

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
／共通課題解決基盤技術開発

／**高効率・高出力・高耐久PEFCを実現する革新的材料の研究開発事業**

発表者 山梨大学 飯山明裕

国立大学法人山梨大学
(共同実施) 株式会社 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

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
株式会社日産アーク
国立大学法人東北大学
国立大学法人大阪大学

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

事業概要

1. 期間

開始：2020年7月 終了（予定）：2025年2月

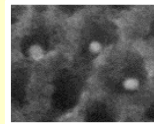
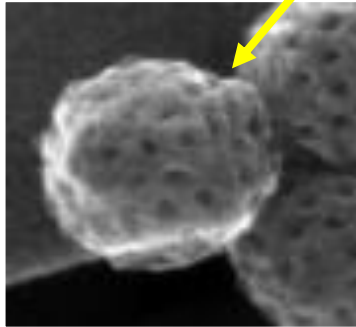
燃料電池の2030年以降に目指すべき目標性能を達成するための担体・触媒・電解質・触媒層に関する過電圧低減と耐久性向上を達成させ、高効率・高出力・高耐久を両立した新たな電極・電解質材料を産業界と共に実用化につなげる。

本プロジェクトにおいては、以下の3テーマを実施する。

- 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」

高効率

カーボン担体表面
アクセシブルポア形成

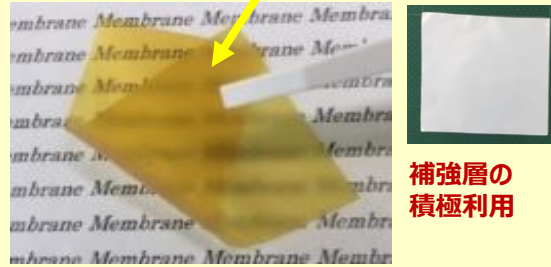


有効な位置
へのPt担持

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

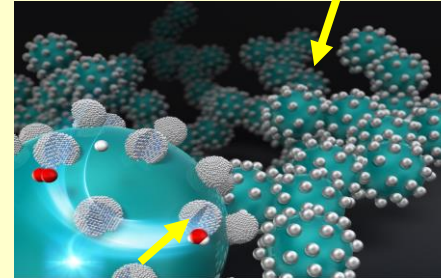


補強層の
積極利用

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

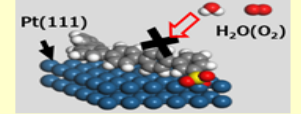
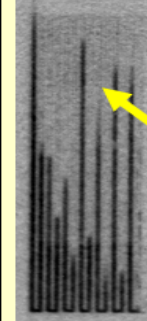


Pt触媒の電子状態・構造制御

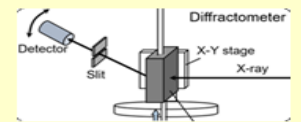
形状異方性・表面機能を積極利用した
高耐久Pt担持セラミックス担体・触媒

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

○中間目標（2022年6月）

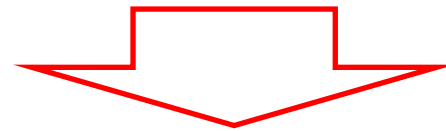
- ・高活性・耐久性をもつ電極触媒、高プロトン伝導性・ガスバリア性をもつ電解質膜及びそれらを用いたセルにて、機能と劣化メカニズムを検証する。
- ・現状比6倍の耐久性と1.5倍の活性を持つ電極触媒と1.6倍のプロトン伝導度とガスバリア性を持つ電解質を設計する。

○最終目標（2024年度）

- ・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。

1. 事業の位置付け・必要性

- ・関連サイエンス、先端計測技術を駆使して、山梨大学が既に得ている産業界からの要望や産業界の持つ共通課題を解決する新規な電極触媒・電解質（膜／イオンマー用）材料に関する研究開発を行う。
- ・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。



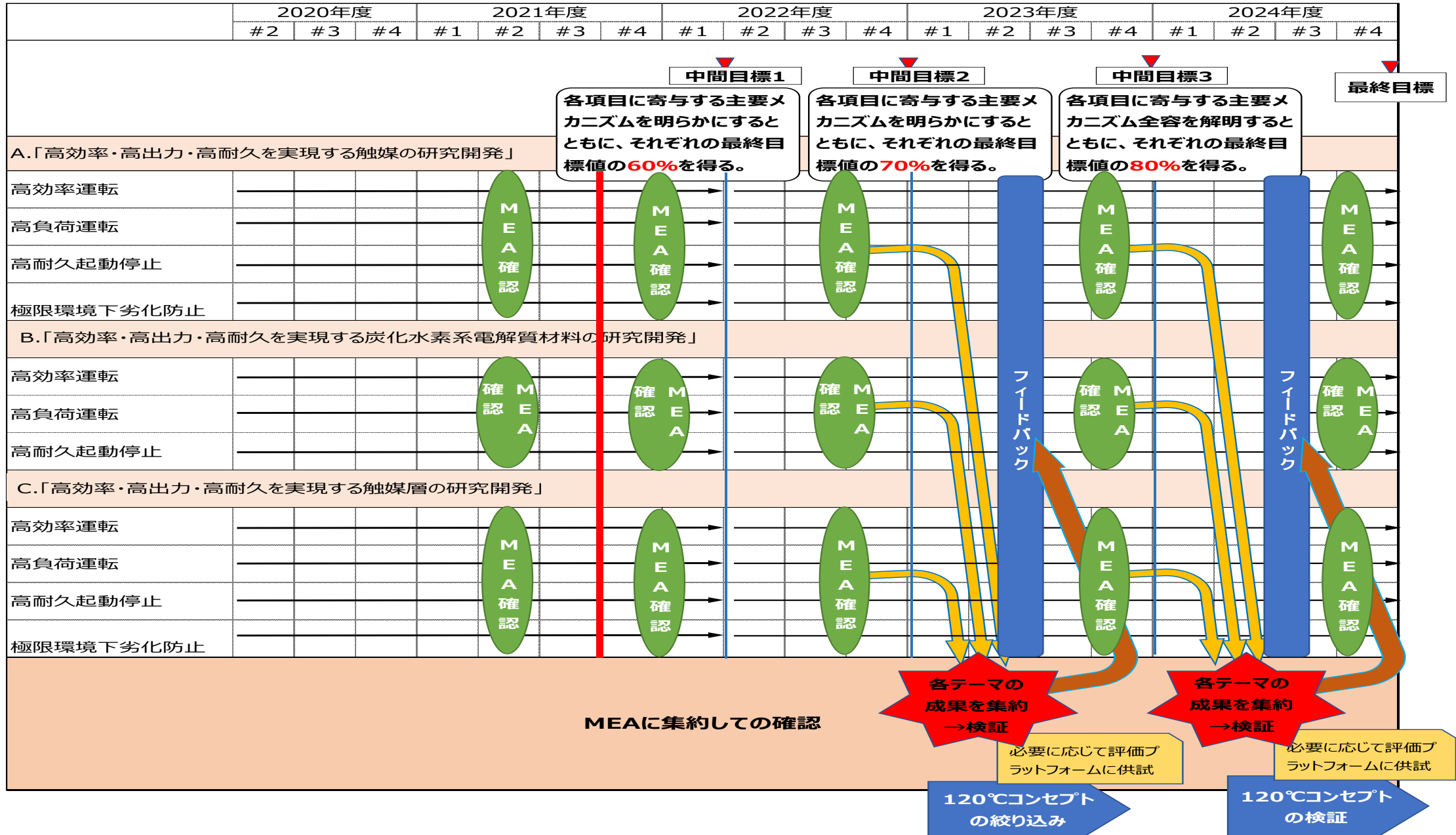
・これらを通して、産業界の持つ共通課題を解決する高効率・高出力・高耐久を両立した新たな電極・電解質材料を創製し、産業界と共にそれら材料を実用化につなげる。2030年目標性能を達成するための担体・触媒・電解質・触媒層に関する過電圧低減と耐久性向上を達成する。

