

# 燃料電池イノベーション研究センター

燃料電池  
イノベーション  
研究センター



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

次世代燃料電池触媒開発とクリーンエネルギー科学を牽引する世界唯一の *operando* マルチ同時系列計測が可能な放射光 BL36XU ビームラインを用いたオペランド計測評価解析

次世代燃料電池開発研究プロジェクト推進のため、また、本学での次世代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、次世代燃料電池開発とクリーンエネルギー科学のための放射光オペランド計測評価を推進しています

センター組織 (2021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9号館 & 東6号館)      メンバー    5名

電気通信大学 SPring-8 拠点      メンバー    3名

## 2021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	特任准教授
吉田 健文	特任准教授
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	客員研究員、JASRI研究プロジェクト推進室
尾崎 日映	事務補佐員(秘書)

計 常勤教員 3名、非常勤教員 1名、客員教員 3名、事務員 1名

# 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年頃の燃料電池自動車の本格的商用化に向けて格段の低コスト化、性能と長期耐久性の革新的向上など、次世代燃料電池技術開発は我が国が解決すべき喫緊の社会的最重要課題の一つと位置付けられています。

次世代燃料電池の合理的設計・開発を妨げているのは、燃料電池電極触媒の構造、機能、触媒作用、劣化の本質が依然としてブラックボックスのままで科学的によく分かっていないことです。これに対するアプローチを可能にする測定方法は高輝度放射光を用いるX線吸収微細構造(XAFS)、XAFSイメージング、X線発光(XES)、及びそれらと相補的なCT、XRD、HAXPESなどのX線分析法です。

そこで、本センターは、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「先端触媒構造反応リアルタイム計測ビームライン」BL36 XUを建設し、燃料電池触媒の構造・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次元の視点で計測・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“複合同時系列計測システムの実現を達成し”、燃料電池触媒機能の最大限化と劣化機構解明を行い、燃料電池用触媒の特徴と具体的な開発設計指針を提示する、燃料電池XAFS等計測プロジェクトを推進することにより、次世代燃料電池自動車、商用車、バス、トラックの本格普及・実現を図ることで人類社会に貢献したいと考えています。

## 燃料電池XAFSプロジェクト

### 燃料電池触媒

#### “ブラックボックス”

- 触媒の構造・機能、劣化の原理が未だ不明
- in situ 計測・解析できる方法論が乏しい

in-situ/operando、時間軸、空間軸、エネルギー軸の4次元の視点

次世代燃料電池車  
本格普及に貢献

1992年米国ピメンテルレポート以来の最重要課題  
合理的触媒設計による触媒システム実現には:  
触媒のその場(in-situ)構造解析

時間・空間・深さ分解

科学に基づいた燃料電池触媒開発の設計指針を提供

## XAFS計測法

高活性実触媒(リアル系触媒)を直接観察する最先端ツールが必要

触媒のブラックボックスに迫る  
世界最先端時空間分解XAFSによる  
触媒構造、表面反応過程、劣化機構等

X線分析法: XAFS  
XES  
XAFS-CT  
HAXPES  
XRD, etc.

### 放射光XAFS (X線吸収微細構造)

- 触媒反応条件(気相・液相・固相)で測定可能
- 触媒反応のリアルタイム計測が可能
- リアル系触媒の空間情報まで測定可能

実触媒の高速反応条件下でのin-situ構造解析  
リアル系触媒自身の構造速度論/ダイナミクス

# 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、ウエット状態下で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。

\* ウエット・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) 法であり、それと相補的な放射光X線解析法との複合計測である。

\* 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などとの*in situ/operando*マルチ計測が困難である。

## 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XAFS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。2013年から利用開始した。(電通大、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プロ支援”

世界最先端の新ビームラインBL36XUを用い、燃料電池触媒の構造・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次元視点で世界オンリーワンビームラインを実現し、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“複合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者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

RIXS(共鳴非弾性X線散乱)とHR-XANES(高分解能XANES)による被毒硫黄の計測評価法の確立とその燃料電池系への展開を図る。

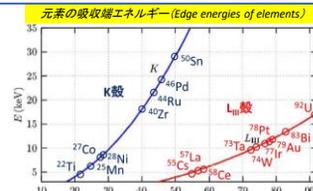
# 新ビームライン「先端触媒構造反応リアルタイム計測ビームライン」 BL36XUの概要



## 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  $\mu$ s (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  $\mu$ m (3D 投影型XAFS-CT法), 50 nm (3D 結像型XAFS-CT法)

