

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K14048

研究課題名（和文）レドックスフロー電池の大電流化・高エネルギー変換効率を実現する新学理の創生

研究課題名（英文）Development of a chemical engineering science for redox flow batteries to improve current and energy conversion efficiency

研究代表者

石飛 宏和 (Ishitobi, Hirokazu)

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：00708406

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：再生可能エネルギーを貯蔵するレドックスフロー電池について、放射線酸化による高効率な酸化と物質輸送現象の理解を行った。電極材料を放射線酸化したところ、未処理の電極と比べて活性が向上した。オゾン酸化と比べても高い活性であったため、放射線酸化の優位性が示された。物質輸送の観点ではシミュレーションにより活物質（電気化学する物質）の電極表面濃度を可視化した。また、負極側の物質輸送速度が低いため、電池全体の物質輸送についても負極側が支配している点を明らかにした。以上の知見は高効率な電池設計を科学的に行うために有意義である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レドックスフロー電池を社会実装するためには大電流化が必要であり、高効率な電極活性化や物質輸送現象に関する学術的な支援が求められていた。本研究により、効率的な放射線酸化に対する学術的知見が集積され、電極内圧力損失（送液によるエネルギー損失）を半理論式で予測することが可能になり、電解液流量と物質輸送速度の関係が明らかになった。以上よりレドックスフロー電池の設計指針を学術的に高度化することができた。社会的にも、レドックスフロー電池が社会実装に近づくことにより、再生可能エネルギーの有効利用が拡大できるために意義深い。

研究成果の概要（英文）：Activation by the electron beam and analysis of the active material for redox flow batteries were studied. The irradiated electrode showed higher activity compared to the pristine electrode and an electrode activated by ozone gas. The concentration of the active material at the electrode surface was visualized by the simulation. The author analyzed mass transport by using full cell and symmetric cell, and found the active material in negative half-cell controlled the rate of mass transport in the full cell. The obtained results are useful to design efficient redox flow batteries.

研究分野：化学工学，電気化学，炭素材料学

キーワード：レドックスフロー電池 反応工学 放射線化学反応 カーボン多孔材料 連通孔 圧力損失 物質輸送

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

国際的な環境問題である気候変動問題に対応するために再生可能エネルギーを大規模に導入し、電源の脱炭素化を進める必要がある。バナジウムレドックスフロー電池(VRFB)は、活物質(電気化学反応して電池の充放電に寄与する物質)としてバナジウムイオン(Vイオン)を使う蓄電池である。電解液をポンプにより電極へ送液する点が他の蓄電池と異なる特徴である。(1)出力と容量を独立に設計できる・(2)充放電中に充電度(活物質が充電状態となる割合)を正確に計測できるためエネルギーシステムに適合的・(3)電池のスケールアップ・スケールダウンが容易、などの利点があり、太陽光・風力など出力変動の大きな再生可能エネルギーの利用を促進するキーテクノロジーとして戦略的に重要なデバイスである。近年では楕形流路および電極としてカーボンペーパー、カーボンクロスなどが用いられ、電解液を対流により電極内に流通させる構成が主流である。研究開始時にはVRFBは流動型電池という特殊な形式ゆえに、「材料・電極構造」と「内部抵抗の低減」に関しては学理が構築されていない問題があった。内部抵抗には(a)反応抵抗、(b)物質輸送抵抗、(c)オーム抵抗がある。従来、VRFBの反応活性点は電極表面上の酸素官能基だとされており[1,2]、空気酸化や液相酸化による活性化処理が行われていた。本研究では電子線を使った高効率な活性化による反応抵抗の低減に着目した。また、水素-酸素燃料電池のように気体を反応させる電気化学デバイスと異なり、VRFBは電解液中に溶解した活物質により電気化学反応するため、低拡散係数・高粘度といった特性が濃度境膜を発達させて物質輸送抵抗の観点から不利になる。しかしながら、レドックスフロー電池のフルセルにおける物質輸送に着目した研究は限定的で[3,4]、高効率な電池の設計のために限界電流などに関する知見が必要である。濃度境膜内の物質輸送抵抗を低減するために、シミュレーションによる電極表面濃度の可視化や新規のカーボン多孔材料を用いて電解液流動・限界電流について研究を行った。

