

第16回FC-Cubicオープンシンポジウム

3. 評価解析プラットフォーム 世界に誇る日本の評価解析技術

3) 高度材料解析

技術研究組合 FC-Cubic

今井 英人

◆概要

◆材料解析支援

- ・燃料電池解析技術のプラットフォーム化
- ・解析技術の標準化
- ・解析支援実績
- ・メカニズム解析

◆解析技術の高度化

- ・マルチスケール・オペランド計測・解析技術
- ・成果紹介

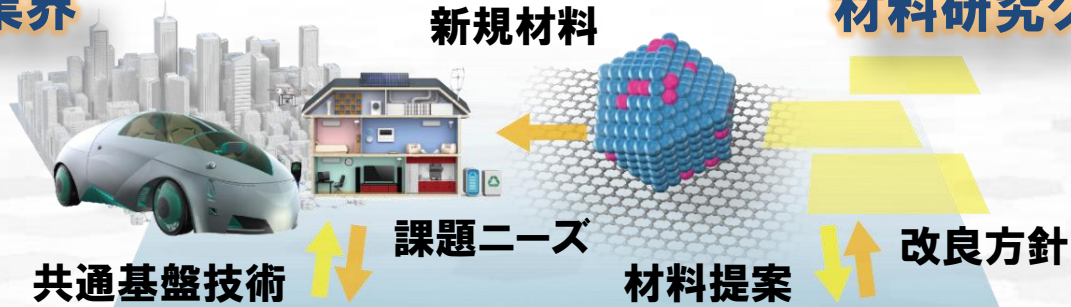
評価解析プラットフォーム



実証・産業界

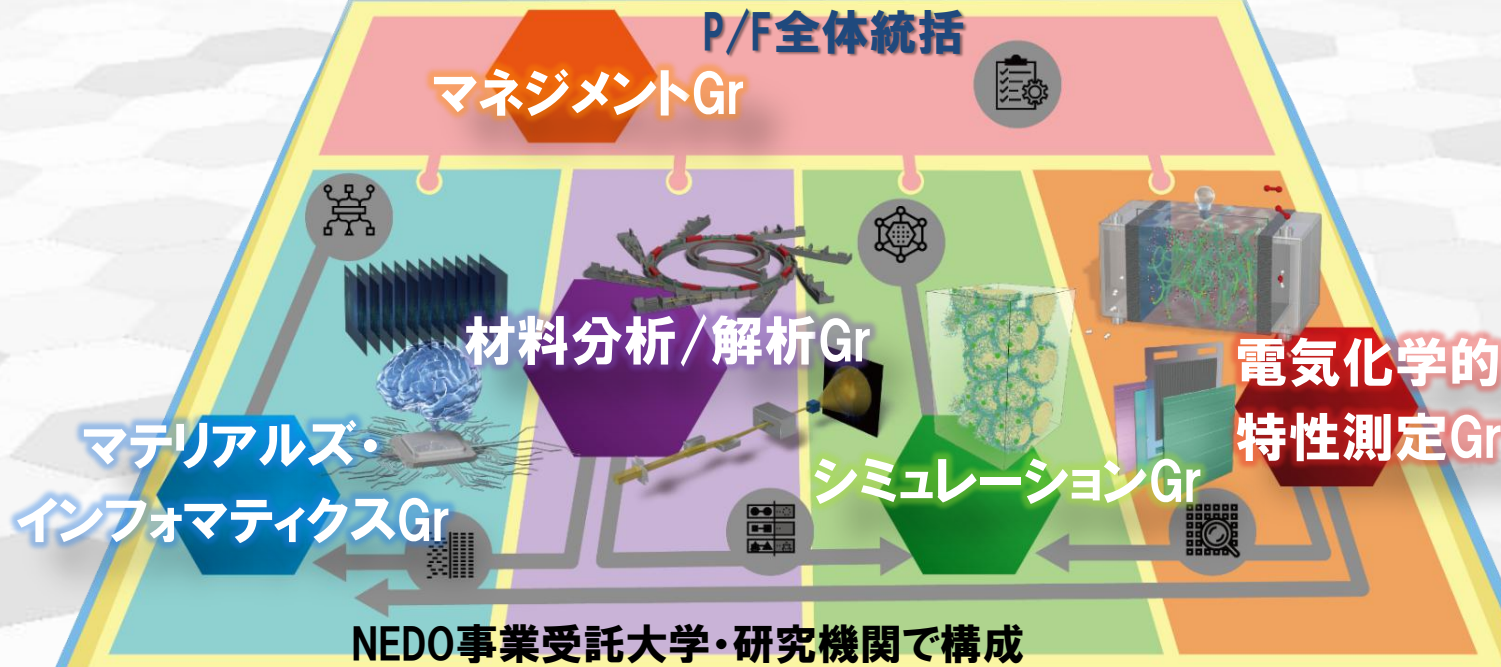
新規材料

材料研究グループ



【目的と成果物】

- A) 材料改良方針
材料評価・DB化
- B) 現象の可視化
高度化オペランド
解析
- C) 現象の予測
性能・寿命予測
モデリング



評価解析プラットフォーム

METI水素・燃料電池戦略 / NEDO事業

- D) 革新材料創生
経験・理論的設計

PEFC評価解析プラットフォームメンバー

4/32



Management Gr



N. Takeuchi



M. Yamauchi



S. Oyama



M. Yoneda

Electrochemical Evaluation Gr



K. Shinohara



T. Asaoka



H. Kanesaka



T. Mikami

Simulation Gr



M. Kawase
(Prof.)



M. Kubo
(Prof.)



S. Hirai
(Prof.)



G. Inoue
(Assoc.Prof.)



I. Kinefuchi
(Assoc.Prof.)

Materials Informatics Gr



K. Sodeyama
(Prof.)



M. Matsumoto

Materials Analysis Gr



H. Imai



Y. Uchimoto
(Prof.)



Y. Sakurai
(Prof.)



T. Otomo
(Prof.)



Y. Iwasawa
(Prof.)



M. Tada
(Prof.)



S. Koizumi
(Prof.)



A. Kuwabara

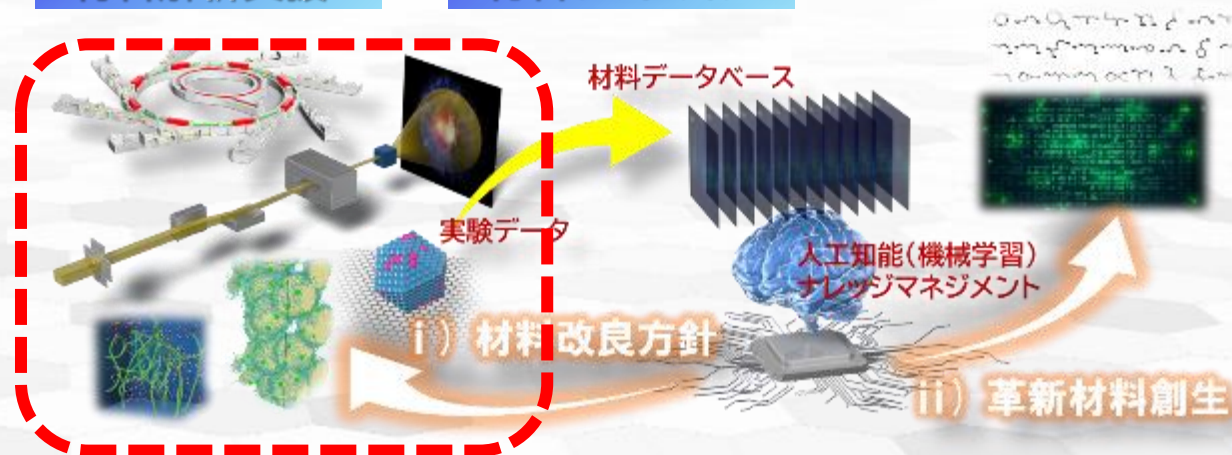


大阪工業大学

【WP1】データ駆動型アプローチ（材料開発研究に貢献）

材料解析支援

材料インフォマティクス



【WP2】モデル駆動型アプローチ（基盤技術開発に貢献）

現象可視化

現象予測



産業界・実証

高性能材料

材料研究グループ

現象可視化
・予測技術

開発効率
ニーズ

材料提案

改良方針

P/F全体統括

マネジメントGr

材料分析/解析Gr

電気化学的
特性測定Gr

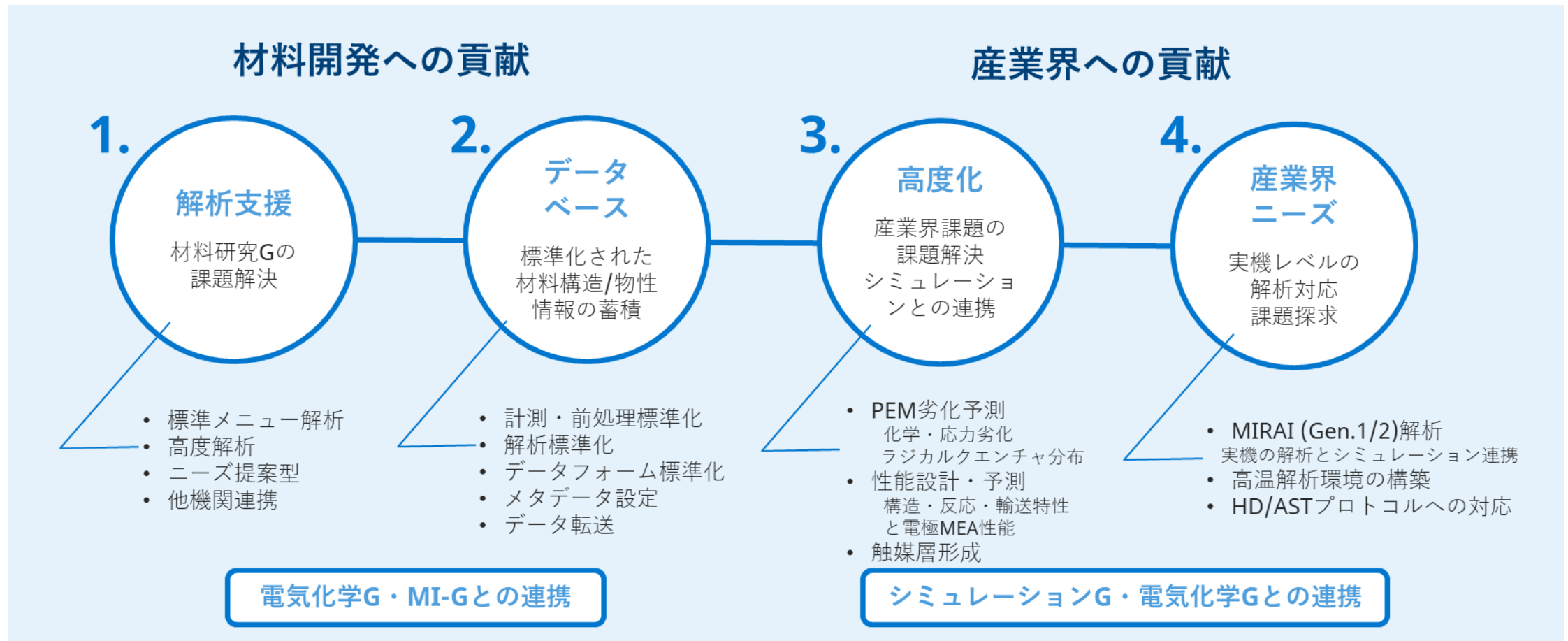
マテリアルズ・
インフォマティクスGr

シミュレーションGr

評価解析プラットフォーム

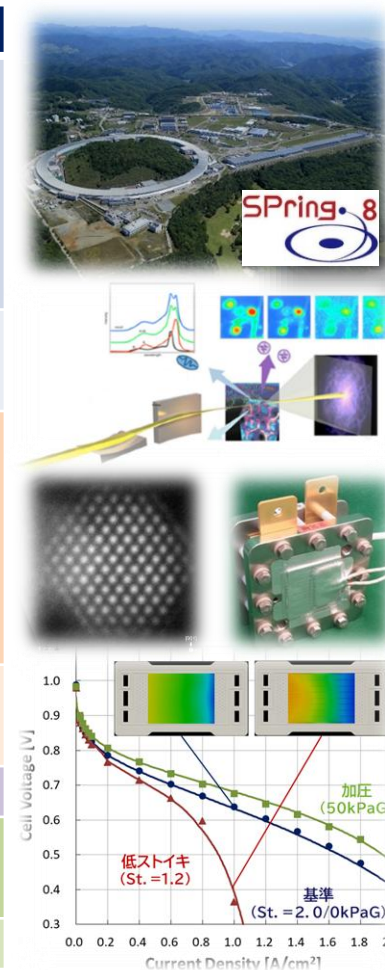
METI水素・燃料電池戦略/ NEDO事業

- PEFC評価解析プラットフォームにおける分析／解析技術の役割として、材料開発グループから提供される材料の分析／解析支援を行い、さらに産業界の課題解決を進めるためのシミュレーター開発支援とそのため解析技術の高度化を実施する。
- 取得したデータは、データベースとしてストックし、マテリアルズ・インフォマティクスで活用する。
- 燃料電池を使用した製品の分析/解析にも適用することで、研究開発への貢献可能性を示す。



