NEDO水素・アンモニア成果報告会2025
発表No.P1-3

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業/水素利用等高度化先端技術開発/出力変動対応、高電流密度域利用、高圧水素製造を可能とする高性能アニオン交換膜型水電解の研究開発

団体名：国立大学法人東京科学大学 (再委託) 国立大学法人東京農工大学
発表日：2025年7月15日

事業概要

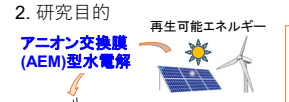
期間：2023年6月～2025年3月

1. 最終目標

・貴金属をできる限り利用せず、出力変動する再生可能エネルギーから高効率に水素製造が可能であり、高電流密度域まで利用でき、**30気圧までの高圧水素製造**を可能とするアニオン交換膜型水電解の材料及び膜電極接合体(MEA)を開発。
・**卑金属アノード・カソード触媒＋AEMを用いた水電解セルにおいて、3.0 A/cm²で電圧2.2 V以下**の達成。

2. 研究目的

アニオン交換膜(AEM)型水電解

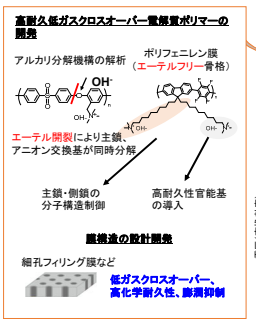


○ 高純度
△ 高圧水素製造
○ 高効率
○ コスト
アルカリ環境への変更
⇒ コストの大幅低下が期待

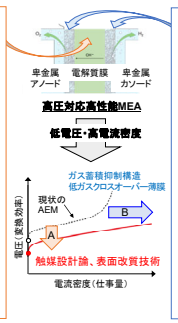
AEM水電解セルの課題
■ アルカリ環境・高電位運転でのAEM、及び触媒の高耐久化
■ 卑金属触媒の高活性化
■ 電解効率向上、変動電源に対する高耐久化
■ 高圧水素製造への対応

① AEM開発

高耐久低ガスクロスオーバー電解質ポリマーの開発

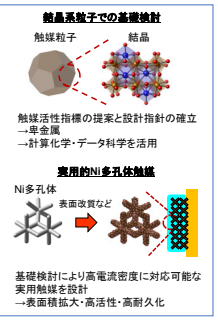


④ MEA開発



② アノード触媒、③カソード触媒開発

結晶系粒子での基礎検討



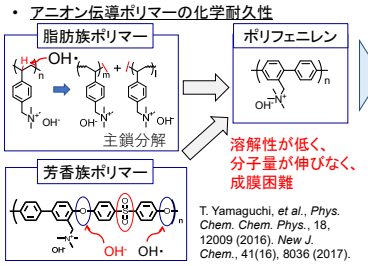
3. 本事業における成果の概要

開発項目	顕著な成果
① 低ガスクロスオーバー・高耐久AEMの開発	• **高耐久な官能基構造**を提案し、**8 M KOH水溶液中 80℃、 240時間分解率1%以内**を達成。 • **ポリフェニレン主鎖側鎖分子構造**を制御し、**機械的な伸び率を大きく改善**。 • **ポリフェニレン主鎖側鎖分子構造**を制御し、**H_2ガス透過性を幅広く調整**。 • ポリフェニレン系ポリマーを用いた**高圧用細孔フィリング厚膜**を開発。
② 高性能・卑金属アノード触媒の開発	• 開発した**Fe系MOF触媒**において、**無機酸化物よりも1~2桁高いOER比活性**を確認。 • **結晶系リン酸化物触媒**を開発し、**OER過電圧0.28 V** (@10 mA/cm²)を達成。 • 開発したNi系触媒において、OER比活性の序列：**リン酸化物 ＞ リン化物 ＞ 酸化物**を確認。
③ 高性能・卑金属カソード触媒の開発	• 電着法を用いて、**Ni多孔体表面を卑金属酸化物で修飾**したHER触媒を開発。 • 開発した卑金属触媒において、最終目標を超える**HER過電圧0.096 V** (@10 mA/cm²)を達成。
④ 高性能MEAの設計・開発及び高圧水素製造の実証	• **高表面積卑金属アノード触媒**を開発し、開発した触媒を用いたMEAにおいて、**1.9 V at 3.0 A/cm²**を達成。 • 実験データからパラメータを取得し、**水電解MEA性能を予測するモデルを構築**。モデル計算から材料開発の設計指針を獲得。 • 高圧下でのガスクロスオーバー量を評価する**ガスクロマトグラフィー一体型水電解装置**を構築。**0.8 MPa下での水電解試験を実証**。

①低ガスクロスオーバー・高耐久AEMの開発

T. Yamaguchi, *et al., Polym. Chem.*, 11, 3812-3820, (2020).

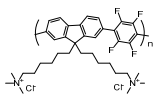
• アニオン伝導ポリマーの化学耐久性



T. Yamaguchi, *et al., Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18, 12009 (2016). *New J. Chem.*, 41(16), 8036 (2017).