2. 研究の目的

反応抵抗の低減については、従来から用いられている空気酸化よりも高効率な酸化が期待できる、電子線を用いた放射線酸化を行うこととした。通常空気雰囲気・乾燥空気雰囲気・乾燥窒素雰囲気でカーボン電極に対して電子線照射を行うことにより、照射雰囲気が電極材料の電気化学的活性に与える影響を明らかにすることを目的とした。また、放射線酸化プロセスでのキーパラメータである照射電流値を変更し、最適な電流値を見出すことを目指した。

物質輸送の観点では実験による電極表面における活物質濃度の実測が困難なため、シミュレーションにより活物質の電極表面濃度を明らかにすることを目的とした。本研究では液透過・物質輸送に適した新規電極材料として多孔性カーボンモノリスであるシームレスカーボン(SC)材料を新たに提案した。SC材料はキャパシタ用の電極材料として実績があり[5,6]、バインダーレスであり面内方向・深さ方向ともに連通マクロ孔構造が均一である利点がある。SC電極の連通マクロ孔径を精密に制御し、連通マクロ孔径と圧力損失の関係をKozeny-Carmanの関係で解析した。また、フルセルのみの測定ではレドックスフロー電池の正極側・負極側のどちらで限界電流が発生しているかを評価できないため、対称セルを用いて電解液流量をパラメータとして限界電流を評価し、レドックスフロー電池の物質輸送特性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

高崎量子応用研究所の電子線加速器により、加速電圧2MVでカーボン電極への電子線照射を行った。照射条件は通常空気雰囲気・乾燥空気雰囲気・乾燥窒素雰囲気とし、比較のためにオゾン酸化した電極材料も用意した。電極材料の表面元素割合はXPS分析(PHI5000 VersaProbe II, ULVAC-PHI, Inc.)で評価した。

濃度境膜が電極表面濃度に与える影響についてはCOMSOL Multiphysicsによる有限要素法により評価した。詳細な計算条件については文献[7]を参照されたい。シームレスカーボン(SC)材料については既報[5]の方法により、以下の概略のように作製した。N₂ガス雰囲気中で800°Cの炭素化、Arガス雰囲気での1500°Cの結晶化熱処理、空気雰囲気(420°C~520°C)での酸化(活性化)を行った。SC材料の連通マクロ孔径は4.7µm~80µmとした。

各電極材料の電気化学的性能を評価するために、レドックスフロー電池のフルセルでの電気化学測定を行った。楕形流路を有するカーボンブロックに電極と隔膜(Nafion 117)を挟み込み単セルとした[8]。電極として上記の方法で作製したカーボン電極を組み込んだ。電解液は1M Vイオン(正極:V(V), 負極:V(II)) in 3M H₂SO₄を100mLずつ用意し、ダイヤフラム式圧力トランスミッターで圧力損失を実測しながら電流-電圧曲線を取得した。対称セルについてもフルセルと同様の電極を組み込み、充電度50%の正極液もしくは負極液を二つの電極に流量5mL min⁻¹~20mL min⁻¹で送液し、限界電流を実測した。

