

論文内容の要旨

論文題目：

バイポーラ膜電気透析法の環境技術への応用 —設計手法の確立とその実証—

氏名 長澤 寛規

1. 静脈系物質フローにおける分離技術

消費活動に伴って発生する排出物を収集し、有価物のリサイクルや有害物の適正処理を行う静脈系と呼ばれる一連の処理フローにおいて、分離技術は不可欠な要素技術である。排出物を扱うという制約から、静脈系の分離技術は、低コストかつ分離操作に伴う追加的な物質及びエネルギーの投入や二次廃棄物の発生を可能な限り抑制することが強く求められる。

2. バイポーラ膜電気透析法：現状と課題

電気透析法によるイオンの分離とバイポーラ膜と呼ばれる複合膜による水の解離反応を組み合わせたバイポーラ膜電気透析法 (Bipolar Membrane Electro-Dialysis, BMED) は、中和塩から酸及びアルカリを製造する溶液系の膜分離技術として知られている^[1]。

BMED 法は電気的なイオンの移動を利用するため、追加的な物質の投入を行うことなく中和塩等の混合物からそれを構成するイオンを別個に分離可能であり、二次廃棄物の発生を抑制可能という特徴がある。

また、溶液中に潜在的に存在する酸及びアルカリを利用して溶液の pH を制御可能なことから、溶液系の分離技術の多くで問題となる pH 調整に伴う酸及びアルカリの消費を低減することが可能である。

このように、バイポーラ膜電気透析法は静脈系の分離技術として有望な技術であるといえるが、BMED 法の利用は単純な酸及びアルカリの回収に限られている。

本研究では、BMED 法を静脈系の分離技術として幅広く展開することを目指し、より複雑な組成を持つ混合物に対して BMED 法を適用するための設計手法を構築することを目的とした。また、構築した設計手法を実際のプロセス設計に適用し手法の妥当性を実験的に検証するとともに、BMED 法の静脈系の分離技術としての有効性を明らかにすることを目的とした。

3. BMED プロセスの設計手法の確立

3.1. 設計手法の概要

本研究で確立した設計手法は、プロセスの類型化を行い各類型に応じて適用可能な

分離パターンを構成する工程と、物質移動論に基づいて構築したBMEDモデルにより分離性能の評価及びプロセスの詳細設計を行う工程から成る (Fig. 1).

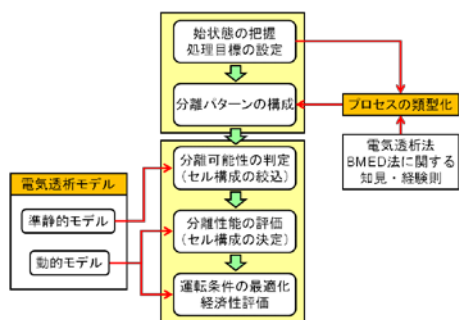


Fig. 1. BMED プロセスの設計手法の概要.

3.2. 類型化による分離パターンの構成

本研究では、従来の経験に依存した分離パターンの構成過程を整理し、与えられた処理対象の性状やBMED法による分離操作の目的に応じて、Fig. 2に示す基本となる7通りの分離パターンから、候補となる分離パターンを系統的に絞り込む設計指針を構築した。

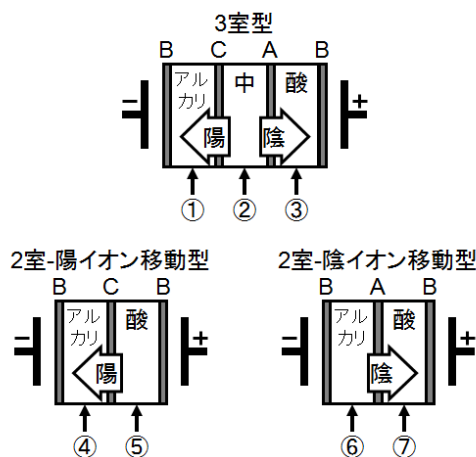
本研究ではBMEDプロセスは処理の目的によって除去型と回収型に、溶解平衡反応の有無によって液相型と相変化型に、分離対象のイオンと競合するイオンの符号によって異符号分離型と同符号分離型に類型化した。

【除去型】対象成分を取り除くことが目的で、被処理液の終状態に制約がある。

【回収型】対象成分の単離が目的で、対象物質の濃度や純度に制約がある。

【液相型】対象成分の分離はイオン交換膜を介した移動のみにより行われる。

【相変化型】対象成分が相変化によって液相から脱離する反応を分離に利用可能。



B: ハイポラ膜, C: 陽イオン交換膜, A: 陰イオン交換膜

Fig. 2. 代表的なBMED法のセル構成.

