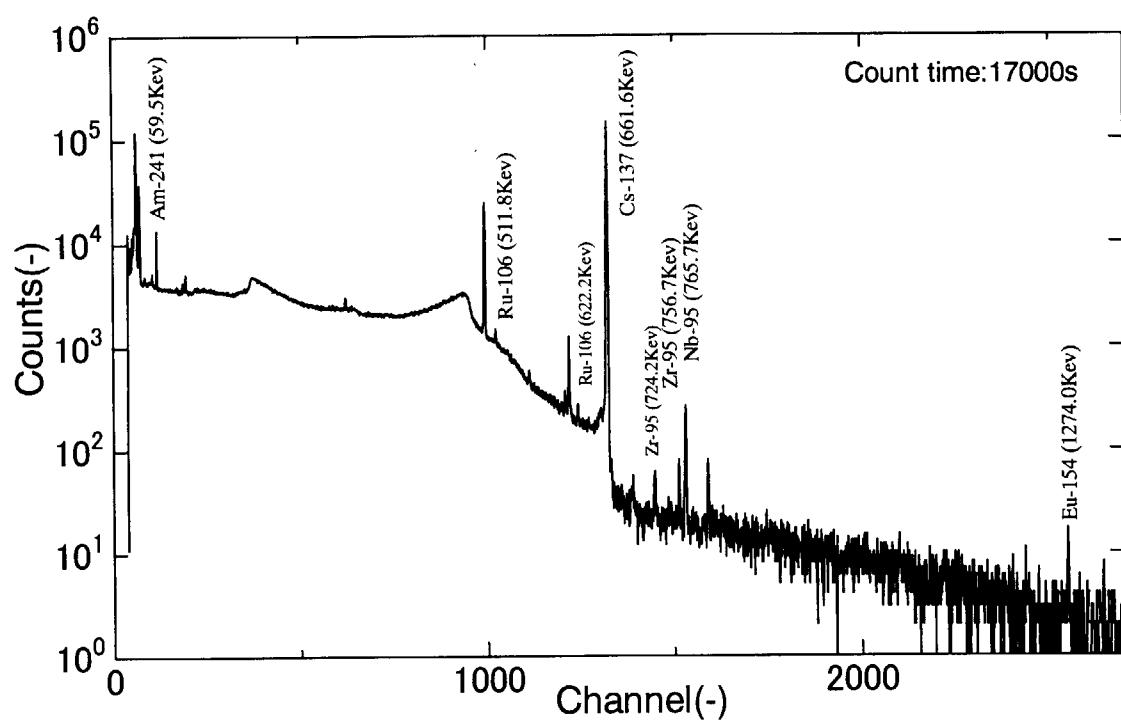
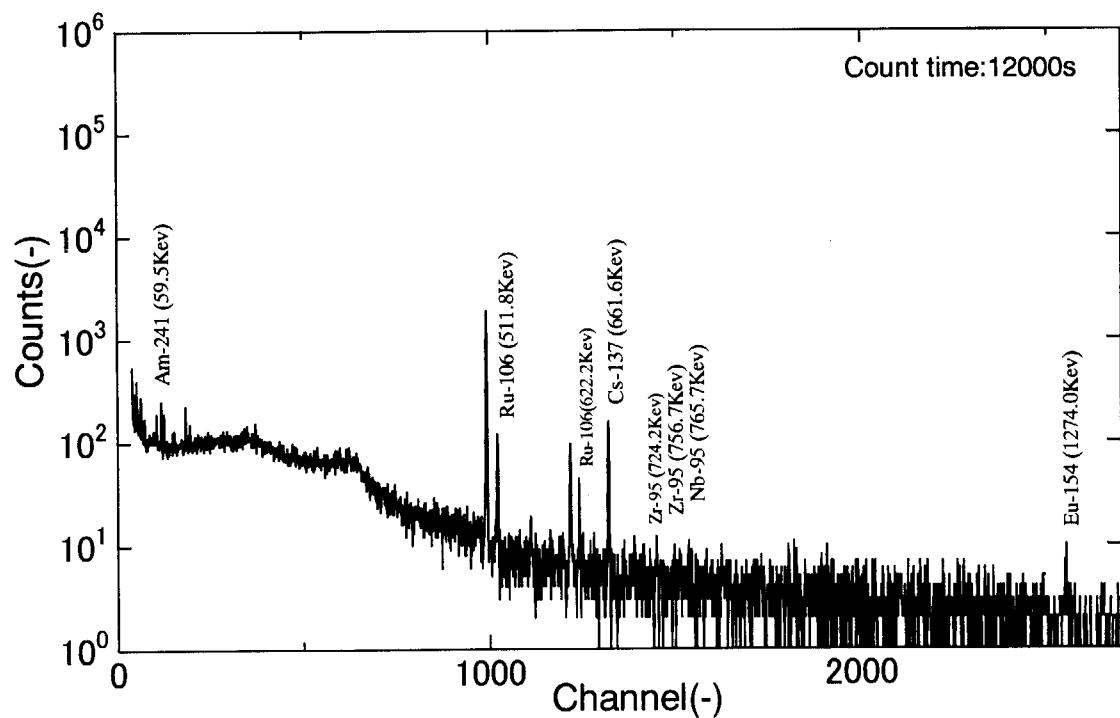