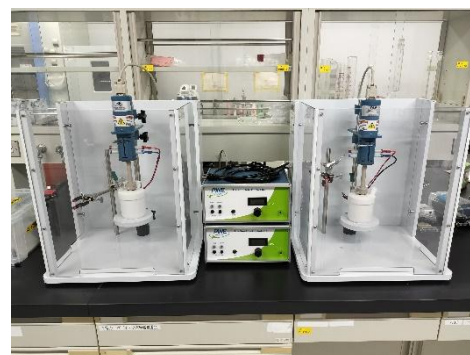
- FC-Platformでは、触媒・電解質膜・MEAの現象解析の基礎となる構造解析を行うための標準的解析手法を整えています。
- 個別の材料開発課題の解決支援に加えて、MIで活用すべきデータ収集&データベース構築を行っています。
- 触媒の構造を特徴づける構造情報として、XRD/XAFS/SAXS/PDF/HAXPESを設定しています。

	手法	取得できる情報	適用材料例
放射光分光 (SPring-8)	粉末X線回折 XRD	結晶構造、合金化度	触媒
	X線吸収分光 XAFS	局所構造、価数、合金化度	
	X線小角散乱 SAXS	平均粒子径、分布	
	X線全散乱 PDF	非晶質構造、粒子径分布	
	硬X線電子分光 HAXPES	電子状態、d-band center	電解質膜
	X線小角/広角散乱 SAXS/WAXS	微細高次構造、結晶構造、配向度	
	軟X線X線吸収分光 XAFS	官能基	
顕微鏡	透過電子顕微鏡 TEM/STEM	結晶構造/ひずみ、粒子形状/分布	触媒
	電子回折 ED	局所結晶構造	
	エネルギー分散型X線解析 EDX	元素分布	
	電子エネルギー損失分光 EELS	局所電子状態	
	トモグラフィー 3D-TEM	3次元構造可視化	
	クライオ電顕観察	アイオノマ被覆状態など	MEA
	FIB-SEM	3次元構造可視化	
振動分光	ラマン分光/IR	構造、官能基	電解質
電気化学	オペランド電気化学分光	in-situ反応状態	触媒
	回転ディスク電極 RDE	触媒活性	
	MEA評価	BOL/EOL性能@AST	MEA



試料前処理、放射光実験用燃料電池セルの調整、等にご利用いただけます。

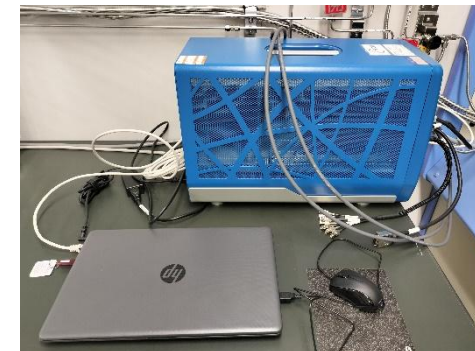
回転電極



グローブボックス



電気化学評価装置



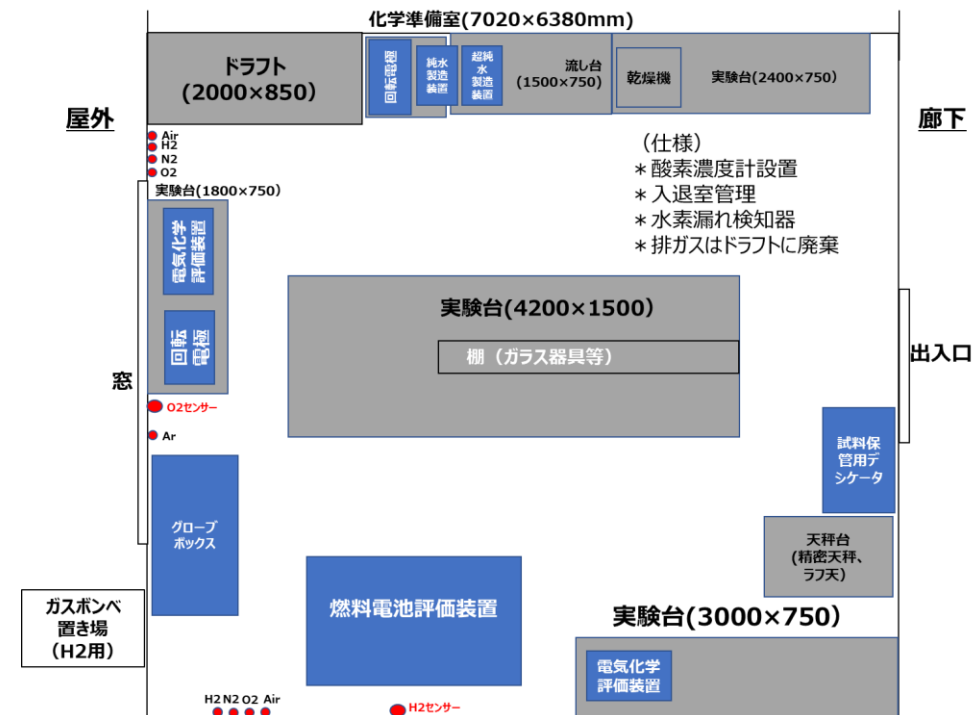
燃料電池評価装置



利用実験施設



配置図

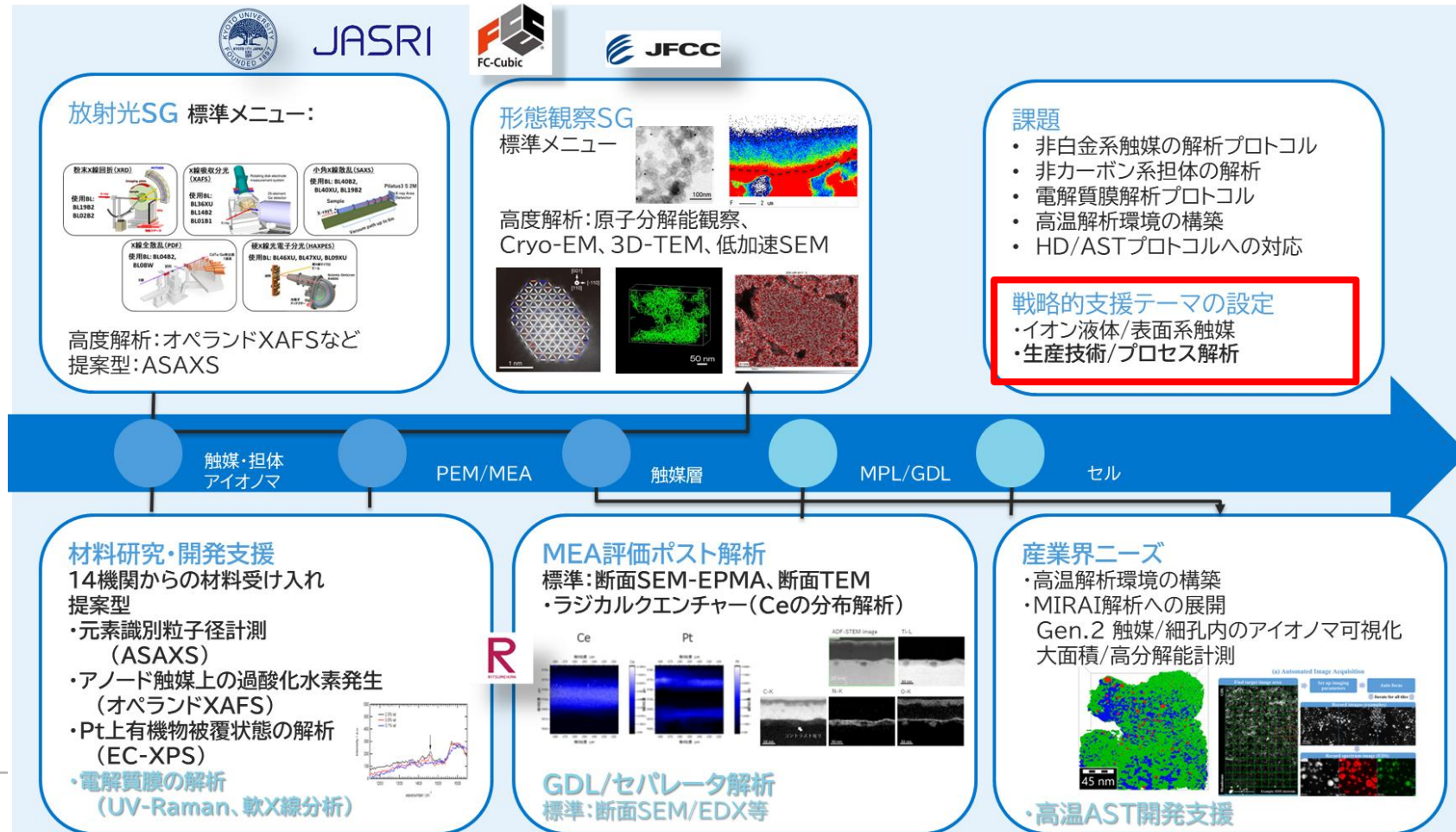


1. 研究開発の進捗・成果 材料研究グループへの解析支援実績

概要 1. 解析支援

・PEFC評価解析プラットフォームの役割として、材料開発グループから提供される材料の分析／解析支援を実施する。連携会議による解析ニーズのヒアリングから解析提案を行い、解析結果を提示し、材料開発における課題解決を支援する。材料解析技術整備の総仕上げとして、革新FC-MEAの解析評価を実施する。

・戦略テーマ設定し、開発した高度解析技術による支援の充実、必要な新規解析技術の高度化を進める。



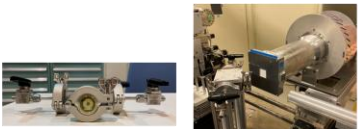
- 測定サンプルの前処理条件を統一、ビームラインごとに異なる計測条件と統一、補正方法を統一しデータベース化を行っています。
- 解析の手順、使用するアプリを統一し、解析者による解析の“ゆらぎ”を徹底排除しています。

前処理・測定・解析の標準化
統一した条件で構造・物性値の取得

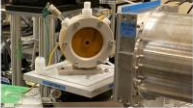
● 標準化仕様（前処理、測定条件<電気化学、MEA>）

評価状態	形態	前処理	サンプリング	適用手法	留意する測定条件
電気化学 エージング	RDE	電気化学処理 基本処理条件はFCCJ プロトコルに準ずる	RDE In situセル使用	オペランド XAFS	・ 最適塗布量 ・ 電極配置
	RDE, 平板電極	電気化学処理 + 水素還元 基本条件： FCCJプロトコル 室温100% H_2 30分	粉末 電気化学処理、水素還元 後に大気非暴露でサンプリング	XRD, SAXS, PDF, HAXPES	前頁に同じ
MEA エージング	MEA	MEA発電 基本稼働条件はFCCJ プロトコルに準ずる	MEA オペランドセル使用	オペランド 2D-XAFS	測定は次年度実施