主鎖のエーテル基の開裂を介して骨格・アニオン交換基が両方分解する劣化機構を解明

• 高分子量エーテルフリーポリフェニレン系AEM



PFT-Cx-TMA

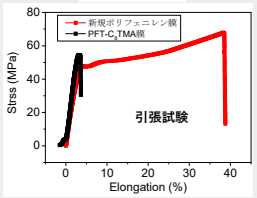
- OH⁻伝導性: 100 mS/cm以上 (70℃、水中)
- 水素透過性: Nafionの1/2～1/8
- アルカリ耐久性 (8 M NaOH aq., 80℃, 168 h): イオン伝導度 88%保持
- ラジカル耐性 (フェントン試験, 80℃, 7 h): 重量 60%保持

- エーテルフリー骨格
- 高分子量 (M_w = *ca.* 20万)
- 高IEC (*ca.* 3 meq/g)
- 簡易な3ステップ合成
- 高溶解性・高機械強度

課題
- **アニオン交換基の高耐久化、耐久性の強化**
- **ガスバリア性の向上**

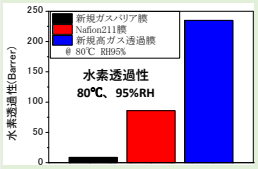
ポリフェニレン系AEMの分子構造制御

機械特性制御



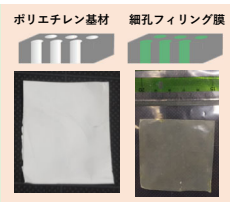
従来のポリフェニレン系AEMより機械的な伸び率を大きく改善

ガス透過性制御



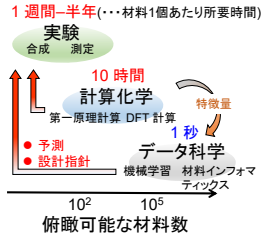
Nafion膜の1/9～3倍まで、幅広くガス透過性を制御

ポリフェニレン系AEMを充填した細孔フィリング膜



高圧水電解試験用の均一な細孔フィリング厚膜を開発
(104 μm厚、5 cm×5 cm)

