

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H01796

研究課題名(和文) 海水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 new energy conversion system with high efficiency and high stability using seawater salinity gradient

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) 32,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではRED発電の実用化を目指して、SGE変換セルの高効率化と大型化、REDシステムの長期安定運転に不可欠なRED前処理装置の開発や洗浄法の検討、及び種々の塩水を用いたRED発電システムの最適運転条件の確立を行った。スタックの大型化(有効膜面積：0.3 m²、総膜面積：180 m²)に成功し、大型スタックでは世界最大の出力密度(1.42 W/m²)が得られた。ナノファイバー複合膜やprofiled膜など新規膜の開発も合わせて、小型スタックの出力密度は3.42 W/m²と大幅に向上した。また今回開発したRED用前処理装置や酵素洗浄法によりこのシステムを長期間安定に運転することが期待出来る。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海水と河川水などの塩水間に存在する塩分濃度差エネルギーを直接電気エネルギーに変換する逆電気透析(RED)発電は低環境負荷、国内エネルギー自給である。さらに風力発電や太陽光発電にはない、高稼働率、小設置面積という利点を有するため、この技術の実用化は社会的意義が大きい。本研究における原水イオン濃度、イオン組成、水温、膜間距離、膜電気抵抗からRED発電出力を定量的に予測する解析は学術的意義が大きい。またREDスタックの大型化に成功して世界最大となる出力密度が得られ、さらに長期安定運転化技術を得た結果は、学術的意義と共にこの技術の実用化を推進する上で社会的にも大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this research, aiming at the practical application of RED power generation, the increase in the efficiency and size of the SGE conversion cell, the development of a RED pretreatment device and cleaning method essential for long-term stable operation of the RED system were investigated. The optimum operating conditions of the RED power generation system using various salty solutions were also examined. As a result, we succeeded in developing a large RED stack (effective membrane area: 0.3 m², total membrane area: 180 m²), which gives the highest power density (1.42W/m²). By developing of new membranes such as nanofiber composite membranes and profiled membranes, the power density significantly improved from 0.45 W/m² to 3.42W/m². In addition, it is expected that the developed new pretreatment device for RED and an enzyme cleaning method will operate the RED system stably for a long time period.

研究分野：機能性高分子材料

キーワード：再生可能エネルギー 塩分濃度差 イオン交換膜

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

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る (図1). 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である¹⁾. 濃度差発電は低環境負荷, 国内エネルギー自給であり, 風力発電や太陽光発電にはない, 高稼働率, 小設置面積という利点を有する. 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発電の原理を図2に示す.

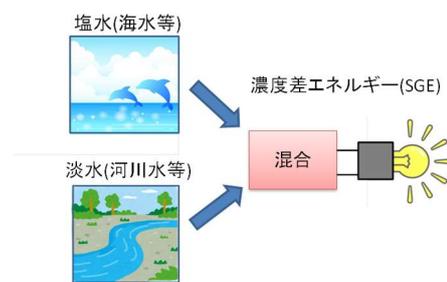


図1 濃度差発電の概念図

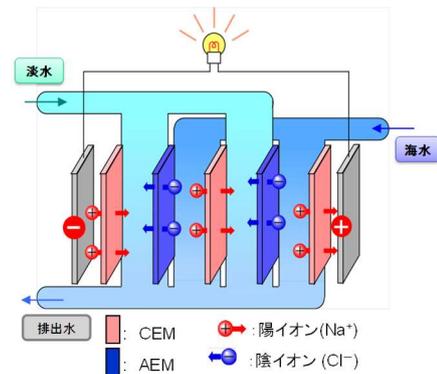


図2 RED発電の原理図

(2)現行技術の問題点: REDstack社がオランダのAfsluitdijkに50kW出力規模のパイロットプラントを建設している. これまで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³⁾. 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.

2. 研究の目的

研究代表者はREDstackと技術交流を行いながら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. 本研究の目的はこの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, そしてこれらを組み込んだ(4)RED発電システムの構築と種々の塩水におけるRED発電評価を通してRED発電システムの実用化技術を確立することである.

3. 研究の方法

(1)RED用新規IEMの作製: ①低電気抵抗・高耐汚染性及び1価イオン選択性を有する親水性薄膜荷電層を形成するためにまずSH末端PVAと種々の荷電モノマーの共重合からブロック共重合体(PVA系高分子カチオン, 高分子アニオン)を合成し, これよりPVA系CEM⁴⁾, PVA系AEMを作製した⁵⁾. ②淡水流路部の電気抵抗を低減するためのProfiled CEMは上記PVA系ブロック共重合体から作製したCEMを90℃で7分間, 60MPaの圧力で熱プレス後に流路部構造の金型を用いて熱プレス成型で作製した後, 化学的架橋を行った⁶⁾. ③電界紡糸装置を用いてPVA溶液からナノファイバー(NF)シートを作製し, PVAブロック共重合体の水溶液をNFシート上にキャスト製膜することでNF複合膜を作製した⁷⁾. ④PVA系CEMとPVA系AEMにそれぞれ反対荷電層を形成することで1価イオン選択性CEM(MS-CEM)⁸⁾及び1価イオン選択性AEM(MS-AEM)を作製した^{9,10)}. ⑤新規構造CEMとして高崎量子応用研究所において重イオンビーム照射したETFEフィルムにスチレン誘導体モノマーをグラフト重合することでIB-CEMを作製した¹¹⁾. ⑥2価イオン成分がRED発電特性に与える影響を検討するために種々の組成のNaClとMgSO₄の混合溶液で膜電位, 膜抵抗¹²⁾及び膜中イオン濃度¹³⁾を測定した.