● 水素還元セルによるXAFS測定



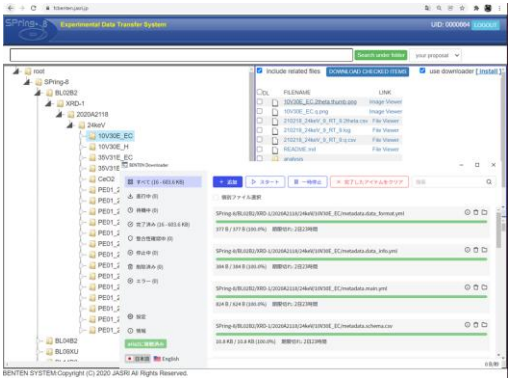
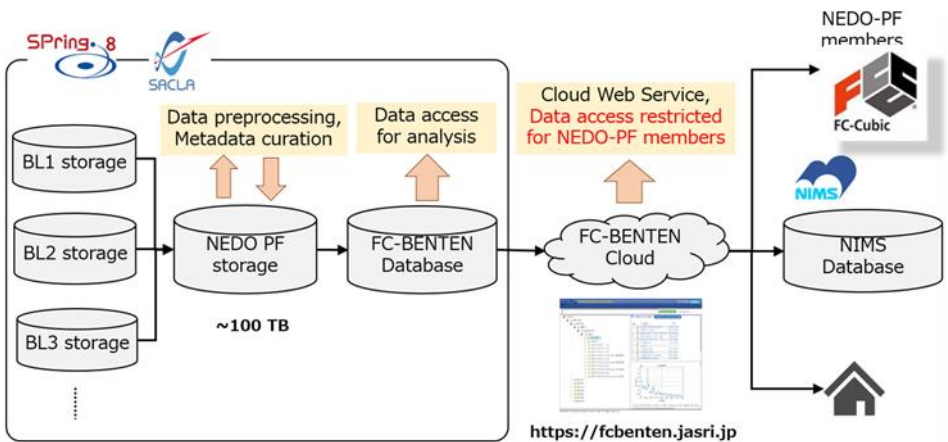
● 電気化学In situセルによるXAFS測定



● 標準化仕様（解析）

手法	XAFS	HAXPES	XRD	SAXS	PDF
求める 物性値	・ 原子間距離 （第1・第2近接中心） ・ 配位数 （DW因子、配位原子種） ・ 価数、電子状態、化学種 ・ 相比率 （複数状態ある場合）	・ d band center ・ 配位数 （化合物、価数） ・ 組成分析 （組成分析） ※感度係数算出必要	・ 結晶系 ・ 格子定数 ・ 占有率 （合金組成） ・ 相比率 ※複数相ある場合 ・ 結晶子径	・ 粒径、形状、サイズ 分布 ・ 1次、2次粒子の 凝集構造 ・ 特定元素濃度 （異常分散SAXS） ・ 劣化挙動 （in-situ測定）	・ 原子間距離 （最近接から $r=2n$ (n は整数 まで、 $\Delta Q=0.05 \text{ \AA}^{-1}$; $r=10 \text{ nm}$) ・ 結晶質、非晶質構造 ・ 格子定数、原子座標、 占有率 ・ 合金構造 （異常分散PDF）
解析 ソフト	・ Demeter	・ Origin	・ Z code	・ 検討中 Fit2D, SAngler, Igor macro (nika, Irena) など	・ BL04B2 Igor ・ 構造解析PDFgui
解析の ポイント	・ スペクトルノーマライズ 時の入力パラメータ の設定の仕方 ・ 解析ソフト入力パラ メータの設定 他	・ 生データから解析可 能なプロセスデータ への加工・変換 ・ BG処理 ・ 寄電補正 ・ 化合物帰属 ・ ピークフィット方法 ・ d band center解析法 他	・ 生データから解析可 能なプロセスデータ への加工・変換 ・ BG処理 ・ ゼロ点補正 他	・ 2次元データ確認 と処理方法 ・ 円周積分方法 ・ 縦軸・横軸校正方法 ・ qレンジ異なるデータ の連結方法 ・ Fitting初期モデル	・ データ前処理におけ る低角側データカット の仕方 ・ 原子散乱因子補正の 仕方等

材料メタデータとともに、データを蓄積



DB登録状況の可視化

- 系統的にDB化を推進

大容量データ転送対応

- Downloaderアプリ機能追加

1. 研究開発の進捗・成果 研究開発成果の詳細

◆ 解析手法に関するノウハウは、マニュアル、事例集、解析プロトコルとして整備

- ・横並び評価とデータ標準化のために前処理、測定、解析方法を標準化
- ・蓄積したノウハウ、データを活用してマニュアル化し、普及のための整備

標準化

□ 形態観察・振動分光

触媒粒径解析(TEM)

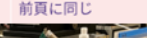
標準化前		標準化後	
	TEC36F52 のTEM像		
			
A社	粒径(nm) 3.7 ± 1.4	改訂項目 ・観察法 ・画像処理法 ・解析法	粒径(nm) 5.1 ± 2.7
B社	4.7 ± 2.3		B社 5.0 ± 2.5

「ラウンドロビン」により
解析者による結果の
「揺らぎ」を徹底排除

□ 量子ビーム

触媒の構造解析を標準化

標準化仕様(前処理/測定条件<電気化学・MEA>)

評価状態	形態	前処理	サンプリング	適用手法	留意する測定条件
電気化学エージング	RDE	電気化学処理 基本処理条件はFCFJプロトコルに準ずる	RDE In situセル使用	オペランド XAFS	- 最適塗布量 - 電極配置 
	RDE, 平板電極	電気化学処理 +水素還元 基本条件: FCFJプロトコル 室温100% H_2 30分	粉末 電気化学処理、水素還元後に大気非暴露でサンプリング	XRD, SAXS, PDF, HAXPES	前頁に同じ 
MEAエージング	MEA	MEA発電 基本稼働条件はFCFJプロトコルに準ずる	MEA オペランドセル使用	オペランド 2D-XAFS	 RDEセル

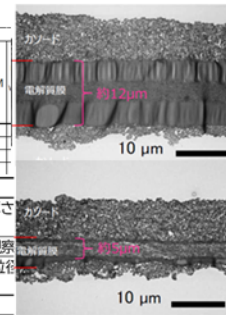
材料解析事例集(プロトコル)

材料に対する前処理法

形態	部位・部材	そのまま	粉末分散法	埋め込み機械研磨法	部材	電気化学特性	構造要素	材料解析	TEM	EDX/EELS	SEM
単体	触媒	◎	◎(TEM用)				表面積	Pt粒子径分布	◎		△
	電解質膜		◎(表面)		◎		表面構造	膜構造 表面電子状態 合金組成	◎		
	補強材入り電解質膜	分析項目		分析法	工程	注意点					
	クエンチャー入り電解質膜										
前処理/測定/解析のノウハウ	触媒金属粒径		TEM	前処理	FIB、ミクロトームなどで100nm以下の厚さに画像処理で粒子を決め、200個以上使い粒布算出						
	膜厚、クラック		SEM	前処理	断面作成時のクラック発生に注意 広い視野を観察し、全体像を把握						

初心者が「試料調製～測定/解析～考察」可能なマニュアル

解析事例



放射光測定・解析マニュアル

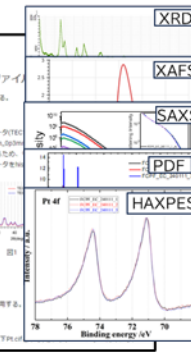
[TOPページ](#)

試料調製

測定

解析

データベース



1. 研究開発の進捗・成果 研究開発成果の詳細

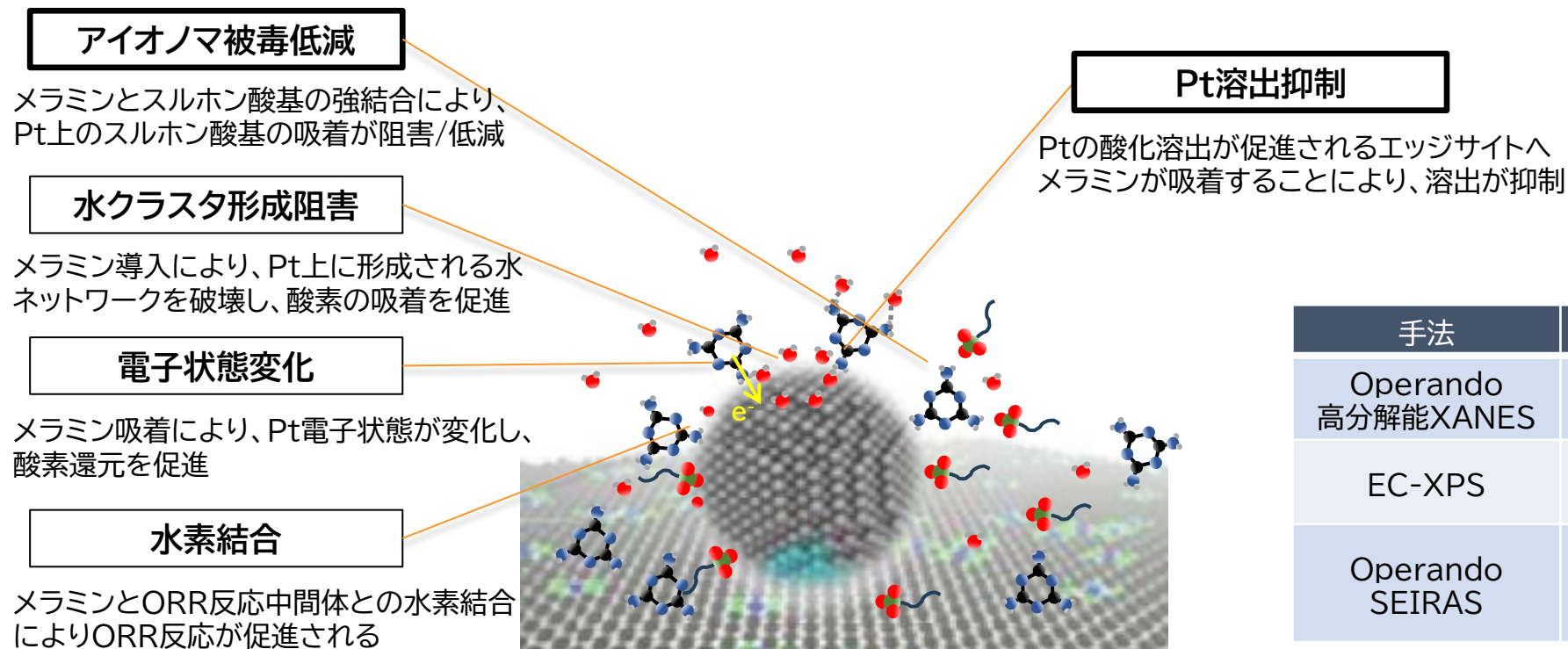
◆ メカニズム解析支援の例

- ・高分解能XANESと第一原理XANESシミュレーションによる反応機構の解明
- ・電子回折と構造シミュレーションによるナノクラスターの構造解析
- ・3D-TEMと画像解析による担体ナノ構造の解析、アイオノマ分布の可視化

