

NEDO水素・アンモニア成果報告会2025

発表No. A 2 - 4

「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 /共通課題解決型基盤技術開発 /高効率・高出力・高耐久P E F Cを実現する革新的材料の研究開発事業」 (ECCEED'30-FCプロジェクト)

発表者名 飯山 明裕

国立大学法人山梨大学

<共同実施> 東レリサーチセンター

<再委託> 日揮ユニバーサル株式会社

株式会社リガク

学校法人東京理科大学

東海カーボン株式会社

パナソニックホールディングス株式会社

田中貴金属工業株式会社

日本化学産業株式会社

国立大学法人東北大学 流体科学研究所

国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科

発表日 2025年7月26日

ECCEED'30-FC Project

Electrolytes, **C**atalysts and **C**atalyst layers with **E**xtraordinary
Efficiency, power and **D**urability for P**EFC**s

連絡先：山梨大学 水素・燃料電池ナノ材料研究センター
(fcnano-as@yamanashi)

事業概要

1. 期間

開始：2020年7月 終了：2025年3月

2. 最終目標

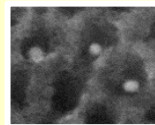
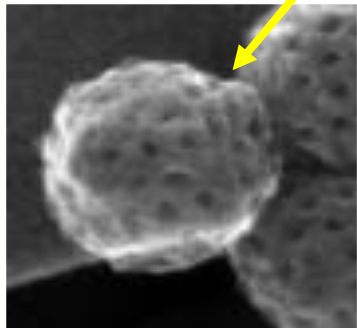
燃料電池の2030年以降に目指すべき目標性能を達成するための担体・触媒・電解質・触媒層に関する過電圧低減と耐久性向上を達成させ、高効率・高出力・高耐久を両立した新たな電極・電解質材料を産業界と共に実用化につなげる。

- A. 「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」
- B. 「高効率・高出力・高耐久を実現する炭化水素系電解質材料の研究開発」
- C. 「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発」

- ・現状比10倍の耐久性と2.5倍以上の活性を有する電極触媒、2倍のプロトン伝導度とガスバリア性を持つ電解質を設計する。
- ・産業界と協力し、上記機能を検証すると共に量産工程を確立する。

高効率

カーボン担体表面
アクセシブルポア形成



有効な位置
へのPt担持

Ptの利用率を最大にする
アクセシブルカーボン担体触媒

高出力

電解質の主鎖・
側鎖構造の高度制御
高プロトン伝導性

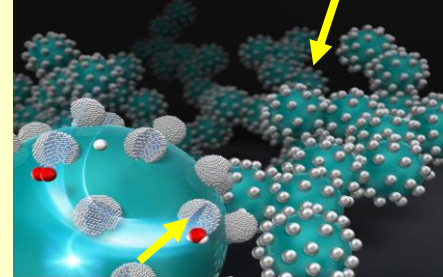


補強層の
積極利用

低ガス透過・高強度・高プロトン伝導性
を有する、革新的炭化水素系補強膜

高耐久

高伝導性連珠構造
セラミックス担体

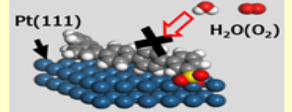
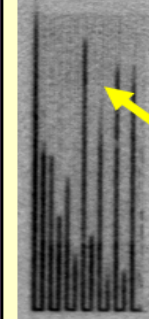


Pt触媒の電子状態・構造制御

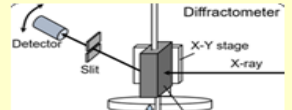
形状異方性・表面機能を積極利用した
高耐久Pt担持セラミックス担体・触媒

高度解析

最新計算科学



発電環境下
での高度解析



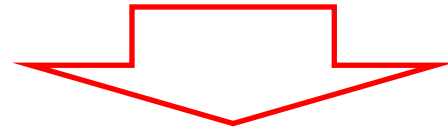
最新機器による材料・セル機能
の高度解析

3. 成果・進捗概要

- A：・セラミックス担体触媒（Pt/Nb-SnO₂）で、質量活性や高負荷運転、起動停止耐久、極限環境劣化の数値目標を達成した。
 - ・カーボン担体触媒：規則的メソポーラスカーボン（OMC）担体に合金（PtCo）触媒を担持、質量活性と高負荷運転の数値目標を達成。
- B：・電解質膜：プロトン導電率、ガス透過率のすべての数値目標、補強効果により化学的安定性と機械的耐久性の目標を達成した。
 - ・イオノマー：嵩高い環状脂肪族基を導入し、プロトン導電率とガス透過率を達成した。
- C：・セラミックス担体とOMC担体において、MEAにて高効率と高負荷目標を達成した。

1. 事業の位置付け・必要性

本事業は、我が国の第5・6次エネルギー基本計画や水素・燃料電池戦略ロードマップ等で定めるシナリオに基づき、2030年以降の自立的普及拡大に資する高効率、高耐久、低コストの燃料電池システムを実現するため、2030年以降に目指すべき目標性能を達成するための、関連サイエンス、先端計測技術を駆使して、担体・触媒・電解質・触媒層に関する過電圧低減と耐久性向上を達成させ、さらに、それら材料の機能を極限まで発揮させる膜・電極接合体にて評価・解析を実施し、その有用性の検証・産業界への供試・材料設計へのフィードバックを行うことを目的とする。



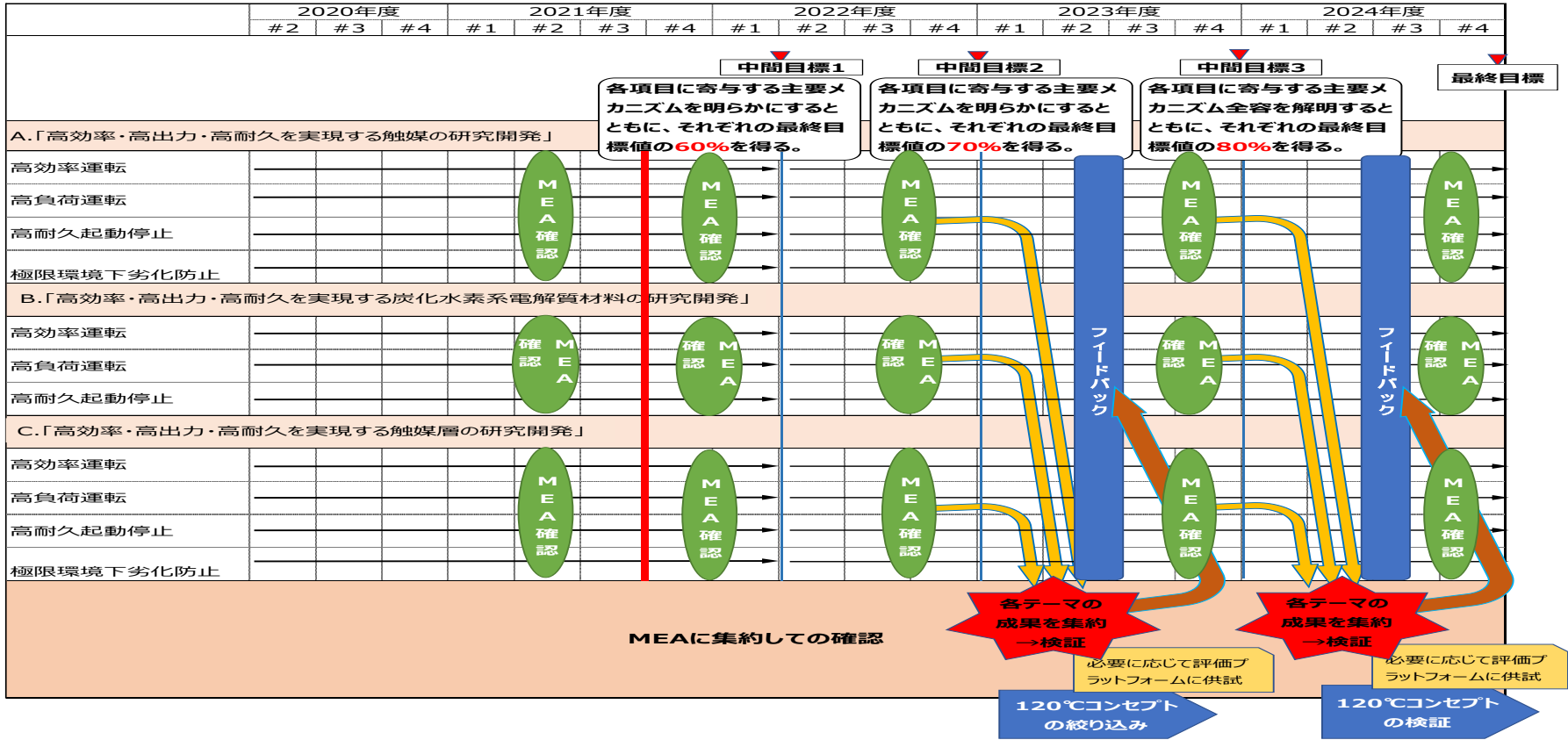
・これらを通して、産業界の持つ共通課題を解決する高効率・高出力・高耐久を両立した新たな電極・電解質材料を創製し、産業界と共にそれら材料を実用化につなげる。2030年目標性能を達成するための担体・触媒・電解質・触媒層に関する過電圧低減と耐久性向上を達成する。

