

2025年12月19日(金)

東北大大学災害科学国際研究棟1F多目的ホール

## 6. 技術議論①

評価解析プラットフォーム材料解析グループの取り組みについて

技術研究組合FC-Cubic

今井 英人

- ◆ 材料解析グループの位置けと役割
- ◆ NEDO事業における活動概要
- ◆ 高度解析技術の開発状況
- ◆ NEDO事業におけるNanoTerasu活用の取り組み

水素利用拡大に向けた共通基盤強化のための研究開発事業

第17回FC-Cubic オープンシンポジウム NEDO後藤様をもとにFC-Cubicで作成

## 燃料電池・水電解評価解析プラットフォーム

### PEFC評価解析プラットフォーム

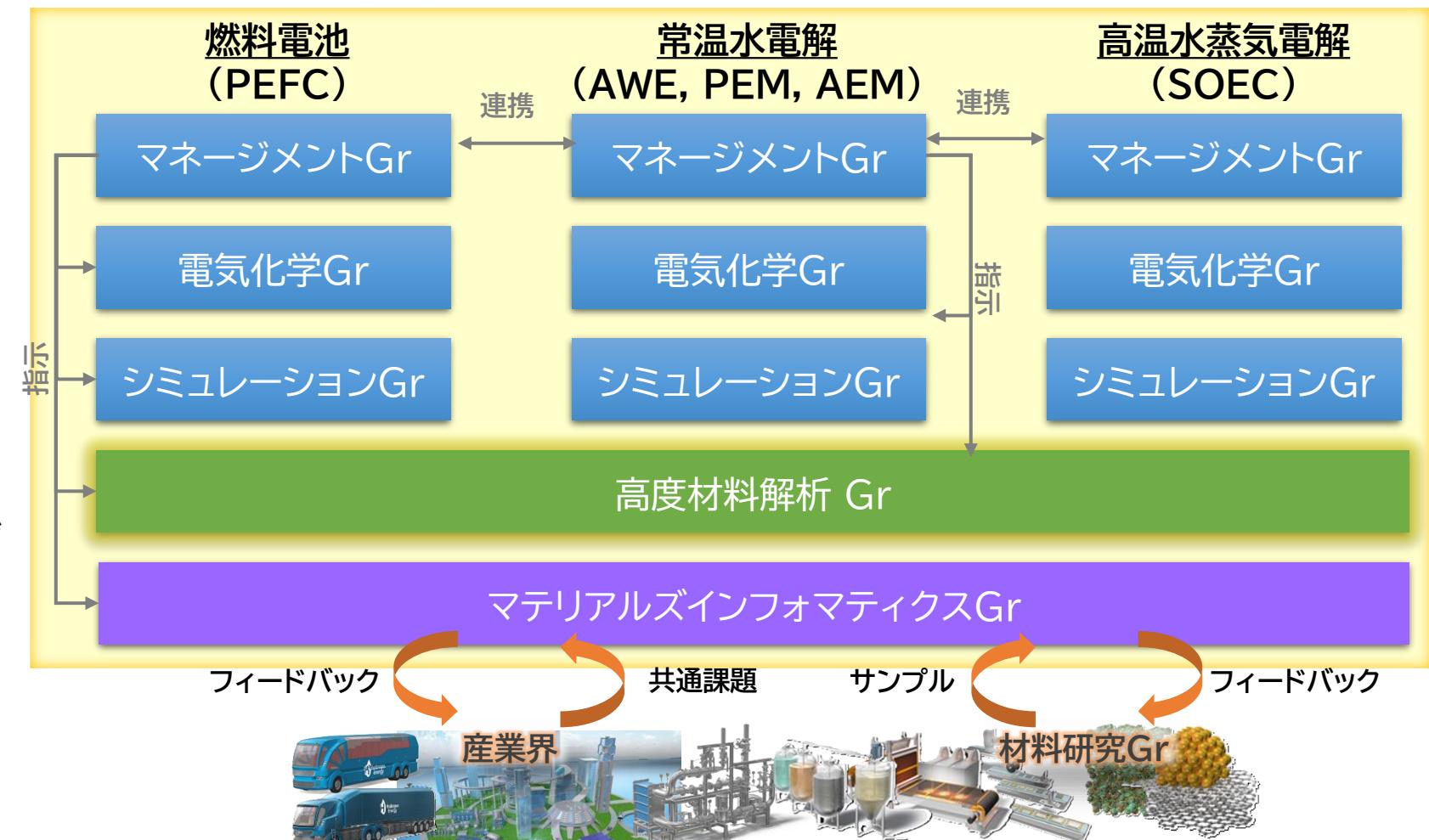
- 技術研究組合FC-Cubic
- みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社
- 他7機関

### 常温水電解評価解析プラットフォーム

- 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- 国立大学法人横浜国立大学
- 技術研究組合FC-Cubic
- みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社
- 他7機関

### 高温水蒸気電解評価解析プラットフォーム

- 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- 一般財団法人電力中央研究所
- 国立大学法人東北大学
- 他3機関



第17回FC-Cubic オープンシンポジウム NEDO後藤様をもとにFC-Cubicで作成

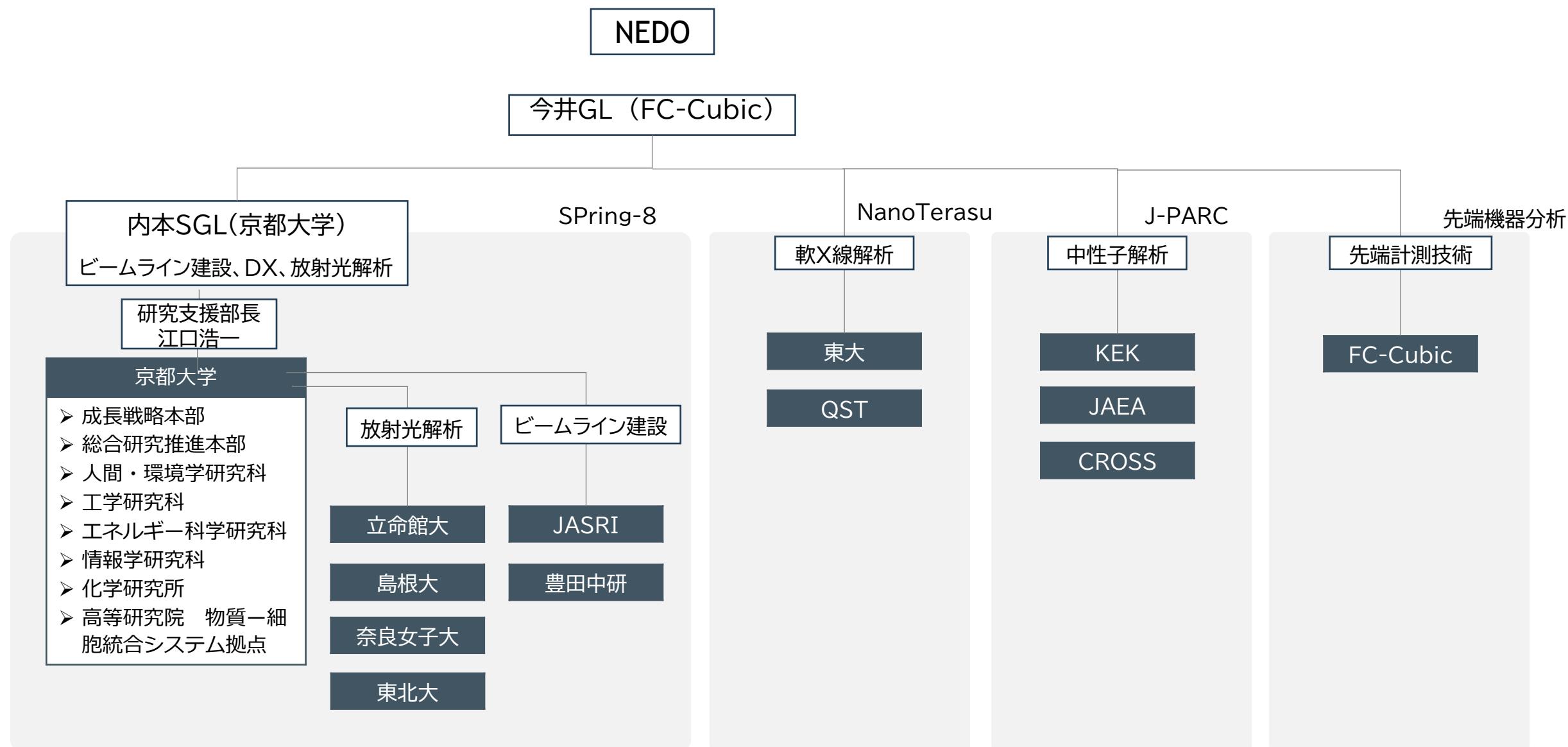
- ◆ 新素材の開発において世界最先端の量子ビーム施設を活用しつつ、「測定・解析」、「材料設計」、「合成・製造」の各工程において、AIやロボット自動制御といったDX技術を導入することで、研究開発の高速化を目指す。
- ◆ さらに、合成・製造プロセスの成果等を活用し、新たな生産技術の開発にもつなげる。



