様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６年　６月２８日現在

機関番号：１５５０１
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：２１Ｈ０４９４２

研究課題名（和文）塩分濃度差発電用新規高効率・高安定性エネルギー変換システムの開発

研究課題名（英文）Development of a novel high-efficiency, high-stability energy conversion system for salinity gradient power generation

研究代表者
比嘉　充（Higa, Mitsuru）

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：３０２４１２５１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　33,000,000円

研究成果の概要（和文）：イミダゾール側鎖をもつパリレン薄膜と、高分子電解質に適した紡糸法である溶液ブロー紡糸法を用いてイオン交換ナノファイバーの開発を行った。これらにより逆電気透析（RED）用の超低抵抗膜を作製する見通しを得た。また数値流体解析技術を用いてイオン交換膜の最適な凹凸構造を計算し、平膜状イオン交換膜よりプロファイル（ＰＦ）膜を作製した。このPF膜を使用したスタックは、平膜より44%高い出力密度が得られた。酵素とNaClなどの洗浄方法を組み合わせることでバイオフォルムの除去に有効なＲＥＤ用洗浄方法を開発した。また種々の工業排水を利用したＲＥＤ特性を評価した結果、グロス出力密度2.3 W/m2が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
塩分濃度差エネルギー（SGE）は、海水1 m3と淡水1 m3の混合で約500 Whのエネルギーが発生する。このSGE変換技術である逆電気透析（RED）発電は、海水と淡水をRED装置に供給するだけで発電する非常にシンプルで安全な発電方法である。RED発電は国内エネルギーの再エネ化率、エネルギー自給率の向上に大きく貢献できる。またRED発電はほぼ100%の高稼働率を有し、再エネ型ベースロード電源になり得る。さらにRED発電は風力発電の約1/200、太陽光発電の約1/50の設置面積で同等の発電出力が得られ、地下設置も可能であることから都市近郊での事業展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed ion-exchange nanofibers using a parylene thin film with imidazole side chains and the solution blow spinning method, which is a spinning method suitable for polymer electrolytes. These have provided the prospect of producing ultra-low resistance membranes for reverse electrodialysis (RED). We also calculated the optimal uneven structure of the ion-exchange membrane using computational fluid analysis technology, and produced profiled (PF) membranes from flat ion-exchange membranes. A stack using this PF membrane achieved 44% higher power density than that of flat membranes. We developed a cleaning method for RED that is effective in removing bioforms by combining enzymes and cleaning methods such as NaCl. We also evaluated the characteristics of RED using various industrial wastewater, and obtained a gross power density of 2.3 W/m2.

研究分野：機能性高分子材料

キーワード：イオン交換膜　塩分濃度差エネルギー　逆電気透析発電　再生可能エネルギー

※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。

１．研究開始当初の背景

．(1)濃度差発電の原理と利点:再生可能エネルギーのひとつに海水と淡水の濃度差エネルギー（SGE）を電気エネルギーに変換する濃度差発電があり（図１），海水 1 m^3 と淡水 1 m^3 の混合で約 500 Wh のエネルギーが発生する. 全世界の SGE の潜在量は世界中の水力発電量（800GW）より多い 980GW との試算が報告されている [1]. 濃度差発電は海水と淡水の供給だけで発電するためほぼ 100%の高稼働率を有し，再エネ型ベースロード電源になり得る。この濃度差発電には半透膜を用いる浸透圧発電（PRO）と，イオン交換膜を用いる RED 発電があるが海水レベルの塩水濃度では RED の優位性が高いと報告されている [2]. この RED 発電の原理は図２に示すように RED 装置内のアニオン交換膜(AEM)とカチオン交換膜(CEM)の間に海水と淡水を流すと，イオンは濃度差により海水側から淡水側に移動するが，AEM は陰イオン，CEM は陽イオンだけを通すため陽イオンは右側，陰イオンは左側に拡散して起電力が発生する. RED は海水と淡水を流すだけで発電するため，その稼働率はほぼ 100%であり，また RED 発電は風力発電の約 1/200，太陽光発電の約 1/50 の設置面積で同等の発電出力が得られ [3]，地下設置も可能であることから都市近郊での事業展開が期待できる.