2. 研究開発マネジメントについて

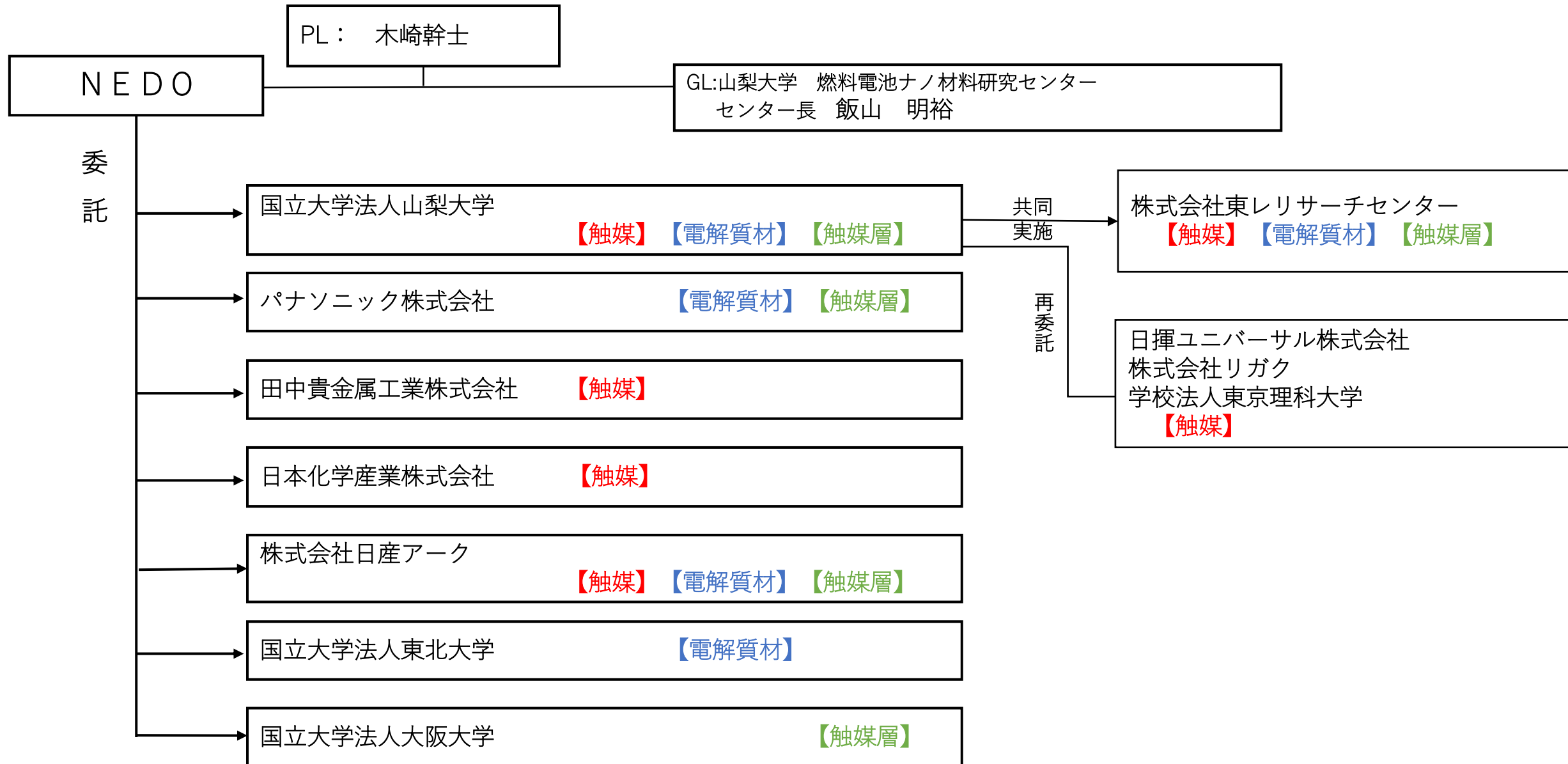
開発目標の位置づけ

	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」
現在の開発目標が設定された背景	2020年1月にFC-Cubicから情報共有いただいた2030年のIV性能予測と各要素技術アイテムから過電圧改善値を読み取り設定。山梨大学で対応する各研究テーマの材料・構造の2 A/cm ² における目標過電圧改善値とした。
ベンチマーク（国内外）結果との比較	目標のベースとしたFCCJから発信された2030年の性能目標は米国、欧州、中国それぞれの目標に対して優位である。このため現在の開発目標値は海外の大学・機関に比べて優位であると判断する。
産業界等のニーズに対して、研究開発目標レベルが妥当か	FCCJ目標は産業界のニーズに基づいたものである。本事業ではFCV・エネファーム・材料等の企業より関心をいただき、各社のそれぞれの課題に向けて、目標を精査し新材料およびそれを活かす触媒層の研究開発を共同で進めている。従って、産業界のニーズを的確にとらえ、妥当な目標設定となっていると判断する。
目標は、産業界等（関心表明企業等）と議論されてきたものか	関心表明企業をはじめとする燃料電池関連企業とのコミュニケーション(次ページ参照)を通じてニーズを的確にとらえているので、今回設定した最終目標を実現することにより実用化達成できると考える。

2. 研究開発マネジメントについて



2. 研究開発マネジメントについて



3. 研究開発成果について 中間目標達成の状況

・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
 ・田中貴金属 ・日本化学産業 ・日産アーク

A : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発

中間目標（2022年度6月）	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360A/g (@0.90 V)以上となることを検証する。	○	特殊な微細構造をもつセラミック担体・カーボン担体を設計し、その一部にて2030年目標に匹敵する酸素還元活性をRDEで確認した。触媒の電気伝導度と接触抵抗を大幅低減させ、抵抗過電圧の抑制にも成功した。これらの活性向上要因をSPRing-8でのオペランド解析や山梨大学の最新評価設備等で解明し、更なる活性向上方針をまとめた。
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170 mV (@2 A/cm ²)以下になることを検証する	○	特殊な微細構造をもつセラミック担体にPtナノロッドを担持した触媒にて、触媒の電気伝導度と接触抵抗の大幅低減に成功した。その抵抗過電圧が中間目標に到達することをMEAで確認した。さらに、その触媒を用いたMEAは評価解析プラットフォームにて評価され、結果のフィードバックを受けた。
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6倍の耐久性を酸性電解液中にて検証する。	○	特殊な微細構造をもつセラミック担体にPtナノロッドを担持した触媒にて、その起動停止・負荷変動サイクル数が中間目標に到達することをRDE(室温)及びMEA(@120℃)にて確認した。
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 (@2.2 A/cm ²)以下であると共に、空気中での抵抗過電圧が300 mV (@2.2 A/cm ²)以上になることを検証する。	○	新たなセラミック担体を開発すると共にPtナノロッドを担持した触媒にて、中間目標レベルの過電圧まで抑制されていることを確認した。さらに、その触媒をアノードに用いた場合、過酸化水素の発生量が抑制されることをRDEにて確認した。

3. 研究開発成果について 中間目標達成の状況

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（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 ・東北大学

中間目標（2022年度6月）	達成度	成果・状況
高効率運転		
<p>・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1.2倍、ガス透過率が1/2を得る。</p>	○	<p>疎水部および親水部の構造と組成、置換基の効果、およびそれらの組み合わせにより炭化水素系高分子電解質膜の物性を制御できることが明らかになった。プロトン導電率向上(フッ素系電解質膜の1.1倍)とガス透過率低下(フッ素系電解質膜の1/3倍)の指針も得られた。プロトンや水を含んだ時の構造、モルフォロジー変化を明らかにした。</p>
高負荷運転		
<p>・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ン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ンマーに比べてプロトン導電率が1.2倍、ガス透過率が1.2倍を得る。</p>	○	<p>分子構造、特に部分フッ素化と嵩高い置換基構造の導入、およびそれらの組み合わせにより、炭化水素系高分子電解質イオンマーのプロトン導電率向上(フッ素系電解質膜と同程度)とガス透過率向上(フッ素系電解質膜の1.18倍)のための設計指針が得られた。触媒表面上での電解質イオンマーおよびモデル化合物の吸着構造や吸着エネルギーをシミュレーションした。</p>
高耐久起動停止等		
<p>・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0.6倍を得る。</p>	○	<p>剛直な芳香族骨格の導入や多孔性基材による補強化、およびそれらの組み合わせにより、炭化水素系高分子電解質膜の化学耐久性と機械的耐久性を向上させるための構造設計指針が得られた。(耐久性試験中で中間目標を達成見込み)</p>

3. 研究開発成果について 中間目標達成の状況

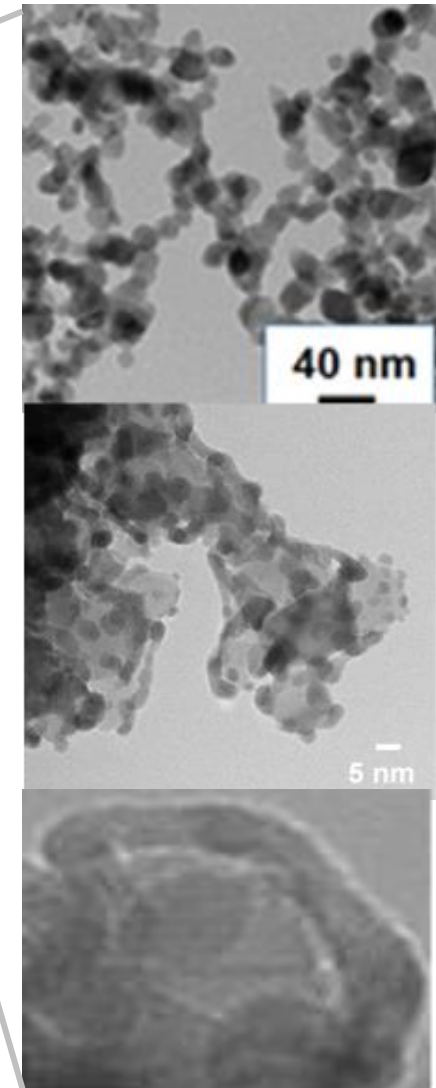
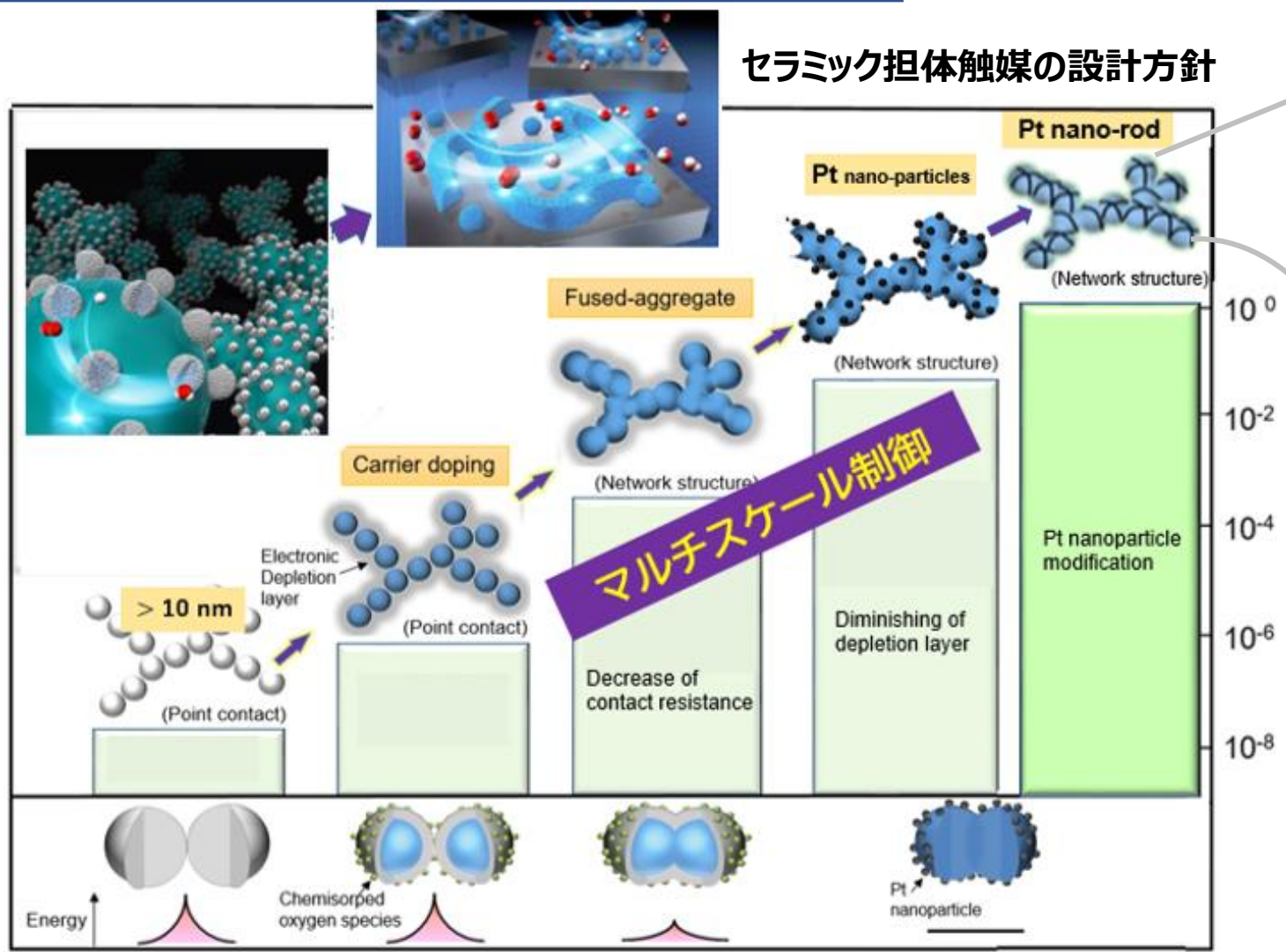
C : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発