2. 研究開発マネジメントについて

研究開発の目標と目標設定の考え方（根拠）

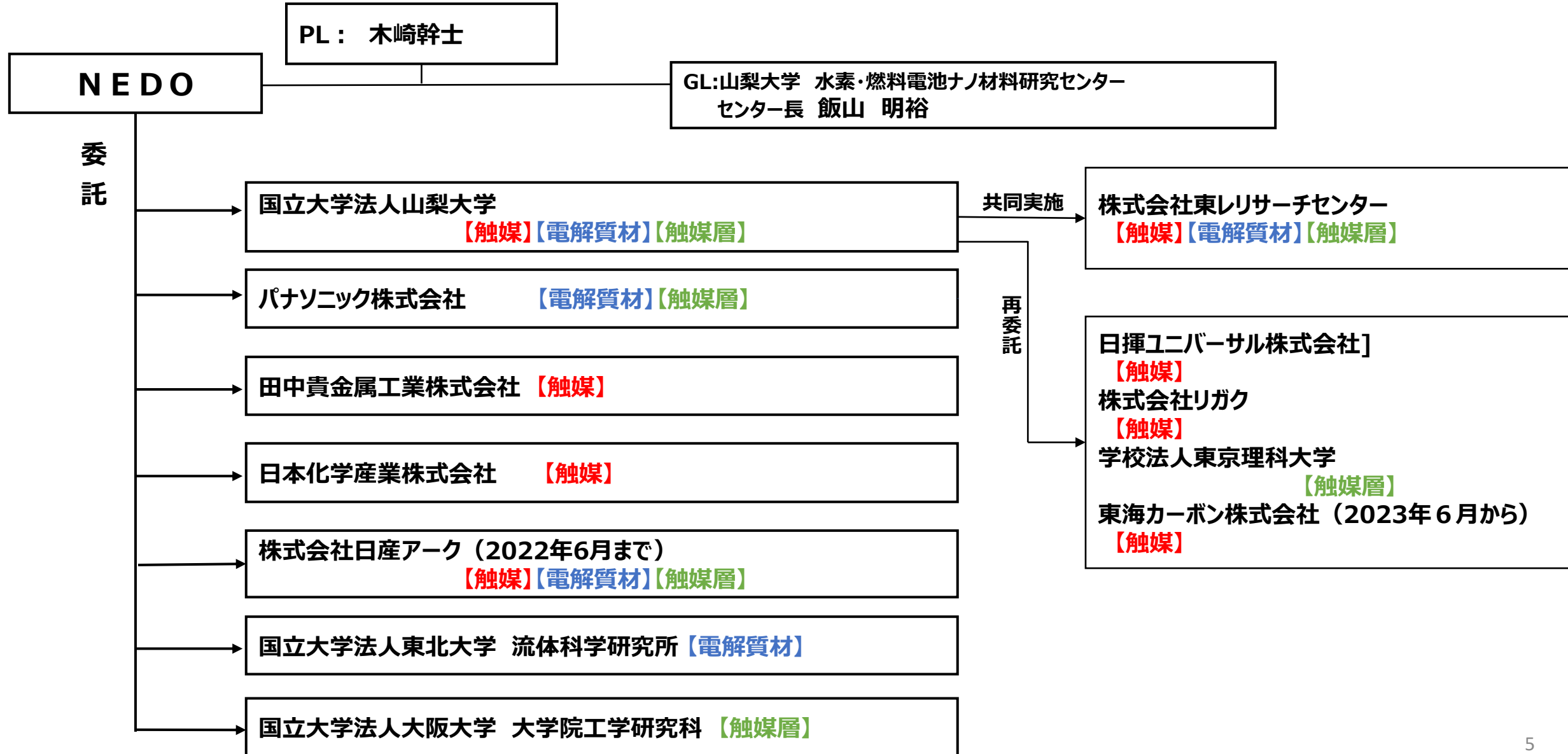
高効率運転目標及び高効率運転目標については、2030年目標IV性能を達成するための触媒・触媒層に関する過電圧低減に関するNEDO公募資料などを参考に設定した。高耐久起動停止等の目標については、商用車に求められる200万km相当の耐久性を実現するため、乗用車の10倍の値を目標とした。極限環境下劣化防止等の目標については、200万km相当に必要な商用車における負荷変動特性を想定した。

研究開発のスケジュール



2. 研究開発マネジメントについて

・ 研究開発の実施体制



3. 研究開発成果について

おもな最終目標達成の状況

A : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発

・山梨大学（共同実施）東レリサーチセンター、（再委託）日揮ユニバーサル、リガク、東京理科大学、東海カーボン（2023年6月から）
・田中貴金属、・日本化学産業、・日産アーク（2022年6月まで）

C : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発

山梨大学、（共同実施）東レリサーチセンター・パナソニック・日産アーク・大阪大学

最終目標への取り組み	達成度	成果・状況
高効率運転		
・高効率運転に寄与する主要メカニズムを明らかにして、酸素還元活性が600～1200A/g (@0.90 V)以上となることを検証する。	○	連珠構造を有するセラミック担体・カーボン担体を設計し、80℃で安定であり、RDEで2030年目標達成が見込まれる酸素還元活性(セラミック担体: 1800 Ag⁻¹ @80℃ 、カーボン担体: 724Ag⁻¹ @RT) に到達した。 10cm ² セルでの評価では、MEAでの質量活性が向上し、2030 年目標とされる劣化後のIV 性能レベルの出力性能を得た 更に、セラミックス系担体を量産化するための量産手法を目途付けした。
高負荷運転		
・高負荷運転に寄与する主要メカニズムを明らかにして、抵抗過電圧が100 mV (@2 A/cm ²)以下になることを検証する	○	触媒層由来の抵抗過電圧を抑制するため、Ptの微細構造や担持状態を検討し、Ptナノロッドにすることで触媒活性が最も高くなることを見出し、その電子電導度は大きく向上、 100mV と目標を達成した。
高耐久起動停止		
・高耐久起動停止等に寄与する主要メカニズムを明らかにして、乗用車の起動停止サイクル数の10倍の耐久性を酸性電解液中にて検証する。	○	80℃だけでなく120℃の作動温度においても市販Pt/C触媒より 10倍以上 高いサイクル耐久性を達成していることを確認した。
極限環境下劣化防止		
・極限環境下劣化防止等に寄与する主要メカニズムを明らかにして、水素雰囲気中での抵抗過電圧が100 mV (@2 A/cm ²)以下であること、および空気中での抵抗過電圧が500 mV (@2 A /cm ²)以上になることを検証する。	○	Pt/CeO ₂ 系にて、一定のプロトコルで水素枯渇耐性試験をRDEにて実施した市販のPt/カーボン系触媒より高耐久であることを確認した。 水素雰囲気中(100mV以下)、空気雰囲気中(500mV以上)と抵抗過電圧目標を達成した。

3. 研究開発成果について

おもな最終目標達成の状況

B：高効率・高出力・高耐久を実現する炭化水素系電解質材料の研究開発

・山梨大学、パナソニック、日産アーク、東北大学流体科学研究所
(共同実施) 東レリサーチセンター

最終目標への取り組み	達成度	成果・状況
高効率運転		
・炭化水素系高分子電解質の主鎖構造、親水部と疎水部の組成と連結性、結合官能基、置換基等をそれぞれ設計して組み合わせる手法で、得られる電解質膜が高効率運転に寄与するための主要な因子を明らかにする。現在のフッ素系電解質膜に比べてプロトン導電率が2倍、ガス透過率が1/10を得る。	○	ポリフェニレン系電解質膜のプロトン導電性と機械強度を共に向上させることを目的として、部分フッ素化の効果を検討した。詳細な検討をすることにより、プロトン導電率と機械強度をいずれも向上した三元共重合膜を開発した。ダイ塗工及びバーコーター塗工での製膜を実施し、低いセル抵抗と高いIV特性と、プロトン伝導率 2倍以上 、ガス透過率 1/10 と最終目標の達成を確認した。
高負荷運転		
・炭化水素系高分子電解質の分子構造や配列、部分フッ素基導入等をそれぞれ設計して組み合わせる手法で、得られる電解質イオノマーが高負荷運転に寄与するための主要な因子を明らかにする。現在のフッ素系イオノマーに比べてプロトン導電率が2倍、ガス透過率が2倍を得る。	○	気体透過性を向上させる分子内に導入する嵩高い置換基として、三元共重合体を検討した。C6組成の最適化で、酸素透過率がNafion比 4倍 増大することを見出し、脂環式構造の導入で目標レベルの酸素透過率を実現した。アイオノマーの白金表面における吸着の構造及び含水率と酸素透過の相関のシミュレーションを行い、実験を説明できる計算であることが確認できた。
高耐久起動停止等		
・炭化水素系高分子電解質の分子構造、結晶性や分子配向等をそれぞれ設計して組み合わせる手法で、得られる電解質膜が高耐久起動停止等に寄与するための主要な因子を明らかにする。そして、化学安定性と機械的耐久性が現在のフッ素系電解質膜の1倍（同等）を得る。	○	目標達成のため、多孔膜基材による補強効果を検討した。補強材としては、ポリエチレン(PE)製延伸多孔膜を用い、製膜を行った。PEの細孔にも電解質を含浸させることができ、高温OCV保持乾湿度サイクル試験などにより、Nafion比 4倍 以上の、極めて優れた化学安定性と機械安定性を併せ持つことを実証した。