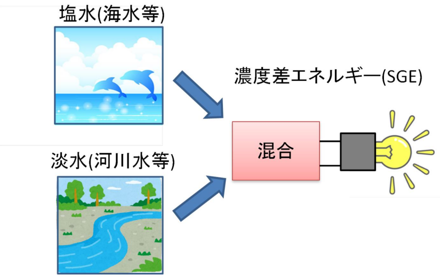

図１ 濃度差発電の概念図

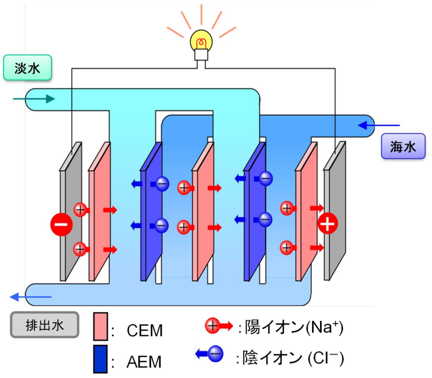

図２ RED 発電の原理図

２．研究の目的

REDstack 社がオランダの Afsluitdijk に建設した 50kW 出力規模のパイロットプラントなどの研究開発において淡水側流路の抵抗が最もスタック内部抵抗を高める原因であり，流路幅を狭めることで流路抵抗は減少するが，一方，淡水に含まれる汚染物質による流路の閉塞が生じて，出力が大幅に低下するという報告がある [4]. そのため RED 発電の実用化には (1)高変換効率・高安定性の SGE 変換ユニットの開発, (2)流路汚染を防ぐための低消費エネルギー前処理システム, (3)新規洗浄方法の開発, (4)RED 発電システムの運転条件の最適化が必要とされている.

研究代表者はこれまで長年に渡り RED 発電用膜とそれを用いた RED 発電スタックの研究を行ってきた. これらの研究成果から上記の問題を解決し，実用的な RED 発電システムの構築が可能であるとの着想に至った.この研究では RED 発電の実用化に必要な以下の技術項目：(1)高効率で長期間安定に SGE を電気エネルギーに変換する SGE 変換ユニット，(2)RED 用前処理装置， (3)新規 RED 用洗浄法を開発する. そして RED 発電システムの本格的な実用化において必要な RED 用パワーラインコンディショナ (power conditioning system: PCS)を開発し，種々の塩水における RED 発電評価を行う. これらより RED 発電システムの実用化技術を確立することが本研究の目的である.

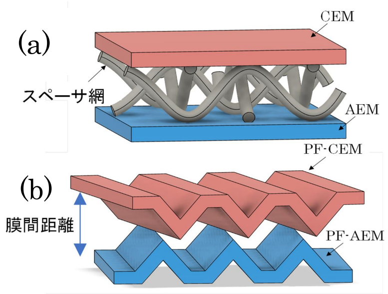

図３ (a) 平膜とスペーサ網で構成したセル、(b)PF 膜で構成したセル

３．研究の方法

(1)高効率・高安定 SGE 変換ユニット：高効率 SGE 変換に必要な超低抵抗膜を作製するために，①新規なイミダゾールを持つシクロファンモノマーを合成し，水溶性フィルム上に化学気相成長によって正電荷を持つパリレン薄膜を成膜した. その後，不織布や限外濾過膜上にパリレン薄膜を転写し，得られた複合膜の選択透過を調査した. ②高分子電解質に適した紡糸法である溶液ブロー紡糸法を用いてイオン交換ナノファイバー（IE-NF）を作製し，熱プレス処理を行うことで IE-NF シート作製した.③従来から使われてきた平膜(図３

(a)) とは異なり，膜表面に凹凸構造を有することで(図 3 (b))，流路部電気抵抗の増加の原因となる非伝導性のスペーサー網が不要なプロファイル(PF)膜は高効率 SGE 変換が期待される．そこで PF 膜構造を有する流路において，数値流体解析技術を用いてイオン交換膜間の流路における流体の挙動および塩分濃度の拡散現象を計算した．④③の結果を参考にして Fumasep® FAS-20，FKS-20 を原膜として金型を用いてプレスすることで作製し，平膜と PF 膜のスタックの RED 発電特性を比較した．

(2)RED 用前処理装置：RED スタックの目詰まりの原因となる濁質成分，溶存有機物の除去を目的として，長崎県西部下水処理場において下水処理水には高速繊維ろ過装置とカートリッジフィルター（CF）を，海水には CF を用いて前処理することで RED 発電特性の評価を行い，下水処理水側の圧力損失の評価を行った．

(3)膜汚染機構の解明とその対策：RED スタックの洗浄条件の効果を効率的に評価するために，96 ウエルプレート内に微生物懸濁液を添加し，２４時間培養してバイオフィルムを形成させた．その後，ウェル内の培養液を除去し，酵素水溶液，界面活性剤水溶液，NaCl 水溶液をそれぞれ別のウェルへ添加し，35℃で所定時間静置した．そして，洗浄後に残存しているバイオフィルムをクリスタルバイオレット法で定量した．

(4)RED 発電システムの構築と発電特性評価： RED 発電システムの本格的な実用化において RED 用系統連携技術の開発が必要不可欠である．RED は，風力発電や PV 発電と異なり，海水および河川水を使用するため電力系統と電気的な絶縁がされていない．そこで太陽電池 (photovoltaic: PV) 用発電システムで使われているパワーラインコンディショナ (power conditioning system: PCS) と同様な機能を有し，DC リンクに絶縁機能を有した RED に適用可能な PCS を開発する．

