

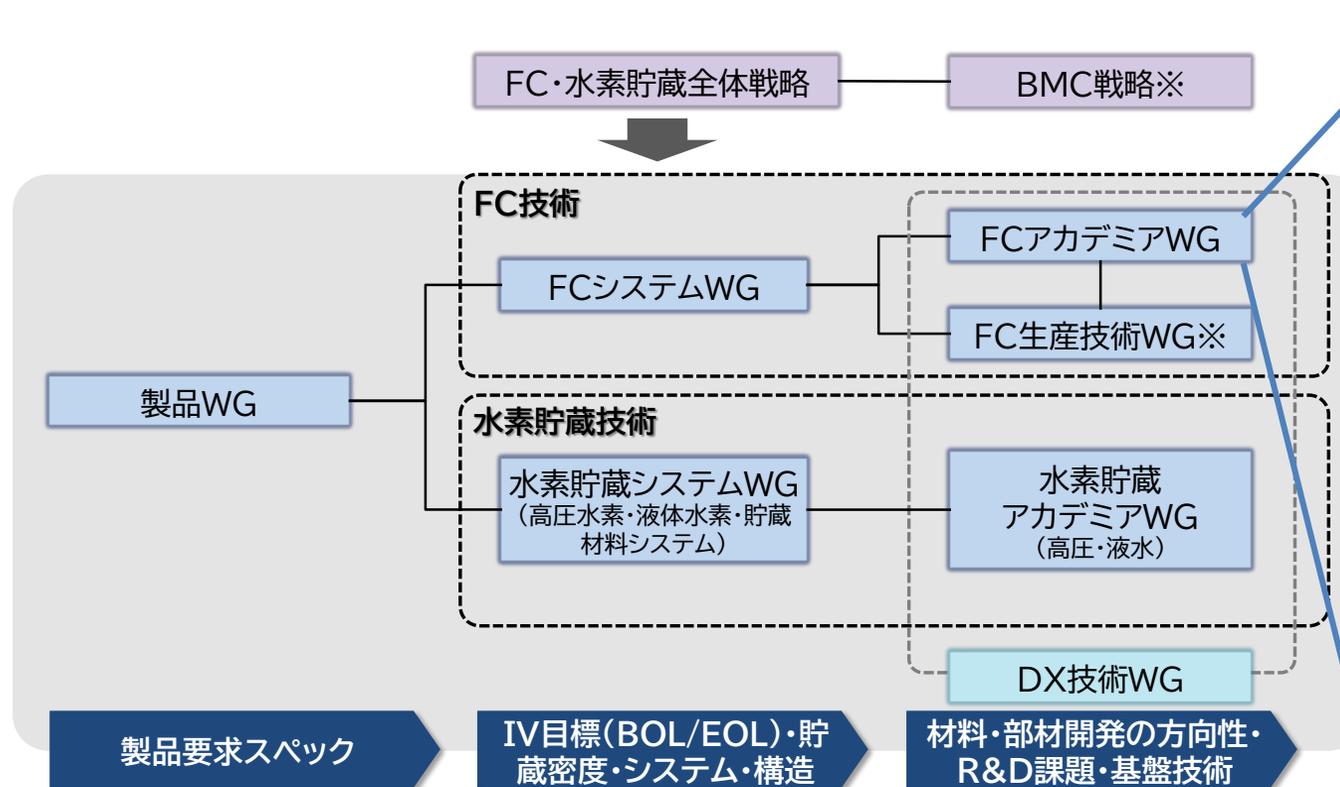
NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ中間報告会

NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ (FCV・HDV 用燃料電池技術開発) FCスタック

プレゼンター: 竹内仙光(FC-Cubic)、陣内亮典(豊田中央研究所)、柿沼克良(山梨大学)、
川上 浩良(東京都立大学)、井上 元(九州大学)、今井英人(FC-Cubic)、塚本貴志(みずほR&T)

NEDO スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 燃料電池・水素室
(委託先)みずほリサーチ&テクノロジーズ

1. FCアカデミアWG 体制・実施内容
2. ロードマップおよび解説書の主な追加・変更箇所
3. 2035年頃の材料物性目標の検討
4. FC材料開発の方向性(PFAS規制)
5. 2035年頃に向けた材料開発
 - ① 電極触媒
 - ② 電解質材料
 - ③ ガス拡散電極
 - ④ MEA
6. 評価・解析技術



※評価解析プラットフォームマネジメントグループ(BMC検討およびオールスターFC生産技術WG)と連携

- 山梨大学
 - 東京都立大学
 - 九州大学
 - 京都大学
 - NIMS
 - 本田技術研究所
 - トヨタ自動車
 - 豊田中央研究所
- 柿沼 克良
川上 浩良
井上 元
内本 喜晴
富中 悟史
田中 慎太郎、中原 章
安藤 雅樹、川角 明人
陣内 亮典、兒玉 健作、
渡辺 隆男、加藤 悟、
篠崎 数馬
雨宮 一樹
竹内 仙光、今井 英人、
小山 茂樹、山内 将樹
米田 雅一、塚本 貴志、
菅原 瑠偉
- FCCJ
 - FC-Cubic
 - みずほR&T
- <解析技術>
- Spring-8
 - J-Parc
 - NanoTerasu
- 矢橋 牧名
大友 季哉
原田 慈久

- ① 2035年目標・制約を踏まえたFCの目標検討とアクションプランへ反映
- ② 材料開発・解析技術開発ニーズの落とし込み
- ③ 2040年シナリオの不足分の整理 (次年度実施予定)
- ④ 2040年シナリオのブラッシュアップとアクションプランの検討 (次年度実施予定)
- ⑤ 上記を踏まえたロードマップ・解説書の更新・改訂

2. ロードマップの主な追加・変更箇所

FCV・HDV用燃料電池技術開発ロードマップ (FCスタック)

現在	2025年頃	2030年頃	2035年頃	2040年頃
		2030年目標	2035年目標	2040年目標
I-V要求性能(1セル)		BOL: 0.77V@1.63 A/cm ² EOL: 0.72V@1.76 A/cm ²	BOL: 0.761V@2.18 A/cm ² EOL: 0.706V@2.37 A/cm ²	BOL: 0.86V@2.29 A/cm ² EOL: 0.81V@2.44 A/cm ²
温度範囲(膜面)	~90-95℃	-30℃~120℃	-30℃~125℃	-30℃~125℃
耐久性		50,000 h	50,000h	50,000h
主要材料目標*1				
空気極Pt目付量	0.17 mg/cm ²	0.20 mg/cm ²	0.178 mg/cm ²	0.12 mg/cm ²
空気極触媒質量活性	500 A/g @80℃, 100%RH	1,740 A/g @80℃, 100%RH	4,630 A/g @80℃, 100%RH	39,000 A/g
Pt溶解速度		1倍	1/2倍	1/30倍
電解質膜厚さ		8μm	5μm	1μm
電解質プロトン伝導率	0.106 S/cm @80℃, 80%RH 0.018 S/cm @120℃, 30%RH	0.12 S/cm @80℃, 80%RH 0.032 S/cm @120℃, 30%RH	0.05 S/cm @120℃, 30%RH	0.15 S/cm @55℃~125℃, 12%RH
ガス拡散抵抗	67 s/m @80℃, 80%RH	28 s/m @80℃, 80%RH	26 s/m @80℃, 80%RH	26 s/m @80℃, 80%RH
目標達成に向けた技術開発課題*2	低温作動、耐久性向上、不純物耐性	高耐久化技術開発、廃棄製品からの貴金属リサイクル技術確立、高温対応新規触媒量産化	現行原理極限触媒量産化、高機能アノード量産化、超高耐久・高機能担体量産化	現行原理極限触媒量産化、高機能アノード量産化、超高耐久・高機能担体量産化
材料系*3 (触媒)		非白金(酸窒化物等, 貴金属に代わる新奇表面サイト)	スクレーンング則打破触媒、超高耐久性・Pt非溶出・非白金モデル触媒	スクレーンング則打破触媒、超高耐久性・Pt非溶出・非白金モデル触媒
		新奇貴金属活性サイト、超低白金(アルカリ雰囲気、(単原子/数原子触媒活性サイト))		
解析・計算科学・DXのキーアイテム	MEA/触媒等評価技術確立、広温湿度領域評価手法確立、高温下計測技術確立、マルチモーダル解析技術の確立とデータベース設計、計算による設計・スクリーニング、MLによる材料候補の提示、自動・自律実験による探索、参照データ拡充	マルチモーダル解析の活用とデータベースの改良・材料スクリーニングと予測、計算による設計・スクリーニング、トランススケールシミュレーション、MLによる材料候補の提示、自動・自律実験による探索、参照データ拡充	DX実装による高速・大量データ生成、トランススケールシミュレーション、MLによる要因分析・学理探索・現象解明	
(電解質材料)	低温作動、耐久性向上(ラジカルケンジ剤)	高耐久化技術開発		
		薄膜化と耐久性の両立(新材料に対応するラジカルケンジ剤・補強層、製膜性)	薄膜の大面积化、Roll to Roll化	

