

燃料電池・水素イノベーション研究センター

燃料電池・水素
イノベーション
研究センター



<http://www.icfc.uec.ac.jp/>

グリーン水素からクリーン電気エネルギー及び材料デバイス

世界唯一のオペランドマルチ同時系列計測が可能な放射光ビームラインBL36XUを用いて次世代燃料電池開発、水素材料デバイス創出、及び持続的CN社会の実現に貢献

カーボンニュートラル(CN)モビリティ社会を実現するため、次世代燃料電池の大幅な市場拡大に向けて、また、本学での水素・燃料電池研究の拠点として、2010年5月1日に燃料電池イノベーション研究センターが設立され(2022年10月1日に燃料電池・水素イノベーション研究センターに名称変更)、放射光BL36XUを用いたoperandoマルチ同時系列計測評価を推進しています。

センター組織(2024年4月1日)

センター長 岩澤康裕特任教授

電気通信大学(東6号館) メンバー 4名

電気通信大学SPring-8拠点 メンバー 3名

2024年度研究体制

岩澤 康裕	センター長・特任教授
宇留賀 朋哉	特任教授(非常勤)、JASRI研究プロジェクト推進室
三輪 寛子	副センター長・情報理工学研究科・共通教育部准教授
吉田 健文	客員准教授、和歌山大システム工学部講師
佐々木 岳彦	客員准教授、東大院新領域准教授
関澤 央輝	客員准教授、JASRI/SPring-8所員
金子 拓真	支援協力者、JASRI研究プロジェクト推進室

センターの目的は

水素燃料電池の実用化・本格普及は我が国の政策的課題であり、資源・エネルギーが乏しく、自然災害・環境問題を抱える我が国の将来の持続的発展と社会生活を支える先進科学技術として、2040年頃の燃料電池車（特にHeavy-Duty Vehicles）の本格的商用化に向けて格段の性能と長期耐久性の革新的向上、低コスト化等、次世代燃料電池技術開発は我が国の社会的最重要課題の一つと位置付けられています。

次世代HDV用燃料電池の合理的設計・先進開発のためには、燃料電池内部の電極触媒の構造と電子状態の動的挙動、触媒作用、劣化、被毒・回復の本質とメカニズムを科学的に解明し理解することが必要です。これを可能にするアプローチ・測定方法は高輝度放射光を用いるX線吸収微細構造(XAFS)、X線発光分光(XES)、3次元XAFS-CTイメージング、及び相補的なXRD、HAXPES等のX線分析法です。

本センターは、NEDOプログラムの下、SPring-8大型放射光施設に燃料電池計測評価用の世界オンリーワン・世界最高性能を持った新ビームラインBL36XU「先端触媒構造反応リアルタイム計測ビームライン」を建設し、燃料電池触媒の構造・反応と劣化、及び被毒・回復過程をin-situ/operando、時間軸、空間軸、エネルギー軸の4次元視点で計測解析、及びオペランド可視化できる手法を開発・確立し、さらにマルチ同時系列計測システムを実現しました。

現在、オペランドXES（HERFD-XANESとRIXS）法を用いて、燃料電池触媒機能と関連する酸素吸着種解析と劣化機構解明、さらに硫黄被毒・回復現象の計測評価を行い、材料開発グループへのフィードバック、材料解析プラットフォームへの情報提供を行うNEDOプログラムを推進しています。これにより、燃料電池を用いた商用車、トラック、バス、電車、船舶、フォークリフト、農機具等の本格普及・実現を図り、持続的カーボンニュートラル（CN）人類社会に貢献したいと考えています。

これらと並行して水素材料デバイス創出及び量子ビーム（ミュオン、陽電子等）材料計測評価も進めていきます。

ビームラインBL36XUの設置の背景・目的とNEDOプログラム

将来の水素社会、超スマート地域社会、緊急分散電源のクリーンなエネルギー源と期待される水素燃料電池の電極触媒の作用は、いまだ“ブラックボックス”の状態であり、次世代燃料電池電極触媒の開発設計の障害となっている。これは、化学プロセスの多くを実現している固体触媒が依然として“ブラックボックス”と言われることと同様大きな問題であり、電極触媒と固体触媒の活性・劣化・メカニズムなどの理解・解明には新たな評価解析手法の開発が課題である。

* 特に燃料電池では、ウェット状態下でMEA内部の作動下の触媒の構造反応 (“生きた状態”) を評価・解析することが必要であるにも関わらず、それを実現できる計測・評価システムがほとんど存在しなかったことが大きい。

* ウェット・不均質・不均一空間分布・多相・界面など複雑環境の燃料電池触媒に対し、燃料電池の発電部位である膜電極接合体 (MEA: membrane-electrode assembly) 内の3次元空間に分布する活性金属 (Pt等) の局所構造、結晶相、及び電子状態などの解析を*in situ/operando*下、原子レベルで行える唯一の手法はX線吸収微細構造 (XAFS)、X線発光分光 (XES) 法、及びXAFS-CT法であり、それと相補的な放射光X線解析法とのマルチ計測である。

* しかし、既存の放射光ビームラインでは、ビーム光学系の制約、放射光測定技術から、*in situ/operando*、時間軸、空間軸、及びエネルギー軸の4次元的視点で対象物質・材料を計測解析、可視化することはできない。また、XAFSと相補的情報を与えるCT(コンピュータ断層撮影)、AP-HAXPES (雰囲気制御型硬X線光電子分光)、RIXS (共鳴非弾性X線散乱)、時間分解XRDなどの*in situ/operando*マルチ同時系列計測が困難である。

NEDOプログラム (2010 - 2014年度)

固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発/MEA材料の構造・反応・物質移動解析/"時空間分解X線吸収微細構造 (XAFS) 等による触媒構造反応解析"

SPring-8に世界最先端の燃料電池触媒解析用の新ビームラインBL36XUを建設し、燃料電池触媒の活性構造、表面反応と劣化過程を*in situ/operando*、時間軸、空間軸で計測・解析できる手法・システムを開発した。(電通大(中心)、名大、分子研; JASRI/SPring-8協力)

NEDOプログラム (2015 - 2019年度)

固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発/普及拡大化基盤技術開発/触媒・電解質・MEA内部現象の高度に連成した解析、セル評価/MEA性能創出技術開発/"MEA劣化機構解明"/"他NEDOプログラム支援"

最先端のビームラインBL36XUを用い、燃料電池内部の触媒の構造・反応と劣化過程を"*in situ/operando*、時間軸、空間軸、エネルギー軸の4次元的視点で計測・解析、及びオペランド可視化できる世界オンリーワンのマルチ同時系列計測システムの実現を達成し"、燃料電池MEAカソード触媒機能の最大限化と劣化機構解明を行った。得られた基盤情報を材料開発グループにフィードバックし、併せて高性能・高耐久電極触媒の設計指針を提示した。

NEDOプログラム (2020-2024年度)