(2)RED用前処理装置の構築: ①REDスタックの目詰まりの原因となる濁質成分, バイオポリマー, 溶存有機物の除去を目的として, 高速繊維ろ過を検討した. ②アルミニウム陽極の電解凝集処理によるバイオポリマーの除去, 溶存有機物の低分子化による目詰まりの抑制を試みた¹⁴⁾.

(3)膜汚染機構の解明とその対策: ①海水と河川水を中型REDスタックに流した後に, 荷電層表面や流路部への付着物を三次元蛍光分析, ATP測定, 顕微鏡観察を使用して分析し, 付着物の分布や付着機構の解明を行った¹⁵⁾. ②REDモジュール内に原水由来の微生物を付着させた後, これを除去するために, 酵素洗浄(脂質分解酵素リパーゼ水溶液)を行い, その洗浄効果を評価した.

(4)RED 発電システムの構築と発電特性評価：本研究では 4 タイプの RED スタックを作製した：(I)自作 IEM 評価用ラボスタック(有効膜サイズ 5×7cm)，(II) RED IEM 評価用小型スタック(有効膜サイズ 8×11cm)，(III) パイロットスケール中型スタック(有効膜サイズ 0.1m²)，(IV)世界最大級の膜面積を有する実証試験用大型スタック(有効膜サイズ 0.3m²)。セル対数は 10 対～300 対，膜間距離は 600μm と 180μm を用いた。使用する膜は自作膜の他に標準市販 IEM, 1 価イオン選択性膜 (アストム社製)，低抵抗膜 (Fumatech 社製) を使用した。ま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)，海水淡水化施設から排出される実濃縮海水(BR, 約 90 mS/cm : 福岡, 約 80 mS/cm: 沖縄)，実海水(SW, 約 50 mS/cm)，及び製塩工場からの塩水を使用した。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)，実下水処理水 (STW : 福岡)，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小型スタックを使用し，イオン組成が異なる製塩工場の排出液を利用した RED 発電出力の調査¹⁶⁾，②ポリ塩化アルミニウム (PAC) を凝固剤とした下水処理水における PAC 添加条件が水質および RED 出力性能への影響の検討¹⁷⁾，③中型スタックに SW と STW を用いて SGE を水素変換する実証研究¹⁸⁾，④種々の形状のスペーサ網を用いてスペーサ網形状と流路部圧損及びスタック電気抵抗との関係の検討¹⁹⁾，⑤中型スタックに MSW と MRW を送液した RED 発電評価²⁰⁾，⑥溶液の水温及び膜間距離が出力性能に与える影響の検討^{21,22)}，⑦中型スタックで BR と STW を使用した RED 発電評価²³⁾，⑧実証化試験として大型スタックに MBR と MRW を用いた RED 発電評価²⁴⁾，⑨小型スタックを用いて種々のイオン交換膜を使用した発電出力を比較した²⁵⁾。一例として図 3 に大型スタックと前処理システムで構成される RED 発電システムを示す。

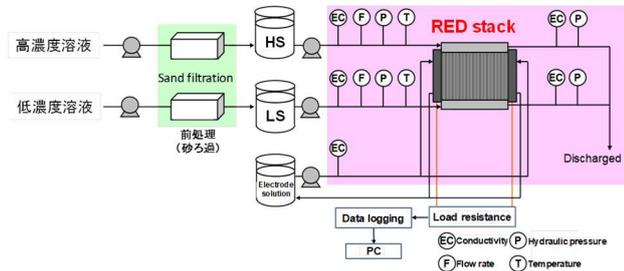


図 3 大型 RED スタックの評価システム

4. 研究成果

(1) RED用新規IEM：

- ①作製したPVA系CEM⁴⁾とPVA系AEM⁵⁾は市販IEMとほぼ同等の輸率と膜抵抗を示した。
- ②図 4 に作製したProfiled CEMの表面と断面の写真を示す⁶⁾。表面画像から突起が均一に形成されたことを確認し，断面画像から突起の高さは約200 μmであることが判明した。この膜の輸率は0.95以上であり，膜抵抗も原膜とほぼ同等の値であり，またProfiled CEMのRED発電特性は平膜と比較して約3倍の出力を示した。
- ③NFシートおよびNF複合膜の断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を図 5 に示す。NF複合膜の機械的強度は原膜より2倍程度向上し，イオン伝導率は原膜と比較して最大で2.5倍程度向上した⁷⁾。
- ④作製したMS-CEMとMS-AEMは，膜抵抗は原膜とほぼ同じ値であり，2価イオンに対する1価イオン選択透過性はそれぞれ2.5倍以上⁸⁾，及び4倍以上⁹⁾高いを示した。またMS-AEMはアニオン性汚染物質に対して高い耐膜汚染性を示した¹⁰⁾。
- ⑤IB-CEMは市販イオン交換膜と比較して高い膜電位，低い膜抵抗を示したことからRED用 IEMとして期待できる¹¹⁾。

