

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26740049

研究課題名(和文) 海水資源を回収する複合型膜分離プロセスの高効率化に向けた物質輸送論に基づく研究

研究課題名(英文) A mass transport approach for promoting the efficiency in a combined membrane separation technology extracting sea resources

研究代表者

佐野 吉彦 (SANO, Yoshihiko)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：90720459

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：複合型膜分離プロセスの高効率化に向け、物質輸送論の立場から、製塩技術と海水淡水化技術の理論解析手法を確立し、それぞれの技術の高効率化を図った。

海水淡水化技術においては、スパイラルモジュールの最適運転条件の決定法を提案した。製塩技術では、ネルンスト・プランクの式と電気中性条件を連立させた理論解析を行うことにより、電気透析内の脱塩・濃縮挙動を明らかにした。さらに、特殊な多孔質構造を有するスペーサーを提案し、電気透析槽に挿入することで、ポンプ動力と電気抵抗を上昇させることなく、限界電流密度を4倍上昇させた。最後に、複合型膜分離プロセスの運転を模擬する数値シミュレーションコードを開発した。

研究成果の概要(英文)：The governing equations for both reverse osmosis membrane method and electro-dialysis were introduced so as to promote the efficiency in a combined membrane separation technology.

In the study for a reverse osmosis membrane method, a series of calculations revealed that an optimal operating condition exists in order to receive the maximum permeate flow rate for given pumping power. On the other hand, in the study for electro-dialysis, the special distributions of an ion concentration and the electric potential were revealed based on the Nernst-Planck equation and the local electro-neutrality. Moreover, it was found that the present porous spacers are quite useful in terms of increasing limiting current density and reducing the consumption of electrical power. Finally, a numerical simulation code was developed to predict the performance in a combined membrane separation technology.

研究分野：物質輸送

キーワード：膜分離技術 海水淡水化技術 逆浸透膜濾過 製塩技術 電気透析 物質輸送 高効率運転

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、世界的な水不足が深刻化するなか、海水から淡水、食塩、さらにリチウムなどの希少元素などを回収するための、製塩技術と海水淡水化技術からなる複合型の膜分離プロセスの実用化が求められてきた。

(2) 複合型の膜分離プロセスは複数のプロセスが同時に稼働することから、規格および運転の最適化を決定することは難しく、実用化に向けは、それぞれのプロセスの理論解析手法を確立し、複数のプロセスを理論的に連成することで、運転仕様を決めていく必要があった。

### 2. 研究の目的

(1) 物質輸送論の立場から、製塩技術と海水淡水化技術の理論解析手法を確立し、想定される複合型の膜分離プロセスについて、理論解析手法を連立させることで、その運転仕様を提言する。

(2) 製塩技術と海水淡水化技術の理論解析を行い、それぞれの技術の高効率化を図る。特に、本研究では、製塩法である電気透析の高効率化に主眼を置き、電気透析における濃度場、電位場、速度場を理論的に把握し、さらに、製塩プロセス自体の運転仕様について検討する。

(3) 製塩プロセスの効率向上のために、多孔質体の攪拌効果について検討するとともに、高濃縮・省エネルギーを実現する多孔質構造スパーサーを検討する。

### 3. 研究の方法

(1) フィルタープレス型の電気透析槽を作成し、ファラデーの法則に基づき、装置の妥当性を検証するとともに、多孔質構造スパーサーが限界電流密度と使用エネルギーに及ぼす効果について検証する。

(2) ネルンスト・プランクの法則と電気中性条件を連立することで、製塩プロセスの濃度場、電位場、速度場を理論的に把握し、さらにプロセス解析により、製塩プロセスの高効率な運転仕様を決定する。

(3) 製塩技術と海水淡水化技術の理論解析手法を提案し、それぞれの技術の高効率化を検討するとともに、想定される複合型の膜分離プロセスの性能を理論予測する最適運転支援ツールを開発する。

### 4. 研究成果

(1) 海水淡水化技術において、物質輸送論に基づきスパイラルモジュールの最適運転条件の決定法を提案した。(図1) この結果は国際論文誌 Journal of Porous Media に公表した。

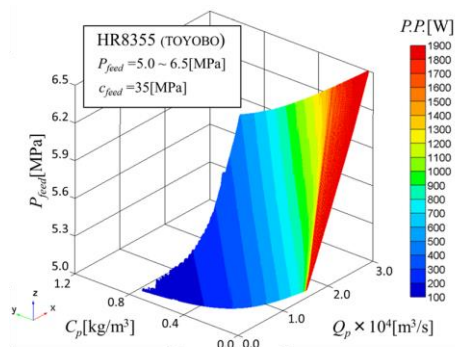


図1 海水淡水化の運転条件決定図

(2) 製塩プラントを想定し、浸透圧を考慮した理論解析を行うことにより、電気透析内の脱塩・濃縮挙動を明らかにした。ここでは、膜表面の濃度を予測することにより、電気透析を行う上で重要となる限界電流密度の決定法を提案した。この結果は国際論文誌 Desalination に公表した。

(3) ネルンスト・プランクの式と電気中性条件を連立させることにより、製塩プロセスにおける電気透析法の濃度場、電位場、速度場の解析解を導出した。(図2, 図3) また、本研究で行ったフィルタープレス型の電気透析の実験結果に基づき、本解析の妥当性を実証した。この結果はこの結果は国際論文誌 Desalination に公表した。