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/共通課題解決型基盤技術開発/プラットフォーム材料の解析及び解析技術の高度化の技術開発

HERFD-XANES(高分解能XANES)/RIXS(共鳴非弾性X線散乱)/QXAFS/XRDによる固体高分子形燃料電池 (PEFC)の硫黄被毒・回復現象のオペランド計測評価解析法の確立とその燃料電池系への展開を図る。

「燃料電池計測用ビームラインBL36XUの概要



大型放射光施設
SPring-8

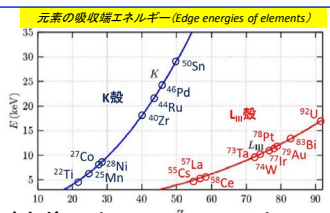
BL36XUビームライン

BL36XUビームラインは世界オンリーワン・世界最高性能を持ち次世代燃料電池開発とクリーンエネルギー科学研究を牽引しています。

BL36XUで開発整備された放射光分析手法

● PEFC用先端XAFS計測法

- エネルギー範囲: 4.5 ~ 35 keV
- 時間分解能: 100 μs (エネルギー分散XAFS法)
2 ms (クイックXAFS法)
- 空間分解能: 100 nm (2D/3D 走査型XAFS/XRD-CT法)
1 μm (3D 投影型XAFS-CT法), 50 nm (3D 結像型XAFS-CT法)

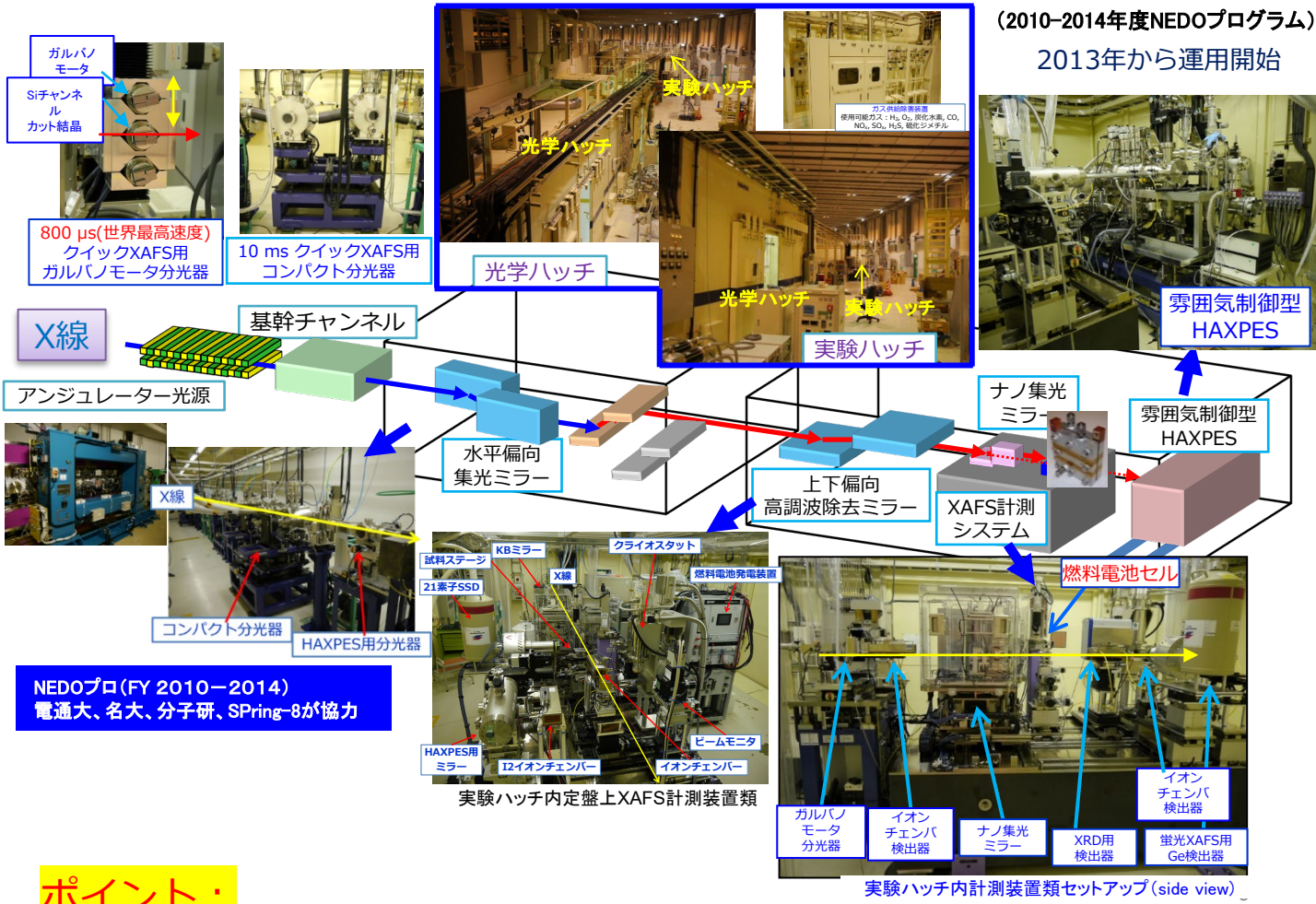


計測法	分解能			適用試料		特徴
	時間	平面	深さ	実セル	希薄	
10msクイックXAFS	10 ms	100 nm	-	○	○	基盤計測法
2 msクイックXAFS	2 ms	100 nm	-	○	×	高速計測特化
DXAFS	100 μs	100 μm	-	×	×	モデル試料, 超高速
時間分解XAFS/XRD	60 ms	100 nm	-	○	×	XAFS/XRD同時
3D 投影型XAFS-CT	1 h	1 μm	1 μm	○	×	In situ 3D計測
3D 結像型XAFS-CT	3 h	50 nm	100 nm	○	×	In situ 高分解3D
2D/3D 走査型マルチ モーダルCT	5 h	100 nm	100 nm	○	○	希薄元素3D XAFS/XRD同時
高エネルギー分解 蛍光XANES	1 min/ 20 ms	100 μm	-	○	○	触媒表面吸着種同定 時間分解
RIXS	1.5 h	100 μm	-	○	○	触媒粒子表面電子状態
雰囲気制御HAXPES	10min/<1s	10 μm	-	○	×	完全大気圧, 時間分解
時間分解X線全散乱	100 ms	100 μm	-	○	×	Uピンクビーム