⑥NaClとMgSO₄の混合溶液を使用した開回路電圧と膜抵抗¹²⁾，膜内イオン濃度¹³⁾を測定した結果，標準IEMでは溶液中MgSO₄の割合が増加すると特にCEMにおいて膜電位が低下し，膜抵抗は増加した。これは膜内移動度が低いMg²⁺イオンがより選択的に分配されるためであり，この結果より膜内 2 価カチオン濃度がRED発電特性に与える影響を定量的に予測できた。

(2)RED 用前処理装置：

- ①アルギン酸の α-L-グルロン酸が多く含まれる画分が Ca イオンにより 1μm 以上の多量体を形成することが分かった。つまり，Ca イオン濃度が高い下水処理水を対象とした場合は，砂ろ過のような濁質成

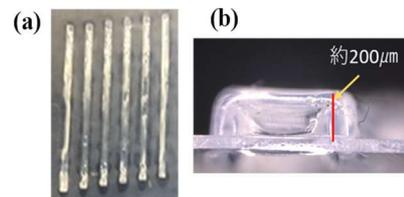


図 4 作製した profiled CEM の (a) 表面写真，(b) 側面写真

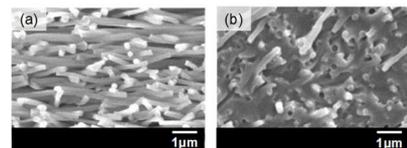


図 5 膜断面の SEM 画像 (a)PVA-NF シート，(b)複合膜

分の除去を対象とした前処理技術でもバイオポリマーを効果的に除去できることが示唆された。

②図6に電気凝集処理による実験において3段階の異なる消費電力で下水処理水の処理を行い、消費電力とLC-OCD（有機物分子量分布測定装置）による分子量分布の関係を評価した結果を示す。電気凝集処理前の下水処理水(i)では約30分の保持時間に確認できるバイオポリマーのピークが、電気凝集処理後の(ii)-(iv)では減少することからバイオポリマーを効果的に除去できることが判明し、電気凝集法がRED用前処理技術として有効であることが示された¹⁴⁾。

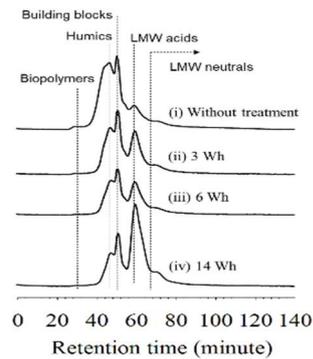


図6 前処理装置の消費電力とLC-OCDによる分子量分布の関係

(3) スタック内汚染物質の分析と洗浄方法

①中型REDスタックにSWとRWを流し、スタック内流路へ付着した汚染物の三次元蛍光分析において、微生物由来の物質が多く検出された(図7)。またその固形物中のATP値(微生物量の指標)が高いという結果から、この河川水中に微生物が多く存在し、スタックを汚染することが確認された¹⁵⁾。

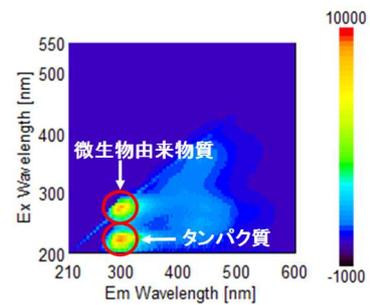


図7 流路付着物の三次元蛍光分析

②微生物汚染への対策として酵素(細胞膜脂質を分解する酵素)を用いた結果、図8に示すように大幅な圧力損失の低下が確認された。このことから、RED装置内の微細流路へ付着した微生物の除去には、微生物自体を分解する酵素による洗浄が効果的であることが判明した。

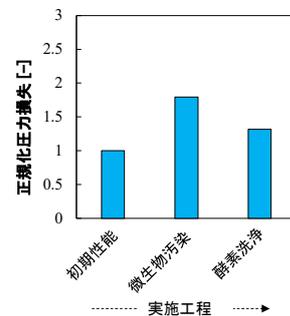


図8 酵素洗浄による圧力損失の変化

(4) REDスタックの発電評価

①イオン組成が異なる製塩工場の排出液でのRED発電出力を調査した結果、最適なイオン組成及び1価イオン選択層の配向方向とRED出力との関係が得られた¹⁶⁾。

②PACを凝固剤とした下水処理水におけるPAC添加条件が水質およびRED出力性能への影響を検討した結果、膜汚染の原因となる天然有機化合物を50%除去し、かつRED出力の低減を抑制するPAC添加量の最適条件を見出した¹⁷⁾。