・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

中間目標（2022年度6月）	達成度	成果・状況
高効率運転		
<p>・高効率発電に寄与する主要メカニズムを明らかにする。 0.012 Acm⁻² (0.9 V, 360 A/g相当)の目途を得、開発材料の目標値をMEAで検証する。</p>	○	<p>Pt/Nb-SnO₂触媒で3.1倍の質量活性向上や新規カーボン担体触媒（Pt/OMC）で2.3倍の質量活性向上が達成できているので、高酸素透過イオンマー技術、ES法塗工技術またはダイコータ技術の合わせ技で、開発触媒を用いたMEAのセル評価により、高効率目標の達成を見込んでいる。</p>
高負荷運転		
<p>・高負荷運転に寄与する主要メカニズムを明らかにする。過電圧低減目標として270 mV (触媒170 mV, 電解質材料100 mV) @2 A/cm²の目途を得、開発材料の目標値をMEAで検証する。</p>	○	<p>Pt/Nb-SnO₂触媒層を用いたMEAにて、1.5A/cm²でΔ80mVの活性化過電圧の低減を達成した。高酸素透過イオンマー技術や、ES法塗工技術またはダイコータ技術の合わせ技で、開発触媒を用いたMEAのセル評価により、高負荷運転の目標達成を見込んでいる。</p>
高耐久起動停止		
<p>・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する。FCCJ 36000サイクル(ECSA低下率が50%以下)を見通す。さらに乗用車の起動停止サイクル数の6倍の耐久性の目途を得、開発材料の目標値をMEAで検証する。</p>	○	<p>市販触媒・セラミック担体触媒における耐久性を検討し、高耐久化への開発指針を材料設計にフィードバックした。その結果、Pt/Nb-SnO₂触媒層を用いたMEAにて、起動停止及び負荷変動モードにてFCCJ最終目標60000サイクル（ECSA低下率が50%以下）を80℃及び120℃にて見通すことができた。</p>
極限環境下劣化防止		
<p>・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する。FCCJ目標24万サイクル(ECSA低下率が50%以下)を見通し、さらに起動時の逆電流の抑制及び水素枯渇時における劣化防止技術を開発する。加えて、乗用車の負荷変動サイクルの6倍の耐久性の目途を得、開発材料の目標値をMEAで検証する。</p>	○	<p>スカベンジャー機能を持つCeO_x系担体触媒を開発し、市販触媒に比べ過酸化水素発生量を大幅に抑制することに成功した。ES塗工法技術あるいはダイコータ技術の合わせ技でMEA検証することにより、目標達成の見込みが得られている。</p>

A : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発

セラミック担体系触媒の性能向上方針を策定



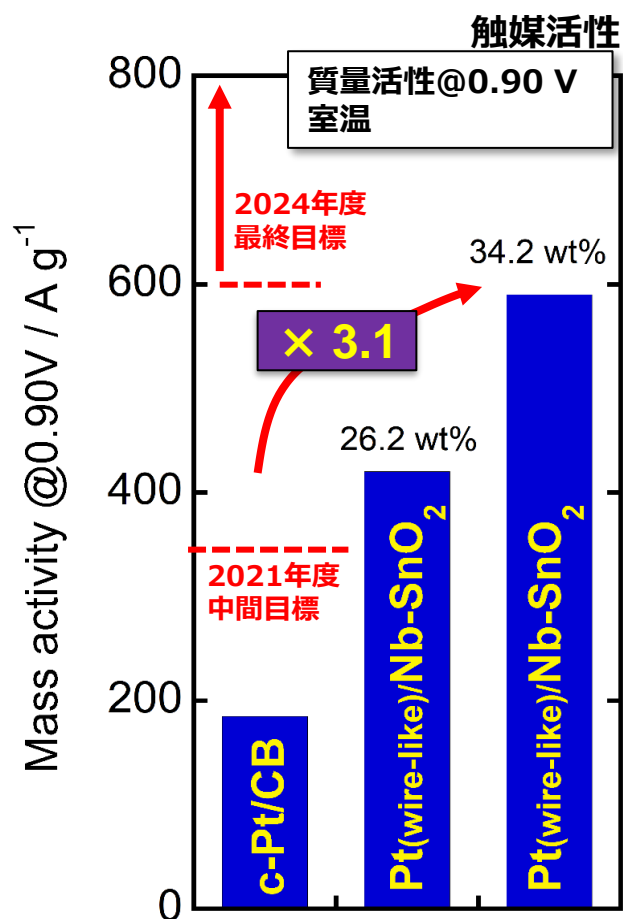
広い温度範囲(max.120°C)にて活性向上 + 高耐久性 + 抵抗過電圧を低下させる材料設計方針を策定

3. 研究開発成果について 成果の詳細

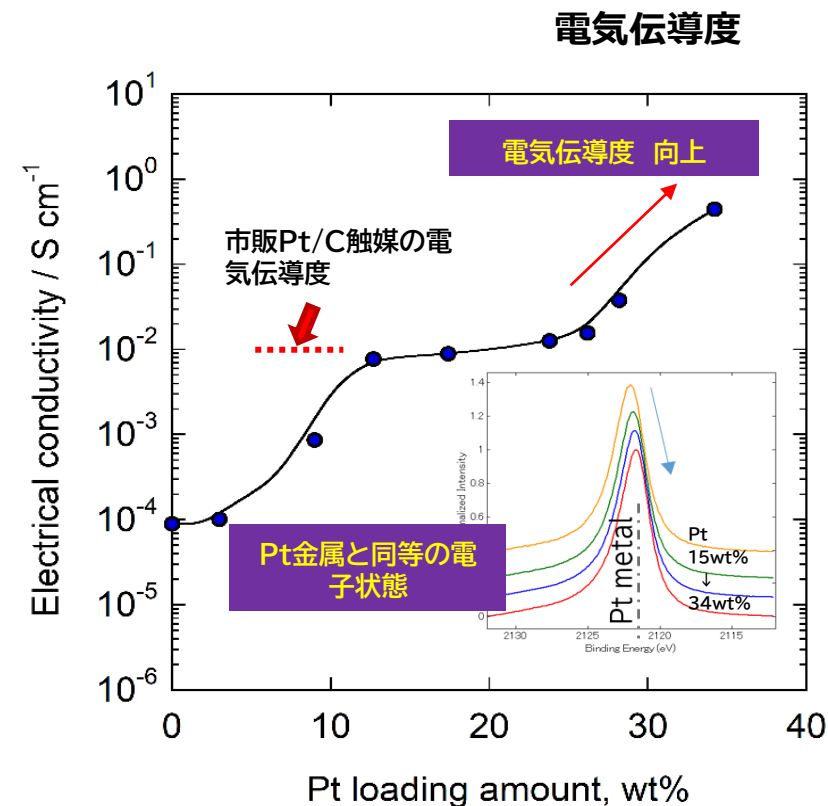
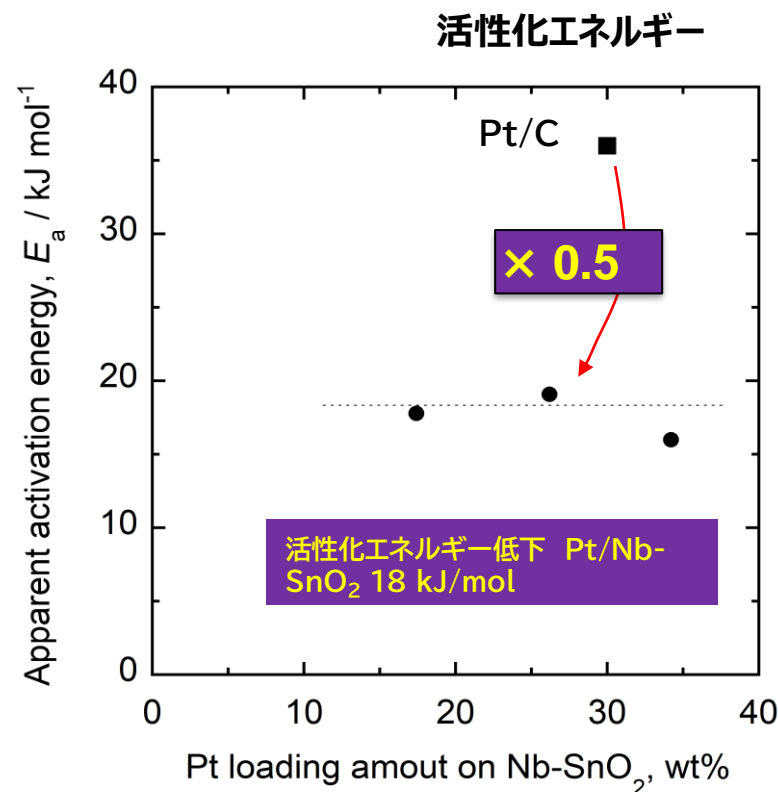
A : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発

セラミック担体系触媒の高活性・高電気伝導性をRDEで確認

RDEによる触媒活性評価及び電気伝導度評価



ACS Catal. 11 (2021) 5222.