赤: 世界初 青: 世界最高レベル 青枠: 現行プロジェクト整備

SPring-8に燃料電池解析評価専用のビームラインBL36XUを建設 及び固体高分子形燃料電池(PEFC)のオペランド評価解析技術開発

(2010-2014年度NEDOプログラム)
2013年から運用開始



NEDOプロ(FY 2010-2014)
電通大、名大、分子研、SPring-8が協力

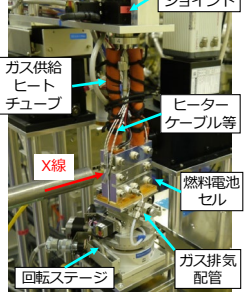
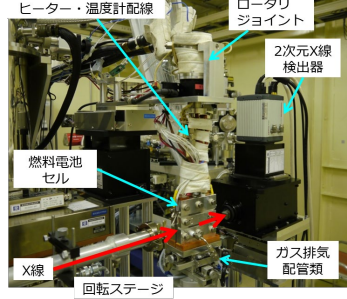
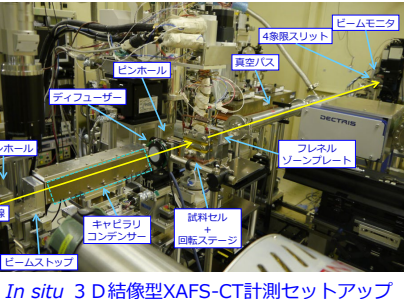
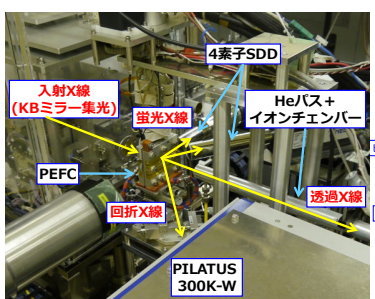
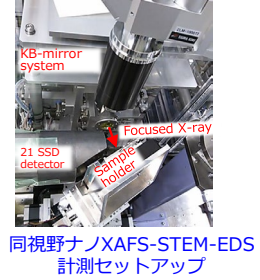
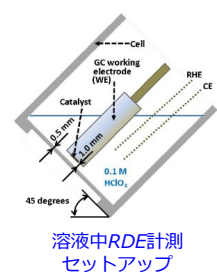
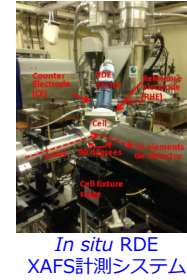
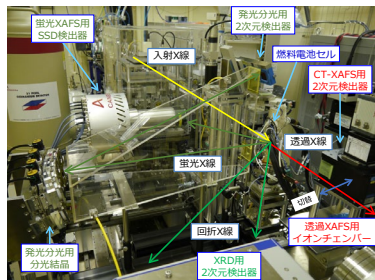
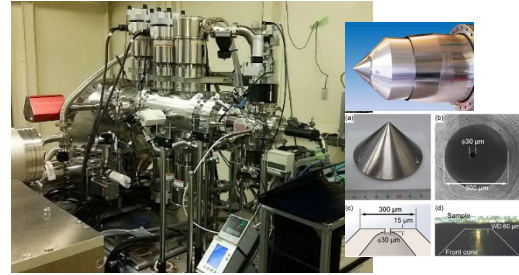
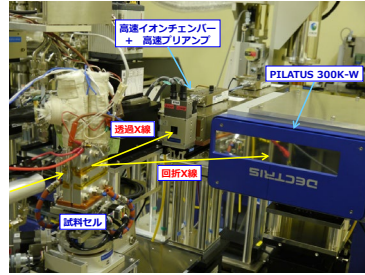
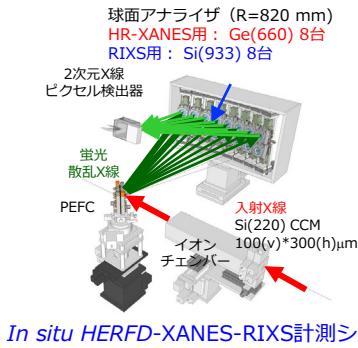
ポイント:

- ① 燃料電池のその場計測に特化した世界でも例のないビームラインを建設。
- ② 電極触媒の劣化過程や反応機構の解明により、燃料電池開発における各種課題の診断が可能であることを実証。
- ③ 燃料電池診断に必要な世界最高性能・世界初の基盤技術を多数開発。

BL36XUで開発整備された燃料電池計測システム群： 世界オンリーワン・世界最高性能のマルチ同時系列計測システム

(2015-2019年度NEDOプログラム)

2016年後半から運用開始



In situ 走査型蛍光XAFS-CT-XRD同時計測システム

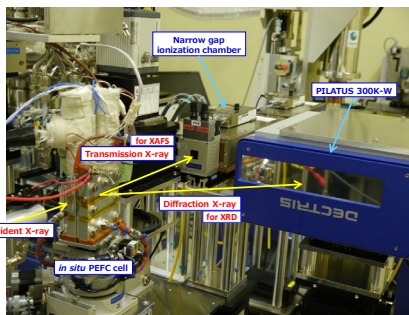
In situ 3D透過型XAFS-CT計測セットアップ

In situ 3D投影型XAFS-CT計測セットアップ

ポイント：

- ①最先端可視化計測技術開発・高度化を推進。
- ②in-situ/operandoマルチ同時系列計測システムの開発・整備。
- ③世界的にも例のない燃料電池のoperando可視化診断技術を開発。
- ④世界を先導する世界唯一のBL36Xビームラインを用いた研究推進を基に産業界の研究開発加速のための基盤情報提供。