③REDスタックを用いてSGEを直接水素に変換するシステムを構築した。SWとSTWを用いた実験においてこのシステムは水素変換効率がほぼ100%で1100時間安定に稼働した¹⁸⁾。またREDスタックの電極部に発生する気体と電極溶液の種類と供給流速、電流密度との関係を検討した結果、酸素/塩素生成で酸素優位であり、この傾向は電極室の流量が低いほど、または電流密度が大きいほど顕著となり、塩素生成が反応物であるCl⁻の拡散律速であることが示唆された。これは電極室の構造および運転条件により電極反応が制御できることを示している。

④形状の異なる16種類のスペーサを用いた比較試験からスペーサ形状に依存した遮蔽効果によりREDスタックの電気抵抗が約14~48%増加することが判明し、膜および流路区画部位における抵抗増加値を予測する新たな経験式を提案した¹⁹⁾。

⑤中型スタックの発電特性をMSWとMRWを用いて評価した結果、グロス出力17.8 W(グロス出力密度 0.45 W/m²)が得られ、ポンプ効率を85%とした場合の正味出力は16.7 W(正味出力密度 0.42 W/m²)が得られた²⁰⁾。

⑥中型スタックで水温が10°Cから35°Cに増加するとグロス出力が22.5 Wから38.6 Wと約1.7倍増加した。これより大面積化時の性能推算モデルを構築するために必要な水温の影響を詳細に解析した結果、膜抵抗は2.0%/°Cの水温依存性があることを示し²¹⁾、RED出力と膜間距離と

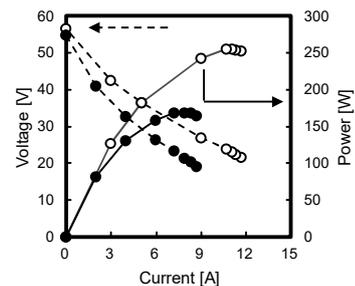


図9 大型REDスタックにおける発電特性: ○, MBR/RW; ●, MSW/RW

の関係を検討した結果、膜間距離を0.6 mmから0.2 mmに減少させると、グロス出力が17.7 Wから29.2 Wと約1.6倍向上する結果が得られた²²⁾。

⑦海水淡水化施設から排出されるBR（約90mS/cm: 福岡）と下水処理施設からのSTW（約1mS/cm）を中型スタックに供給してその発電特性を調べた結果、グロス出力21.7 W（グロス出力密度 0.54 W/m²）を示し、正味出力は18.2W（正味出力密度 0.46 W/m²）が得られた²³⁾。

⑧図9に実証試験用大型スタックでMBR（90 mS/cm, NaCl溶液）、モデル海水（SW:50 mS/cm, NaCl溶液）と表流水RWを用いたRED発電試験での電流—電圧（電力）曲線を示す。MBR/RWにおいて発電出力 256 W（出力密度 1.42 W/m²）、MSW/RWにおいて169W（同 0.93 W/m²）の高出力を達成した²⁴⁾。この出力密度は大型スタックでは世界最大の値である。

⑨低抵抗膜を使用しMSWとMRWを供給した小型スタックでの発電特性では3.42W/m²と⑧で利用した膜より約2.4倍高い出力密度を得られた（図10）²⁵⁾。

この4年間の研究結果により、原水イオン濃度、イオン組成、水温、膜間距離、膜電気抵抗とRED発電出力との関係を実験的に得ることが出来、これよりRED発電出力を定量的に予測することが可能となった。またRED発電に適した前処理装置と洗浄方法が得られたことから実際の海水や河川水・下水処理水を利用して長期間安定に運転できる目途が立った。

⑧と⑨の結果より濃縮海水相当の塩水利用において総膜面積 9000m²のREDスタックで40kWの出力が得られることが試算された。さらに膜間距離と膜電気抵抗を大きく改善する新規プロファイル膜を考案して特許出願中である^{26,27)}。この膜を大型REDスタックに装着することで70kW REDシステムの構築が期待できる。