また RED 発電特性評価においては 3 タイプの RED スタックを使用した：(I)自作 IEM 評価用ラボスタック（有効膜サイズ 5 cm×6 cm)，(II) RED IEM 評価用小型スタック（有効膜サイズ 8 cm×11 cm)，(III) 実証試験用大型スタック（有効膜サイズ 30 cm×50 cm)．セル対数は 10 対～300 対，膜間距離は 180 μm，360 μm を用いた. 使用する膜は標準市販 IEM 膜（アストム社製, Fumatech 社製），新規開発低抵抗膜（アストム社製）を使用した. 使用塩水は高濃度側塩水として模擬濃縮海水（MBR: 90 mS/cm NaCl 溶液），模擬海水（MSW: 50 mS/cm NaCl 溶液），工場廃水 A（伝導度 54 mS/cm）,工場廃水 B（伝導度 190 mS/cm）実海水（SW：長崎,沖縄,約 50 mS/cm）を使用した. また低濃度側塩水として模擬河川水（MRW: 種々の伝導度の NaCl 溶液），工場廃水 C（伝導度 7.6 mS/cm）,実下水処理水（STW：長崎）,実表流水（RW：沖縄）を使用した. これらを用いて以下の RED 性能評価実験を行った. ①ラボスタックを使用し，プロファイル（PF）膜と平膜の発電性能を比較[5] した. ②ラボスタックに工場廃水を供給し発電性能を評価[6] を行った. ③小型スタックを使用し，様々なイオン交換膜の発電性能比を比較[7] した.

４．研究成果

(1)高効率・高安定 SGE 変換ユニット：①正電荷となるイミダゾール側鎖をもつパリレン薄膜（膜厚 10-150nm）の成膜に成功した（図 4）．さらに，イミダゾール側鎖の金属イオン配位能を用い，ナノ空間をもつ有機金属構造体との複合化を行なったところ，正電荷による選択性とともにナノ空間内への取り込みを付与した分離膜となることを見出した[8]．この成果により，カルボン酸をもつ負電荷性パリレン膜とともに，CVD 法によるイオン交換パリレン薄膜形成手法を確立することができた．また，成膜サイズの拡大を A4 サイズに拡大することに成功し，塩分濃度発電用薄膜部材への可能性を示すことができた．

②熱プレス処理後のIE-NF膜の走査型電子顕微鏡（SEM）写真とIE-NFの小角X線散乱（SAXS）パターンを図 5 に示す. NF作製時の延伸効果によって，イオン伝導率は同一高分子電解質材料から作製した膜と比較して最大で3倍程度向上した[9].

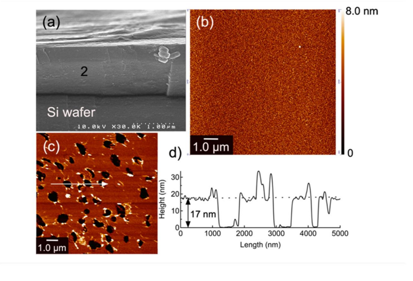

図４ (a) CVD 法によって成膜したパリレン膜、(b) 膜厚 17nm のパリレン膜表面の AFM 観察 (c &d) 超音波での欠陥形成による膜厚計測

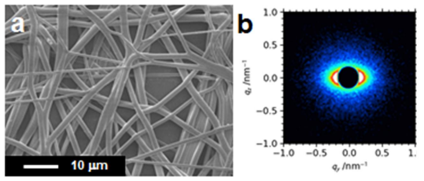

図５ 熱プレス処理後の (a) IE-NF 膜の SEM 像と (b) IE-NF の SAXS パターン

③図６に示す計算結果より，プロファイル膜を使用することで，約70%のエネルギーロスの削減が可能であることが明らかになった．また，スペーサー流路では濃度分極現象が発生する一方で，プロファイル流路では濃度分布の均一性が改善され，発電効率の向上につながることが示唆された．

④図７(a)に作製した PF 膜の表面画像を示す．気泡が見えることからこの膜の裏側に凹構造があることが分かる [10]．また図７(b)に PF 膜先端部のレーザー顕微鏡画像を示す．この画像より形状を測定した結果，約 100μm 高さの凸構造かイオン交換膜上に形成していることが判明した．また半年以上塩水に浸漬させてもこの構造が安定に保持されていることが判明した．

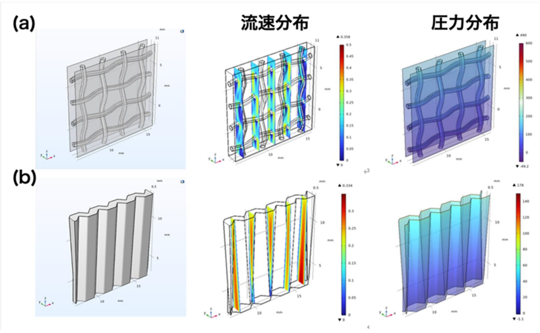

図６　CFD によるセルの流路内部の流れ解析結果 (a)スペーサ網を用いた流路 (b) プロファイル膜を用いた流路

(2)RED 用前処理装置：長崎県西部下水処理場から放出される下水処理水とその近くの海水を用いて RED 発電試験を行った．高速砂ろ過装置を使った結果では約 20kPa の圧損で，安定に RED 発電が行える水質が得られた．この結果より，従来の砂ろ過装置と比較して，約 4 倍高い処理水量が得られることが判明した．