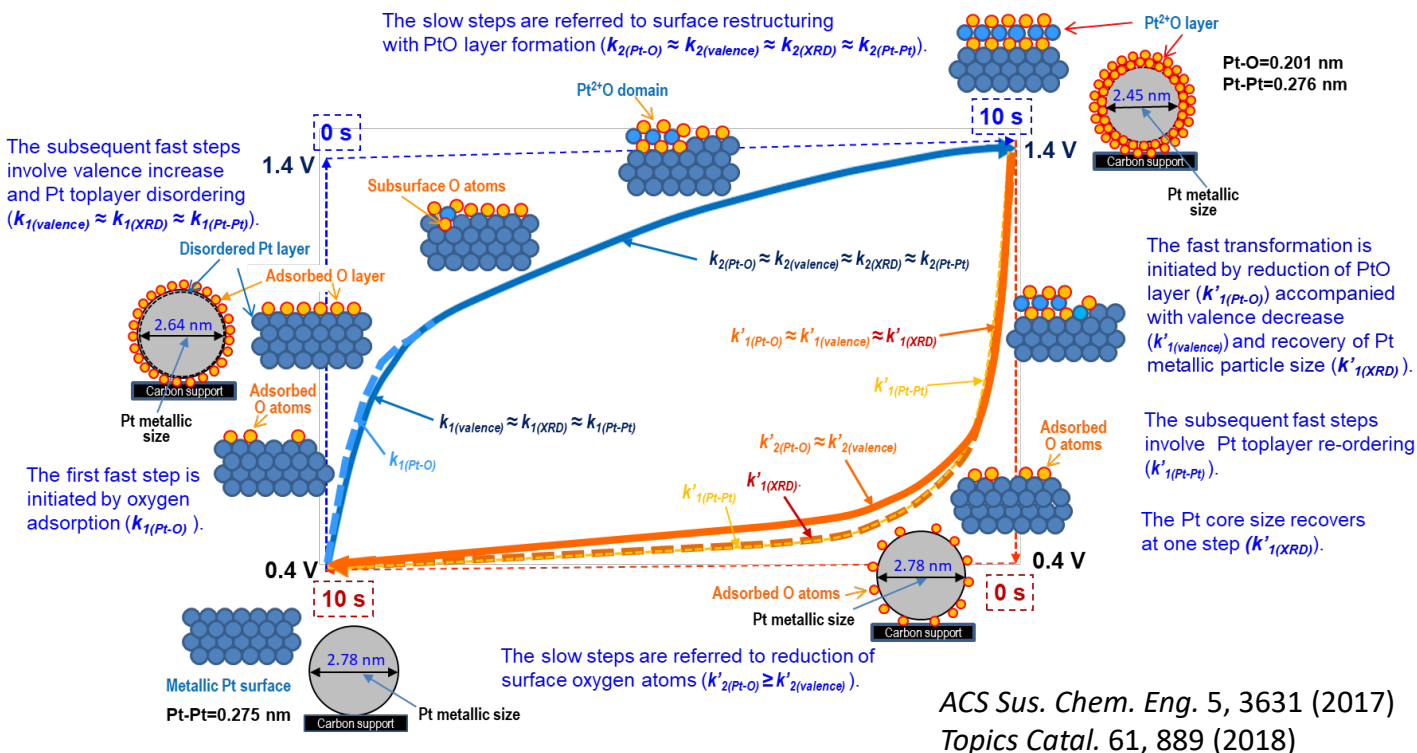
BL36XUを用いた最近の研究成果から①



- 1 cycle 時間分解能 : 60 ms (個々は20 ms時間分解)

MEA Pt/Cカソード触媒の *in situ* 時間分解XAFS-XRD同時計測から明らかになったこと

触媒作用の素反応過程とメカニズムは単に定常状態での計測では観察が困難であることが多い。そのような場合は、ある電圧（電流）での平衡状態/定常状態から急激に電圧（電流）を変えて新たな平衡状態/定常状態に移る時の触媒作用の過渡応答を時間分解測定することで、定常状態では見えなかった素反応過程（メカニズム）が見えてくる。



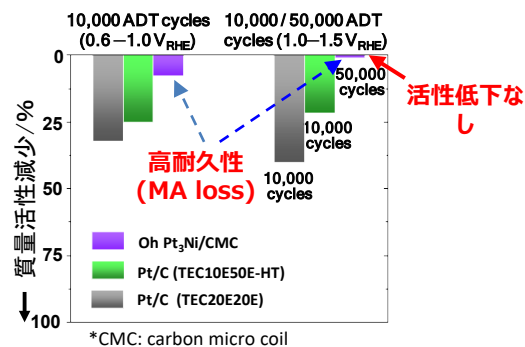
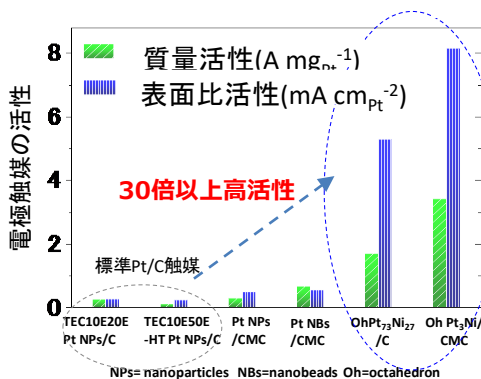
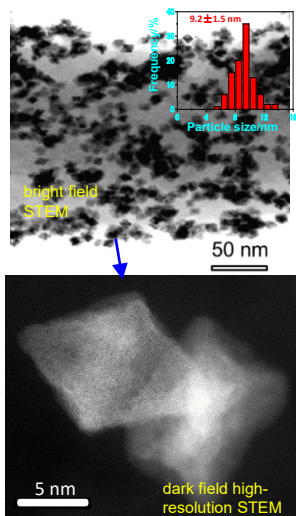
- * 時間分解XAFS/XRD同時計測によりMEA Pt/Cの過渡応答過程（電位変化）のメカニズムが確定された。
- * MEA Pt/Cの過渡応答は、表面（活性因子）が1秒程度であるが、サブサーフェス酸素形成（劣化因子）は10秒のオーダーである。従って、実走下の高電位変動が0.5秒以内に抑えれば劣化は抑制可能。

BL36XUを用いた最近の研究成果から②

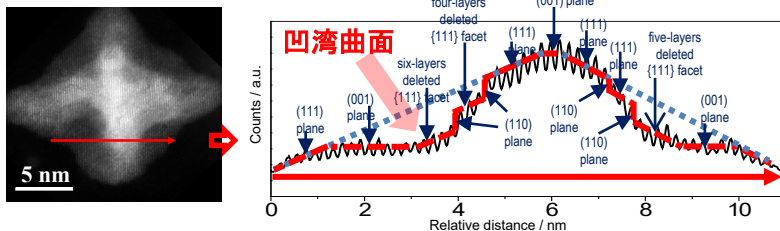
極めて活性が高く耐久性も高い湾曲型新規Pt₃Ni/CMC触媒を開発

日本経済新聞 2018年4月30日掲載

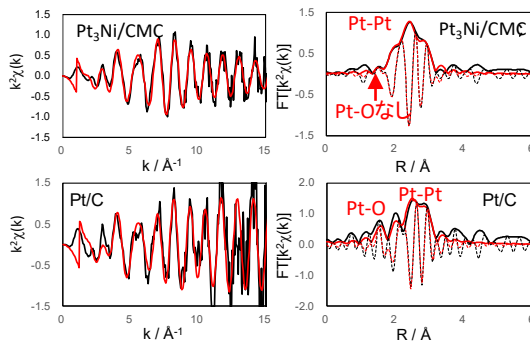
開発したPt₃Ni/Carbon触媒は市販Pt/Cより30倍以上高活性・高耐久性



Cross-section analysis



In situ Pt L₃-edge EXAFS analysis



ACS Catal. 7, 4642 (2017); Chem. Record, 19,1337 (2019).