<引用文献>

- 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. Nijmeijer, C. J. N. Buisman, *J. Membr. Sci.*, **288**, 218 (2007)
- 3) D. A. Vermaas, D. Kunteng, M. Saakes, K. Nijmeijer, *Water Research*, **47**, 1289-1298, (2013)
- 4) M. Higa, T. Mizuno, M. Anno, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **70**, 324-325 (2016)
- 5) M. Higa, T. Mizuno, M. Anno, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **71**, 110-111 (2017)
- 6) Y. Kakihana, T. Uchimura, M. Yasukawa, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **73**, 139 (2019).
- 7) F. Seino, Y. Konosu, M. Ashizawa, Y. Kakihana, M. Higa, H. Matsumoto, *Langmuir*, **34**, 13035-13040 (2018)
- 8) S. Harada, Y. Kakihana, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **72**, 338-339 (2018)
- 9) S. Harada, Y. Kakihana, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **74**, 50-51 (2020)
- 10) S. Harada, Y. Kakihana, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **74**, 189-190 (2020)
- 11) M. Higa, M. Goto, T. Yamaki, S. Sawada, H. Kosikawa, A. Kitamura, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **71**, 37-38 (2017)
- 12) M. Kuno, M. Yasukawa, Y. Kakihana, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **71**, 350-351 (2017)
- 13) M. Kuno, M. Yasukawa, Y. Kakihana, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **72**, 120-121 (2018)
- 14) 原田美冬, 高尾祐平, 山口緋加里, 鈴木祐麻, 新苗正和, *水環境学会誌*, **42**(5), 185-194 (2019)
- 15) 岩井崇, 通阪栄一, 垣花百合子, 安川政宏, 比嘉充, *化学工学会中国四国支部・関西支部合同徳島大会要旨集*, C-5 (2018)
- 16) S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, M. Kuno, Y. Kawabata, M. Higa, *Desalination*, **467**, 95-102 (2019)
- 17) S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, T. Suzuki, M. Higa, *Desalination*, **481**, 114356 (2020)
- 18) M. Higa, T. Watanabe, M. Yasukawa, N. Endo, Y. Kakihana, H. Futamura, K. Inoue, H. Miyake, J. Usui, A. Hayashi, M. Matsushashi, *Water Practice & Technology*, **14**, 645-651 (2019)
- 19) S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, T. Abo, Y. Kakihana, M. Higa, *J. Membr. Sci.*, **572**, 271-280 (2019)
- 20) M. Higa, T. Sakurada, H. Takemura, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **70**, 118-119 (2016)
- 21) T. Abo, M. Kuno, M. Yasukawa, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **73**, 237-238 (2019)
- 22) S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, T. Abo, M. Kuno, Y. Noguchi, M. Higa, *Membranes*, **9**, 73 (2019)
- 23) M. Yasukawa, S. Mehdizadeh, T. Sakurada, T. Abo, M. Kuno, M. Higa, *Desalination*, **491**, 114449 (2020)
- 24) T. Abo, S. Mehdizadeh, Y. Kakihana, M. Yasukawa, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **73**, 96-97 (2019)
- 25) R. Ujike, Y. Kawabata, S. Mehdizadeh, Y. Kakihana, M. Yasukawa, M. Higa, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, **74**, 139 (2020)
- 26) 特願 2019-201239, 比嘉 充, 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
- 27) 特願 2019-201241, 比嘉 充, 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