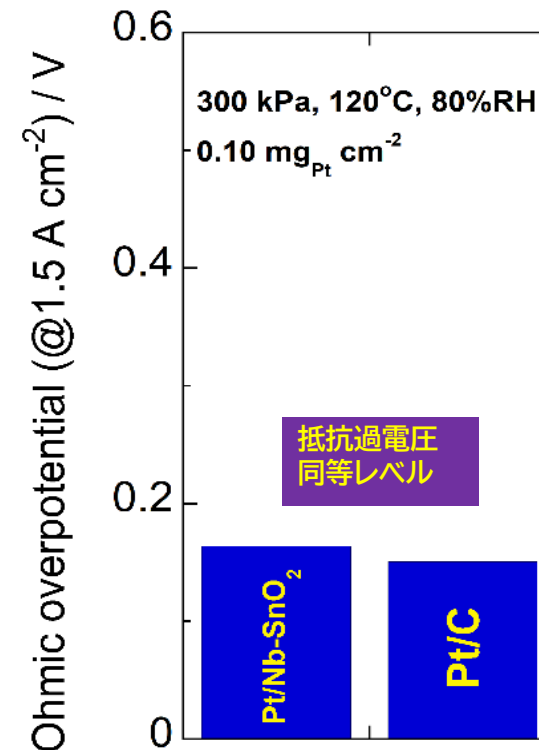
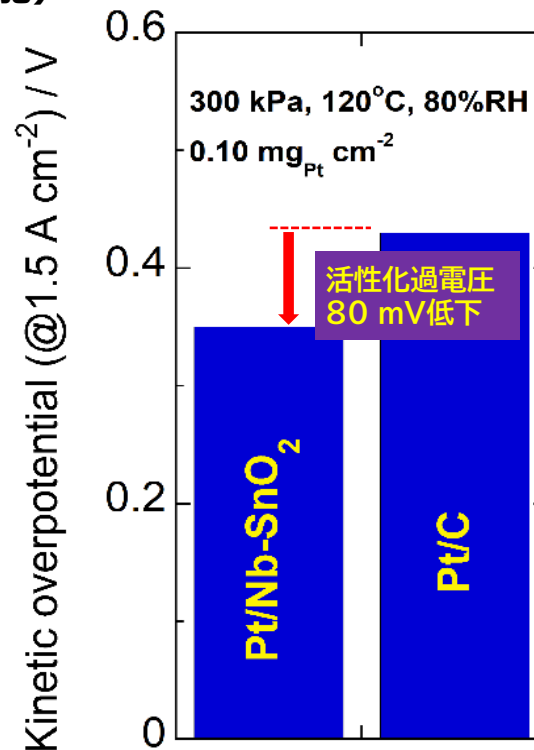
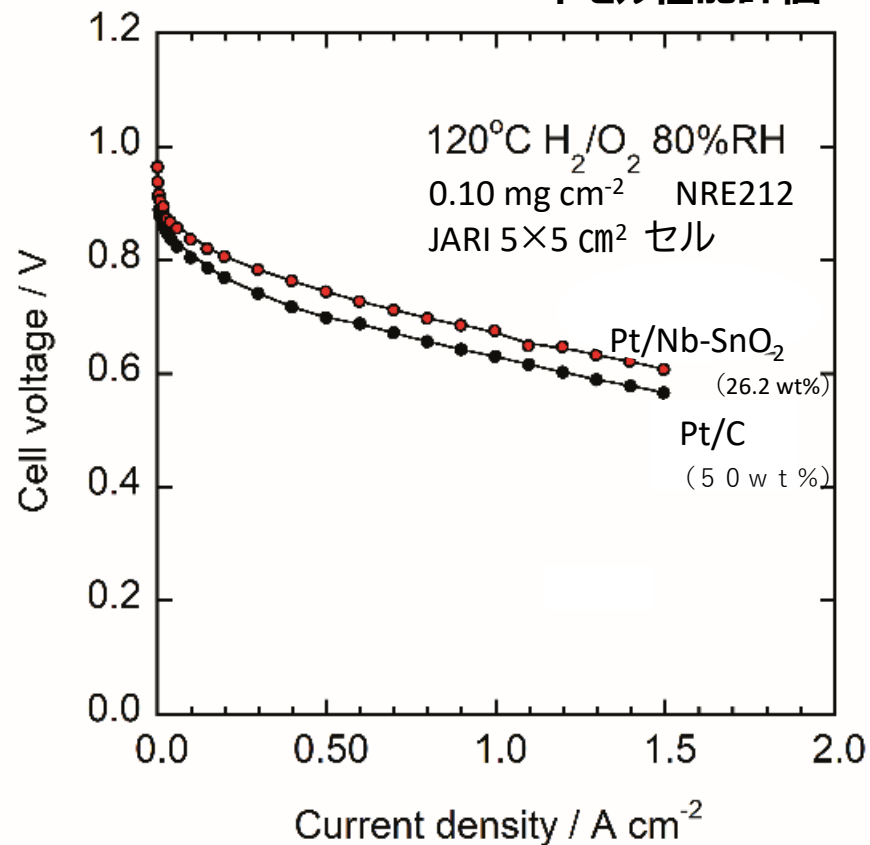
- ・Ptナノロッドを担持することで、2024年度最終目標に匹敵する触媒活性発現
- ・Pt(111)面を優先配向させ、酸素還元活性向上+活性化エネルギー低下
- ・カーボン系担体触媒よりPt/Nb-SnO₂触媒の電気伝導度は高い
→接触抵抗や触媒抵抗に起因する過電圧を低下

3. 研究開発成果について 成果の詳細

A : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発

セラミック担体系触媒の高活性・高電気伝導性を120℃単セル評価で確認

単セル性能評価 (発電性能)



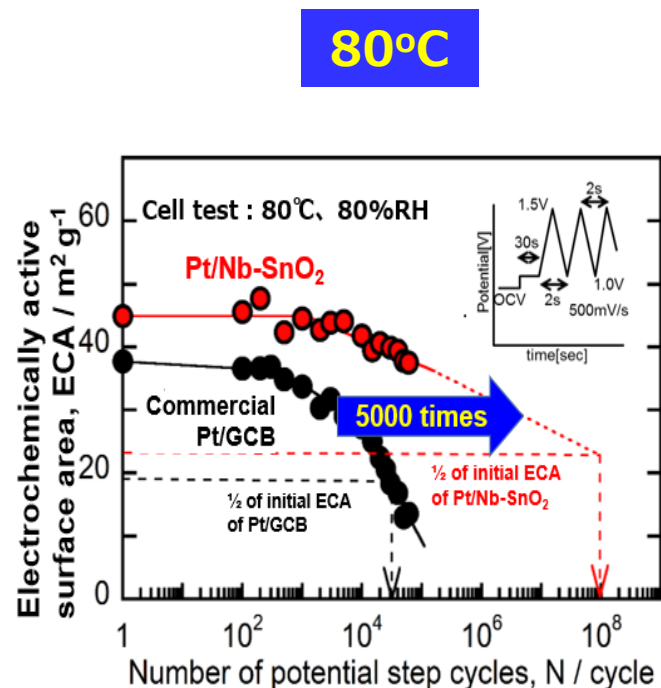
**NRE212(厚さ : 50μm) カソード目付 0.10 mg/cm²
120℃ (膜近傍温度) にて評価**

- ・活性化過電圧が市販Pt/Cより大幅に抑制
- ・抵抗過電圧を市販Pt/C程度まで抑制

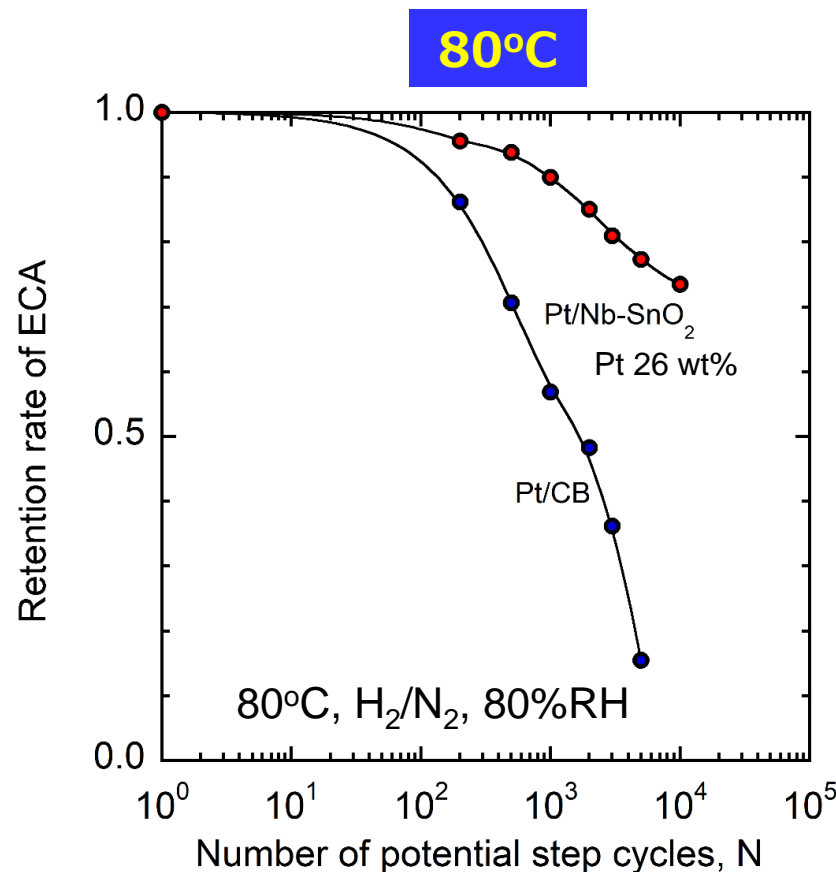
3. 研究開発成果について 成果の詳細

A : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発

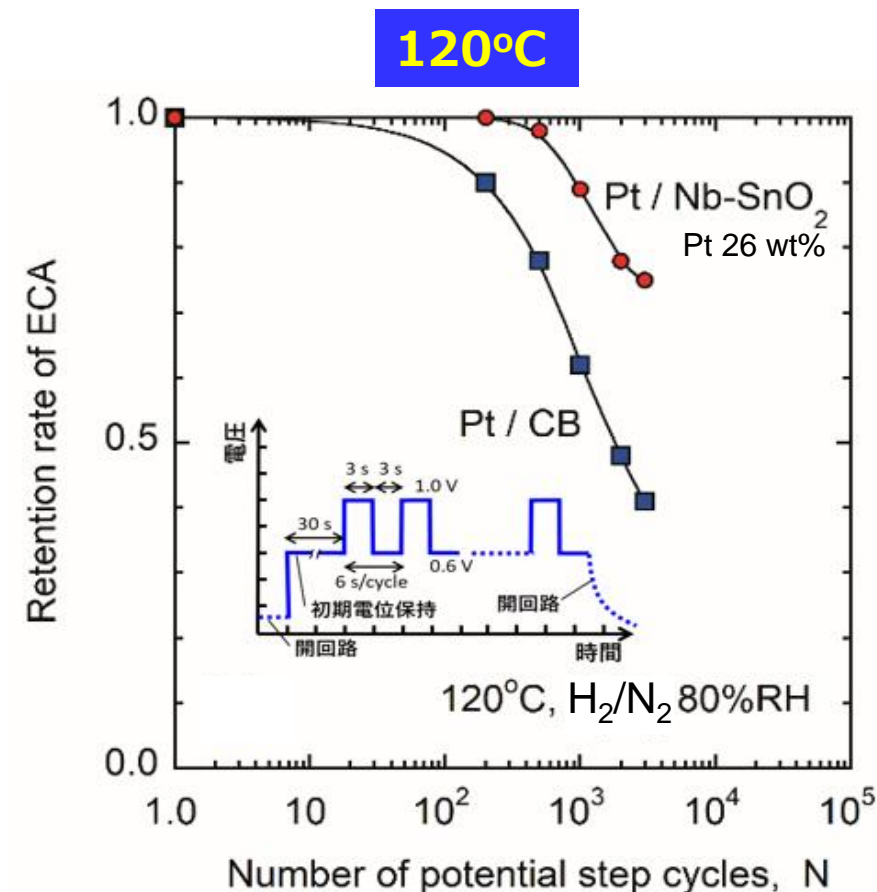
セラミック担体系触媒の高耐久性を80~120℃負荷変動耐久評価で確認



J. Electrochem. Soc. 162 (2015) 736.



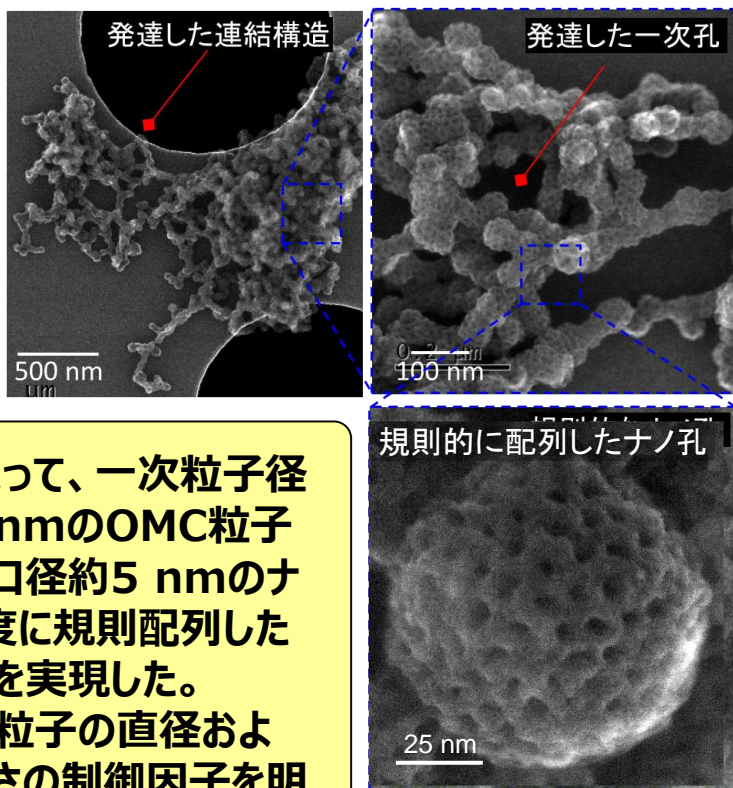
J. Electrochem. Soc. 169 (2022) 044522.



