

NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ成果報告会

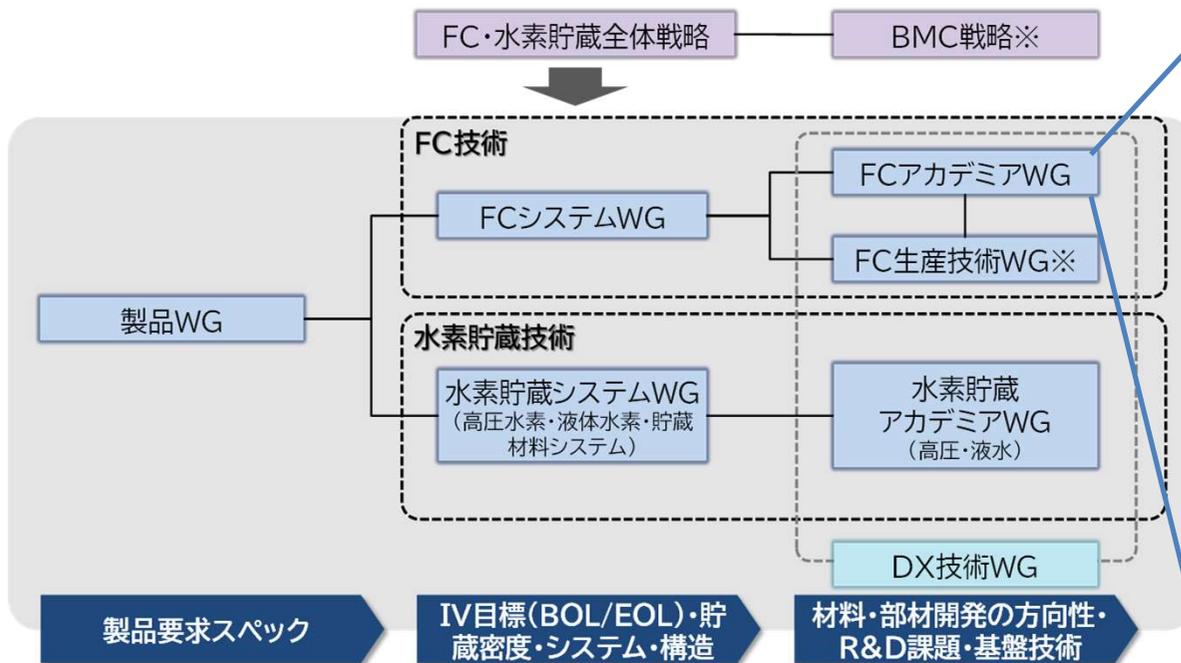
NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ (FCV・HDV 用燃料電池技術開発) FCスタック (アカデミアWG)

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 水素・アンモニア部
(委託先)みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

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
 - ✓ 2035年頃の材料物性目標の検討
 - ✓ ロードマップ目標に即したMEA評価手法の整備
 - ✓ 2035年頃に向けた材料開発
 - 電極触媒
 - 電解質材料
 - ガス拡散電極
 - MEA
 - ✓ 評価・解析技術
3. まとめ

FCアカデミアWG 体制



※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
- FCCJ
- FC-Cubic
- みずほR&T
- <解析技術>
- Spring-8
 - J-Parc
 - NanoTerasu

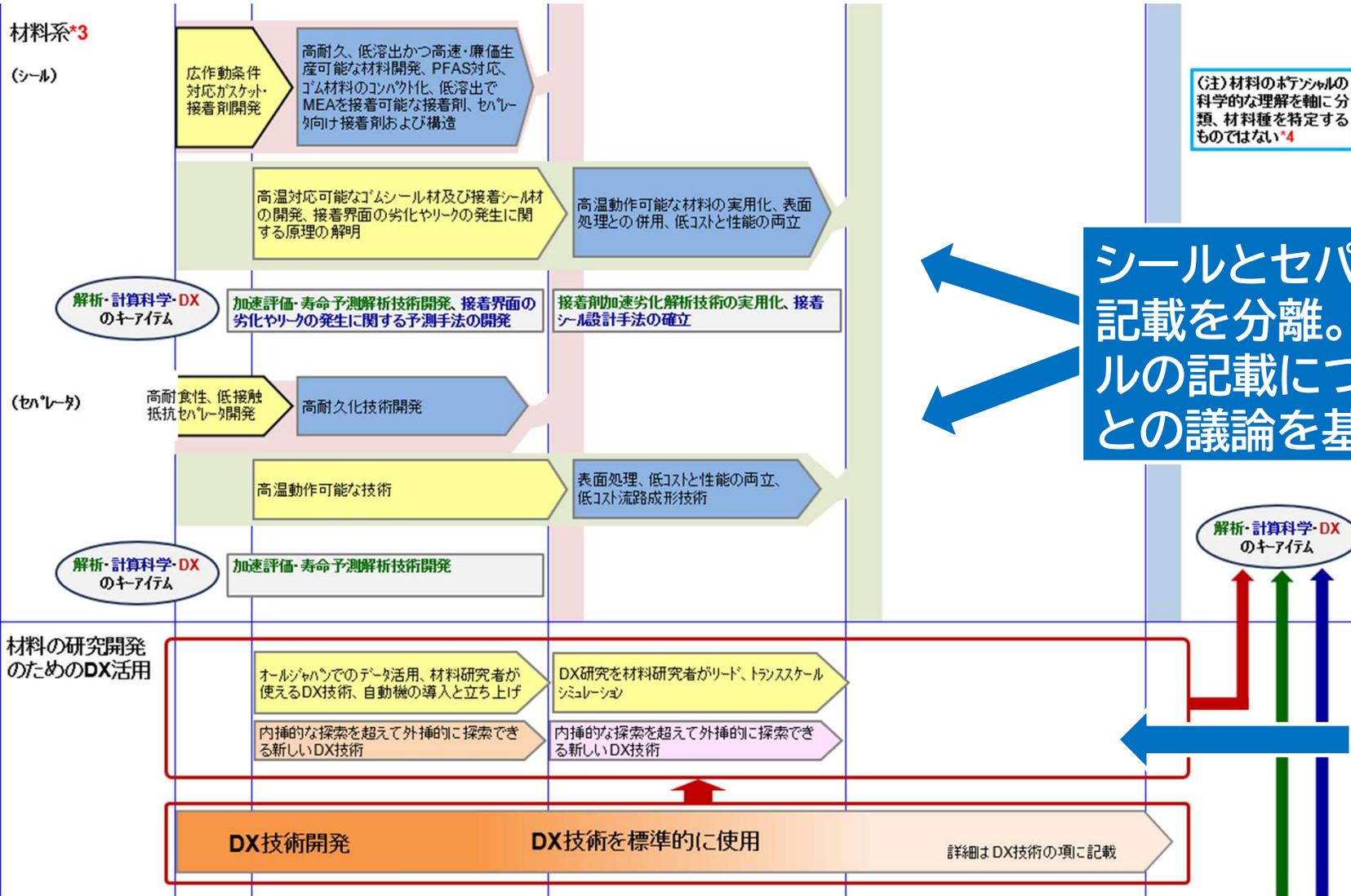
- 柿沼 克良
川上 浩良
井上 元
内本 喜晴
富中 悟史
田中 慎太郎、中原 章
安藤 雅樹、川角 明人
陣内 亮典、兒玉 健作、
渡辺 隆男、加藤 悟、
篠崎 数馬
雨宮 一樹
竹内 仙光、今井 英人、
小山 茂樹*1、高野 純*2、
山内 将樹
米田 雅一、塚本 貴志、
菅原 瑠偉
- 矢橋 牧名
大友 季哉
原田 慈久

