

発表No. D-8

水素利用等先導研究開発事業/水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発/
高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発

発表者名 山口猛央

団体名 国立大学法人東京工業大学

再委託先 ノリタケカンパニーリミテド

発表日 2022年7月29日

連絡先：
東京工業大学 山口猛央
yamag@res.titech.ac.jp

事業概要

1. 期間

開始 : 2018年6月
終了 : 2023年3月

2. 最終目標

- ・プラント引渡し価格30円/Nm³に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた、材料高度化に関する指針や、変動電源に対する耐久性評価の手法確立。
- ・水電解性能として、**固体高分子形水電解では2 A/cm²で電圧1.63 V**、AEM型水電解では**アニオン交換膜を用いた水電解セルにおいて0.6 A/cm²で電圧1.65 V**の達成。

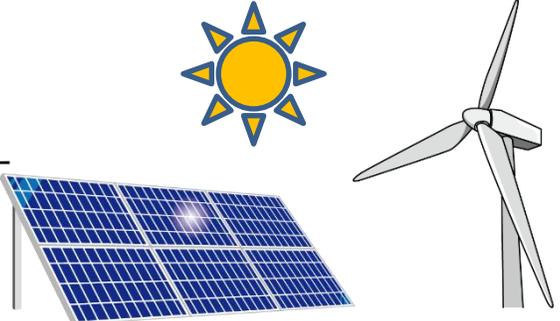
3. 成果・進捗概要

- ・ **固体高分子形水電解**：電解質膜として細孔フィリング型プロトン伝導性電解質膜、触媒として導電担体フリーかつ高表面積・高活性のIr系ナノ粒子連結触媒を開発した。Ir系ナノ粒子連結触媒を用いた水電解セルの電解性能を評価し、**低Ir担持量でも高性能**であることを示した。
- ・ **AEM型（固体アルカリ）水電解**：電解質膜として**高分子量ポリフェニレン系アニオン交換膜およびアイオノマー**、触媒として**卑金属触媒**を開発した。大幅なコスト削減が見込める**AEM型水電解**において、水電解セルとしての電解性能評価を行い、**性能と耐久性の両立に成功し、純水供給により、80℃で100時間以上にわたり高耐久性**を示す電解質膜・セルの開発に成功した。

1. 事業の位置付け・必要性

再生可能エネルギー由来の電力による水素製造

再生可能エネルギー

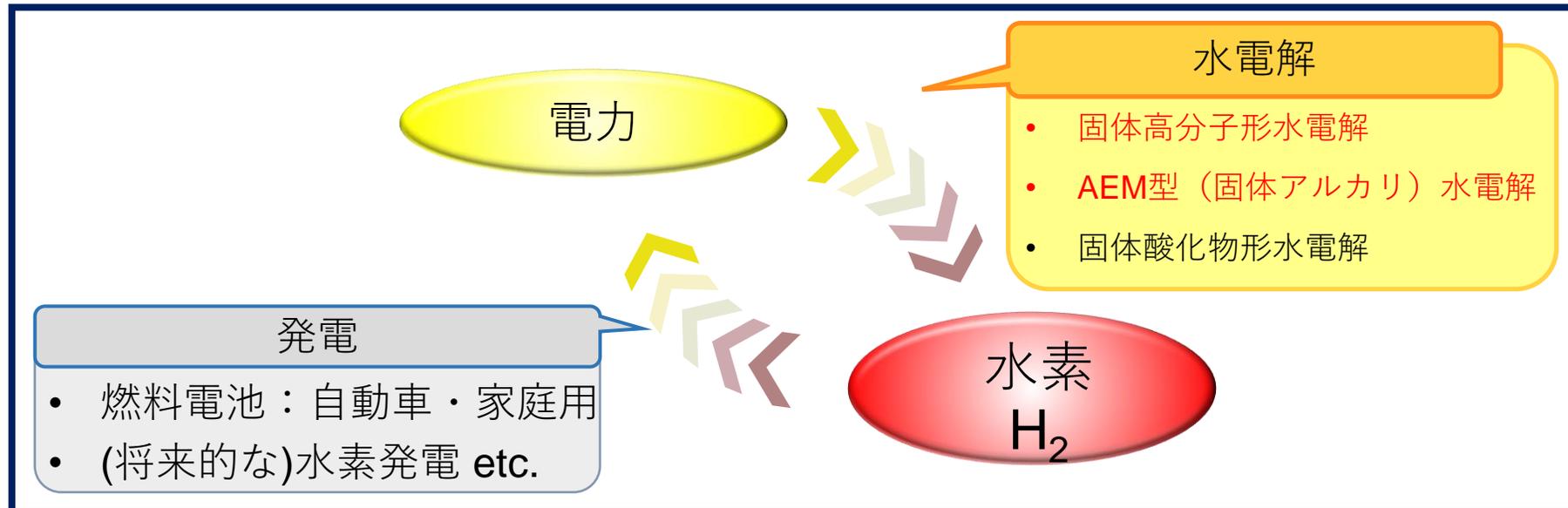


- ・ 海外の再生可能エネルギー
急激に価格低下
太陽電池, 風力発電 2 cent/kWh~

大きな負荷変動への追従が今後の課題

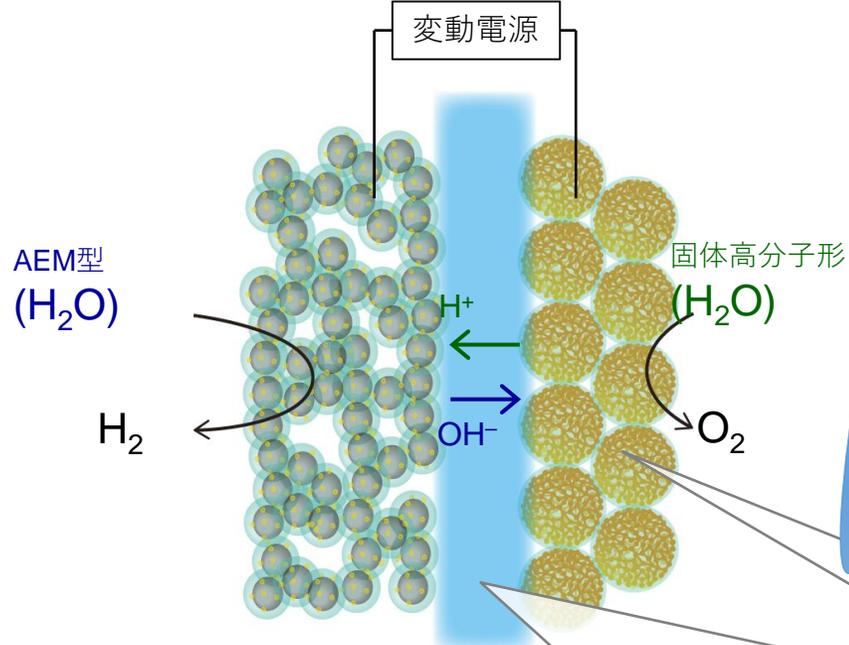
液体型

固体膜型



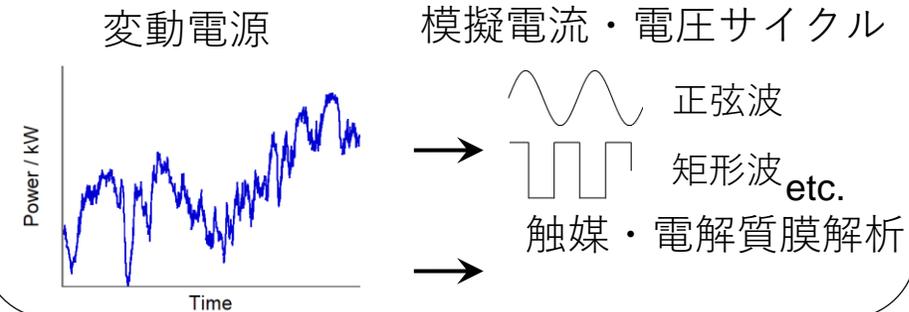
2. 研究開発マネジメントについて

- ・水電解技術の現状の課題を解決し、変動電源に対して高性能・高耐久な材料(電解質膜、触媒)およびセル最適化
- ・変動電源へ追従する高性能単セルの設計指針確立
- ・変動電源に対する劣化機構の解明によるセル高耐久化指針確立



① 固体電解質膜 (酸型、アルカリ型)
高い耐久性 (ラジカル耐性 + アルカリ耐性)
低いIR損失 (薄膜化)
低い水素クロスオーバー

④ 変動電源に対する耐久性評価・劣化解析



③ 変動電源に対する高性能水電解セル設計

MEA設計・開発
電気化学解析(電圧損失要因解明)

② 触媒 (酸型、アルカリ型)

高い触媒の耐久性
高い触媒活性 (大きな触媒表面積、少ない貴金属使用量)

3. 研究開発成果について__研究開発の目標と目標設定の考え方

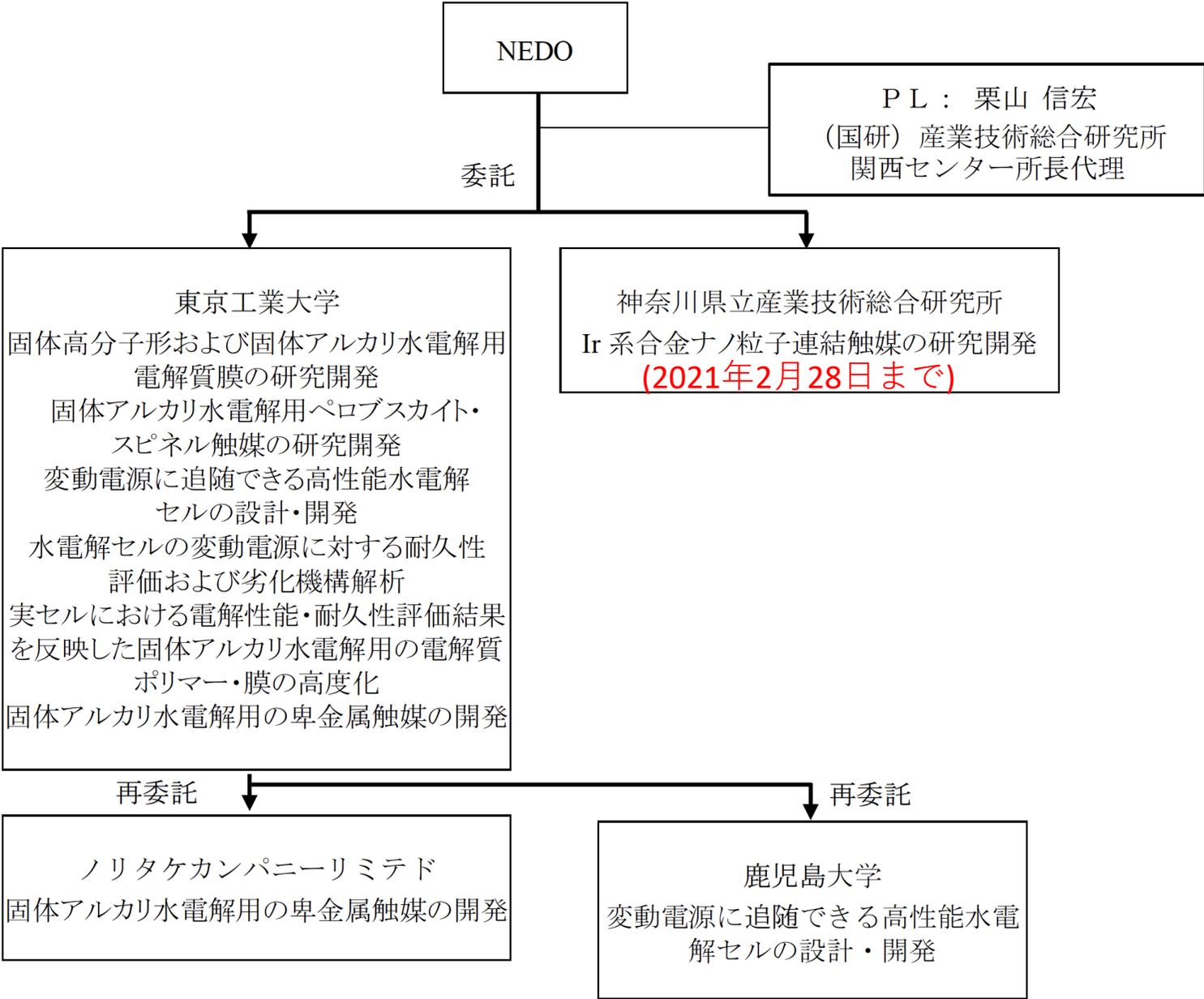
研究開発の最終目標(2022年度)

- ・ プラント引渡し価格30円/Nm³に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた、材料高度化に関する指針や、変動電源に対する耐久性評価の手法確立。
- ・ 水電解性能として、**固体高分子形水電解では2 A/cm²で電圧1.63 V**、AEM型水電解ではアニオン交換膜を用いた水電解セルにおいて**0.6 A/cm²で電圧1.65 V**の達成。

目標設定の考え方

- ・ 水素・燃料電池戦略ロードマップに記載されている2030年の水電解装置の目標*より設定。
 - * 固体高分子形水電解
システムエネルギー消費量**4.5 kWh/Nm³ (セル電圧で1.88 V相当)**、**セル電流密度2.5 A/cm²**
 - * アルカリ水電解(液体電解質型)
システムエネルギー消費量**4.3 kWh/Nm³ (セル電圧で1.80 V相当)**、**セル電流密度0.8 A/cm²**
- ・ 目標達成へ向けて、材料高度化に関する指針や、変動電源に対する耐久性評価の手法確立を目指す。

研究開発の実施体制



3. 研究開発成果について__研究開発の成果と意義

②固体高分子形およびAEM型水電解用触媒の研究開発

②-1 Ir系ナノ粒子連結触媒研究開発

③変動電源に追従できる高性能水電解セルの設計・開発

③-1 高性能固体高分子形水電解セルの開発

④水電解セルの変動電源に対する耐久性評価および劣化機構解析

④-1 固体高分子形水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析

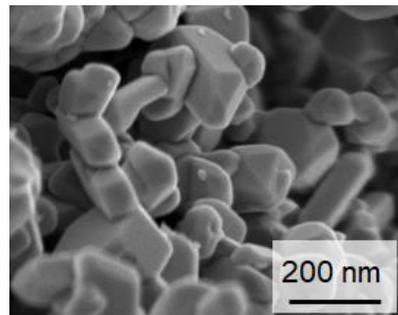
3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び成果の意義

