

[背景と目的・課題]

人形峠では、施設設備の解体撤去に伴う除染によって、ウランを含んだ多量の廃液が発生している。廃液に含まれるウランは、廃液を処理することで放射性スラッジ（汚泥）に移行することから、廃液処理を効率的に進めるとともに、発生する放射性スラッジのウラン量を低減するためには、除染廃液から高選択的にウランを除去する必要がある。現状では、イオン交換樹脂やキレート樹脂によるウランの除去が検討されたが、処理速度（迅速性）やコスト（経済性）が課題となっている。

廃液から有害物質あるいは有価物を回収するとき、多くの場合、カラム分離法²⁾あるいは溶媒抽出法が選択される。一般的に、回収すべき目的成分の濃度が高く（例えば、100ppm以上）、処理対象となる廃液が大量で迅速処理を求められる場合、溶媒抽出法が選択されることが多い。カラムに充填して用いる固体樹脂は、抽出（吸着）容量が小さいため、高濃度の目的成分を回収する場合、高頻度で樹脂を交換・再生する必要があり、限度まで繰り返し利用した後には廃棄するため、大量の樹脂廃棄物が発生する。処理対象の除染廃液には、最大で200ppm程度の比較的高い濃度のウランが含まれるので、消耗品コスト、設備運転コスト、廃棄物処理コストなどの点から、カラム分離法は不利である。加えて、固-液系での吸着（抽出）にはかなりの時間を要するため、カラム分離法では大量の廃液を迅速に処理できない。一方、溶媒抽出法は、抽出容量が大きく、かつ大量・迅速処理に適した方法である。しかしながら、溶媒抽出法では、水相と有機相の混合/相分離を繰り返す特殊な装置が必要であり、カラムに樹脂を充填して送液するだけのカラム分離法と比較すると、簡便な方法とは言えない。実際、従来法に基づく溶媒抽出装置は、扱いづらく、初期コスト、運転コストともに小さくはない。

[内容と成果]

原子力機構では、除染廃液中のウランを簡便・低コストかつ迅速・高効率に回収できる新たな溶媒抽出法として、エマルションフロー法を開発した。エマルションフロー法に基づく装置の特徴は、カラム分離法と同様な簡便さで（送液するだけで）、従来の装置よりも格段に低コストで、かつ最高レベルの性能で溶媒抽出を行える点にあり、簡便・低コストと高性能とを両立させている。以下に、エマルションフロー法の概要を示す。

（1）エマルションフロー法の概要

エマルションフロー法とは、処理対象となる水溶液（水相）の中に、抽出剤を含む有機溶媒（油相）を微細な液滴として噴出させることで、水相と有機相とが混合・乳濁したエマルションの流れ（エマルションフロー）を発生させる点に特徴がある溶媒抽出の新しい方法である。エマルションフロー法を利用した装置では、従来装置とは異なり、水相と有機相の混合に、攪拌、振とう、遠心力などの機械的な外力をいっさい必要としない。