*1 2023年度まで
*2 2024年度から

- ① 2035年頃のFCV／HDV目標を踏まえたFC材料物性目標の検討
- ② 2035年頃に向けた材料開発課題の検討
- ③ 材料の研究開発の加速にむけたDX活用の議論
- ④ 材料開発・解析技術開発ニーズの落とし込み
- ⑤ 上記を踏まえたロードマップ・解説書の更新・改訂

昨年度はHDV目標に対応する項目などを中心に実施し、
今年度はFCV目標に対する項目などを中心に実施した
本日は昨年度中間報告からのアップデートを中心にご報告する

ロードマップの主な追加・変更箇所



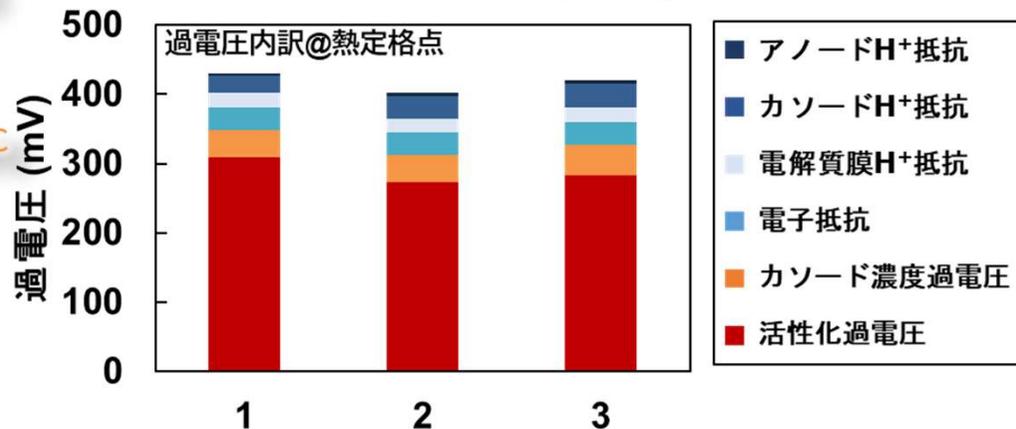
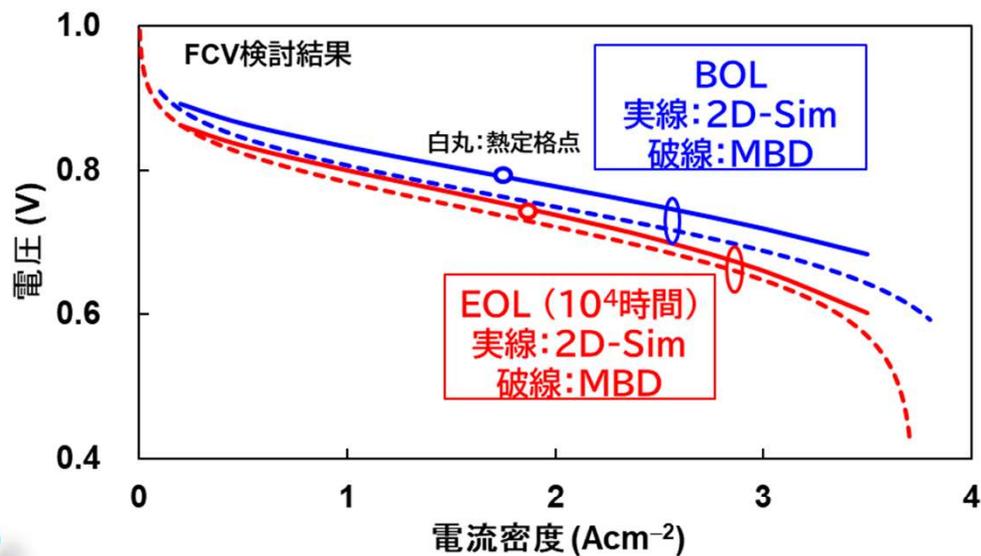
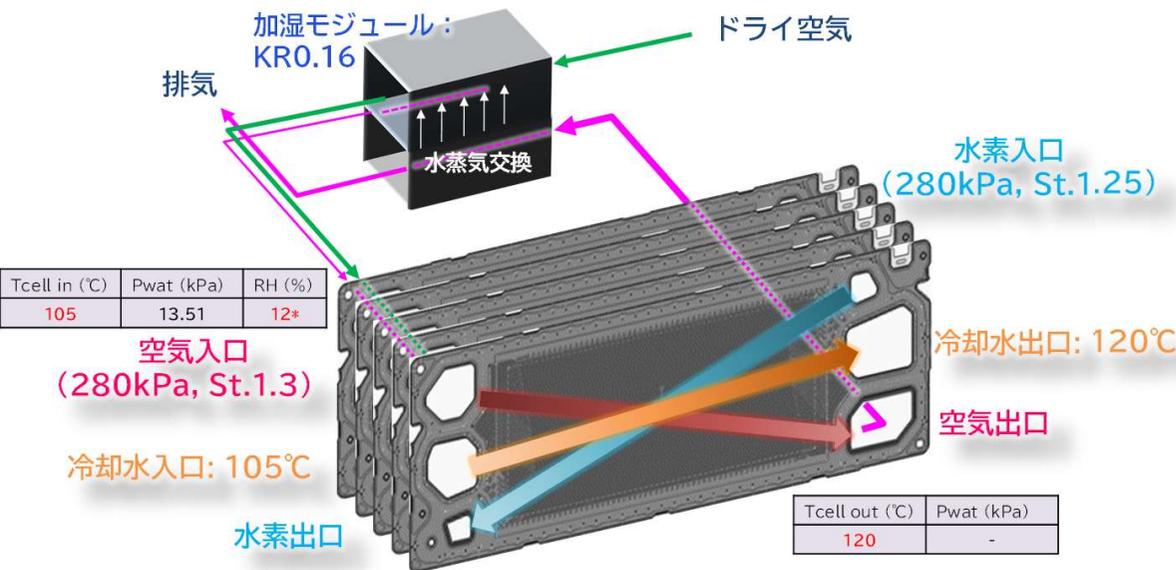
- 2.5 FC 材料目標
 - 2.5.1 材料目標の考え方
 - (1) 2030 年頃の目標
 - (2) 2035 年頃の目標
 - (3) 2040 年頃の目標
 - 2.5.2 材料初期物性検討のためのシミュレーションモデル
 - (1) 電解質のプロトン伝導率.....
 - (2) 空気極流路/GDL ガス輸送特性
 - (3) 空気極触媒層ガス輸送特性
 - (4) 空気極触媒活性
 - 2.5.3 材料物性目標の検討.....
 - (1) 2030 年頃の目標
 - (2) 2035 年頃の目標
 - (3) 2040 年頃の目標
 - 2.5.4 主要材料コストの目安
 - 2.5.5 材料評価の考え方
 - (1) 性能耐久評価.....
 - (2) 電解質膜耐久評価
- 2.6 FC 材料開発の方向性
 - 2.6.1 PFAS 規制.....
 - 2.6.2 2030 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

- 2.6.3 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
 - (5) シール材料
 - (6) セパレータ・表面処理
- 2.6.4 2040 年頃に向けた材料開発
 - (1) 材料開発の方向性の考え方.....
 - (2) 材料開発の加速手段や取り組み方法.....
 - (3) カソード触媒材料
 - (4) 電解質膜材料.....
 - (5) 他の材料・部材
- 2.6.5 評価・解析技術.....
 - (1) 材料・プロセス探索加速のための DX 技術
 - (2) 現象・機構解明（高度解析）
 - (3) 現象・機構解明（計算科学）
 - (4) ロードマップ目標に即した MEA 評価手法の整備
- 2.6.6 人材育成