②-1 Ir系ナノ粒子連結触媒研究開発

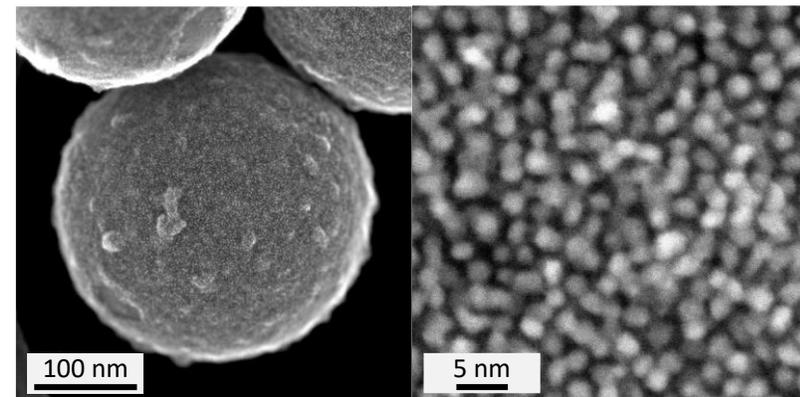
酸素発生極触媒：高腐食条件

× 担体(カーボン・Ti)が
使用不可

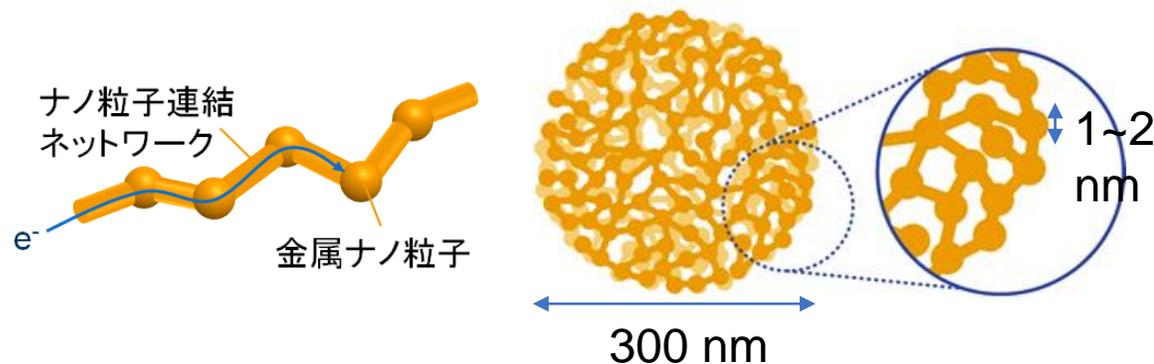


市販IrO₂触媒

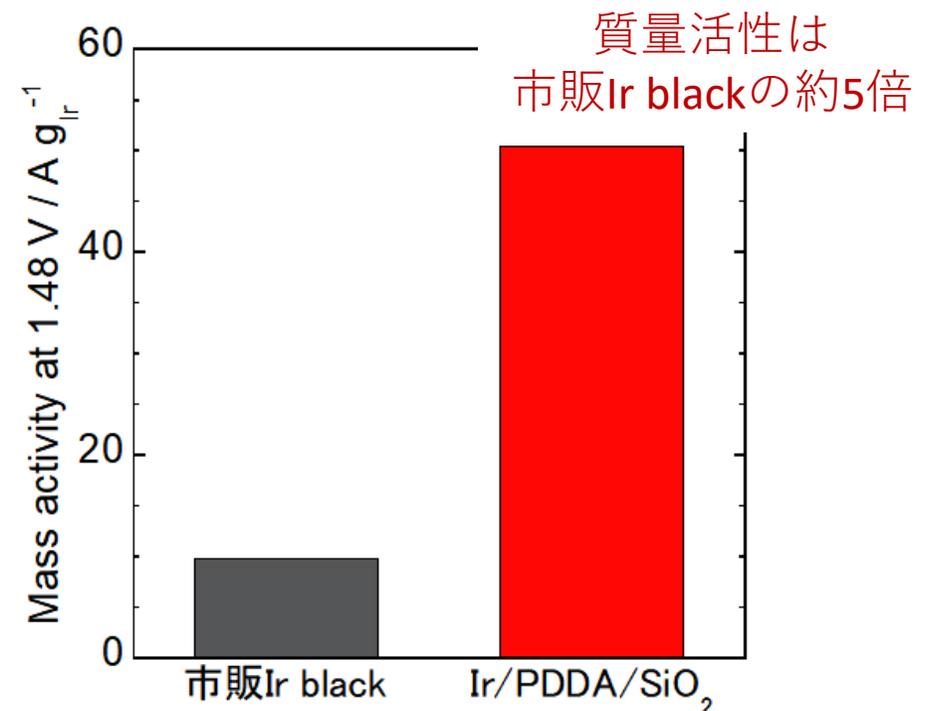
Ir ナノ粒子連結触媒 結晶子径 ~ 1.5 nm



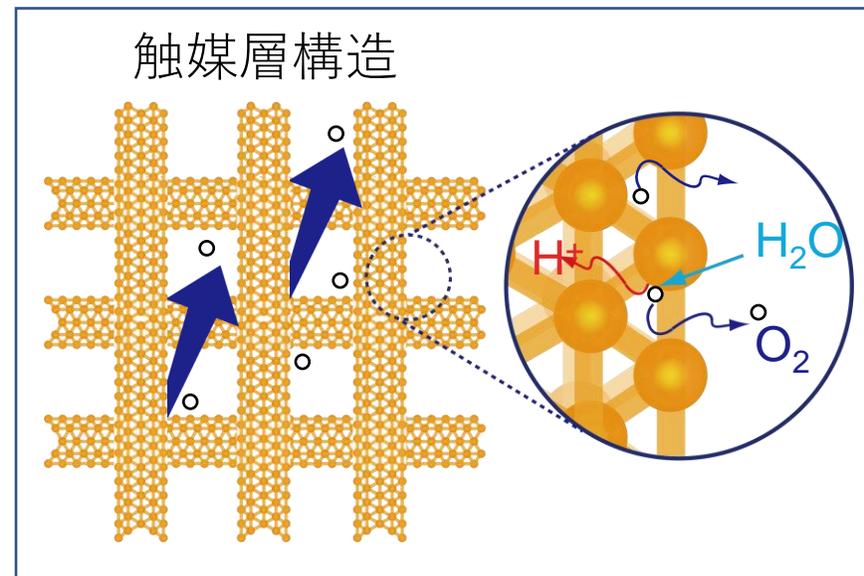
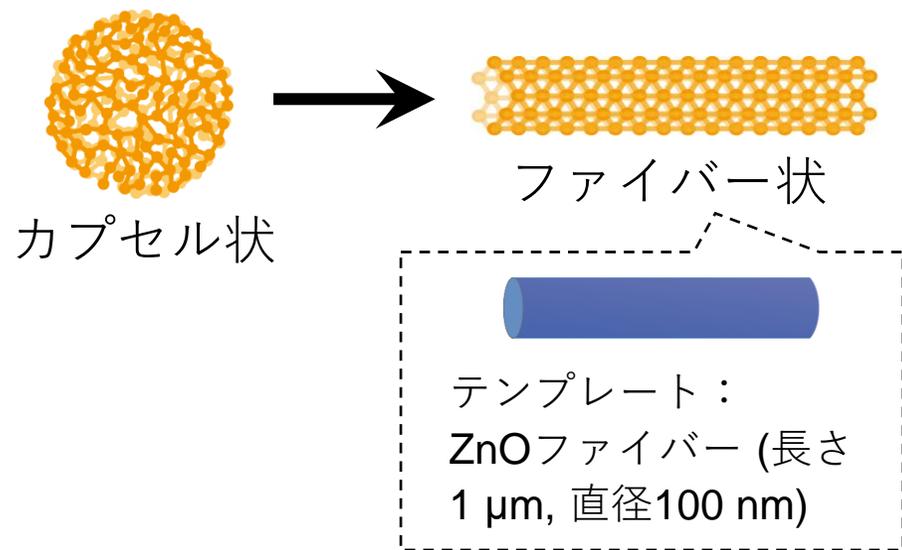
Irナノ粒子連結触媒