Pt/Nb-SnO₂カソード(Pt 26 wt%)にて120℃(セル温度)での負荷変動に対する高耐久性を確認した

A : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発

- 高効率・高出力運転を実現する規則的メソポーラスカーボン (OMC) 連結構造担体の開発
 - ・規則ナノ孔・一次孔の発達したネットワークOMC担体の開発
 - ・PtのOMC細孔内表層への選択担持によるアクセシブルPt触媒の実現とPt有効性の最大化

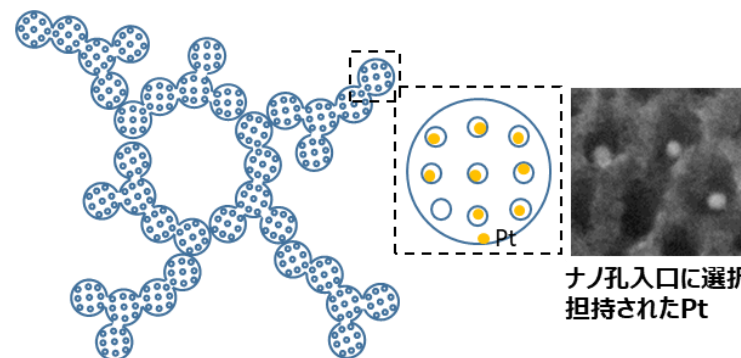


鋳型法カーボン (OMC連結構造担体) のSTEM像

- ・鋳型法によって、一次粒子径 50~80 nmのOMC粒子表面に入口径約5 nmのナノ孔が高度に規則配列した担体構造を実現した。
- ・OMC一次粒子の直径および連結長さの制御因子を明らかにした。

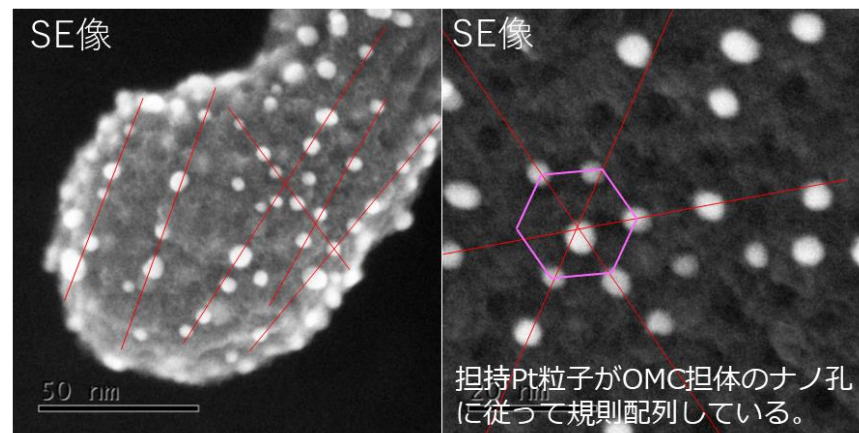
新規なネットワーク構造を有する規則的メソポーラスカーボン担体とそのメソ孔内へのPt選択担持法の開発で高効率・高出力を実現するアクセシブルポア触媒を実現

- OMC連結構造担体のナノ孔内表層近傍へのPt粒子の選択的担持法の開発とORR活性評価 ⇒RDE法で市販触媒より優れた活性・耐久性確認



ナノ孔入口に選択担持されたPt

鋳型法カーボンのモデル構造とナノ孔内に選択担持されたPt粒子のSTEM像



担持Pt粒子がOMC担体のナノ孔に従って規則配列している。

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

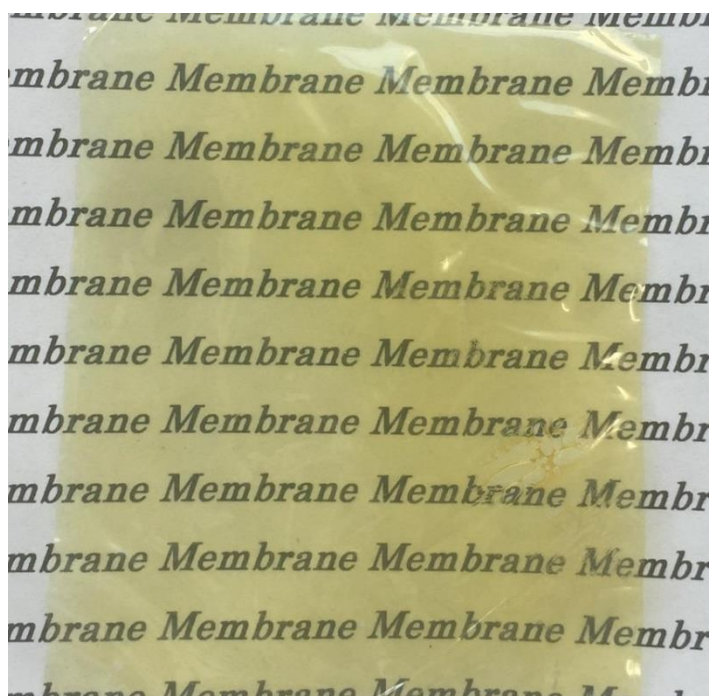
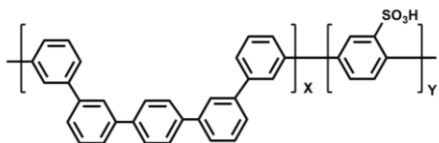
- ・特定の分子構造を有する分散剤により、Ptナノ粒子がOMC担体ナノ孔内表層近傍に選択担持される条件を見出した。またPt粒子はOMCのナノ孔位置に規則的に自己配列することを見出した。

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

ポリフェニレン系電解質の機械強度改善を目指して、ポリエチレン(PE)多孔基材による補強を検討。



SPP-QP



SPP-QP-PE



PE

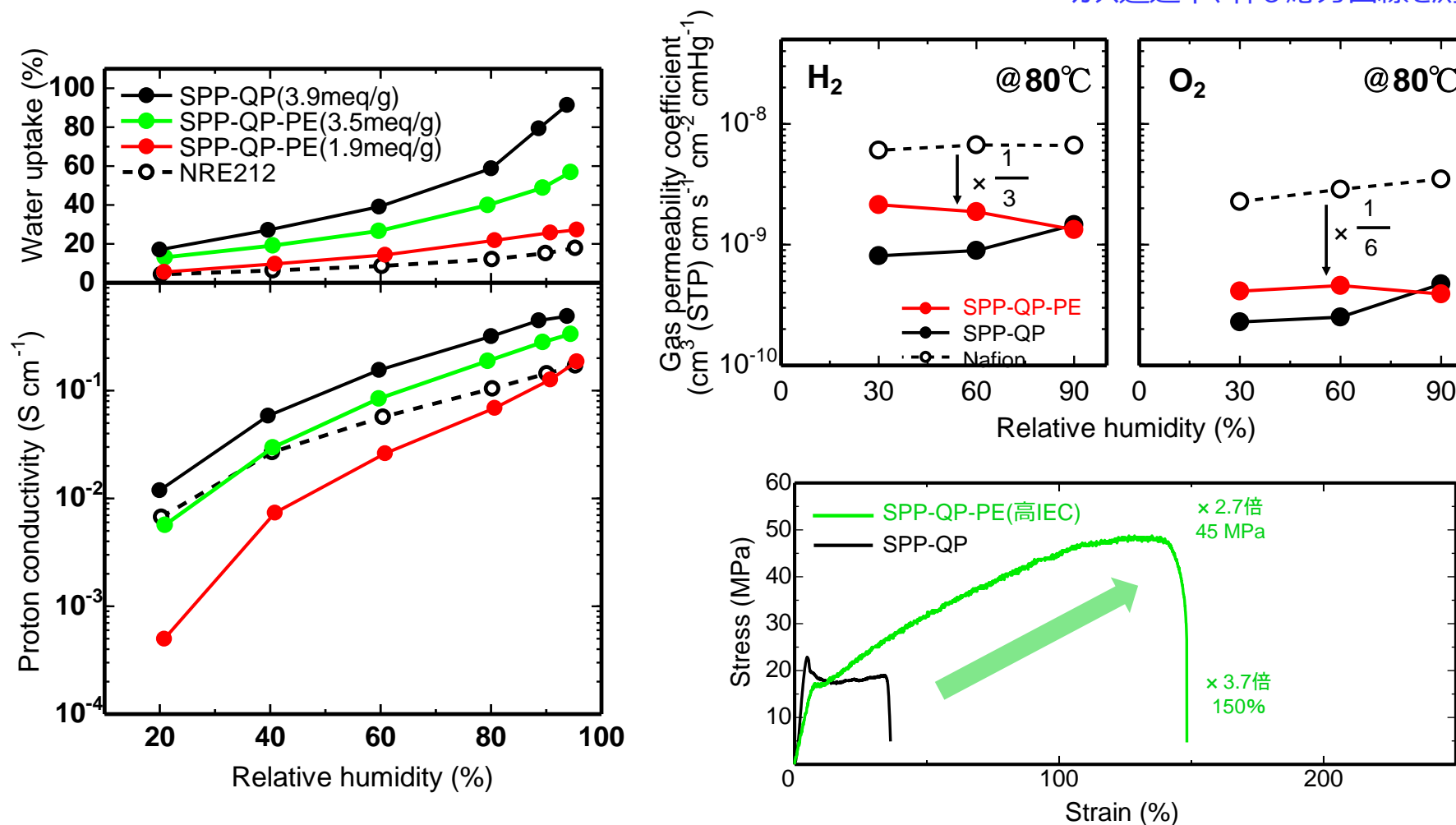
東レ SETELA

組成 : ポリエチレン
膜厚 : 7-9 μm
空隙率 : 32-44%
細孔径 : 30-60 nm

- 炭化水素系材料同士で親和性が高く、ピンホールやムラなどは認められなかった。
- IECが異なる幾つかのSPP-QPを用いたところ、いずれの場合にも均一透明な補強膜が得られた。

