

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 1 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12395

研究課題名(和文)新規イオンシープ電気活性透過膜の創製によるリチウム成分連続分離回収技術の開発

研究課題名(英文)Creation of novel ion sieve electroactive permeable membranes for continuous separation and recovery technology of lithium

研究代表者

官 国清 (Guan, Guoqing)

弘前大学・地域戦略研究所・教授

研究者番号：90573618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多イオン共存条件の下、高リチウムイオン選択性を有する電気活性膜を創生し、電気化学的に制御できるイオン交換分離プロセスに応用した。特に、高リチウムイオン選択性を有する -MnO₂、還元型酸化グラフェン(rGO)及びアルギン酸カルシウム(Ca-alg)で構成されるスケーラブルな -MnO₂/rGO/Ca-alg 三次元多孔質複合膜は優れたリチウムイオン選択性を示し、吸着容量は32.7mg・g⁻¹に達した。また、自己電気エネルギー回収を備えたリチウムイオン分離回収システムを構築し、低いエネルギー消費でLiClを選択的に分離できることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海水等溶液中の希薄なリチウムイオンの選択分離に対する新たな分離理論の構築、材料設計及びプロセス開発が必要である。本研究では、多イオン共存条件の下、高リチウムイオン選択性透過膜の創製を中心に、新規電気活性イオン選択透過膜の合成方法を探索した。その同時に、Li-と伴う非金属イオン(特にBr-とCl-)を選択的に分離できる電気活性膜も合成し、Li-イオンと非金属イオン同時に選択的に分離できる省エネルギーの電気活性イオン選択分離システムを構築した。得られた研究成果は、Li+の分離回収に大きく貢献できるものと考えられる。また、Li+以外の様々な有価金属イオンの分離・濃縮を実現するための糸口ともなる。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on development of electroactive materials with high selectivity and capacitance for the lithium ions in the coexistence of other metal ions. In particular, A scalable three-dimensional (3D) porous composite electroactive film consisting of -MnO₂, reduced graphene oxide (rGO) and calcium alginate (Ca-alg) was successfully fabricated and employed for the selective extraction of Li⁺ ions with low concentration via an electrochemically switched ion exchange (ESIX) technology. As a result, the Li⁺ ion adsorption capacity of the obtained -MnO₂/rGO/Ca-alg composite electroactive film reached up to as high as 32.7 mg g⁻¹. In addition, an ESIX system for efficient and selective LiCl separation from brine lakes was developed based on a strategy of self-electrical-energy recuperation, in which the electric energy generated in the process of LiCl uptake was proposed to compensate the energy consumed for the desorption of ions as well as the regeneration of electrodes.

研究分野：化学工学

キーワード：電気活性膜 リチウムイオン分離回収 電気化学的に制御できるイオン交換分離プロセス 選択性透過膜 自己電気エネルギー回収 吸着容量 脱着 分離機構

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本はリチウムの全量を海外からの輸入に頼っており、今後は再生可能エネルギーの貯蔵や電気自動車の普及拡大によって大幅な需要の増加が予想される。また、リチウムは、陸上の推定埋蔵量 4,070 万トンに対して海水中には約 2,500 億トンも溶存しているが、海水 1 リットル当たり約 0.17 ミリグラムと極めて希薄で、様々なイオンと共存しているため、経済的かつ高純度に回収することは極めて困難であり、リチウムの日本国内自給の夢を実現することには、鹹水・海水・廃棄電池浸出液中の希薄なりチウムイオンの選択分離に対する新たな分離理論の構築、材料設計及びプロセス開発が必要である。