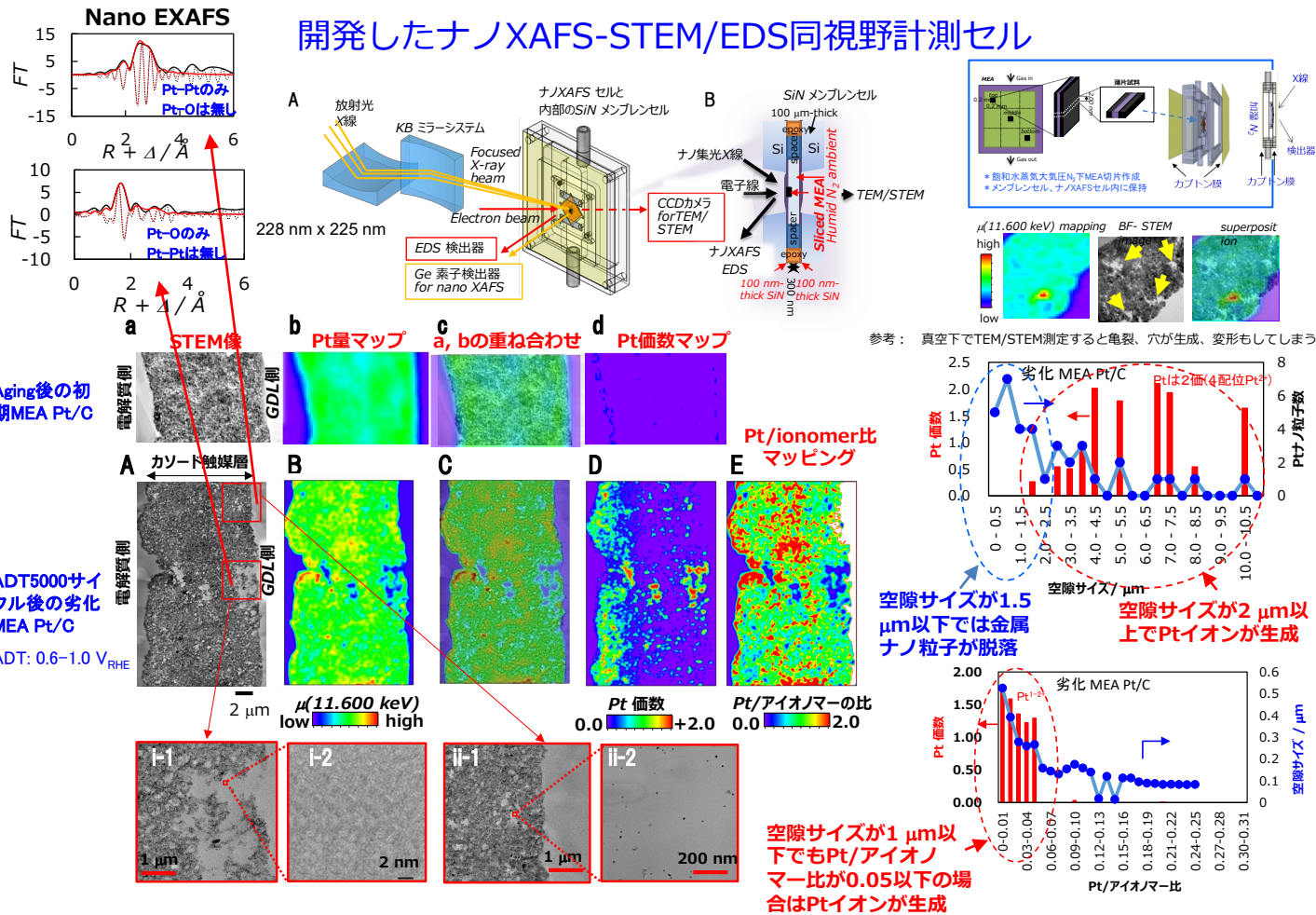
課題：RDEでは非常に高活性であるが、
MEA内では触媒粒子の有効利用率が低いことが問題

BL36XUを用いた最近の研究成果から③

劣化前後のMEAカソードPt/C触媒層の大気圧飽和水蒸気下STEM/EDS-ナノXAFS同視野計測

カソード触媒の劣化後の大気圧飽和水蒸気下のSTEM/EDS-ナノXAFS同視野計測を初めて実現し、Pt/アイオノマー比および空隙サイズが制御因子となって、PtがPt²⁺イオンとしてカーボンから酸化溶出するか、またはPt金属ナノ粒子としてカーボンから脱落していることを見出した。

開発したナノXAFS-STEM/EDS同視野計測セル



カーボン空隙サイズとPt/アイオノマー比がPt挙動の制御因子

Angew. Chem. Int. Ed. (2014)
 J. Phys. Chem. Lett. (2015)
 Topics Catal. (ISHHC-7) (2016)

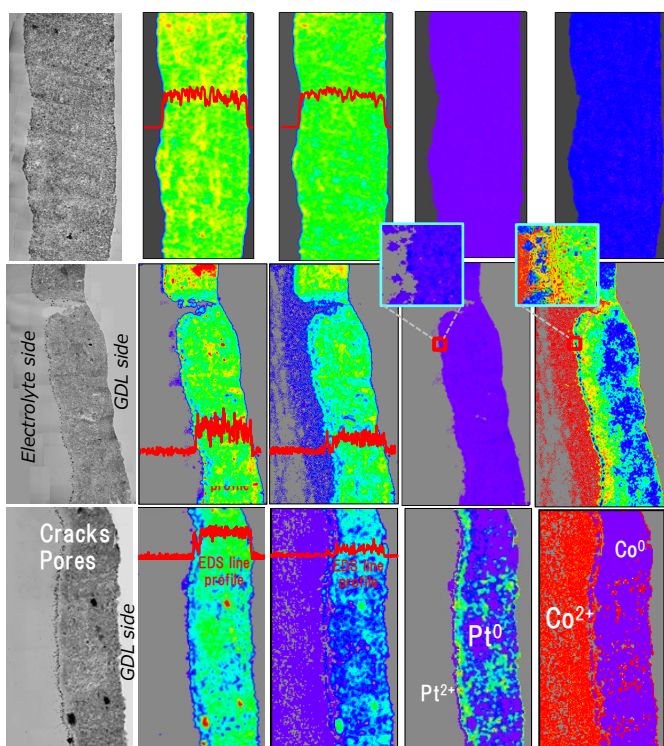
BL36XUを用いた最近の研究成果から④

劣化前後のMEAカソードPt₃Co/C触媒層の大気圧飽和水蒸気下STEM/EDS-ナノXAFS同視野計測

開発したSTEM/EDS-ナノXAFS同視野計測法を用いてADT劣化過程におけるMEA Pt₃Co/Cのカソード触媒層と電解質領域のPtとCoの量と酸化状態の変化を初めて可視化

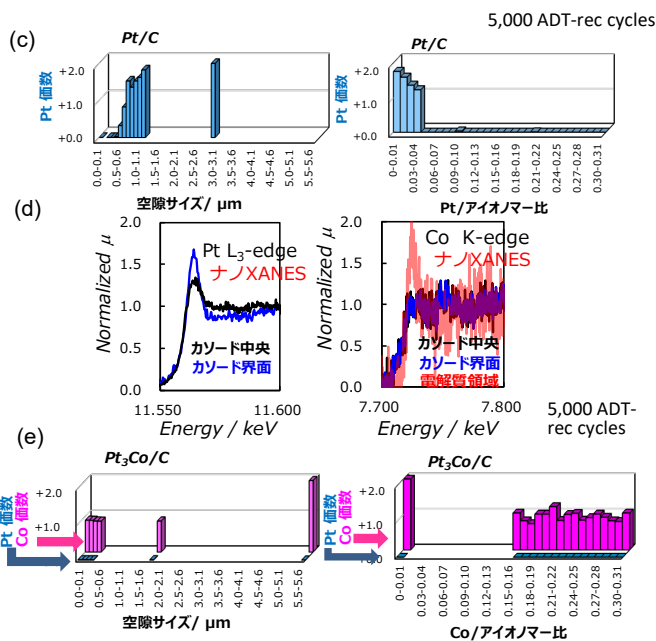
ナノXAFS-STEM/EDSの同視野計測法によるMEA劣化機構解明とCoの効果