4. 研究成果

表 1 に XPS で評価した電極表面の元素割合を示す。カーボンクロス電極に対して放射線酸化を行ったところ、従来手法である空気酸化と比べて高密度に表面酸素を導入することに成功した。図 1 に放射線酸化した電極の電流-電圧曲線を示す。放射線酸化した電極を用いたレドックスフロー電池は、未処理電極を用いた電池と比べて高い電流密度を示すことを明らかにした。放射線化学反応を行う際の雰囲気電流密度に与える影響について検討し、乾燥空気雰囲気電流で電子線を照射すると電極に窒素が導入されるものの、電流-電圧曲線は未処理の電極と同様であり、乾燥窒素雰囲気電流での電子線照射は電極活性に影響しない点を明らかにした。著者らは放射線化学反応による効率的な活性化は、電子線による化学結合の切断と空気中に生成した活性種（オゾン等）による複合的な反応過程によるものだと考えている。一方で、未処理電極に対して通常空気雰囲気もしくは乾燥空気雰囲気電流で電子線を照射すると 1.4 V 時の電流密度が増加することを見出し、XPS 分析の結果より放射線酸化によって導入された表面酸素官能基が活性点として作用したと考えている。図 2 のように放射線化学反応との対照実験としてオゾン酸化によるカーボンクロス電極の酸化実験を行ったところ、比較的に高濃度のオゾンで酸化したサンプルは表面酸素量が増加したものの、放射線酸化したサンプルの 2/3 程度の出力にとどまったため、放射線酸化の有用性が示された。図 3 にフルエンス（面積あたりに照射した電子の量）を一定にして照射電流値を変更したカーボンクロス電極の電流-電圧曲線を示す。同じフルエンスでも照射電流値が大きいほど電池が高出力化することを見出した。電流値を高くすると、(a) 照射中のサンプル温度が高くなり酸化に有利になる、(b) 放射線化学反応が起きる頻度が高くなる、(c) 照射時間が短くなるために逐次反応による活性点の変性を防げる、などの要因が考えられる。加えて、照射時間を最適値よりも長くすると電池出力が低下することを見出した。これは上述したように、照射時間が長いと逐次反応により活性点が変性するためだと考えられる。