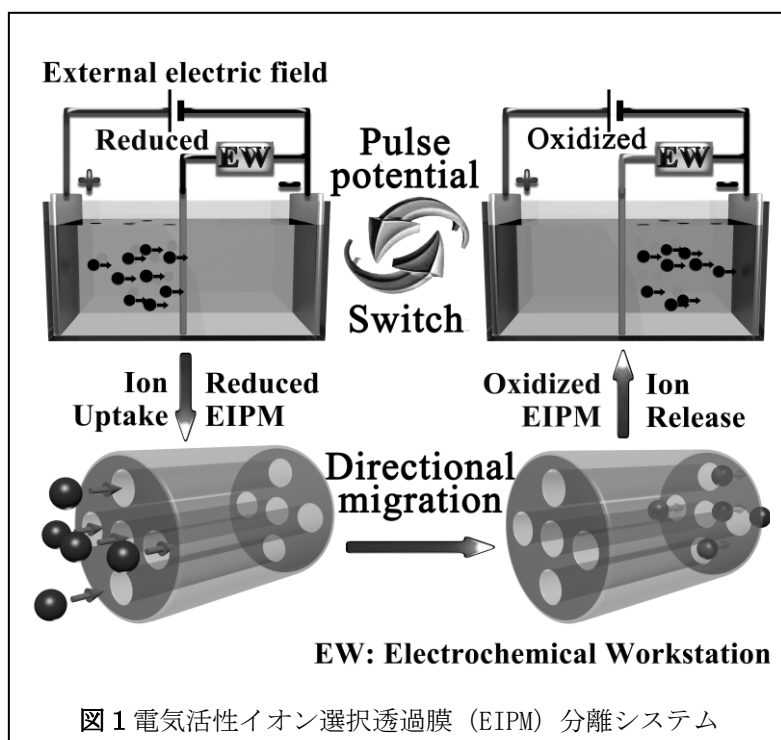
Li⁺の分離回収について、国内外において多くの研究が行われている (Xu ら, *Progress in Mater. Sci.*, 84(2016)276-313)。特にイオン形状記憶機能を持つスピネル型マンガン酸化物の改良により、Li⁺の吸着量を従来の 1mg/g から 49.6mg/g まで飛躍的に増大させた例が存在する (Xu ら, *Progress in Mater. Sci.*, 84(2016)276-313 ; 吉塚ら, *J. Plasma Fusion Res.* 87(12) (2011)795)。しかしながら、これらの吸着剤からの Li⁺溶出の際に、酸処理による大量の二次汚染物が生じると同時に吸着剤の骨格成分も溶出する重大な欠点がある。近年、二次汚染物の発生しない、電気化学的に制御できるイオン交換 (Electrically switched ion exchange, ESIX) 分離回収技術は国内外の研究者に注目され、様々なイオンの選択分離に対する適用が試みられている (官ら, *J. Mater. Chem. A*, 4(2016)6236)。前述のスピネル型マンガン酸化物では Li⁺の吸着脱着が酸化還元サイトとイオン交換サイトの両方で起こるため、電気活性材料としても使える。しかし、この材料はそのままでは電極基材上への製膜が困難である。本研究グループではワンステップユニポーラパルス電着重合 (UPEP) を用い、この材料と導電性ポリマーを電極表面に複合化して、Li⁺の吸着に高い選択性を示す有機・無機複合電気活性イオン交換膜の創製に成功した (官ら, *J. Mater. Chem. A*, 4(2016)13989)。しかし、その膜は緻密な電極基材上に形成され、透過膜ではない。Li⁺のみが膜の一方の側から他方の側へ透過するリチウム分離膜

(LSM) プロセス従来の吸着分離方法よりも環境にやさしく、コスト・効率も良いと言える。これまでに提案された数少ない LSM プロセスは、これまで、数少ない LSM プロセスの提案があったが、Li⁺の回収効率は従来の技術よりも悪い (Hoshino, *Desalination*, 317(2013)11)。したがって、より高いリチウム回収効率とより経済的な適用性を備えた新しい Li⁺分離膜の開発が必要である。そこで、本研究では斬新な電気活性イオン選択透過膜 (Electroactive Ion Permeable Membrane, EIPM) の創製を中心に行う。また、この EIPM を用いたトレードオフを打破した高選択性かつ高透過フラックスを有する斬新なりチウムイオン分離システム (図 1) を構築し、Li⁺の分離回収に大きく貢献できる技術の開発を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、多イオン共存条件の下、主に高リチウムイオン選択性を有する金属イオンシープ配向透過膜の創製と、新規電気活性イオン選択透過膜を合成・評価する。また、膜内イオン・電荷移動特性、イオン交換サイトにおけるリチウムイオンの可逆的な吸着・脱着特性、膜の動的輸率と膜構造との関係及び膜のシープ効果などを調べ、膜の選択透過機構の解明を目指す。更に、補助電場の印加とカップリングによるリチウムイオン選択透過性及び膜中イオン移動速度に対する促進効果を調べ、リチウムイオン透過性および選択性のトレードオフを打破した斬新な電界強化型電気活性膜分離システムを構築し、リチウムイオンの迅速かつ連続的に分離回収する。その同時に、リチウムイオンと伴う非金属イオン (特に Br⁻ と Cl⁻ イオン) を選択的に分離できる電気活性膜も合成し、リチウムイオンと非金属イオン同時に選択的に分離できる省エネルギーの電気活性イオン選択分離システムを構築する。