主な変更箇所を色付けして表示

目標物性の試算

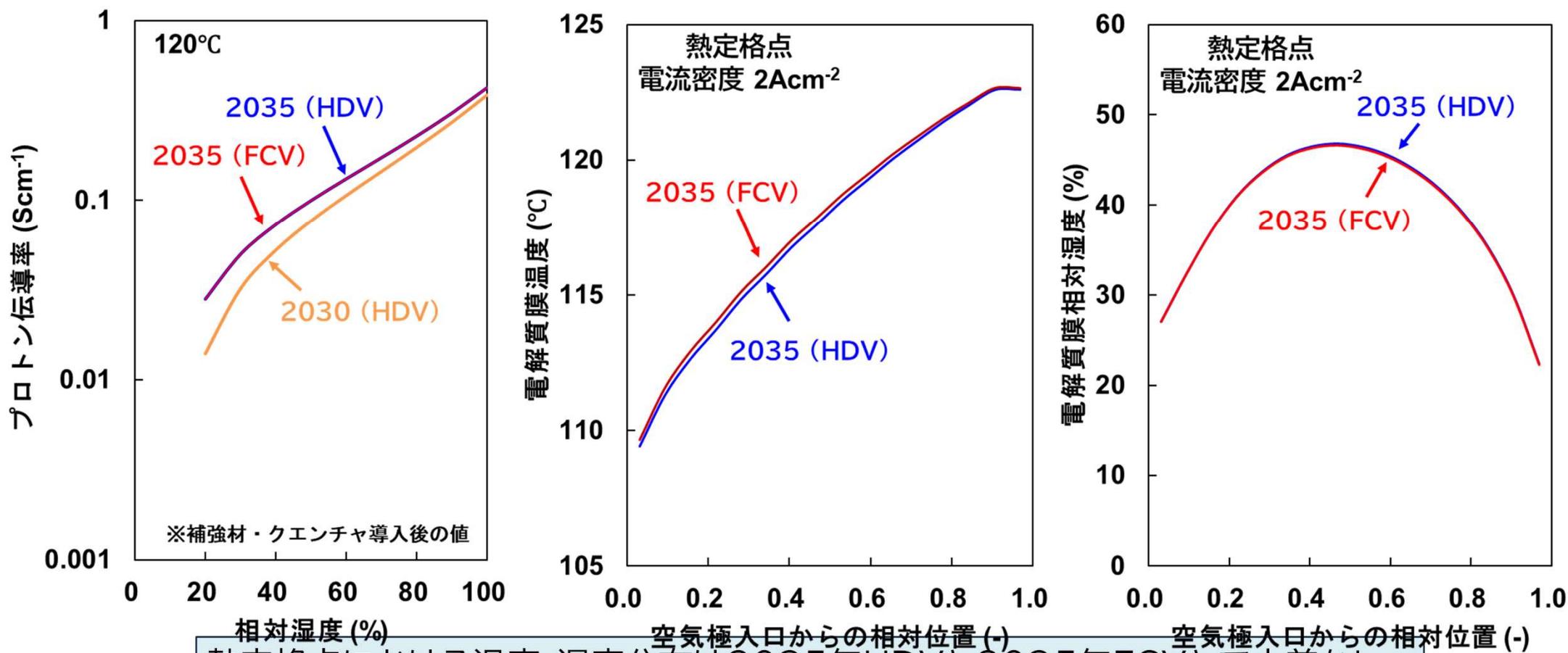
熱定格点 (120°C運転条件)	
電極面積 cm ²	283
動作点 (初期) A/cm ²	1.8
H ₂ St.	1.25
Air St.	1.30
※アノード循環あり	



材料物性にとって最も過酷な運転条件は、2035年HDVの想定と同じく、冷媒出口温度120°C, 空気極入口280kPa, 12RH(%).Pt目付は0.1 mgcm⁻².

2035HDVと同じ材料物性で、2035年にFCVに求められるシステム目標を達成可能.

電解質プロトン伝導率および温度・湿度分布の試算結果



熱定格点における温度・湿度分布は2035年HDVと2035年FCVとで大差なし。
 電解質最高温度は122°C、湿度は20-50%RH程度と試算。

材料物性目標

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	HDV: 0.18 FCV: 0.10	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	HDV: 1088^a FCV: 2273^a	9968
	BOL 酸素拡散抵抗 (sm ⁻¹) [界面抵抗成分]	9.1 [×1]	10 [×1]	HDV: 10 FCV: 13 [界面物性×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

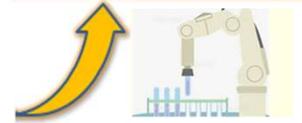
a. HDV耐久性50000時間相当, FCV耐久性10000時間相当, b. 電解質膜プロトン伝導率は補強材・クエンチャ導入後の値, c. 流路・GDL込みで達成する目標値, d. 並行流路での測定結果, e. 120°C12%RH

2035の材料目標を提案 (HDV目標を達成できればFCV目標を満たす見込み)

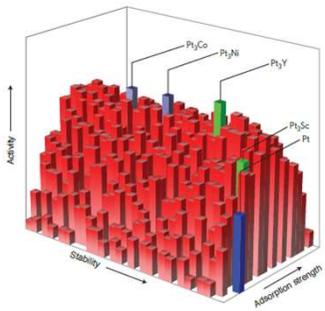
2035年頃に向けた材料開発：電極触媒

	現状の技術開発項目 (@ロードマップ)	2035年頃に向けた技術開発項目 (@ロードマップ)
電極触媒	<ul style="list-style-type: none"> 高温作動 <120°C 触媒活性 1740A/g (80°C,100%RH) 貴金属目付 0.2 mg/cm²(空気極) 0.04 mg/cm²(水素極) 高耐久化技術開発 高機能アノード 超高耐久・高機能担体 (@広温湿度対応) 	<ul style="list-style-type: none"> 高温作動 <125°C 触媒活性 4630A/g (80°C,100%RH) 貴金属目付 0.1 mg/cm²(FCV・空気極) 0.178 mg/cm²(HDV・空気極) 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