2035年頃の製品市場投入時の材料物性目標を新たに設定

2035年頃の目標達成に向けた技術開発課題を整理

(注) 科学類、材料種を特定するものではない*5

評価・解析技術、計算科学、DX技術のキーアイテムを整理

2.5 FC 材料目標	66
2.5.1 材料目標の考え方	66
(1) 2030 年頃の目標	66
(2) 2035 年頃の目標	66
(3) 2040 年頃の目標	67
2.5.2 材料初期物性検討のためのシミュレーションモデル	67
(1) 電解質のプロトン伝導率	68
(2) 空気極流路/GDL ガス輸送特性	69
(3) 空気極触媒層ガス輸送特性	69
(4) 空気極触媒活性	70
2.5.3 材料物性目標の検討	70
(1) 2030 年頃の目標	70
(2) 2035 年頃の目標	77
(3) 2040 年頃の目標	82
2.5.4 主要材料コストの目安	89
2.5.5 材料評価の考え方	92
(1) 性能耐久評価	94
(2) 電解質膜耐久評価	95
2.6 FC 材料開発の方向性	98
2.6.1 PFAS 規制	98
2.6.2 2030 年頃に向けた材料開発	99
(1) 電極触媒	99
(2) 電解質材料	101
(3) ガス拡散電極	102
(4) MEA	102

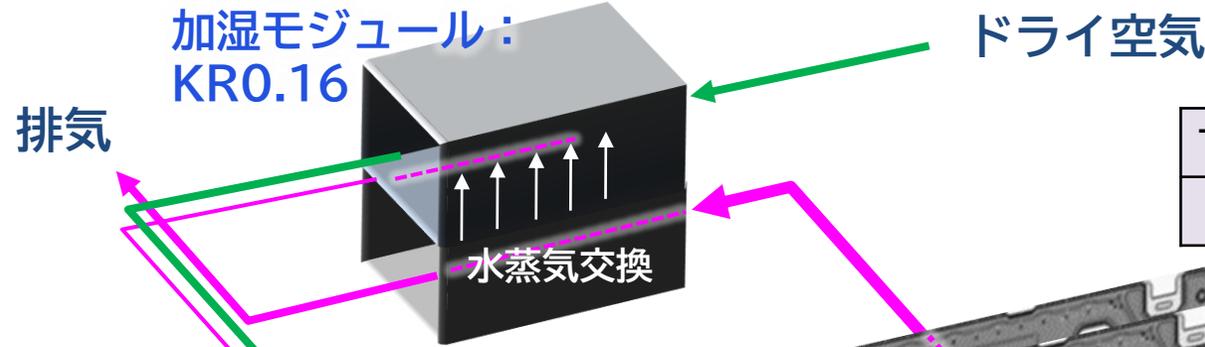
2.6.3 2035 年頃に向けた材料開発	103
(1) 電極触媒	103
(2) 電解質材料	104
(3) ガス拡散電極	105
(4) MEA	105
(5) シール材料	106
(6) セパレータ・表面処理	106
2.6.4 2040 年頃に向けた材料開発	107
(1) 材料開発の方向性の考え方	107
(2) 材料開発の加速手段や取り組み方法	108
(3) カソード触媒材料	109
(4) 電解質膜材料	111
(5) 他の材料・部材	114
2.6.5 評価・解析技術	117
(1) 材料・プロセス探索加速のための DX 技術	117
(2) 現象・機構解明（高度解析）	118
(3) 現象・機構解明（計算科学）	125
2.6.6 人材育成	135