## 【研究開発の目標】

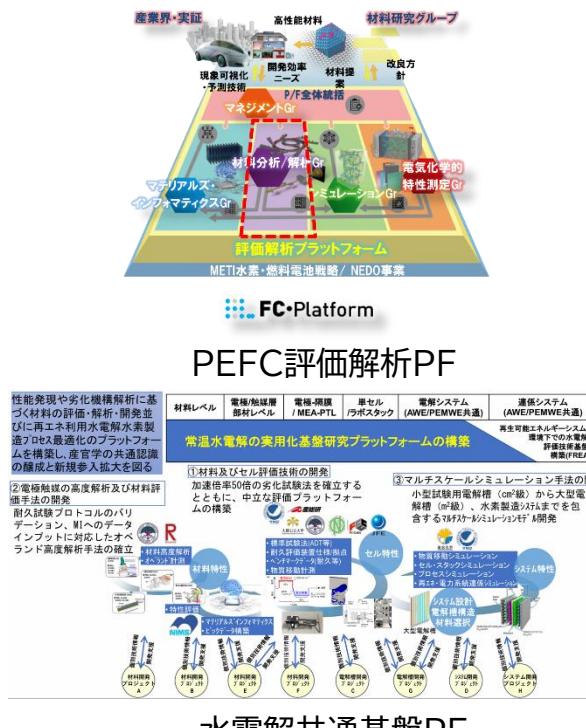
- ・燃料電池および水電解技術の2035年開発目標の実現に向けて、**材料分析・解析の共通基盤プラットフォームを構築し**、燃料電池や水電解における複雑な現象の理解を深化させ、材料およびシステムの飛躍的性能向上に係る研究開発に貢献する。
- ・前事業で構築したPEFC評価解析プラットフォームにおける材料分析・解析グループの仕組みやノウハウ、高度解析技術をベースに、高度な現象解析のためのオペランド計測の強化、および、解析高速化のためのDX技術による解析技術の高度化を進める。





## ①全体概要:材料解析支援

- ◆ 世界最高レベルの解析技術を提供し、革新的な材料・プロセス開発に貢献する
- ◆ SPring-8、NanoTerasu、J-PARCの設置運営機関が直接参画することにより、材料研究者の原理解明・検証ニーズに対して、多様な解析技術を提供し、材料開発に有効な情報をフィードバックする



前事業で蓄積した  
ノウハウ × オペランド計測の高度化  
DX技術導入



## ◆ 前事業における一般材料解析ニーズに対応するため、

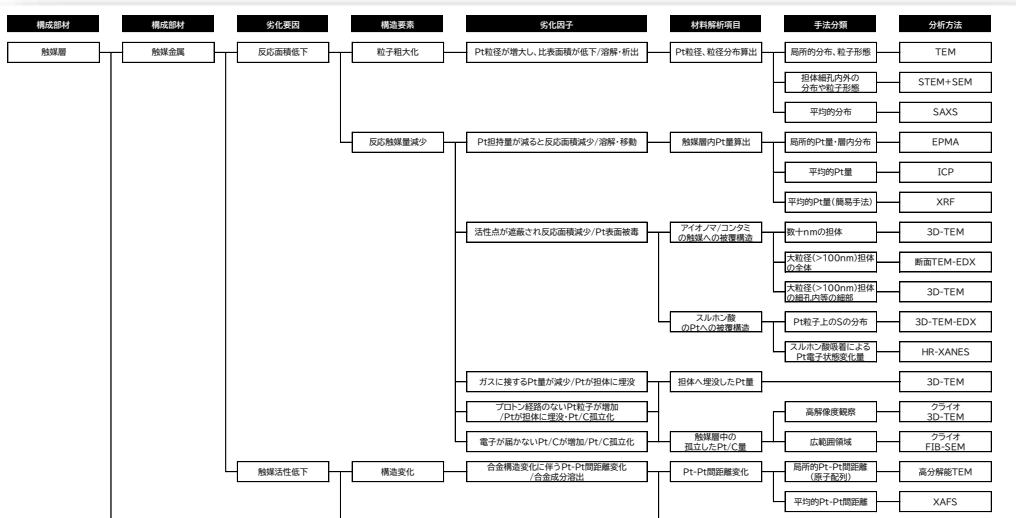
- ①プロトコルとして整理
- ②3D計測技術の強化
- ③微量元素検出の強化

を進めている。

### ①プロトコルとして整理

前事業で蓄積した解析技術やノウハウを用いて、電気化学特性と構造要因の対応関係を検証するプロトコルに整理  
前処理、測定、解析方法の標準化も反映し、再現性と比較性を担保したプロトコルとして整備

#### PEFC性能要因解析プロトコル



#### 材料分析の標準化された 測定・解析ノウハウ

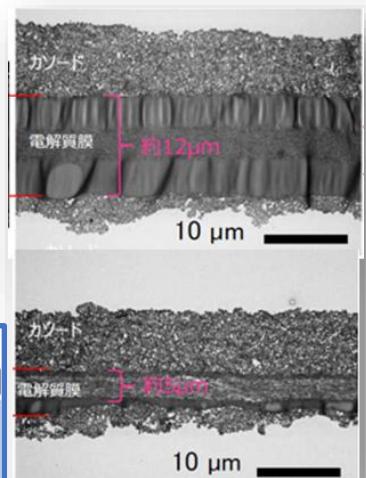
形態	部位・部材	そのまま	粉末分散法	埋め込み機械研磨法	イオン研磨	クライオイオン研磨法	ミクロトーム法
単体	触媒	◎ (TEM用)					
	電解質膜	◎ (表面)		◎		○ (TEM用)	
	補強材入り電解質膜	△ (裏面)	○			○	

分析項目	分析法	工程	注意点
触媒金属粒径	TEM	前処理	FIB、ミクロトームなどで100nm以下の厚さにする
		分析	粒子の重なりの少ない領域マスクで撮影する
		解析	画像処理で粒度分布算出
膜厚、クラック	SEM	前処理	断面作成時のマスクを範囲につなげる
		分析	断面像を撮影する
		解析	標準化前と標準化後の比較

#### 標準化

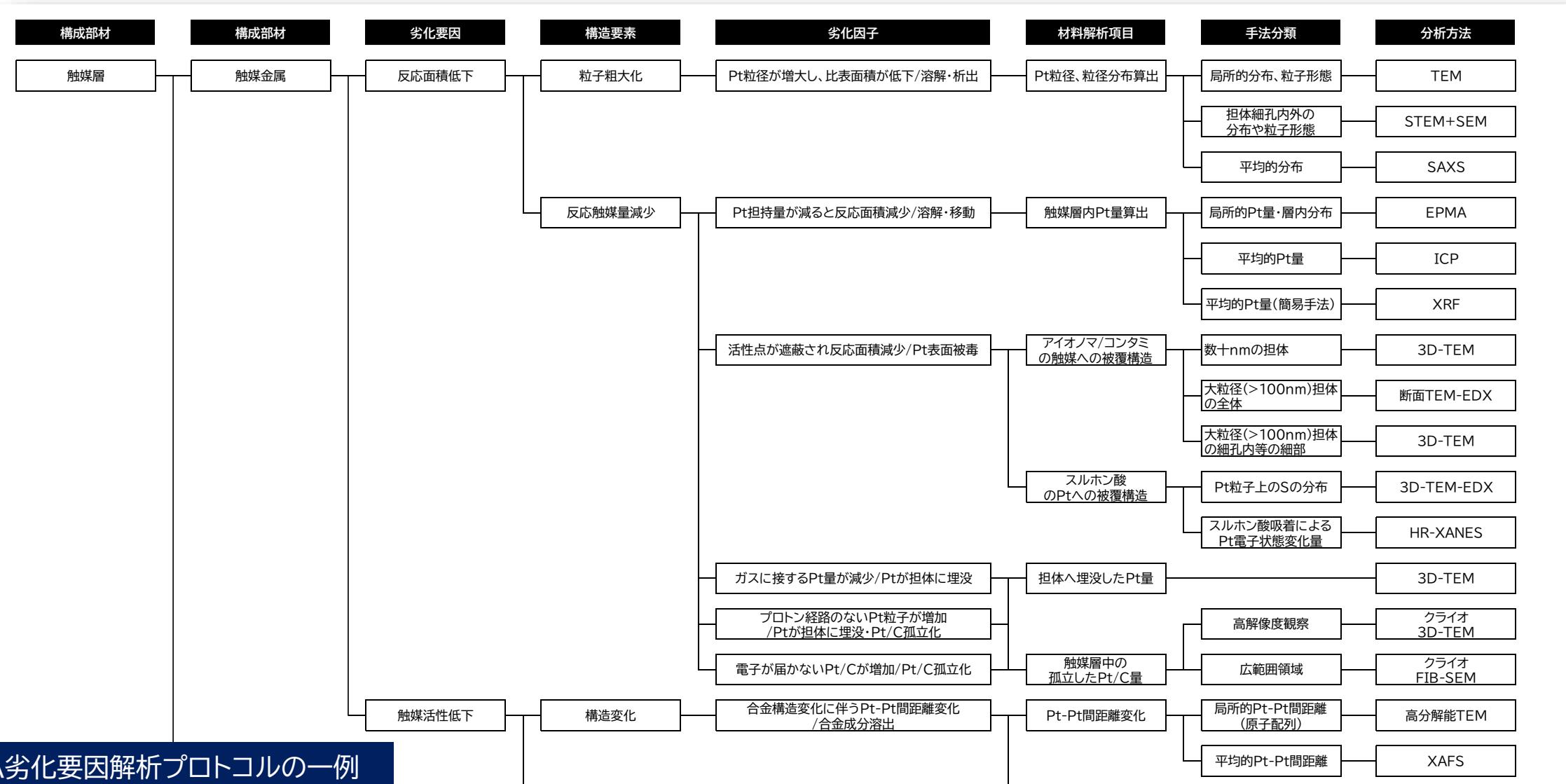
	粒径(nm)		粒径(nm)
A社	3.7±1.4	A社	5.1±2.7
B社	4.7±2.3	B社	5.0±2.5