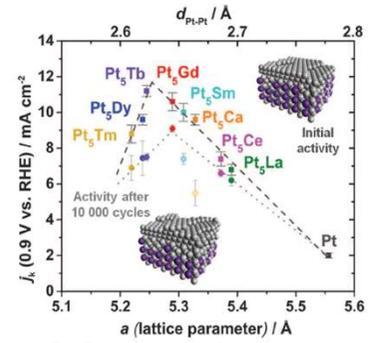
自動(自律)機、DX/MI積極活用
材料探索の加速
プロセス検討効率化



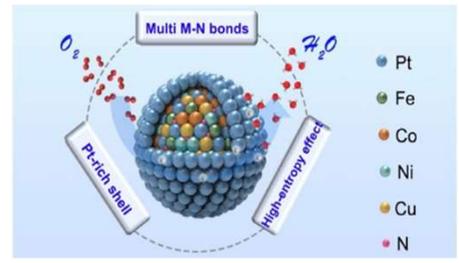
元素選択



M. Arentz et al. Nature Chem. 1 (2009) 518.

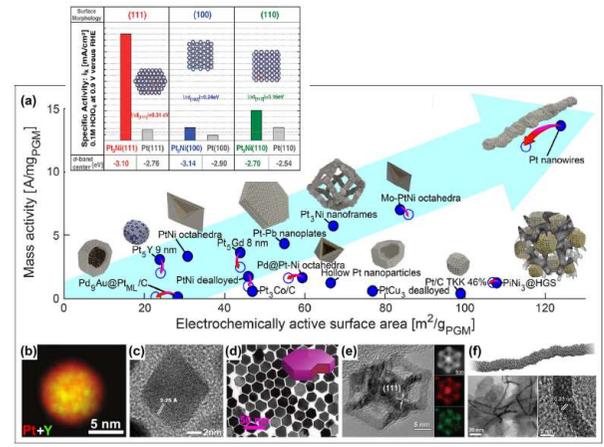


P. Strasser et al. Nature Chem. 2 (2010) 454.



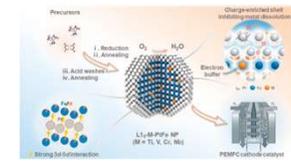
X. Zhao et al. J. Am. Chem. Soc. 146 (2024), 3010

形態制御

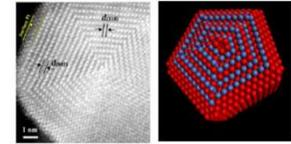


M. Escudero-Escribano et al. Curr. Opin. Electrochem.,8,(2018)135.

元素配列 (結晶面 & 規則性)

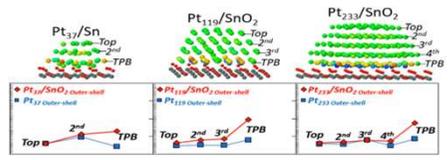


X. Liu et al. J. Am. Chem. Soc. 146,(2024) 2033.



X.Zhao et al. ACS Catal. 10, (2020) 10637

粒子径 <3nm

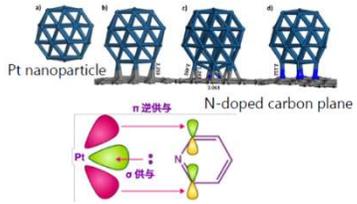


D.S.R.Rocabado et al.SN Appl. Sci. (2019) 1485

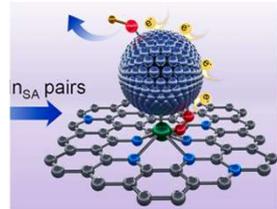
Pt合金系ナノ粒子
有望な元素選択及び規則配列技術の進展
高活性結晶面を利用した形態制御の積極活用

各アイテム融合による極限触媒の性能検証と量産化

金属-担体間電子的相互作用(SMSI/EMSI)



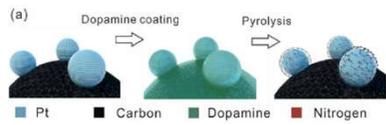
J. Ma, et al. J. Mater. Chem. A, 3 (2015) 11891



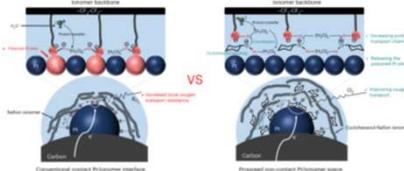
Y. Zeng et al. J. Am. Chem. Soc. 145 (2023) 17643.

修飾効果

1) 吸着/被覆による特異吸着抑制

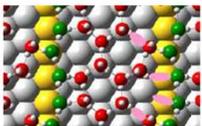


Y. Gao et al. ACS Appl. Mater. Interfaces, 15 (2023) 30240.



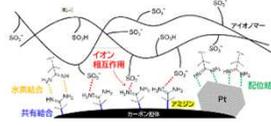
F. Chen et al. Nat. Catal. 6 (2023) 392.

2) 触媒電子状態制御 & 水吸着構造無秩序化



R. Jinnouchi et al. J. Electroanal. Chem. 716, (2013) 31.

3) 触媒電子状態制御 & 特異吸着抑制



K. Matsutori et al. Electrochem. Aci. Adv. 1 (2021) e2100014.

カーボン 連通孔

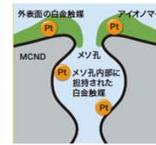
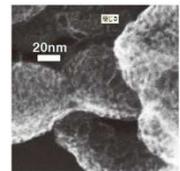
高温処理したクノール(MH-18)



CNovel



<https://www.toyotanso.co.jp/Products/cnovel/>

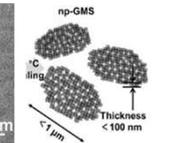
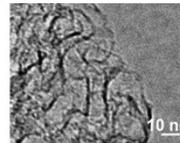


MCND

日鉄ケミカル&マテリアル

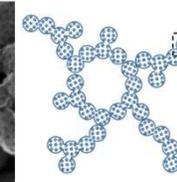
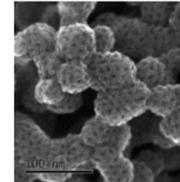
<https://www.nscm.nipponsteel.com/mcnd/index.html>

カーボン エッジ削減&多孔化&結晶性



GMS

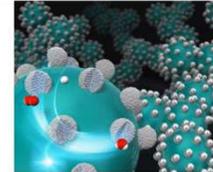
Electrochim. Acta 484 (2024) 144034
電気化学 92 (2024) 21