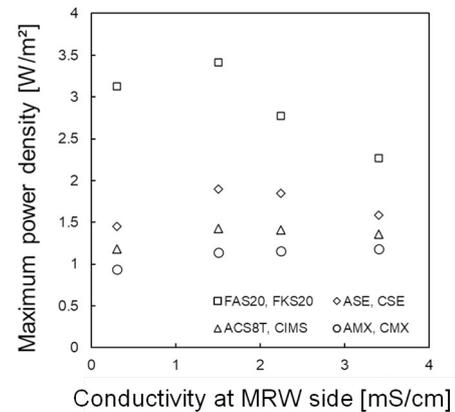


図10 種々のイオン交換膜を用いた小型スタックでの出力密度と低塩濃度側溶液(MRW)伝導度との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計35件（うち査読付論文 31件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 M. Yasukawa, S. Mehdizadeh, T. Sakurada, T Abo, M. Kuno, M. Higa	4. 巻 491
2. 論文標題 Power generation performance of a bench-scale reverse electrodialysis stack using wastewater discharged from sewage treatment and seawater reverse osmosis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Desalination	6. 最初と最後の頁 114449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.desal.2020.114449	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 Soroush Mehdizadeh, Masahiro Yasukawa, Tsuma Suzuki, Mitsuru Higa	4. 巻 481
2. 論文標題 Reverse electrodialysis for power generation using seawater/municipal wastewater: Effect of coagulation pretreatment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Desalination	6. 最初と最後の頁 114356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.desal.2020.114356	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 S. Harada, Y. Kakihana and M. Higa	4. 巻 74(1)
2. 論文標題 Monovalent selective anion-exchange membranes prepared from PVA-based block copolymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 50-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 S. Sawada, M. Goto, H. Koshikawa, A. Kitamura, M. Higa & T. Yamaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Ion and water transport properties of cation exchange membranes prepared by heavy-ion-track grafting technique	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Separation Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01496395.2019.1648510	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 M. Higa, T. Watanabe, M. Yasukawa, N. Endo, Y. Kakihana, H. Futamura, K. Inoue, H. Miyake, J. Usui, A. Hayashi, M. Matsuhashi	4. 巻 14(3)
2. 論文標題 Sustainable hydrogen production from seawater and sewage treated water using reverse electro dialysis technology	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Water Practice & Technology	6. 最初と最後の頁 645-651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2166/wpt.2019.048	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 S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, T. Abo, M. Kuno, Y. Noguchi, M. Higa	4. 巻 9(6)
2. 論文標題 The effect of feed solution temperature on the power output performance of a pilot-scale reverse electro dialysis (RED) system with different intermediate distance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Membranes	6. 最初と最後の頁 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/membranes9060073	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 T. Abo, M. Kuno, M. Yasukawa, M. Higa	4. 巻 73(4)
2. 論文標題 The relationship between water temperature and power output in a pilot-scale reverse electro dialysis system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 237-238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, M. Kuno, Y. Kawabata, M. Higa	4. 巻 467
2. 論文標題 Evaluation of energy harvesting from discharged solutions in a salt production plant by reverse electro dialysis (RED)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Desalination	6. 最初と最後の頁 95-102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.desal.2019.04.007	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 M. Harada, T. Suzuki, N. Masakazu	4. 巻 73(6)
2. 論文標題 Influence of calcium ions on the fouling of a thin-film composite reverse osmosis membrane by alginate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 356-357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 T. Abo, S. Mehdizadeh, Y. Kakihana, M. Yasukawa and M. Higa	4. 巻 73(2)
2. 論文標題 Power generation performance of a pilot-scale reverse electro dialysis (RED) stack	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 96-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Higa, Y. Kakihana, T. Sugimoto and K. Toyota	4. 巻 9(1)
2. 論文標題 Preparation of PVA-based hollow fiber ion-exchange membranes and their performance for Donnan dialysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Membranes	6. 最初と最後の頁 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/membranes9010004	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 S. Doi, M. Kinoshita, M. Yasukawa and M. Higa	4. 巻 8(4)
2. 論文標題 Alkali attack on anion exchange membranes with PVC backing and binder: Prediction of electrical and mechanical performances from simple optical analyses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Membranes	6. 最初と最後の頁 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/membranes8040133	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 S. Doi, M. Yasukawa, Y. Kakihana, M. Higa	4. 巻 573
2. 論文標題 Alkali attack on anion exchange membranes with PVC backing and binder: Effect on performance and correlation between them	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 85-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2018.11.065	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 S. Harada, Y. Kakihana and M. Higa	4. 巻 72(6)
2. 論文標題 Monovalent selective cation-exchange membranes prepared from PVA-based block copolymers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 338-339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.72.6_338	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 F. Seino, Y. Konosu, M. Ashizawa, Y. Kakihana, M. Higa and H. Matsumoto	4. 巻 34(43)
2. 論文標題 Polyelectrolyte composite membranes containing electrospun ion-exchange nanofibers: effect of nanofiber surface charges on ionic transport	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 13035-13040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.8b02747	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 S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, T. Abo, Y. Kakihana, M. Higa	4. 巻 572
2. 論文標題 Effect of spacer geometry on membrane and solution compartment resistances in reverse electrodialysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 271-280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2018.09.051	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 Y. Noguchi, M. Yasukawa and M. Higa	4. 巻 72(6)
2. 論文標題 Desalination of salt solutions by means of circulating diffusion dialysis system using salinity gradient energy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 334-335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.72.6_334	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 澤田真一, 安保貴和, 匠 伸弥, 安川政宏, 垣花百合子, 比嘉 充, 前川康成	4. 巻 146
2. 論文標題 放射線グラフト陽・陰イオン交換膜を用いた逆電気透析装置の発電性能	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 放射線と産業 特集 第17回放射線プロセスシンポジウム	6. 最初と最後の頁 28-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 比嘉 充	4. 巻 73(1)
2. 論文標題 塩分濃度差エネルギー発電の原理と最近の技術動向	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本海水学会誌 「特集 西日本の海水科学研究(8)」	6. 最初と最後の頁 3-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 安川政宏, 垣花百合子, 比嘉 充	4. 巻 74(4)
2. 論文標題 水・エネルギー問題を解決するための荷電膜	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 繊維学会誌 特集 <我が国における分離膜の研究開発(その1)>	6. 最初と最後の頁 134-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2115/fiber.74.P-134	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 M. Kuno, M. Yasukawa, Y. Kakihana and M. Higa	4. 巻 72(2)
2. 論文標題 Relationship between cation concentration in a cation exchange membrane and molar fraction of divalent ions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 120-121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.72.2_120	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 M. Kuno, M. Yasukawa, Y. Kakihana and M. Higa	4. 巻 71(6)
2. 論文標題 The effect of divalent ions on reverse electrodialysis power generation system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 350-351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.71.6_350	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 比嘉 充、安川 政宏	4. 巻 70(8)
2. 論文標題 機能性分離膜を用いた濃度差発電システム	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 化学と工業 特集 環境を守り、エネルギーを生み出す夢の膜工学	6. 最初と最後の頁 684-686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 M. Higa, T. Mizuno and M. Anno	4. 巻 71(2)
2. 論文標題 Characterization of anion-exchange membranes prepared from PVA-based block copolymers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 110-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.71.2_110	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 M. Higa, M. Goto, T. Yamaki, S. Sawada, H. Koshikawa and A. Kitamura	4. 巻 71(1)
2. 論文標題 Characterization of cation-exchange membranes prepared by ion-track graft polymerization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	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/swsj.71.1_37	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 Y. Kakihana, K. Ukai and M. Higa	4. 巻 70(6)
2. 論文標題 Preparation of cation-exchange membranes from polyisulfone with poly (sodium p-styrenesulfonate) graft chains	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 369-370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.70.6_369	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 M. Higa, T. Mizuno and M. Anno	4. 巻 70(5)
2. 論文標題 Characterization of cation-exchange membranes prepared from PVA-based block copolymers	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan	6. 最初と最後の頁 324-325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.70.5_324	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 比嘉 充	4. 巻 81(9)
2. 論文標題 逆電気透析 (RED) 発電の最新動向	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 化学工学 特集 我が国の海洋開発の最新動向および今後の展開	6. 最初と最後の頁 472-474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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145件（うち招待講演 10件／うち国際学会 38件）