#### 解析事例



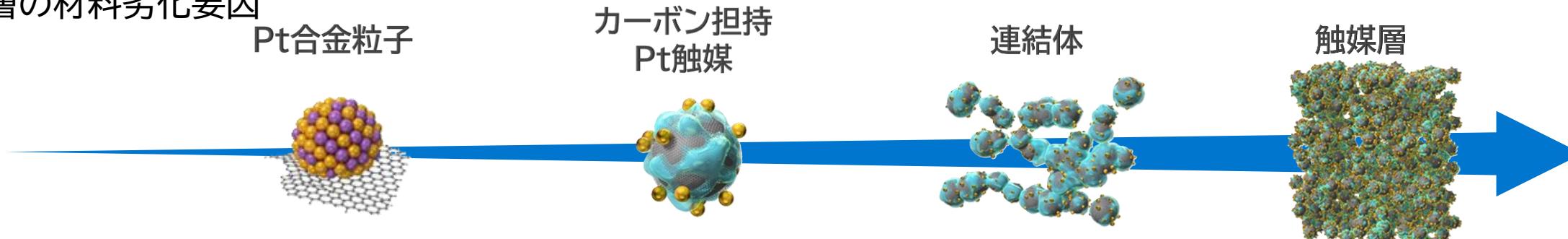
## ①プロトコルとして整理: PEFC性能要因解析プロトコル

- 燃料電池の性能要因解析に対応する前事業で構築した高度解析を含む材料解析手法を整理



- 例えば、Pt/MPCカソード触媒層が負荷サイクル試験によりECSA低下、活性化(MA)、拡散、抵抗過電圧が上昇

## □ 触媒層の材料劣化要因



	Pt合金粒子	カーボン担持 Pt触媒	連結体	触媒層
ECSA低下	● 粒子粗大化 溶解・析出	● 反応触媒量減少 溶解・欠落 被毒(アイオノマ,コンタミ) 孤立化		
活性化 過電圧	● 構造変化(Pt-Pt間距離) 合金成分溶出	● 電子状態変化 被毒(アイオノマ,コンタミ)		
濃度 過電圧	ガス輸送低下	● MPC細孔パス減少 MPC細孔構造変化 (担体腐食、アイオノマ被覆) ● 担体濡れ性増加 担体構造変化 ● アイオノマガス透過性減少 アイオノマ分子構造変化	● アイオノマ被覆厚さ増加 アイオノマ被覆構造変化	● 空隙パス減少 空隙構造変化 (担体腐食、アイオノマ被覆)
抵抗 過電圧	H <sup>+</sup> 伝導低下	● Ptへのアイオノマ接触 アイオノマ被覆構造変化 ● アイオノマH <sup>+</sup> 伝導性減少 分子構造変化、金属イオン混入 ● Pt/アイオノマ界面構造変化 界面水構造	● 触媒間アイオノマ連結性 アイオノマ被覆構造変化	

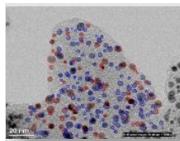
# 適用する解析手法

11/26

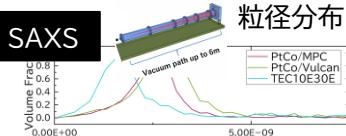
放射光標準メニューアルモード(マルチモーダル解析)

TEM 粒径分布(局所)

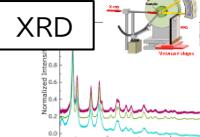
SEM+STEM MPC表面と内部の粒子を識別



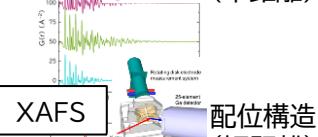
SAXS 粒径分布(平均)



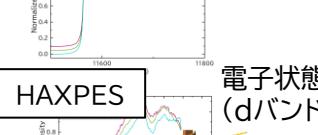
XRD 結晶構造



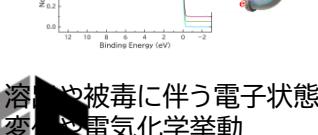
PDF 配位構造(中距離)



XAFS 配位構造(短距離)



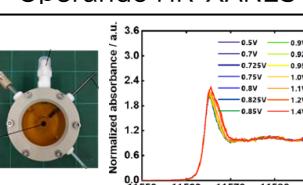
HAXPES 電子状態(dバンド中心等)



溶出や被毒に伴う電子状態変化

FC-Cub Operando AP-XPS

Operando HR-XANES



電子状態

電気化学挙動

高分解能TEM-EELS

1原子ごと元素可視化した粒子の原子配列

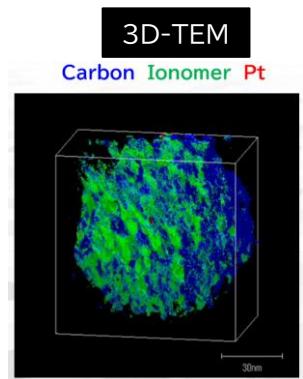
コンタミ被毒



3D-TEM

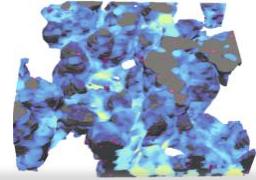
Carbon Ionomer Pt

3D-



MPC表面と内部のアイオノマ  
の分布や厚さ

被覆構造変化



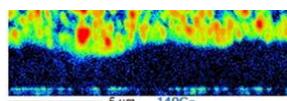
アイオノマ被覆厚さ変化

STEM-EDX



アイオノマ分布

NanoSIMS



FやSの分布(分解能50nm) — 触媒間アイオノマ連結構造

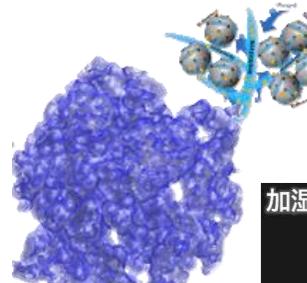
被覆構造変化



連結体

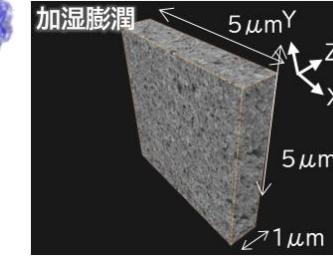
触媒層

空隙パス減少

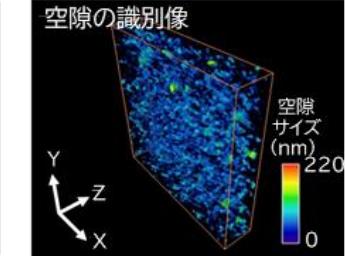


空隙構造変化

Cryo測定により膨潤アイオノマ時の空隙構造

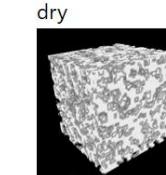


FIB-SEM

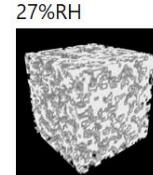


Nano-CT

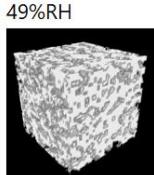
湿度制御下の空隙構造



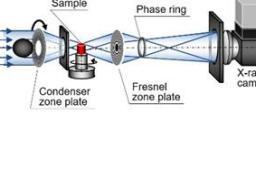
細孔率: 38%



細孔率: 36%



細孔率: 32%



dry

27%RH

49%RH

70%RH

85%RH

95%RH



100%RH

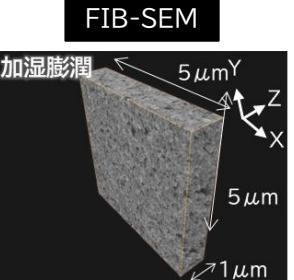
細孔率: 30%

細孔率: 26%

細孔率: 25%

細孔率: 25%

細孔率: 25%



Cryo測定により膨潤アイオノマ時の  
触媒層内の3Dアイオノマ連結性

プラズマFIBによる大面積加工  
(最大200×200×200 μm<sup>3</sup>)