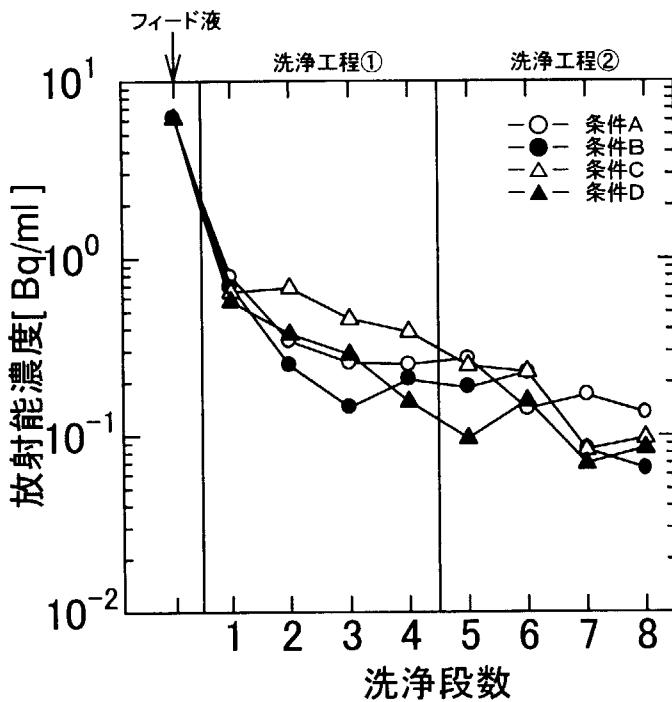
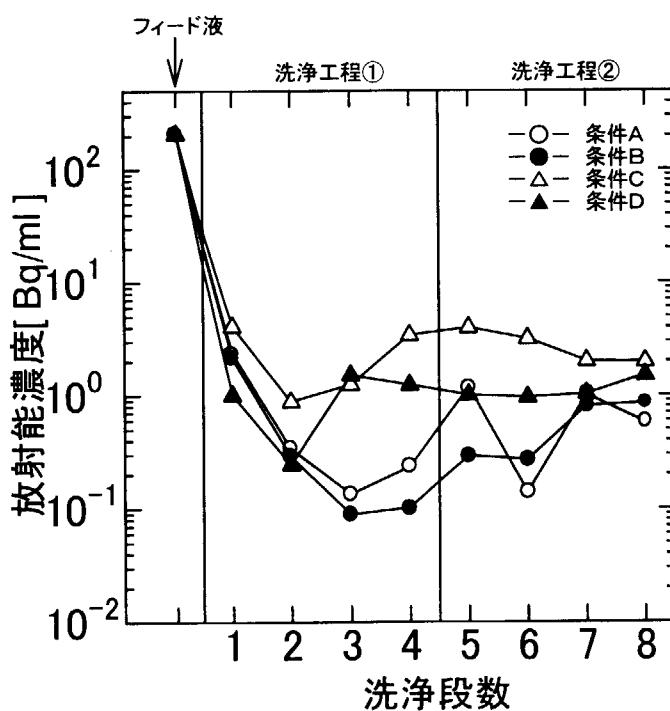