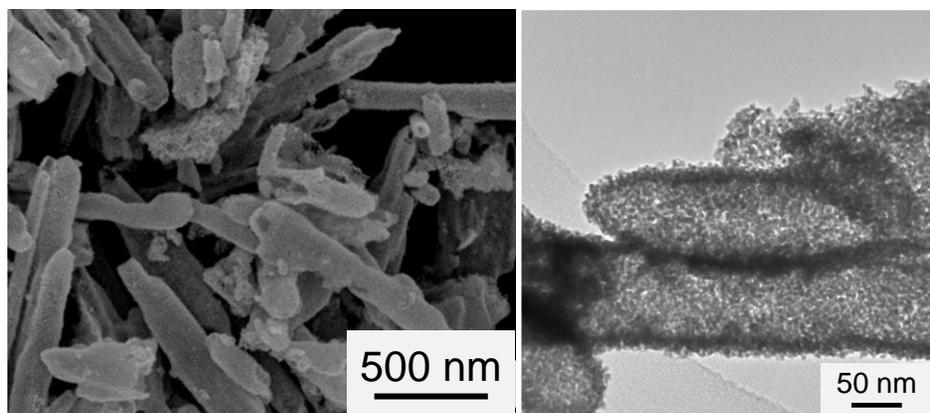
- 担体フリー
- 高表面積・高活性
- 高耐久



②-1 ファイバー状Irナノ粒子連結触媒

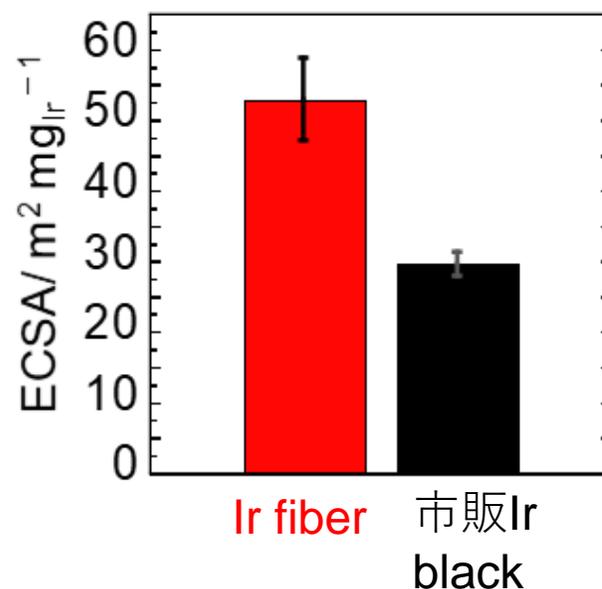


< SEM, TEM像 >

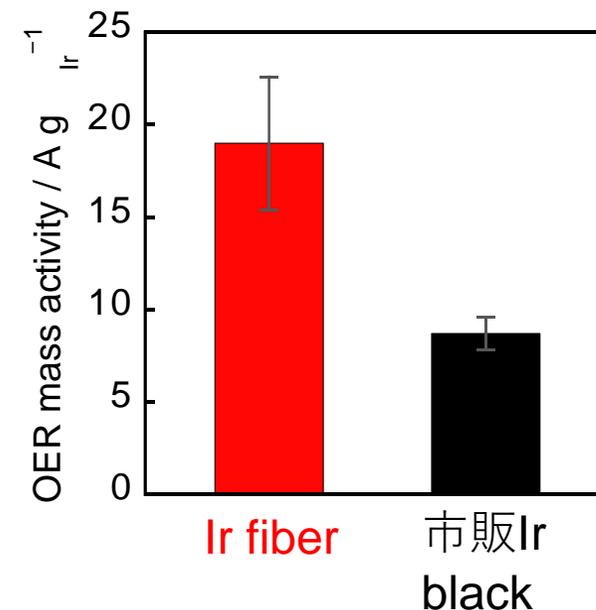


結晶子径 3~4 nmの緻密なネットワーク
⇒ 高表面積 **ECSA = ca. 50 m²/g_{Ir}**

< 表面積 >



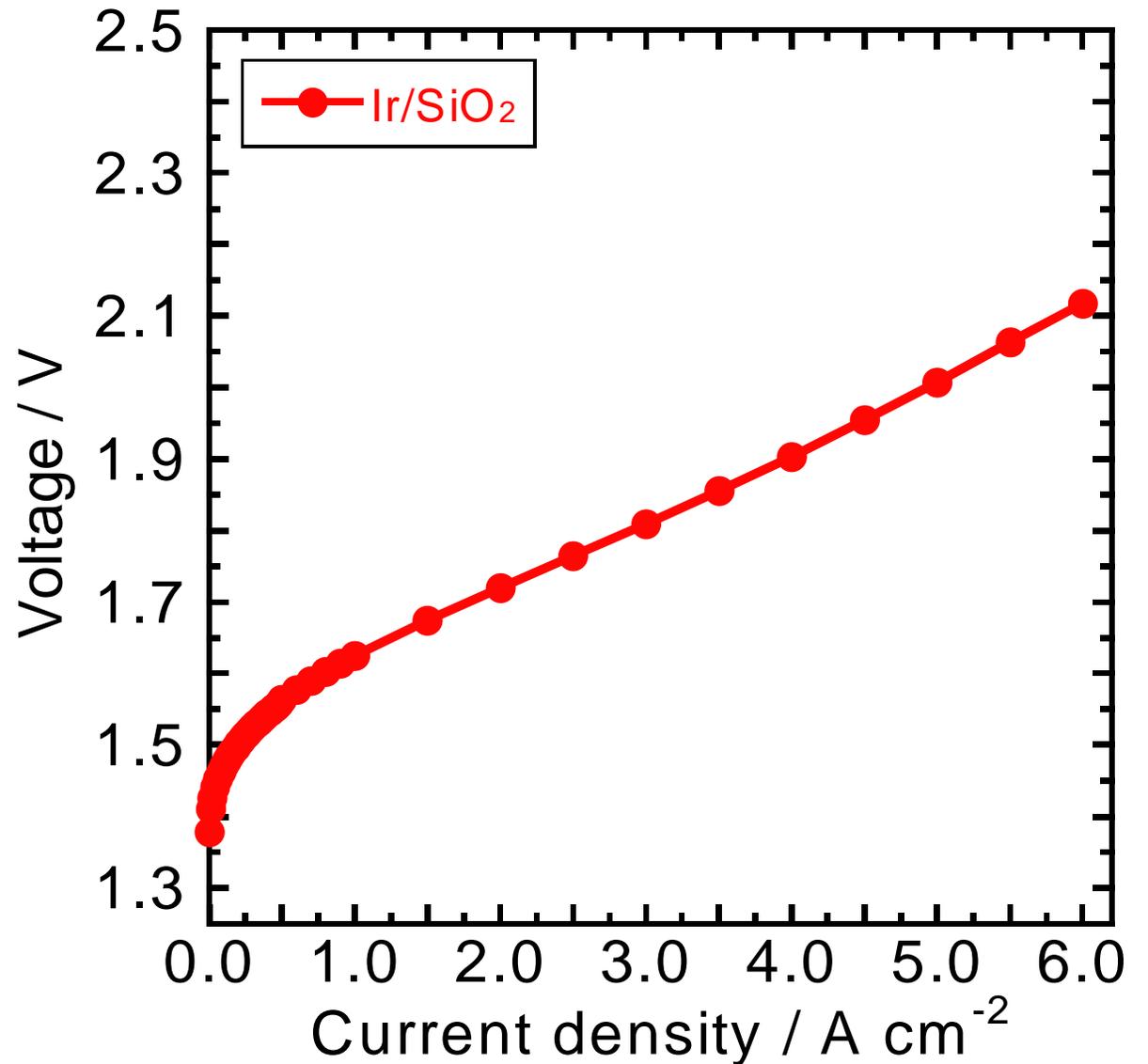
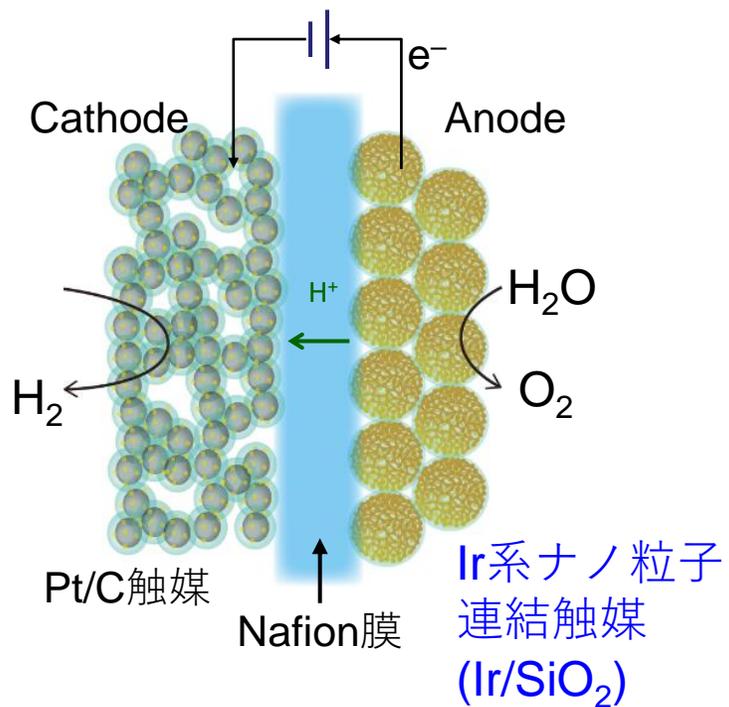
< OER質量活性 at 1.48V >



③-1. 固体高分子形水電解セル: 市販触媒との比較

水電解試験条件
Anode: H₂O, 10 mL/min
Cell temperature: 80 °C

Anode catalyst	Ir loading [mg _{-Ir} cm ⁻²]	IR-free voltage at 1 A cm ⁻² [V]
Ir/SiO ₂	0.3	1.55



3. 研究開発成果について__研究開発の成果と意義

① 固体高分子形およびAEM型水電解用電解質膜の研究開発

①-2 AEM型水電解用電解質膜の研究開発

③ 変動電源に追従できる高性能水電解セルの設計・開発

③-2 高性能AEM型水電解セルの開発

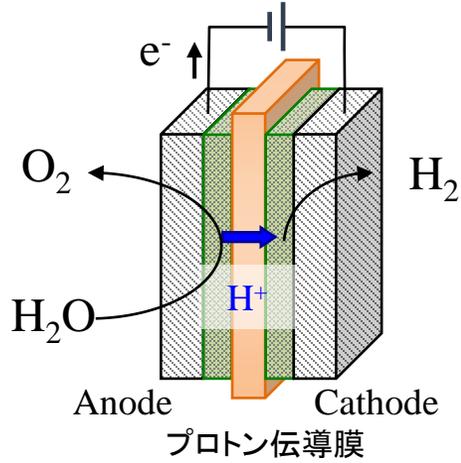
④ 水電解セルの変動電源に対する耐久性評価および劣化機構解析

④-2 AEM型水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析

⑤ 実セルにおける電解性能・耐久性評価結果を反映したAEM型水電解用の電解質ポリマー・膜の高度化

AEM型水電解への期待

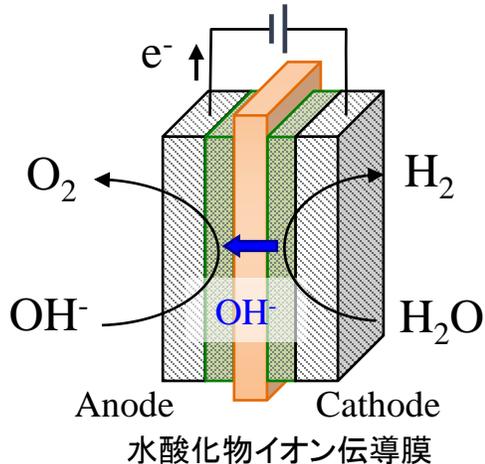
固体高分子形（酸性）



- 高純度
- 高圧水素製造
- 高効率

× コスト

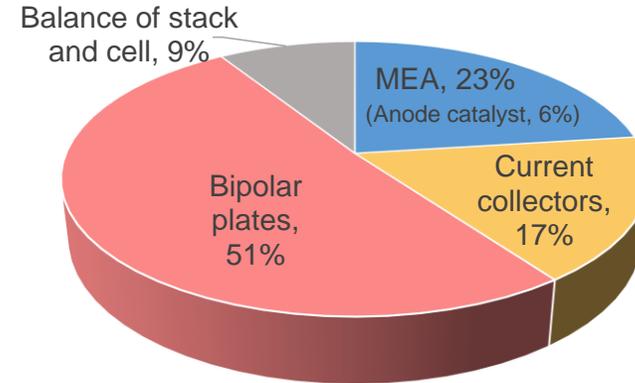
AEM型（アルカリ性）



- 高純度
- △ 高圧水素製造
- 高効率

○ コスト

スタックコスト*



セパレータ、集電体などアノードで
スタックコストの75%

高腐食：カーボン×
酸：多くの金属×

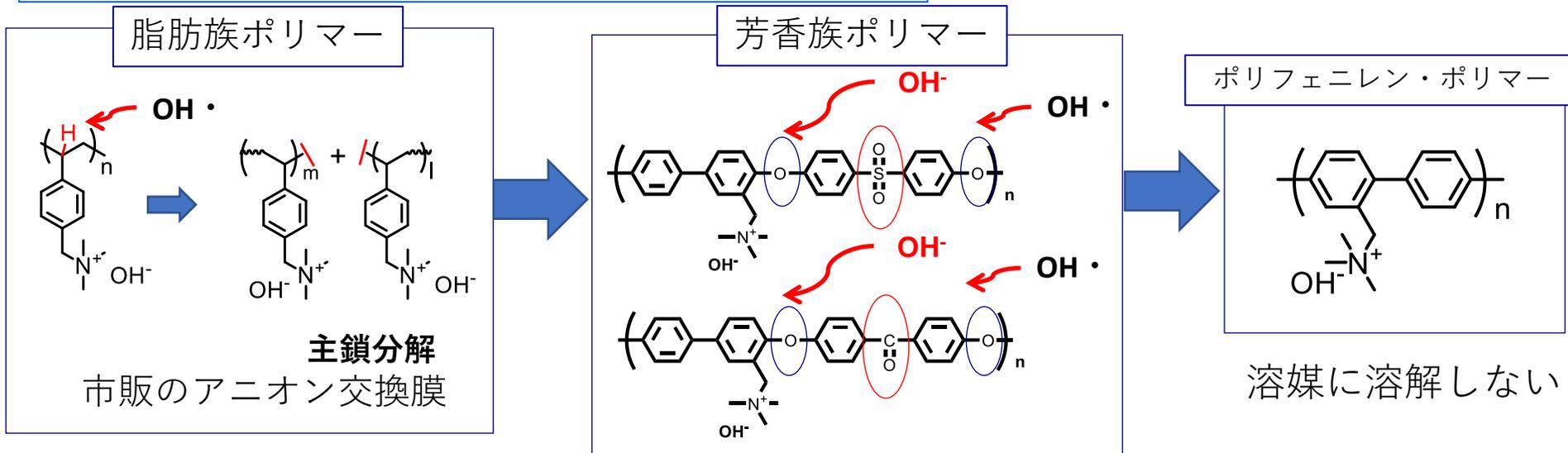
問題点→アルカリ環境で高耐久な膜がない

*Adapted from L. Bertuccioli et al., Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCHJU), Final Report (2014)

3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び成果の意義

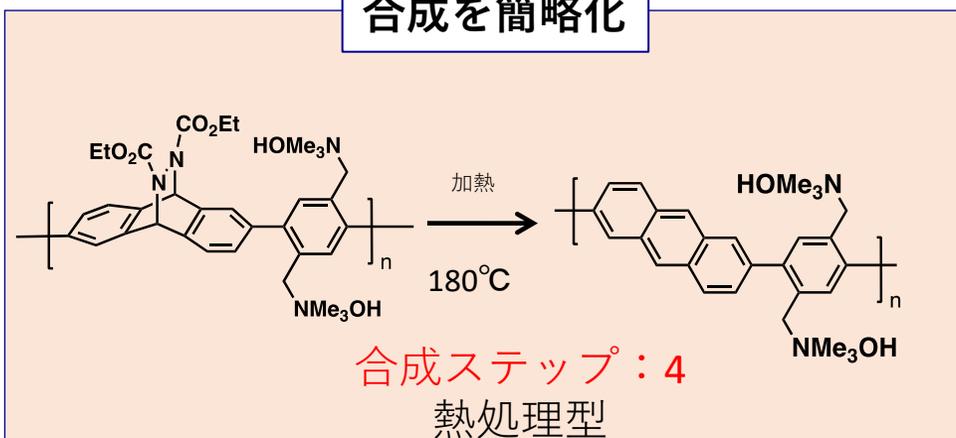
①-2 AEM型水電解用電解質膜の研究開発



Reproduced from S. Miyanishi, T. Yamaguchi, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18(17), 12009-12023 (2016) with permission from the PCCP Owner Societies.

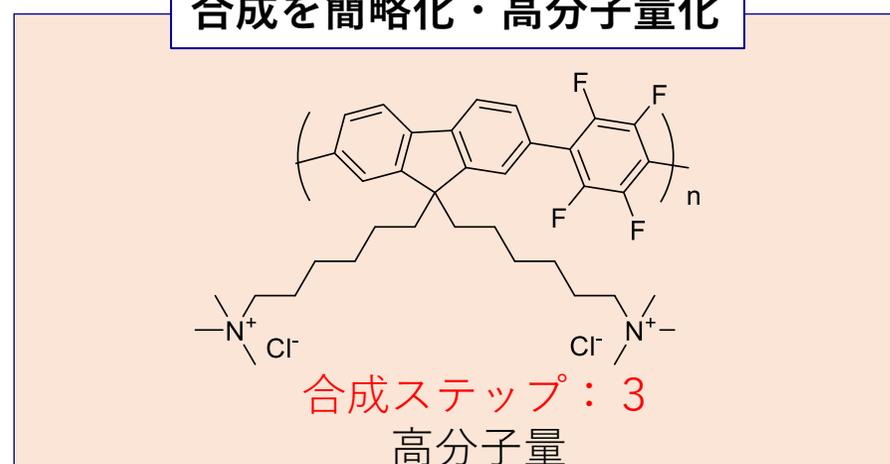
Reproduced from S. Miyanishi, T. Yamaguchi, *New J. Chem.*, 41(16), 8036-8044 (2017) with permission from the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) and the Royal Society of Chemistry.

合成を簡略化



Reproduced from H.P.R. Graha, S. Ando, S. Miyanishi, T. Yamaguchi, *Chem. Comm.*, 54(77), 10820-10823 (2018) with permission from the Royal Society of Chemistry.