1. 研究開発の進捗・成果 材料研究グループへの解析支援実績

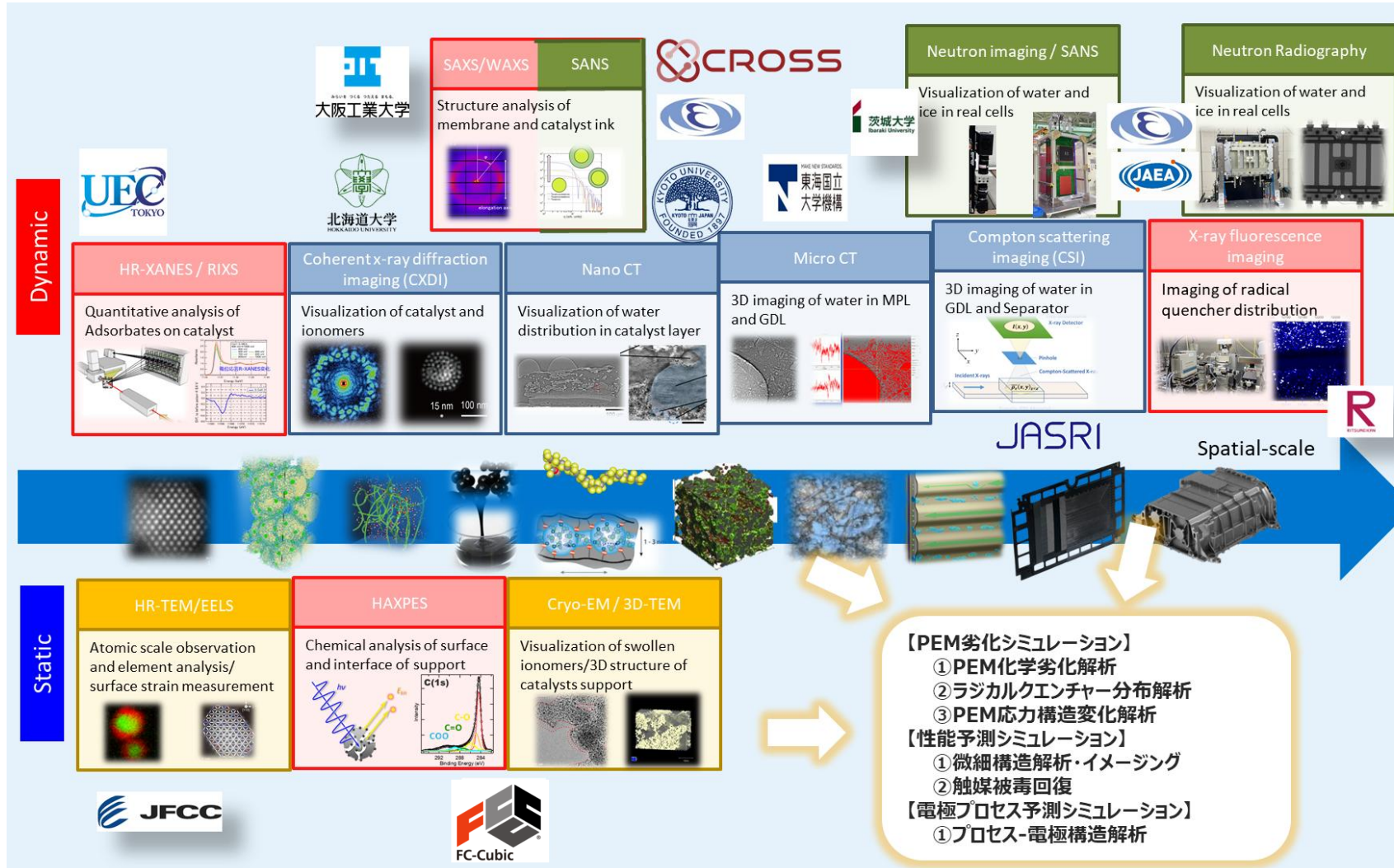
◆ イオン液体/有機分子表面修飾系触媒のメカニズム解析

- ・メラミン吸着によるORR高活性および高耐久メカニズム解析し、開発課題解決を支援
- ・スルホン酸基の吸着阻害、水素結合によるORR促進の効果が大きい



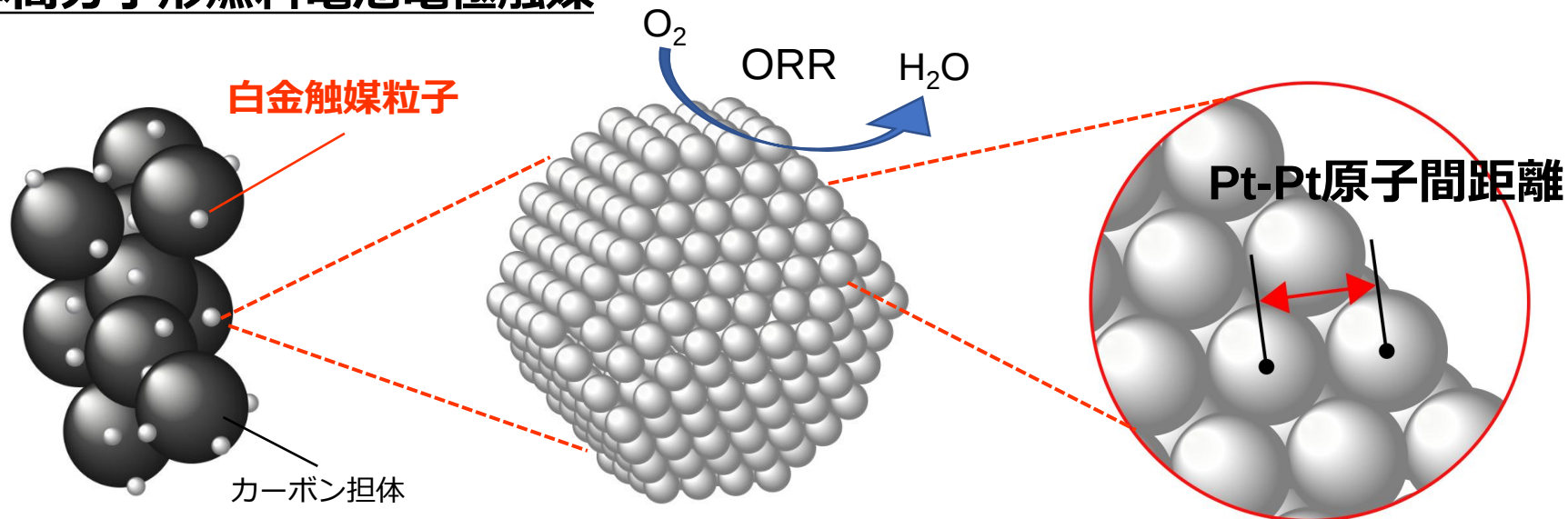
手法	解析内容
Operando 高分解能XANES	・Ptの電子状態変化
EC-XPS	・Ptの電子状態変化 ・メラミン/スルホン酸の分子間結合
Operando SEIRAS	・メラミン/スルホン酸吸着挙動 ・プロトン化メラミンとOHの水素結合 ・水のネットワーク構造

- 材料研究Gから提供される触媒・電解質膜を解析するための標準的解析手法、産業界から提示されるPEFC開発の課題を解決するため、解析技術の高度

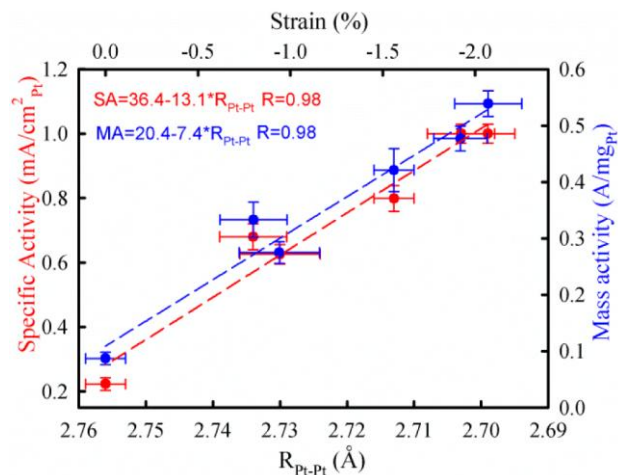


白金系触媒表面のPt-Pt原子間距離

固体高分子形燃料電池電極触媒

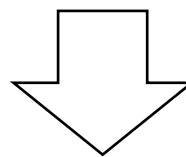


Pt-Pt原子間距離と触媒活性



Qingying Jia et al., ACS Nano 9, 387-400 (2015).

Pt-Pt原子間距離が触媒活性に寄与



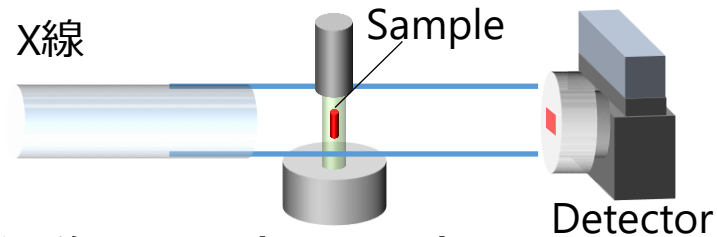
原子分解能レベルの表面構造解析が重要

放射光X線CT計測 BL20XU@SPring-8

カソード触媒層内の酸素拡散抵抗と凝縮水飽和度

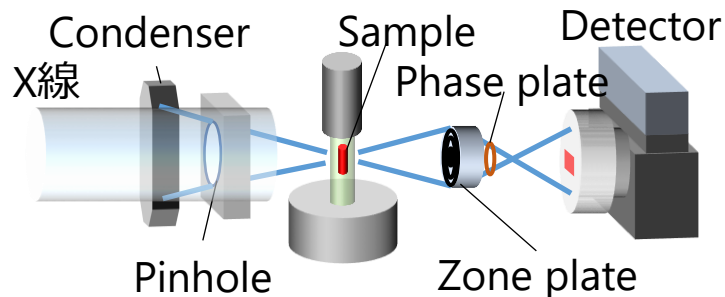
PEFCの発電特性はカソード触媒層への酸素拡散抵抗に大きな影響を受ける。
この酸素拡散抵抗は、供給される加湿ガスや発電によって生成した凝縮水によって酸素輸送が阻害され抵抗が高くなる。
→放射光CT計測により、セル内の凝縮水飽和度を明らかにする。

投影型CT (マイクロCT)

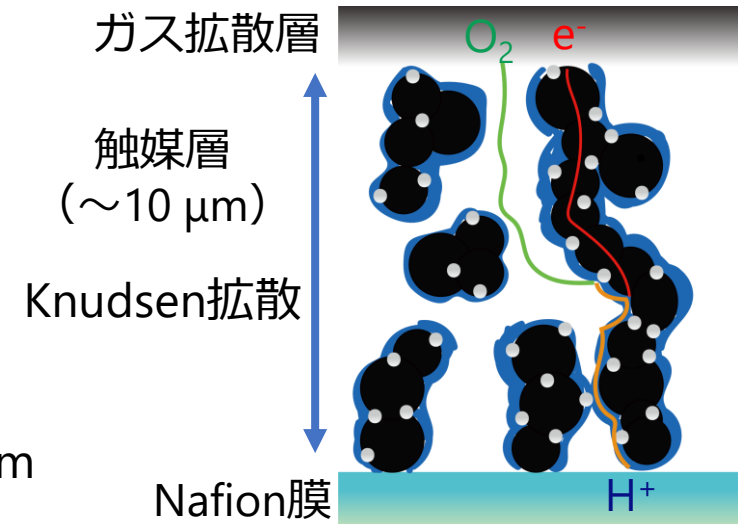


視野および分解能：
1 mm、 $\sim 2 \mu\text{m}$

結像型CT (ナノCT)



視野および分解能：
約 $50 \mu\text{m}$ 、 $\sim 100 \text{ nm}$

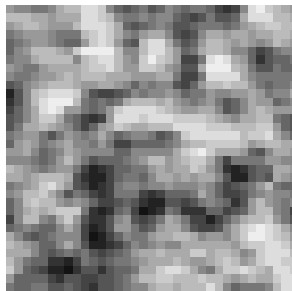


1. 加湿条件下におけるカソード触媒層の細孔径分布の解析

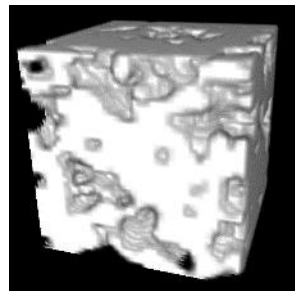
- 湿潤状態での触媒層の構造と酸素輸送抵抗の関連性を明らかにすることを目的とする。
- シミュレーション結果（（東京大学）杵淵先生）と実験による構造の直接観察から加湿条件下における触媒層内の細孔分布などを取得し比較を行う。
- 加湿条件下でのナノCT測定によって触媒層の構造を明らかにする。