3. 研究の方法



3. 1 リチウムイオン選択透過電気活性膜の合成

新しい発想として、導電性ポリマーの代わりに、海藻から抽出された天然多糖類のアルギン酸カルシウム (Ca-alg) をバインダーとして使用し、高リチウムイオン選択性を有する λ -MnO₂、還元型酸化グラフェン (rGO) 及び Ca-alg で構成されるスケラブルな λ -MnO₂/rGO/Ca-alg 三次元 (3D) 多孔質複合膜を製造した。ここで、3D 多孔質 λ -MnO₂/rGO/Ca-alg 複合電気活性膜を次の手順を使用して調製した。まず、20 mg の rGO を Na-alg 溶液に加え、30 分間攪拌した。次に、超音波処理で上記の溶液に 25 mg の λ -MnO₂ を分散させた。その後、よく分散した溶液をペトリ皿の上に広げ、-45°C で 48 時間凍結乾燥させ、 λ -MnO₂/rGO/Na-alg 複合膜を得た。最後に、 λ -MnO₂/rGO/Ca-alg 複合電気活性膜は、CaCl₂ 溶液中に λ -MnO₂/rGO/Na-alg 複合膜を浸すことによって製造した。

3. 2 複合電気活性膜の物理化学特性評価

複合電気活性膜の形態とナノ構造の分析は、走査電子顕微鏡 (日立製作所 SU8010 型) と透過電子顕微鏡 (日本電子 JEM-2100F 型) によって、それぞれ 15.0 kV 及び 200kV の加速電圧で測定した。また粉末 X 線回折計 (Rigaku 社 SmartLab 9KW 型) によって X 線回折パターンを得た。元素の組成と化学価の状態は、X 線光電子分光計 (Thermo Electron 社 VG Escalab 250 型) で取得した。複合膜の重量組成は、熱重量測定分析装置 (TGA, Shimadzu DTG60 型) を使用して分析した。水溶液中の陽イオン濃度は、イオンクロマトグラフィー (米国 Dionex 社 DX-600 型) によって分析した。

3. 3 電気化学的特性の評価

得られたリチウムイオン選択透過電気活性膜の電気化学的特性評価は、三電極電気化学システムを使用して実行された。そのイオン交換挙動は、サイクリックボルタンメトリー (cyclic voltammetry, CV) によって調査された。ここで、印加電位範囲は 0-0.8V、スキャン速度は 50 mV s⁻¹ でした。電気活性膜上の Li⁺イオンの電気化学的吸着と脱着は、室温で 200 mL の様々なイオン濃度を有する LiCl 水溶液中に測定した。膜の吸着容量 (Q) は、次の式を使用して計算された。

$$Q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}$$

ここで、C₀ と C_e (mg L⁻¹) は、それぞれ試験中の初期及びポイントオブケア Li⁺イオン濃度であり、V (L) は水溶液の体積、M (g) は、複合膜の質量である。

リチウムイオンに対する複合膜の選択性係数は、次のように定義されている。

$$\alpha_{\text{Na}}^{\text{Li}} = \frac{x'_{\text{Li}}/x'_{\text{M}}}{x_{\text{Li}}/x_{\text{M}}}$$

ここで、分子と分母は、それぞれ複合膜内およびバルク溶液内の陽イオンモル量の比である。

3. 4 電気活性イオン選択透過膜 (EIPM) 分離システム

図 1 に示した電気活性イオン選択透過膜 (EIPM) 分離システムに対して、連続透過分離試験の前に、電気活性膜を膜モジュールのソースとレシーバーチャンバーの間に組み立てた。200 mL のリチウムイオンを含有する混合溶液とレシーバーをそれぞれソースとレシーバーチャンバーに注ぎた。送液ポンプがオンになった後、連続的な透過分離システムが形成される。ここで、一定範囲のパルス電位が膜に印加され、リチウムイオンの透過速度を向上する。その同時に、外部電場も加えた。実験中、ソースまたはレシーバーチャンバーから 1 mL の溶液を定期的にサンプリングして分析した。