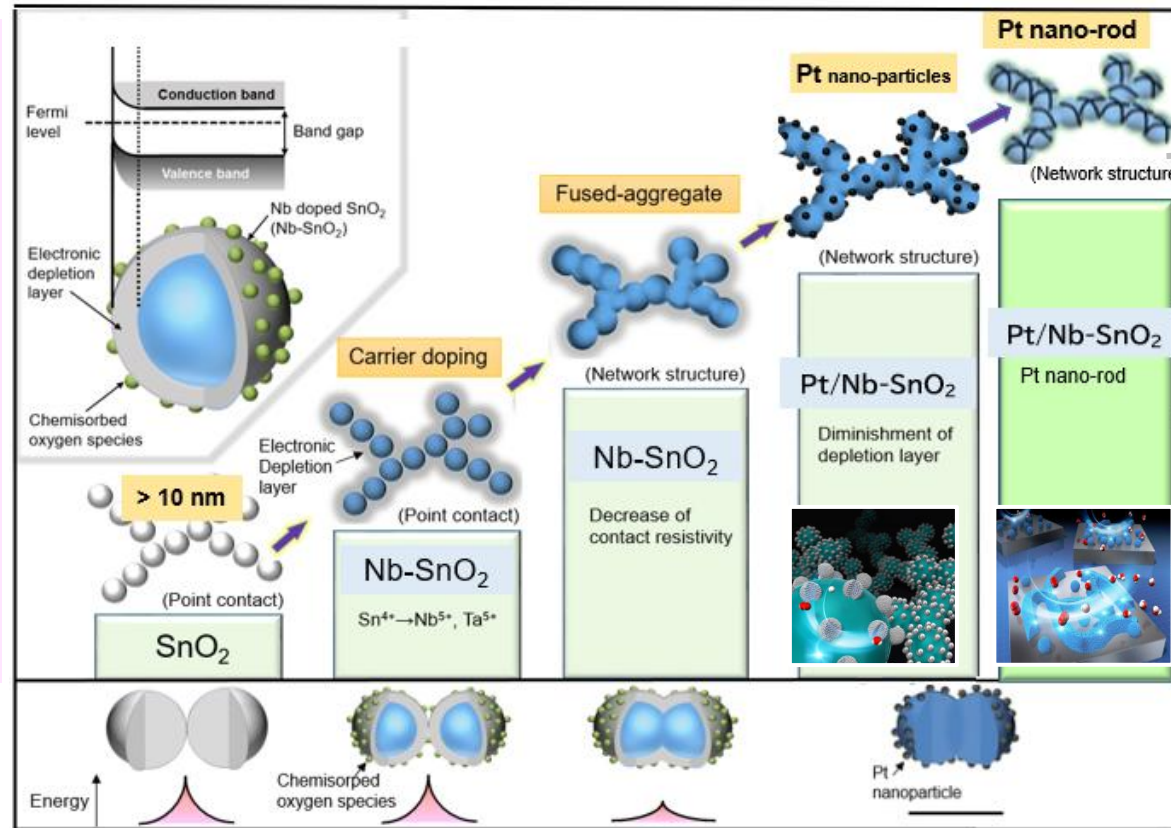
3. 研究開発成果について

A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

a. セラミックス系担体触媒（担当：山梨大学、田中貴金属工業、日本化学産業、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター、（再委託リガク）

- 広い温度範囲
(max.120°C)にて活性向上
+ 高耐久性 + 抵抗過電圧を
低下させる材料設計方針を策定した。

- ✓ 酸化物担体触媒の電子伝導性大幅向上（金属伝導化）
- ✓ 酸化物担体触媒・Pt自己組織化利用（Ptナノロッド形成）



ACS Catal. 11 (2021) 5222.

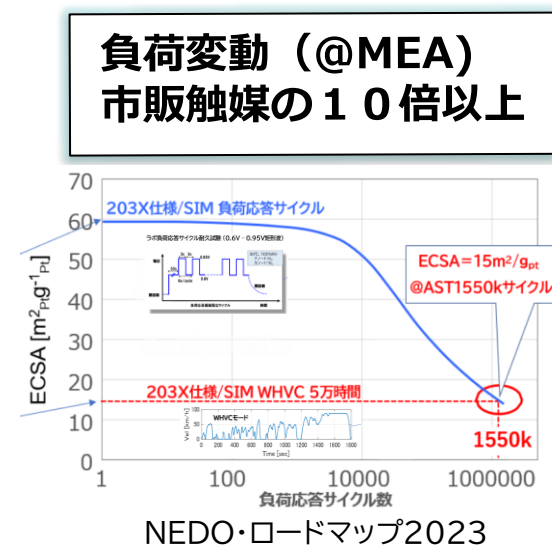
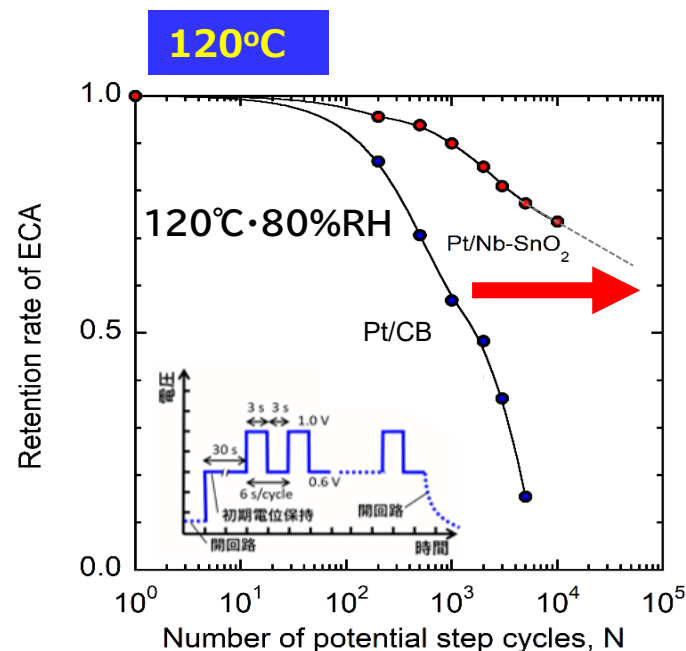
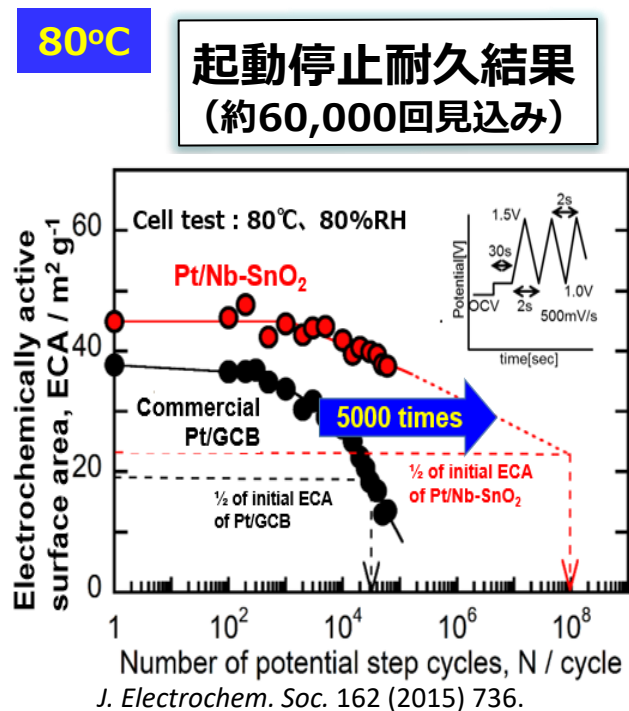
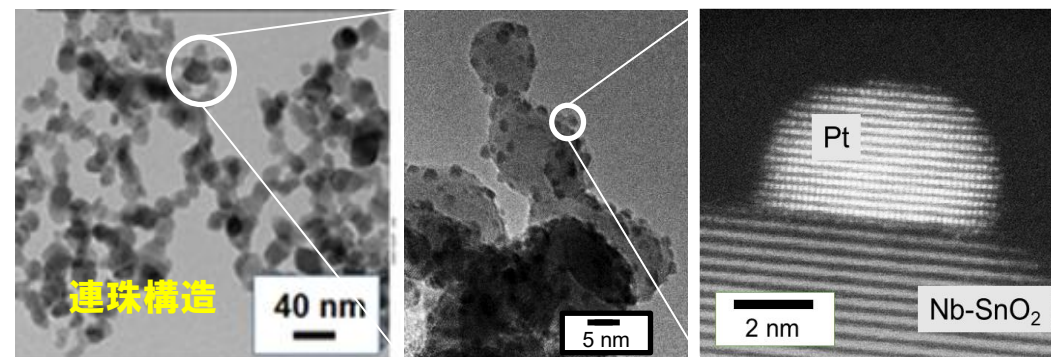
ACS Appl. Mater. & Interfaces 11 (2019) 34957.

3. 研究開発成果について

A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

a.セラミックス系担体触媒（担当：山梨大学、田中貴金属工業、日本化学産業、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター、（再委託リガク）

- セラミックス担体触媒は、起動停止や負荷変動サイクル耐久性において、市販触媒の10倍以上の高い耐久性を示す。



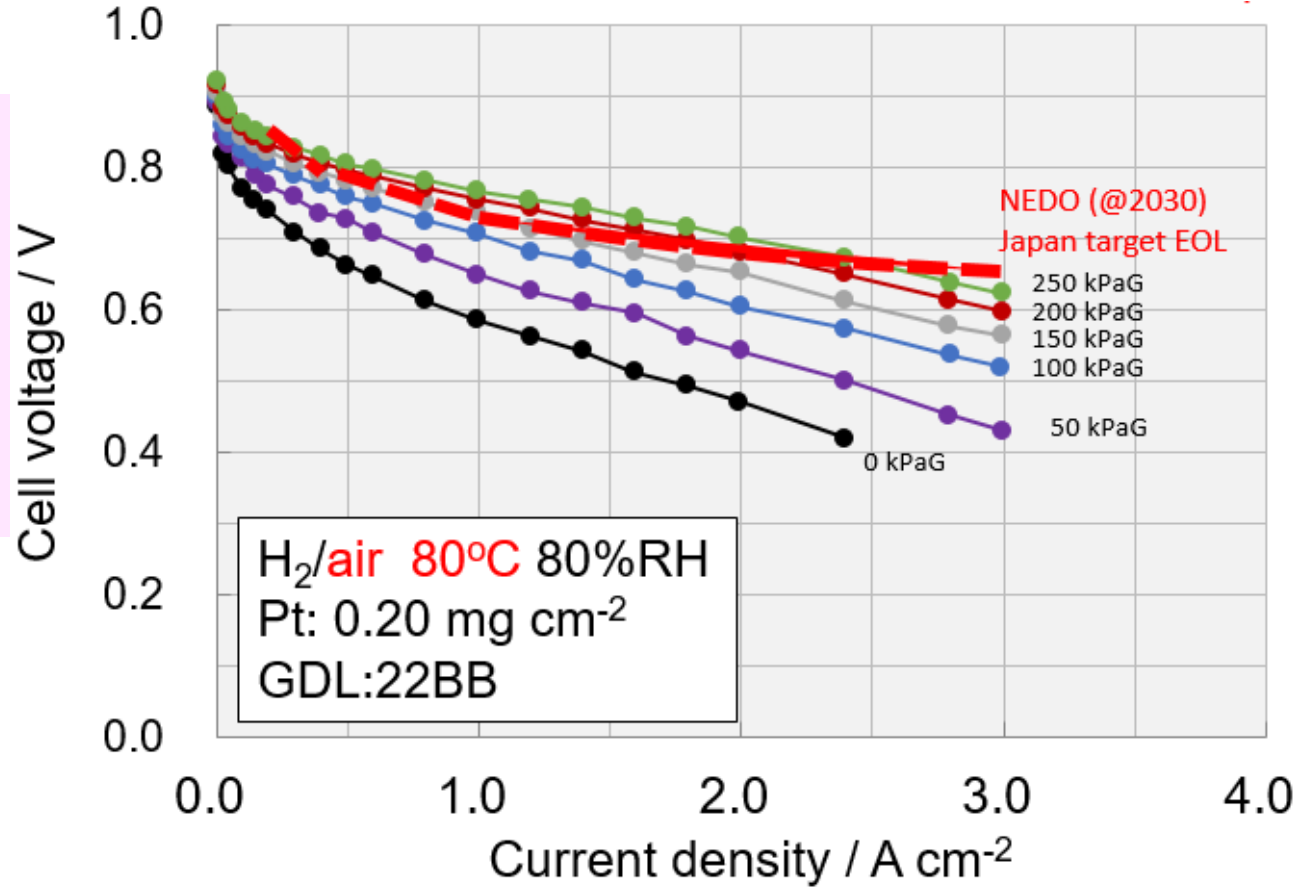
WHVC+シミュレーションでの耐久
(203x) 1.55×10^6 サイクル(@初期ECSAの1/4)も120℃にて見通している。