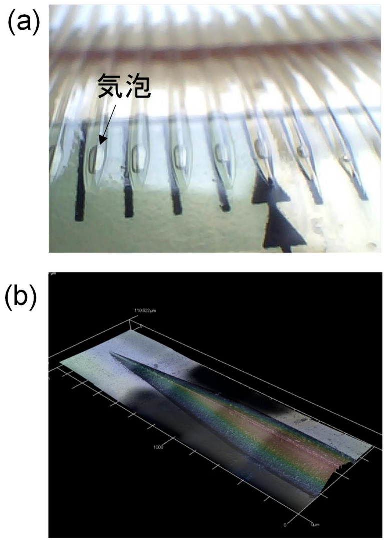

図７ (a)作製した PF 膜の光学顕微鏡画像、(b)PF 膜の凸構造の先端のレーザー顕微鏡画像

(3)膜汚染機構の解明とその対策

　酵素としてはプロテアーゼ（タンパク質分解酵素），リパーゼ（脂質分解酵素），セルラーゼ（糖鎖分解酵素）を用いた．すべての酵素において洗浄効果が確認されたが，特にプロテアーゼにおいて約 80%の高い洗浄効果が見られた．これは，タンパク質がバイオフィルムの主成分であることに加え特にバイオフィルムの構造維持，付着に大きく関わっているためだと考えられた．しかし，酵素だけでは除去できないものが存在していることが確認された．また，酵素洗浄はコストもかかることから高濃度の使用は難しいと考えられた．そこで他の洗浄液と組み合わせて低濃度のプロテアーゼで処理できないかを検討した．プロテアーゼによる洗浄の前処理として NaCl，サーファクチンによる洗浄を行った．それぞれの洗浄液を単独で使用した場合と比べ，バイオフィルムの除去率向上が確認された（図８）．これらの結果から，温和な環境でバイオフィルムを除去する方法として２段階洗浄が有効であることが示された．

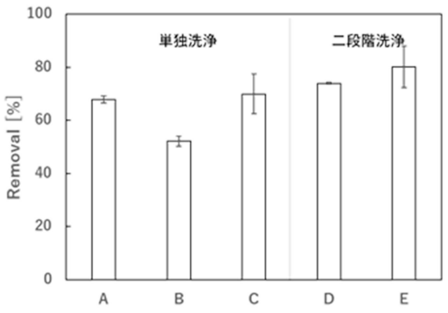

図８　２段階洗浄によるバイオフィルム除去効果

(A) 1.0×10⁻³ U/ml Protease, (B) 1.2 mol/L NaCl, (C) 1.0 wt% Sodium Surfactin, (D) 1.2 mol/L NaCl / 1.0×10⁻³ U/ml Protease, (E) 1.0 wt% Sodium Surfactin / 1.0×10⁻³ U/ml Protease

(4)RED 発電システムの構築と発電特性評価：

図９に，構築した RED シミュレータの P-V 特性を示す．この図より，RED の出力電圧を 120 Vdc に一定すればよいことが判明した．そこで，Q_D を用いて RED 出力電圧を一定とし MPPT を実現した．図１０に PCS の連系結果のシミュレーション波形を示す．RED の出力電圧は 120 Vdc に制御されており，MPPT が実現できている．また，v_T と i_S の位相が反対となっており，RED の発

電電力が系統側へ逆潮流されていることが確認できる[2]．また実験装置を構築し実験による検討の結果，汎用直流電源と PC を USB 接続し，Python を用いて制御し，図９ と一致した P-V 特性が実現できることを明らかにした．さらに，Q_D による MPPT 動作実現も確認した．

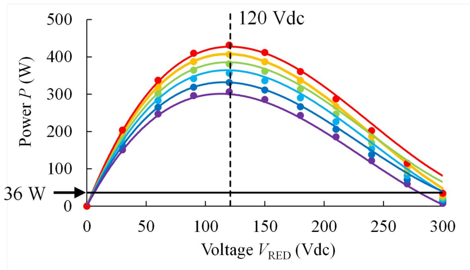

図９ RED シミュレータの P-V 特性

①ラボスタックにおいて，平膜と PF 膜の RED 発電性能を比較した結果，PF 膜を用いた場合，平膜より 1.4 倍高いグロス出力密度 1.4 W/m² が得られた（図１１）[1]．今回作製した PF 膜は従来の PF 膜と異なり，膜の両面に凹凸構造が存在する．そのため，スペーサーが存在しない低濃度流路だけでなく，スペーサーが存在する高濃度流路においても圧損の低下が確認された．

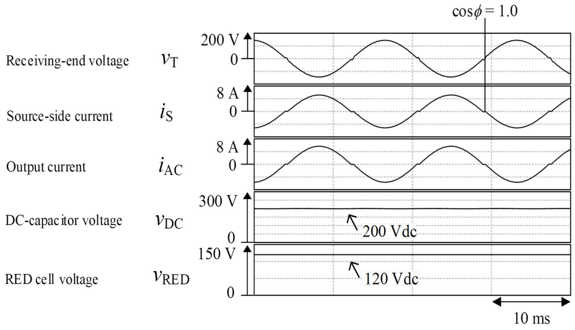

図１０ 図１の PCS の連系結果

②ラボスタックにおいて，工場廃水 A と C を供給した場合グロス出力密度 0.48 W/m²，工場廃水 B と C を供給した場合グロス出力密度 2.3 W/m² が得られた[6]．