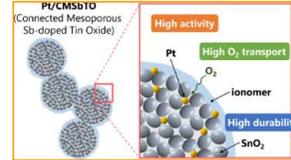
MPC

<https://www.nedo.go.jp/content/100980707.pdf>

多孔性セラ担

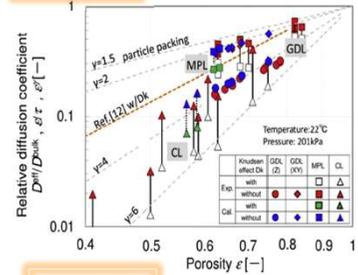


K. Kakinuma et al. ACS Appl. Mater. Interfaces 11 (2019) 34957



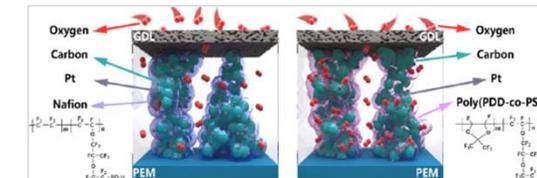
M. Inaba et al. ACS Appl. Mater. Interfaces 16 (2024) 10295

多孔性



G. Inoue et al. J. Power Sources 327 (2016) 1

HOPI



S. Fang et al. ACS Appl. Energy Mater., 6 (2023) 3590.

電子相互作用・修飾効果とPt合金とのシナジー作用
高度解析による各作用・効果のメカニズム解明
担体微細構造・結晶構造の高度制御/追加機能付与(含・耐久)
担体多孔性改善・HOPIによるガス輸送特性向上

原稿原理極限触媒の開発・量産化

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			

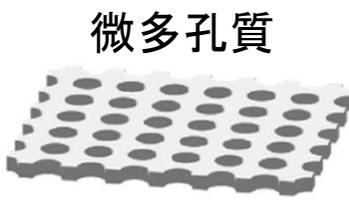
電解質膜のH⁺伝導率はクエンチ剤, 補強材込みの状態達成しなければならない

電解質膜材料：フッ素系高分子, 炭化水素系高分子

膜厚：5μm

FCスタック耐久時間：50,000 [h]

補強層
(機械劣化)



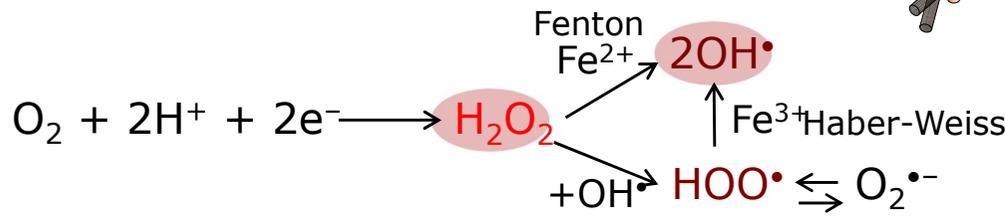
- (1) 有効面積の減少を補う
- (2) 電解質ポリマーとの親和性
- (3) 電極との接合性 etc.



ナノファイバー

- (1) 電解質ポリマーとの親和性
- (2) 電極との接合性 etc.

クエンチ剤
(化学劣化)



電解質膜内で起きるラジカル反応

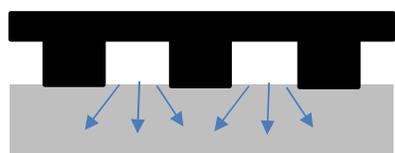
- (1) 膜内の流動性を抑制
- (2) 伝導度の低下を抑制
- (3) 強酸下状態での安定性 etc.

電解質膜の薄膜化 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た電解質薄膜をRoll to Rollで作製

DX、自動自律機を活用した電解質膜開発の加速

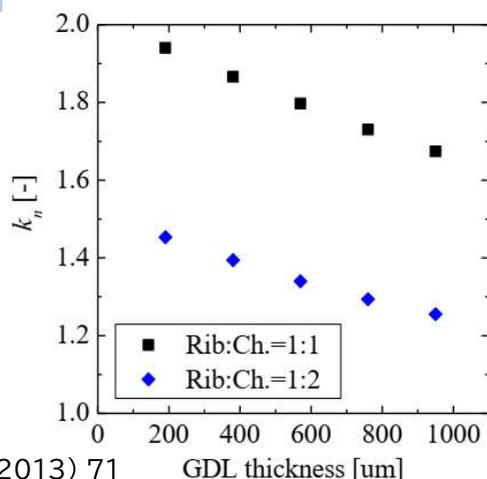
① 流路設計の必要性



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

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

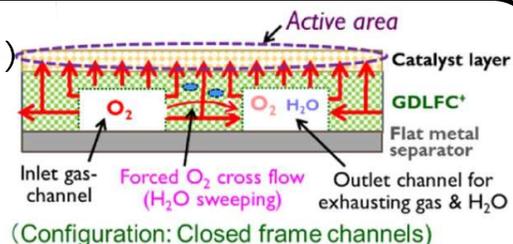
金子ら日本機械学会論文集B 79(797) (2013) 71



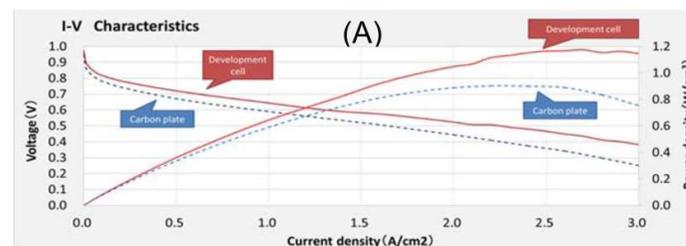
② 新たなGDL構造

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)