有効空隙率

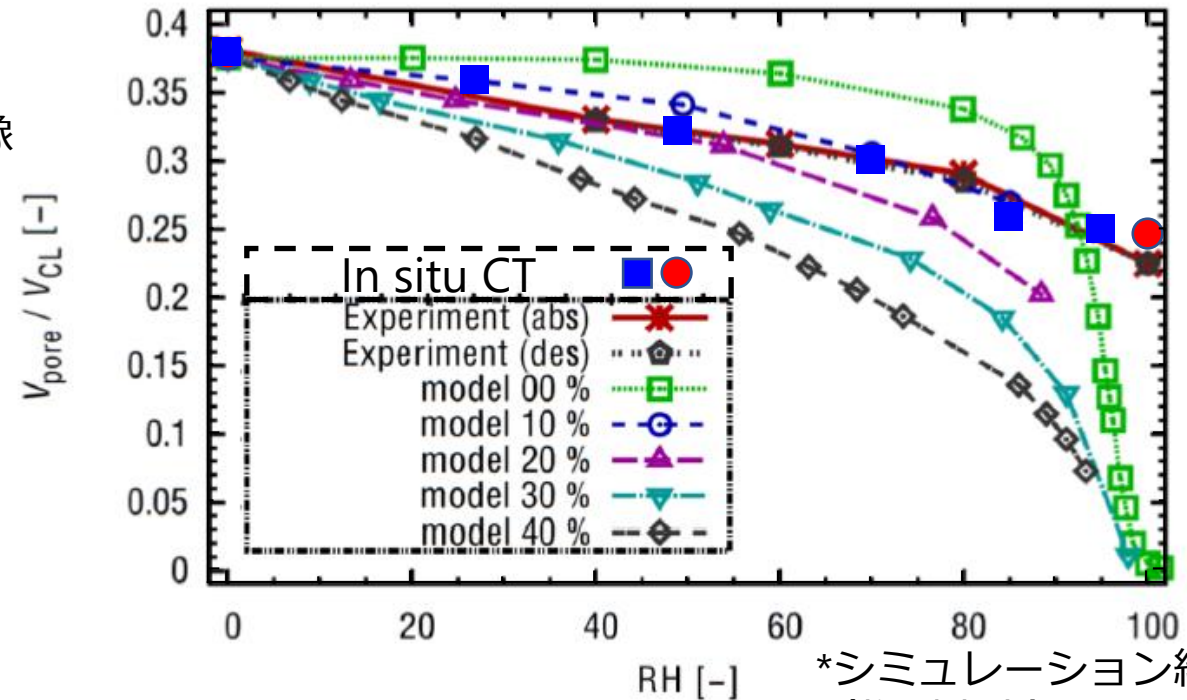
乾燥条件で測定した触媒層のナノCT像



1 μm



1 μm



*シミュレーション結果
（杵淵先生）との比較

ナノCTの空間分解能においてもサブミクロンオーダーの細孔を観察できており、加湿条件下で測定することにより、細孔分布の変化を測定することができる。

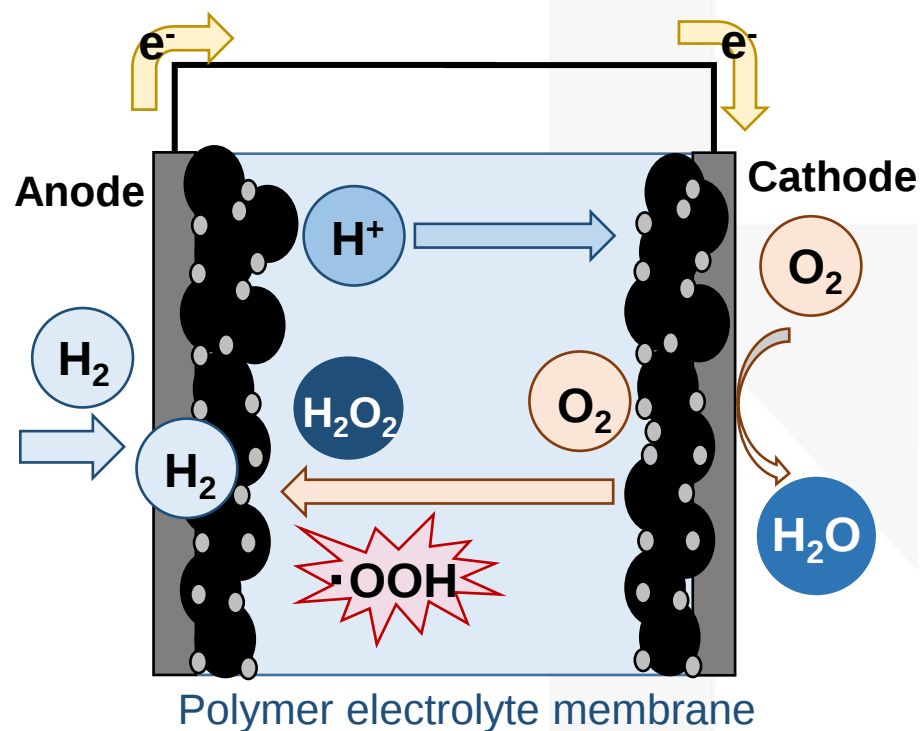


Fig. 1 燃料電池作動条件下でのラジカル生成反応

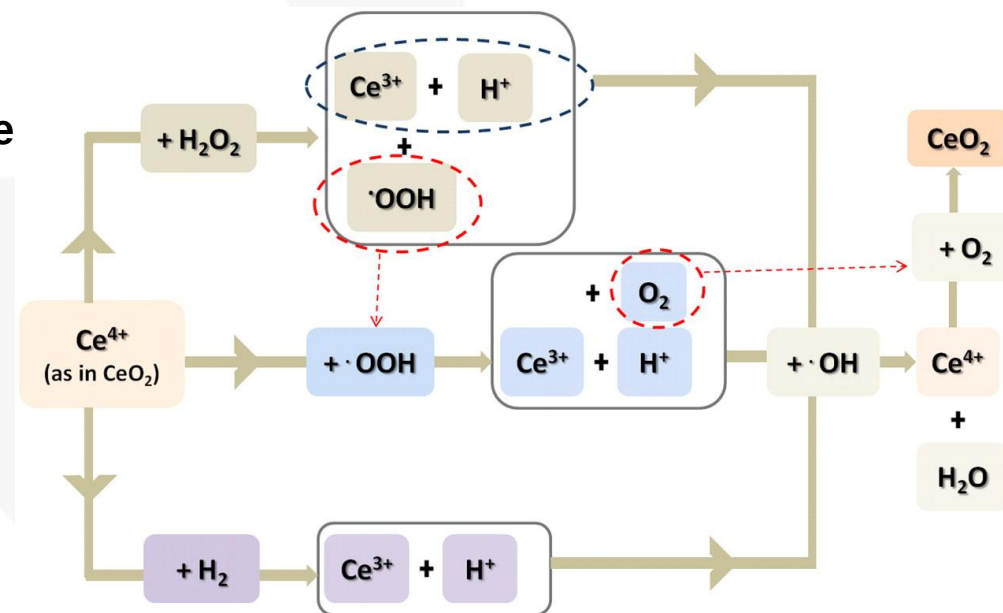


Fig. 2 セリウムイオンとラジカルの反応¹⁾

セリウムイオンがラジカルと酸化還元反応を起こす。

電解質膜の分解が抑制 = 燃料電池の劣化が抑制

1) V. Prabhakaran et al. *PNAS* **109**, 1029-1034 (2012).

MEA膜厚方向でのセリウムイオン分布の検出

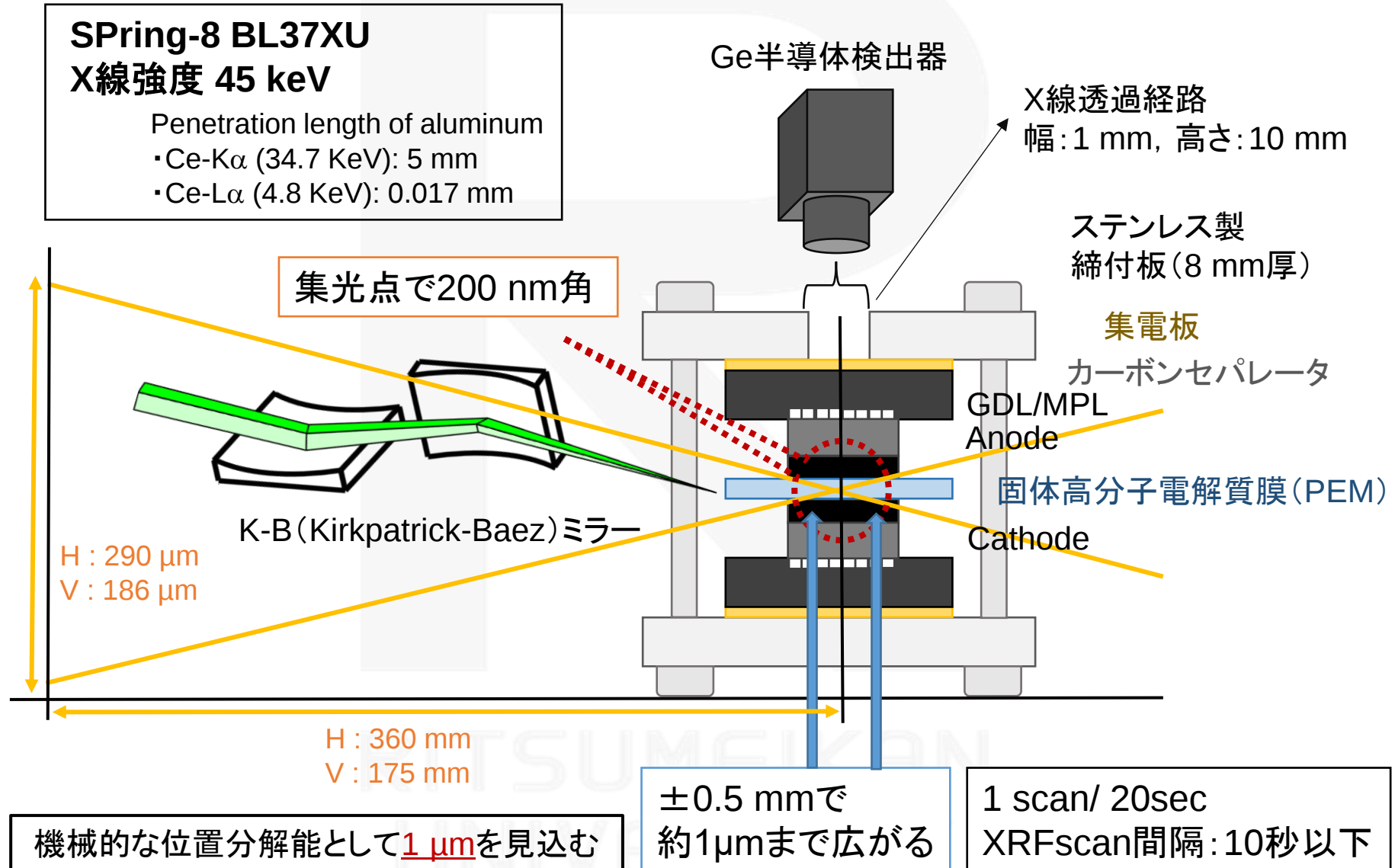


Fig. 8 セリウム分布オペアンド測定用、自作燃料電池セル

測定に使用したMEAのセリウム分布初期状態

* PEMの仕様 → セリウムが添加されている

GORE-SELECT® MEMBRANE M788.12 厚さ: 12 μm , 面積: 9 cm^2

* 電極面積 (Pt/C) : 1 cm^2

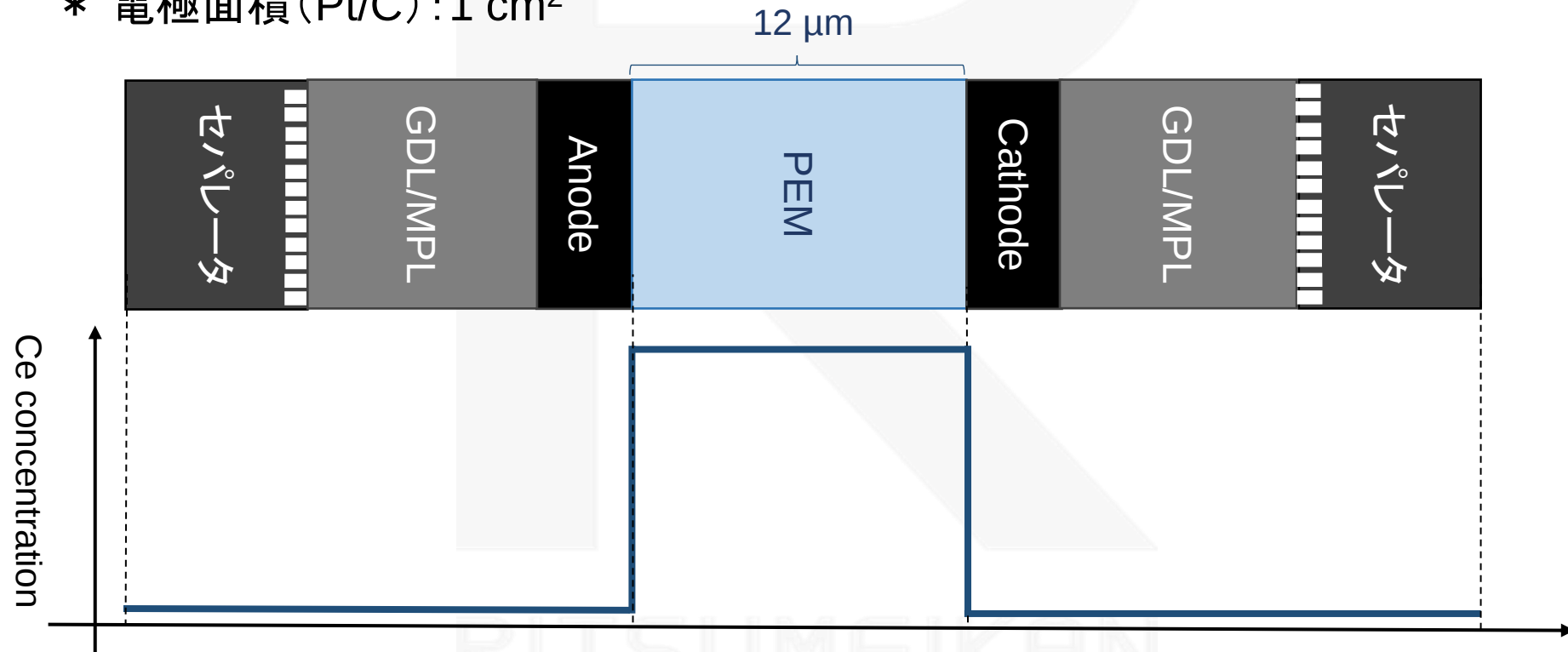


Fig. 9 オペランドセル内でのセリウム分布プロファイル

発電試験前の初期状態において、セリウムは膜内のみに存在

MEA内でのセリウム蛍光X線強度

セル温度: 80 °C, Ca: O₂(RH 100%); An: H₂(RH 100%)

OCV (5分) → 2 A/cm²発電 (15分) → OCV

1 scan / 20 sec.