③小型スタックにおいて，様々なイオン交換膜の発電性能を比較した結果，低抵抗膜を使用した場合に最も大きな出力密度が得られることを見出した[7]

これらの結果から総膜面積：10,800 m² で出力約40 kWのREDモジュールが得られることが試算された．

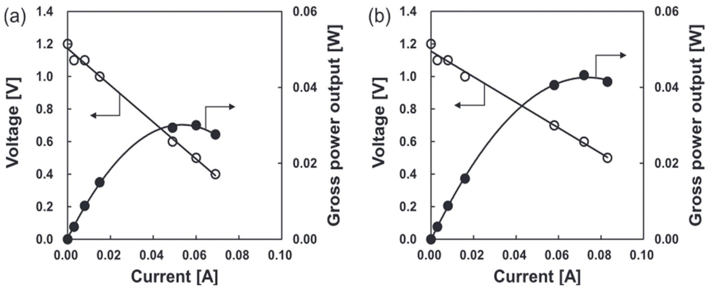

図１１．(a)平膜と(b)PF 膜を使用した RED スタックにおける電圧-電流曲線

このREDモジュールを一例として海岸沿いの水力発電所（(207万 m³/日 排水量）に設置した場合，太陽光発電（メガソーラー：1,000 kW；稼働率13%と仮定）の約118か所分に相当する年間電力量が，約2か所分の設置面積で得られると試算される．これより，高稼働率でベースロード電源としての稼働が可能であり，また低設置面積で地下設置も可能なRED発電は，再生可能エネルギーの１つとして我が国のエネルギー自給率を高めることに貢献することが期待される．

参考文献

1) B.E. Logan and M. Elimelech, *Nature*, **488**, 313 (2012)
2) J.W. Post, J. Veerman, H. V.M. Hamelers, G. J. W. Euverink, S. J. Metz, K. Nymeijer, C. J. N. Buisman, *J. Membr. Sci.*, **288**, 218 (2007)
3) 経済産業省資源エネルギー庁 HP https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/nuclearcost.html を参考に試算
4) D. A. Vermaas, D. Kunteng, M. Saakes, K. Nijmeijer, *Water Research,* **47**, 1289-1298, (2013)
5) M. Tanaka, Y. Sugimoto, M. Higa, *Salt and Seawater Sci. & Tech*, **4**, 22-23 (2024)
6) H. Kawasaki, R. Ujike, Y. Kawabata, Y. Kakihana, M. Higa, *Salt and Seawater Sci. & Tech*, **2**, 29-30 (2022)
7) Y. Sugimoto, R. Ujike, M. Higa, Y. Kakihana, M. Higa, *Membranes*, **12**, 1141 (2022)
8) S. Yoshida, T. Shii, Y. Kitazawa, M. L. Kim, E. H. Otal, Y. Hattori, M. Kimura, *Polymers*, **15**, 3309, (2023)
9) S. Onuki, Y. Kawai, H. Masunaga, N. Ohta, R. Kikuchi, M. Ashizawa, Y. Nabae, H. Matsumoto, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 10682-10691 (2024)
10) 比嘉　充, JPN2019-201239; JPN019-201241

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計19件（うち査読付論文　18件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　10件）

1．著者名 Sugimoto Yu、Ujike Ryo、Higa Minato、Kakihana Yuriko、Higa Mitsuru	4．巻 12
2．論文標題 Power Generation Performance of Reverse Electrodialysis (RED) Using Various Ion Exchange Membranes and Power Output Prediction for a Large RED Stack	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Membranes	6．最初と最後の頁 1141～1141
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/membranes12111141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 通阪 栄一	4．巻 76
2．論文標題 バイオフィルムの評価と形成抑制・洗浄技術	5．発行年 2022年
3．雑誌名 日本海水学会誌	6．最初と最後の頁 163～169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/swsj.76.3_163	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Ryo Ujike,Minato Higa,Yoshihiro Kawabata,Yuriko Kakihana,Mitsuru Higa	4．巻 2
2．論文標題 Evaluation of Power Generation Performance in a Small Stack Using Various Ion Exchange Membranes in Reverse Electrodialysis (RED)	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	6．最初と最後の頁 48-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.2.0_48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Minato Higa,Toru Uchimura,Masahiro Yasukawa,Yuriko Kakihana,Mitsuru Higa	4．巻 2
2．論文標題 Fabrication of PVA-based Ion Exchange Membrane for Reverse Electrodialysis Power Generation and Its Characteristic Evaluation	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	6．最初と最後の頁 46-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.2.0_46	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Keiko Komuta,Yuriko Kakihana,Mitsuru Higa	４．巻 2
２．論文標題 Evaluation of Donnan Dialysis Using a Cation Exchange Membrane Made of Sulfonated Polyether Sulfone	５．発行年 2022年
３．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	６．最初と最後の頁 37-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.2.0_37	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Hiroki Kawasaki,Ryo Ujike,Yoshihiro Kawabata,Yuriko Kakihana,Mitsuru Higa	４．巻 2
２．論文標題 Power Generation by Reverse Electrodialysis System Using Industrial Salty Wastewater in a Production Process for Magnesium Compounds from Seawater	５．発行年 2022年
３．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	６．最初と最後の頁 29-30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.2.0_29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Ryoya Itoshiro, Naoko Yoshida, Toshiyuki Yagi , Yuriko Kakihana, Mitsuru Higa	４．巻 12
２．論文標題 Effect of Ion Selectivity on Current Production in Sewage Microbial Fuel Cell Separators	５．発行年 2022年
３．雑誌名 Membranes	６．最初と最後の頁 183
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/membranes12020183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Eugenio H. Otal, Manuela, L. Kim, Juan P. Hinestroza, Mutsumi Kimura	４．巻 11
２．論文標題 A solid-state pathway towards the tunable carboxylation of cellulosic fabrics	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Membranes	６．最初と最後の頁 514
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/membranes11070514 (2021)	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Jiang, F., Liu, H., Chen, X., & Tsuji, T	4．巻 11
2．論文標題 A coupled LBM-DEM method for simulating the multiphase fluid-solid interaction problem.	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Journal of Computational Physics	6．最初と最後の頁 963
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcp.2022.110963	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 －