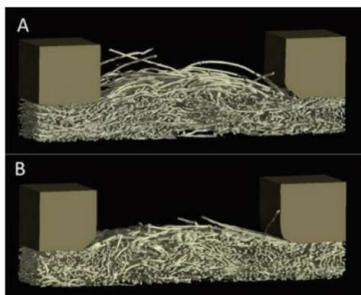
電子伝導性
Pt利用率
の向上にも寄与

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



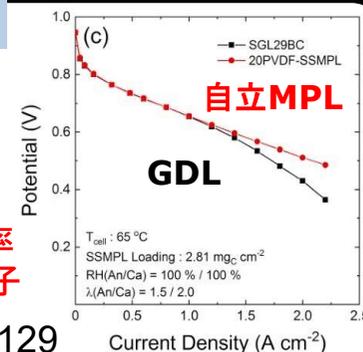
④ GDLフリー、多孔構造の工夫

- 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

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

厚さ、空隙率
幾何形状因子

J. Power Sources, 506 (2021), 230129

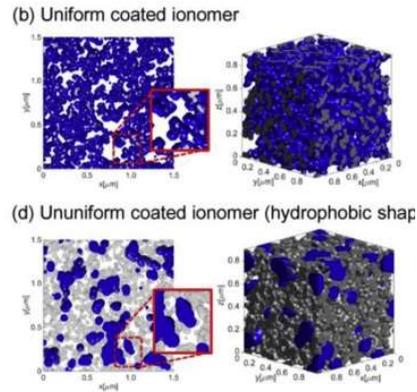


GDL単体としての酸素輸送抵抗はほぼ目標達成。流路構造との組み合わせを考慮し、抵抗を低減する必要

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



J.Power Sources 327 (2016)1-10

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



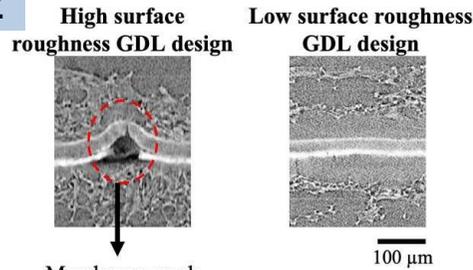
- 各工程の現象理解
- PI等, データ駆動によるプロセス最適化

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

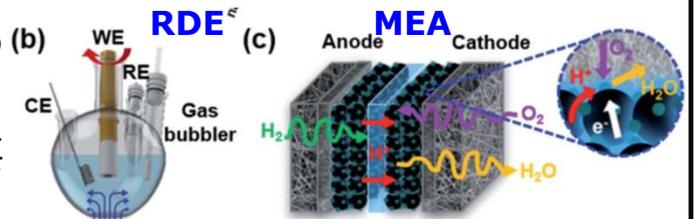


J.Power Sources 512 (2021)230446

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

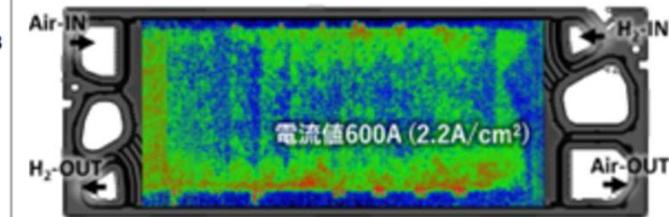
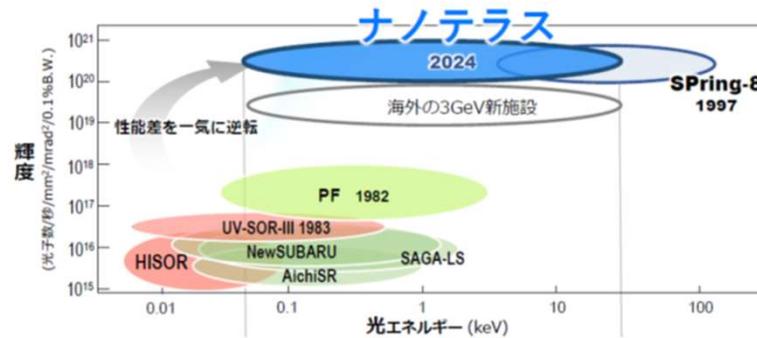
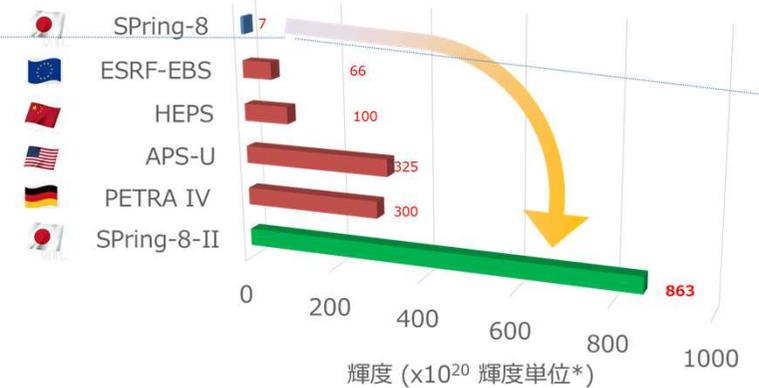
マルチモーダル解析やオペランド解析等の各種計測技術の高度化
シミュレーションによる現象解明と最適設計



Chem.Sci.,13 (2022) 6782

触媒層内の酸素輸送抵抗の低減, 作製プロセスの高度化, 必要特性の検証と最適化, 内部現象解明が必要

- ◆ SPring-8-IIへのアップグレードが決定し、NanoTerasu稼働するなど、日本の量子ビーム研究施設の能力が增强されている。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。
- ◆ MEIによるDX化と施設のポテンシャルを最大化する計測・解析手法の開発により、課題解決型の解析を行える環境を整備し、35年/40年課題解決に貢献することで日本の競争力を強化