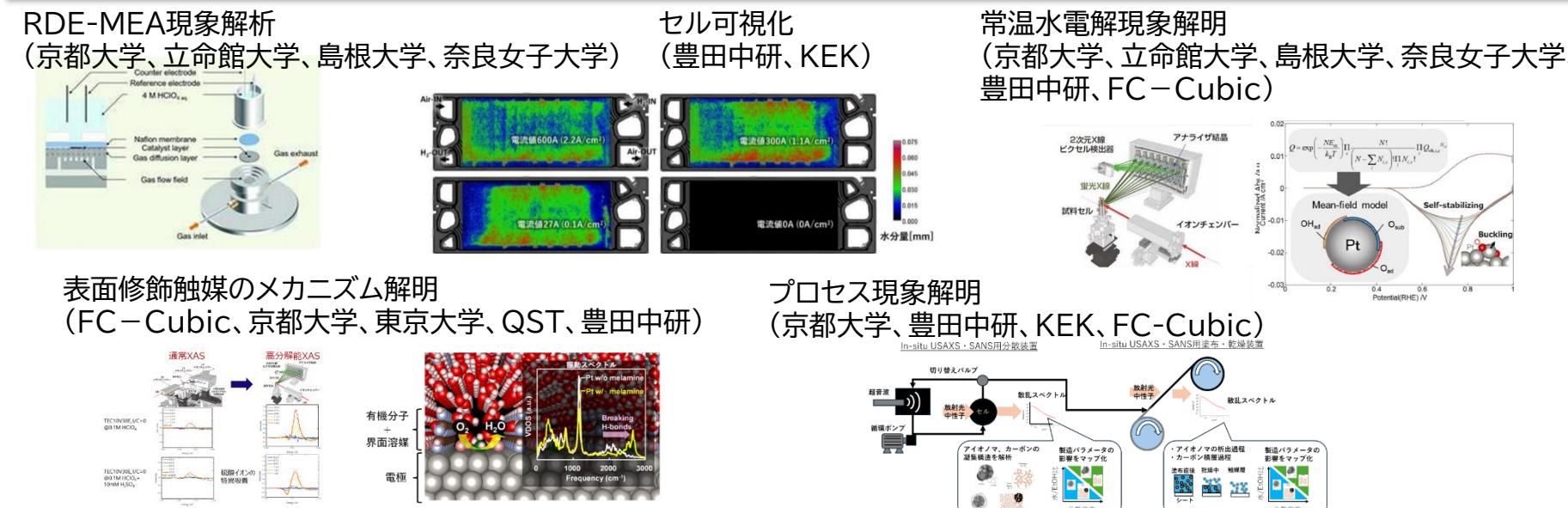
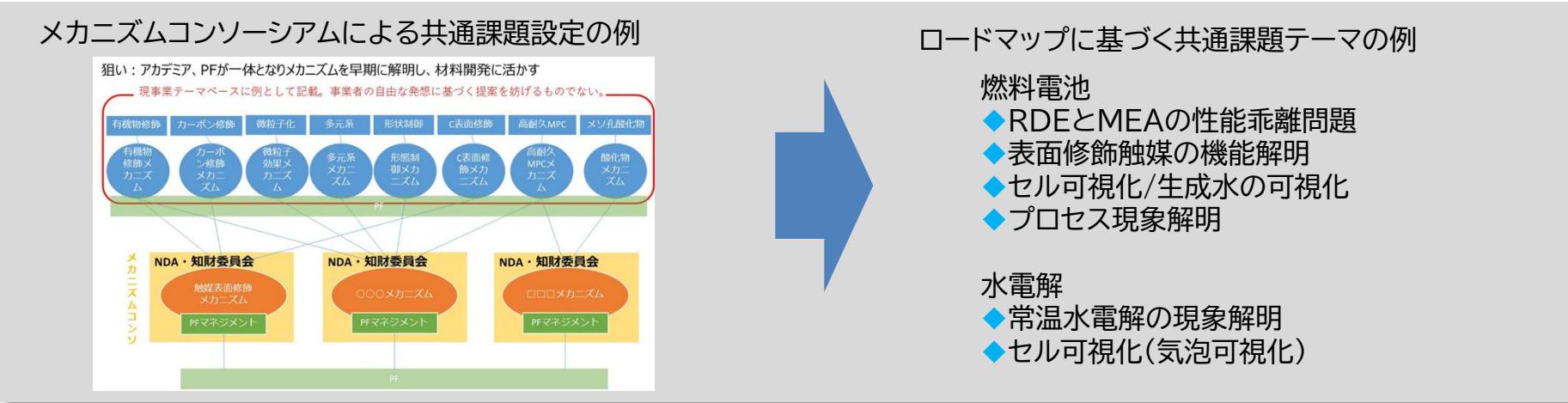
劣化要因解析手法(触媒層)