1. 発表者名 S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, M. Higa
2. 発表標題 Reverse electrodialysis using seawater/municipal water: Effect of a coagulant in water on the power generation performance
3. 学会等名 The 12th conference of the Aseanian Membrane Society (AMS12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yasukawa, M. Higa, N. Endo, Y. Kakihana, T. Watanabe, H. Futamaru, K. Inoue, H. Miyake, J. Usui, A. Hayashi, M. Matsuhashi
2. 発表標題 Direct hydrogen production from seawater and sewage treated water using reverse electrodialysis technology
3. 学会等名 The 12th conference of the Aseanian Membrane Society (AMS12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Higa, S. Mehdizadeh, T. Abo, M. Yasukawa, Y. Kakihana
2. 発表標題 Power generation performance of a pilot-scale RED stack using SWRO brine and river water
3. 学会等名 The 12th conference of the Aseanian Membrane Society (AMS12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawabata, Y. Noguchi, T. Abo, M. Yasukawa, Y. Kakihana, M. Higa
2. 発表標題 Experimental study of a reverse electrodialysis system for energy recovery at a reverse osmosis desalination plant
3. 学会等名 The 12th conference of the Aseanian Membrane Society (AMS12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比嘉 充, ソルシ メジザデ, 安保貴和, 安川政宏, 垣花百合子
2. 発表標題 濃縮海水/海水と表流水を用いたパイロットスケール逆電気透析 (RED) システムにおける発電出力と運転条件との関係
3. 学会等名 2019年度日本海水学会第70年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安川政宏, 安保貴和, 比嘉 充
2. 発表標題 ベンチスケール逆電気透析スタックの発電性能評価: 水温と供給流量の関係
3. 学会等名 2019年度日本海水学会第70年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川畑良拓, 野口侑輝, 安保貴和, 安川政宏, 比嘉 充
2. 発表標題 高出力逆電気透析発電システムのためのスタック抵抗低減の検討
3. 学会等名 2019年度日本海水学会第70年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安川政宏, 安保貴和, 比嘉 充
2. 発表標題 ベンチスケール逆電気透析スタックの発電性能評価: 水温と供給流量の影響
3. 学会等名 日本膜学会第41年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比嘉 充
2. 発表標題 塩分濃度差エネルギーの有効利用
3. 学会等名 日本学会議中国・四国地区会議公開学術講演会 ~ SDGs (持続可能な開発目標) の実現に向けた地域研究とイノベーション研究 ~ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 比嘉 充
2. 発表標題 イオン交換膜を用いた水処理・エネルギー変換技術
3. 学会等名 エネルギー自立型水処理技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口侑輝, 安川政宏, 比嘉 充
2. 発表標題 塩分濃度差エネルギーを利用した新規脱塩技術の構築
3. 学会等名 膜シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川畑良拓, 氏家 瞭, MEHDIZADEH Soroush, 垣花百合子, 安川政宏, 比嘉 充
2. 発表標題 逆電気透析 (RED) 発電システムにおける大型スタックでの塩分濃度差エネルギー変換効率の解析
3. 学会等名 膜シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 氏家 瞭, 川畑良拓, Soroush Mehdizadeh, 垣花百合子, 安川政宏, 比嘉 充
2. 発表標題 逆電気透析 (RED) 発電システムにおける大型スタックでの発電評価特性
3. 学会等名 第34回中国四国地区高分子若手研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小牟田啓子, 後藤光暁, 垣花百合子, 安川政宏, 比嘉 充
2. 発表標題 イオン飛跡グラフと重合法によるイオン交換膜の作製と特性評価
3. 学会等名 第34回中国四国地区高分子若手研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川畑良拓, 野口侑輝, 垣花百合子, 安川政宏, 比嘉 充
2. 発表標題 逆電気透析 (RED) 技術を用いたエネルギー変換
3. 学会等名 2019年度日本海水学会第70年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 垣花百合子, 内村 達, 安川政宏, 比嘉 充
2. 発表標題 逆電気透析発電用PVA系イオン交換膜の作製とその特性評価
3. 学会等名 2019年度日本海水学会第70年会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Higa, Y. Kakihana, M. Yasukawa, T. Abo, M. Kuno and Y. Noguchi
2 . 発表標題 Power production in a reverse electro dialysis pilot plant with desalination brine and treated waste water effluent
3 . 学会等名 MELPRO 2018 - Conference on Membrane and Electromembrane Processes (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Higa, T. Watanabe, M. Yasukawa, N. Endo, Y. Kakihana, H. Futamura, K. Inoue, H. Miyake, J. Usui, A. Ikegami, M. Matsubishi
2 . 発表標題 Sustainable hydrogen production from seawater and sewage treated water using reverse electro dialysis technology: Its feasibility and long-time pilot test
3 . 学会等名 IWA World Water Congress & Exhibition 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Higa
2 . 発表標題 Principle, current status and prospect of reverse electro dialysis (RED)
3 . 学会等名 International Seminar on Hydrogen Energy (UniMAP) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Yasukawa, M, Higa
2 . 発表標題 Blue energy center for SGE technology (BEST) in Yamaguchi University
3 . 学会等名 International Seminar on Hydrogen Energy (UniMAP) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Mehdizeadeh, M. Yasukawa, Y. Kakihana, M. Higa
2 . 発表標題 Effect of spacer geometry on stack resistance in reverse electrodialysis
3 . 学会等名 The 11th conference of Aseanian Membrane Society (AMS11) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Yasukawa, T. Sakurada, R. Horie, M. Kuno, Y. Kakihana and M. Higa
2 . 発表標題 Experimental pilot-scale performance comparison between pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis
3 . 学会等名 The 11th conference of Aseanian Membrane Society (AMS11) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Kuno, M. Yasukawa, Y. Kakihana and M. Higa
2 . 発表標題 Effect of divalent ions in reverse electrodialysis : Experimental and simulation
3 . 学会等名 The 11th conference of Aseanian Membrane Society (AMS11) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Abo, M. Kuno, Y. Noguchi, M. Yasukawa, Y. Kakihana and M. Higa
2 . 発表標題 Effect of water temperture on power output in a pilot-scale reverse electrodialysis (RED)
3 . 学会等名 The 11th conference of Aseanian Membrane Society (AMS11) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Mehdizadeh, T. Abo, M. Yasukawa, Y. Kakihana, M. Higa
2. 発表標題 Effect of spacer geometry on reverse electrodialysis (RED) resistances
3. 学会等名 The Fiber Society's Spring 2018 Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Yasukawa, T. Sakurada, R. Horie, M. Kuno, Y. Kakihana, M. Higa
2. 発表標題 Performance and efficiency comparison between pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis
3. 学会等名 The Fiber Society's Spring 2018 Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Seino, M. Ashizawa, Y. Kakihana, M. Higa, H. Matsumoto
2. 発表標題 Preparation and characterization of polyelectrolyte composite membranes containing electrospun ion-exchange nanofibers
3. 学会等名 International Nanofiber Symposium 2018 (Nanofibers 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 松本英俊、相羽誉礼（分担執筆）他86名	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 608
3. 書名 次世代のポリマー・高分子開発、新しい用途展開と将来展望	