出展: <https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5.101558.html>



「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

評価・解析技術

◆ 35年課題に設定されているプロセス解析やシール材料・セパレータ材料の解析にも活用できるように進める

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°C, 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	<ul style="list-style-type: none"> ・高温耐久触媒(120°C) →触媒表面における水可視化 →劣化要因の体系的解析 →120°C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 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温耐久電解質膜 120°C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 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温化 ・薄GDL化 ・触媒層構造最適化 ・ガス(水蒸気)の解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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°C, 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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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—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 	<ul style="list-style-type: none"> ・理想的触媒層の構造 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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°C, 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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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°C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 →オペラント計測+DX技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・革新材料に対応する触媒層の最適化 	<ul style="list-style-type: none"> ・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		<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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) 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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ト計測を含むPI 	<ul style="list-style-type: none"> ・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

加速耐久評価条件(AST)

用途別FC運転温度頻度分布

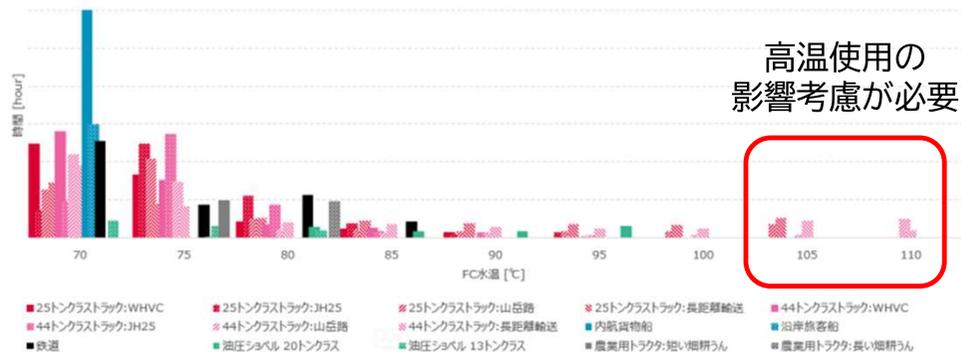
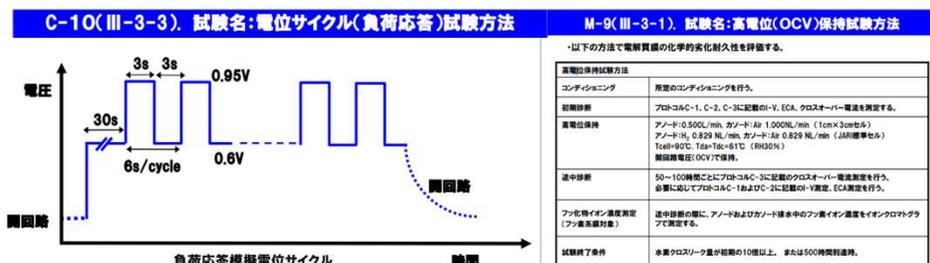


図 2.2.3-4 FC 水温の時間分布

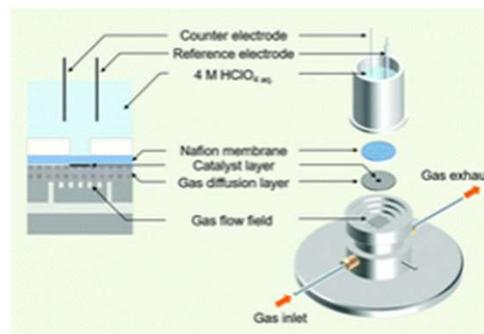
FCV・HDV用燃料電池技術開発ロードマップ(解説書)(2024年3月)



【2023年版公開】NEDO PEFCセル評価解析プロトコル

高温運転の影響を考慮したASTが必要

電極性能評価手法



M. Inaba et al. Energy Environ. Sci., 2018,11, 988

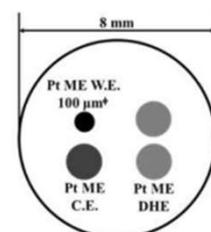
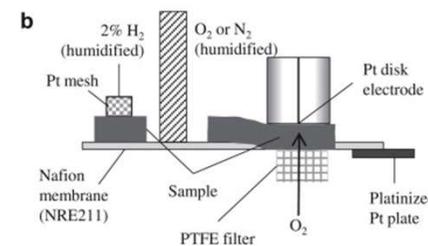
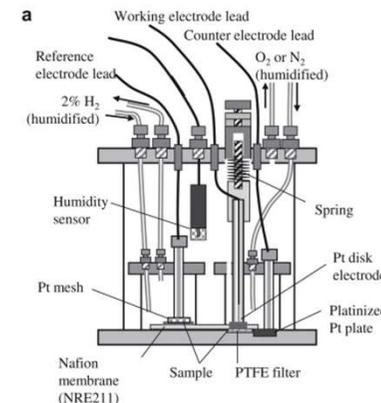


Fig. 2. Top view of glass rod.

K. Ino et al. ECS Meet. Abst. MA2014-02 (2014) 1165 T. Suzuki et al. J. Power Sources 222 (2013) 379

燃料電池ベンチが無くても、電極材料評価可能な手法
燃料電池材料研究への参入障壁低減

ロードマップの高温運転を考慮した性能・耐久(AST)の評価条件や
燃料電池ベンチに頼らない電極材料評価手法の構築が必要

- 2035年頃のFCV／HDV目標を踏まえ、2Dシミュレーションを用いて材料物性目標を試算・提案
⇒ FCV／HDVの違いは白金担持量のみとし、目指すゴールを一本化
- 2035年頃に向けた材料開発課題の検討を中心に、材料の研究開発の加速にむけたDX活用の議論、材料開発・解析技術開発ニーズの落とし込み、などについてRM本紙・解説書に反映