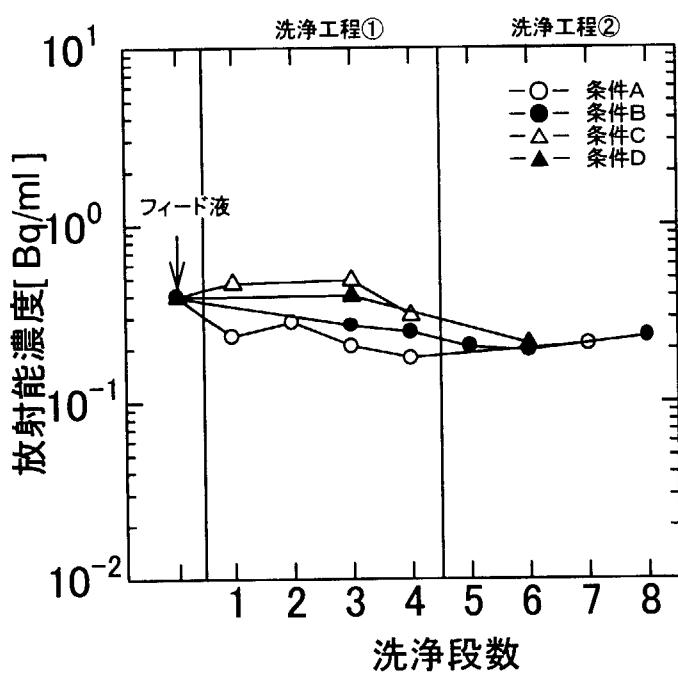
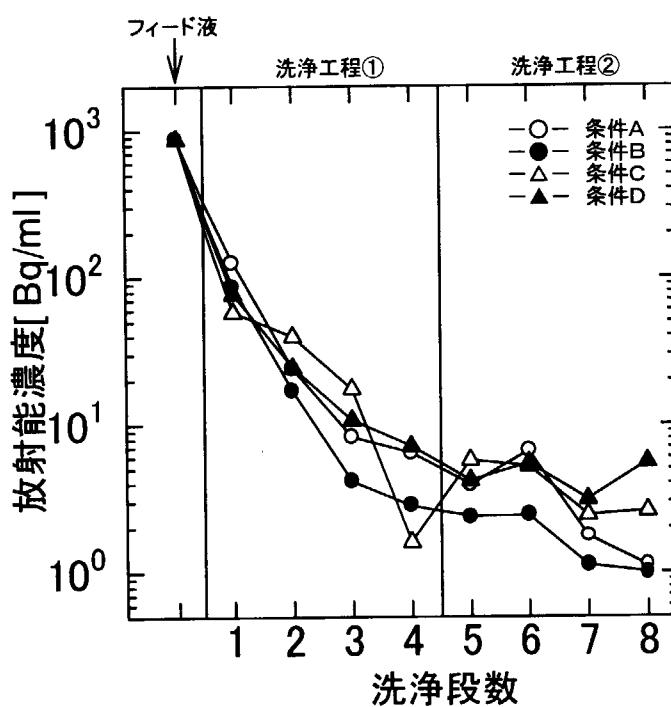