主な変更箇所を色付けして表示

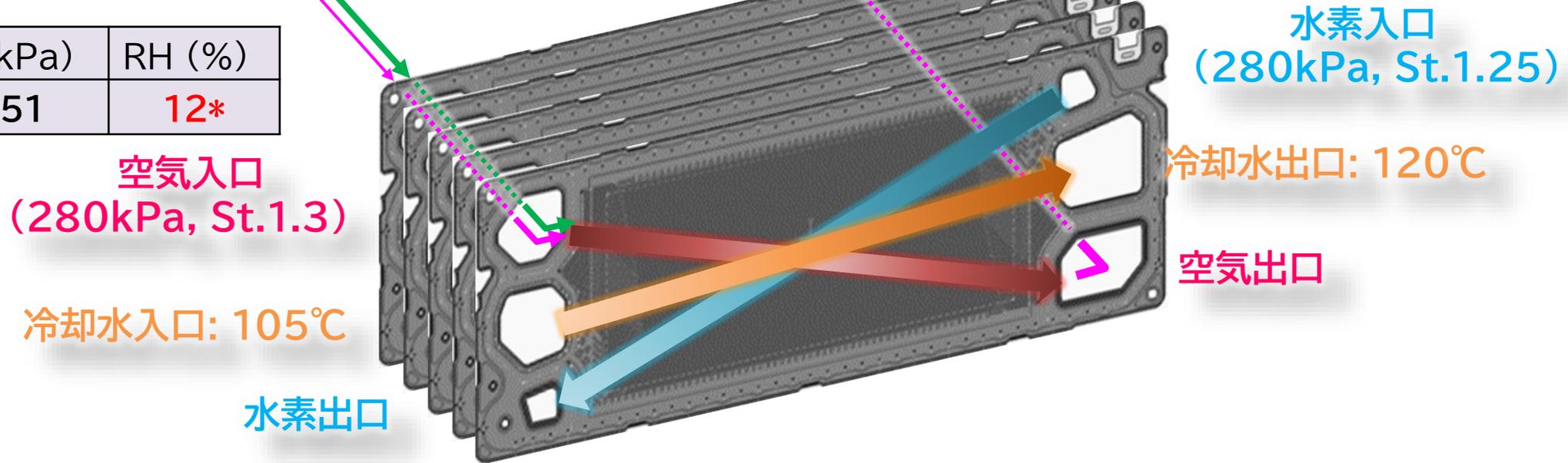
3. 目標物性試算の前提（温度・加湿）（2035年）

熱定格点（120℃運転条件）	
電極面積 cm2	283
動作点 A/cm2	2.42
H2 St.	1.25
Air St.	1.30
※アノード循環あり	

T _{cell in} (°C)	P _{wat} (kPa)	RH (%)
105	13.51	12*

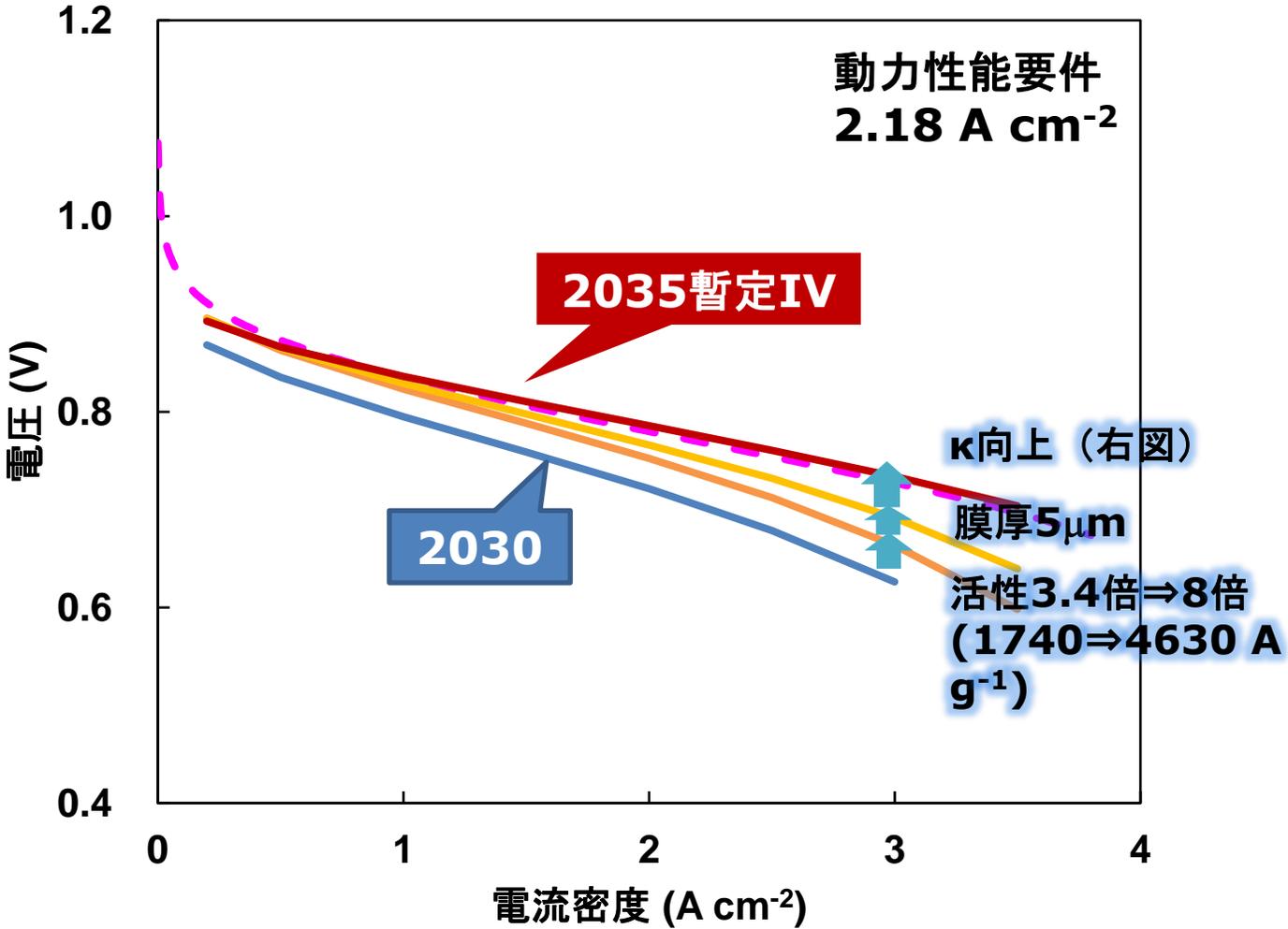


T _{cell out} (°C)	P _{wat} (kPa)
120	-

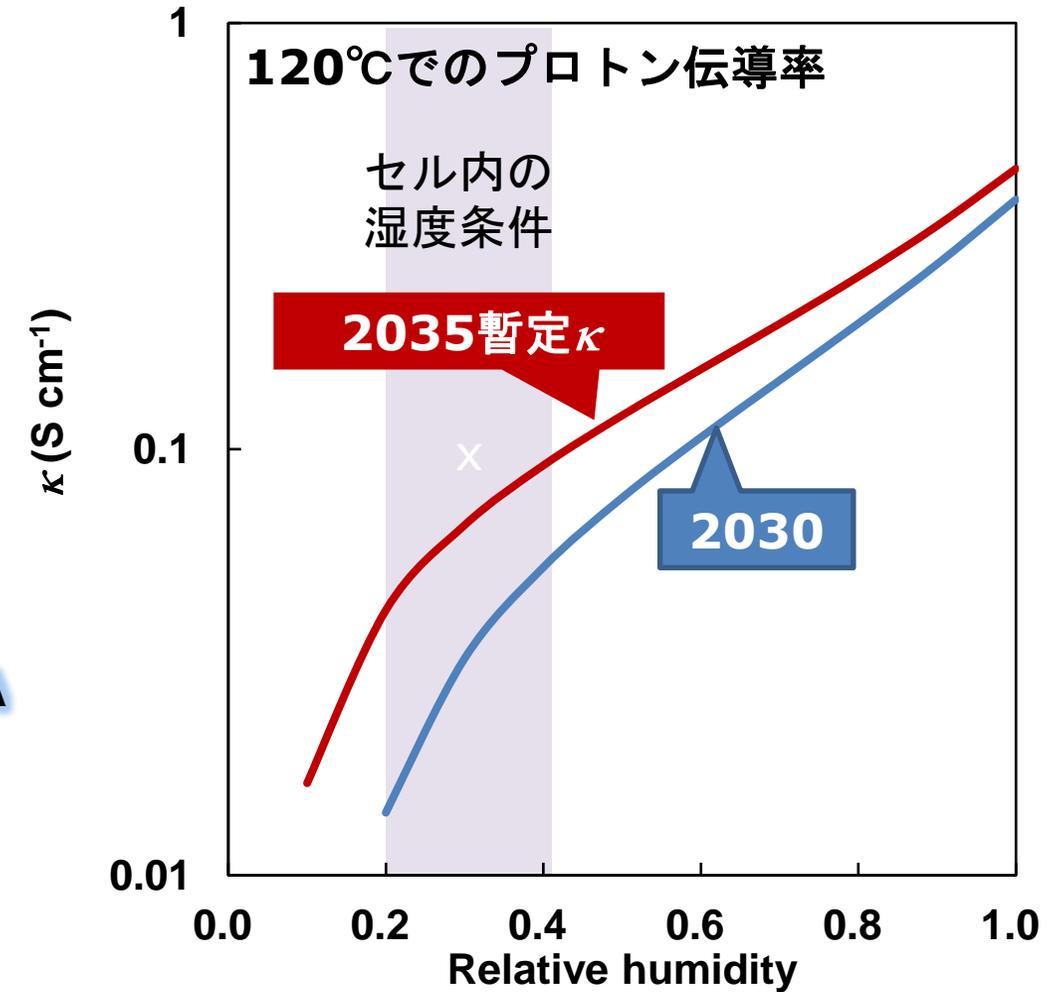


必要物性を決定づける動力性能要件での状況を想定し、最高作動温度**120℃**@冷却水出口運転，セル冷却水入口（=空気入口）105℃，空気入口湿度**12%RH**@105℃と定義．セル枚数**396**枚，ラジエータは**1.4**枚．
 ※大半の運転条件は70℃100%RH等の通常運転モード．