3. 研究開発成果について

A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

a. セラミックス系担体触媒（担当：山梨大学、田中貴金属工業、日本化学産業、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター、（再委託）リガク）

■ セラミック担体触媒
の出力性能は
NEDO2030年目
標（EOL）レベ
ルの出力性能が得
られた。



それぞれを適切に制御することでNEDO2030 EOLレベルまで到達

- ・高結晶性（Pt&セラ担）
- ・Pt/担体界面構造
- ・担体微細構造
- ・アイオノマー被覆構造
- ・触媒層構造
- ・セル設計
- ・水管理

Ionomer

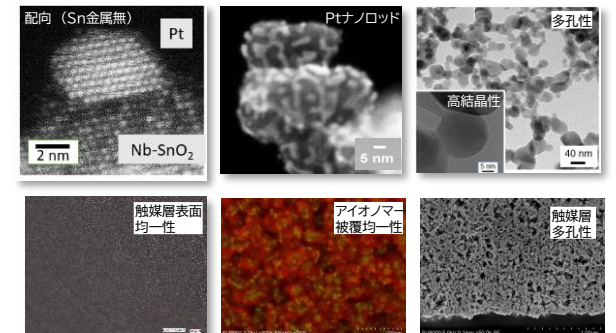
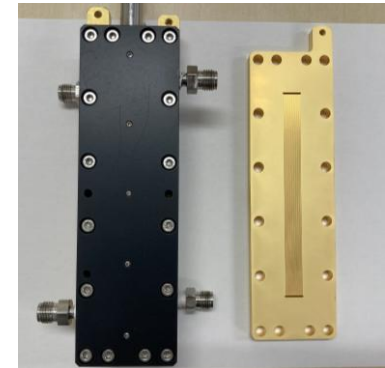
AGC HOPI-A

Membrane

Gore-Select® membrane
(thickness: 8μm)

Cell

1 cm × 10 cm

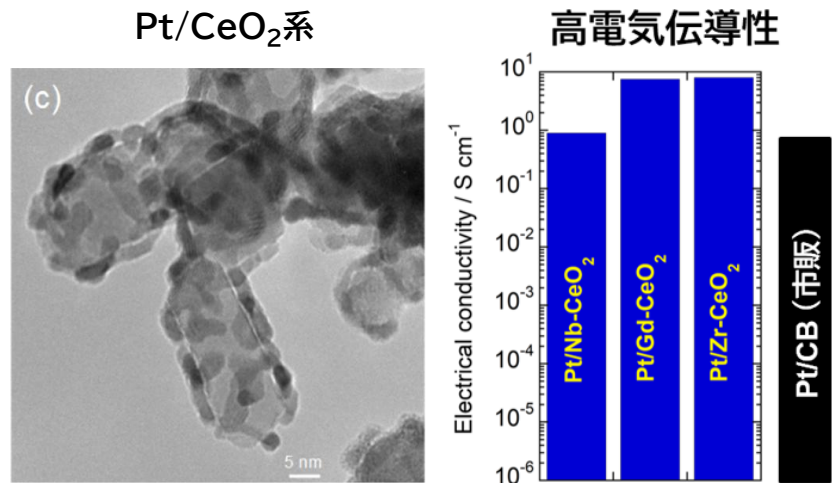


3. 研究開発成果について

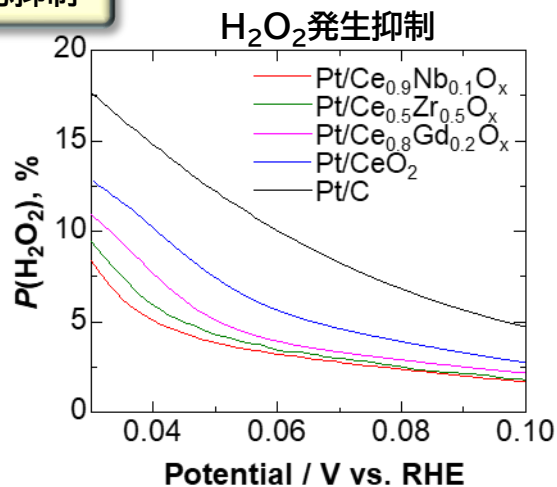
A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

a. セラミックス系担体触媒（担当：山梨大学、田中貴金属工業、日本化学産業、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター、（再委託リガク）

■ 過酸化水素発生量を抑制しつつ、水素枯渇耐性を持つアノード触媒を創製（Pt/CeO₂系）

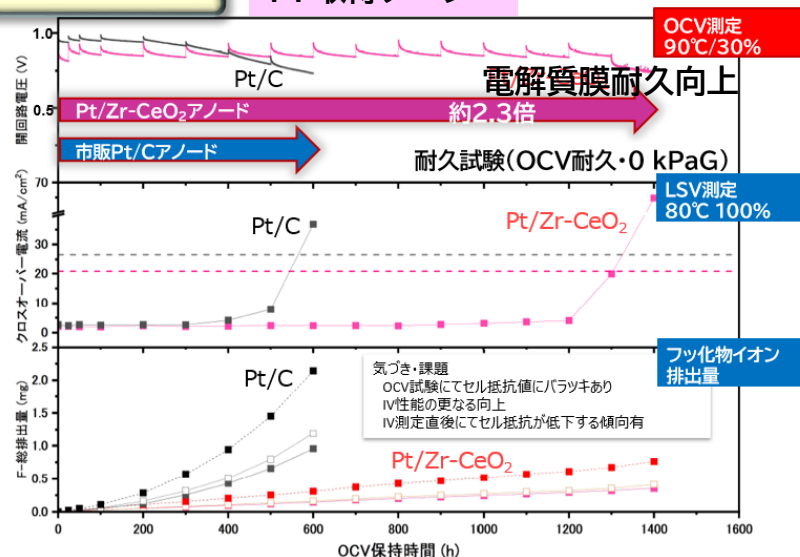


2電子反応抑制

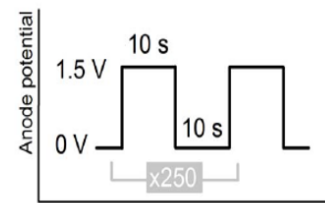


2電子反応抑制

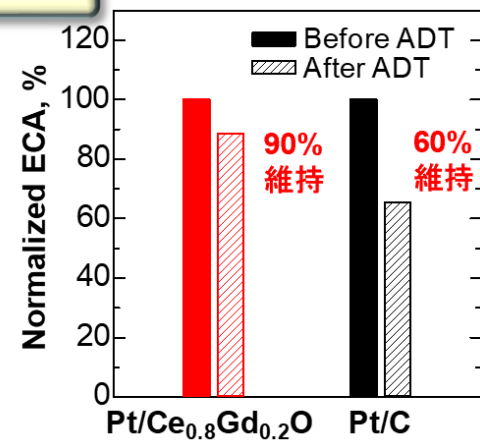
PF取得データ



転極対策・炭素担体酸化抑制



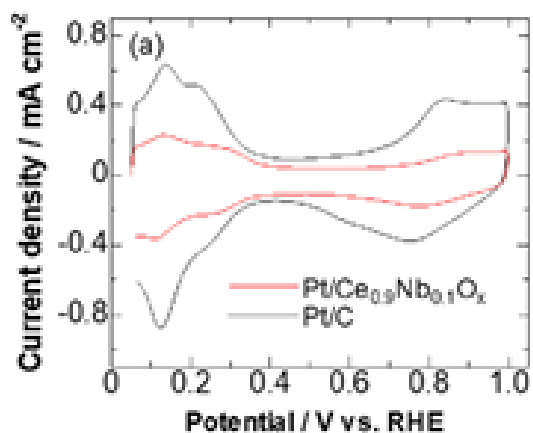
S. Henning, R. Shimizu, et al., J. Electrochem. Soc. 165 (6) F3001-F3006 (2018).