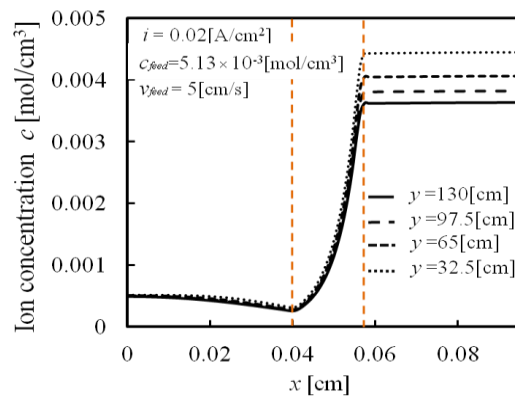


図2 電気透析における濃度場

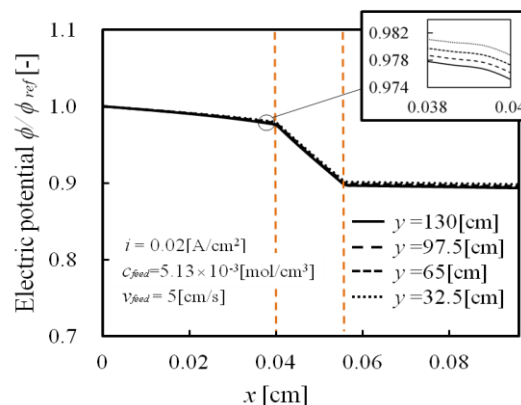


図3 電気透析における電位場

(4) セラミックス製の多孔質体を利用した多孔質構造スぺーサーを作成し、電気透析槽に挿入することで、限界電流密度を4倍上昇させた(図4)。さらに、その形状を検討することで、ポンプ動力と電気抵抗の上昇を抑えることに成功した。この結果は国際論文誌 Desalination に投稿中である。

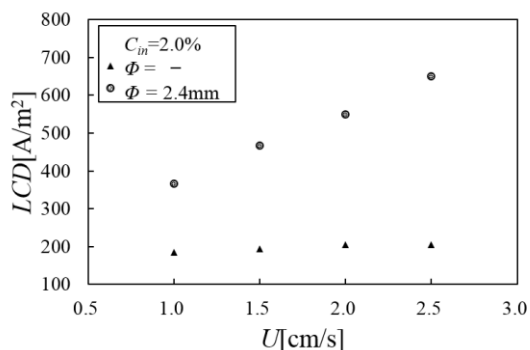


図4 多孔質構造スぺーサーによる限界電流密度の増加効果

(5) スぺーサー形状が電気透析の性能に及ぼす効果を実験的に検討し、多孔質体の攪拌強さと攪拌する方向が限界電流密度に大きく影響することが判明した。この結果は 28th International Symposium on Transport Phenomena で公表する予定である。

(6) 複合型膜分離プロセスの運転を模擬する数値シミュレーションコードを開発し終えており、現在は高効率運転を実現する運転条件を検討している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① A. Nakayama, Y. Sano, X. Baia, K. Tado, A boundary layer analysis for determination of the limiting current density in an electro-dialysis desalination, Desalination 404, 41-49 (2017), 査読あり。
- ② K. Tado, Y. Sano, X. Bai, A. Nakayama, A GENERAL ANALYTIC EXPRESSION BASED ON THE LOCAL ELECTRICAL NEUTRALITY DESCRIBING ION TRANSPORT THROUGH AN ION-EXCHANGE MEMBRANE, JP Journal of Heat and Mass Transfer, 13-3, 303-323 (2016), 査読あり。
- ③ K. Tado, F. Sakai, Y. Sano, A. Nakayama, An analysis on ion transport process in electro-dialysis desalination, Desalination 378, 60-66 (2016), 査読あり。
- ④ Y. Sano, A. Horibe, N. Haruki, A.

Nakayama, A volume-averaging approach for analyzing a spiral-wound reverse osmosis desalination module, J. Porous Media, 18-11, 1149-1158 (2015), 査読あり。

〔学会発表〕(計6件)

- ① 田渡賢史, 天海十漸, 佐野吉彦, 中山顕, 電気的中性条件に基づく電気透析の数学モデル, 第53回日本伝熱シンポジウム, 大阪府立国際会議場 大阪府, 大阪市, 2016年5月24-26日。
- ② 花房湧紀, 佐野吉彦, 堀部明彦, 春木直人, 藤本諒, イオン交換膜を用いた電気透析における溶液流れ状態の効果, 日本機械学会 中国四国学生会 第46回学生員卒業研究発表講演会, 愛媛大学工学部, 愛媛県, 松山市, 2016年3月8日。
- ③ 佐野吉彦, 堀部明彦, 春木直人, 藤本諒, 電気透析における流れ場の影響, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2015, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪府, 吹田市, 2015年10月24日-25日。
- ④ 加藤広康, 田渡賢史, 佐野吉彦, 中山顕, 電気透析による海水濃縮の数値シミュレーション, 第51回日本伝熱シンポジウム, アクトシティ浜松, 静岡県, 浜松市, 2014年5月21-23日。
- ⑤ Y. Sano, A. Horibe, N. Haruki, A. Nakayama, A Porous Media Approach for Analyzing a Spiral-Wound Reverse Osmosis Desalination Module, The 15th International Heat transfer Conference, IHTC15, Aug. 10-15 (2014) Kyoto International Conference Center, Kyoto pre., Kyoto, Japan.
- ⑥ K. Tado, Y. Sano, F. Kuwahara and A. Nakayama, A numerical model for desalination of seawater using electro-dialysis, Joint Symposium among Sister Universities in Mechanical Engineering, JSSUME 2014, Aug. 15-17 (2014), Kaiko Kinen Kaikan, Kanagawa pre., Yokohama, Japan.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐野 吉彦 (SAN0, Yoshihiko)  
静岡大学・工学部・助教  
研究者番号：90720459