BOL IV

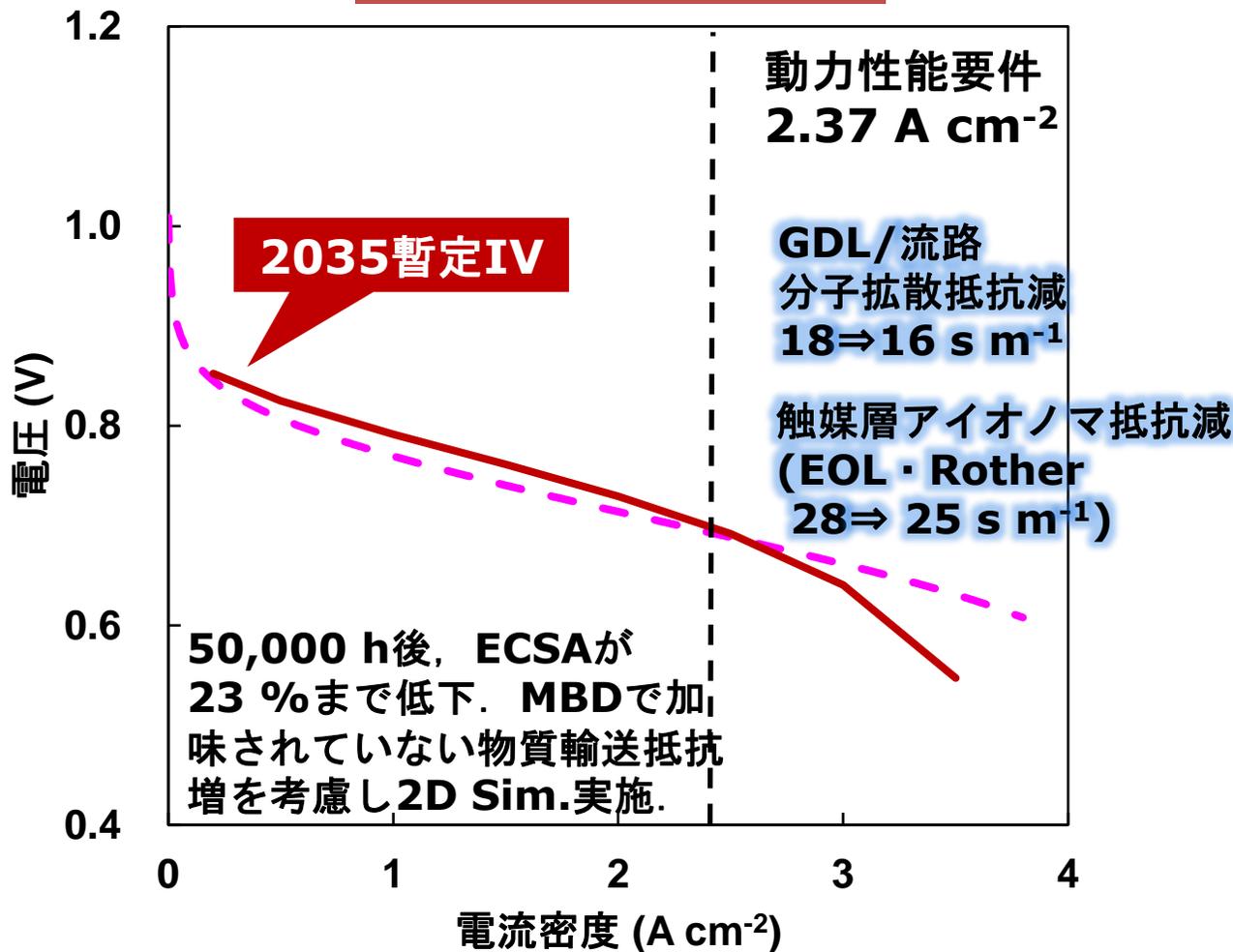


プロトン伝導率 κ



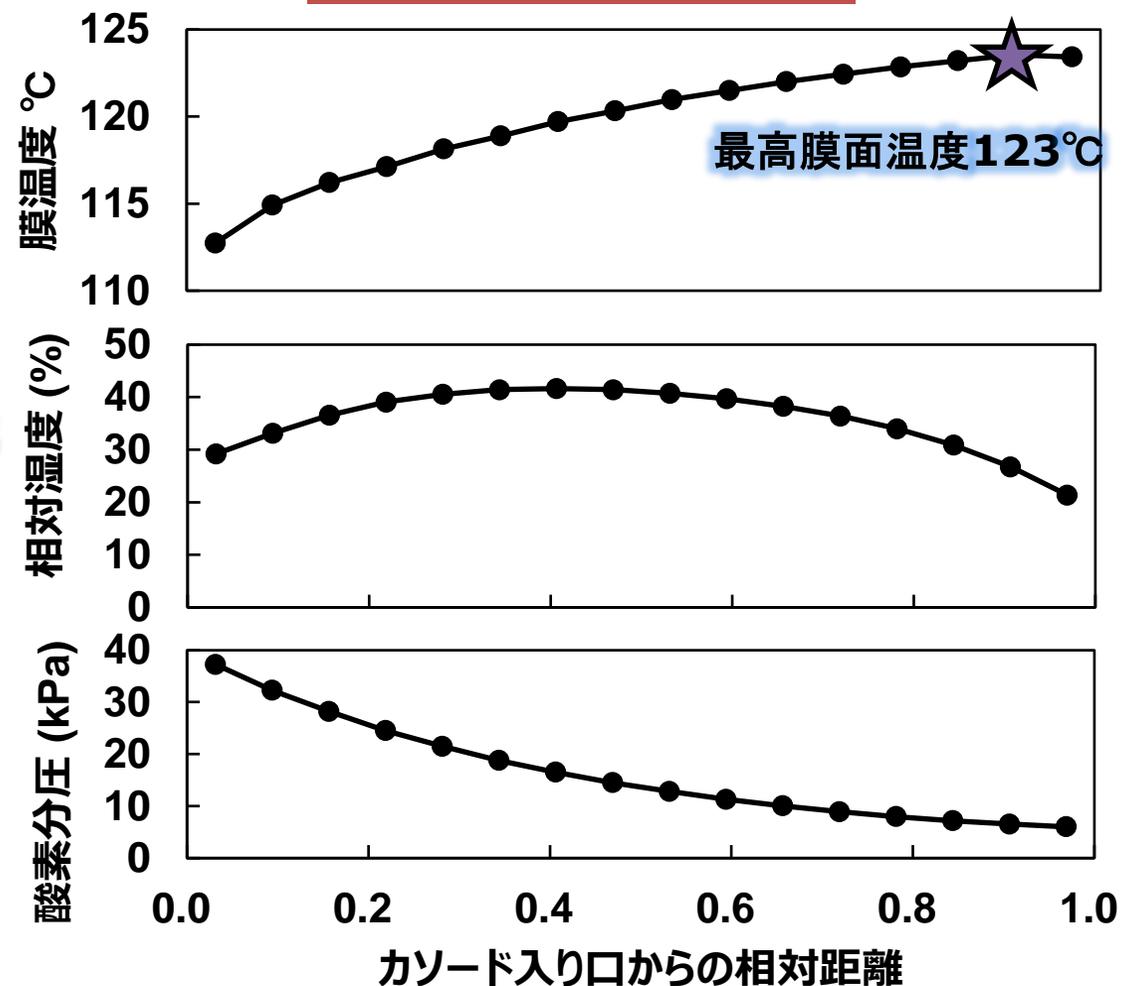
Gen2比で活性8倍 (4630 A g^{-1}), 膜厚 $5\mu\text{m}$, 高プロトン伝導化 (28 mS cm^{-1} @ $120^\circ\text{C} \cdot 20\% \text{RH}$, 50 mS cm^{-1} @ $120^\circ\text{C} \cdot 30\% \text{RH}$) で達成可能.

EOL IV



ECSA維持率 %では, BOL必要要件に加え, GDL/流路, 触媒層抵抗減が必要.

面内分布@EOL



電解質膜最高温度123°C, 湿度21-40%RH. 走行の大半は70°C, 100%RHであるが, これに加え, 全体の数%現れる本環境にも対応した電解質膜・触媒層物性が必要.

3. 暫定物性目標 (※GDL/流路, 界面抵抗等, 現況の開発状況をもて今後の修正あり) 10/20

要素	物性	Gen2	203X	2035	2040
空気極触媒	Pt目付 (mg cm^{-2})	0.17	0.20	0.18	0.12
	触媒層厚さ (μm)	7.5	6.0	6.0	3.6
	BOL 質量活性 (A g^{-1} @80°C・100%RH)	500	1740 [×3.4]	4630 [×8]	39400
	EOL 質量活性 (A g^{-1} @80°C・100%RH)	-	348	1088 ^a	9968
	BOL 酸素拡散抵抗 (sm^{-1}) [界面抵抗成分]	9.1 [×1]	10 [×1]	10 [×0.9]	8 [×1]
	Pt溶出速度	×1	×1	×1/2	×1/30
電解質膜	厚さ(μm)	8.5	8	5	1
	プロトン伝導率@120°C・30%RH (mScm^{-1}) ^b	18	32	50	150 ^e
流路・GDL	酸素拡散抵抗 (sm^{-1}) ^c	58.3 ^d	18	16 [×0.9]	18
	GDL/セパ、セパ/セパ等: 接触抵抗合計 (Ωcm^2)	-	0.0065	0.0065	0.0004

a. 材料種問わず担体・活性種双方の高耐久化により実現, b. 電解質膜プロトン伝導率は補強材・クエンチャ導入後の値, c. 流路・GDL込みで達成する目標値, d. 並行流路での測定結果, e. 120°C12%RH

2035の暫定目標を提案(赤枠)

燃料電池用途のPFAS規制の猶予期間

FCJ 目的外への使用・転載不可 16

欧州REACH PFAS制限案 規制概要

⑤ PEM型燃料電池用途に関する制限案

◆ ステークホルダーからの情報提供(2回)を基に、提案国(エネルギー分野:オランダ)が制限案を作成

部材	電解膜	補強材	シール材
代替材料	スルホン化PEEK ポリスルホン	ポリベンゾイミダゾール	炭化水素系エラストマー
代替適合性	<ul style="list-style-type: none"> 性能は良好であるが、酸素ラジカルによる劣化のため、耐久性が低い。 有効な代替材料が開発されるまでに10年以上はかかると予想される。 シール材は劣化による燃料電池の機能/安全性低下の可能性あり。 		

(ガス拡散層/マイクロポラス層は情報提供無し)

↓

PEM型燃料電池に使用されるフッ素ポリマー/パーフルオロポリエーテルには18ヶ月の移行期間に加え、5年間の制限適用猶予が提案された

- 代替材料の可用性に時間を要する：2022年より少なくとも5~10年
- 代替材料の研究開発状況等を考慮すると、12年の猶予期間が正当化される可能性あり

<https://echa.europa.eu/documents/10162/8de11d7c-c56f-e204-5072-e89f11071219>

決定されると規制の開始が 32~39となる見込み

今後の動き

日本フルオロプロダクト協議会資料(AGC様ご提供)

FCJ 目的外への使用・転載不可 20

欧州REACH PFAS制限案

⑦ 今後の見通し

・ECHA (欧州化学品庁) の専門家委員会 (RAC/SEAC) でPFASの議論が開始
→ セクター毎での議論となる見通しであり、食品接触用途からスタート。

Consultation in scientific committees
Including 6 months + 60 days stakeholder consultation

22 March 2023 Start of consultation

5 April 2023 Online information session

22 September 2023 End of 6 months consultation

2024 Opinion of Committees

2025 COM decision Entry into Force

2026/2027 Restriction becomes effective

出典：2023-02-07_pfas_media_briefing_en.pdf

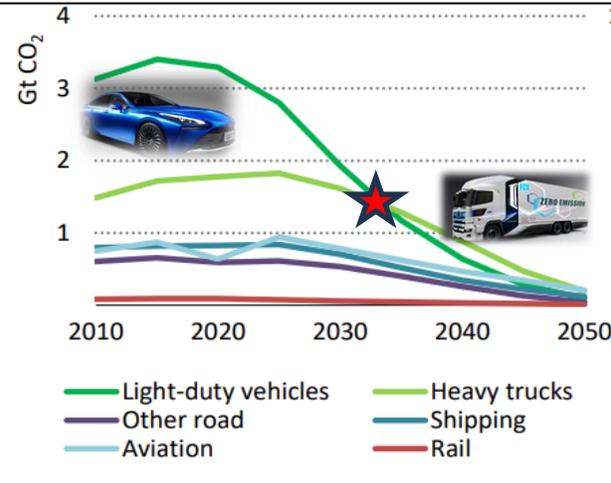
※ 次回パブコメ(最終)は、SEAC意見案に対して60日間実施：開始時期は未定

水素・燃料電池は '24~25に審議開始の見込み

PEM型燃料電池用途は1.5年+5年の猶予(12年の猶予期間が可能性がある)
本ロードマップ検討期間中(~'25/2)に規制可否の決定は不明確
→本検討では「規制有無両面の技術指針」を提案

