

革新的 GX 技術創出事業(GteX) チーム型研究
「水素」領域
年次報告書

令和 6 年度
研究開発年次報告書

令和 6 年度採択研究開発代表者(チームリーダー)

[研究開発代表者(チームリーダー)名:高鍋 和広]

[東京大学大学院工学系研究科・教授]

[研究開発課題名:グリーン水素製造用革新的水電解システムの開発]

実施期間 : 令和 6 年 4 月 1 日～令和 7 年 3 月 31 日

§1. 研究開発実施体制

(1)「極 pH 水電解」グループ

① グループ参画者:

グループリーダー: 中村 龍平 (理化学研究所環境資源科学研究センター、チームディレクター)

主たる共同研究者: 加藤 善大 (東北工業大学工学部、教授)
内田 さやか (東京大学大学院総合文化研究科、教授)
山口 和也 (東京大学大学院工学系研究科、教授)
鎌田 慶吾 (東京科学大学総合研究院、教授)
南本 大穂 (神戸大学大学院工学研究科、講師)

② 研究項目

- ・PEMWE 電極材料の低貴金属化
- ・電極触媒の安定性を決める構造因子と劣化機構の特定
- ・ポーラストランスポートレイヤー(PTL)の低貴金属化
- ・AWE のオン・オフの繰り返しで発生する逆電流で活性低下する原因解明

(2)「中性・海水電解」グループ

① グループ参画者:

グループリーダー: 高鍋 和広 (東京大学大学院工学系研究科、教授)

主たる共同研究者: 坂牛 健 (物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究センター、チームリーダー)

松田 翔一 (物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究センター、チームリーダー)

TUNG Vincent (東京大学大学院工学系研究科、教授)

中山 哲 (東京大学大学院工学系研究科、教授)

吉田 真明 (山口大学大学院創成科学研究科、准教授)

BADR Sara (東京大学大学院工学系研究科、准教授)

西岡 季穂 (京都大学大学院工学研究科、助教)

門脇 万里子 (物質・材料研究機構構造材料研究センター、主任研究員)

② 研究項目

- ・多様な水源利用の水電解システム構築
- ・溶液抵抗の低減と拡散定数の向上

- ・水溶液特性(粘度、伝導率など)の計算による定量化
- ・隔膜材料を含めた単セル評価
- ・Life Cycle Assessment (LCA 評価)

(3)「AEMWE・電解膜」グループ

① グループ参画者:

グループリーダー: 宮武 健治 (山梨大学大学院総合研究部、教授)
 主たる共同研究者: 徳増 崇 (東北大学流体科学研究所、教授)
 國本 雅宏 (早稲田大学理工学術院、准教授)
 忠永 清治 (北海道大学大学院工学研究院、教授)

② 研究項目

- ・革新的 AEM の合成
- ・有機無機複合アニオン膜の作製
- ・アニオン膜および触媒界面の解析とシミュレーション
- ・膜への触媒コーティング技術等の確立
- ・AEMWE セル評価

(4)「界面解析デザイン」グループ

① グループ参画者:

グループリーダー: 山内 美穂 (九州大学先端物質化学研究所、教授)
 主たる共同研究者: 石元 孝佳 (広島大学大学院先進理工系科学研究科、教授)
 竹口 雅樹 (物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究センター、主席研究員)
 村越 敬 (北海道大学大学院理学院理学研究院、教授)
 武次 徹也 (北海道大学大学院理学院理学研究院、教授)

② 研究項目

- ・各種スペクトロスコピー手法の確立と測定
- ・電子顕微鏡による固液界面オペランド観察
- ・計算化学やデータ同化手法による材料探索および反応機構解明

§2. 研究開発成果の概要

GteX 水素領域で水素製造を担当する本チームは、プロトン交換膜 (PEMWE)、アルカリ水 (AWE)、アニオン交換膜 (AEMWE)、中性・海水電解の 4 つの水電解 (WE) システムに関して、4 つの研究グループが協力して研究を進めている。

まず、PEMWE においては、酸素発生電極に希少元素である Ir(イリジウム)が使われており、その使用量の大幅な低減が求められている。本年度は Ir の使用量が 0.1 mg/cm^2 以下の極微量で、Ir を 6 価に高分散できる特殊な複合酸化物を開発し、優れた電流-電位特性および長期安定性を確認することに成功した。現在、この低い Ir 触媒量を変化させて活性および耐久性にどのような影響があるか検討を詳細に行っている。今後は再エネ利用に付随する変動電力への耐性についても検討を進める。また、脱 Ir に向けて強酸中でも比較的安定・安価な金属酸化物を見出しており、今後、そのような材料の合成を試みる。