4. 研究成果

4. 1 λ -MnO₂/rGO/アルギン酸カルシウム複合膜を用いた ESIX メカニズム

図 2 には 3D 多孔質 λ -MnO₂/rGO/Ca-alg 複合電気活性膜の構造と ESIX プロセス中の Li⁺イオンの吸着および脱着メカニズムを示す。ここで、 λ -MnO₂ ナノロッドは複合膜の表面と細孔に存在しているほか、rGO の-OH 基と Ca-alg の-OH 基の間に水素結合が形成されて複合材料を安定させていると考えられる。この複合電気活性膜による水溶液からの Li⁺イオンの選択抽出は λ -MnO₂ の特殊な電位応答性イオンポンピング効果を有することを確認した。電極に還元電位を印加すると、複合膜が還元されるため、水溶液中の Li⁺イオンが λ -MnO₂ に選択的に吸着され、膜の電荷中性が維持される。逆に、電極に酸化電位を印加すると、複合膜が酸化状態になり、吸着した Li⁺イオンが溶液に放出されて電荷の中性が維持されることを明らかにした。ESIX プロセス中のこの Li⁺イオン吸着/脱着プロセスは、Li⁺イオンを選択的に吸着/脱着できる電位応答性イオンポンピングプロセスのようなものであり、動作電位を調整することで複合膜の再生を容易に実現できる。ここで、 λ -MnO₂ による Li⁺イオンの選択的吸着/脱着を除いて、負/正電位が作用電極に印加されると、rGO/Ca-alg の表面に静電相互作用で任意の陽イオンが吸着/脱着する可能性もありうる。

4. 2 λ -MnO₂/rGO/アルギン酸カルシウム複合膜の電気化学特性

図 3A に示すように、負および正の電位スキャンプロセスにそれぞれ対応する CV 曲線上の還元/酸化ピークがそれぞれ二組観察された。これは、 λ - MnO_2 結晶の二つの格子サイトでの Li^+ イオンの挿入と放出に起因することである。また、興味深いことに、真空凍結乾燥で得られた λ 複合膜ベースの電極の CV 曲線は、一般的な真空乾燥で得られた電極と比較して、はるかに大きな電気活性応答領域を示し、それは真空凍結乾燥によって、3D 多孔質ネットワーク構造を形成して、 Li^+ イオンに対してより高い電極活性と、より大きな吸着および貯蔵容量を備えていたと考えられる。図 3B は、2、5、10、15、20、 50mVs^{-1} のさまざまなスキャン速度での真空凍結乾燥から得られた複合膜電極の電気化学的性能を示す。スキャンレートが高いほど、CV 曲線の面積が大きくなること

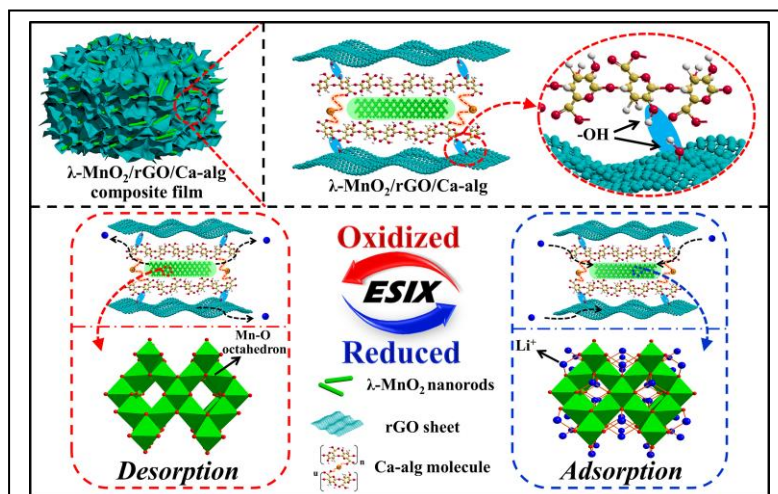


図 2 3D 多孔質 λ - MnO_2 /rGO/Ca-alg 複合電気活性膜の構造と ESIX プロセス中の Li^+ イオンの吸着および脱着メカニズム

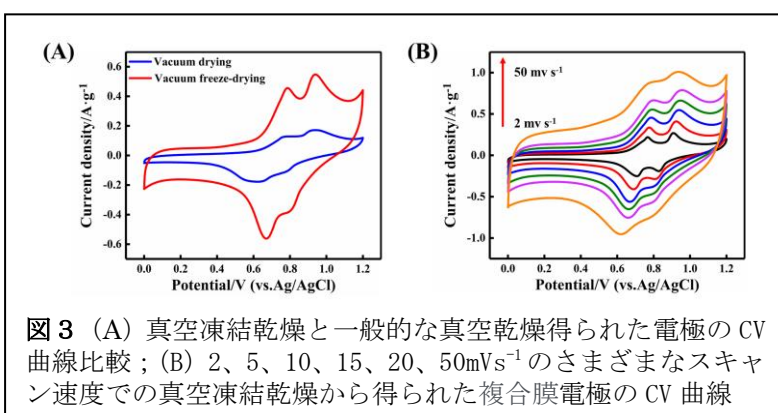


図 3 (A) 真空凍結乾燥と一般的な真空乾燥得られた電極の CV 曲線比較 ; (B) 2、5、10、15、20、 50mVs^{-1} のさまざまなスキャン速度での真空凍結乾燥から得られた複合膜電極の CV 曲線