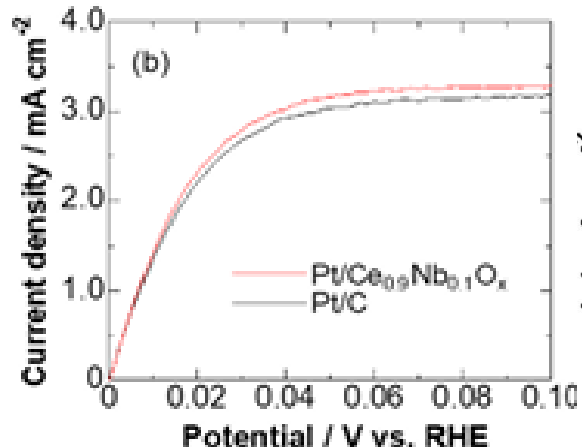
3. 研究開発成果について

A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

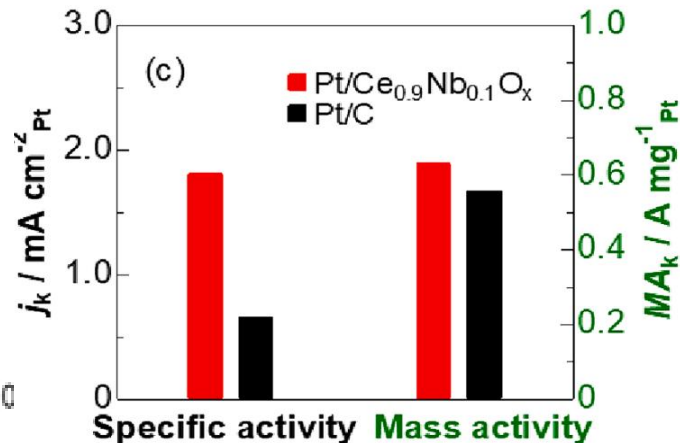
a. セラミックス系担体触媒 (担当: 山梨大学、田中貴金属工業、日本化学産業、日産アーク (2020年7月~2022年6月)、(共同実施) 東レリサーチセンター、(再委託) リガク)



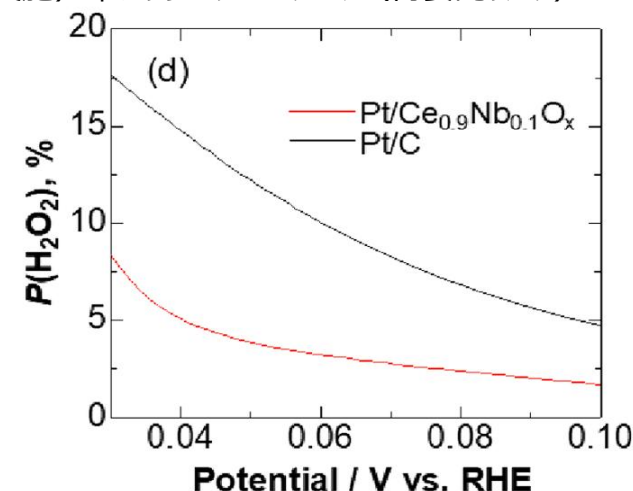
Cyclic voltammograms measured in N_2 -saturated 0.1 M $HClO_4$



HOR polarization curves recorded in H_2 -saturated 0.1 M $HClO_4$

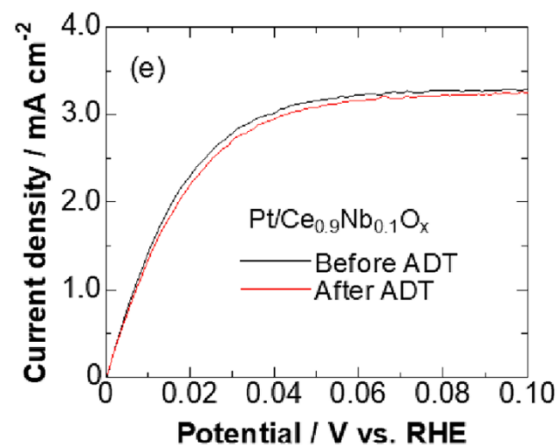


HOR specific activity j_k and mass activity MA_k at 0.02 V

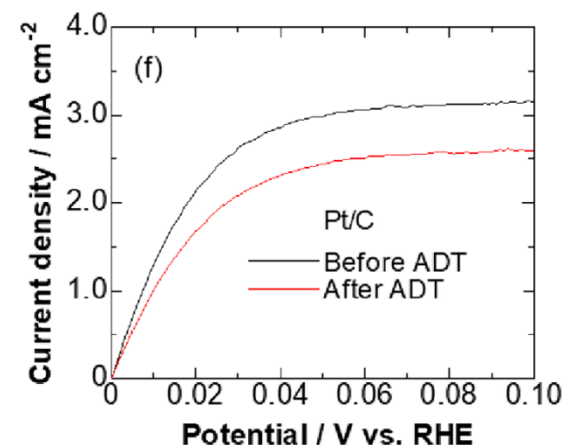


H_2O_2 yield $P(H_2O_2)$ evaluated in O_2 -saturated 0.1 M $HClO_4$

- 高い比活性と質量活性を示し、耐久性にも優れている。



HOR polarization curves before and after ADT for $Pt/Ce_{0.9}Nb_{0.1}O_x$



HOR polarization curves before and after ADT for Pt/C

出典 :
<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2024.107733>
Electrochemistry Communications 163 (2024) 107733

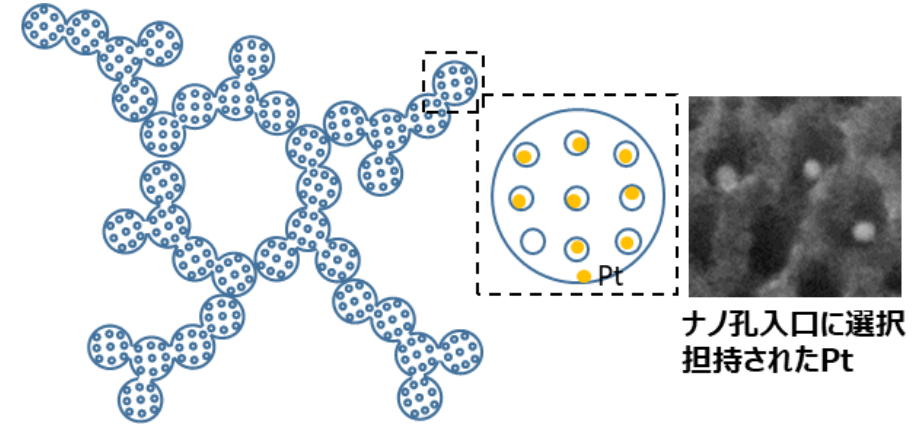
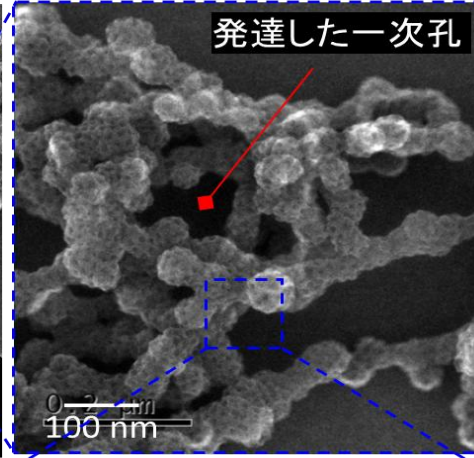
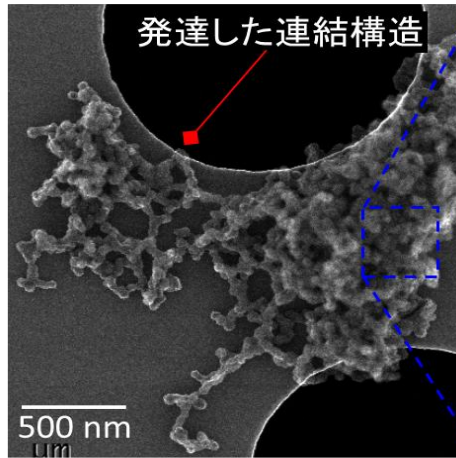
3. 研究開発成果について

A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

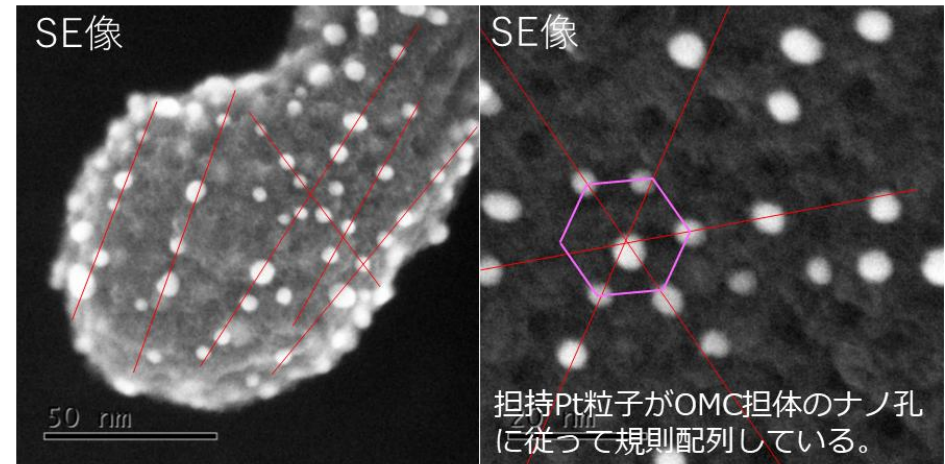
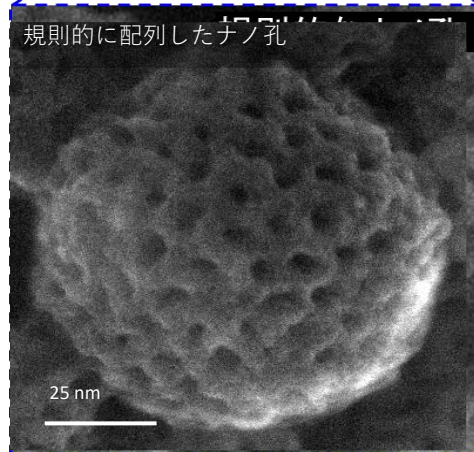
b.カーボン担体系触媒

(担当：山梨大学、田中貴金属工業、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター、日揮ユニバーサル、東海カーボン(2023年6月～)