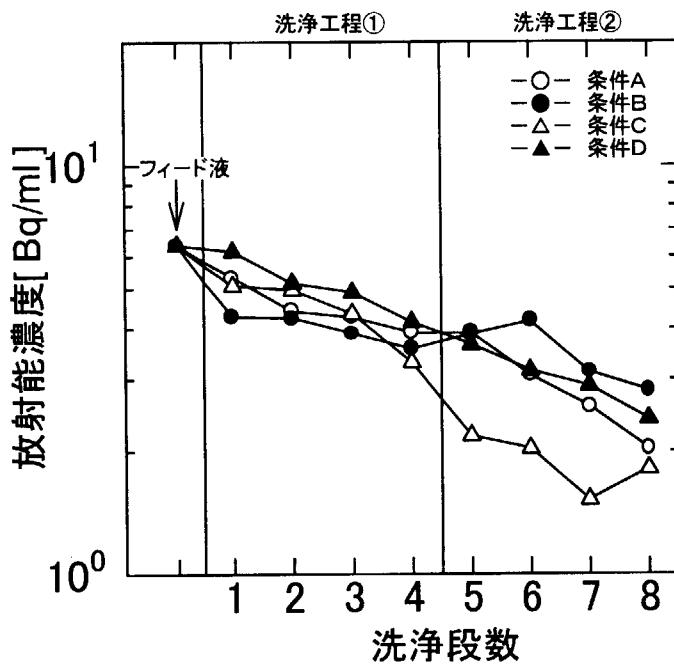
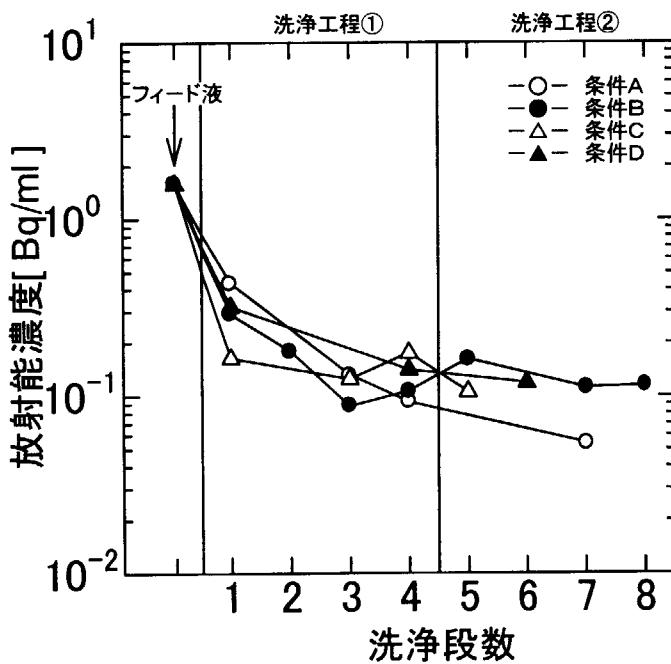