らからであり、また、スキャン速度の増加に伴い、ボルタモグラムの形状は基本的に変化しなかったが、わずかな歪みがあった。これは、多孔質 λ - MnO_2 /rGO/Ca-alg 複合膜が優れたレート機能と水溶液中での優れた安定性を持っていることを示している。

4. 3 λ - MnO_2 /rGO/アルギン酸カルシウム複合膜の ESIX 特性評価

λ - MnO_2 /rGO/Ca-alg 複合電気活性膜の吸着容量に対する初期 Li^+ イオン濃度の影響は、 -0.6V の吸着電位で推定された。図 4A に示すように、膜の Li^+ イオンの吸着容量は初期濃度の増加とともに改善され、初期濃度が 80mgL^{-1} (ppm) の場合、 Li^+ イオン吸着容量は $32.7\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ に達し、報告されている Li^+ イオン交換材料と比較して高い吸着容量を有することが明らかになった。また、1 時間以内に平衡吸着容量の約 90% に達した。この優れた Li^+ イオン吸着性能は、3D 多孔質構造と ESIX プロセスでの電位応答性イオンポンピング効果により、複合電気活性膜のイオン移動抵抗が低いことに起因すると考えられる。さらに、 λ - MnO_2 /rGO/Ca-alg 複合電気活性膜の脱着性能は 0.9V の酸化電位を印加することにより、 10^{-3}molL^{-1} の LiCl 水溶液を用いて実施した結果、図 4B に示す脱着率曲線の通り、吸着した Li^+ イオンの 91.3% が脱着したことが明らかとなった。ここで、酸化電位が印加されると、 Li^+ イオンが複合膜から溶液に放出され、これは化学再生の過程で二次汚染を伴う酸性溶液への Mn-O 八面体の溶解を効果的に排除できるといえる。 Li^+/Na^+ 及び $\text{Li}^+/\text{Mg}^{2+}$ 分離のため、この複合電気活性膜の選択性は、それぞれ 5mmolL^{-1} の同じ濃度の LiCl 、 NaCl 、および MgCl_2 の混合溶液への競合吸着によって評価され、図 4C に示した通り、複合膜は、 Na^+ または Mg^{2+} イオンの吸着より Li^+ イオンに対して高い選択性を示した。また、 Li^+/Na^+ 及び $\text{Li}^+/\text{Mg}^{2+}$ の計算による分離係数は、それぞれ 32.15 および 23.57 でした。この高い分離係数は、 λ - MnO_2 の Li^+ イオンの選択的認識能力が高く、 λ - MnO_2 の Na^+ および Mg^{2+} よりも Li^+ の拡散エネルギー障壁が低いことに起因すると考えられる。 λ - MnO_2 /rGO/Ca-alg 複合電気活性膜の電気化学的安定性を評価するために、 LiCl 溶液中の複合膜ベースの電極の還元/酸化状態を定期的に調整することによってイオン交換容量を測定し、100 サイクルスキャンでの正規化されたイオン交換容量の変化を図 8D に示す。複合膜の正規化されたイオン交換容量は、100 回の連続サイクル後も初期値の 98.3% に保たれ、この複合膜が高い電気化学的安定性を持っていることを意味している。

4. 4 自己電気エネルギー一回収を備えたりチウムイオン分離回収システムの構築

本研究では、自己電気エネルギー回収というコンセプトに基づいて、混合溶液から LiCl を高効率的に抽出するための ESIX システムも構築した。図 5 に構築したシステムを示し、二つのイオン選択分離できる電極（すなわち、スピネル型 λ - MnO_2 膜電極および $\text{BiOCl}@$ PPy 複合膜電極）を使用して、 Li^+ および Cl^- イオンの埋め込みときに蓄積された電気エネルギーを有効利用し、 Li^+ および Cl^- イオン脱離のために必要なエネルギーを補償する。ここで、 λ - MnO_2 は Li^+ イオンに対して優れた選択性を示し、 $\text{BiOCl}@$ PPy 複合材料は、PPy を BiOCl で覆うことによって調製され、塩素イオンのインプリ