1．著者名 Shaoling Zhang, Akihiko Tanioka, Hidetoshi Matsumoto	4．巻 11
2．論文標題 De Novo Ion-Exchange Membranes Based on Nanofibers	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Membranes	6．最初と最後の頁 652
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/membranes11090652	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Masahiro Shinkawa, Kazunori Motai, Keita Eguchi, Wataru Takarada, Minoru Ashizawa, Hiroyasu Masunaga, Noboru Ohta, Yuhei Hayamizu, Hidetoshi Matsumoto	4．巻 11
2．論文標題 Preparation of Perfluorosulfonated Ionomer Nanofibers by Solution Blow Spinning	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Membranes	6．最初と最後の頁 389
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/membranes11060389	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 松本英俊	4．巻 95
2．論文標題 ナノファイバー材料の機能設計と環境・エネルギー分野への応用	5．発行年 2022年
3．雑誌名 日本ゴム協会誌	6．最初と最後の頁 124-131
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2324/gomu.95.124	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 －

１．著者名 E. Toorisaka, D. Yamamoto	４．巻 70
２．論文標題 Development of a spontaneous emulsifying technique using porous microparticles with water-soluble polymers	５．発行年 2021年
３．雑誌名 J. Oleo Sci.	６．最初と最後の頁 1103-1107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5650/jos.ess21096	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 －

１．著者名 Suzuki, T.; Kakihana, Y.; Higa, M	４．巻 1
２．論文標題 Recovery of salinity gradient energy by reverse electrodialysis (RED): Principle, recent developments, and challenges for commercialization	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	６．最初と最後の頁 46-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.1.0_46	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 －

１．著者名 Suzuki, T.; Tamenishi, T.; Niinae, M	４．巻 1
２．論文標題 Influence of ions contained in seawater on the desorption of manganese(II) from contaminated montmorillonite	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	６．最初と最後の頁 74-75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.1.0_74	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 －

１．著者名 Suzuki, T.; Morotomi, H.; Abe, M.; Niinae, M	４．巻 1
２．論文標題 Highly efficient and irreversible adsorption of Sr(II) from brackish water using layered titanate	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	６．最初と最後の頁 76-77
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.1.0_76	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 －

1．著者名 Suzuki, T.; Abe, M.; Yamasaki, H.; Niinae, M.	4．巻 1
2．論文標題 Immobilization of fluoride in kaolinite and montmorillonite by the addition of magnesium oxide	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Salt and Seawater Science & Technology	6．最初と最後の頁 78-79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11457/ssst.1.0_78	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 －

1．著者名 Suzuki, T.; Yamate, T.; Hara, J.; Wada, K.; Niinae, M.	4．巻 9
2．論文標題 Inactivation of bacteria using Fe3+-loaded montmorillonite.	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Journal of Environmental Chemical Engineering	6．最初と最後の頁 105637
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jece.2021.105637	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 －

1．著者名 Suzuki, T.; Harada, M.; Wada, Y.; Ichimura, S.	4．巻 9
2．論文標題 Enhancement of solute removal efficiency of polyamide reverse osmosis membrane without water permeability loss.	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Journal of Environmental Chemical Engineering	6．最初と最後の頁 106818
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jece.2021.106818	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 －

〔学会発表〕　計25件（うち招待講演　3件／うち国際学会　9件）

1．発表者名 田中愛都、川﨑大輝、氏家瞭、杉本悠、垣花百合子、比嘉充
2．発表標題 新規凹凸構造膜を用いた逆電気透析発電システムでの発電特性評価
3．学会等名 2022年度日本海水学会第73年会
4．発表年 2022年