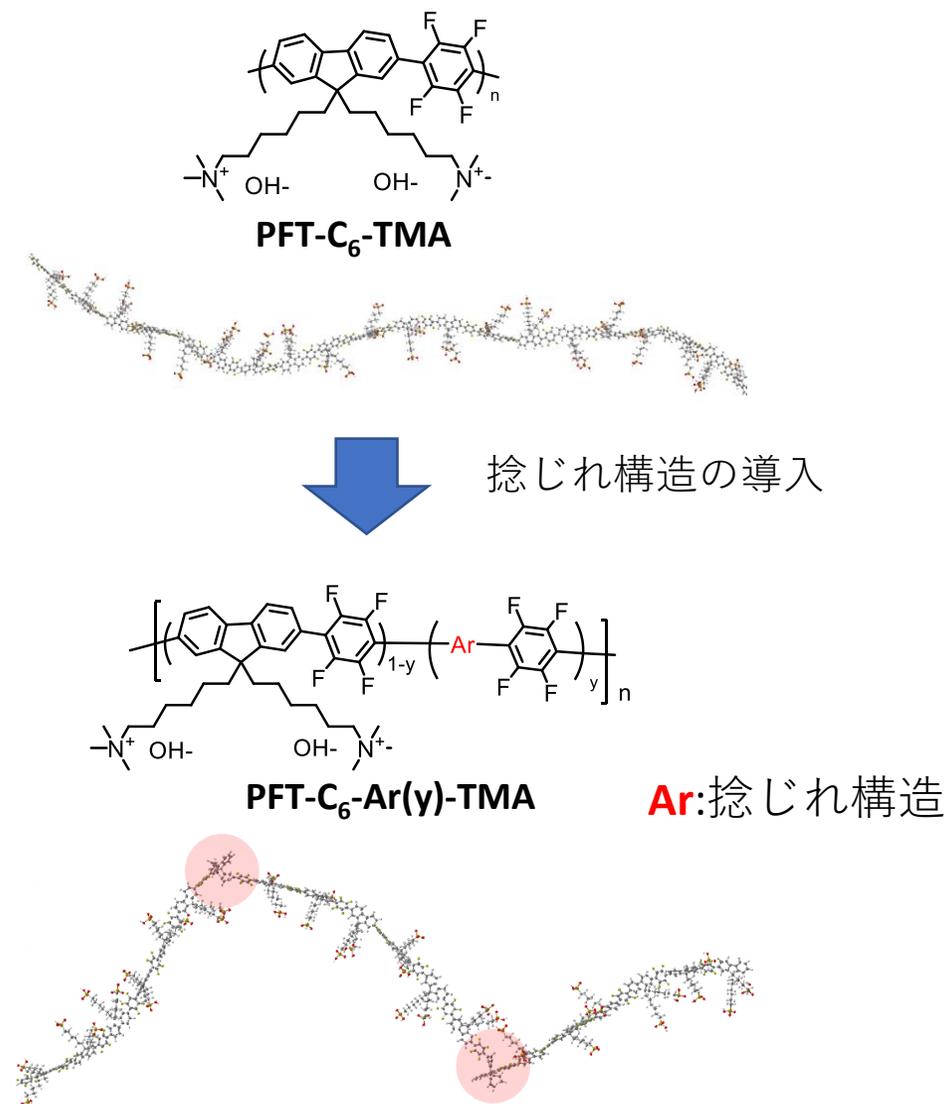
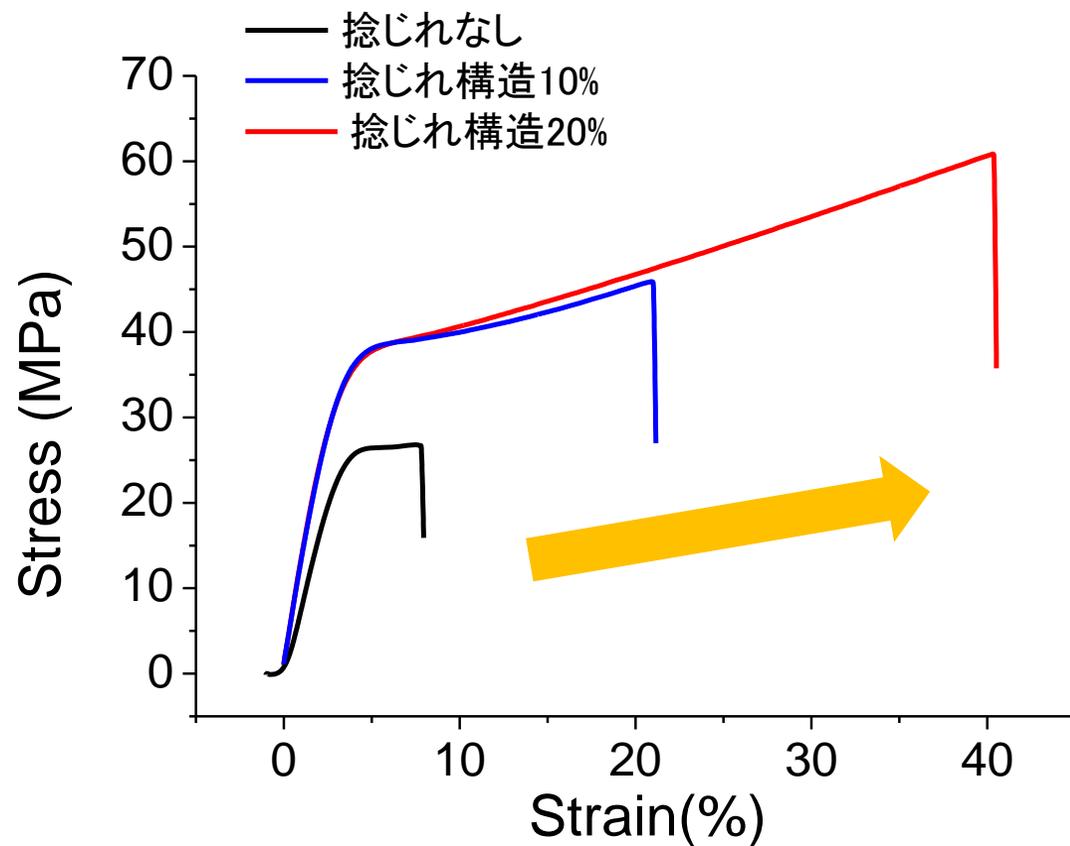
合成を簡略化・高分子量化



Reproduced from S. Miyanishi, T. Yamaguchi, *Polym. Chem.*, 11(23), 3812-3820 (2020) with permission from the Royal Society of Chemistry.

・捻じれ構造の導入による電解質膜の機械強度・機械的柔軟性の改善

電解質膜の引っ張り強度試験
(室温 大気下)

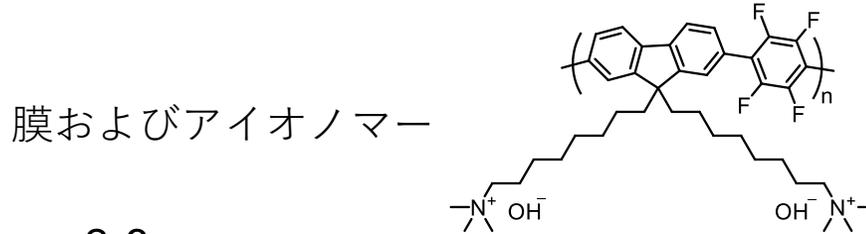


3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び成果の意義

③-2 高性能AEM型水電解セルの開発

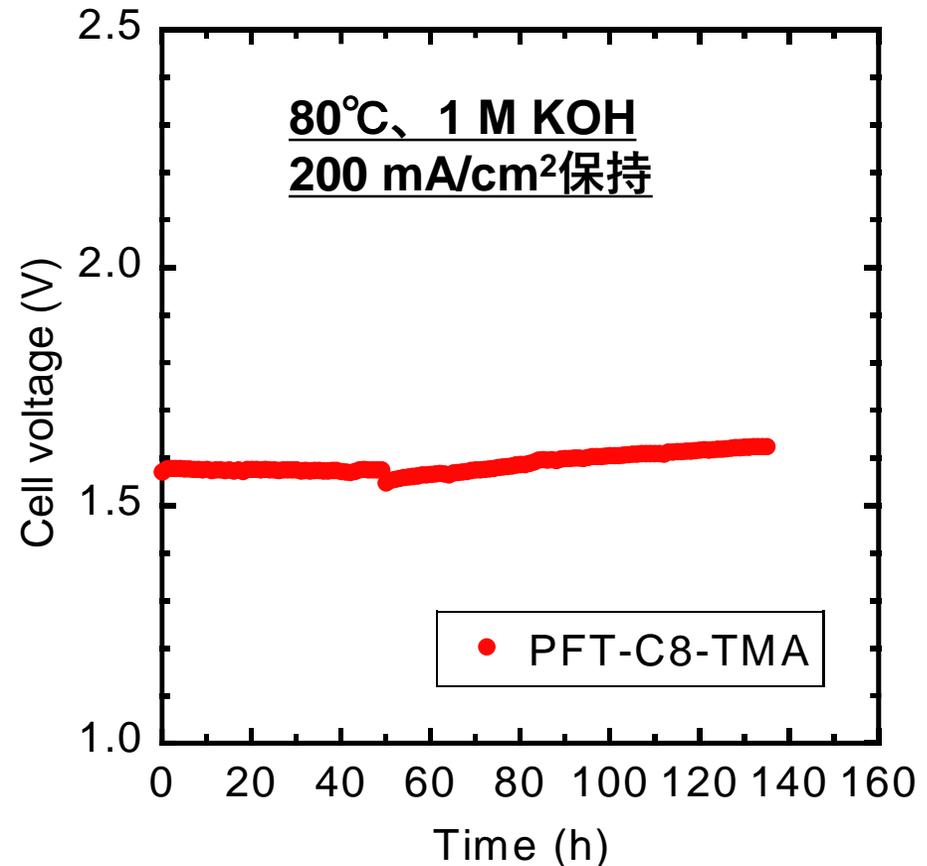
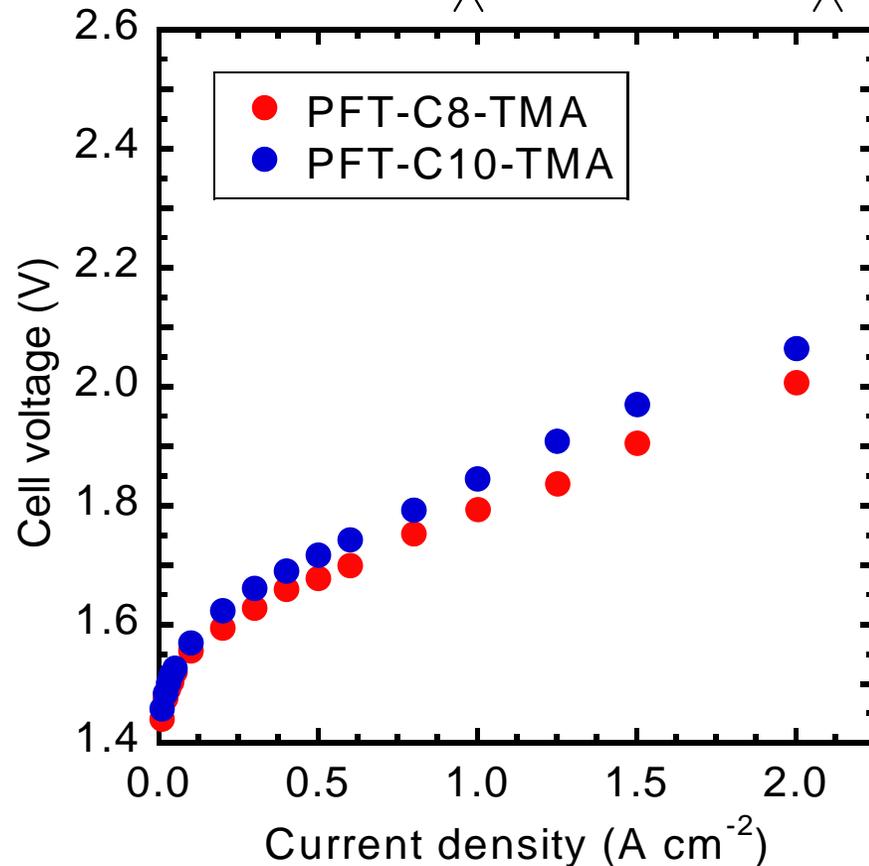
④-2 AEM型水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析



1 M KOH水溶液 @ 80 °C

アノード触媒 IrO₂ (1.16~1.22 mg/cm²)

カソード触媒 Pt/C (0.29~0.32 mg/cm²)



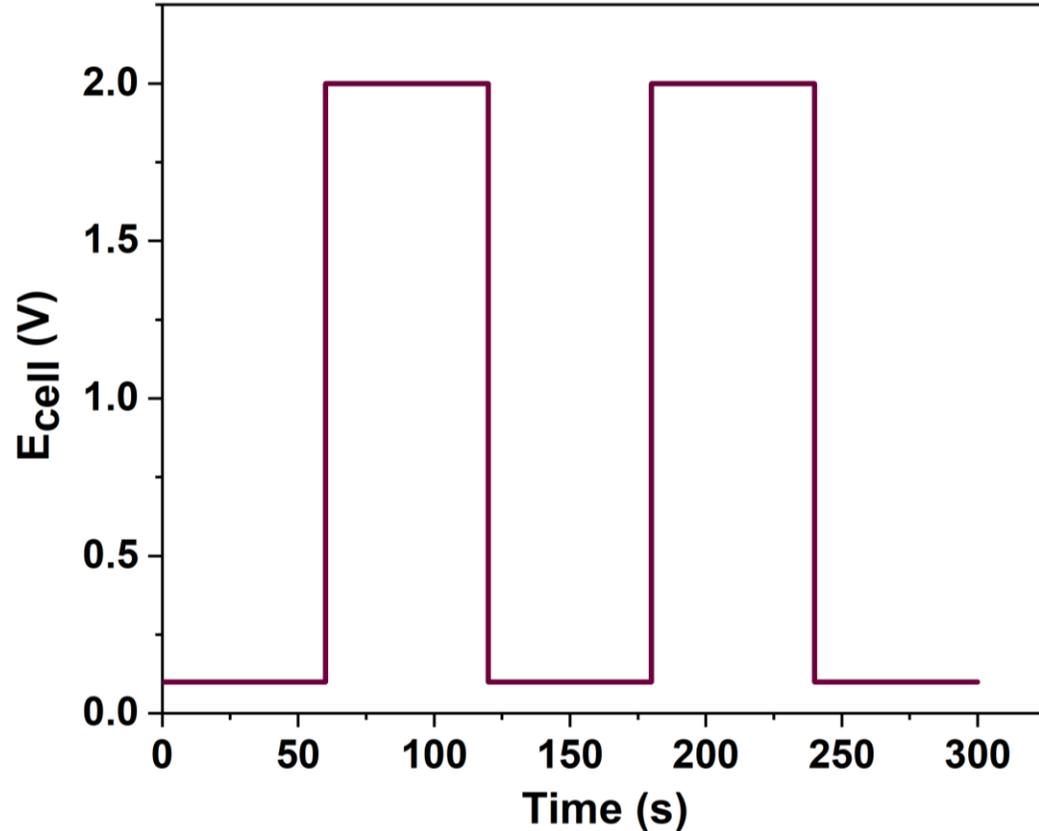
0.1~2.0 Vの起動停止サイクル耐久試験

1M KOH水溶液 @ 80 °C

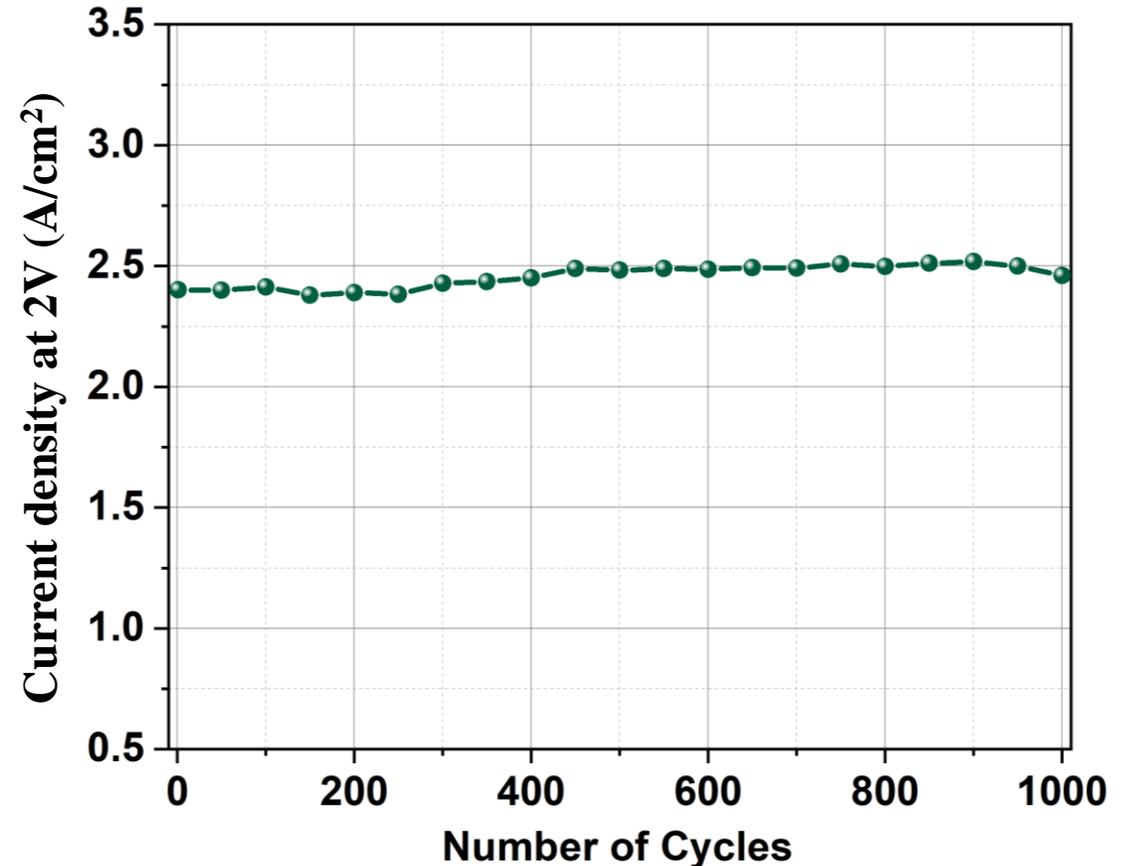
Anode catalyst IrO₂ (1.2 mg/cm²)