ンティング効果のある PPy シェルは、 Cl^- イオンの選択的イオン輸送経路を提供し、優れた Cl^- イオン選択性吸着能力をもたらしている。また、ESIX システムのエネルギー消費量が十分に検討した他、自己電気エネルギー回収を備えたこのような ESIX システムは、非常に低いエネルギー消費で LiCl を選択的に分離できることが実証された。結果として、本 ESIX システムの LiCl 抽出能力は 10.88 mg/g に達した。また、1.2V の電圧差で LiCl 放出効率率は 93.7% に到達した。特に、0.6V の電圧差で LiCl 1 モルあたりの抽出に消費されるエネルギーは最小値 (1.007Whmol^{-1}) となった。

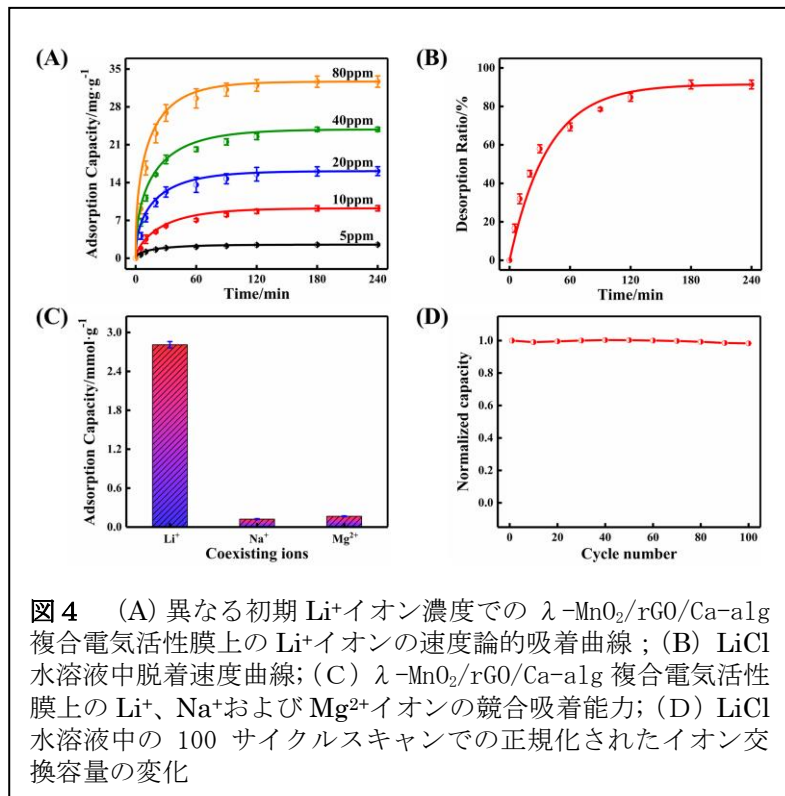


図 4 (A) 異なる初期 Li^+ イオン濃度での λ - MnO_2 /rGO/Ca-alg 複合電気活性膜上の Li^+ イオンの速度論的吸着曲線；(B) LiCl 水溶液中脱着速度曲線；(C) λ - MnO_2 /rGO/Ca-alg 複合電気活性膜上の Li^+ 、 Na^+ および Mg^{2+} イオンの競合吸着能力；(D) LiCl 水溶液中の 100 サイクルスキャンでの正規化されたイオン交換容量の変化