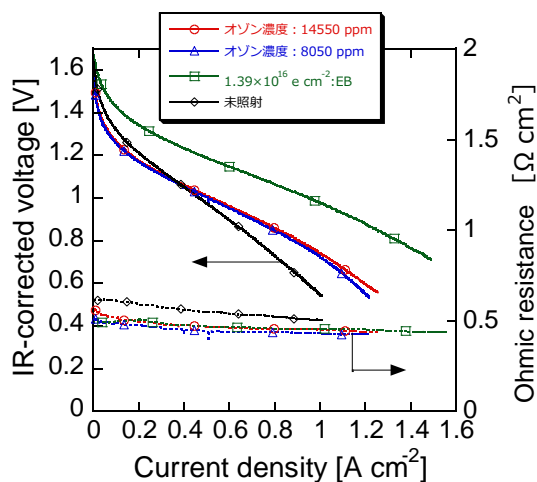


図 2 フルエンスを一定として照射電流値を 5 mA から 10 mA まで変更した放射線酸化した電極の電流-電圧曲線の比較。

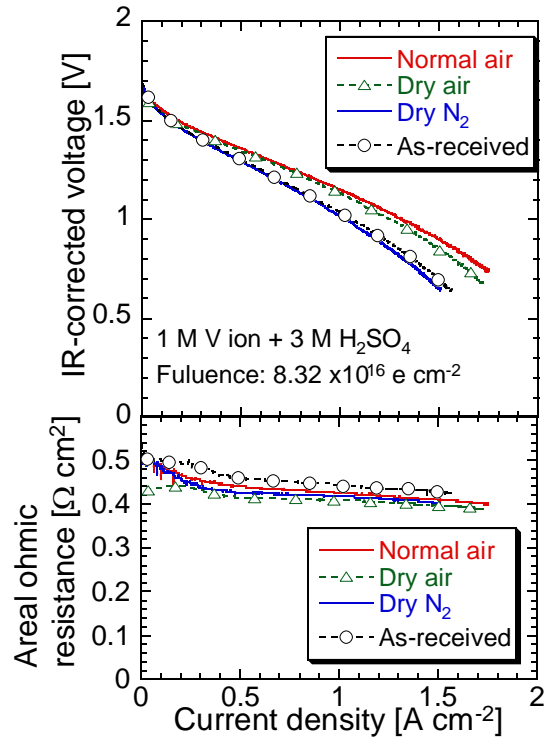


図 1 様々な条件で放射線酸化した電極の電流-電圧曲線および面積オーム抵抗。

放射線酸化したサンプルの 2/3 程度の出力にとどまったため、放射線酸化の有用性が示された。図 3 にフルエンス（面積あたりに照射した電子の量）を一定にして照射電流値を変更したカーボンクロス電極の電流-電圧曲線を示す。同じフルエンスでも照射電流値が大きいほど電池が高出力化することを見出した。電流値を高くすると、(a) 照射中のサンプル温度が高くなり酸化に有利になる、(b) 放射線化学反応が起きる頻度が高くなる、(c) 照射時間が短くなるために逐次反応による活性点の変性を防げる、などの要因が考えられる。加えて、照射時間を最適値よりも長くすると電池出力が低下することを見出した。これは上述したように、照射時間が長いと逐次反応により活性点が変性するためだと考えられる。

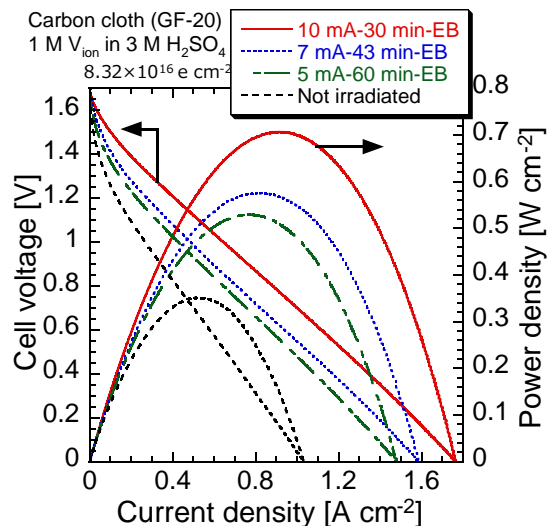


図 3 放射線酸化した電極とオゾン酸化した電極の電流-電圧曲線および面積オーム抵抗の比較。

表 1 XPS で評価した電極表面の元素割合.

条件	表面割合 [at%]			O/C
	炭素	酸素	窒素	
未処理	91	8.3	0.8	0.09
通常空気雰囲気での照射	79	20	1.7	0.25
乾燥窒素雰囲気での照射	87	11	2.5	0.13

電極内部の物質輸送現象の理解を深めるためにシミュレーションを行った. 図 4 にカーボンペーパー電極内の「電極表面での活物質濃度」を示す. バルク (沖合) での活物質の濃度変化は小さい点を確認している. 低拡散係数・高粘度の電解液を用いているため, バルクにおける活物質濃度の低下は比較的小さい一方で, 境界膜内で大きく濃度が減少して電極表面では活物質濃度が大きく低下した点を明らかにした. 加えて, 液透過・物質輸送に適した新規電極材料として多孔性カーボンモノリスであるシームレスカーボン(SC)材料を提案した. SC材料はカーボン積層材料と異なりバインダーが無く, 全ての方向に対して均一なマクロ孔構造になっているなどレドックスフロー電池に適した構造になっている (図 5). SC材料の熱処理温度を 1200 °C~2000 °Cとした上で空気酸化を行うと顕著に電流密度が向上する点を明らかにした. 電流密度向上の要因としては, 高温での熱処理によりカーボンが結晶化したためにオーム抵抗が低減された点, 結晶性カーボンと活性点である表面酸素官能基との相互作用が示唆される. また, シームレス多孔性カーボンの連通マクロ孔径と圧力損失の関係についても実験的に検討を行い, 図 6 のように概ね Kozeny-Carman 式の関係で整理できることを見出した. SC材料については電極内屈曲が圧力損失に与える影響がほぼ無い点を明らかにした. さらに, 物質輸送の観点から電解液流量と濃度境界膜に関する検討を行った. 単通転化率が 0.3 程度の条件で限界電流が現れたため, 電池全体の速度過程に対して境界膜内物質輸送の影響が大きい点を明らかにした. 正極と負極のどちらの物質輸送速度が低いかを明らかにするために, 二つの電極に負極液のみ・正極液のみを流通する対称セルを用いることにより, 負極の過電圧と電流密度の関係, 正極の過電圧と電流密度の関係を調べた. 図 7 のように, 負極側の物質輸送速度が低いために負極側で限界電流が観測され, 流量 5 mL min⁻¹ の際は 0.27 A cm⁻², 流量 10 mL min⁻¹ の際は 0.70 A cm⁻² であった. フルセルの限界電流密度は流量 5 mL min⁻¹ の際は 0.33 A cm⁻², 流量 10 mL min⁻¹ の際は 0.63 A cm⁻² であったため, フルセルの物質輸送抵抗は主に負極側の物質輸送抵抗に支配されている点を明らかにした. これは, 正極活物質の拡散係数に比べて負極活物質の拡散係数が低い点や, 負極活物質が表面酸素官能基のプロトンとイオン交換する際に, 電解液は硫酸酸性のため平衡論的には