断面SEM-EPMA

2次元、簡易

## ②メカニズム解明

- ◆ 革新的材料開発やプロセス開発のボトルネックとなる共通課題を高度解析により、深く掘り下げ、課題解決の方針を提示する

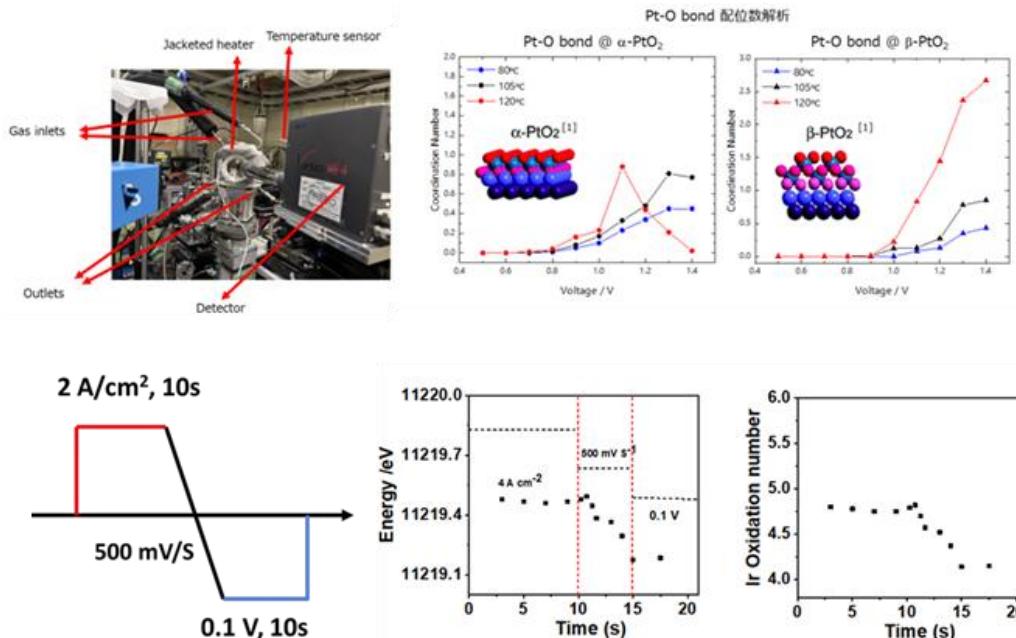


## ③プロトコル開発支援

- ◆ 加速耐久評価法を含む評価プロトコルに関連する現象解析を行い、各種プロトコル設定根拠を提示する。

### 燃料電池

120°Cの高温運転環境における燃料電池触媒  
触媒担体の加速劣化試験



### 水電解

産業界のニーズを踏まえた水電解の技術課題に対する現象解析  
加速耐久評価法を含む各種計測プロトコルの設定根拠を提示する

#### 常温水電解におけるプラットフォームとして扱うべき解析のニーズ一覧

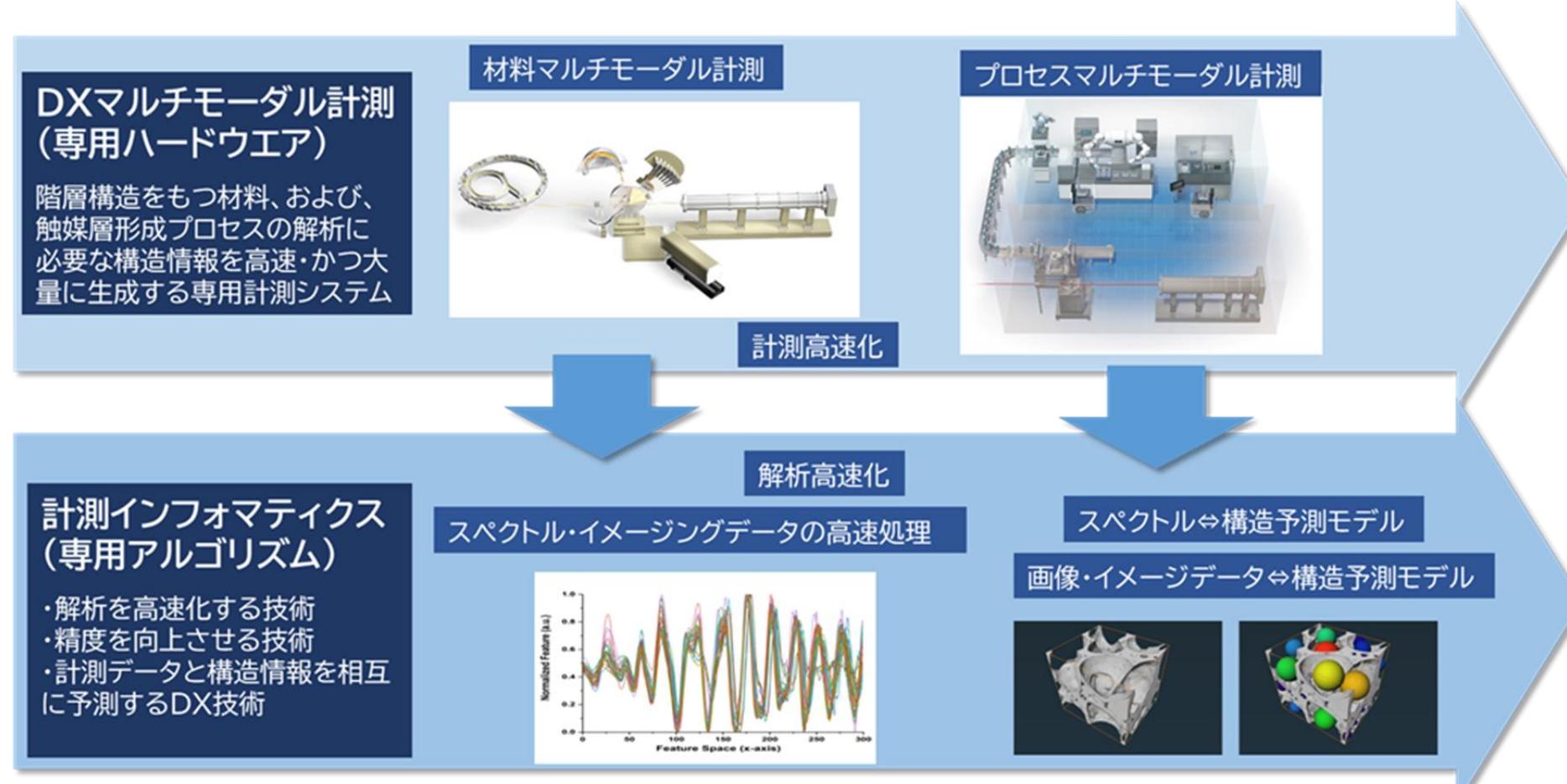
	触媒/電極/アイオノマー	電解質膜/隔膜	PTL/GDL	電解スタック・システム	産業界ニーズ
アルカリ水電解	<b>Ni触媒の劣化低減</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>入力別劣化形態、要因分析</li> <li>劣化条件の分類整理</li> <li>電極剥離メカニズム解明</li> <li>被毒種(Fe等)の劣化影響把握</li> </ul> <b>代替新規触媒の特性把握</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>入力別劣化形態、要因分析</li> <li>劣化条件の分類整理</li> </ul>	<b>クロスリーク低減</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>リーキ要因の観察、分析</li> <li>高圧運転と薄膜化のバランス</li> </ul> <b>高温運転時の耐耐性</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>高圧運転条件の探索</li> </ul>	<b>気泡発生の低減</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>気泡発生個所、要因の把握</li> <li>気泡の影響低減の検討</li> </ul> <b>低廉素材の可能性検討</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>表面処理、修飾条件検討</li> </ul>	<b>起動・停止による劣化対応</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>起動停止時の劣化要因解析</li> <li>システム制御による劣化低減</li> </ul> <b>変動応答性に対する耐性向上</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>応答時間、変動率の影響解析</li> <li>変動に対する劣化要因解析</li> <li>スライク方式による解析（マニホールド方式による違い）</li> </ul> <b>高圧運転対応</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>水分布、気泡分布と挙動</li> <li>電極近傍の機械強度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>反応現象把握</li> <li>標準的評価プロトコルの策定</li> <li>加速耐久プロトコルの策定</li> <li>低廉化のための方針策定</li> <li>標準セルの策定</li> </ul>
固体高分子水電解	<b>IrO<sub>x</sub>触媒量削減</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>電解反応中の触媒状態</li> <li>IrO<sub>x</sub>析出メカニズム解明</li> <li>劣化形態の把握、要因分析</li> <li>性能・耐久性向上に向けた触媒構成</li> </ul> <b>性能・耐久性向上に向けた触媒構成</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>電解反応中の触媒表面構造、電子状態、利用率、ラジカル制御</li> <li>気泡発生抑制剤</li> <li>不純物の影響と劣化メカニズム</li> </ul> <b>触媒担体の影響分析</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>触媒の反応観察、影響把握</li> </ul> <b>PFAS対応</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>炭化水素系アイオノマー物性評価</li> <li>現象把握と課題の整理</li> <li>再結合触媒</li> </ul>	<b>耐久性向上に向けた要因分析</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ラジカル耐性向上、高温高圧、薄膜化のための要因解析</li> <li>高電流密度化影響要因把握</li> <li>機械強度、ガス(リ)活性</li> </ul> <b>クロスリーク低減</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>薄膜化の影響と条件分析</li> <li>高圧化による影響、要因解析</li> <li>GRC導入による低減原理</li> </ul> <b>高温運転時の耐耐性向上</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>高圧運転条件の探索</li> <li>差圧運転時の劣化要因把握</li> </ul> <b>GDL内の水の挙動</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>MPLの極性と電解性能</li> <li>高圧時の構造劣化と性能低下</li> </ul>	<b>気泡発生の低減</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>気泡発生個所、要因の把握</li> <li>気泡の影響低減の検討</li> <li>気泡に排出性の向上</li> </ul> <b>PTLの耐久信頼性向上と低コスト化</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>PTL劣化 (EOL) 定義</li> <li>劣化要因分析、酸化状態解析</li> <li>貴金属コーティング量低減</li> </ul> <b>高圧運転対応</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>基材の低コスト材化検討</li> <li>MPLの極性と電解性能</li> </ul>	<b>起動・停止による劣化対応</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>起動停止時の劣化要因解析</li> <li>システム制御による劣化低減</li> </ul> <b>変動応答性に対する耐性向上</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>応答時間、変動率の影響解析</li> </ul> <b>セリ内の流れ分布の各部材への影響把握</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>劣化部位の現象把握と要因解析</li> <li>水・酸素2相系での解析</li> </ul> <b>高圧運転対応</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>水分布、気泡分布と挙動</li> <li>電極近傍の機械強度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>反応現象把握</li> <li>標準的評価プロトコルの策定</li> <li>加速耐久プロトコルの策定</li> <li>低廉化のための方針策定</li> <li>標準セルの策定</li> <li>PFAS対応</li> </ul>

加速劣化プロトコルの確立に関する課題については、燃料電池および水電解のプラットフォームマネジメントグループの指示の下で対象が選定され、電気化学計測をタスクとするグループが主体となり、本提案によるバリデーションを用いて確立に至る。

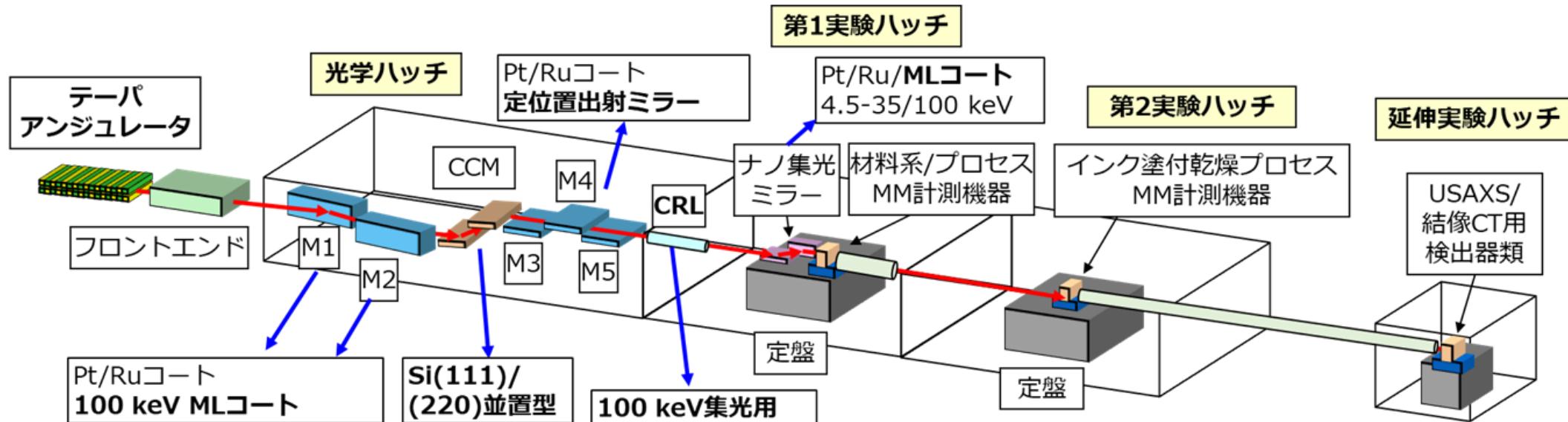
水電解においては、まだ加速試験法が完全に確立できておらず、我が国のみならず、欧州や米国においても加速試験法の開発を目的として国家プロジェクトが立ち上がっている。

## ④DXマルチモーダル計測

- ◆ 2035年目標に設定されている材料・プロセス開発においては、現在の開発の必要がある。MIやPIのような大量のデータに基づく延長線上にはない革新的な材料の開発や触媒層形成プロセスを高速に最適化すべくDX技術による開発加速が必須である。
- ◆ 材料や触媒層の階層構造を網羅的にとらえるマルチモーダル計測および解析の方法論を確立し、高速かつ大量にデータを取得する。MIやPIの予測精度の向上には、情報量が多い放射光計測データが望ましく専用ビームラインを建設する。