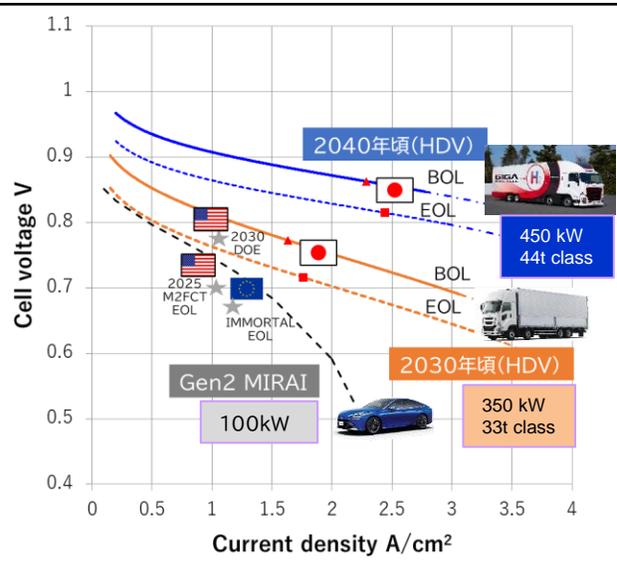
2035年とは...

NET-ZEROに対して...

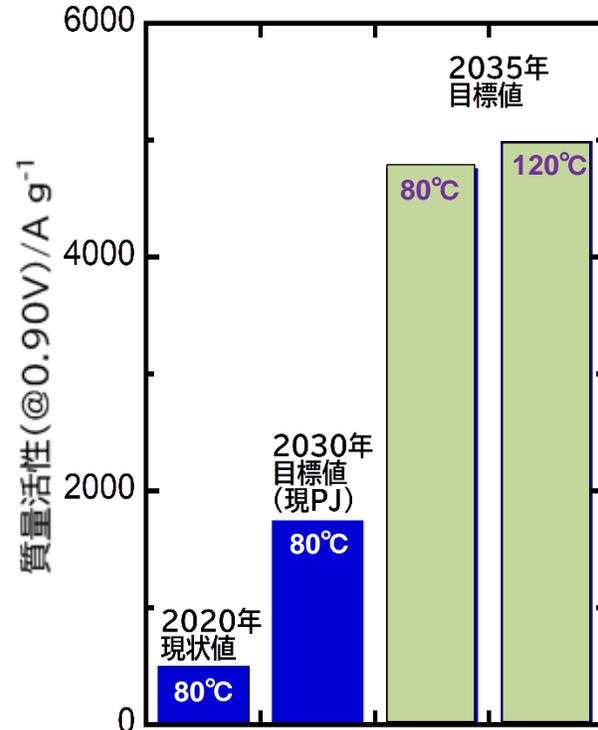


<https://iea.blob.core.windows.net>

求められる性能...



2035年到達目標 (カソード)



100%RH, O₂分圧=100 kPa_{abs}
 PGM目付量: 0.178 mg cm⁻²
 ECSA: 60 m² g⁻¹
 触媒層厚み: 6.0 μm

システム側の協力 (設定目標の緩和)
 セル枚数: 330 枚数 ⇨ 396 枚数
 電極面積: 270 cm² ⇨ 283 cm²

重要課題

- 2035~2040年
* 経験則(スケーリング則等)超越
新規触媒(PGM&非PGM)
- 2030~2035年
* 新アイテム創出&メカニズム解明
アイテム複合利用による活性向上
- ~2030年 (貴重な知見の蓄積)
* Pt系触媒(合金・スキン・コアシェル等)
* 活性向上&劣化メカニズムの解明

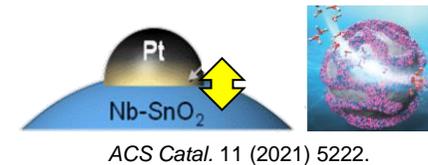
・高耐久性の付与

メカニズム解明・課題抽出⇨より効果の高いアイテム創出へ

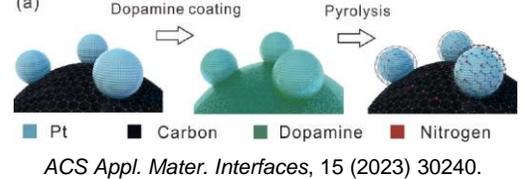
並行実施課題

- ・MI/機械学習/自動自律実験 & データ蓄積・体制構築
- ・マルチモーダル解析 & 多角的視野での材料設計
- ・触媒層構造とIV性能の相関 & シミュレーション利用
- ・小型MEA評価確立
- ・MEAとRDEの差異解明

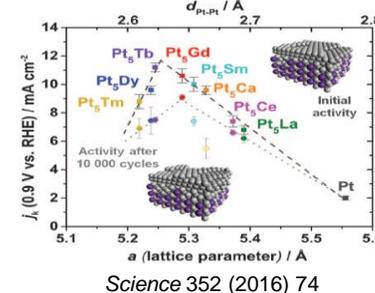
電子状態&微細構造制御(SMSI)



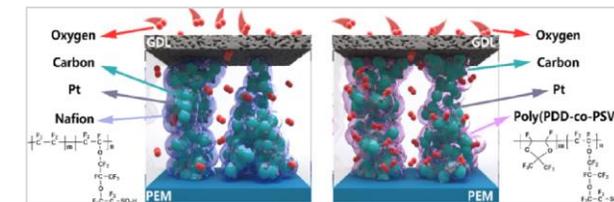
修飾効果



新合金/ハイエントロピー



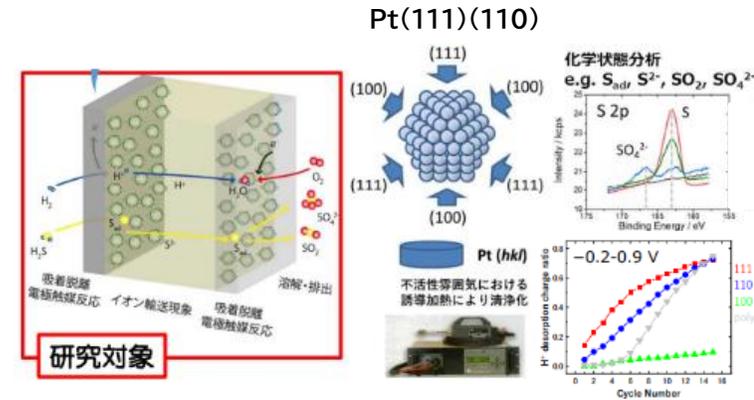
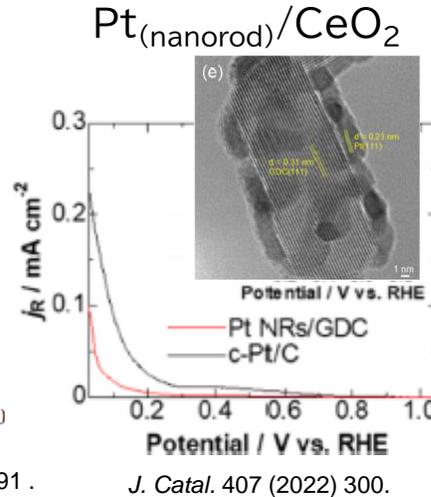
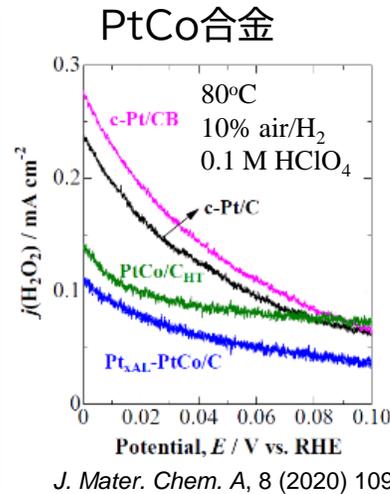
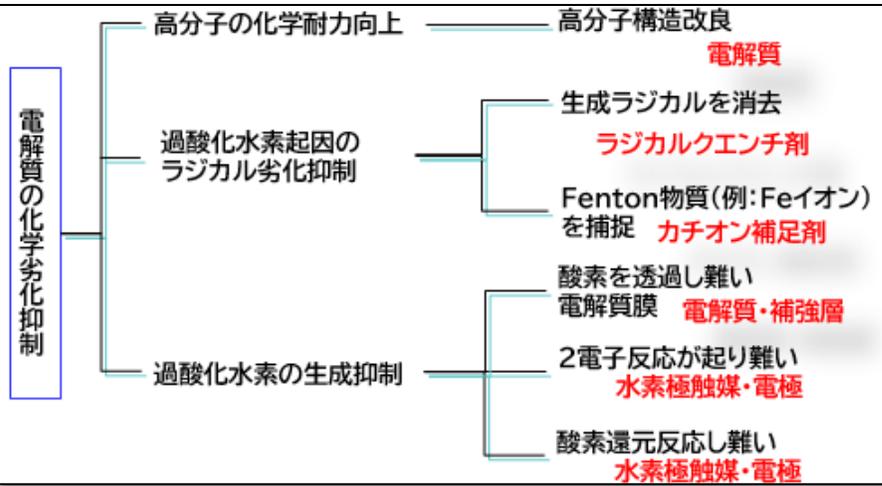
HOPI