・ 新規なネットワーク構造を有する規則的メソポーラスカーボン（OMC）担体とそのメソ孔内へのPt選択担持法の開発



鋳型法カーボン（OMC連結構造担体）のSTEM像



Pt粒子が担体表層に選択担持されたPt/鋳型法カーボン触媒のSTEM像

3. 研究開発成果について

A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

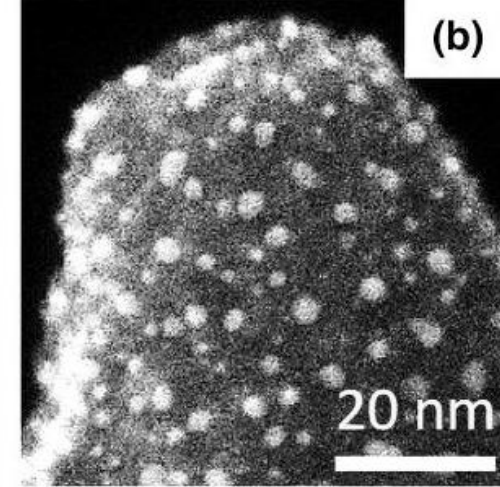
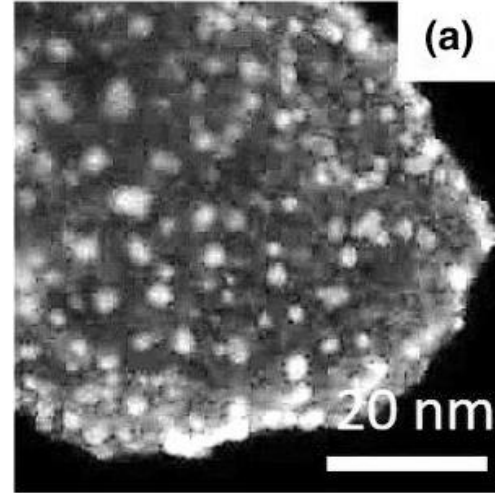
b.カーボン担体系触媒

(担当：山梨大学、田中貴金属工業、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター、日揮ユニバーサル、東海カーボン(2023年6月～)

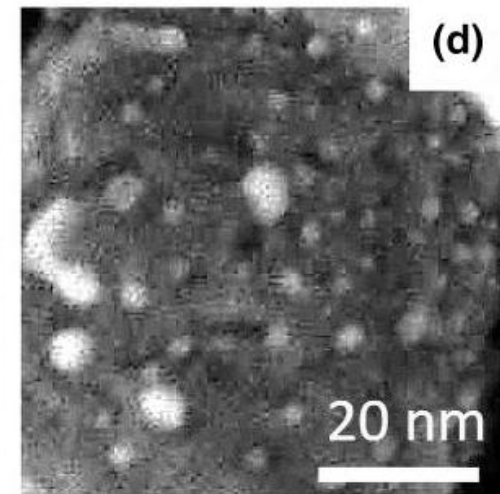
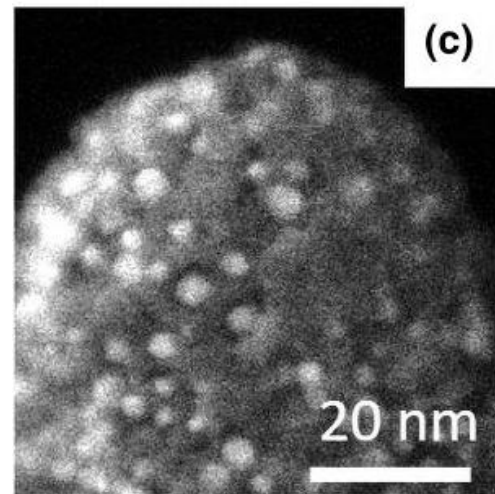
- Pt粒子は、酸素雰囲気下と水素雰囲気下とで異なる挙動を示した。

初期：（室温）
微細なPt粒子が、
ナノポアの外表面
近傍に分散してい
る。

O₂雰囲気 +
200℃：
Pt粒子径の増大と、
ナノポアの**直径が
拡大**した。Pt粒子
による酸化腐食の
ためと考えられる。



N₂雰囲気 +
200℃：
Pt粒子径は変わら
ず、多少深い場所
に移動している。



H₂雰囲気 +
200℃：
一部Pt粒子径の増
大が見られる。ナ
ノポアの**内部に向
かって移動**した。

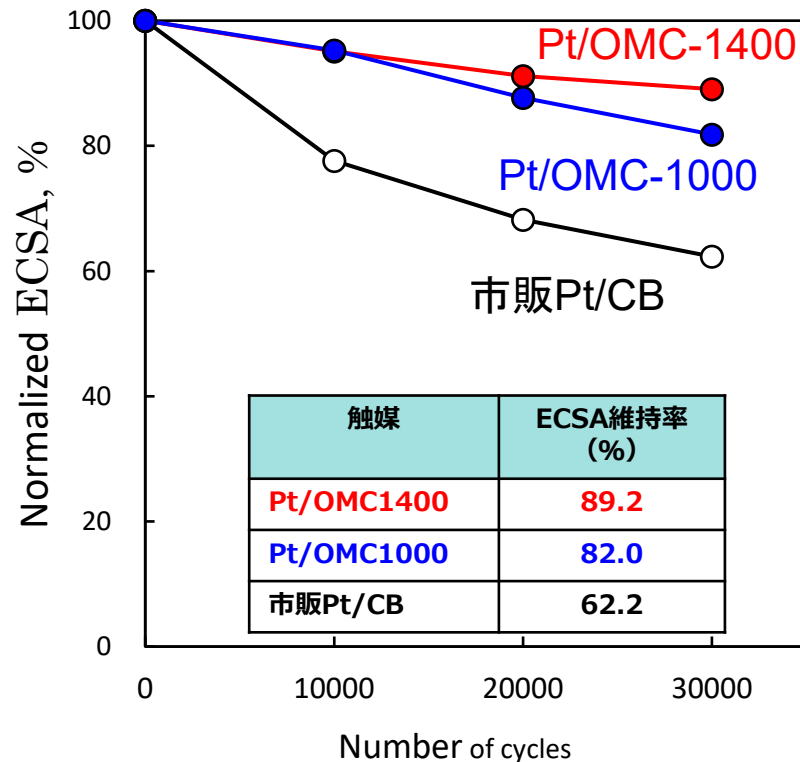
3. 研究開発成果について

A.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発」

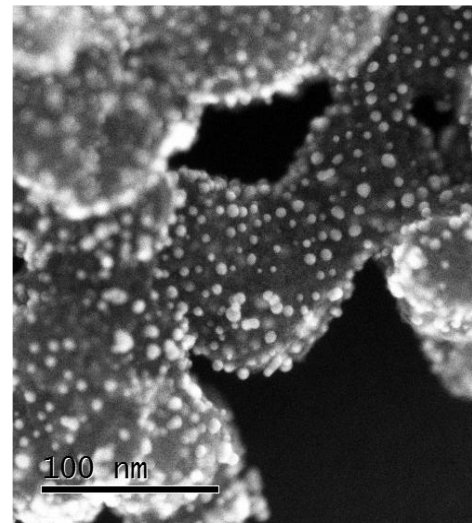
b.カーボン担体系触媒

(担当：山梨大学、田中貴金属工業、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター、日揮ユニバーサル、東海カーボン(2023年6月～)

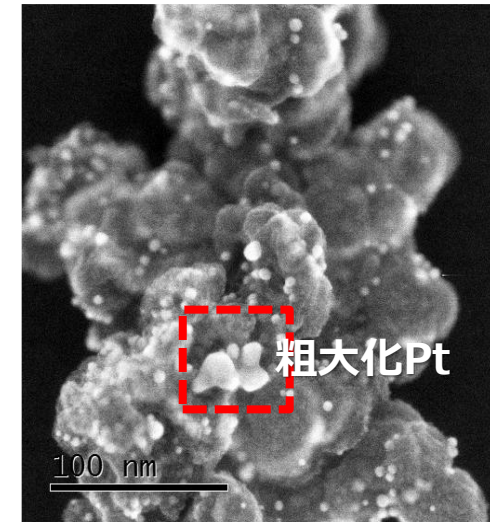
- Pt/OMCは市販Pt/CBと比較して、負荷変動サイクルに対して30,000サイクルで80%以上の高いECSA維持率を示した。