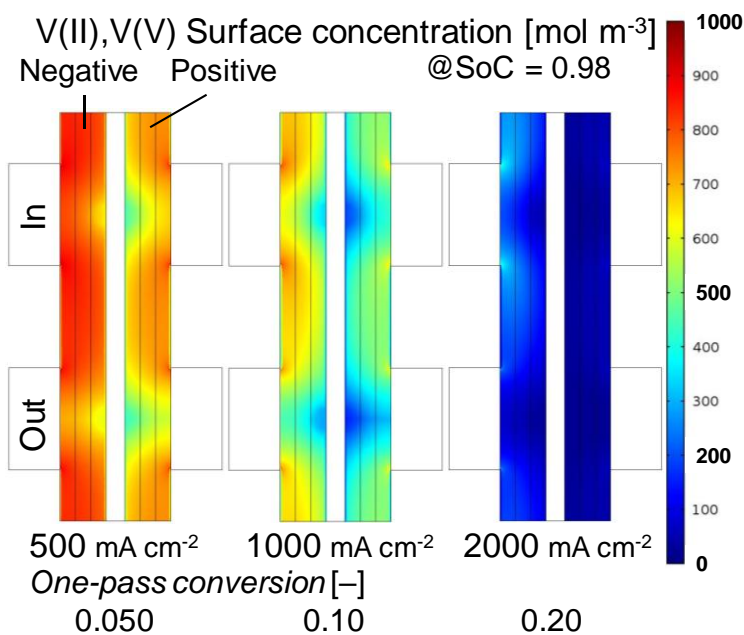


図 4 様々な電流密度におけるカーボンペーパー電極内における電極表面での活物質濃度.

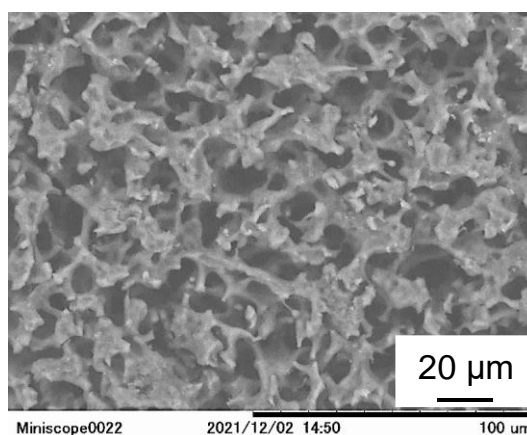


図 5 シームレスカーボン電極の走査電子顕微鏡像.