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

ポリフェニレン系電解質/PE補強膜の含水率、プロトン導電率、ガス透過率、伸び応力曲線を測定し、補強効果を検証。

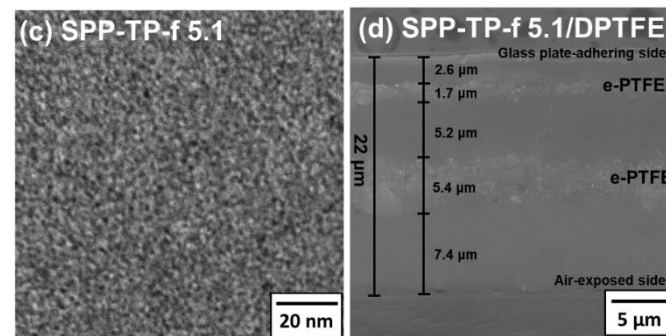
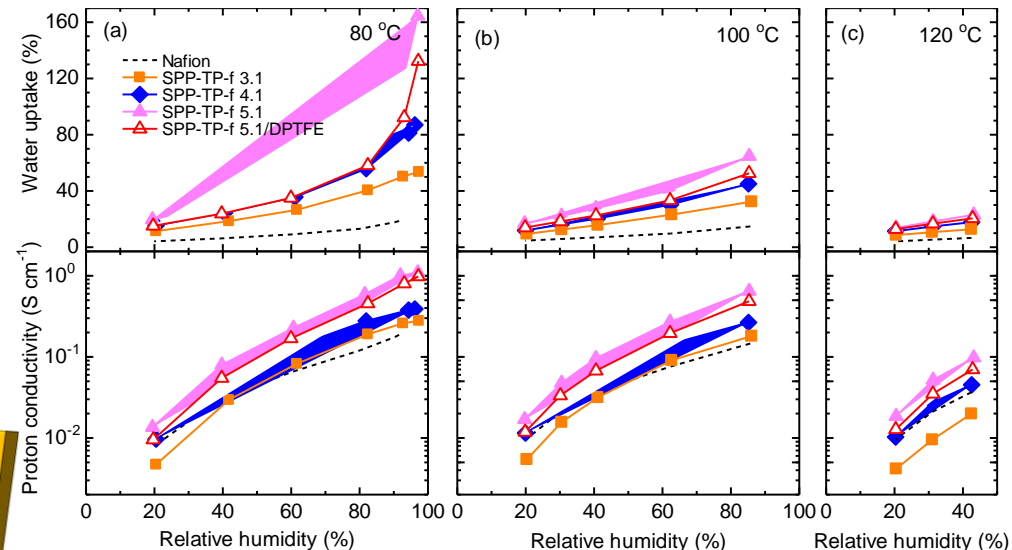
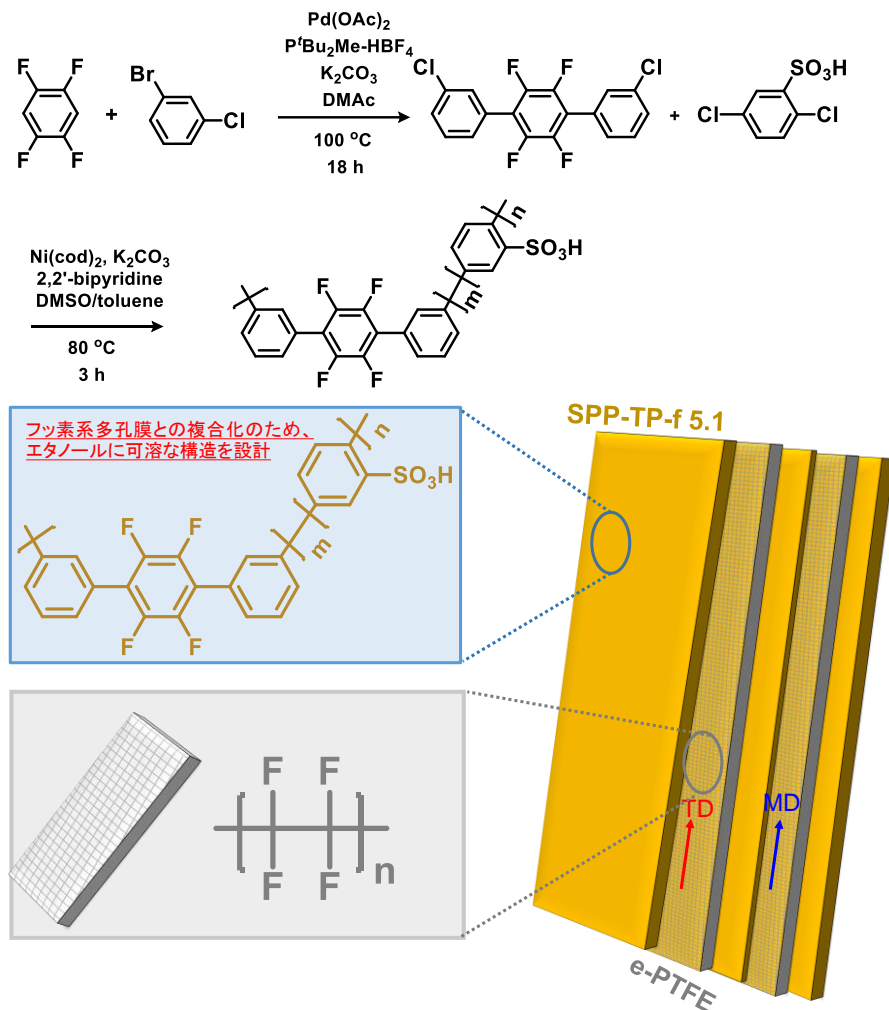


- 高IEC炭化水素系との組み合わせにより、高プロトン導電率を達成
- 補強膜は低ガス透過率、高機械強度(破断強度、破断伸びが改善)

3. 研究開発成果について 成果の詳細

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

ポリフェニレン系電解質を部分フッ素化することにより、ePTFEによる補強を探求。

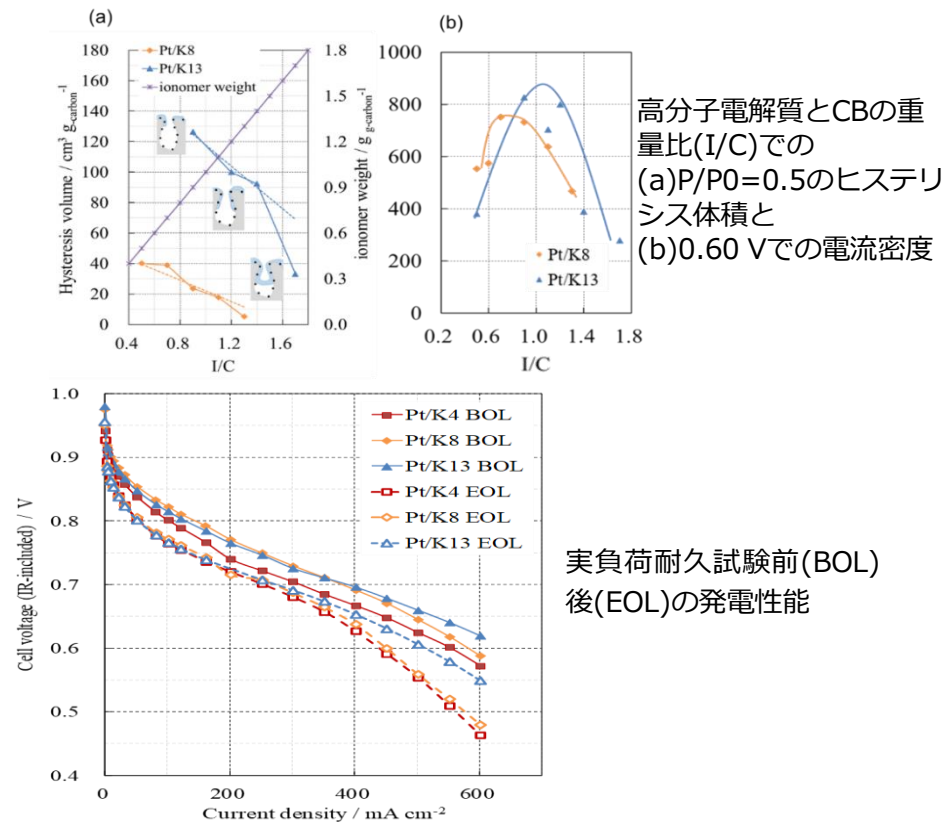


iScience, 24, 102962 (2021)

- 部分フッ素化の効果により、エタノールにも可溶な炭化水素系電解質膜を開発、部分フッ素化電解質はePTFEによる補強が可能
- 補強膜は120°C、20%RHでも高プロトン導電率を保持

C : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発

➤ 比表面積が約800 m²/g (K8)と約1300 m²/g (K13)のケッチェンブラック担体の比較



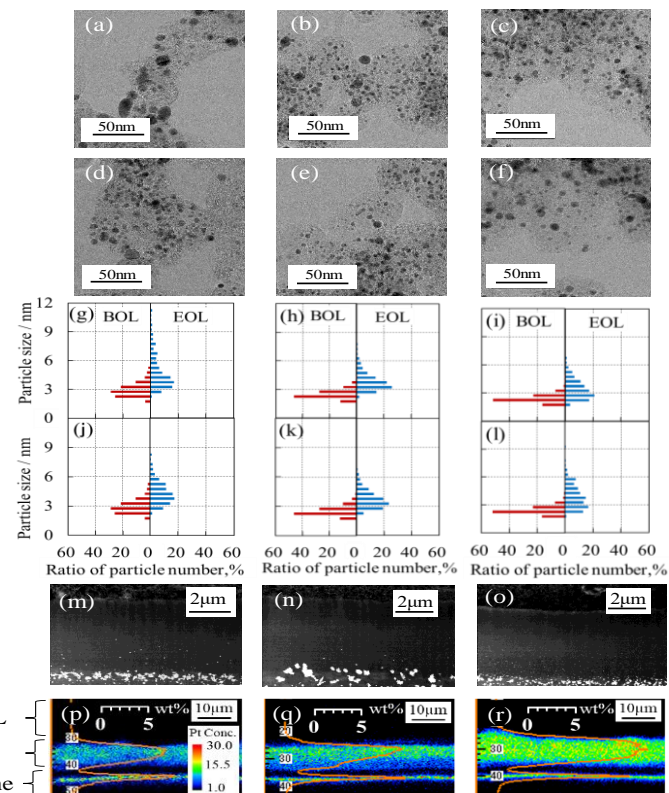
高分子電解質とCBの重量比(I/C)での
(a)P/P0=0.5のヒステリシス体積と
(b)0.60 Vでの電流密度