高電位(三角波1.0-1.5 V)ADTサイクル劣化過程の2次元可視化



Ptの量と酸化状態の分布を可視化
Coの量と酸化状態の分布を可視化

MEA内Pt/CのPt価数(Ptイオン化溶出)とPt⁰(Ptがカーボンから脱落)はカーボン空隙サイズ及びPt/アイオノマー比に依存。PtはPt²⁺+4配位イオンに酸化・溶出。



MEA内Pt₃Co/CのPt価数或いはCo価数の空隙サイズ及びCo/アイオノマー比との関係：Pt酸化は抑制される。Coはカーボン腐食の空隙サイズやCo/アイオノマー比によらずCo²⁺+6配位イオンに酸化・溶出。

BL36XUを用いた最近 の研究成果から⑤

In situ 3次元投影型CT-XAFS計測

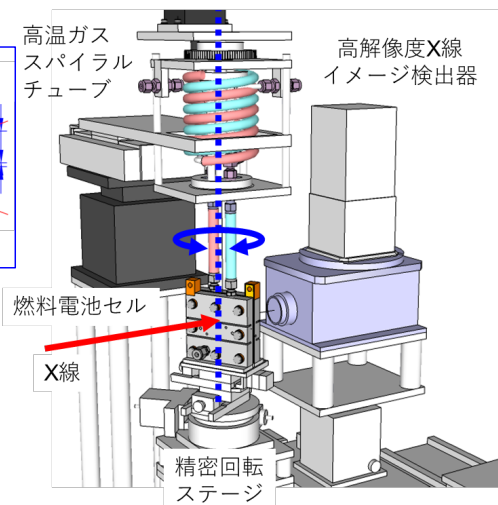
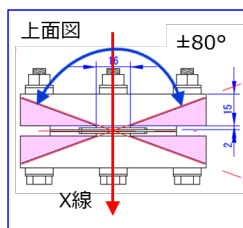
名大唯教授との共同研究

燃料電池動作下の3次元イメージング (世界初)

- 空間分解能: 1 μm 、観察視野: $\sim 500 \mu\text{m}$

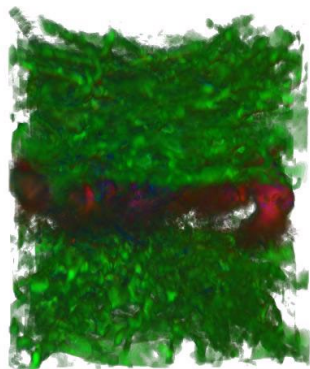
計測方法の迅速化・高精度化 (2.5 hr \Rightarrow 0.8 hr)

- 計測セル角度で2次元クイックXAFS透過像計測
- 計測セル角度点数: 1/10に圧縮
 - ✓ $-80 \sim 80^\circ / 0.1^\circ = 1600$ 点 $\Rightarrow 1^\circ$ step = 160点
- セル内水滴発生抑制
 - ✓ 高温ガス導入部スパイラルチューブ等の開発



解析方法の迅速化・高精度化 (数ヶ月 \Rightarrow 3日)

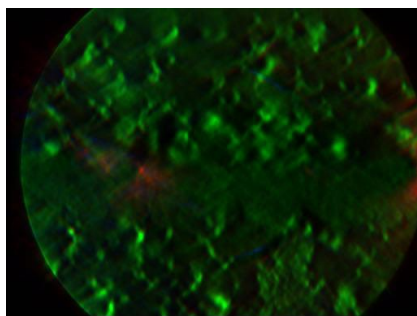
- 検出器各画素に対しXAFS解析を行い、得られたPt吸収量、XANESピーク強度、吸収端前強度を3次元再構成し、Pt分布、Pt価数分布、モルフォロジーを直接計算 (名大開発)



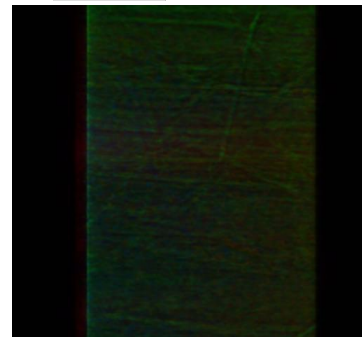
100 μm

In-situ燃料電池3次元再構成像

- ✓ 加速劣化前 @ 0.4V (還元状態)
- ✓ 赤: Pt分布、青: Pt酸化度
- ✓ 緑: GDL、AN触媒、カーボン担体等



膜厚方向断面



膜面方向断面

J. Phys. Conf. Ser., **849**, 012022 (2017).
Angew. Chem. Int. Ed., **56**, 9371 (2017).

注: 元データは動画 (3次元可視化)

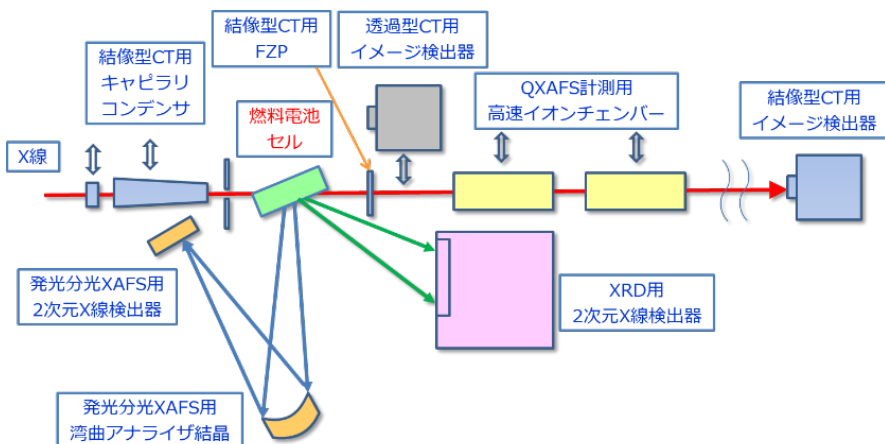
BL36XUを用いた最近の研究成果から⑥

In situ 同視野マルチ同時系列計測システム（世界初）

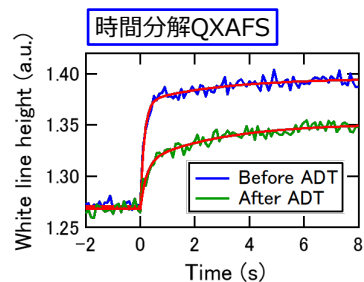
- 燃料電池内の反応・劣化は、空間的に不均一に進行する
⇒ 同一箇所に対して、できるだけ同状態で、時間分解・空間分解・エネルギー分解計測法により多角的に調べることで、初めて確度の高い情報が得られる