バナジウムの付加が不利なため、限界電流の時点でも負極活物質の電極表面濃度がゼロになっていない可能性が示唆された。

以上のように、電子線照射によるカーボン電極は放射線反応により高効率に表面酸化できるため、レドックスフロー電池の処理方法として適切であることを示した。加えて、シミュレーションにより境膜内の濃度変化が大きい点を明らかにし、連通マクロ孔径と圧力損失の関係を Kozeny-Carman 式の関係で整理した。シームレスカーボン電極については、負極側の限界電流がフルセルの限界電流に一致する点を示した。本研究の成果は高効率なレドックスフロー電池の設計に必要な学術的基盤となるものである。

<謝辞>

本研究を開始する際に、大阪大学の津島将司教授よりご支援をいただいた。また、放射線酸化反応を行うにあたり、量子科学技術研究機構の山本春也博士、越川博博士、岡崎広之博士よりご支援をいただいた。アイオン株式会社からはサンプルのご提供をいただいた。記して感謝申し上げます。

<引用文献>

- [1] J. Maruyama, T. Hasegawa, S. Iwasaki, T. Fukuhara, and M. Nogami, *J. Electrochem. Soc.*, 160 (2013) A1293–A1298
- [2] K.J. Kim, M.S. Park, Y.J. Kim, J.H. Kim, S.X. Dou, and M. Skyllas-Kazacos, *J. Mater. Chem. A*, 3 (2015) 16913–16933
- [3] K. M. Tenny et al., *J. Electrochem. Energy Convers. Storage*, 17 (2020) 041010-1
- [4] 田部ら, 機論, 83 (2017) 16-00458
- [5] アイオン株式会社, 群馬大学, 特許第 6047799 号
- [6] T. Tagaya et al., *J. Electrochem. Soc.*, 167 (2020) 060523
- [7] H. Ishitobi et al., *Electrochim. Acta*, 313 (2019) 513–522
- [8] H. Ishitobi et al., *J. Electrochem. Energy Convers. Storage*, 17 (2020) 031001-1