- ◆ NEDO燃料電池・水素技術ロードマップに記載された2035年目標に設定されている材料・プロセス開発の課題解決
- ◆ 現在の開発の延長線上にはない革新的な材料の開発や触媒層形成プロセスを対象。
- ◆ メカニズム解明のためのオペランド計測の高度化、MIやPIのような大量のデータに基づくDX技術の開発と実装



- ビームラインデザイン： BL28XU/BL36XU（高速QXAFS @ 4.5~35/4.5~46 keV）をベース
  - 100 keV ピンク/単色X線利用可能に性能仕様アップしたBL設計
- 第1実験ハッチ： DXマルチモーダル(MM)計測システム
- 第2実験ハッチ： プロセス分析用システム（インク塗付乾燥プロセス）
- 延伸ハッチ： 長カメラ距離計測用検出器設置 (USAXS、結像CT等)
- 放射光光源/光学素子等： SPring-8-II仕様

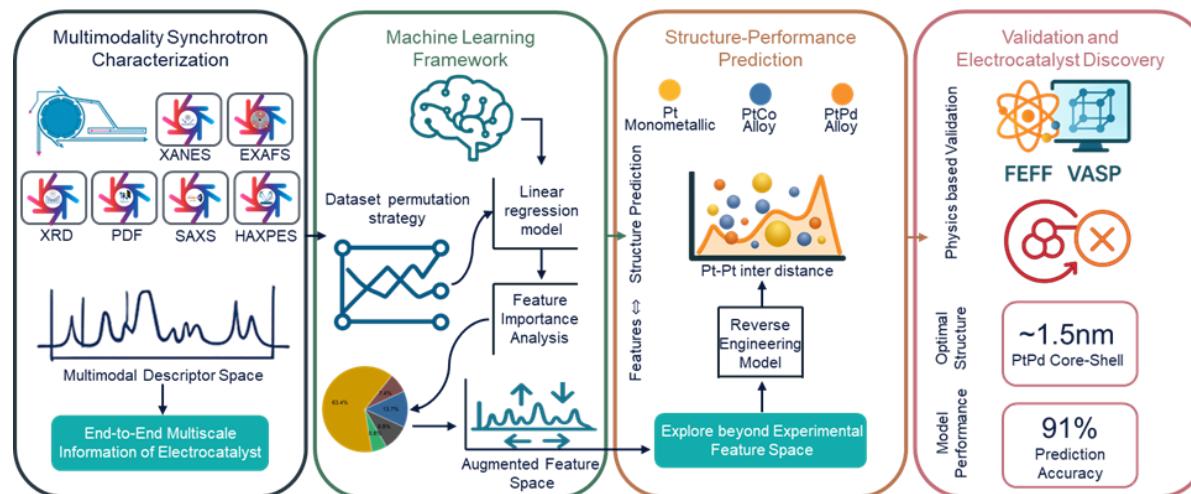
## 材料系MM解析の実証：DX-MMビームラインの基本コンセプト、根拠となる技術の開発

### ◆放射光MMスペクトル解析による触媒探索ワークフロー開発

マルチモーダル放射光計測 × 機械学習により燃料電池触媒探索を革新  
—放射光スペクトルから性能と構造を“逆予測”する世界初のワークフローを開発—

技術研究組合FC-Cubic(バリヤン アンクール主任研究員、今井英人部長)、国立大学法人京都大学(内本喜晴教授)、公益財団法人高輝度光科学研究センターの研究グループは、世界初となる固体高分子形燃料電池に用いられる触媒について、性能と構造を同時に推定し、さらに最適構造を逆予測できる「マルチモーダル放射光計測×機械学習」ワークフローを開発しました。

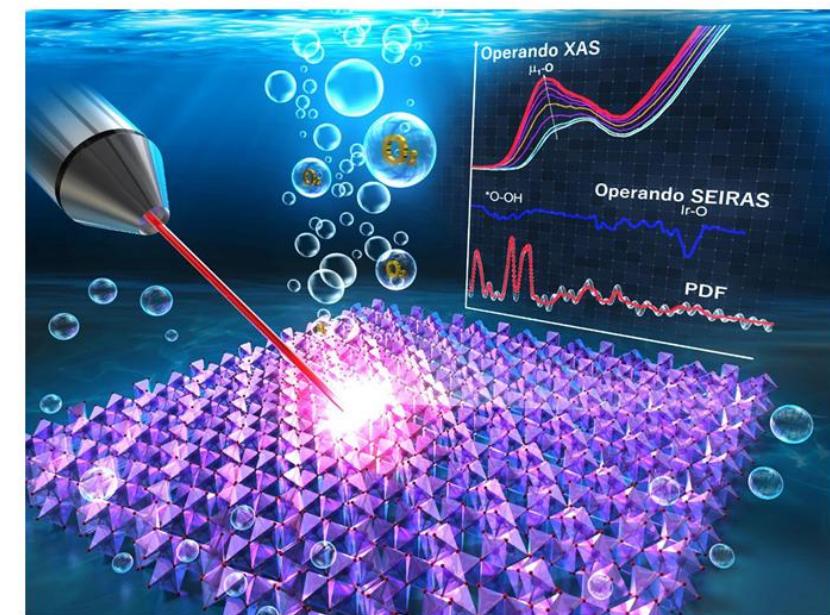
### Machine Learning-Guided Multimodal Synchrotron Analysis Workflow for Fuel Cell Electrocatalyst Discovery Data-Driven Catalyst Discovery



### ◆Operando MM解析による酸素発生反応の活性点特定

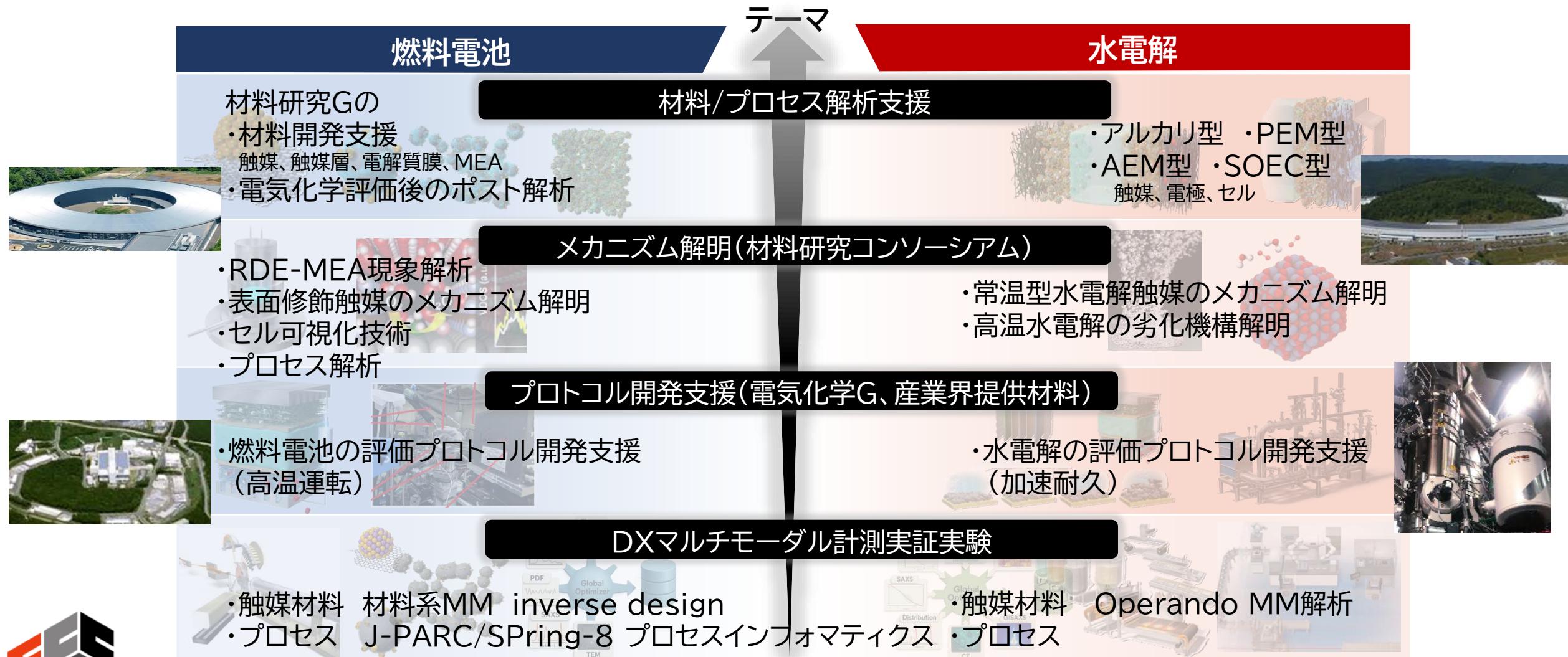
マルチモーダル解析で酸素発生反応(OER)の鍵を握る“活性点”を特定：酸化イリジウム触媒の構造が高性能の秘密を握る  
～水電解によるグリーン水素社会実現へ新たな一步～

京都大学大学院人間・環境学研究科 Neha Thakur 博士研究員、内本喜晴 同教授らの研究グループは、田中貴金属工業株式会社、技術研究組合 FC-Cubic、横浜国立大学、九州大学、奈良女子大学、島根大学、立命館大学と共に、水を電気分解して水素を製造する水電解<sup>#1</sup>の鍵となる酸素発生反応(OER)において、酸化イリジウム触媒の高い活性の起源を解明しました。