劣化過程の多角的解明： 加速劣化試験過程の各段階で以下の計測を同一箇所について行う

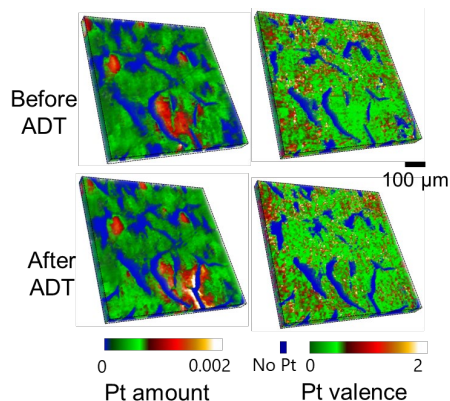
- 電位過渡応答に対する時間分解XAFS/XRD計測により、触媒の反応素過程を調べる
- in-situ XAFS-CT計測により、PEFC内の触媒層・電解質膜層の形態、触媒の3次元化学状態分布を調べる
- CV同期HERFD-XANES計測により、触媒粒子表面の吸着種を調べる。



In situ 同視野複合同時系列計測システム概念図



In-situ 投影型XAFS-CTイメージング



注：元データは動画（3次元可視化）

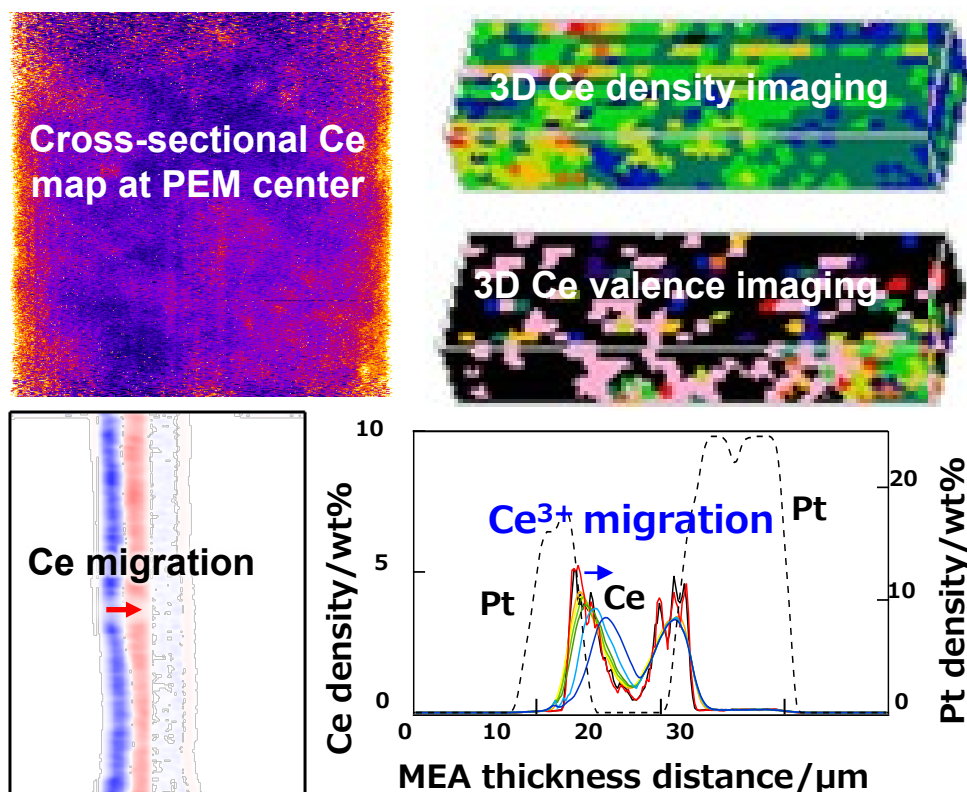
BL36XUを用いた最近 の研究成果から⑦

燃料電池電解質膜のラジカル破壊を防ぐCeスキャベンジャー のオペランド CT-XAFSおよびナノXAFS/SEM-EDS計測

オペランドCT-XAFSおよびナノXAFS/SEM-EDSによりMEA内のCe
ラジカルスキャベンジャーのオペランド3次元イメージングに成功し、
種々の電圧条件下でのCe分布と移動現象の可視化評価に成功

名大唯教授との共同研究

MEA内のCeラジカル捕捉剤のoperando 3次元 イメージングとCe移動の可視化解析を初めて実現

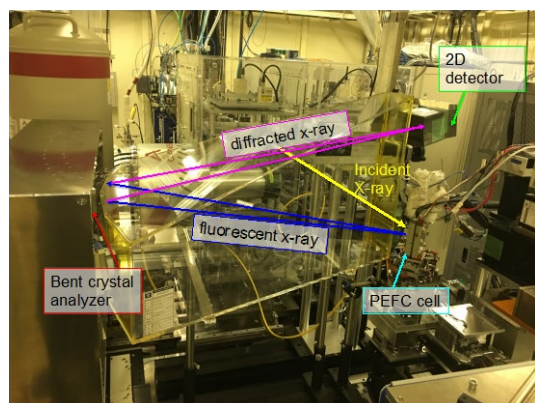
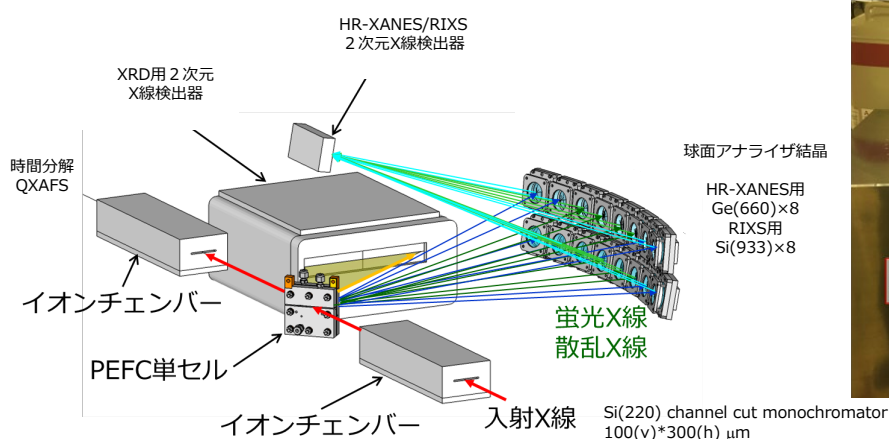