Fig. 10 洗浄後溶媒（条件A）の α 線スペクトル

Fig. 11 実劣化溶媒の γ 線スペクトルFig. 12 洗浄後溶媒（条件A）の γ 線スペクトル

Fig. 13 ^{241}Am 濃度（有機相）の段方向変化Fig. 14 $^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$ 濃度（有機相）の段方向変化

Fig. 15 ^{154}Eu 濃度（有機相）の段方向変化Fig. 16 ^{137}Cs 濃度（有機相）の段方向変化

Fig. 17 ¹⁰⁶Ru 濃度（有機相）の段方向変化Fig. 18 ⁹⁵Nb 濃度（有機相）の段方向変化

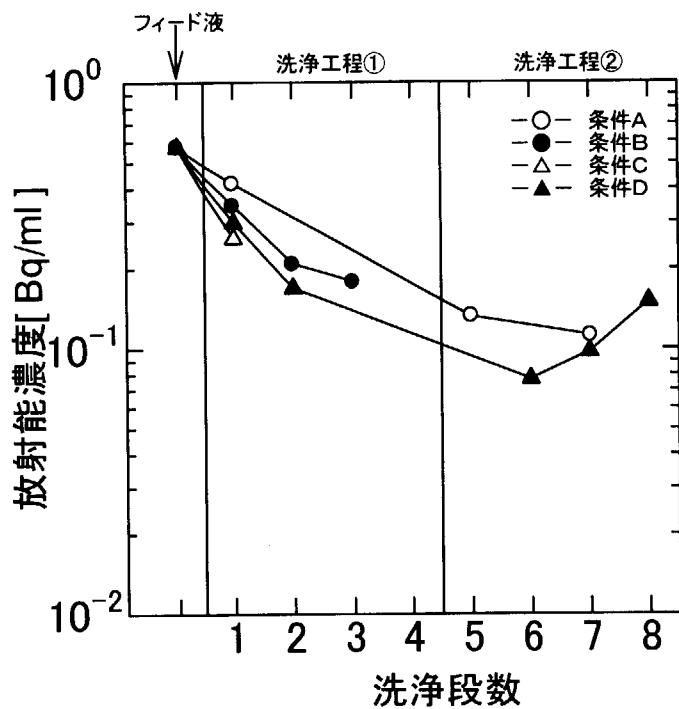


Fig. 19 ^{95}Zr 濃度（有機相）の段方向変化

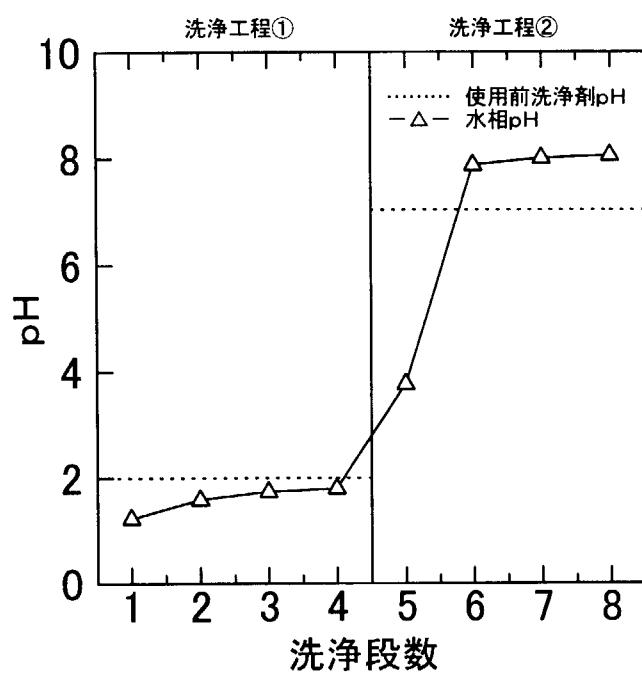


Fig. 20 水相 pH の段方向変化（条件 A）

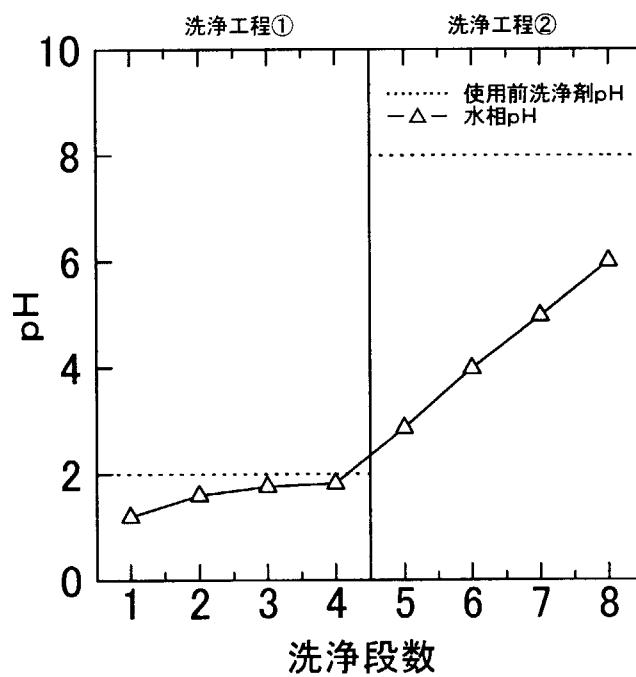


Fig. 21 水相 pH の段方向変化（条件 B）

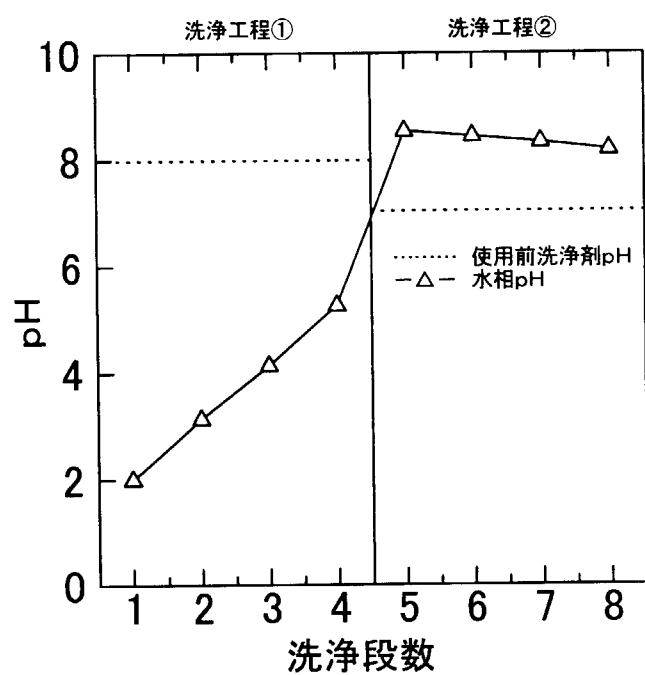


Fig. 22 水相pHの段方向変化（条件C）

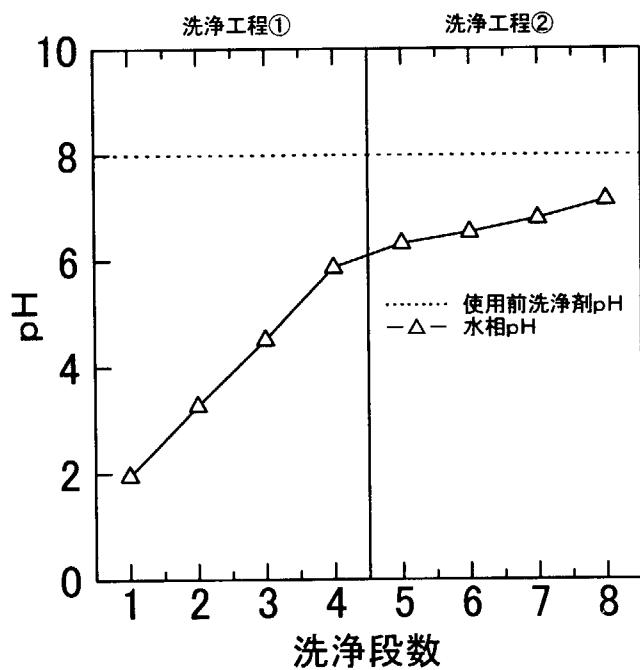


Fig. 23 水相pHの段方向変化（条件D）

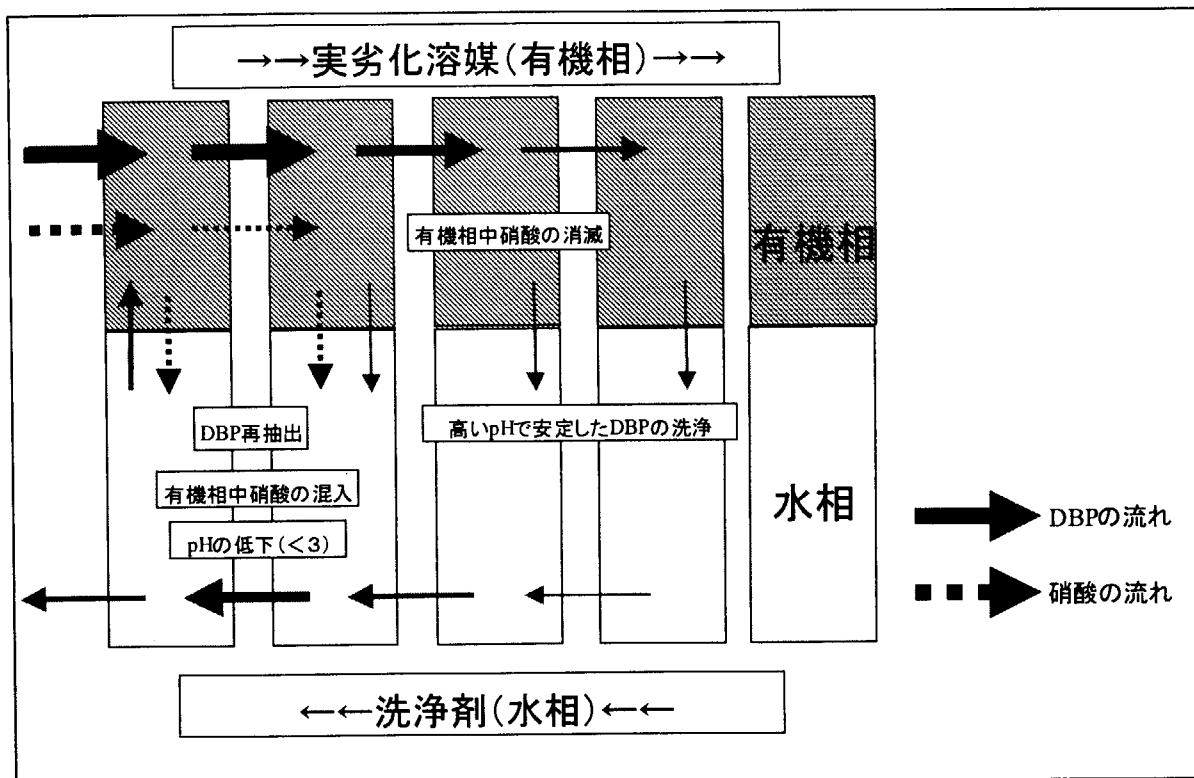


Fig. 24 ミキサセトラ内溶液間で起きるD B Pの移動

This is a blank page.

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
光强度	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
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
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジemens	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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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
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。
- ECE開発理事会指令では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($=10^3$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462
4.44822	0.453592	1

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

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

圧 力 MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062 $\times 10^3$	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($=10^3$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)	
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-8}	-4.184 J (熱化学)	
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-9}	-4.1855 J (15 C)		
3.6×10^6	3.67098×10^3	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$		
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{-9}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$	$= 1 \text{ PS(ボアズ)}$	
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{-3}	$= 75 \text{ kgf}\cdot\text{m/s}$		
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{-8}	$= 735.499 \text{ W}$		
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	吸 收 線 量	Gy	rad	照 射 線 量	C/kg	R	線 量 等 量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876		1	100
	3.7×10^{10}	1	0.01	1			2.58×10^{-4}	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

劣化溶媒に対するブチルアミン洗浄剤の性能試験