負荷変動30,000サイクル後のSTEM像



Pt/OMC-1000



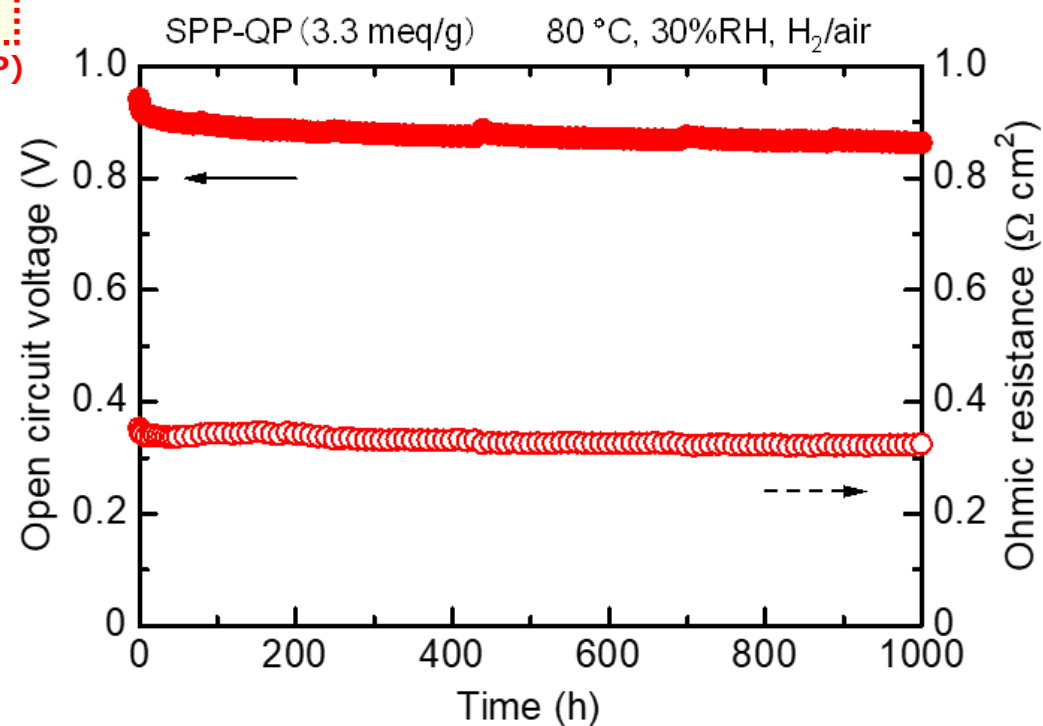
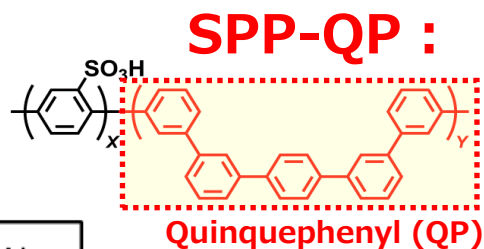
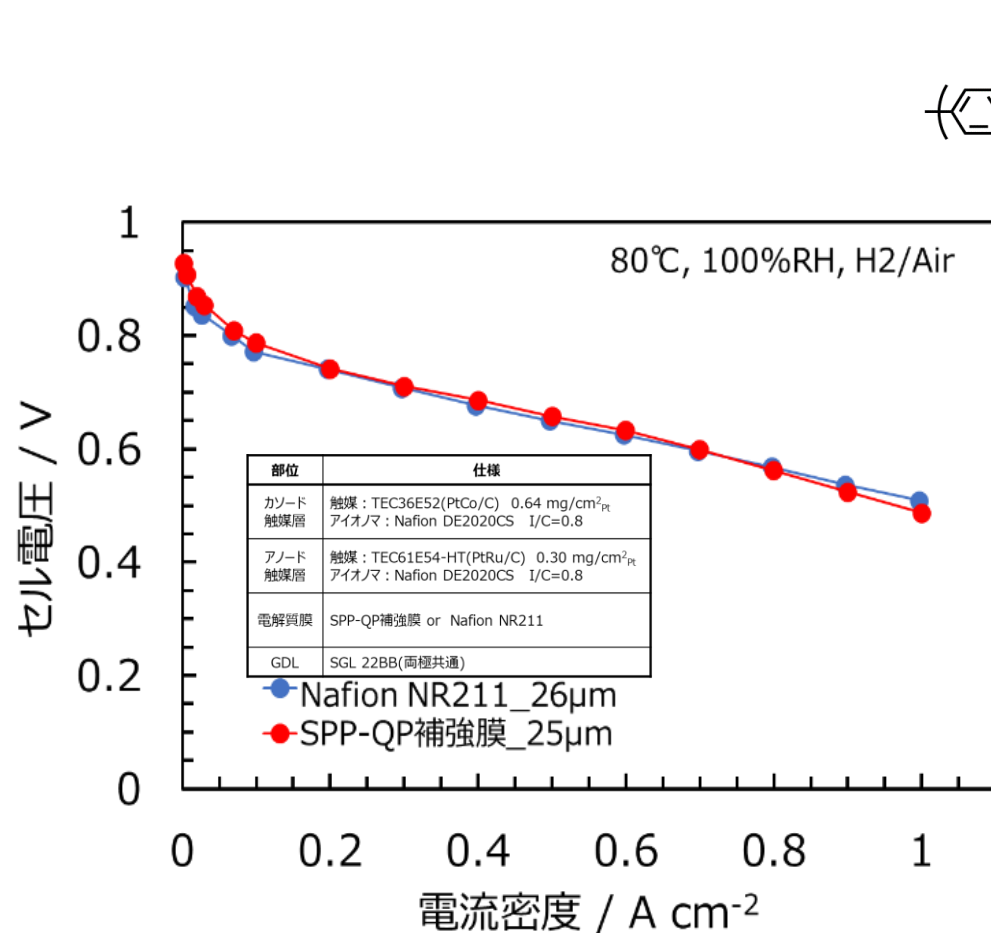
市販Pt/CB

3. 研究開発成果について

B.「高効率・高出力・高耐久を実現する炭化水素系電解質材料の研究開発」

(担当：山梨大学、パナソニックホールディングス、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター）

- 適度な大きさの疎水部と親水部のブロック構造（イオンクラスターネットワーク）を形成して、フッ素系膜と同等のセル性能と高いOCV耐性を実現できる。

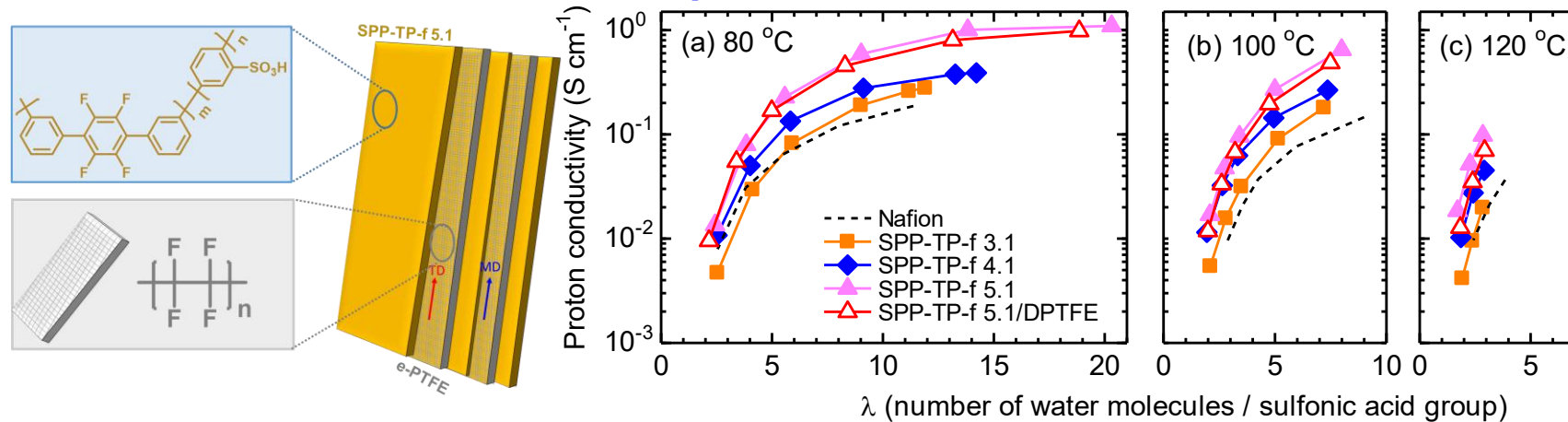


3. 研究開発成果について

B.「高効率・高出力・高耐久を実現する炭化水素系電解質材料の研究開発」

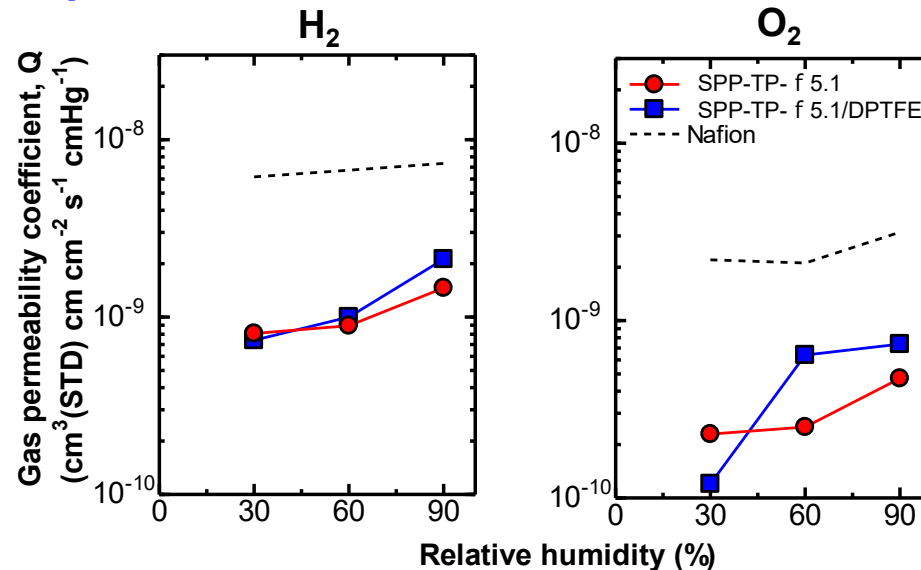
(担当：山梨大学、パナソニックホールディングス、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター）

部分フッ素化ポリフェニレン系電解質/ePTFE補強膜のプロトン導電率と含水率の関係



SPP-TP-f-5.1およびSPP-TP-f-5.1/ePTFE補強膜は、含水率(λ)が同じでもプロトン導電率が高い

部分フッ素化ポリフェニレン系電解質の気体透過性



SPP-TP-f-5.1およびSPP-TP-f-5.1/DPTFE補強膜は、幅広い湿度範囲にわたって低気体透過率を達成

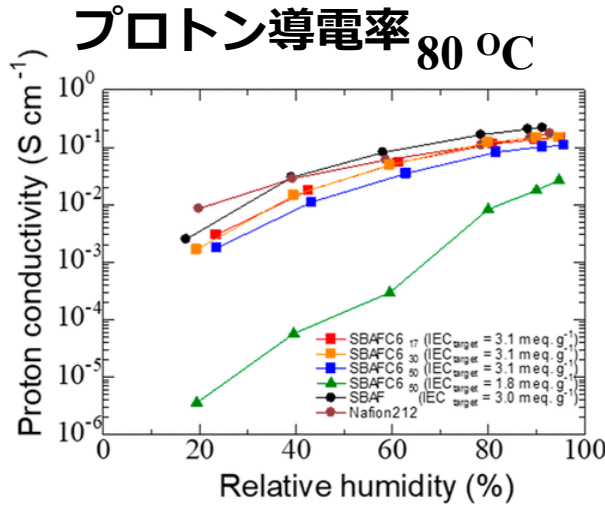
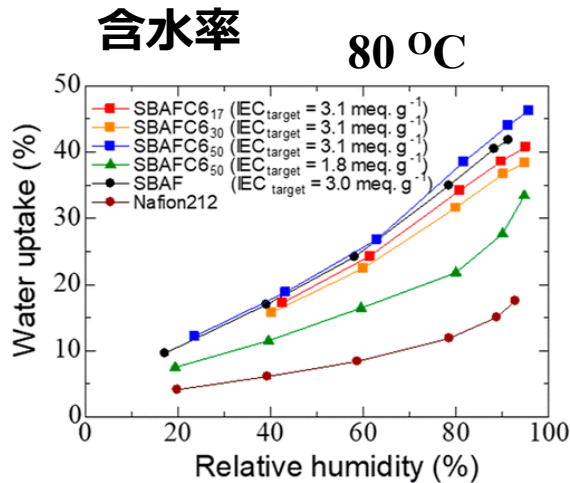
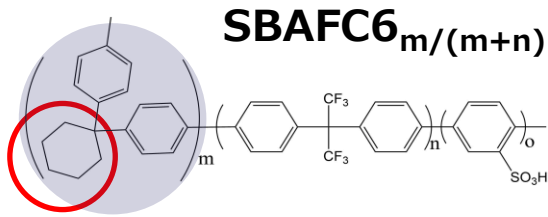
Z.Long and K. Miyatake, iScience 24, 102962, September 24, 2021
Open access article
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