AEMWE の研究では、高アニオン伝導率と高化学安定性、高機械強度を兼ね備えた高分子構造および無機材料との複合化を用いて電解質膜設計を行い、電解特性評価も行った。膜の官能基の最適化により 150 mS/cm を超える高い伝導率を達成した。また、膜、アイオノマーと電極の相互作用を計算科学により解明し、膜中の水の挙動を分光手法を用いて明らかにして、膜電極接合体(MEA)の最適化を進めた。現状で電流密度 1 A/cm^2 を 1.61 V で達成し、世界最高クラスの電解性能を得た。今後はさらなる膜伝導率および耐久性の向上を目指す。

中性・海水電解の研究では、強酸・強アルカリでない非極 pH の水を用いることでステンレスのような極めて安価な材料が利用できる可能性があるが、反応による pH 勾配を緩和できる高い伝導率を有する電解質開発が鍵となっている。本年度はロボット自動実験とデータ科学手法を組み合わせ大量のデータベース構築と電解質組成の予測に成功した。この複合緩衝イオンの組み合わせで AWE 用 KOH 電解液の半分の伝導率を達成した。また反応物として競合する塩化物イオン存在下でも酸素を選択的に発生できる非極 pH の電解質と電極材料の組み合わせを見出した。これにより、超純水製造を必要としない海水の簡易処理による電解利用に目途をつけた。

【代表的な原著論文情報】

1. Beyond single-molecule chemistry for electrified interfaces using molecule polaritons
Nobuaki Oyamada, Hiro Minamimoto, Tomohiro Fukushima, Ruifeng Zhou, Kei Murakoshi, Bull. Chem. Soc. Jpn. 2024, 97, uoae007
2. Aryl ether-free polymer electrolytes for electrochemical and energy devices
Eun Joo Park, Patric Jannasch, Kenji Miyatake, Chulsung Bae, Kevin Noonan, Cy Fujimoto, Steven Holdcroft, John R. Varcoe, Dirk Henkensmeier, Michael D. Guiver, Yu Seung Kim, Chem. Soc. Rev. 2024, 53, 5704-5780
3. Atomically dispersed hexavalent iridium oxide from MnO_2 reduction for oxygen evolution catalysis
Ailong Li, Shuang Kong, Kiyohiro Adachi, Hideshi Ooka, Kazuna Fushimi, Qike Jiang, Hironori Ofuchi, Satoru Hamamoto, Masaki Oura, Kotaro Higashi, Takuma Kaneko, Tomoya Uruga, Naomi Kawamura, Daisuke Hashizume, Ryuhei Nakamura, Science 2024, 384, 666-670
4. Impact of gas bubble slug on high-frequency resistance and cell voltage in water electrolysis device
Huihang Qiu, Keisuke Obata, Kensei Tsuburaya, Takeshi Nishimoto, Keisuke Nagato, Kazuhiro Takanabe, J. Power Sources, 2024, 611, 234765
5. High-performance anion exchange membrane water electrolyzers enabled by highly gas permeable and dimensionally stable anion exchange ionomers
Fanghua Liu, Kenji Miyatake, Masako Tanabe, Ahmed Mohamed Ahmed Mahmoud, Vikrant Yadav, Lin Guo, Chun Yik Wong, Fang Xian, Toshio Iwataki, Makoto Uchida, Katsuyoshi Kakinuma, Adv. Sci., 2024, 11, 2402969
6. Incorporation of poly(vinyl alcohol) into an inorganic framework based on Eu-bonded preyssler-type phosphotungstate for enhanced proton conduction
Tsukasa Iwano, Sora Shirai, Chaoqui Chen, Zhewei Weng, Yuji Kikukawa, Satoshi Muratsugu, Mizuki Tada, Hiroshi Takatsu, Hiroshi Kageyama, Sayaka Uchida, ACS Applied Polymers Materials, 2024, 6, 7926-7931
7. Facile preparation of graphene-graphene oxide liquid cells and their application in