Cathode catalyst PtRu/C (0.3 mg_{Pt}/cm²)

Potential cycling pattern



Current density at 2.0 V vs number of Cycles

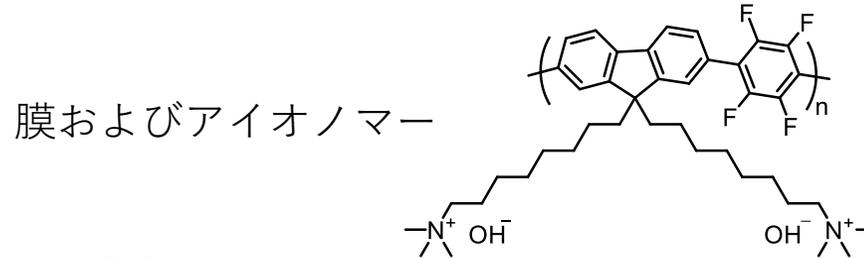


3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び成果の意義

③-2 高性能AEM型水電解セルの開発

④- 2 AEM型水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析



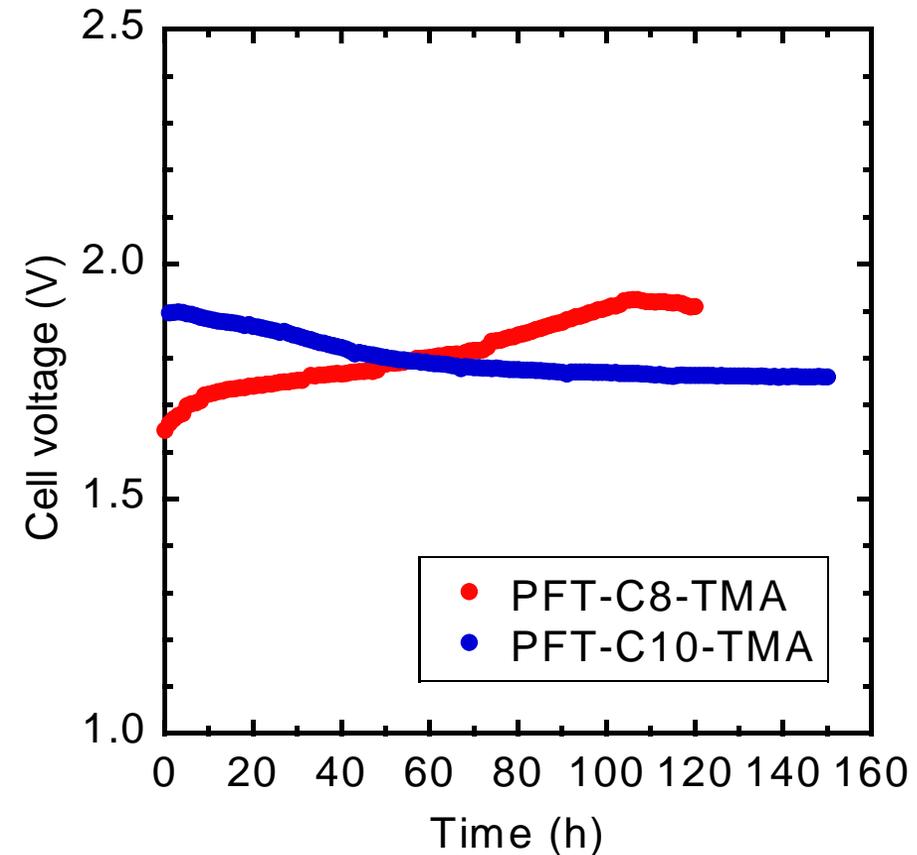
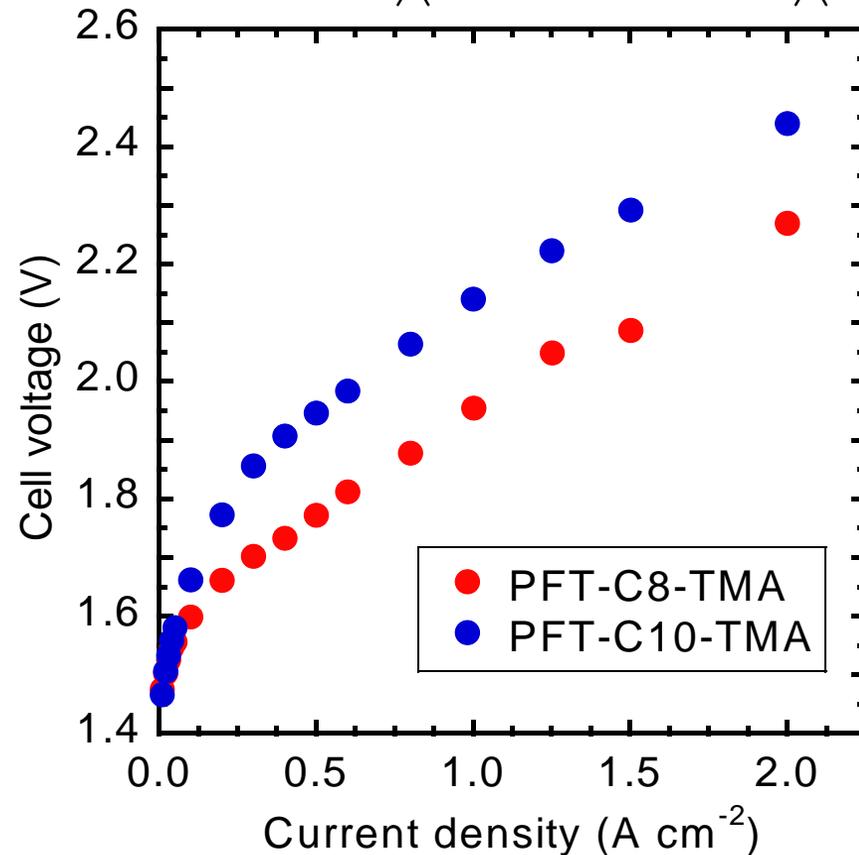
純水 @80 °C

Anode catalyst

IrO₂ (1.16~1.22 mg/cm²)

Cathode catalyst

Pt/C (0.29~0.32 mg/cm²)



3. 研究開発成果について__研究開発の成果と意義

② 固体高分子形およびAEM型水電解用触媒の研究開発

②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

⑥ 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の開発

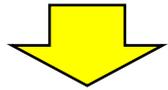
③ 変動電源に追従できる高性能水電解セルの設計・開発

③-2 高性能固体アルカリ水電解セルの開発

②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

水電解用高活性貴金属触媒

Pt, Ir, Ru



✗ 非常に高価

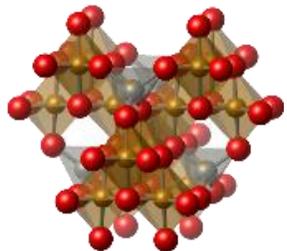
アルカリ中では安価な卑金属を使用可能

卑金属酸化物触媒の利点

- ◆ 低コスト
- ◆ 低環境負荷
- ◆ 元素の置換・ドーピングにより触媒活性を柔軟に調節可
- ◆ 合成容易

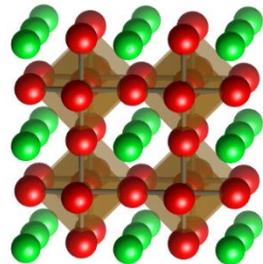
(例) アノード(OER)用卑金属酸化物触媒

スピネル型酸化物



CoFe₂O₄, NiFe₂O₄,
MnCo₂O₄など

ペロブスカイト型酸化物



SrCoO₃, LaCoO₃,
LaNiO₃など

Crustal abundance (ppm)		Price (\$/kg)	
Al	10 ⁵	Fe	10 ⁻¹
Fe	10 ⁴	Al	10 ⁰
Ca	10 ⁴	Ca	10 ⁰
Ni	10 ¹	Ni	10 ¹
Co	10 ¹	Co	10 ¹
Ir	10 ⁻³	Ru	10 ³
Pt	10 ⁻³	Pt	10 ⁴
Ru	10 ⁻⁵	Ir	10 ⁴

地殻中の金属埋蔵量と価格

P. C. K. Vesborg et al. RSC Adv.,
2012, 2, 7933

鉄に着目

- Ir, Ptと比べ4桁安い
- Ni, Coと比べても2桁安い

✗ 鉄単独のOER活性は低い

RuO₂ > IrO₂ > MnO₂ > NiO > Co₃O₄ ≫ Fe₃O₄

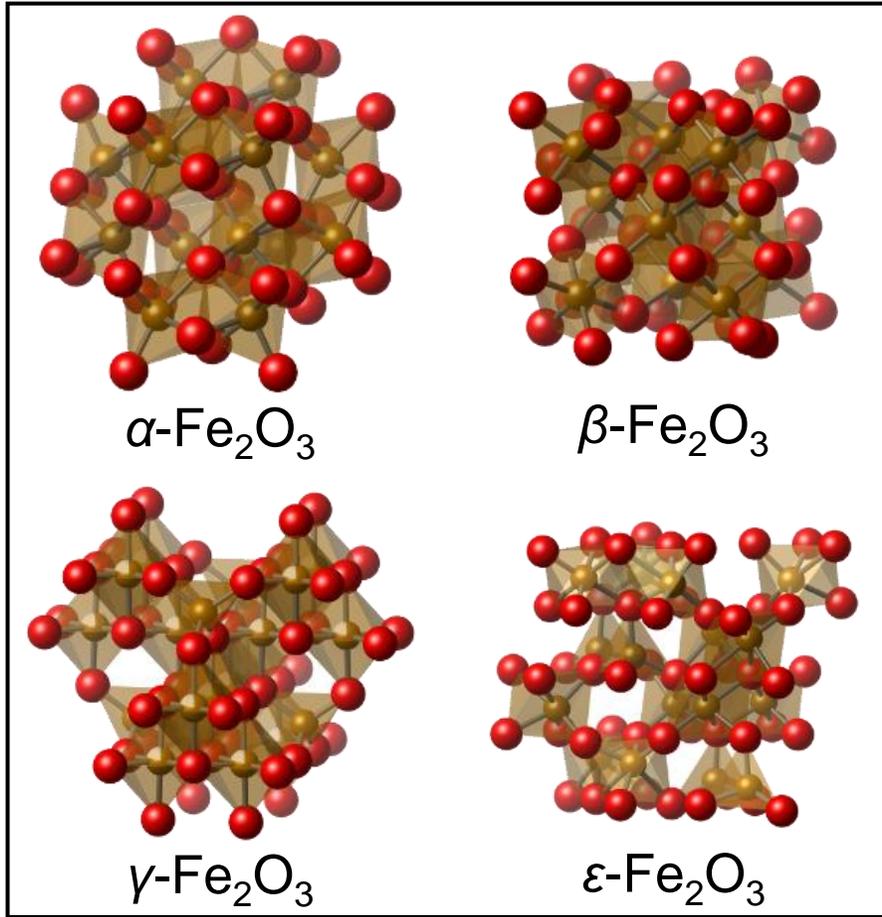
● 他の金属と複合化で活性が飛躍的増加

CaCu₃Fe₄O₁₂ ≫ CaFeO₃ > SrFeO₃

H. Bandal et al. J. Power Sources, 2018, 395, 106

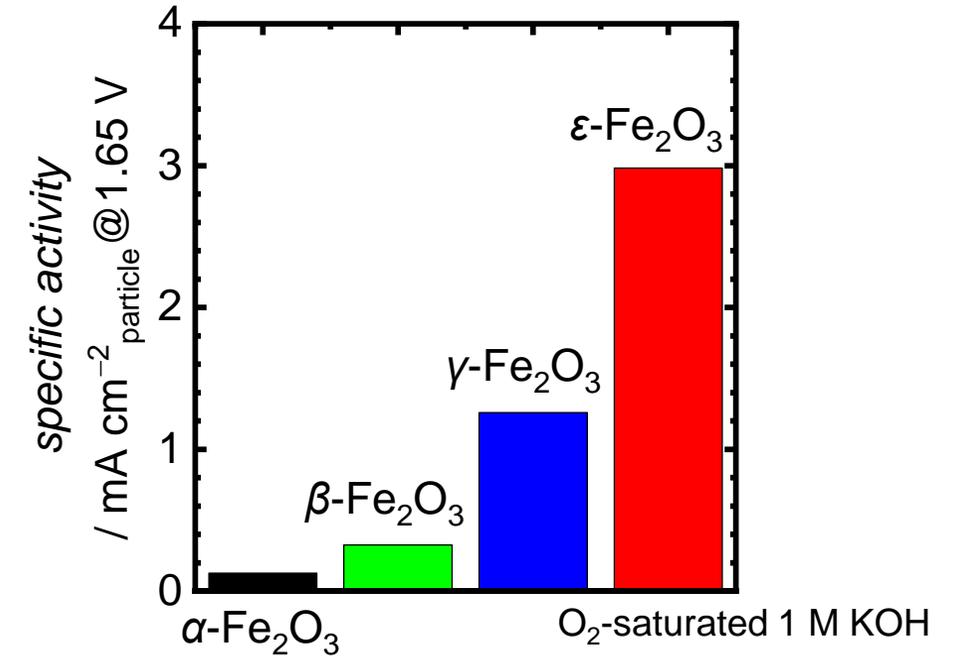
S. Yagi et al. Nat. Commun., 2015, 6, 8249