実負荷耐久試験前(BOL)
後(EOL)の発電性能

- ・カーボン担体の一次粒子内のナノ細孔内のPtを有効に利用するための細孔容積と高分子電解質量との関係を紐解く指標として、ナノ細孔のヒステリシス容積が有効であることが明らかになった。
- ・触媒の細孔に蓋をしないように高分子電解質を被覆させ、Pt粒子間距離を長くすることで発電性能と耐久性を向上できることが分かった。

市販“アクセシブル”カーボン担体触媒“において、LOI企業の要望仕様で高い性能・耐久性を発揮させるための触媒層を探索。

➤ ケッチェンブラック担体の比表面積差による耐久性比較 (K4:約400、K8:約800、K13 : 約1300 m²/g)

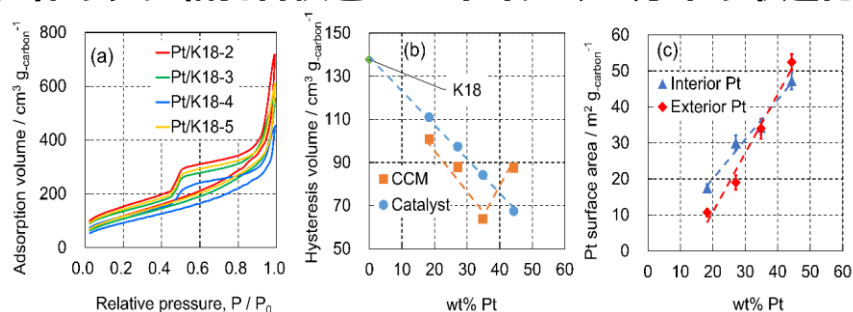


耐久試験前(BOL)後(EOL)のPt分散状態: K4(左)、K8(中)、K13 (右)
(上: TEM像、中: Ptサイズ分布、下触媒層断面のPt分布(EPMA))

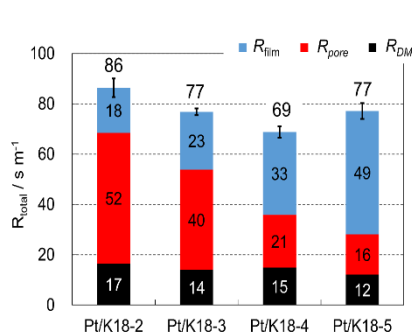
- ・カーボン担体の一次粒子内のナノ容積を大きくすることにより、触媒のPt粒子間距離を長くすることで発電性能と耐久性を向上できることが分かった。

C : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発

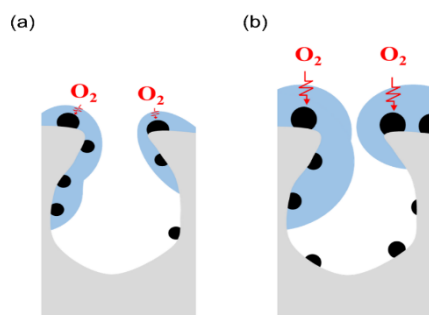
▶ 高比表面積ケッチェンブラック(約1800 m²/g,K18)担体のナノ細孔容積とPt&イオノマー分布の最適化



(a)触媒層のN₂吸着等線、(b)P/P0=0.5のヒステリシス体積とPt担持密度、(c)Ptの細孔内外比表面積比率とPt担持密度



各Pt担持密度(20-50w%)のカソード濃度過電圧変化(R_{film}: イオノマー, R_{pore}: 細孔, R_{DM}: 拡散層)

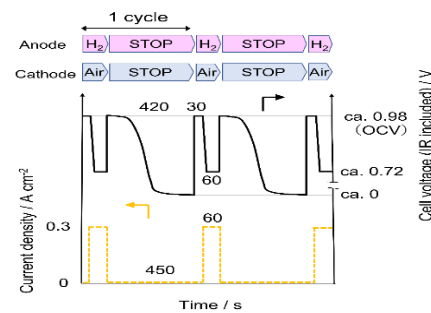


Pt担持密度差によるPtとイオノマーの分布の概略図
(a) K18-2(Pt20w%)
(b) K18-5(Pt50w%)

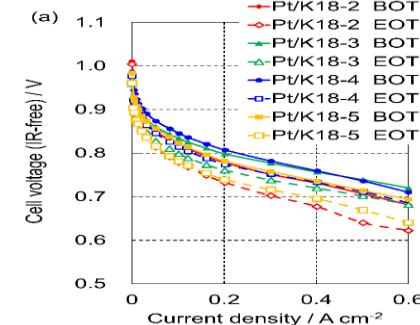
- カーボン担体の一次粒子内のナノ細孔内外のPtは担持密度で分布が変化。担持密度を過剰に増大させると外表面Ptの粒子サイズが増大し、イオノマーの偏在を促進する。
- Pt担持量40w%で細孔の入り口を塞がないように高分子電解質を被覆させると発電性能を向上できる。

市販“アクセシブル”カーボン担体触媒“において、LOI企業の要望仕様で高い性能・耐久性を発揮させるための触媒層を探求。

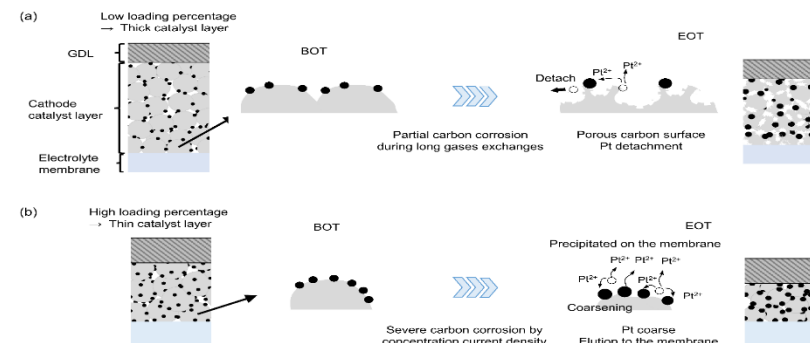
▶ 水素ソーク停止 & ガス置換起動 & 実負荷耐久評価



水素ソーク起動停止 & 実負荷複合耐久試験



耐久試験前(BOL)後(EOL)の発電性能



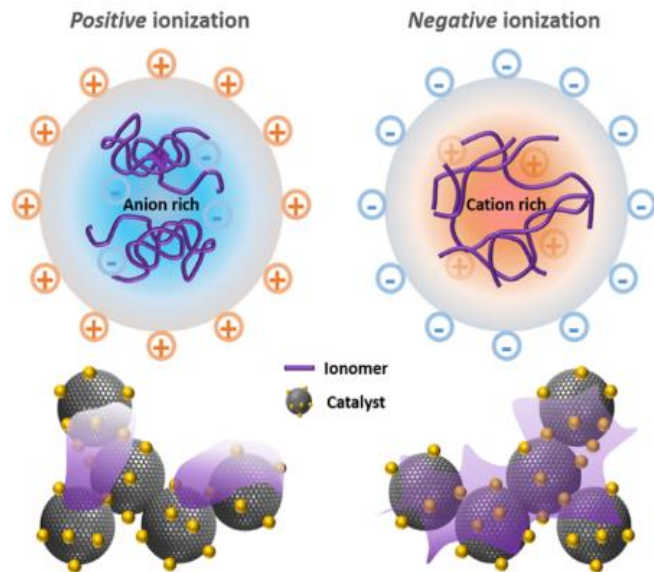
耐久試験前(BOL)後(EOL)のPt分散状態とカーボン劣化の概略図
a: K18-2(Pt20w%), b: K18-5(Pt50w%)
(カソード触媒層の厚み変化とPtサイズ分布、カーボン劣化)

- ナノ細孔容積の大きい高比表面積カーボン担体触媒は
(a)低Pt担持: 起動停止時の水素と酸素の置換時間が長く、カーボン劣化を促進
(b)高Pt担持: 表面Pt担持比率が増大、表面Pt粒子の凝集とそのPtによるカーボン腐食が進行
⇒Pt担持量40w%が高効率 & 高耐久化に最適

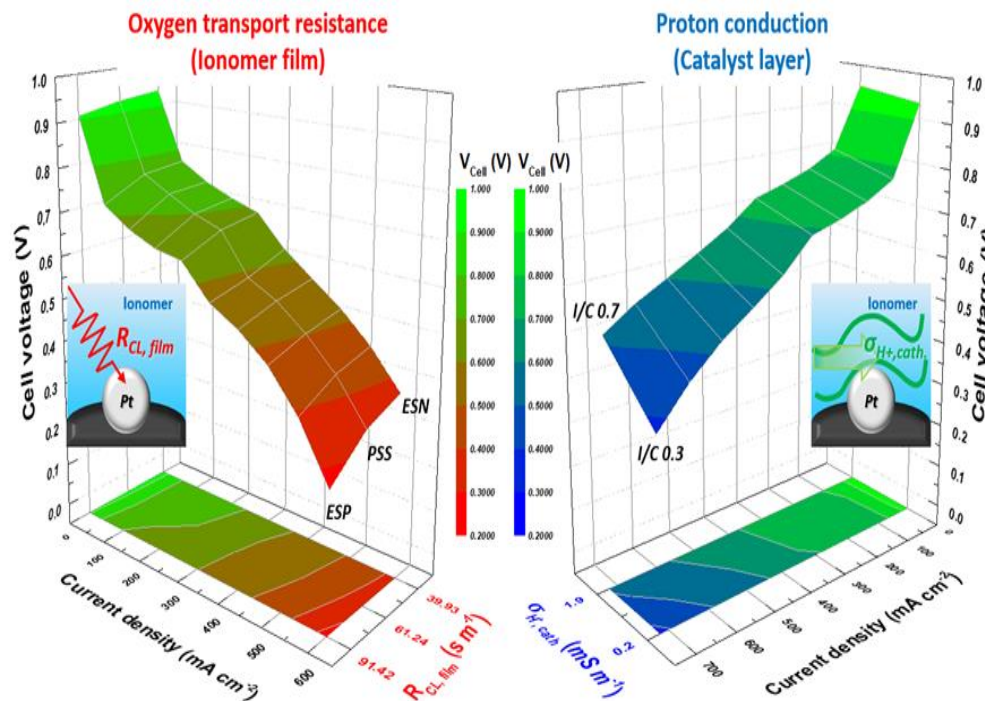
C : 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発

触媒性能を引き出す究極の触媒層構造を実現するプロセス技術を探求。

▶ 静電スプレー(ES)法のイオン化モードの制御による高分子電解質の酸素輸送抵抗の低減による性能改善



液滴内部の酸塩基条件に起因する、イオン化モード別の高分子電解質形態



- (a) イオン化モード別のES法とPSS法による単セルの発電性能と触媒層の高分子電解質の酸素輸送抵抗 ($R_{\text{CL, film}}$) 変化、
- (b) I/Cの異なるES法触媒層 (ESN) の発電性能とプロトン導電率 (σ_{H^+}) 変化