本研究の概要図。電位を印加した状態、つまり、水電解が起こっている際の酸化イリジウム表面の構造をX線によってマルチモーダルに分析する様子を表現している

◆ 燃料電池、および、水電解のマネジメントGと連携し、実施テーマを設定。



- ◆ NEDO水素・燃料電池ロードマップ：アカデミア・産業界による技術開発ロードマップ  
2040年の市場/製品イメージから2030/2035/2040年に必要とされる要素技術をブレイクダウン
- ◆ 現在技術の改良から、現在とは不連続な革新的材料・システム技術への開発へ向け、目標と課題を整理

## 6. 評価・解析技術：技術ポテンシャルマップ 材料開発目標

21/22

### ◆ 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°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	・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	・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	・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°C, 30%RH 触媒層厚さ:6μm 触媒目付:0.18 mg/cm <sup>2</sup> 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、高エンタロピー合金、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HOPAI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 →MII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°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	・MII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	・MII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の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

- ◆ 新規材料(高性能×高耐久)探索の加速、触媒層形成も含めたプロセス・生産技術における課題の解決  
→材料の性能・耐久要因を決める階層的構造パラメータの網羅的高速取得  
→プロセス・製品開発に関わる複雑・階層的現象を技術するパラメータの取得

## 6. 評価・解析技術：技術ポテンシャルマップ 材料開発目標

21/22

◆ 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	SDL/MPL MEGA	生産技術	産業界ニーズ
2025～2030年	電解質膜: 厚さ8 μm プロトン伝導率: 0.032 @120°C, 50%RH 触媒層厚さ: 8 μm 触媒目付: 0.02 比活性: 7,740 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°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	・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	・高溫化 ・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高耐久セパレーター ④シール材料	・産業界による解析PFの活用 現用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 ・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5 μm プロトン伝導率: 0.066 @120°C, 30%RH 触媒層厚さ: 5 μm 触媒目付: 0.15 ~ 0.2/cm <sup>2</sup> 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・ナノクレータ、規則合金、高エンボイド合金、高融点合金、有機触媒、C-C-Nコート、高耐久メタル触体、酸化物触体 →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	・材料開発 HC系、ホスピタリティ系ポリマ、ナノファイバ、コンポジット、高HOPAIオノマ、アニオノ膜 ・PFAS規制対応 炭化水素系電解質構造一性化 ・触媒反応メカニズム解析 →MIに応じた計測技術	・理想的触媒層の構造 ・PIによる触媒層最適化 ・工程検査 →PIに応じた計測技術、DX技術	・不純物の影響評価 ・高温での触体耐久性 ・EOLまでの触媒層劣化変化	
2035～2040年	電解質膜: 厚さ1 μm プロトン伝導率: 0.15 @55 ~125°C, 12%RH以上 触媒層厚さ: 4 μm 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(型膜) ・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 →オペランド計測+DX技術	・革新材料に対する触媒層の最適化 ・革新材料に対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技術	・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
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・物理・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/高分解能測定やマイクロ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	

①革新的材料探索  
現在の延長線上にはない技術

②現行材料改良  
120°C環境への対応  
現象解明

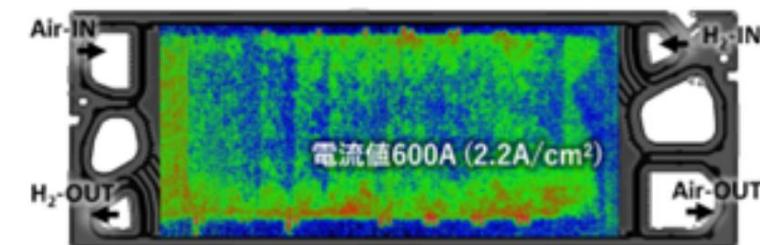
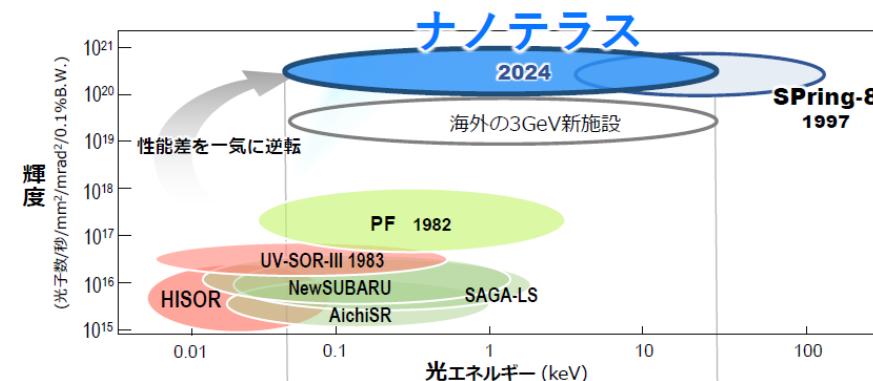
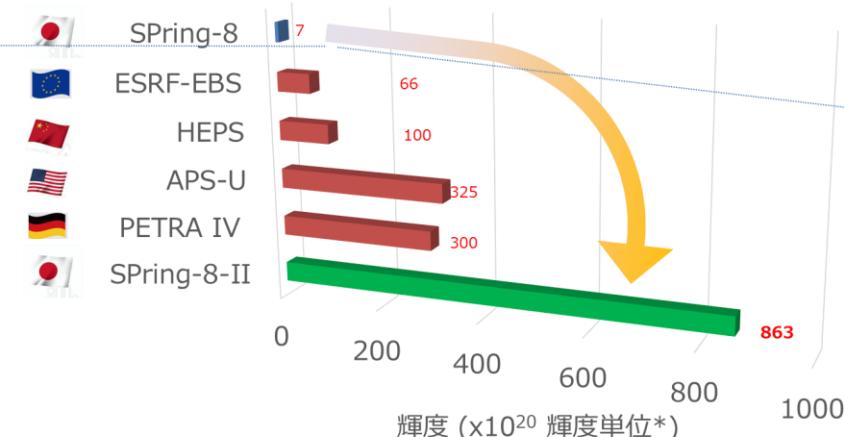
③理想的触媒層構造  
プロセスの高速化  
触媒層耐久性

④生産技術課題

# 6. 評価・解析技術：解析技術 ベンチマーク

21/26

- ◆ 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



- ◆ 世界最高性能を持つ大型解析施設の活用により、触媒反応のその場解析、水・プロトンのナノスケール解析、実機レベルの現象解析、プロセスの自動解析の実現が期待される。
- ◆ 高度なDX化、オペランド計測、自動自律実験等を可能にするための専用装置設置が望まれる。



線源	放射光X線		中性子線
	低エネルギー領域(軟X線)	高エネルギー領域(硬X線)	
特徴	<input type="radio"/> 化学状態・電子状態 <input type="radio"/> 軽元素/表面・界面	<input type="radio"/> 構造 <input type="radio"/> 重元素/バルク/ 触媒層・MEA・セル越し	<input type="radio"/> 構造/分子運動 <input type="radio"/> 水素、水、氷/大視野
手法適用例	<u>軟X線XAFS</u> 雰囲気制御下のPt/アイオノマの 界面構造	高エネルギーX線回折・全散乱 水電解反応時の触媒及び触媒担体 の中長期構造	<u>中性子イメージング</u> 燃料電池作動状態でのフルサイズ セルの水/水分布状態
	<u>高分解能軟X線RIXS</u> 燃料電池反応時の触媒の酸素種の 電子構造・局所構造	X線小角散乱 触媒インクと塗布乾燥過程における 触媒分散構造の解析	<u>中性子小角散乱</u> 触媒インクと塗布乾燥過程における 担体やアイオノマの分散構造の解析
	<u>軟X線大気圧光電子分光</u> 発電環境下のMEA界面の酸素種の 化学状態	<u>GI-WAXS, GI-SAXS</u> 雰囲気制御下のアイオノマの構造、 配向性	<u>中性子準弾性散乱</u> 触媒層/電解質膜の水・プロトンの 分子運動(拡散・振動・回転)

◆ NanoTerasu活用により35年ロードマップに示される材料プロセス開発を加速

BL	BL名称	手法		NEDO事業との関係
		標準	アドバンスト	
02U	軟X線超高分解能RIXS	共鳴非弾性X線散乱		新材料触媒開発
06U	軟X線ナノ光電子分光	高エネルギー分解能/共鳴/偏光依存ARPES		新材料触媒開発 生産技術(材料)
07U	軟X線電子状態解析	吸収分光 光電子分光	共鳴軟X線非弾性散乱 ナノX線光電子分光	新材料触媒開発 高温耐久電解質膜/薄膜化 /PFAS 規制対応/新材料電解質膜開発 高温化/ 薄GDL化/触媒層構造最適化 生産技術(材料)
08U	軟X線オペランド分光	光電子分光 吸収微細構造	雰囲気軟X線光電子分光 オペランド軟X線吸収微細構造	高温耐久触媒(120°C)/新材料触媒開発
13U	軟X線ナノ吸収分光	吸収分光 磁気円/線二色性分光		高温耐久触媒(120°C)
14U	軟X線イメージング	吸収分光 磁気円二色性分光	軟X線顕微鏡	高温耐久触媒(120°C) 高温耐久電解質膜/薄膜化 /PFAS 規制対応/新材料電解質膜開発 生産 技術(プロセス/材料)
08W	局所構造解析	テンダー～硬X線吸収分光 (斜入射)小角X線散乱 X線回折	環境下X線吸収分光 環境下X線回折	新材料触媒開発
09U	X線オペランド分光	硬X線光電子分光		新材料触媒開発
09W	階層構造	白色広視野CT 白色リアルタイムイメージング	4D-CT	高温化/薄GDL化/触媒層構造最適化
10U	X線コヒーレント イメージング	単色高分解能CT	コヒーレント回折イメージング	高温耐久電解質膜/薄膜化