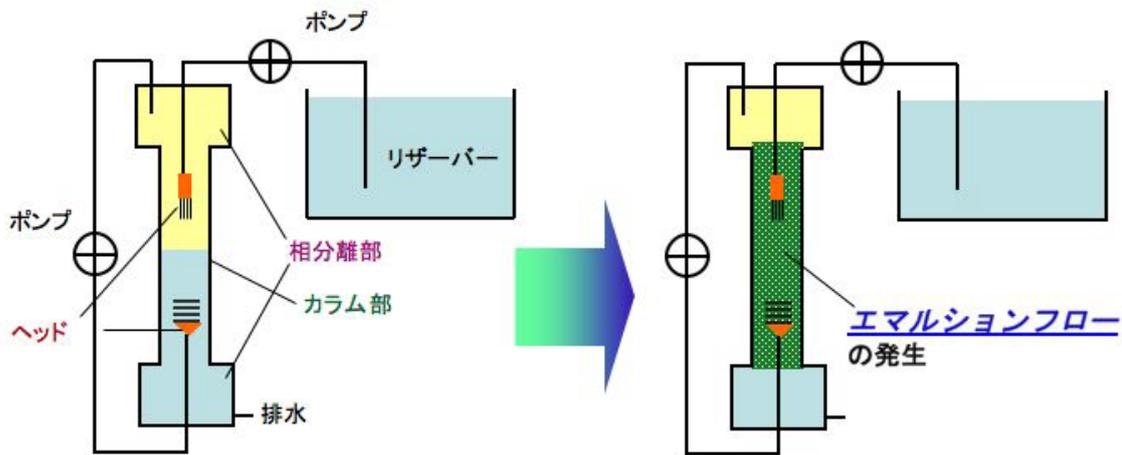


図1 エマルションフロー法を利用した装置の概要

図1に示すように、エマルションフロー装置は、中央のカラム部に対して上下に位置する2つの相分離部から成る極めてシンプルな構造である。水相（図中の水色）は装置の上部から供給され、有機相（図中の黄色）は装置内を循環する。水相中に設置された有機相用ヘッドから発生する有機相の微細液滴の流れと有機相中に設置された水相用ヘッドからの水相の流れが重なって、安定なエマルションフロー（図中の緑色）が発生する。この仕組みにより、攪拌、振とうなどの機械的な外力を用いることなく、送液のみで2液相を混合してエマルション（乳濁状態）にすることができる。

また、エマルションフロー装置では、重力による相分離を待たず、機械的な外力（遠心力など）を用いることもなく、水相と有機相の相分離を迅速かつ効率的に行う独特な仕組みを持つ。すなわち、液滴流の鉛直方向の線速度を大きく変化させることにより、液滴の凝集が急速に進行する。図2に、カラム部で発生したエマルションフローがカラム部の上下に位置する相分離部に到達すると速やかに消滅するときの様子を示す。右の写真からわかるように、乳濁状態はカラム部のみで、カラム部の下の相分離部（ウランが除去された後の排水が集まる部分）は無色透明である。



図2 上下の相分離部におけるエマルションフロー消滅の様子

(2) 従来の溶媒抽出装置との比較

一般的な溶媒抽出装置として知られるミキサーセトラーは、攪拌ファンによって水相と有機相を混合するミキサー（混合）部と2液相を重力によって相分離するセトラー（沈降）部から成る装置である（図3を参照）。ミキサーセトラーは構造が簡単なので、比較的安価に製造できるうえに、安定な抽出性能を発揮できる装置でもあり、現在、もっとも普及している溶媒抽出装置の代名詞である。しかしながら、相分離を重力のみに頼る（重力分離を待つ）ため、処理速度は大きくない。また、排水には油分が混入してしまう欠点もある。溶媒抽出法が環境にやさしくないとされるゆえんである。