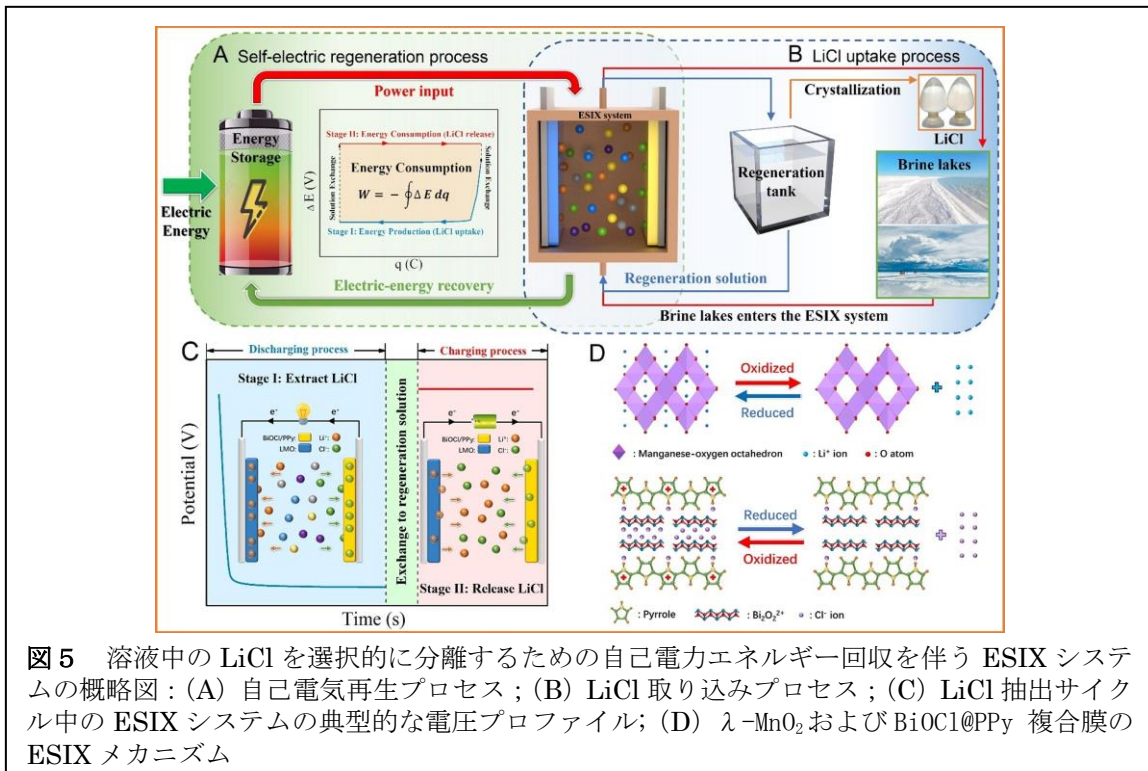


図 5 溶液中の LiCl を選択的に分離するための自己電力エネルギー回収を伴う ESIX システムの概略図：(A) 自己電気再生プロセス；(B) LiCl 取り込みプロセス；(C) LiCl 抽出サイクル中の ESIX システムの典型的な電圧プロファイル；(D) λ - MnO_2 および $\text{BiOCl}@$ PPy 複合膜の ESIX メカニズム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jiajia Wang, Xiyan Yue, Peifen Wang, Tao Yu, Xiao Du, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula, and Guoqing Guan	4. 巻 154
2. 論文標題 Electrochemical technologies for lithium recovery from liquid resources: A review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Renewable and Sustainable Energy Reviews	6. 最初と最後の頁 111813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rser.2021.111813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Xiaoyuan Song, Junjian Niu, Wenjun Yan, Xuan Li, Xiaogang Hao, Guoqing Guan, Zhongde Wang	4. 巻 290
2. 論文標題 An electroactive BiOBr@PPy hybrid film with synergistic effect for electrochemically switched capture of bromine ions from aqueous solutions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 120845
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2022.120845	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Junjian Niu, Wenjun Yan, Xiaoyuan Song, Wangwang Ji, Zhongde Wang, Xiaogang Hao, and Guoqing Guan	4. 巻 274
2. 論文標題 An electrically switched ion exchange system with self-electrical-energy recuperation for efficient and selective LiCl separation from brine lakes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 118995
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2021.118995	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yaqin Rong, Shuai Li, Junjian Niu, Zhongde Wang, Xiaogang Hao, Chengwen Song, Tonghua Wang, Guoqing Guan	4. 巻 274
2. 論文標題 Carbon-based Electroactive Ion Exchange Materials: Ultrahigh Removal Efficiency and Ion Selectivity for Rapid Removal of Cs+ Ions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 119056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2021.119056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jie Wang, Xiao Du, Xiaoqiong Hao, Jinhua Luo, Xiaogang Hao, Qing Cao, Guoqing Guan, Jun Li, Zhong Liu, Yongguo Li, Abuliti Abudula	4. 巻 427
2. 論文標題 A novel photo-assisted electrochemically switched ion exchange technology for selective recovery of bromide ions,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 131693
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2021.131693	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fengfeng Gao, Jian Wang, Mengfang Jiang, Xiao Du, Xuli Ma, Xiaogang Hao, Xiuping Yue, Guoqing Guan	4. 巻 265
2. 論文標題 A novel unipolar pulse potential oscillation system based on HKUST-1(C)@CoAl LDH film for selective separation of dodecyl sulfonate ions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 118488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2021.118488	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jiajia Wang, Xiyan Yue, Peifen Wang, Tao Yu, Xiao Du, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula, and Guoqing Guan	4. 巻 154
2. 論文標題 Electrochemical technologies for lithium recovery from liquid resources: A review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Renewable and Sustainable Energy Reviews	6. 最初と最後の頁 111813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rser.2021.111813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xuefeng Zhang, Jie Wang, Zhonglin Zhang, Xiao Du, Fengfeng Gao, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula, Guoqing Guan, Zhong Liu, and Jun Li	4. 巻 286
2. 論文標題 Modelling of pseudocapacitive ion adsorption of electrochemically switched ion exchange based on electroactive site concentration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 120451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2022.120451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mengfang Jiang, Xuefeng Zhang, Xiao Du, Xiaowei An, Fengfeng Gao, Xiaogang Hao, Guoqing Guan, Zhong Liu, Jun Li, Abuliti Abudula	4. 巻 283