１．発表者名
川﨑大輝、川畑良拓、比嘉充

２．発表標題
海水からマグネシウム化合物を製造する工程の排水を用いた大型逆電気透析発電システムのエネルギー解析

３．学会等名
日本膜学会第44年会

４．発表年
2022年

１．発表者名
杉本悠、氏家瞭、比嘉南斗、垣花百合子、比嘉充

２．発表標題
膜特性の異なるイオン交換膜を用いた逆電気透析発電装置の発電評価と解析

３．学会等名
日本膜学会第44年会

４．発表年
2022年

１．発表者名
田中愛都、氏家瞭、川﨑大輝、杉本悠、垣花百合子、比嘉充

２．発表標題
新規凹凸構造イオン交換膜を用いた逆電気透析発電システムにおける発電特性評価

３．学会等名
第71回高分子討論会

４．発表年
2022年

１．発表者名
杉本悠、氏家瞭、比嘉南斗、垣花百合子、比嘉充

２．発表標題
種々のイオン交換膜を用いた逆電気透析発電装置の発電特性解析

３．学会等名
第71回高分子討論会

４．発表年
2022年

１．発表者名 比嘉充、杉本悠、垣花百合子、比嘉南斗
２．発表標題 電気透析/逆電気透析を用いた大規模電力貯蔵システムの検討
３．学会等名 第71回高分子討論会
４．発表年 2022年

１．発表者名 Tanaka Manato, Saito Soma, Sugimoto Yu, Higa Mitsuru
２．発表標題 Evaluation of power generation characteristics in reverse electrodialysis power generation using novel profiled ion-exchange membranes
３．学会等名 EuroMembrane2022（国際学会）
４．発表年 2022年

１．発表者名 Kawasaki Hiroki, Shimogouchi Yuki, Saito Soma, Sugimoto Yu, Higa Mitsuru
２．発表標題 Estimation of power generation of pilot-scale reverse electrodialysis (RED) based on performance of prototype RED stack
３．学会等名 EuroMembrane2022（国際学会）
４．発表年 2022年

１．発表者名 Sugimoto Yu, Ujike Ryo, Higa Minato, Kakihana Yuriko, Higa Mitsuru
２．発表標題 Evaluation of power generation performance of reverse electrodialysis using ion exchange membranes with different properties
３．学会等名 EuroMembrane2022（国際学会）
４．発表年 2022年

１．発表者名
Higa Mitsuru

２．発表標題
Ion-exchange membranes for electrodialysis, reverse electrodialysis and piezo dialysis

３．学会等名
EuroMembrane2022（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
下河内悠希、田中愛都、川﨑大輝、杉本悠、垣花百合子、比嘉充

２．発表標題
大型逆電気透析発電における模擬海水及び河川水を用いた発電特性評価

３．学会等名
第37回中国四国地区高分子若手研究会

４．発表年
2022年

１．発表者名
下河内悠希、川﨑大輝、杉本悠、垣花百合子、比嘉充

２．発表標題
逆電気透析発電の大型化における出力性能の解析

３．学会等名
日本海水学会若手会　第14回学生研究発表会

４．発表年
2023年

１．発表者名
島袋佑真、角賢介、奥村哲也、林秀千人、比嘉充

２．発表標題
逆電気透析発電装置における圧力損失に及ぼす流路形状の影響

３．学会等名
日本膜学会第44年会

４．発表年
2022年

１．発表者名
H. Matsumoto, F. Seino, M. Ashizawa, Y. Kakihana, M. Higa

２．発表標題
Polyelectrolyte membranes composited with electrospun ion-exchange nanofibers

３．学会等名
The Society of Chemical Industry Conference on Ion Exchange (IEX2022) - A Vision for the Future（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
大貫秀太、 川合祥紀、 芦沢実、 松本英俊

２．発表標題
パーフルオロスルホン酸アイオノマーナノファイバーを用いた複合電解質膜の作製と評価

３．学会等名
2022年繊維学会秋季研究発表会

４．発表年
2022年

１．発表者名
松本英俊、 佐伯章斗、 張紹玲、 芦沢実、 田中佑一郎、 林靖彦

２．発表標題
垂直配向カーボンナノチューブを輸送チャネルとする高分子複合膜の作製と評価

３．学会等名
2022年繊維学会秋季研究発表会

４．発表年
2022年

１．発表者名
Ryota Hatate, Yuriko Kakihana, Hiroaki Yamada, Mitsuru Higa, and Toshihiko Tanaka

２．発表標題
An RED Cell Simulator Using a General-Purpose DC Power Supply With Python

３．学会等名
The 10th International Conference of Innovative Application Research and Education（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
旗手凌太、垣花百合子、山田洋明、比嘉充、田中俊彦