3. 研究開発成果について

B.「高効率・高出力・高耐久を実現する炭化水素系電解質材料の研究開発」

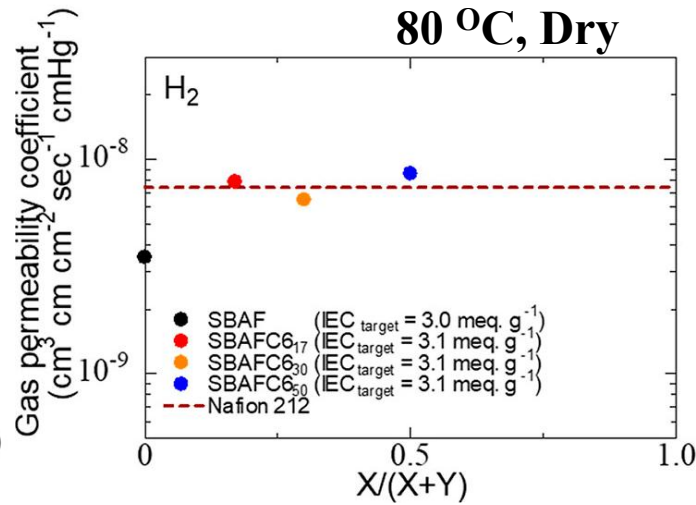
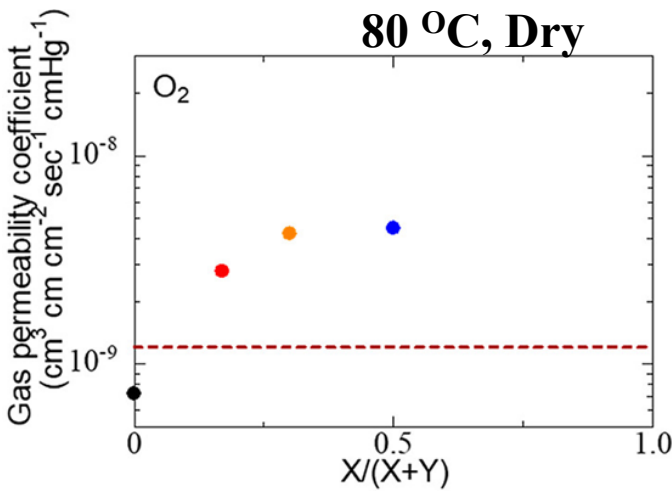
(担当：山梨大学、パナソニックホールディングス、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、（共同実施）東レリサーチセンター）

嵩高い構造を導入した炭化水素系イオノマーの含水率と導電率



・ C6環構造の導入による、含水率やプロトン導電率の変化は少なく、親水性特性への影響は少ないと考えられる。

嵩高い構造を導入した炭化水素系イオノマーの気体透過率



・ C6構造の導入により、酸素透過係数の増大（約6倍）効果を示し、Nafion NRE 212の約4倍となった。

・ C6構造の導入により、水素透過係数の増大（約2倍）効果を示し、Nafion NRE 212と同等であった。

3. 研究開発成果について

C.「高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発」

高耐久起動停止等技術開発：

(担当：山梨大学、パナソニックホールディングス、日産アーク（2020年7月～2022年6月）、大阪大学、（再委託）東京理科大学、（共同実施）東レリサーチセンター）

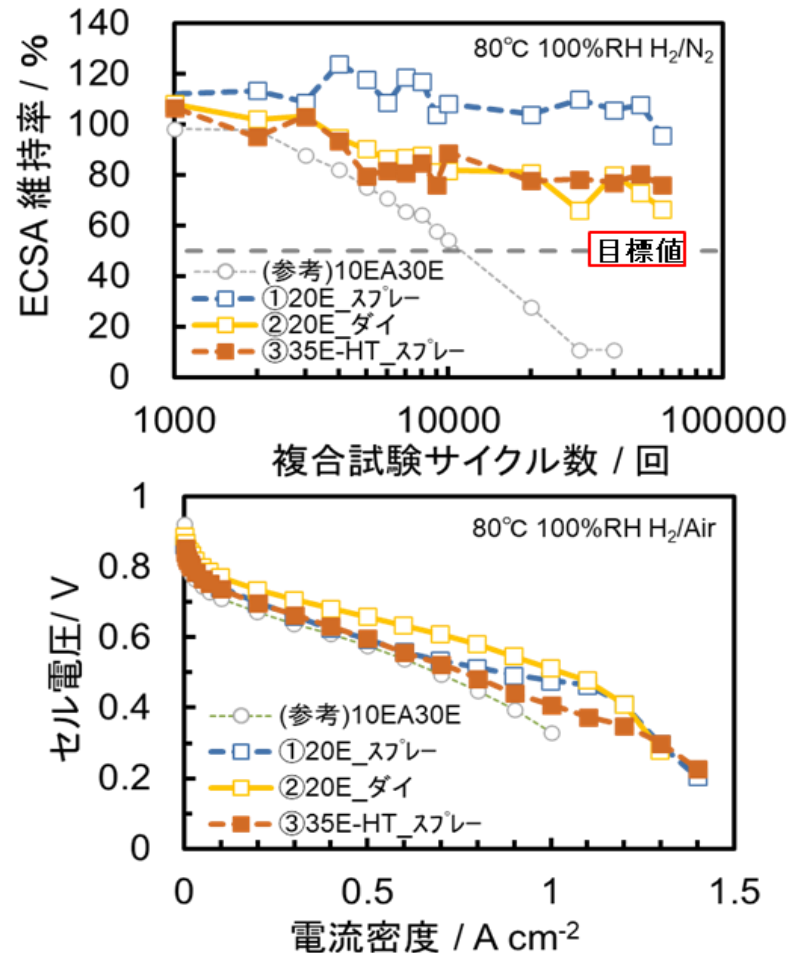
起動停止サイクル試験：

スプレー塗工、ダイ塗工品ともに最終目標の6万時間耐久後の目標値をクリアする結果が得られた。また、初期IV性能については、どのセラミック触媒もカーボン触媒と同等以上の性能であることを確認した。

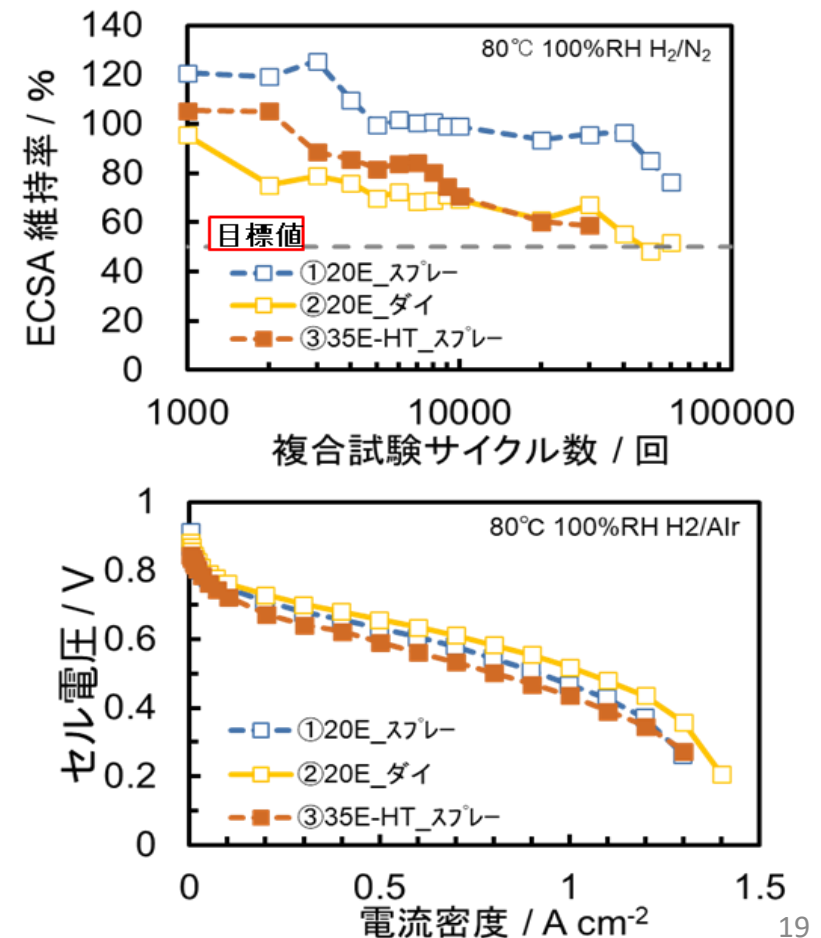
負荷変動サイクル試験：

スプレー塗工、ダイ塗工品ともに6万回耐久後の目標値のクリアを確認した。また、初期IV性能についても、起動停止特性のセルと同等の性能が得られた。

起動停止耐久試験結果
(上：ECSA維持率、下：初期I/V特性)



負荷変動耐久試験結果
(上：ECSA維持率、下：初期I/V特性)



3. 研究開発成果について

1. 特許：15件出願（1件登録済）
2. 論文：26報
3. 研究発表・講演：85件
4. 受賞：5件
5. 広報等：39件

4. 今後の見通しについて

- **実用化・事業化のイメージ**

- ✓ セラミックス担体触媒は、日本化学産業による担体に田中貴金属工業で触媒担持して、事業化を検討中。
- ✓ OMC触媒は、東海カーボンによるOMCに日揮ユニバーサルで触媒担持して、事業化を検討中。

- **成果の実用化に向けた想定スケジュール**

2025年	2026年	2027年	2028年	2029年度以降
製品設計	市場開発	設備投資	生産	販売
設計支援				
	市場開発支援			
	製品開発支援			
		生産設備仕様検討支援		
			生産立ち上げ支援	
				販売後対応支援