2. 論文標題 An electrochemically induced dual-site adsorption composite film of Ni-MOF derivative/NiCo LDH for selective bromide-ion extraction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 120175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2021.120175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhang Zheng, Du Xiao, Wang Qiang, Gao Fengfeng, Jin Tongtong, Hao Xiaogang, Ma Pengfei, Li Jun, Guan Guoqing	4. 巻 259
2. 論文標題 A scalable three-dimensional porous -MnO ₂ /rGO/Ca-alginate composite electroactive film with potential-responsive ion-pumping effect for selective recovery of lithium ions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 118111 ~ 118111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2020.118111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ma Wenbiao, Du Xiao, Liu Mimi, Gao Fengfeng, Ma Xuli, Li Yongguo, Guan Guoqing, Hao Xiaogang	4. 巻 412
2. 論文標題 A conductive chlorine ion-imprinted polymer threaded in metal-organic frameworks for electrochemically selective separation of chloride ions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 128576 ~ 128576
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2021.128576	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Luo Jinhua, Du Xiao, Gao Fengfeng, Ma Pengfei, Hao Xiaogang, Guan Guoqing, Scialdone Onofrio, Li Jun	4. 巻 259
2. 論文標題 Electrochemically triggered iodide-vacancy BiOI film for selective extraction of iodide ion from aqueous solutions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 118120 ~ 118120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2020.118120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Luo Jinhua, Du Xiao, Gao Fengfeng, Kong Haixia, Hao Xiaogang, Abudula Abuliti, Guan Guoqing, Ma Xuli, Tang Bing	4. 巻 251
2. 論文標題 An electrochemically switchable triiodide-ion-imprinted PPy membrane for highly selective recognition and continuous extraction of iodide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 117312 ~ 117312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2020.117312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Gao Fengfeng, Du Xiao, Hao Xiaogang, Ma Xuli, Chang Lutong, Han Nianchen, Guan Guoqing, Tang Keyong	4. 巻 380
2. 論文標題 A novel electrical double-layer ion transport carbon-based membrane with 3D porous structure: High permselectivity for dilute zinc ion separation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 122413 ~ 122413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2019.122413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Peifen Wang, Junlan Zheng, Xuli Ma, Xiao Du, Fengfeng Gao, Xiaogang Hao, Bing Tang, Abuliti Abudula, Guoqing Guan	4. 巻 185
2. 論文標題 Electroactive magnetic microparticles for the selective elimination of cesium ions in the wastewater	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Research	6. 最初と最後の頁 109474 ~ 109474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.envres.2020.109474	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 官国清、阿布里提、Wang Zhongde、Hao Xiaogang
2. 発表標題 自己電気エネルギー再生を備えたりチウムイオン分離回収システムの構築
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会、岡山大学、2021年9月22-24日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Peifen Wang, Jiajia Wang, Xiao Du, Xiaogang Hao, Akihiro Yoshida, Abuliti Abudula, and Guoqing Guan
2. 発表標題 A novel electroactive PPy/HKUST-1 composite film-coated electrode for the selective recovery of lithium ions with low concentrations in aqueous solutions
3. 学会等名 令和2年度化学系学協会東北大会, 八戸
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Guoqing Guan, Xiao Du, Peifen Wang, Xiaogang Hao, Akihiro Yoshida, Abuliti Abudula
2. 発表標題 Selective electrochemical extraction of low concentration of Li ⁺ ions from aqueous solution
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCCChE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉田 暁弘 (Yoshida Akihiro) (30514434)	弘前大学・地域戦略研究所・准教授 (11101)	
研究分担者	阿布 里提 (Abudula Abuliti) (70565374)	弘前大学・理工学研究科・教授 (11101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	太原理工大学			