- ◆ 軟X線が得意とする軽元素の状態解析を中心とし、燃料電池および水電解のボトルネック課題を解決
- ◆ QST、および、コアリショニンビームラインを横断的に活用
- ◆ 電気化学系に特化した計測環境の導入により、世界初のデータを取得

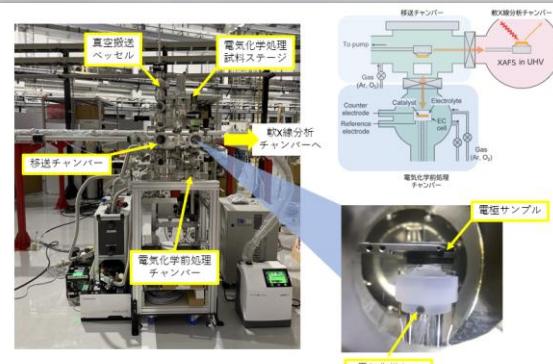
## BL02/06/13U QST共用BL



電気化学計測チャンバーを用いた新材料触媒や触媒層のマルチパス計測

K. Horiba

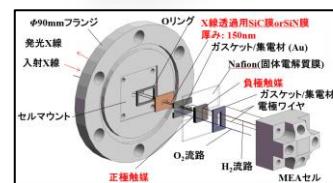
## 電気化学計測チャンバー



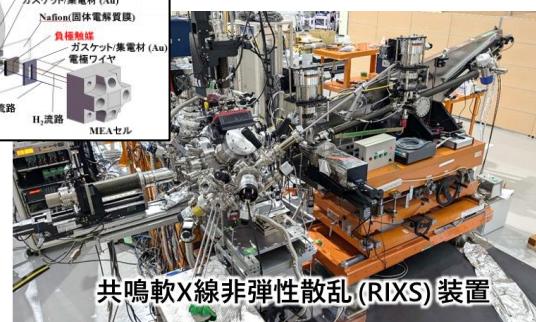
## BL07U 軟X線電子状態解析BL



・Operando RIXSによる修飾触媒の反応メカニズム解析  
・NanoESCAによる生産技術材料の要因解析

Y. Harada  
(Prof.)

Electrochim. Commun. 35 57 (2013).



共鳴軟X線非弾性散乱(RIXS)装置



ナノX線光電子分光(NanoESCA)装置

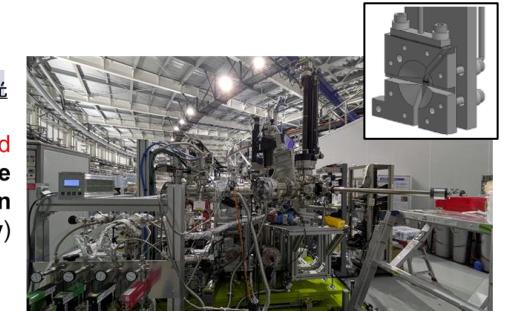
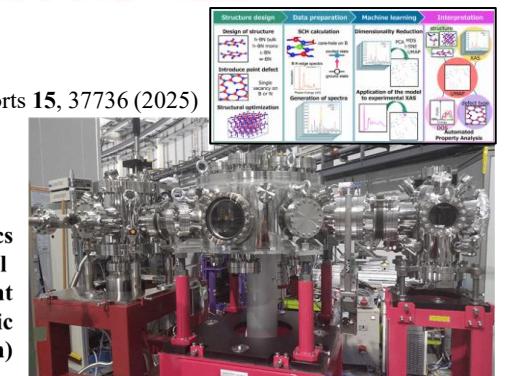
## BL08U軟X線オペランド分光BL

I. Matsuda  
(Prof.)

・PEFC・水電解材料のX線スペクトルデータベース構築  
・セル稼働環境下のMEA界面化学状態の追跡

Scientific Reports 15, 37736 (2025)

1. PIONEERシステム  
PIONEER system  
(Process Informatics  
Operando Novel  
Experiment  
for  
Electronic  
Research)



## 生産技術

### 狙い:接着メカニズムの解明

- シール部の技術課題
  - 過酷環境耐性の確保:

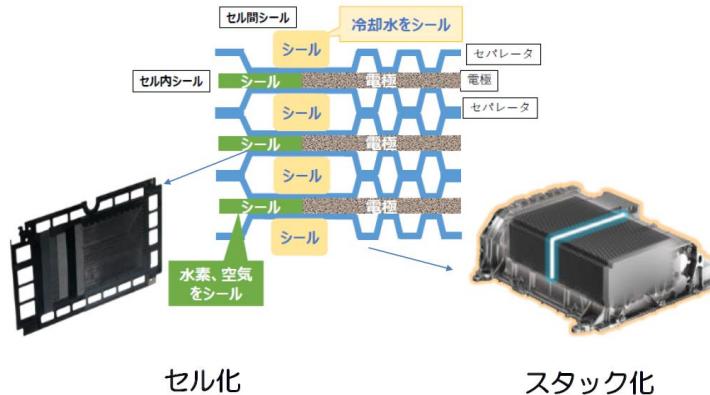
シール部が曝される 高温・高湿・低pH 条件でも劣化しない接着剤(シール材)

- 設計短時間接合(高速硬化):

量産工程に適した 接合時間の短い接着剤の開発(タクト短縮)

- 生産性向上・コストダウン:

工程簡素化、歩留まり向上による製造コスト低減

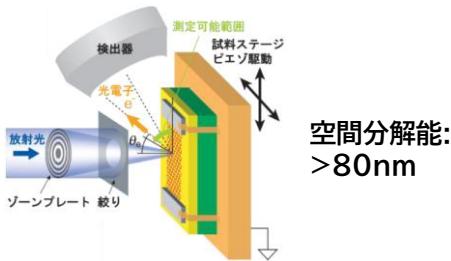


界面起因の不良要因を特定・定量化し、耐久化と高速接合の両立および工程最適化に反映するため、接着界面の化学状態解析が不可欠。

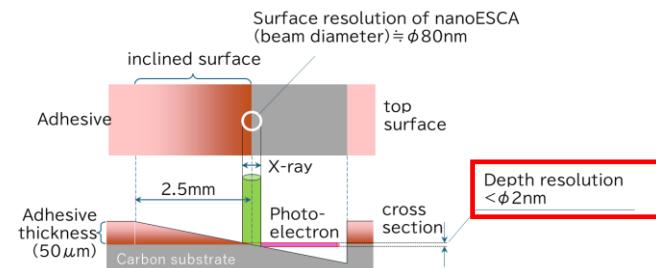
## 接着界面の化学状態解析（ナノ軟X線光電子分光）

- NanoESCAを用いてnmオーダーの空間分解能で接着界面の化学的結合状態を測定、解析が行える材料解析技術を確立
- 母材界面でシール材の特徴的な結合状態を捉えている

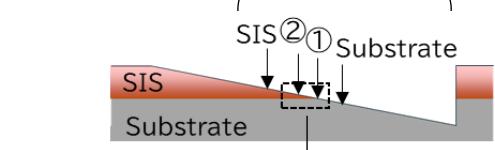
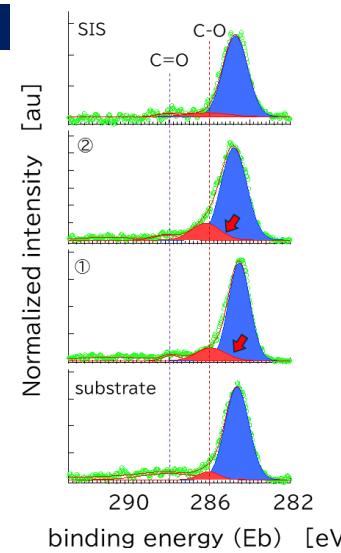
### NanoESCAの原理



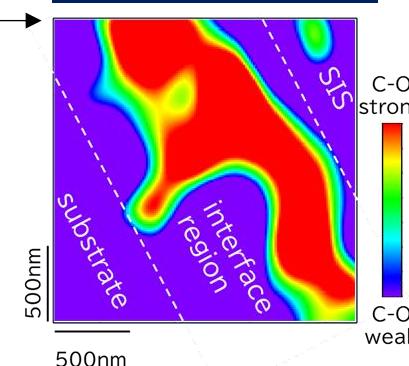
### 傾斜切削による接着界面の空間分解能向上



### C 1s XPS



### C-O bond/C bond total mapping



界面はC-O結合を形成し、強固に接着

# ご清聴ありがとうございました

謝辞:本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)  
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(JP20003)、および、  
水素利用拡大に向けた共通基盤強化のための研究開発事業(JP250002)により実施されました。