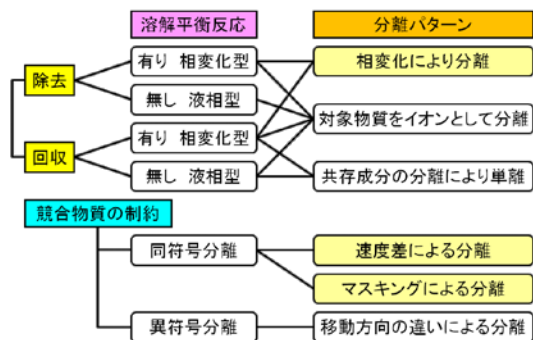


Fig. 3. BMED プロセスの類型化.

【異符号分離型】分離対象と競合成分が異符号であり、電気泳動の方向の違いにより相互分離を行う。

【同符号分離型】対象成分と競合成分が同符号であり、電気泳動の速度差やマスクングにより相互分離を行う。

処理対象の性状や分離操作の目的によりプロセスを類型化することにより、Fig. 2のチャートから適用可能な分離パターンを絞り込むことが可能である。

3.3. BMEDモデルによる分離性能評価

本研究では、はじめに準静的モデルを用

いて上記の工程で候補として絞り込まれた分離パターンの分離可能性の判定を行う。準静的モデルはBMEDプロセスにおけるイオンの移動が濃度勾配の影響を受けず、物質の移動量が電気透析槽を通過した電流量のみで決まる理想的状況を仮定した物質移動モデルである。

さらに、準静的モデルで分離可能と判定された分離パターンに対して動的モデルを用いた分離性能の評価を行い、プロセスに実際に適用する分離パターンの選定を行う。具体的な評価指標としては、処理容量や所要エネルギーを計算することが可能で、それらを比較することにより、最適な分離パターンの選定を行う。

【処理容量】 [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$]

単位膜面積、単位時間あたりに処理可能な被処理液の体積を表す。

【所要電力量】 [kWh/m^3]

単位体積の被処理液を処理する際に要した電力量を表す。

本研究で構築したBMEDモデルは、物質移動現象の基礎式としてNernst-Planckの式を用い、水溶液中での拡散係数等の基礎的な物性値のみを用いて、BMEDプロセスにおける物質移動を再現するボトムアップ型のモデルである。従って、処理対象となる混合物の組成と基礎的な物性値さえ得られれば、BMEDプロセスを適用した場合の結果を容易に予測可能であり、本研究で構築したBMEDモデルはBMED法を静脈系の分離技術として幅広く展開する際の簡易設計手法としても有用なモデルである。

3.5. プロセスの最適化及び詳細設計

動的モデルを用いて、処理対象の性状や

操作条件を変化させて数値計算を行うことにより、プロセスの最適化を行う。また、電気透析実験を並行して実施し、実験結果をモデルのパラメータにフィードバックすることにより、より詳細なプロセスの評価及び設計を行うことが可能である。

4. 実証実験

4.1. 排ガスからの二酸化炭素回収

二酸化炭素回収貯留は地球温暖化対策技術のひとつと考えられているが、二酸化炭素の分離回収に多量の熱エネルギーを要するため高コストであることが実用化の障害となっている。

ここでは、二酸化炭素の水溶液への溶解度がpHにより大きく変化することに着目し、BMED法によるpHスイングによって二酸化炭素分離回収を行うことを検討した。

適用可能な分離パターンとして、3室型の②、2室-陽イオン移動型の⑤及び2室-陰イオン移動型の⑥の3つ分離パターンが考えられるため、準静的モデル及び動的モデルによる分離パターンの選定を行うとともに、電気透析実験により本研究で構築した設計手法による分離パターンの選定結果の妥当性を検証した。