鉄の単純酸化物 Fe_2O_3 の4種のポリモルフを調査



- 他の金属の影響を排除
- 組成が完全に同一のため、純粋に構造の効果のみを解析可能

OER表面比活性



- ✓ 活性はポリモルフの種類に強く依存
- ✓ 表面分析により、粒子の表面状態が活性の差の要因ではないと判明
- ✓ 結晶構造が要因であると推察

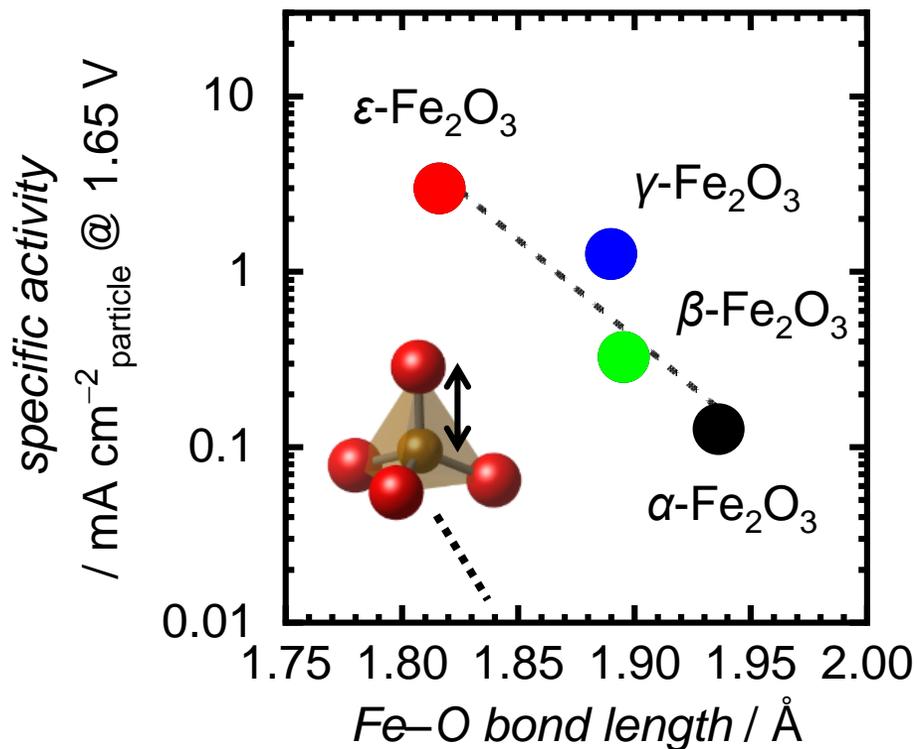
②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

結晶中の構造の因子
と活性の関係を分析

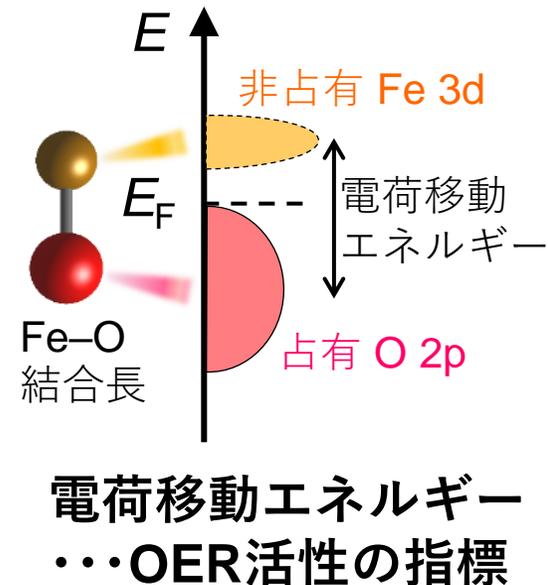
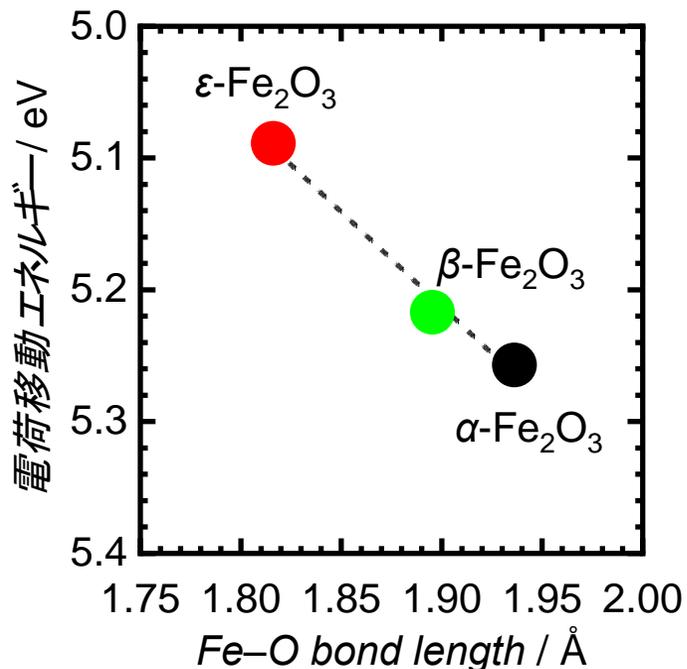
- Fe-O-Fe結合角
- Fe-Fe原子間距離
- Fe-O結合長

など

OER活性 vs. Fe-O結合長



電荷移動エネルギー vs. Fe-O結合長



(鉄欠損のあるγ-Fe₂O₃は除外)

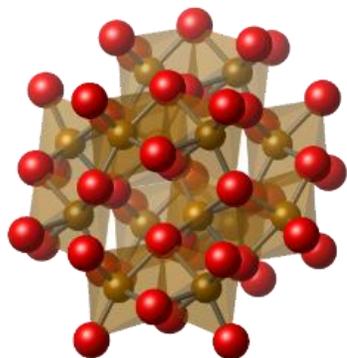
✓ 短いFe-O結合長で電荷移動エネルギーが減少し、OERに有利

②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

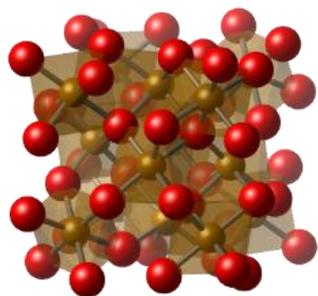
Fe₂O₃だけでなく、複数の金属元素を含む鉄系複合酸化物にも適用可能か？

文献から11種類の鉄系複合酸化物の構造と活性を抽出して検証 ... 計15種類

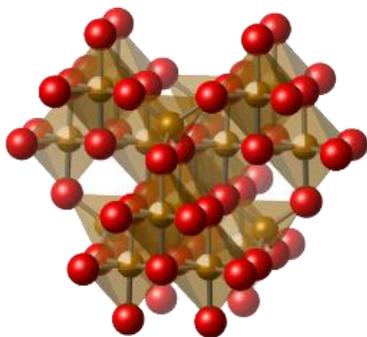
Fe₂O₃ polymorphs



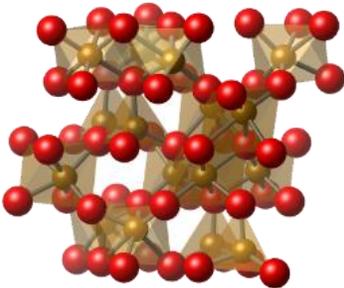
① α -Fe₂O₃



② β -Fe₂O₃

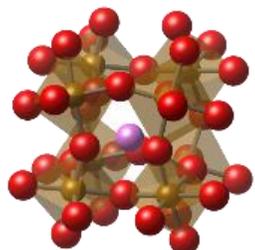


③ γ -Fe₂O₃

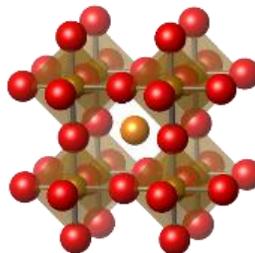


④ ϵ -Fe₂O₃

Corner-shared perovskites



⑤ YFeO₃



⑥ GdFeO₃

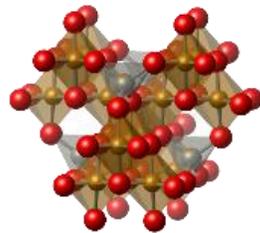
⑦ PrFeO₃

⑧ LaFeO₃

⑨ SrFeO₃

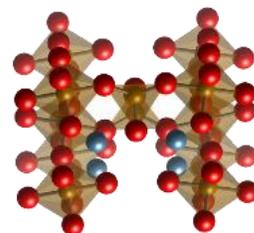
⑩ CaFeO₃

Spinel



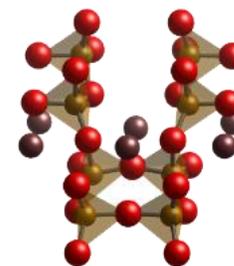
⑪ ZnFe₂O₄

Brownmillerite

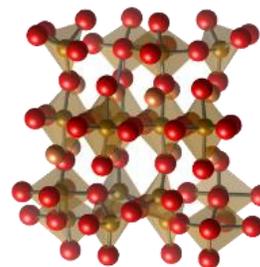


⑫ Ca₂Fe₂O₅

Others



⑬ BaFe₂O₄



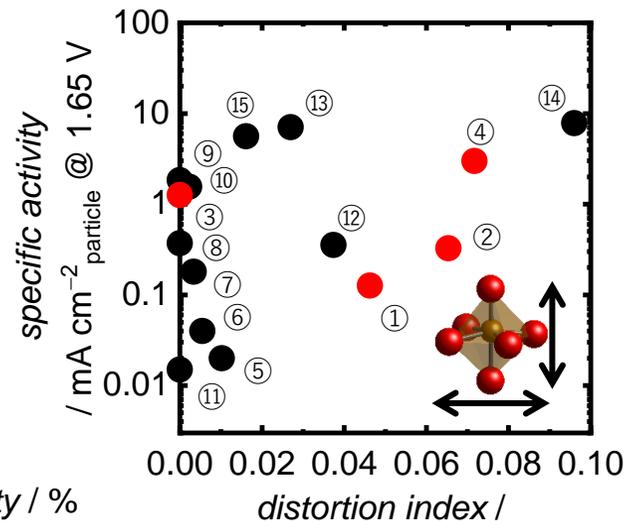
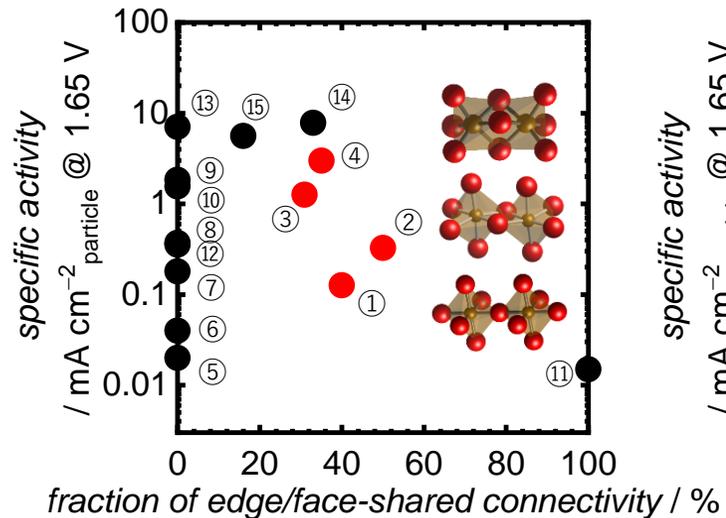
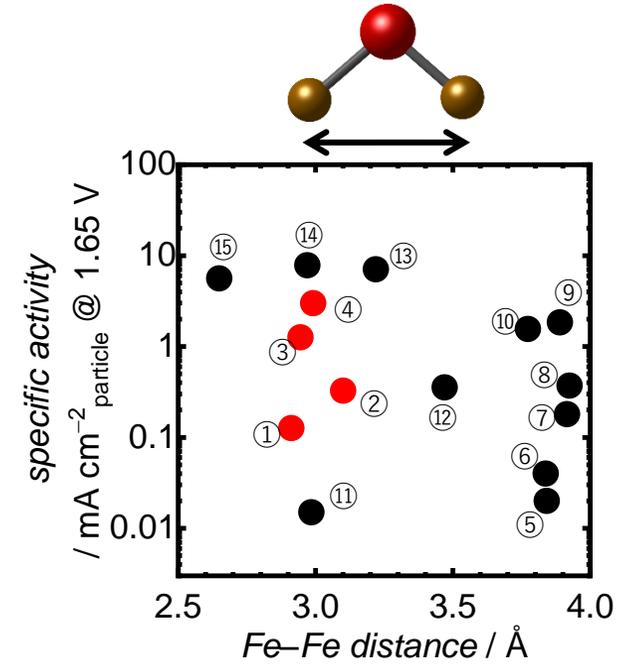
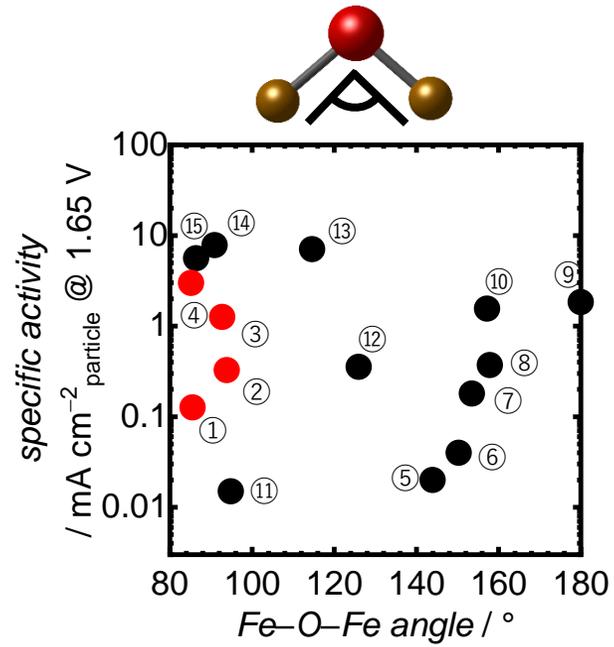
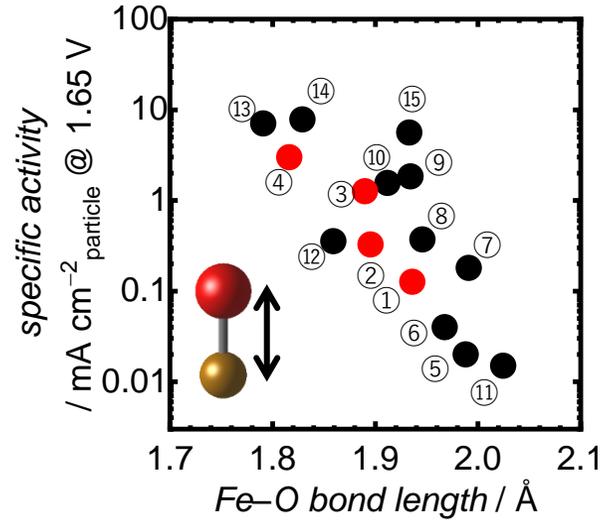
⑭ Sr₄Fe₆O₁₃



⑮ BaFeO_{3- δ}

②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

構造パラメータの検証



From Y. Sugawara, K. Kamata, E. Hayashi, M. Itoh, Y. Hamasaki, T. Yamaguchi, Comprehensive Structural Descriptor for Electrocatalytic Oxygen Evolution Activities of Iron Oxides, Copyright © 2021 by John Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

Adapted with permission from I. Yamada, A. Takamatsu, K. Asai, T. Shirakawa, H. Ohzuku, A. Seno, T. Uchimura, H. Fujii, S. Kawaguchi, K. Wada, H. Ikeno, S. Yagi *J. Phys. Chem. C* 2018, 122, 49, 27885–27892 Copyright © 2018 American Chemical Society.