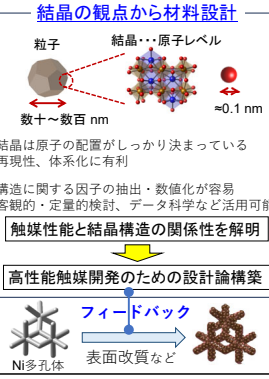
②,③ 触媒設計・開発スキーム



✓ 最適な構造や組成を予測し、設計指針を提供

◎ 効率的な材料開発を推進

結晶の観点から材料設計



結晶は原子の配置がしっかり決まっている再現性、体系化に有利

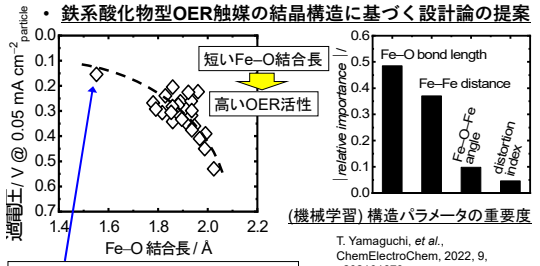
構造に関する因子の抽出・数値化が容易客観的・定量的検討、データ科学など活用可能

触媒性能と結晶構造の関係性を解明

高性能触媒開発のための設計論構築

② 高性能・卑金属アノード触媒の開発

• 鉄系酸化物型OER触媒の結晶構造に基づく設計論の提案



✓ 高活性触媒の迅速な探索に成功

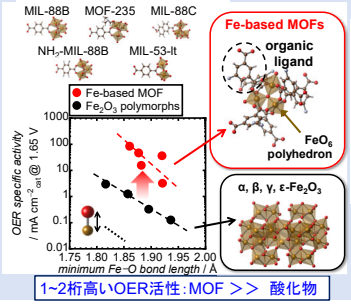
(機械学習) 構造パラメータの重要度

T. Yamaguchi, *et al.*, ChemElectroChem, 2022, 9, e202101679.

鉄系MOFへ探索を展開

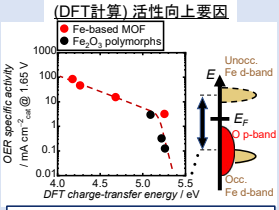
• Fe系MOF型OER触媒

T. Yamaguchi, *et al., Chem. Commun.*, 61, 8675–8678 (2025).



1~2桁高いOER活性：MOF ＞＞ 酸化物

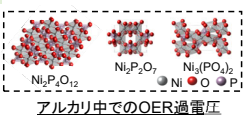
(DFT計算) 活性向上要因



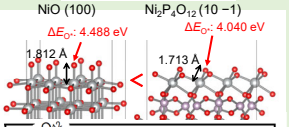
電荷移動エネルギー小さい程、OER活性向上
⇒ 無機酸化物でFeと結合するO²⁻と比べ、MOFでFeと結合する有機リガンドは電気陰性度が低く共有結合性が高い

リン酸化物へ探索を展開

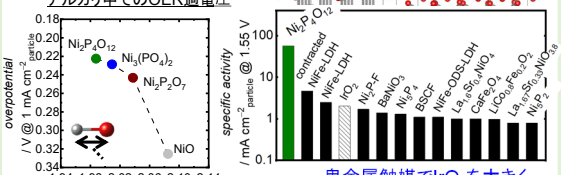
• Niリン酸化物型OER触媒



(DFT計算) O*吸着力



アルカリ中でのOER過電圧



卑金属触媒でIrO₂を大きく超えるOER活性を達成

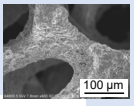
リン酸化物 ＞ リン化物 ＞ 酸化物

T. Yamaguchi, *et al., Nanoscale Adv.*, 7, 456–466 (2025).

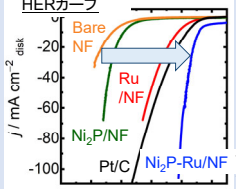
③ 高性能・卑金属カソード触媒の開発

• 低Ru修飾Ni多孔体

改質Niフォーム
(Ni_2P-Ru/NF)
低Ru 4 wt%



アルカリ中でのHERカーブ

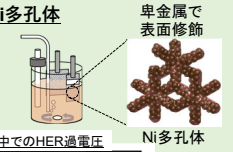


T. Yamaguchi *et al., Sustainable Energy Fuels*, 7(12), 2830-2840 (2023)

• 卑金属修飾Ni多孔体

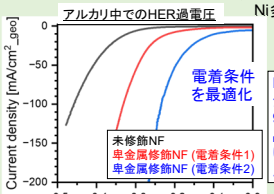
電気化学的表面改質

均一＆スケールアップ容易



Ruフリー化＆電着法

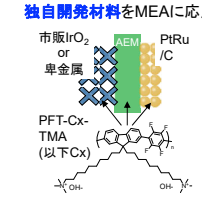
アルカリ中でのHER過電圧



Ruフリー卑金属触媒で96 mV(@10 mA/cm²)の低いHER過電圧を達成

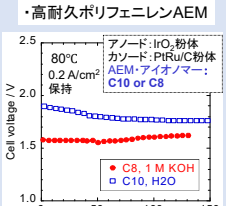
④ 変動電源・高電流密度域対応高性能MEAの設計開発、及び高圧水素製造の実証

独自開発材料をMEAに応用



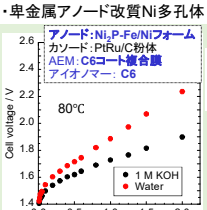
T. Yamaguchi, *et al., ACS Appl. Energy Mater.*, 4, 1053–1058 (2021). *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 11(3), 854–865 (2023)

・高耐久ポリフェニレンAEM



80℃、純水供給で高耐久

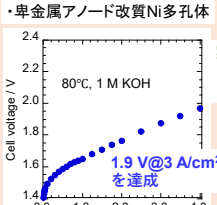
・卑金属アノード改質Ni多孔体



高耐久AEM＋卑金属アノード

アノード高表面積化

・卑金属アノード改質Ni多孔体

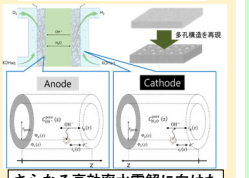


高耐久AEM＋高表面積卑金属アノード

実験データからパラメータを取得

・水電解性能予測モデルの構築

本グループ独自の物性・構造・反応が独立したMEAモデリング



さらなる高効率水電解に向けた材料開発指針を獲得

・高圧水素製造の実証

ガスクロマトグラフィー一体型水電解装置を構築

高圧での水電解試験を実証、及び高圧下でのアノードO_2中H_2濃度を評価

連絡先：東京科学大学　山口猛央
yamag@res.titech.ac.jp