アノードへの期待

過酸化水素生成抑制

硫黄被毒予防・回復技術



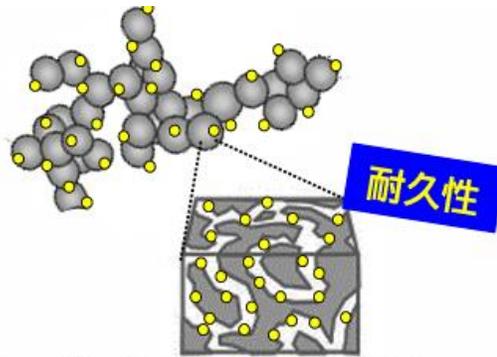
NEDO水素・燃料電池プロジェクトレビュー2021, 硫黄化合物等の吸着脱離メカニズム解明と被毒予防・回復技術開発, 物質・材料研究機構, 日本自動車研究所

- ・新機能付与 & メカニズム解明
- ・広温湿度領域対応

担体への期待

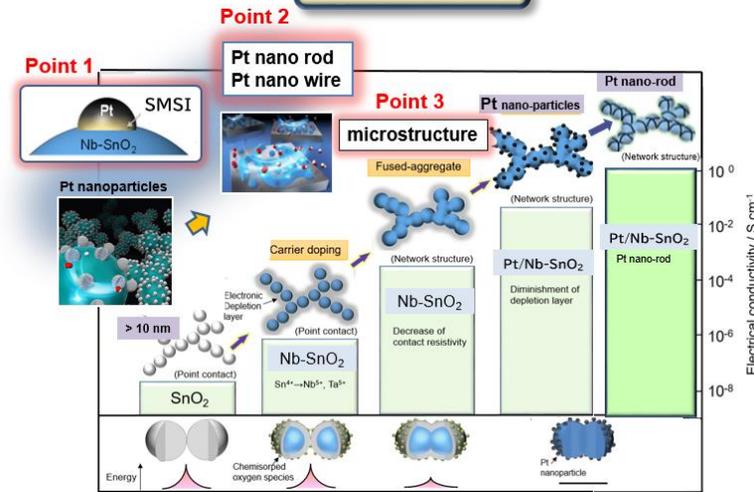
- カーボン**
- ・Ptナノワイヤ/ナノロッドに適する微細構造
 - ・アイオノマー/表面修飾(均一・選択被覆)に適した表面
- 非カーボン**
- ・化学的安定性 & 物質輸送/電子輸送に適した微細構造
 - ・新機能(電子的相互作用・界面相互作用・耐久等)付与

カーボン



カーボンのストラクチャに注目
連通孔(予想)による触媒利用率向上

非カーボン



ACS Appl. Mater. Interfaces 11 (2019) 34957

電解質膜とアイオノマーの目標物性

2035年目標値

電解質	膜	膜厚 (μm)↵	↵	5.0↵	8.5↵	25↵	Chemours↵ Nafion™↵	
		H ⁺ 伝導率 (S/cm) ↵ ※1↵	at 120°C, 20%RH↵	0.028↵	↵	↵	↵	↵
		at 120°C, 30%RH↵	0.050↵	↵	0.018↵	0.016↵	※9↵	
		at 100°C, 40%RH↵	0.057↵	↵	0.027↵	0.024↵		
		at 80°C, 80%RH↵	0.135↵	↵	0.106↵	0.086↵		
		at -30°C, 0%RH※2↵	今後設定↵	↵	★↵	★↵		
アイオノマー	H ⁺ 伝導率 (S/cm)↵	at 120°C, 20%RH↵	0.028↵	↵	↵	↵	↵	
		at 120°C, 30%RH↵	0.050↵	↵	—↵	★↵	Chemours↵ Nafion™↵	
		at 100°C, 40%RH↵	0.057↵	↵	—↵	★↵	D2020↵	
		at 80°C, 80%RH↵	0.135↵	↵	—↵	★↵	触媒層抵抗↵	
		at -30°C, 0%RH※2↵	今後設定↵	↵	↵	↵	※9↵	
	空気極触媒層抵抗(Ωcm ²)↵	at 120°C, 20%RH↵	↵	0.147↵	↵	↵	↵	
		at 120°C, 30%RH↵	↵	0.083↵	0.77↵	0.37↵		
		at 100°C, 40%RH↵	↵	0.073↵	0.41↵	0.24↵		
		at 80°C, 80%RH↵	↵	0.030↵	0.10↵	0.060↵		
		at -30°C, 0%RH※2↵	今後設定↵	今後設定↵	↵	↵	↵	↵

2030年
目標値
0.032
0.041
0.12

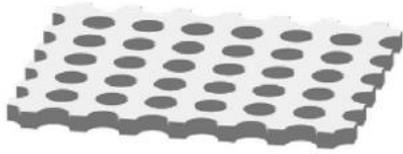
電解質膜のH⁺伝導率は補強材込みの伝導率、クエンチ剤など耐久性を担保した状態での伝導率を想定

電解質膜材料: フッ素系高分子, 炭化水素系高分子

膜厚: 5 μ m

FCスタック耐久時間: 50,000 [h]

補強層
(機械劣化)



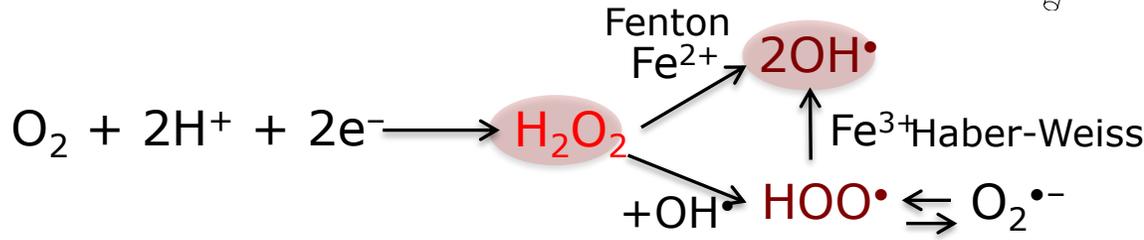
微多孔質

- (1) 有効面積の減少を補う
- (2) 電解質ポリマーとの親和性
- (3) 電極との接合性 etc.



- (1) 電解質ポリマーとの親和性
 - (2) 電極との接合性 etc.
- ナノファイバー

クエンチ剤
(化学劣化)



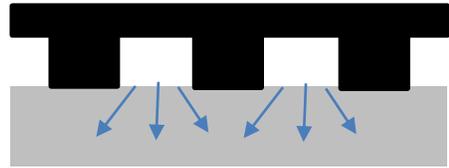
電解質膜内で起きるラジカル反応

- (1) 膜内の流動性を抑制
- (2) 伝導度の低下を抑制
- (3) 強酸下状態での安定性 etc.

Roll to Roll による膜製造

電解質膜材料, 補強層, クエンチ剤を複合化して電解質膜をRoll to Rollで作製

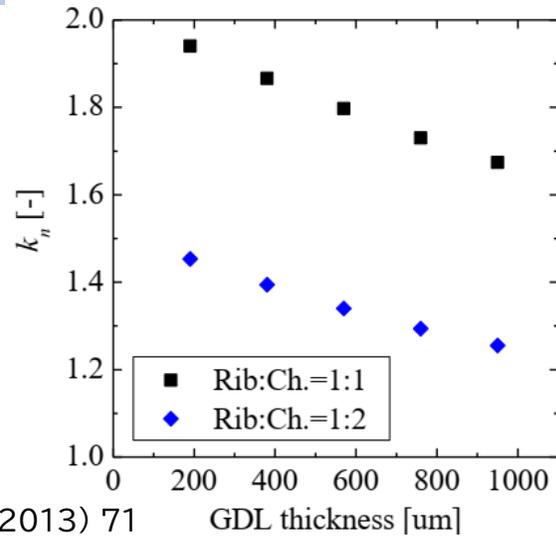
① 流路設計の必要性



$$k_n = \frac{R'_{\text{eff}}}{R'_{\text{GDL}}} \begin{matrix} \text{GDL抵抗} \\ \text{(みかけ)} \\ \text{GDL抵抗} \end{matrix}$$