- liquid-phase STEM imaging of Pt atoms
Masaki Takeguchi, Kazutaka Mitsuishi, Ayako Hashimoto, Appl. Phys. Express, 2024, 17, 85001
8. Tuning proton conduction by staggered arrays of polar preyssler-type oxoclusters
Tsukasa Iwano, Daiki Akutsu, Yuji Kikukawa, Hiroshi Kageyama, Likai Yan, Sayaka Uchida, J. Am. Chem. Soc. 2024, 146, 26113-26120
 9. Preparation of fluorine-doped α -Ni hydroxides as alkaline water electrolysis catalysts via the liquid phase deposition method
Tomoyuki Watanabe, Kenko Tsuchimoto, Tomohiro Fukushima, Kei Murakoshi, Minoru Mizuhata, Hiro Minamimoto, Sustainable Energy Fuels, 2024, 8, 4813-4819
 10. Poly(arylene piperidinium) terpolymer membranes with dual piperidinium cations and semi-fluoroalkyl pendants for anion exchange membrane water electrolyzers
Vikrant Yadav, Kenji Miyatake, Ahmed Mohamed Ahmed Mahmoud, Fanghua Liu, Fang Xian, Lin Guo, Chun Yik Wong, Toshio Iwataki, Makoto Uchida, Katsuyoshi Kakinuma, J. Mater. Chem. A 2024, 12, 25429-25441
 11. Evaluation of hydrogen evolution activity by bubbles growth rates as descriptor
Daiki Sato, Nobuaki Oyamada, Tomohiro Fukushima, Kei Murakoshi, J. Electroanal. Chem. 2024, 973, 118667
 12. Unlocking the potential of manganese oxide for acidic water electrolysis
Ailong Li, Shuang Kong, Ryuhei Nakamura, Innov. Mater. 2024, 2, 100094
 13. Polyphenylene-based anion exchange membranes with robust hydrophobic components designed for high-performance and durable anion exchange membrane water electrolyzers using non-pgm anode catalysts
Fanghua Liu, Kenji Miyatake, Ahmed Mohamed Ahmed Mahmoud, Vikrant Yadav, Fang Xian, Lin Guo, Chun Yik Wong, Toshio Iwataki, Yuto Shirase, Katsuyoshi Kakinuma, Makoto Uchida, Adv. Energy Mater. 2024, 2404089
 14. Microkinetic model to rationalize the lifetime of electrocatalysis: Trade-off between activity and stability
Hideshi Ooka, Marie E. Wintzer, Hirokazu Komatsu, Tomoharu Suda, Kiyohiro Adachi, Ailong Li, Shuang Kong, Daisuke Hashizume, Atsushi Mochizuki, Ryuhei Nakamura, J. Phys. Chem. Lett. 2024, 15, 10079-10085
 15. Effect of Ta-TiO₂ nanoparticles in anion exchange membranes for improving hydroxide ion conductivity and mechanical strength
Ahmed Mohamed Ahmed Mahmoud, Kenji Miyatake, Kaito Tsujii, Katsuyoshi Kakinuma, Fanghua Liu, Vikrant Yadav, Fang Xian, Lin Guo, Chun Yik Wong, Toshio Iwataki, Makoto Uchida, Macromol. Chem. Phys. 2024, 2400226
 16. Porous substrate optimization for efficient water electrolysis: Uncovering electrocatalysts, electrolyte, and bubble dynamics effects
Kensei Tsuburaya, Keisuke Obata, Keisuke Nagato, Kazuhiro Takanabe, ACS Sustainable Chem. Eng. 2024, 2024, 12, 16308-16319
 17. Raman spectroscopic observation of electrolyte-dependent oxygen evolution reaction intermediates in nickel-based electrodes
Tomohiro Fukushima, Kenko Tsuchimoto, Nobuaki Oyamada, Daiki Sato, Hiro Minamimoto, Kei Murakoshi, J. Phys. Chem. C, 2024, 128, 20156-20164
 18. Effects of dissolved 3d-block metal ions on PEM water electrolysis performance
Shuang Kong, Kazuna Fushimi, Ailong Li, Ryuhei Nakamura, Chem. Commun., 2024, 60, 14621-14624
 19. Constructing two-dimensional, ordered networks of carbon-carbon bonds with precision
Jui-Han Fu, De-Chian Chen, Yen-Ju Wu, Vincent Tung, ACS Precision Chem. 2025, 3, 3-9
 20. Poly(fluorene)-based anion exchange membranes for high-performance and durable

- alkaline water electrolyzers: effect of the pendent ammonium structure
 Vikrant Yadav, Kenji Miyatake, Ahmed Mohamed Ahmed Mahmoud, Fanghua Liu,
 Fang Xian, Lin Guo, Chun Yik Wong, Toshio Iwataki, Makoto Uchida, Katsuyoshi
 Kakinuma, *Energy Fuels* 2025, 39, 1418-1431
21. Deciphering pH mismatching at the electrified electrode–electrolyte interface
 towards understanding intrinsic water molecule oxidation kinetics
 Miao Wang, Ken Sakaushi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2025, 64, e202419823
 22. Mass activity elucidation of cobalt-based oxygen evolution catalysts utilizing depth-
 resolved spectroscopy in the presence of various cations with chloride
 Hiroki Komiya, Keisuke Obata, Oki Sekizawa, Kiyofumi Nitta, Ke Xu, Melody Wada,
 Kazuhiro Takanabe, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2025, 64, e202501579
 23. Effect of biphenyl groups on the properties of poly(fluorenylidene piperidinium)
 based anion exchange membranes for applications in water electrolyzers
 Ahmed Mohamed Ahmed Mahmoud, Kenji Miyatake, Fanghua Liu, Vikrant Yadav,
 Fang Xian, Lin Guo, Chun Yik Wong, Toshio Iwataki, Makoto Uchida, Katsuyoshi
 Kakinuma, *Polym. Chem.* 2025, in press.
 24. Enhancing the oxygen evolution reaction by tuning the electrode–electrolyte
 interface in nickel-based electrocatalysts
 Ben Wang, Tomohiro Fukushima, Hiro Minamimoto, Andrey Lyalin, Kei Murakoshi,
 Tetsuya Taketsugu, *Commun. Chem.* 2025, 8, 109.