２．発表標題
MPPT 制御を適用した逆電気透析塩分濃度差発電シミュレータ

３．学会等名
令和 5 年電気学会全国大会

４．発表年
2023年

１．発表者名
比嘉　充

２．発表標題
逆電気透析(RED)技術による海水からの発電・水素製造

３．学会等名
第43回高分子と水・分離に関する研究会講座（招待講演）

４．発表年
2021年

１．発表者名
比嘉 充、氏家 瞭、川﨑大輝、垣花百合子

２．発表標題
逆電気透析（RED）水素システムにおける高エネルギー変換効率の検討

３．学会等名
第70回高分子討論会

４．発表年
2021年

１．発表者名
比嘉　充

２．発表標題
逆電気透析(RED)技術の開発状況と展望

３．学会等名
第37回2021ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム

４．発表年
2021年

１．発表者名
比嘉　充

２．発表標題
逆電気透析(RED)技術による海水からの発電・水素製造と山口大学ﾌﾞﾙｰｴﾅｼﾞｰｾﾝﾀｰの紹介

３．学会等名
JDAフォーラム 2021（招待講演）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Mitsuru Higa

２．発表標題
Power generation performance of a pilot-scale reverse electrodialysis (RED) stack using SWRO brine/seawater and fresh water

３．学会等名
MRM2021 Materials Research Meeting（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Ryota Hatate, Yuriko Kakihana, Hiroaki Yamada, Mitsuru Higa and Toshihiko Tanaka

２．発表標題
Reverse Electrodialysis Cell Model and Its Grid-Connection With Isolated SEPIC

３．学会等名
Proceedings of the 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Ryota Hatate, Yuriko Kakihana, Hiroaki Yamada, Mitsuru Higa and Toshihiko Tanaka

２．発表標題
Development of Reverse Electrodialysis Cell Simulator Using a General-Purpose DC Power Supply With Python

３．学会等名
Proceeding of the Innovative Application Research and Education (ICIARE2021)（国際学会）

４．発表年
2021年

〔図書〕　計2件

1．著者名	4．発行年
比嘉充、遠藤成輝、岡崎慎司、岡田佳巳、沖本真也、花田信子、貝應大介、鎌田博之、官国清、関和彦、岩田光由、吉野正人、宮西将史、宮﨑洋、古山通久、古川森也、高野俊夫、佐藤剛史、佐藤豊人、坂田興、阪井敦、他39名	2022年
2．出版社	5．総ページ数
技術情報協会	603
3．書名	
水素の製造とその輸送,貯蔵,利用技術 (塩分濃度差を利用した水素製造技術, p.201-p.210)	

1．著者名	4．発行年
S. Zhang、 H. Matsumoto	2022年
2．出版社	5．総ページ数
Elsevier	662
3．書名	
Electrospun and Nanofibrous Membranes 1st Edition: Principles and Applications (Chapter 17: Electrospun ion-exchange membranes, p.445-p.469)	

〔出願〕　計5件

産業財産権の名称	発明者	権利者
イオン交換膜、イオン交換膜の製造方法及びイオン交換膜セル	比嘉　充	山口大学
産業財産権の種類、番号	**出願年**	**国内・外国の別**
特許、2022-076133	2022年	国内

産業財産権の名称	発明者	権利者
イオン交換膜、イオン交換膜の製造方法及びイオン交換膜セル	比嘉　充	山口大学
産業財産権の種類、番号	**出願年**	**国内・外国の別**
特許、2022-075997	2022年	国内

産業財産権の名称	発明者	権利者
イオン交換膜セル及びガスケット	比嘉　充	山口大学
産業財産権の種類、番号	**出願年**	**国内・外国の別**
特許、2022-180515	2022年	国内

産業財産権の名称	発明者	権利者
イオン交換膜及びイオン交換膜セル	比嘉　充	国立大学法人山口大学
産業財産権の種類、番号	**出願年**	**国内・外国の別**
特許、2021-078122	2021年	国内

産業財産権の名称	発明者	権利者
イオン交換膜、イオン交換膜の製造及びイオン交換膜セル	比嘉　充	国立大学法人山口大学
産業財産権の種類、番号	**出願年**	**国内・外国の別**
特許、2021-078148	2021年	国内

〔取得〕　計0件

〔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	田中　俊彦 (Tanaka Toshihiko) (00179772)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授 (15501)	
研究分担者	奥村　哲也 (Okumura Tetsuya) (10380817)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	
研究分担者	杉本　悠 (Sugimoto Yu) (30848841)	山口大学・大学院創成科学研究科・助教 (15501)	
研究分担者	松本　英俊 (Matumoto Hidetosi) (40345393)	東京工業大学・物質理工学院・教授 (12608)	
研究分担者	通阪　栄一 (Torisaka Eiichi) (40363543)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	
研究分担者	木村　睦 (Kimura Mutsumi) (60273075)	信州大学・学術研究院繊維学系・教授 (13601)	
研究分担者	Ｊｉａｎｇ　Ｆｅｉ (Jiang Fei) (60734358)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	

６．研究組織（つづき）

	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	垣花　百合子 (Kakihana Yuriko) (90592014)	山口大学・大学院創成科学研究科・学術研究員 (15501)	
研究分担者	鈴木　祐麻 (Suzuki Tasuma) (00577489)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	鹿島建設に異動（2022年4月1日）

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