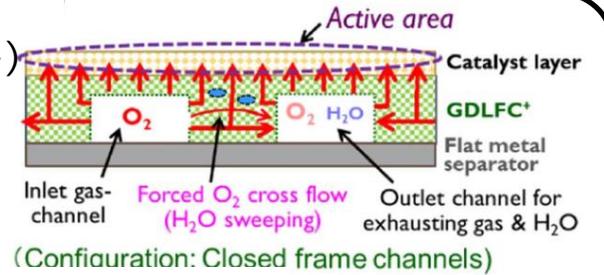
リブ下へのガス拡散が不十分
GDL薄膜化により顕著
流路構造の最適化が必要

金子ら日本機械学会論文集B 79(797) (2013) 71



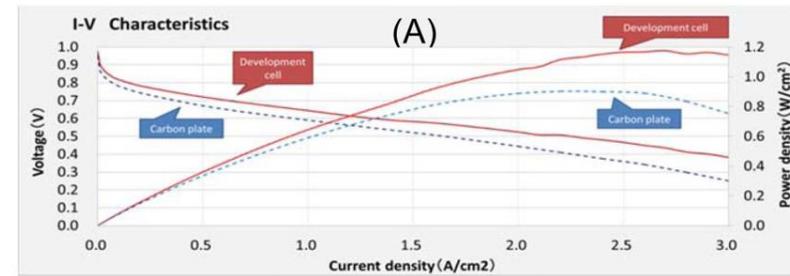
② 新たなGDL構造

GDL・流路一体型セル (GDLFC+)
M. Watanabe et al.,
JECS 166 (7) (2019), F3210



多孔性流路による
触媒層全体への酸素輸送促進

(Configuration: Closed frame channels)



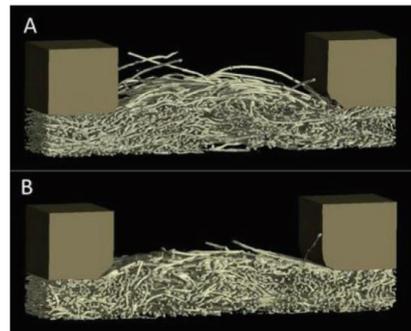
電子伝導性
Pt利用率
の向上にも寄与

③ GDLの他機能との両立

- 部材間接触抵抗の低減
- MEA安定保持のための機械強度維持

薄層化、高空隙率化と
機械強度は相反関係

J. Power Sources, 324 (2016), 625



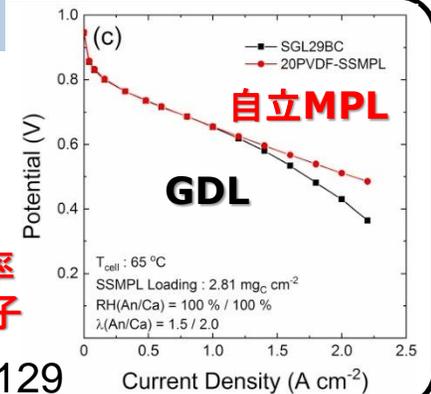
④ GDLフリー、多孔構造の工夫

- GDLではなくMPLによりMEAを支持。O₂拡散性向上
- 構造制御による輸送性向上

$$R_{MPL} = \frac{t_{MPL}}{D_{ij}^{eff}} = \frac{t_{MPL}}{D_{ij} \epsilon_{MPL}^{\gamma}}$$

厚さ, 空隙率
幾何形状因子

J. Power Sources, 506 (2021), 230129

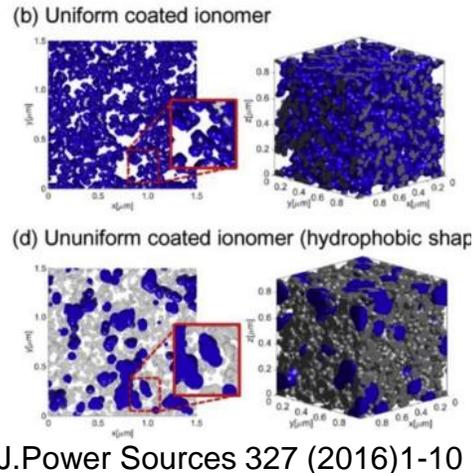


GDL単体としての酸素輸送抵抗はほぼ目標達成。流路構造との組み合わせを考慮し、抵抗を低減する必要

① 触媒層の輸送抵抗の低減

- Pt近傍のアイオノマー内/界面O₂輸送抵抗の低減
- 担体細孔内の輸送抵抗低減
- アイオノマー分布や被覆形態制御による輸送性向上

酸素, プロトン, 電子の円滑供給のための構造設計



② 触媒層作製プロセスの高度化

厚さ, 空隙率, 比表面積, 分散, 凝集粒子径
プロトン伝導性, 酸素拡散性, みかけ触媒活性を左右

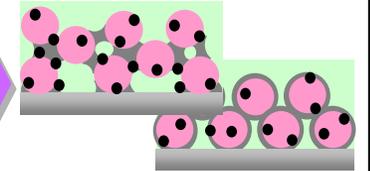
インク調製

分散・混練

触媒層塗布

触媒層乾燥

圧着



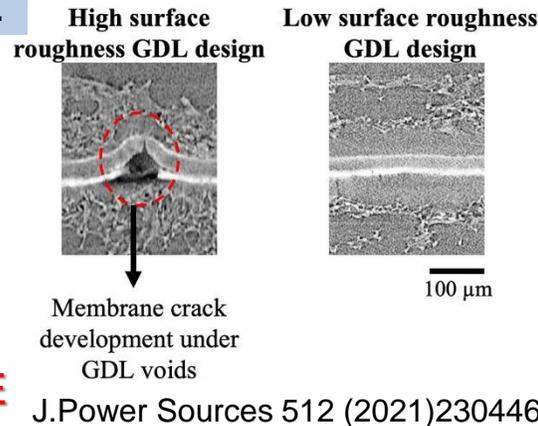
- 各工程の現象理解
- PI等, データ駆動によるプロセス最適化

各工程の現象解明や新たな製造工程の検討も必要

③ MEAの必要特性の検証

- 電解質膜, 触媒層, GDL, シール部材の組み合わせ
- 薄膜化による, 他部材の必要剛性・表面粗さ変化

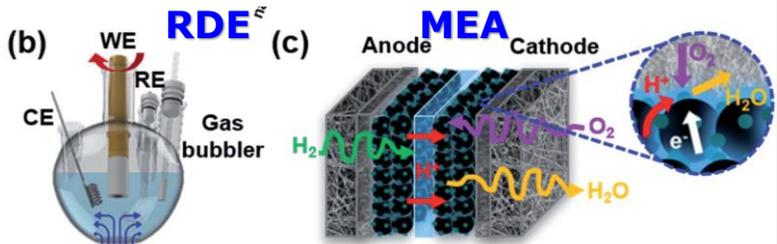
物質輸送性, 保水性
電子伝導性, 機械強度, 耐久性



④ 触媒層構造の設計工夫

- 触媒活性の差異の要因解明が必要
- 互いの補間に必要な因子の抽出

マルチモーダル解析やオペランド解析等の各種計測技術の高度化
シミュレーションによる現象解明と最適設計

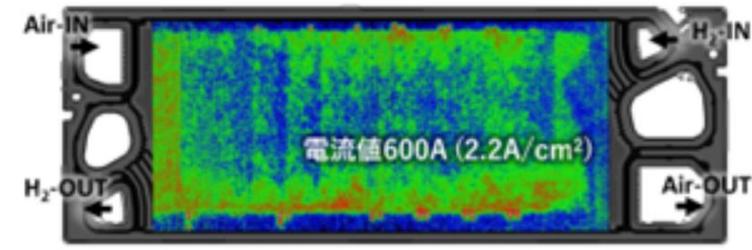
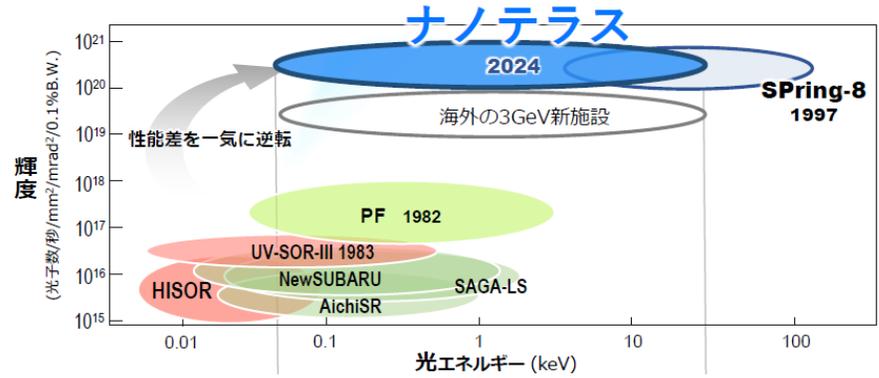
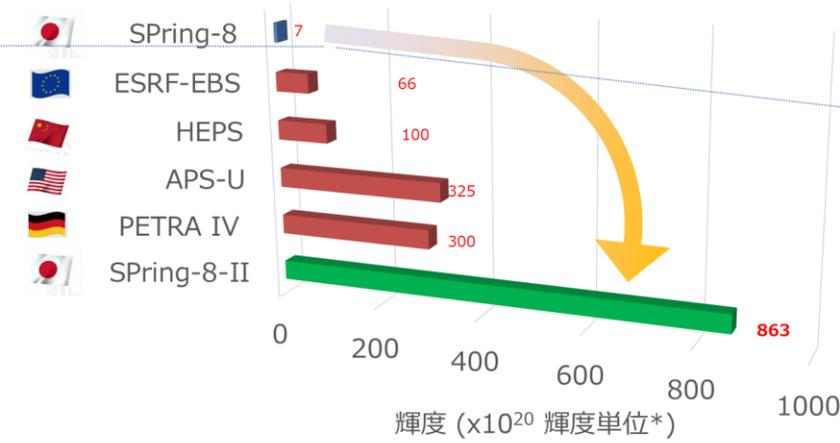