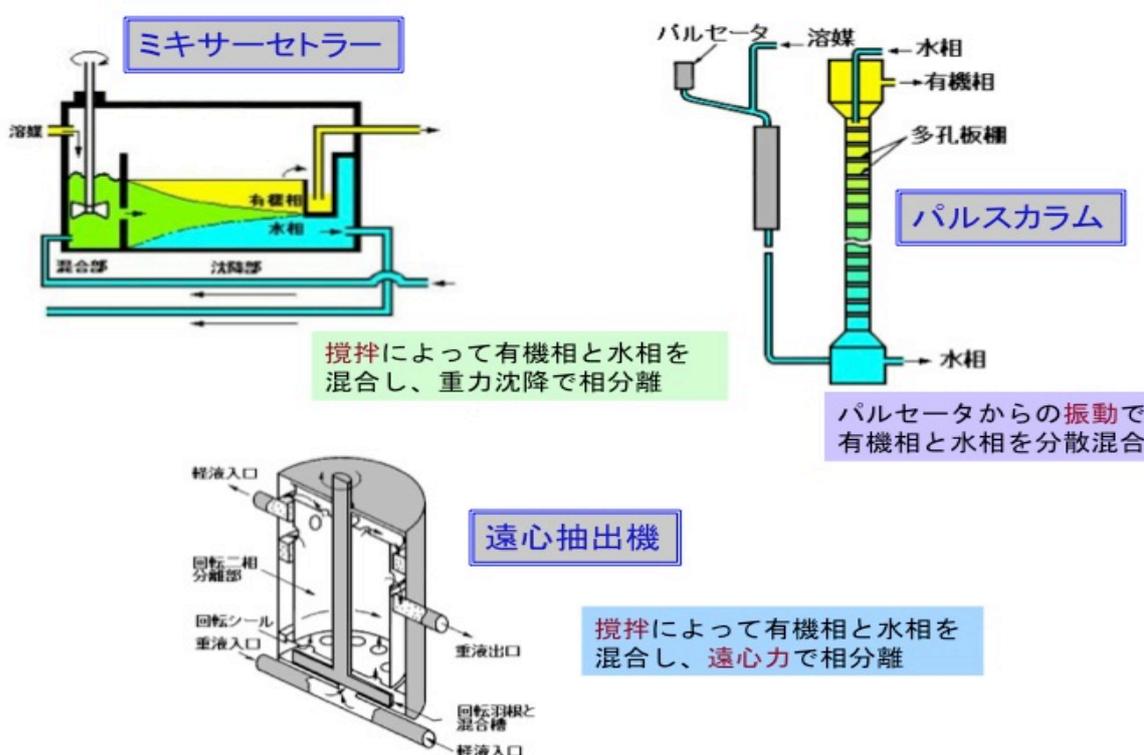


図3 従来の溶媒抽出装置

パルスカラムは、パルス振動によって水相と有機相を分散混合する装置であり、多孔板棚が設置された縦長カラム状の大型装置である（図3を参照）。この装置は、迅速処理能力（処理速度）に優れているが、2液相の混合能力においてはミキサーセトラーに大きく劣る。パルスカラムでは、乳濁状態には至らないため、抽出能力は低い。

遠心抽出機は、攪拌ファンによって水相と有機相を混合すると同時に、遠心力によって迅速に2液相を分離する装置である（図3を参照）。遠心力で相分離を行うことで、処理速度を大幅に向上させ（同サイズの装置でミキサーセトラーの10倍以上）、装置のコンパクト化を実現している。また、遠心力を使って相分離するので、排水への油滴の混入は少ない。よって、性能面では従来装置の中で最高レベルにある。しかしながら、装置全体を回転させる駆動力と複雑な装置構造から、初期コスト、運転コストのいずれも大きく、定期的なオーバーホールと部品交換を必要とするため、維持コストも大きいことが難点である。

従来の溶媒抽出装置は、いずれの装置も、ポンプ送液以外にも機械的な外力（攪拌力、遠心力など）を必要とするため、定常運転に至るまでの調整作業に熟練を要するといった、扱いづらさも欠点である。一方、エマルションフロー法を利用した装置は、カラム分離法と同様な簡便さ（送液のみ）で溶媒抽出を行うことが可能である。加えて、従来の溶媒抽出装置の中で最高レベルの性能を有する遠心抽出機に匹敵する高性能を持ち（処理速度はミキサーセトラーの10倍以上、抽出能力および相分離能力は遠心抽出機と同等）、その一方で、コスト面において有利とされるミキサーセトラーよりも更に格段に安価な初期・運転・メンテナンスコストにできる（ミキサーセトラーの1/5以下）。

（3）実用化に向けた成果

人形峠での実際の除染廃液を用いた試験によって、エマルションフロー法を用いることで、除染廃液中のウランを排出基準値以下のウラン濃度まで迅速に除去することに成功した。実用スケールの約半分の規模の装置（幅 50cm×奥行 20cm×高さ 140cm の装置）を用いて、1時間に 60 から 90 リットルの廃液を処理して、廃液中のウランの 92%を選択的に回収することができた。同じ装置を 3 段つなげれば、99.9%のウランの回収が可能となる。また、除染廃液を溶媒抽出法によって処理する際、廃液中の浮遊物（固形成分）がウランの抽出を阻害するが、浮遊物を集めて回収できるようにエマルションフロー装置の容器構造を改良するとともに、浮遊物トラップを設置することで、浮遊物を除去することに成功し、実用化への目処が立った。

[今後の期待、波及効果]

新しく開発した技術“エマルションフロー法”は、原子力機構での除染廃液処理に利用できるだけでなく、国内のウラン廃液の処理に広く役立つと期待できる。また、エマルションフロー法は、原子力分野以外にも、工場からの排水の浄化や廃液からのレアメタルの回収などに利用できる新技術として、様々な産業分野で注目を集めている。

[用語説明]

1) 液-液抽出（溶媒抽出）

溶媒抽出法とは、水に溶解している目的成分を、水と混じり合わず 2 液相（水相と有機相）を成す有機溶媒に抽出する方法のことで、通常、抽出剤と呼ばれる金属イオンと結合する疎水性の化合物を有機相に添加して用いる。溶媒抽出では、通常、攪拌・振とうなどによって 2 液相を混合することで液-液界面の面積を大きくして目的成分の有機相への移行を促進し、重力分離あるいは遠心分離によって混合した 2 液相を分離（相分離）することで処理後の水相だけを排水する。

2) カラム分離法

カラム分離法とは、イオン交換樹脂、キレート樹脂、吸着剤などをカラムに充填して用いる方法で、処理対象の水溶液（廃液など）をカラムに通して目的成分を回収する方法である。カラムに樹脂を充填して送液するだけなので、簡便である。

以上