Ce分布(Ce^{3+} & Ce^{4+})およびCe移動速度の決定

BL36XUを用いた最近 の研究成果から⑧

オペランドHERFD-XANESとRIXSによる 燃料電池カソード触媒被毒・回復現象の解析

整備確立した下図のオペランドマルチ同時系列計測システムを用いて、HERFD-XANES/RIXS/XAFS/XRD評価解析により、硫黄によるMEA Pt/C触媒の被毒及びその回復現象の定量的な評価解析法を確立



BL36XU実験ハッチ内のセットアップ写真

確立したオペランドHERFD-XANES/RIXS/XAFS/XRDマルチ同時系列計測システム

- * 論文執筆中
- * 定量的な解析結果を元にした産業界等への情報、データの提供を行う。

これまでの研究実績によって、燃料電池動作下、電気化学反応条件下、或いは触媒反応下で、評価可能になった計測評価解析：

- (1) 燃料電池MEA内部や電極触媒の金属種 (Pt、Co、Ce等) の活性化構造と電子状態の分析
- (2) 構造変化と反応プロセスの解析
- (3) ナノ粒子結晶相と表面層の構造の同時計測
- (4) 劣化過程の触媒構造と電子状態の分析
- (5) Aging過程、実走行モード条件下、劣化過程等のPtやCo等活性金属種の量・構造・酸化状態、カーボン担体の劣化亀裂・腐食、及び金属酸化物系触媒の不均一性・活性相・劣化等の2次元及び3次元分布の可視化と制御因子の情報
- (6) 燃料電池発電中のMEA内部のPtやCo等の触媒の3次元分布・化学状態を非破壊で直接的にインフォグラフィック診断可能
- (7) 電解質膜・アノード・カソード内の金属種 (イオン、ナノ粒子等) 物質移動の可視化分析
- (8) MEA電極表面の酸素吸着種や被毒硫黄種の同定と電位依存性の計測評価
- (9) MEA内電極表面及び近傍のNAP-及びAP-HAXPES或いは時間分解HAXPES計測評価
- (10) 周期表でTi以上のほとんど全ての元素の触媒・材料の*in situ*、時間軸、空間軸、エネルギー軸の計測が可能

特徴ある研究成果：

1. オペランド計測への対応が可能なたもグラフィーの利用を開始し、燃料電池発電中のMEA内部の電極触媒の分布、状態を3次的に画像化できる*operando* CT-XAFS法を開発し、不均質な触媒劣化の様子を直接画像化できる手法を世界で初めて提供し、MEA内部のPt触媒の3次元分布・状態を、発電条件下、非破壊で直接的に診断可能になった (名大ー電通大)。 *Angew. Chem. Int. Ed.* **56**, 9371 (2017)
2. MEA内のPtやCoの溶出・脱落・凝集が起こる境界域、空隙サイズ、アイオノマー濃度等を2次的に評価解析が可能である*operando*ナノXAFS-STEM/SEM/EDS同視野評価解析法を開発し、MEA内の金属種の状態・構造分析と挙動をMEA面内方向及び膜厚方向で長時間・高空間分解で計測評価が可能となった。 *J. Phys. Chem. Lett.* **6**, 2121 (2015); *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 2299 (2020)
3. PEFC活性・劣化に直接影響を与えるPt表面の吸着酸素とdバンドセンターをPEFC動作下で計測するためのHERFD-XANESとRIXSの*operando*計測評価法を初めて実現させた。 *Chem. Rec.* **19**, 1444 (2019)
4. 大気圧HAXPES開発 (分子研一名大ー電通大)。 *Acc. Chem. Res.* **51**, 719 (2018)
5. 高活性・高耐久な新規電極触媒の設計開発。 *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 12856 (2015); *ACS Catal.* **7**, 4642 (2017); *ACS Appl. Energy Mater.* **3**, 5542 (2020)
6. 自動車メーカー (トヨタ自動車、本田技研工業) から喫緊の共通課題として提示された (METI/NEDOフォーラム) ラジカルクエンチャCeの価数・状態の変化と電解質膜内の移動の計測評価に成功して、成果を自動車メーカーにフィードバックした (名大ー電通大)。 *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 6762–6776 (2022)
7. 高活性な新奇PdOx/RuO2ナノシート電極触媒の開発とXAFSによる活性構造種の解明。 *Adv. Mater.* **5**, 2208860 (2023)

産業界からの強いニーズの下、BL36XUの建設・技術開発・運用推進を牽引



ウェット・不均質・多相・界面などの複雑環境下におかれるPEFCの可視化評価とマルチ評価を世界に先駆けて実現
 今後も我が国の優位性とPEFC評価解析の先進性を継続して確保・提供

特徴ある主な研究開発実績

- “*in situ/operando*”、“時間軸”、“空間軸”、“エネルギー軸”の4次元視点で、**MEAに特化した計測環境を提供**できる**世界オンリーワン・世界最高性能のビームラインBL36XU**を実現。
- MEA電極触媒の局所構造・電子状態・吸着種、MEA内の元素や化学状態の分布等の**動作下の“生きた”情報を提供できるマルチ同時系列およびイメージング評価解析技術群を構築**（世界初）。
- **産業界（自動車企業）共通課題の解決**のために計測解析技術を提供（世界初の結果を産業界にNEDOと連携してフィードバック）
- **高速XAFS/XRD同時計測によりMEA触媒構造反応リアルタイム評価**（世界初）
- PEFC内の三次元的な触媒分布と化学状態変化を評価解析可能なオペランドCT-XAFS法を開発、動作下のMEA電極触媒の**三次元可視化を実現**（名大と共同、世界初、世界唯一）。
- MEA活性、耐久性の説明と長期耐久性予測ができる**オペランド時間分解XAFS速度論を確立・実証**（世界初）。
- ナノXAFS-STEM/EDS（水蒸気飽和気圧下）の同視野計測法の開発と**MEA劣化のサイト・プロセス・因子のマッピングに成功**（世界初）。
- 高活性・高耐久な**電極触媒の設計開発**（新触媒）、他。

国内外における実績評価

論文 *Adv. Mater.* 5, 2208860 (2023) IF: 32.086
Appl. Catal. B: Environmental, 324, 122268 (2023) IF: 24.319
ACS Appl. Mater. Interfaces, 12, 2299 (2020) IF: 9.229
Acc. Chem. Res. **51**, 719 (2018) IF: 21.661
ACS Catal. 8, 11979 (2018) IF: 12.221
Angew. Chem. Int. Ed. 56, 9371 (2017) IF: 12.959
ACS Catal. 7, 4642 (2017) IF: 12.221
J. Am. Chem. Soc. 137, 12856 (2015) IF: 14.695
 他多数

招待講演 *16th International Congr. on Catal.*, Beijing, July 3–8, 2016.
253rd ACS National Meeting, San Francisco, April 2–6, 2017.
258th ACS National Meeting, San Diego, Aug. 25–29, 2019. 他

報道 日本経済新聞（2018年4月30日）
 日本経済新聞（2018年5月4日）
 日経サイエンス（2018年8月号），他

アクセス

電気通信大学 学内マップ