6. 評価・解析技術：技術ポテンシャルマップ 材料開発目標

◆ 30年/35年/40年材料開発目標と検討項目

開発時期	目標値	触媒	電解質膜 アイオノマ	GDL/MPL MEGA	生産技術	産業界ニーズ
2025～ 2030年	電解質膜：厚さ8μm プロトン伝導率：0.032 @120℃, 30%RH 触媒層厚さ：8μm 触媒目付：0.02 比活性：1,740 酸素輸送抵抗：10 S/m 分子拡散抵抗：18 S/m	・高温耐久触媒(120℃) →触媒表面における水可視化 →劣化要因の体系的解析 →120℃運転での非定常状態の可視化 →界面：カーボン・アイオノマ、カーボン表面(高温挙動) →イオン液体の結合状態 →高温環境下における計測技術の確立 →過渡現象の解析	・高温耐久電解質膜 120℃以上, 30%RH条件下でのプロトン輸送解明 膜の相分離(酸官能基の状態)、膜内の水の状態 ダイナミックな計測 ・薄膜化 断面相分離構造：温度・湿度相関 水の分布状態：温度・湿度相関 薄膜化による変化、制御 →高温における解析環境の構築	・高温化 ・薄GDL化 ・触媒層構造最適化 ・ガス(水蒸気)の解析	・生産プロセスの現象解析 ①触媒層形成プロセス ②エージング ・材料開発への適用 ③高耐久セパレータ ④シール材料	・産業界による解析PFの活用 現PF利用可能技術の展開 産業界ニーズ ・電極内での水挙動可視化 ・アイオノマー被覆状態可視化 ・高電位による触媒劣化の影響評価 ・MEA活性とRDE活性 ・電解質膜の耐久性 ・材料表面物性の耐久性
2030～ 2035年	電解質膜：厚さ 5μm プロトン伝導率 0.066 S/cm@120℃, 30%RH 触媒層厚さ：6μm 触媒目付：0.18 mg/cm ² 比活性：4630 A/g 酸素輸送抵抗：10 S/m 分子拡散抵抗：16 S/m	・新材料開発 微粒化・ナノクラスタ、規則化合金、高エントロピー合金、高融点合金、有機修飾、C-C-Nコート、高耐久メソ孔担体、酸化物担体 →触媒反応メカニズム解析 →RDE vs MEA(イオン液体など新規アイテムの現象解析) →高度な材料解析の実現	・新材料開発 HC系、ホスホン酸系ポリマ、ナノファイバ、コンポジット膜、高HOPIアイオノマ、アニオン膜 ・PFAS規制対応 炭化水素系電解質構造一性能相関ライブラリ(スタンダード系) ・新材料に対応するクエンチャ開発 →MIに対応できる計測技術	・理想的触媒層の構造	・PIによる触媒層プロセス最適化 ・工程検査 →PIに対応可能な計測技術・DX技術	・不純物の影響評価 ・高温での担体耐久性 ・EOLまでの触媒層構造変化
2035～ 2040年	電解質膜：厚さ1μm プロトン伝導率：0.15@55～125℃, 12%RH以上 触媒層厚さ：4μm 触媒目付：0.120 比活性：39,000 酸素輸送抵抗：8 S/m 分子拡散抵抗：18 S/m	・MIによる革新的触媒開発 →DX実装による高速・大量データ生成	・MIによる革新的電解質膜開発 ・PIによる電解質膜合成(製膜) ・120℃以上, 12%RH条件下でのプロトン輸送解明 膜の相分離(酸官能基の状態)、膜内の水の状態 →オペランド計測+DX技術	・革新材料に対応する触媒層の最適化	・新規材料に対応するプロセス最適化、システム化 →プロセスや触媒層構造の最適化が可能な計測疑似術	
包括的な 取組		・高温環境下における反応、および、触媒(触媒層)劣化要因の体系的解析	・炭化水素系電解質膜の構造・物性・性能相関ライブラリ作成 ・非フッ素系劣化の要因解析(スタンダード系)	・劣化予測技術 ・大視野/高分解能測定やマーカー的解析活用による劣化起点の計測	・生産技術への高度解析適用 ・触媒インク、インク乾燥過程のオペランド計測を含むPI	・イメージング・DX/シミュレーション技術 ・AIによる画像解析

- ◆ 3つの量子ビーム施設は、今後5年でアップグレード計画が進行中。中国勢の追い上げをかわし、欧米を追い越し、トップの性能へ。
- ◆ 量子ビームのポテンシャルを最大限活用する計測・解析手法の開発と、35年/40年課題を見据えた課題解決型の解析を行える環境を施設の協力を得て進め、仕組みとして運用することで日本の競争力を強化



「SPring-8-II シンポジウム 概要説明資料 (2024年8月2日)」より抜粋
https://new.spring8.or.jp/images/spring8/spring8-2/symposium_y3.pdf

6. 評価・解析技術：技術ポテンシャルマップ 解析シーズ

- ◆ 量子ビーム施設の能力は、5年程度で世界トップへ。DXによる計測の高度化・効率化・自動化が実施、または、計画されている。
- ◆ 35年/40年の開発課題に照準を合わせて、解析技術のPF化や高度化、MI/PI活用を想定した計測自動化技術の導入が期待される。

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030以降
施設upgrade	SPring-8	●ビームライン再編 ●検出器高度化、データセンター				●シャットダウン		●SPring-8-II 供用再開 ★ 輝度100倍で世界トップへ
	NanoTerasu	●供用開始(コアリションメンバー枠) ●高輝度化、検出器高度化、データセンター	●供用開始(共用枠)	★ 輝度100倍で世界トップ				
	J-PARC	●1MW運転			●BL増強 ★ 輝度10倍、パルスイメージングでは世界トップへ			
ニーズ×シーズ	解析ニーズ 30~40年課題	●触媒、電解質膜の120℃環境における解析 ●産業界課題への対応	●新規材料開発のための高度な現象解析 ●構造データライブラリ作成のための高速計測		●その場観察による高度な現象理解 (触媒層構造最適化、劣化機構モデル化) ●MIを活用した材料開発 ●PIを活用したプロセス開発			●プロセスや触媒層構造最適等
	ロードマップ 解析シーズ	●既存解析ツールのプラットフォーム化と機能拡充	●ハードウェアの性能向上による解析技術の高度化 ●DXによる計測の高度化・高速化		●その場観察技術の高度化 ●MIに対応する計測・解析技術 ●PIに対応する計測・解析技術			●自動計測・自動解析(触媒材料、触媒層、電解質膜)
解析シーズ	SPring-8-II/ SACLA	●既存解析の提供、活用手法の拡大 汎用構造解析(XRD、XAFS、SAXS、HAXPES、PDF) 高分解能XAFS、XAFS-CT、Operando HAXPES ●CITIUS/AKB導入による高感度SAXS、高速XAFS計測 ●生産技術課題への対応 ●高温現象解析	●試料調整の自動化、リモート計測 ●マルチモーダル計測/解析		●触媒表面反応解析のその場解析技術基盤の構築 ●触媒層/プロセス解析技術基盤の構築 ●材料・触媒層解析への対応 ●アイオノマ・電解質膜の構造解析			●自動計測・自動解析(触媒材料、触媒層、電解質膜)
	NanoTerasu	●供用手法のPF化 ●生産技術課題への対応 ●高温現象解析	●自動計測 ●Operando計測基盤構築		●触媒表面反応解析のその場解析技術基盤の構築 ●軽元素分析(水)、真空中でも大気圧その場観察			●自動計測・自動解析(触媒材料、触媒層、電解質膜)
	J-PARC	●既存解析のPF化 ●CV-SANS、反射率、準弾性散乱等のオペランド化	●水・プロトンの構造と移動現象解析	●ユーティリティ機能増強による大容量セルの計測	●イメージングデータのDXによる解析	●BL整備によるラジオグラフィの高度化 ●実機セルの大視野/高分解能可視化技術		●ビームライン増強