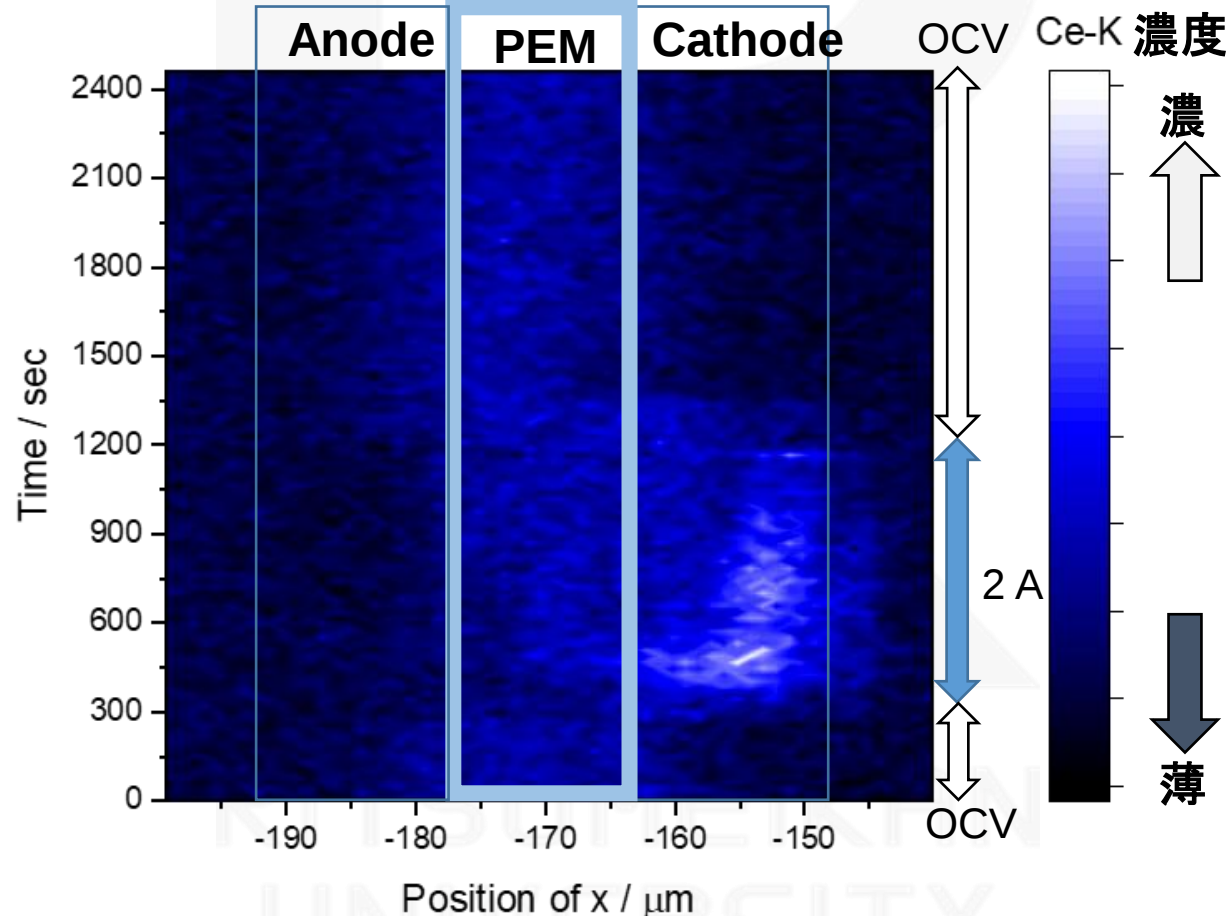


Fig.10 発電中MEA内のCe-K α 強度変化プロファイル

ラジカルクエンチャーであるセリウムイオンは、発電時にPEM内からカソード触媒層へ移動する。

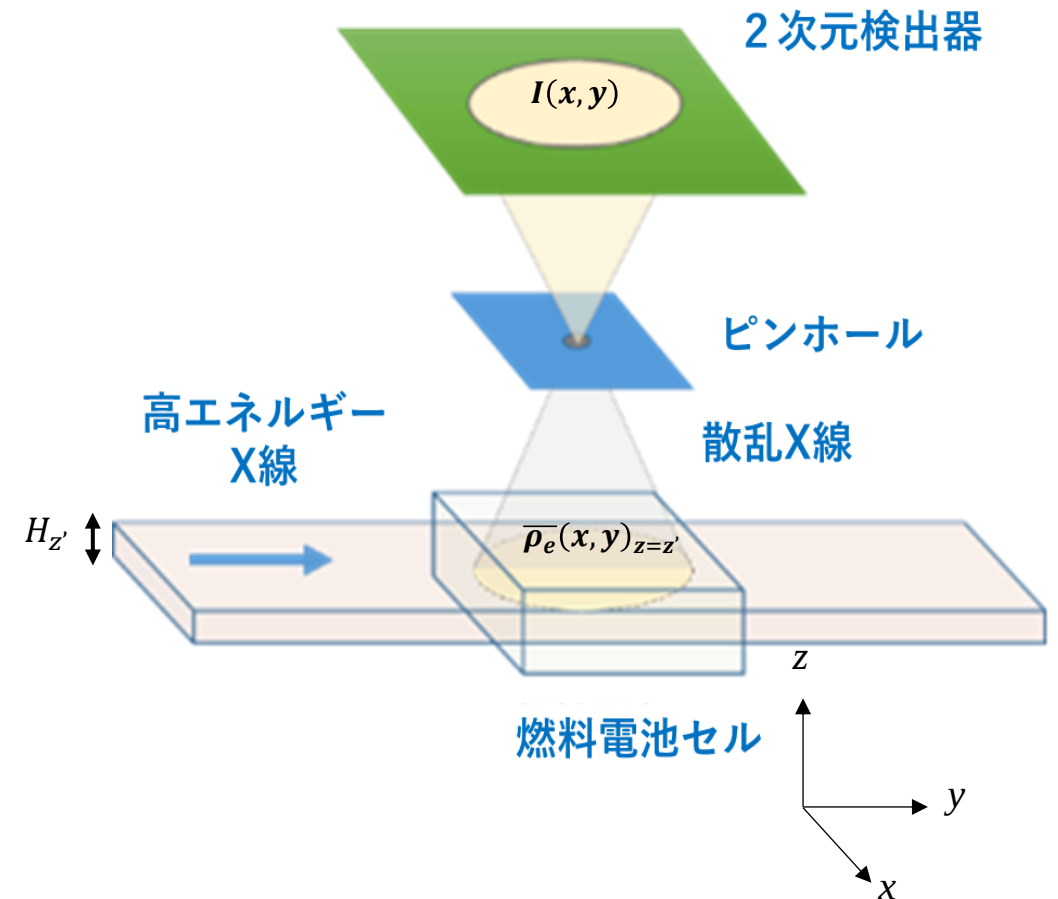
測定原理

2次元検出器上の散乱X線強度分布 $I(x, y)$:

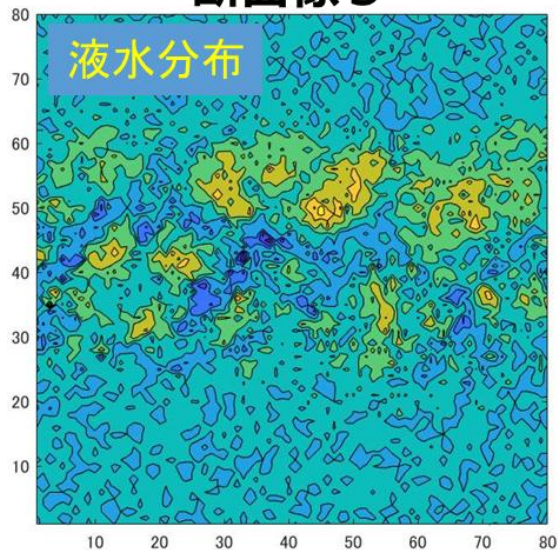
$$I(x, y) \propto \int_{z' - \frac{H_{z'}}{2}}^{z' + \frac{H_{z'}}{2}} \rho_e(x, y, z) dz = \overline{\rho_e}(x, y)_{z=z'} H_{z'}$$

$\rho_e(x, y, z)$: 3次元電子密度分布
 $H_{z'}$: 入射X線ビームの縦幅 (z方向)
 $\overline{\rho_e}(x, y)_{z=z'}$: 2次元電子密度分布