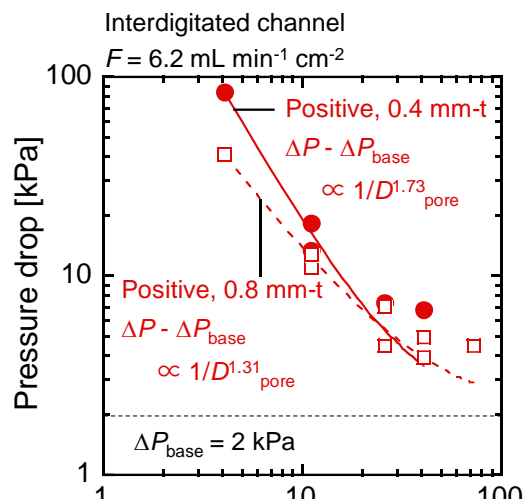


図 6 シームレスカーボン電極の連通マクロ孔径と圧力損失の関係。

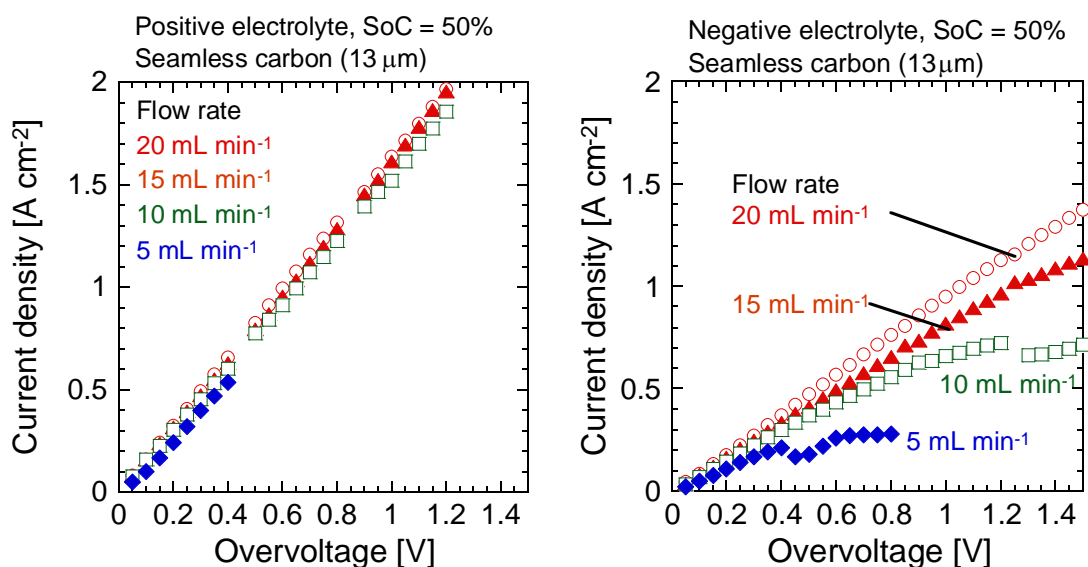


図 7 シームレスカーボン電極の対称セルにおける過電圧と電流密度の関係。(左) 正極液を用いた対称セル, (右) 負極液を用いた対称セル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hirokazu Ishitobi, Satoshi Sugawara, Kosuke Oba, and Nobuyoshi Nakagawa	4. 巻 38
2. 論文標題 Increased Current Density of a Redox Flow Battery with a Carbon Paper Partially Modified by Porous Carbon Nanofibers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Forum	6. 最初と最後の頁 31-37
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/www.scientific.net/AEF.38.31	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 Ishitobi Hirokazu, Sugawara Satoshi, Oba Kosuke, Hirano Takumi, Doki Honoka, Handa Yusuke, Sato Yuma, Yamamoto Shunya, Nakagawa Nobuyoshi	4. 巻 17
2. 論文標題 Highly Active Electrode With Efficiently Added Surface Oxygen Groups for a Vanadium Redox Flow Battery	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage	6. 最初と最後の頁 031001-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4044959	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 Ishitobi Hirokazu, Saito Jin, Sugawara Satoshi, Oba Kosuke, Nakagawa Nobuyoshi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Visualized cell characteristics by a two-dimensional model of vanadium redox flow battery with interdigitated channel and thin active electrode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.electacta.2019.04.055	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19件（うち招待講演 6件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Hirokazu Ishitobi
2. 発表標題 Activity and flow in carbon electrodes for vanadium redox flow batteries
3. 学会等名 International Chemical Engineering Symposia 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣崎由理香, 石飛宏和, 寺本一憲, 塚田豪彦, 富田夏美, 中川紳好
2. 発表標題 カーボン固定電極/カーボンスラリー電極による容量可変キャパシタ
3. 学会等名 第23回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石飛宏和, 白石壮志, 塚田豪彦, 富田夏美, 土岐帆乃佳, 中川紳好
2. 発表標題 均一な連通マクロ孔構造を有するカーボン電極を用いるレドックスフロー電池
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石飛宏和, 白石壮志, 塚田豪彦, 富田夏美, 土岐帆乃佳, 中川紳好
2. 発表標題 深さ方向・面内方向の両方に均一な連通マクロ孔構造を持つカーボン電極のレドックスフロー電池への適用
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirokazu Ishitobi, Shunya Yamamoto, Takafumi Ishii, Kosuke Oba, Honoka Doki, and Nobuyoshi Nakagawa
2. 発表標題 Enhancement of Electrochemical Activity of Vanadium Redox Flow Battery by Electron-beam Irradiation
3. 学会等名 The Fifth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Honoka Doki, Hirokazu Ishitobi, Shunya Yamamoto, Kosuke Oba, Nobuyoshi Nakagawa
2. 発表標題 Activation of carbon electrode for vanadium redox flow battery by electron beam-irradiation