1. 著者名 M. Yasukawa, T. Suzuki and M. Higa (分担執筆 他29名)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 366
3. 書名 Membrane-Based Salinity Gradient Processes for Water Treatment and Power Generation Salinity Gradient Processes: Thermodynamics, Application, and Future Prospects (Chapter 1)	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 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	発明者 比嘉 充	権利者 山口大学
産業財産権の種類、番号 特許、2019-201239	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 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	発明者 比嘉 充	権利者 山口大学
産業財産権の種類、番号 特許、2019-201241	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>逆電気透析 (RED) の研究内容 http://piano.chem.yamaguchi-u.ac.jp/1_3_RED(Japanese).html 研究論文の公開 http://piano.chem.yamaguchi-u.ac.jp/3_Publication(Japanese).html 塩分濃度差エネルギー (SGE) の研究内容 http://ds27i.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~blue/technology/ 研究論文の公開 http://ds27i.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~blue/publications/</p>
--

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	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)	
研究分担者	安川 政宏 (Yasukawa Masahiro) (20647309)	山口大学・大学院創成科学研究科・助教 (15501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	遠藤 宣隆 (Endo Nobutaka) (40314819)	山口大学・大学院創成科学研究科・講師 (15501)	
研究分担者	松本 英俊 (Matsumoto Hidetoshi) (40345393)	東京工業大学・物質理工学院・准教授 (12608)	
研究分担者	通阪 栄一 (Toorisaka Eiichi) (40363543)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	