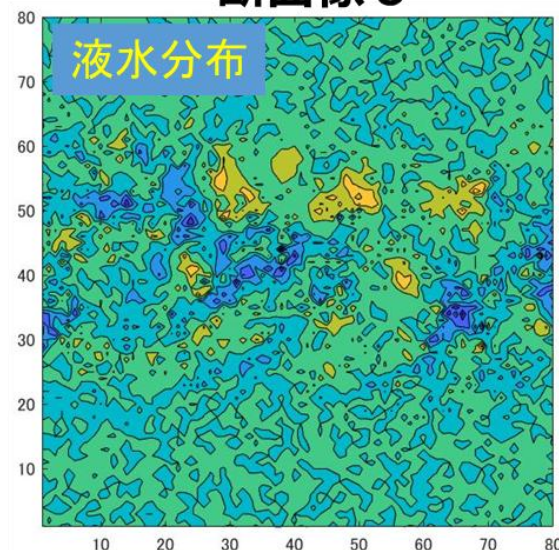
ピンホール・カメラ型CSI



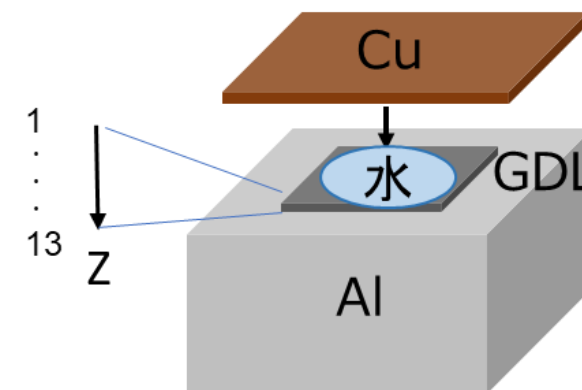
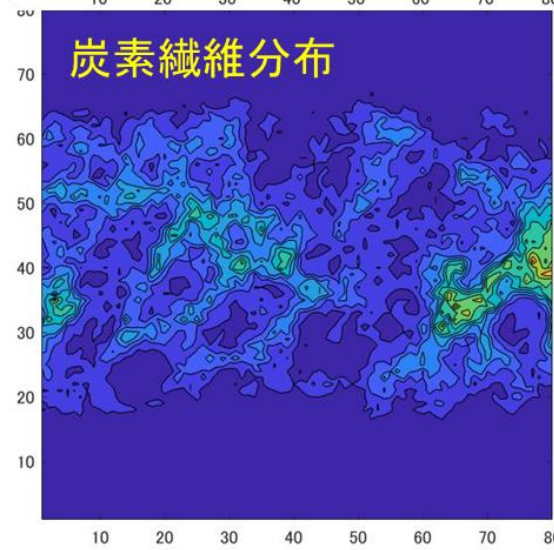
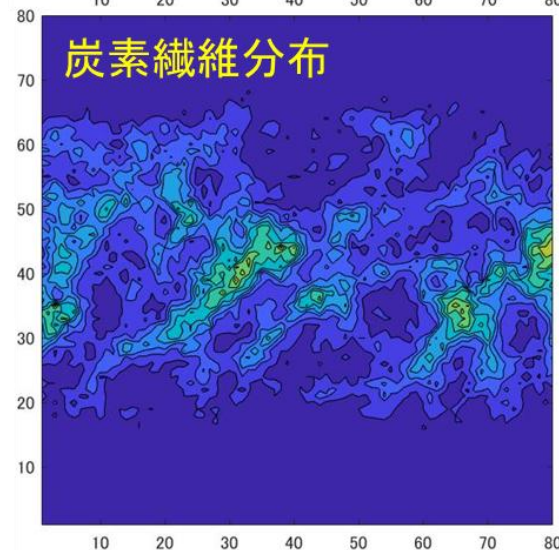
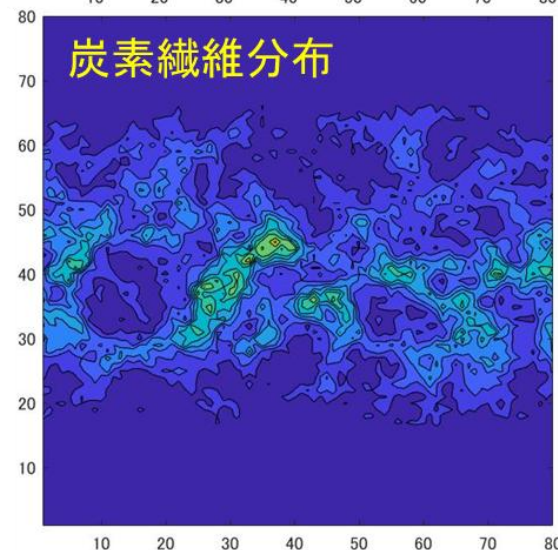
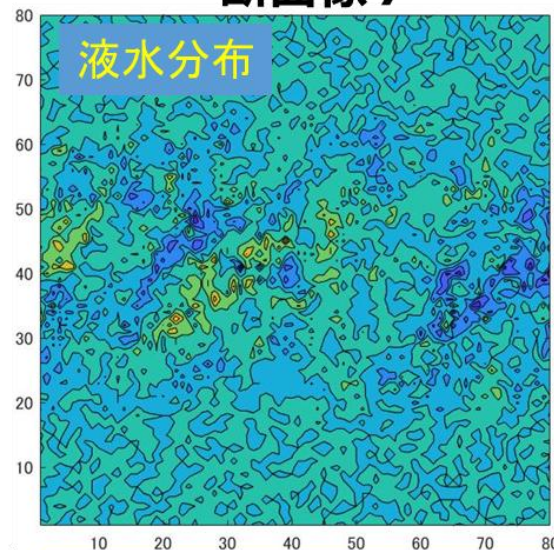
断面像 5



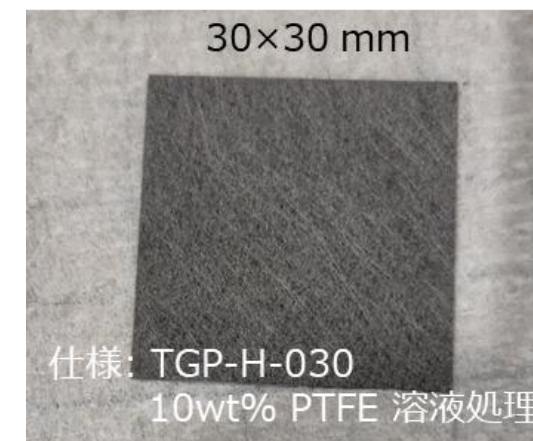
断面像 6



断面像 7



GDL素材



2mm

N. Tsuji *et al.*, Appl. Sci. **11** (2021)3851.

中性子イメージングによる燃料電池内部に生成する水の可視化

中性子を用いた可視化 → 作動中のフルサイズセル内部の水の観察に最適な手法

物質透過能力が高い

大きな物体の内部を見る。(鉄の中も見える)
閉鎖空間の内部を見る。(様々な試料環境が使える)
稼働条件下での観察ができる。

軽元素の感度が高い・同位体を識別できる

水素・リチウムなどの軽元素に対して高い感度を持つ。
水素と重水素を区別できる。

ビームサイズが大きい

中性子透過率

$$\text{透過率} = I / I_0 = \exp(-\mu t)$$

I : 試料透過後のビーム強度 μ : 線減弱係数 (cm^{-1})

I_0 : 試料透過前のビーム強度 t : 試料厚さ (cm)

線減弱係数 = 全断面積 Σ (cm^2) * 原子数密度 N ($1/\text{cm}^3$)
(全断面積…吸収断面積 + 散乱断面積)

相互作用断面積から物理量を定量化

他にもJ-PARCのパルス中性子ビームを利用すると、

- ✓ 水と氷を区別する (エネルギー選択型イメージング)
 - ✓ 磁場を見る (偏極中性子イメージング)
 - ✓ 結晶構造を調べる (ブラッグエッジイメージング)
 - ✓ 元素を見分ける・温度を測る (共鳴吸収イメージング)
- なども可能



J-PARC 物質・生命科学実験施設
パルス中性子イメージング専用実験装置RADEN

波長範囲 $\lambda < 8.8 \text{ \AA}$ @L=18m
波長分解能 $\Delta\lambda/\lambda > 0.20\%$ @L=23m
中性子強度 $1.1 \times 10^8 \text{ n/sec/cm}^2$ ($E < 1\text{MeV}$) @L=18m, L/D=180
L/D範囲 180~7500

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 大友季哉
日本原子力研究開発機構 (JAEA) 篠原武尚、酒井基亘、川北至信
FC-Cubic 今井英人、雨宮一樹、青木努

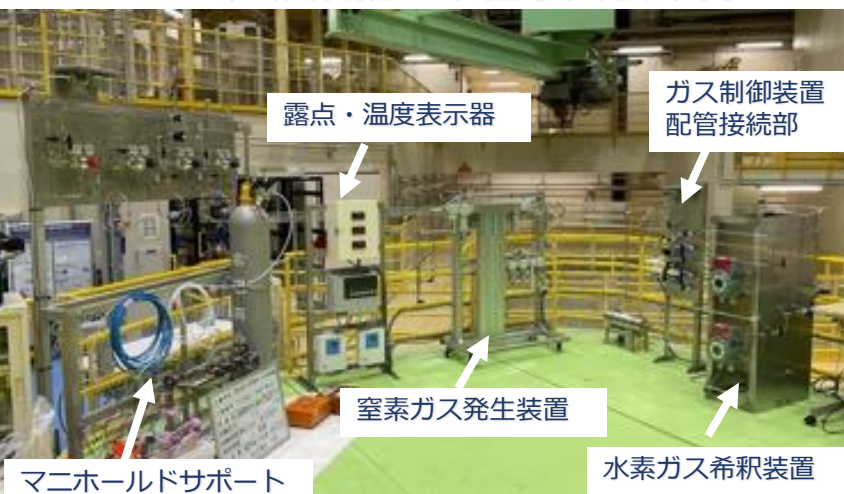
中性子イメージングによる燃料電池セル内部の凝縮水観察

目的 車載用フルサイズの燃料電池を用いて、作動中セル内部の水を観察する

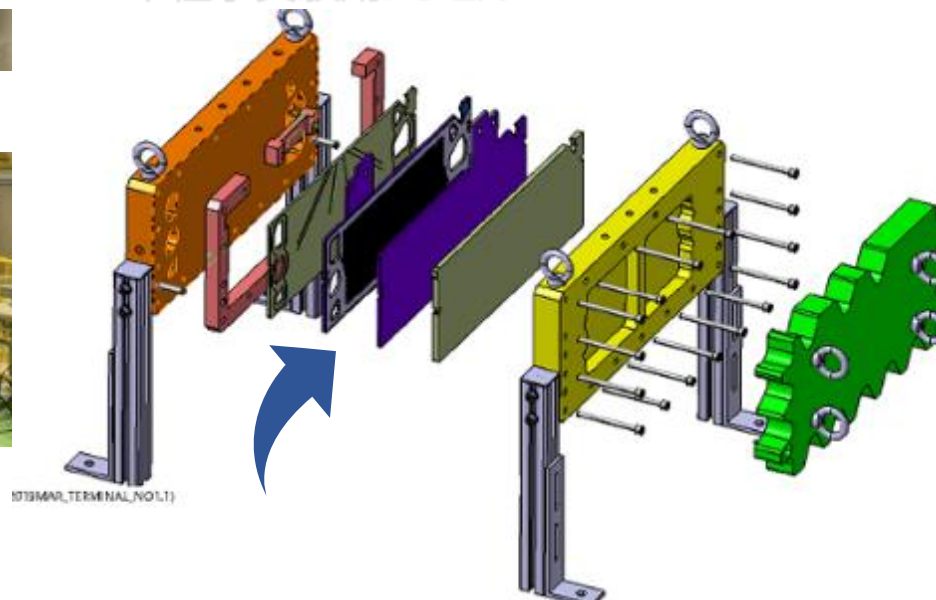
燃料電池は発電時に水を生成 → 出力の向上・高性能化には適切な水の管理が必須
 発電中のセル内部の水の観察 → 最適な燃料電池セル運転条件の把握・流路構造の設計に貢献

中性子イメージング用フルサイズ燃料電池動作環境の準備

✓ ガス供給設備・中性子実験環境



✓ 中性子実験用FCセル



✓ 発電制御・評価装置



MIRAIセル内凝縮水可視化実験 試験内容

セル温度55℃（重水D₂Oを用いてセルを温調）

アノード露点45℃、カソード無加湿

① 負荷応答試験

- IV測定 電流密度 2.2~0.1 A/cm² (600.1A~27.3A)