Adapted with permission from H. Li, Y. Chen, S. Xi, J. Wang, S. Sun, Y. Sun, Y. Du, and Z. J. Xu *Chem. Mater.* 2018, 30, 13, 4313–4320 Copyright © 2018 American Chemical Society.

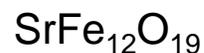
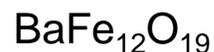
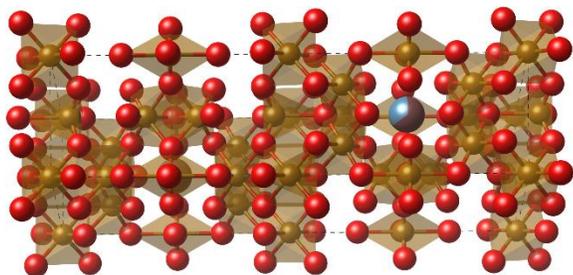
Adapted with permission from Y. Sugawara, K. Kamata, A. Ishikawa, Y. Tateyama, T. Yamaguchi *ACS Appl. Energy Mater.* 2021, 4, 4, 3057–3066 Copyright © 2018 American Chemical Society.

②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

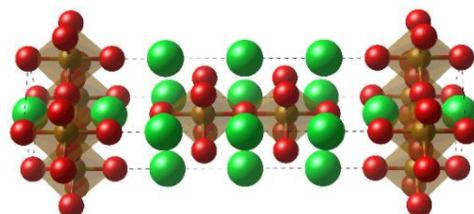
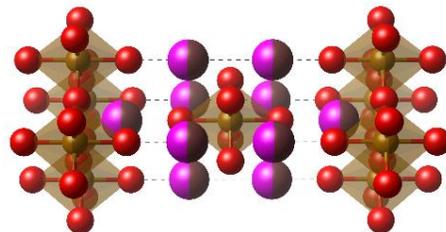
●Bimetal oxides: $A_xFe_yO_z$

●Trimetal oxides: $A_wA'_xFe_yO_z$

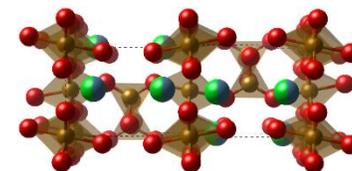
M-type Hexaferrite



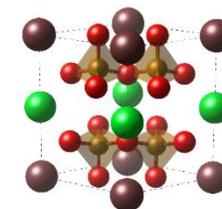
Ruddlesden-Popper



Brownmillerite



Stuffed Tridymite



化合物

Fe-O 結合長 (Å)



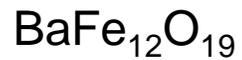
1.552



1.858



1.859



1.881

化合物

Fe-O 結合長 (Å)



1.780



1.853



1.922



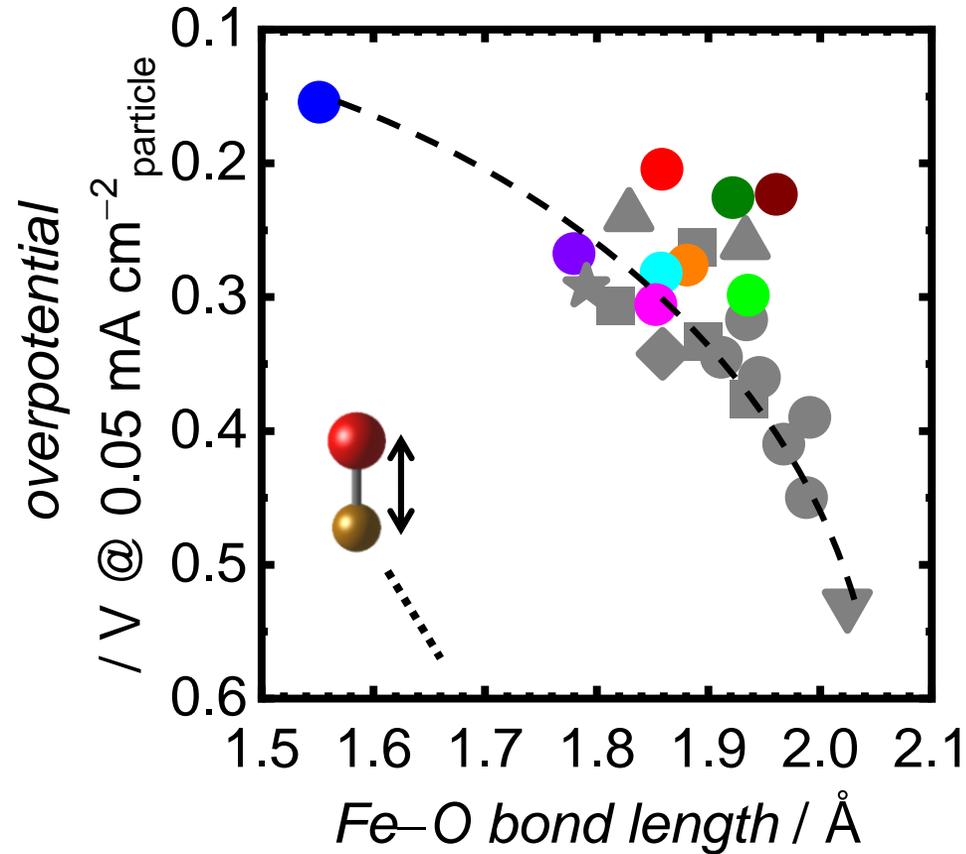
1.936



1.961

②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

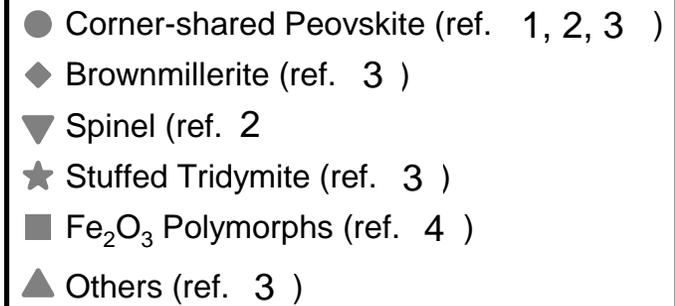
活性未報告の鉄系触媒の評価結果



今回合成・評価



文献



[1] I. Yamada *et al.* *J Phys. Chem. C*, **2018**, 122, 27885

[2] H. Li *et al.* *Chem. Mater.*, **2018**, 30, 4313

[3] Y. Sugawara *et al.* *ACS Appl. Energy Mater.*, **2021**, 4, 3057

[4] Y. Sugawara *et al.* *ChemElectroChem*, **2021**, 8, 4466

From Y. Sugawara, S. Ueno, K. Kamata, T. Yamaguchi, Crystal Structures of Iron-Based Oxides and Their Catalytic Efficiencies for the Oxygen Evolution Reaction: A Trend in Alkaline Media, Copyright © 2022 by John Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

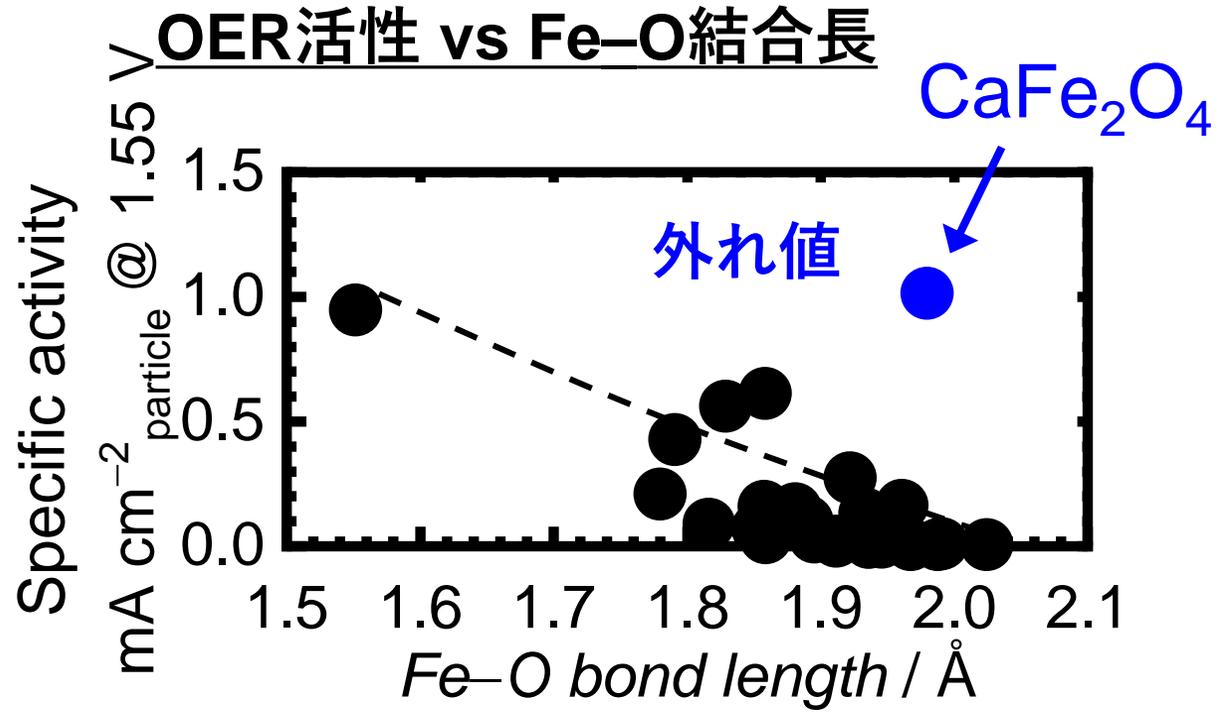
Adapted with permission from I. Yamada, A. Takamatsu, K. Asai, T. Shirakawa, H. Ohzuku, A. Seno, T. Uchimura, H. Fujii, S. Kawaguchi, K. Wada, H. Ikeno, S. Yagi *J. Phys. Chem. C* 2018, 122, 49, 27885–27892 Copyright © 2018 American Chemical Society.

Adapted with permission from H. Li, Y. Chen, S. Xi, J. Wang, S. Sun, Y. Sun, Y. Du, and Z. J. Xu *Chem. Mater.* 2018, 30, 13, 4313–4320 Copyright © 2018 American Chemical Society.

Adapted with permission from Y. Sugawara, K. Kamata, A. Ishikawa, Y. Tateyama, T. Yamaguchi *ACS Appl. Energy Mater.* 2021, 4, 4, 3057–3066 Copyright © 2018 American Chemical Society.