Fig. 4にモデル計算及び電気透析実験で得られた二酸化炭素回収所要電力量の比較結果を示す。モデル計算及び実験結果とも所要電力量は2室-陽イオン移動型の⑥が最も小さく、3室型の②、2室-陰イオン移動型の⑥順に増加した。この結果から、本研究で構築した設計手法による選定結果の妥当性が確認された。

さらに、2室-陽イオン移動型の⑤の分離パターンについて電流密度を変化させて二

酸化炭素回収実験を行い、二酸化炭素回収所要電力量を最小で 0.66 kWh/kg- CO₂ まで低減可能であることを確認した。

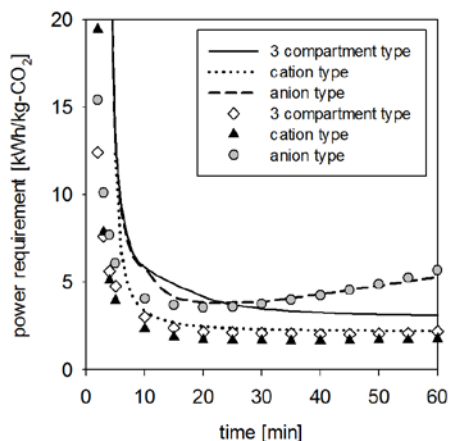


Fig. 4. 二酸化炭素回収所要電力量.

4.2. 工業排水からのホウ素化合物の除去

近年、ホウ素化合物の排水規制が強化されているが、効果的なホウ素除去技術は依然として確立されていない。ここでは、ホウ素の排水中での主な存在形態であるホウ酸の除去技術として BMED 法を適用することを検討した。

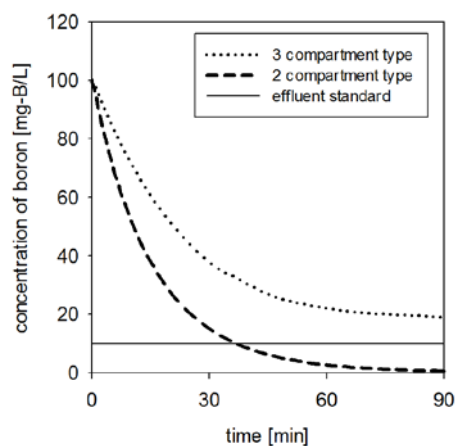


Fig. 5. 動的モデルによるホウ素除去プロセスの計算結果.

ホウ素除去に適用可能なセル構成としては 3 室型の②及び 2 室陰イオン移動型の⑥が考えられる。準静的モデル及び動的モデルによる評価を行い、Fig. 5 に示すように排水基準 (10 mg-B/L) を満たす濃度までホウ素の除去を行うためには、2 室-陰イオン移動型の⑥の分離パターンが好適であるという結果を得た。

2 室-陰イオン移動型の⑥分離パターンを用いてホウ素除去実験を行った結果、実際にホウ素除去が可能であることが確認された。また、排水の pH や共存成分の濃度を変化させて実験を行った場合にも排水基準を満たす濃度までホウ素を除去することが可能であり、BMED 法がホウ素含有廃水処理技術として有効であることが示された。

5. 結論

本研究では、BMED 法を静脈系の分離技術として展開するためのプロセス設計手法の構築を行った。本手法を用いれば処理対象の性状や操作の目的に応じた分離パターンを系統的に与えることが可能である。また、BMED モデルを用いることにより、様々な分離パターンや操作条件を幅広く網羅してプロセスの分離性能の評価及び設計を行うことが可能となる。

実際に確立した設計手法を、具体的な問題に適用して、本手法を用いたプロセス設計の妥当性を確認するとともに、BMED 法の静脈系の分離技術としての有効性を明らかにした。

参考文献

[1] K. Mani, Journal of Membrane Science, 58, 117-138 (1991).