② 空気ストイキ応答試験

- 電流密度2.2, 1.5 A/cm² (600.0, 409.5 A)
水素ストイキ：1.25固定。空気ストイキ：2.5~1.2で変化

※試験条件はFC-Cubicにおいて事前に試験して決定

撮像条件

使用機器

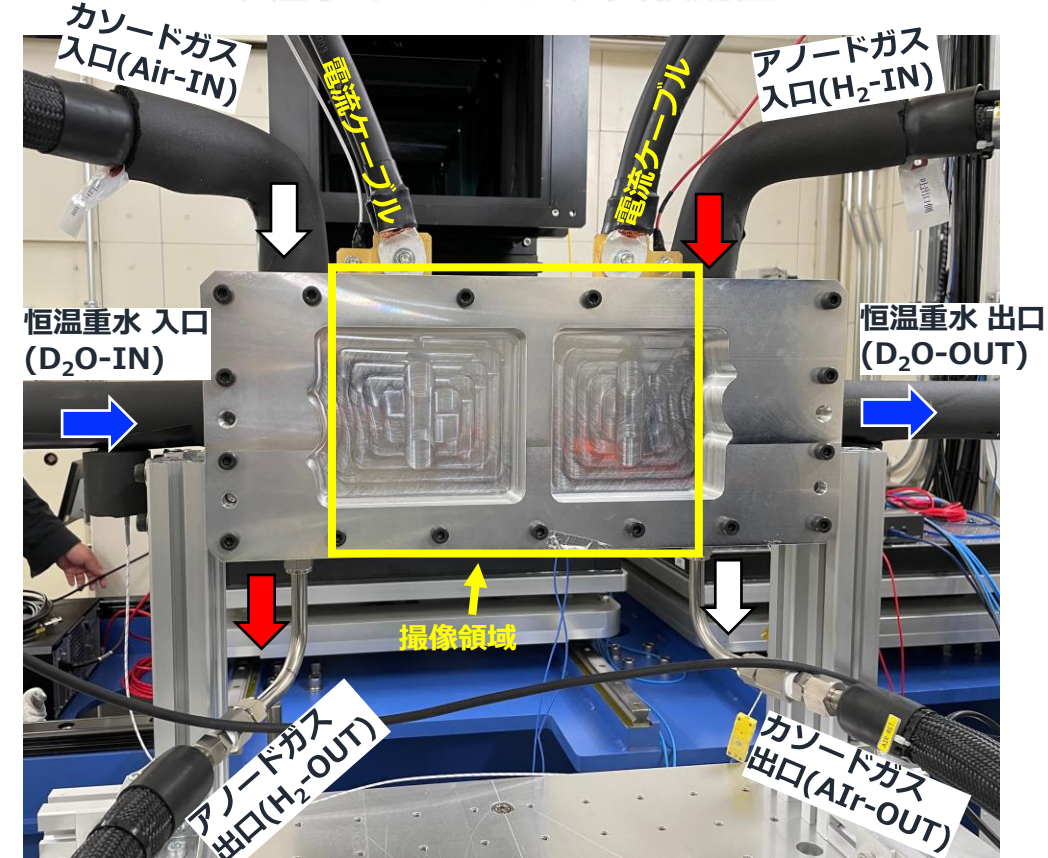
sCMOSカメラ（浜松ホトニクスORCA Flash4.0v3）

光イメージンテンシファイア（浜松ホトニクスORCA Flash4.0v3）

シンチレータ（Scintacor ND-FAST, ZnO/⁶LiF, t=0.3mm, 300×300mm²）

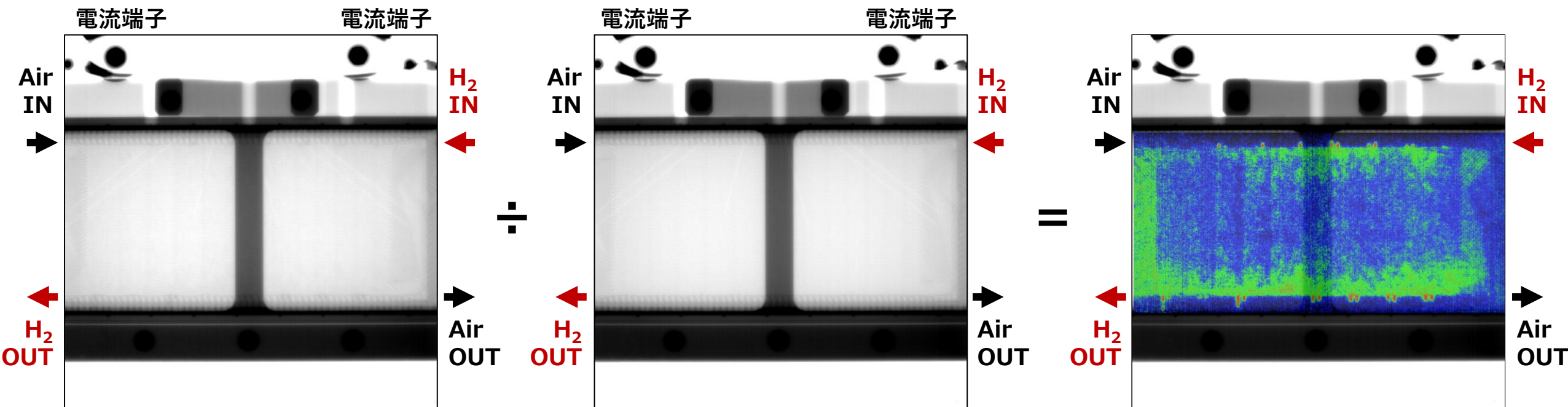
- 露光時間 1秒×300枚
- 中性子波長範囲 2.3~8.8Å

中性子イメージング実験配置



セルは4cm厚のアルミ合金製
エンドプレートで拘束
(総厚10.33cm)

画像処理



①中性子透過率像 (55℃ 発電中)

$$T_{op} = \exp(-(\mu_{water}t_{water} + \sigma_{dry}))$$

②中性子透過率像 (55℃ 乾燥後)

$$T_{dry} = \exp(-\sigma_{dry})$$

①/② = 凝縮水による中性子透過率像

$$T_{water} = \exp(-(\mu_{water}t_{water}))$$

凝縮水による中性子透過率像

$$\ln(T_{water}) = -(\mu_{water}t_{water})$$



既知の厚さの水の中性子透過率で規格化

$$\ln(T_{water})/\ln(T_0) = (-\mu_{water}t_{water})/(-\mu_{water}t_0)$$



水分量分布画像

$$t_{water}$$

NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ (FCV・HDV用燃料電池) 40年シナリオ

プレゼンター:辻庸一郎(FC-Cubic)、陣内亮典(豊田中央研究所)、富中悟史(NIMS)
今井英人(FC-Cubic)、米田雅一(みずほリサーチ&テクノロジーズ)、葛谷孝史(豊田中央研究所)

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

- ◆ 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ビームライン設置が望まれる。



SPring-8



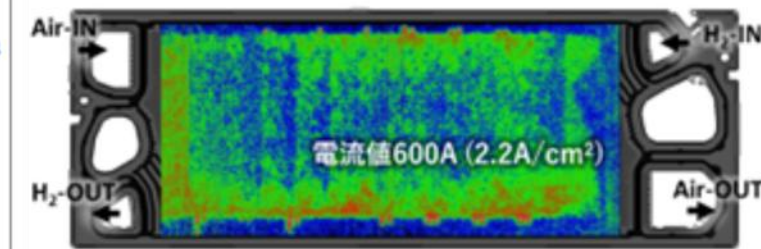
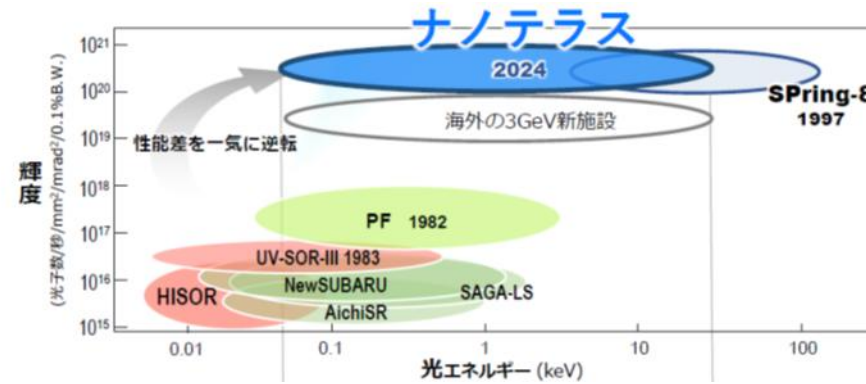
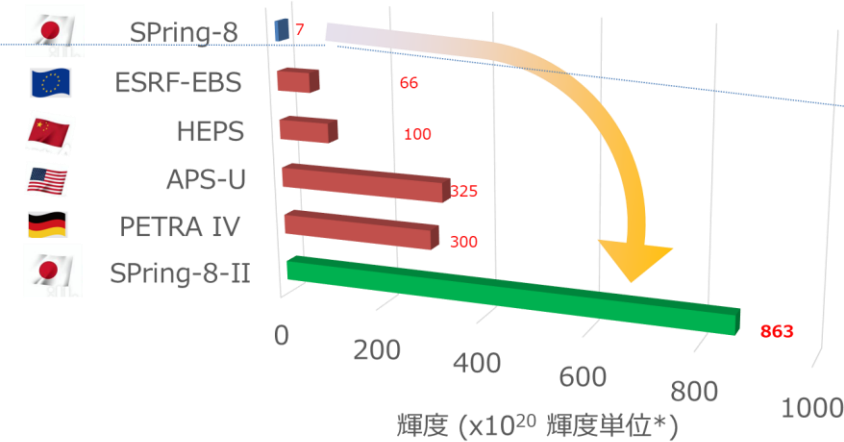
NanoTerasu



J-PARC

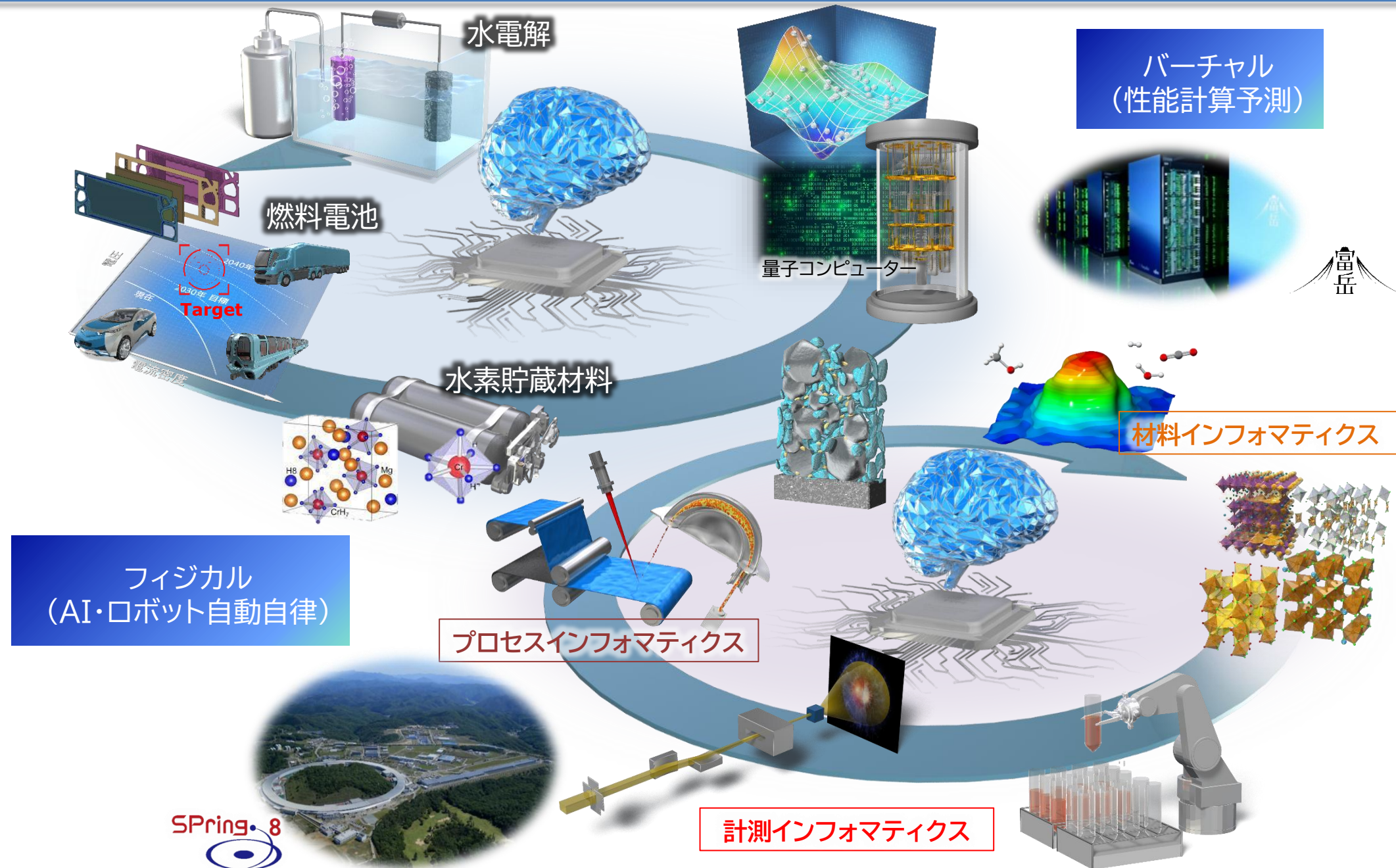
線源	放射光X線		中性子線
	高エネルギー領域(硬X線)	低エネルギー領域(軟X線)	
対象	構造 セルイメージング プロセス技術	界面構造/反応解析 化学結合 新原理材料開発	構造・分子運動(水、プロトン) 大視野イメージング 実機・材料・部品開発
技術 (手法ニーズ例)	高エネルギーX線回折・全散乱 雰囲気制御下の触媒および触媒担体の 中長期構造	軟X線XAFS 燃料電池反応進行時の触媒上の酸素種の 電子構造・局所構造	中性子イメージング 燃料電池作動状態でのフルサイズセルの 水/氷分布状態
	X線小角散乱(SAX) 雰囲気制御下の電解質のマクロスケールの 規則構造の解析	高分解能軟X線RIXS 雰囲気制御下の触媒および触媒担体の 酸素種の電子構造・局所構造	中性子小角散乱(SANS)/反射率(NR) アイオノマ/電解質膜、接合界面のナノスケール 構造
	GI-WAXS, GI-SAXS 雰囲気制御下のアイオノマーの構造、配向性	高分解能軟X線タイコグラフィ 触媒層中のカーボン担体、アイオノマの三次元構 造	中性子準弾性散乱(QENS) 触媒層/電解質膜の水・プロトンの分子運動 (拡散・振動・回転)

- ◆ SPring-8-II へのアップグレードが決定し、NanoTerasuの稼働するなど、日本の量子ビーム研究施設的能力が增強されている。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





ご清聴ありがとうございました

本日の内容は、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/プラットフォーム材料の解析と解析技術高度化の技術開発の中で実施されました。