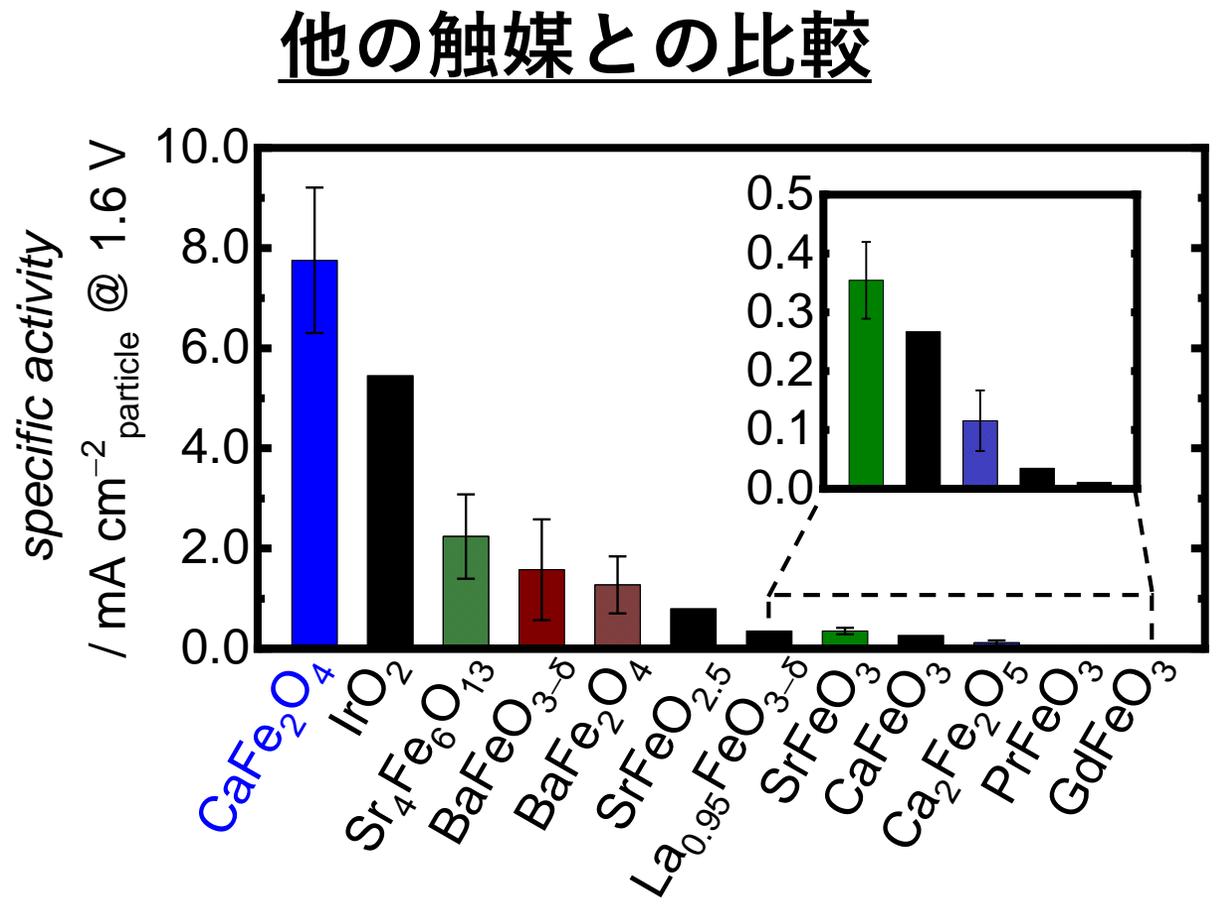
From Y. Sugawara, K. Kamata, E. Hayashi, M. Itoh, Y. Hamasaki, T. Yamaguchi, Comprehensive Structural Descriptor for Electrocatalytic Oxygen Evolution Activities of Iron Oxides, Copyright © 2021 by John Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

酸素発生(OER)触媒反応性サイト



➤ OER触媒作用のメカニズム切り替えで記述子Fe-Oの法則を超越

➤ 大きな外れ値となる高いOER活性を発揮



- ✓ 既報の鉄系触媒で最高のOER活性
- ✓ 酸化イリジウムを超えた

From Y. Sugawara, S. Ueno, K. Kamata, T. Yamaguchi, Crystal Structures of Iron-Based Oxides and Their Catalytic Efficiencies for the Oxygen Evolution Reaction: A Trend in Alkaline Media, Copyright © 2022 by John Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

Adapted with permission from I. Yamada, A. Takamatsu, K. Asai, T. Shirakawa, H. Ohzuku, A. Seno, T. Uchimura, H. Fujii, S. Kawaguchi, K. Wada, H. Ikeno, S. Yagi *J. Phys. Chem. C* 2018, 122, 49, 27885–27892 Copyright © 2018 American Chemical Society.

Adapted with permission from H. Li, Y. Chen, S. Xi, J. Wang, S. Sun, Y. Sun, Y. Du, and Z. J. Xu *Chem. Mater.* 2018, 30, 13, 4313–4320 Copyright © 2018 American Chemical Society.

From Y. Sugawara, K. Kamata, E. Hayashi, M. Itoh, Y. Hamasaki, T. Yamaguchi, Comprehensive Structural Descriptor for Electrocatalytic Oxygen Evolution Activities of Iron Oxides, Copyright © 2021 by John Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

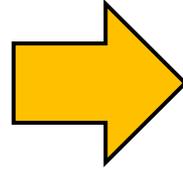
Adapted with permission from Y. Sugawara, K. Kamata, A. Ishikawa, Y. Tateyama, T. Yamaguchi *ACS Appl. Energy Mater.* 2021, 4, 4, 3057–3066 Copyright © 2018 American Chemical Society.

②-2 ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発

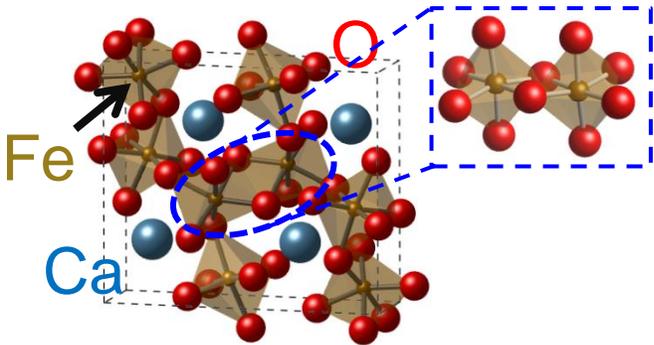
メカニズムの切り替えによる高活性化

➤ OERの記述子(Fe-O)を発見

◆ 異なる反応メカニズムでは、異なる記述子が存在するはず



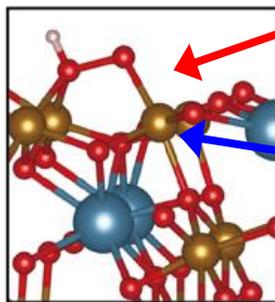
鉄原子配置の制御で反応メカニズムを切り替え、高活性化が可能と予想



Fe-Fe距離が近い特徴的構造

- 非常に安価
- 合成容易/再現性高
- 環境負荷低

触媒の表面構造

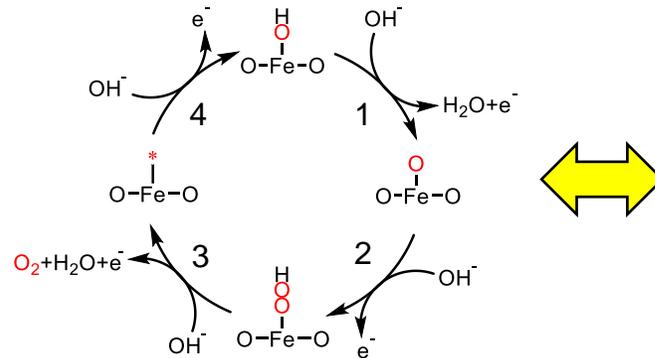


反応中間体がO-O橋掛け構造を形成

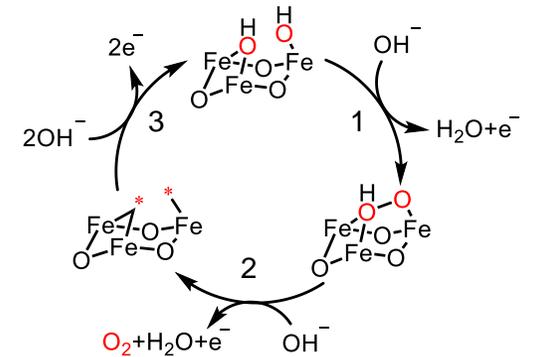
三つの鉄原子が活性サイトを担う

DFT計算でメカニズムを推定

従来のメカニズム



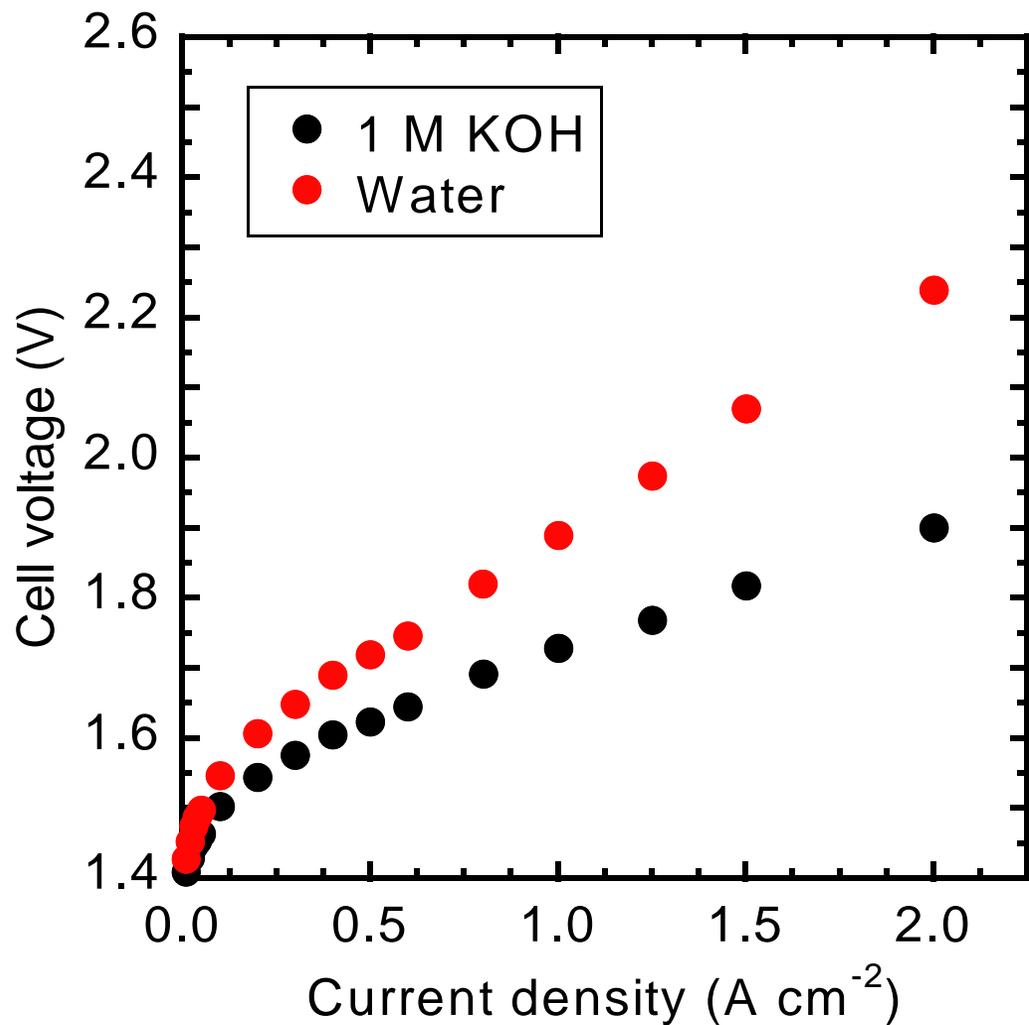
新規なメカニズム



- 新規なメカニズムを発見
- メカニズムの切り替わりにより劇的にOERが促進されると予想

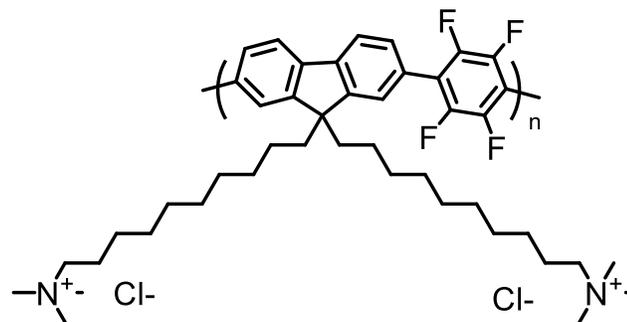
③-2 高性能固体アルカリ水電解セルの開発

卑金属触媒とポリフェニレン系AEMを利用したAEM型水電解性能



非結晶系触媒に展開

- 膜 : PFT-Cx-TMAを含む電解質膜
- 触媒層アイオノマー : PFT-Cx-TMAポリマー
- アノード触媒 : **卑金属触媒 (Ir, Ptなどの貴金属未使用)**
- カソード触媒 : Pt/C (46.5 wt%), 0.3 mg/cm²



3. 研究開発成果について_まとめ

固体高分子形水電解

- Ir連結触媒を開発し、高い表面積と質量活性を示すこと、固体高分子形水電解として高い性能を示すことを実証した。

AEM型水電解

- 大幅なコスト削減が見込めるAEM型水電解において、**性能と耐久性の両立に成功し、純水供給により、80℃で100時間以上にわたり高耐久性を示す電解質膜・セルの開発に成功した。**また、**各過電圧の分離**を行いそれぞれの寄与を明確にし、**起動停止耐久性**の評価も実施した。
- 卑金属触媒において、バルク構造のパラメータに基づく**有望材料の合理的設計指針**を提案した。
- 当設計指針と**インフォマティクス技術**を活用することで安価な**高活性触媒の迅速な開発**に成功した。
- **両極とも卑金属触媒と組み合わせた低コストAEM型水電解の実証**にも成功した。

- 本事業では、固体高分子形水電解、AEM型水電解について、変動電源に適した特性を有する触媒・電解質膜の材料開発に成功し、以下に示す**材料設計指針の原案を策定**した。

- 固体高分子形水電解では、電解質膜として細孔フィリング型プロトン伝導性電解質膜、触媒は導電担体フリーかつ高表面積・高活性のIr触媒が有効であると策定した。
- AEM型水電解では、電解質膜として高分子量ポリフェニレン系アニオン交換膜およびアイオノマー、触媒としては卑金属系高活性触媒が有効であると策定した。

3. 研究開発成果について_論文、学会発表、広報等

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	計
論文(査読付き)	0	2	3	2	0	7件
研究発表・講演	1	20 (うち招待講演: 6)	19 (うち招待講演: 2)	17 (うち招待講演: 11)	11 (うち招待講演: 4、予定: 5)	68件 (うち予定: 5)

AEM型水電解用卑金属触媒

1. 日刊工業新聞電子版 2021年3月5日
2. 日刊工業新聞 2021年3月5日
3. 日本経済新聞電子版 2021年3月8日
4. 日本経済新聞 2021年3月8日
5. 産経ニュース 2021年3月13日
6. 日経産業新聞 2021年3月22日
7. 化学工業日報 2021年4月7日

高耐久高性能低コストAEM型水電解

8. 日経産業新聞 2021年5月14日
9. 化学工業日報 2021年6月18日
10. 日経クロステック 2021年12月6日

3. 研究開発成果について_知財等

電解質膜・触媒・MEAについて以下の知財マネジメント計画をもとに進めている

	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	計
特許出願	0	1	2	5	3	12件

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて：成果の実用化に向けた戦略

【固体高分子形水電解】

- 本事業では導電担体フリーな高活性・高表面積なIrナノ粒子連結触媒によりIr使用量を1/10へ低減とともに、変動電源に対する劣化機構の解明を実施している。

【AEM型水電解】

- 2022年度末までに、**膜および触媒をサンプルワークする体制を整える**。材料の性能および耐久性をさらに向上させるとともに、変動電源に対する水電解システム全体の評価を実施し、実用化への課題の明確化と、その解決のための指針策定を実施する。
- 本事業で開発を行っている、コスト・性能面で優位性を有する材料・システムについて、実用化を検討する。変動電源に対する**さらなる効率と耐久性の向上**を目指し、**改善を実施する**。