・負イオン化モード(ESN)で高分子電解質を比較的薄く均一に被覆することによって高いプロトン導電率を維持しつつ高分子電解質フィルムの酸素輸送抵抗を低減し、さらにより良好な水管理を誘発した細孔の多孔性により大電流で優れた性能を示した。

3. 研究開発成果について

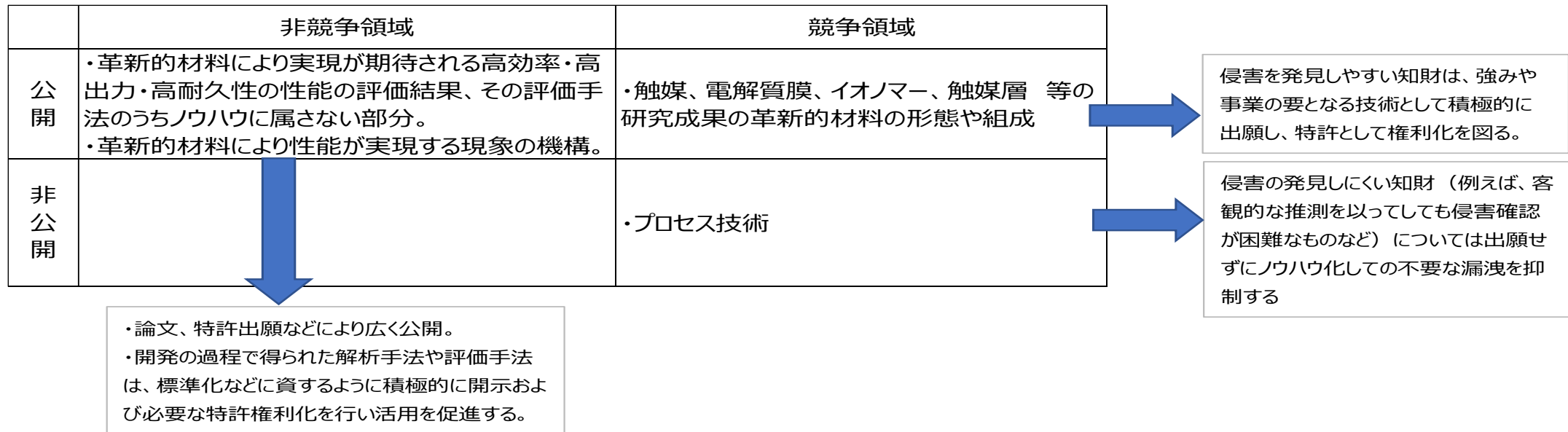
- 想定される研究開発成果

研究成果である 触媒、電解質、イオノマー、触媒層等に関わる材料、およびプロセス技術

- 戦略的な特許取得：戦略的なオープンクローズ戦略に沿って特許取得を進める。

出願国：特許の権利化にあたっては想定される有望な燃料電池に関連する市場における有効な特許の実施権行使に直結するよう、出願国を選別して出願する。米国、欧州、中国など燃料電池市場として発展が期待される諸国に留意する。

企業との連携：発明者主義を原則として、共同する材料メーカーにおける事業化が円滑に有効に行えるよう、特許の公知例調査、出願、権利化の各段階において共同実施する材料メーカーなど連携して実施する。



- 対外的な成果発信

- ・研究成果が得られた際には適時論文、学会発表、特許出願を行う。
- ・産業界にもインパクトがある画期的な案件に関してはタイムリーなプレスリリースを行う。

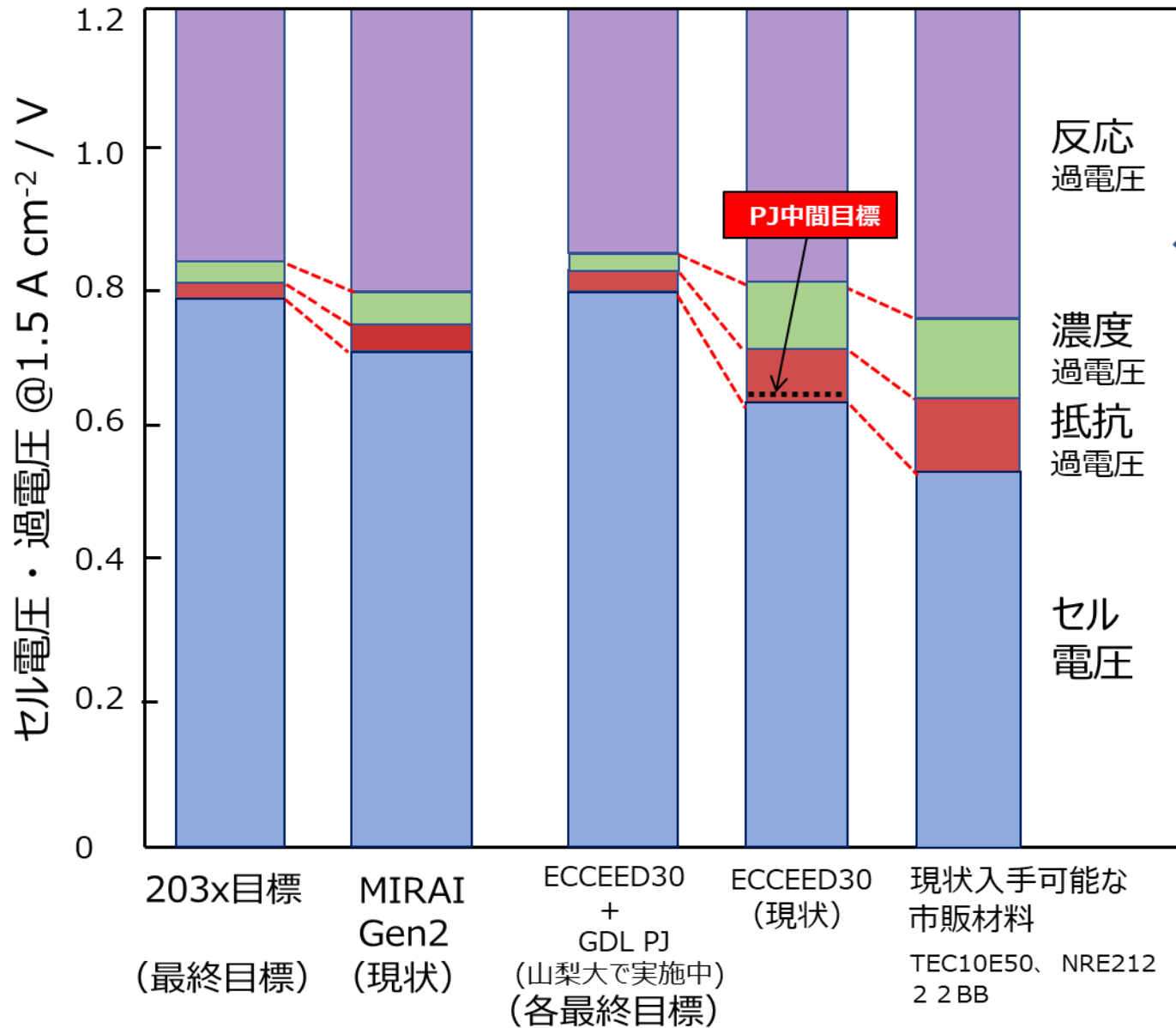
4. 今後の見通しについて

○研究開発を通じて見えてきた技術的課題とその解決方法

研究テーマ	課題	解決方法
A. 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発	120℃での触媒耐久性(FCCJ負荷変動模擬プロトコル利用)の評価結果が湿度で大きく異なる。	120℃でのPt酸化開始電位は80℃の時と大きな差はない。可能であれば、評価時の湿度を定義する、もしくは高温でのプロトコルを設定していただきたい。
A. 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発	高温での機械強度・輸送特性等の測定における湿度制御	湿度制御装置の設計まで完了。測定セルの設計を実施し、双方を導入できれば可能と考える。
A. 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発	ユーザーの要望する量産工程(塗工速度)に対応した触媒層作製	塗工を専門とする関連企業を交え検討中。
A. 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒の研究開発	触媒開発において、100℃を超える温度における触媒解析手法が、確立されていない。	発電反応を含む電気化学反応中、あるいはそれを模した状態で測定可能なセルの開発。測定環境条件を実現可能な、環境制御装置の開発。
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	炭化水素系電解質材料開発において、100℃を超える温度における電解質解析手法が、確立されていない。	発電反応を含む電気化学反応中、あるいはそれを模した状態で測定可能なセルの開発。測定環境条件を実現可能な、環境制御装置の開発。
C. 高効率・高出力・高耐久を実現する触媒層の研究開発	触媒層開発において、100℃を超える温度における触媒層およびセル解析手法が用意されていない。	発電反応を含む電気化学反応中、あるいはそれを模した状態で測定可能なセルの開発。測定環境条件を実現可能な、環境制御装置の開発。

4. 今後の見通しについて

最終目標へのアプローチ



出力性能向上方針

過電圧	今後の性能向上アイテム (山梨大の研究アイテム)	課題 (背反) への対策
反応過電圧	(触媒) ・Ptナノロッド・ワイヤ改良 ・新合金(2元・3元合金)	耐久性 ・触媒-担体相互作用 ・マキシメントロピー
濃度過電圧	(GDL) (GDL-PJ) ・流路付GDL (担体) ・細孔体積の増加	ロバスト性 ・空隙/表面改良 導電性 ・電子状態制御(金属伝導性) 触媒層設計 ・量産塗工技術の構築(ES)
抵抗過電圧	(電解質膜) ・薄膜(50μm→10μm以下) (触媒層) ・電子状態制御(金属へ)	クロスリーク、耐久性、機械強度 ・炭化水素系補強膜 ・新規スカベンジャー ・高活性アノード新規触媒 ・高活性カソード新規触媒

高温・耐久性能向上方針 (ECCEED30)

過電圧	今後の性能向上アイテム (山梨大の研究アイテム)	課題 (背反) への対策
触媒耐久	(触媒) ・新規担体創製	耐久性 ・触媒-担体相互作用 ・マキシメントロピー
膜耐久	補強層適用 ・ラジカルスカベンジャー固定 ・過酸化水素発生抑制	ロバスト性 ・空隙/表面改良 導電性 ・電子状態制御(金属へ) 触媒層設計 ・新規量産塗工技術(ES)
高温耐久	(触媒) ・新規担体・触媒 (電解質膜) ・コンポジット膜 (触媒層) ・電子状態制御(金属伝導性)	クロスリーク、耐久性 ・高活性新規カソード触媒 ・コンポジット補強膜 ・新規ラジカルスカベンジャー ・高活性アノード新規触媒

4. 今後の見通しについて

○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