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCCHE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirokazu Ishitobi
2. 発表標題 Porous carbon materials as electrodes for redox flow batteries
3. 学会等名 International Chemical Engineering Symposia 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石飛宏和
2. 発表標題 レドックスフロー電池をはじめとする電気化学デバイスの炭素電極
3. 学会等名 CPC研究会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石飛宏和, 白石壮志, 塚田豪彦, 富田夏美, 土岐帆乃佳, 中川紳好
2. 発表標題 高活性なシームレスカーボン材料を電極とするレドックスフロー電池
3. 学会等名 電気化学会第87回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石飛宏和, 白石壮志, 塚田豪彦, 富田夏美, 土岐帆乃佳, 中川紳好
2. 発表標題 活性化したシームレスカーボン電極によるレドックスフロー電池の内部抵抗の低減
3. 学会等名 第46回炭素材料学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小幡隆亮, 土岐帆乃佳, 石飛宏和, 山本春也, 岡崎宏之, 中川紳好
2. 発表標題 バナジウムレドックスフロー電池に用いるカーボン電極の活性に電子線照射条件が与える影響
3. 学会等名 第22回化学工学会学生発表会(東京大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石飛宏和
2. 発表標題 反応・輸送の高速化を目的としたレドックスフロー電池材料の機能化
3. 学会等名 第110回複合材料懇話会講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirokazu Ishitobi, Jin Saito, Satoshi Sugawara, Kosuke Oba, and Nobuyoshi Nakagawa
2. 発表標題 Kinetic Phenomena in Vanadium Redox Flow Battery
3. 学会等名 69th annual meeting of the international society of electrochemistry(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石飛宏和
2. 発表標題 材料・電極構造に着目したバナジウムレドックスフロー電池の大電流化
3. 学会等名 スマートエンジニアリングTOKYO2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Oba, Syunya Yamamoto, Hirokazu Ishitobi, Hiroshi Koshikawa, Tetsuya Yamaki, Honoka Doki, and Nobuyoshi Nakagawa
2. 発表標題 Performance of vanadium redox flow battery with electron-beam-irradiated electrode
3. 学会等名 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土岐帆乃佳, 大場晃介, 石飛宏和, 山本春也, 中川紳好
2. 発表標題 電子線照射電極によるバナジウムレドックスフロー電池の大電流化
3. 学会等名 第21回化学工学会学生発表会(東京大会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石飛宏和, 菅原諭, 大場晃介, 平野拓海, 土岐帆乃佳, 飯田裕介, 中川紳好
2. 発表標題 空気酸化したレドックスフロー電池材料の分析および電池特性
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石飛宏和, 大場晃介, 菅原諭, 中川紳好
2. 発表標題 空気酸化温度とレドックスフロー電池の電流-電圧特性の関係
3. 学会等名 化学工学会室蘭大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大場晃介, 山本春也, 石飛宏和, 越川博, 八巻徹也, 土岐帆乃佳, 中川紳好
2. 発表標題 電子線照射カーボンクロスを用いたレドックスフロー電池の性能評価
3. 学会等名 化学工学会室蘭大会2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 石飛宏和	4. 発行年 2020年
2. 出版社 CPC研究会	5. 総ページ数 9
3. 書名 レドックスフロー電池におけるカーボン多孔性電極, 炭素材料の研究開発動向2020	

1. 著者名 (分担執筆) 石飛宏和	4. 発行年 2019年
2. 出版社 三恵社	5. 総ページ数 310
3. 書名 進化する燃料電池・二次電池 反応・構造・製造技術の基礎と未来社会を支える電池技術	

1. 著者名 (解説, 分担) 石飛宏和	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 7
3. 書名 レドックスフロー電池用途のシームレスカーボン材料の活性・液体透過性の向上, 月刊ファインケミカル	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 レドックスフロー電池用電極及びその製造方法	発明者 塚田豪彦, 富田夏美, 石飛宏和, 白石壮志, 土岐帆乃佳,	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/043589	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------