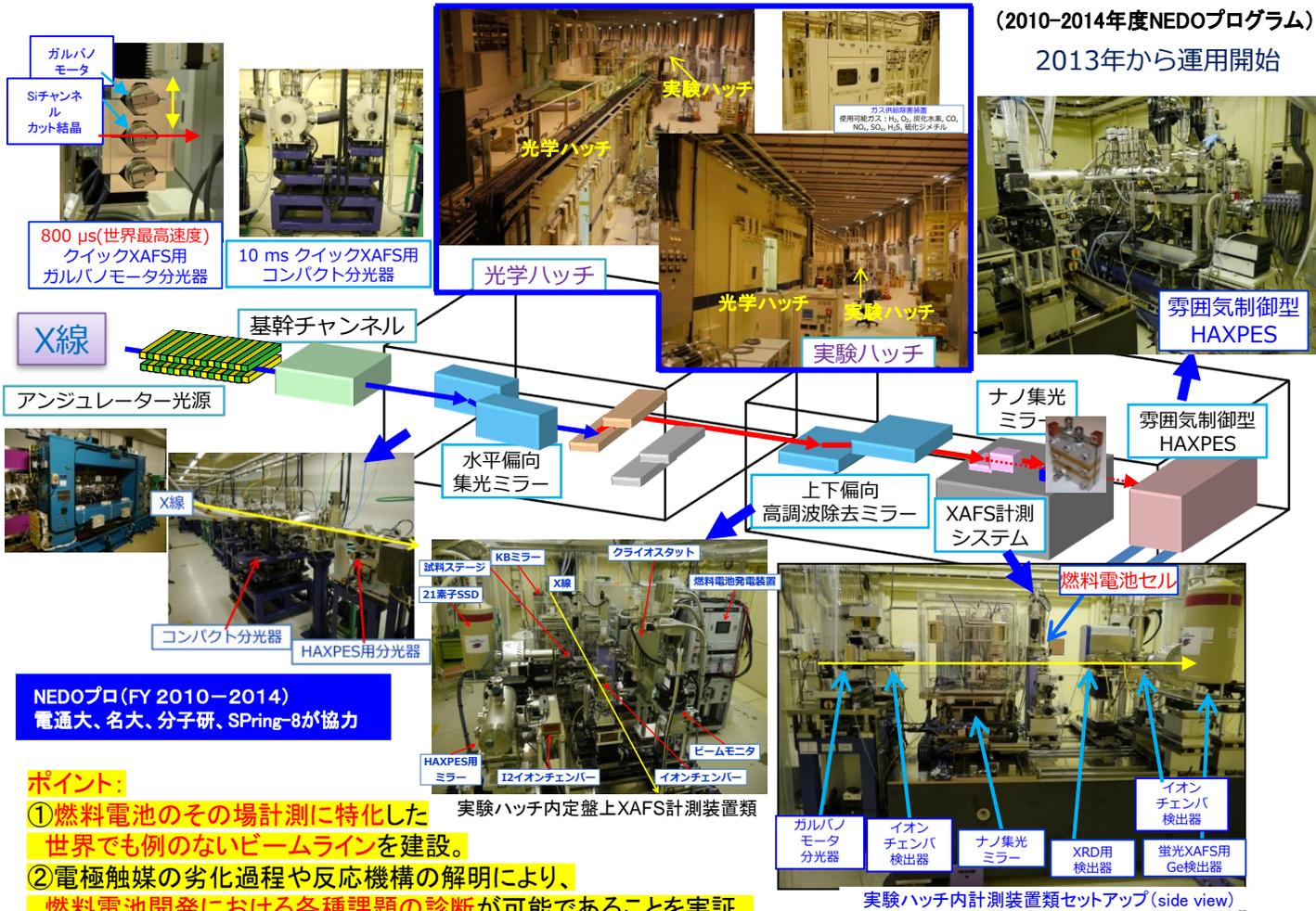


計測法	分解能			適用試料		特徴
	時間	平面	深さ	実セル	希薄	
10msクイックXAFS	10 ms	100 nm	-	○	○	基盤計測法
2 msクイックXAFS	2 ms	100 nm	-	○	×	高速計測特化
DXAFS	100 $\mu$ s	100 $\mu$ m	-	×	×	モデル試料, 超高速
時間分解XAFS/XRD	60 ms	100 nm	-	○	×	XAFS/XRD同時
3D 投影型XAFS-CT	1 h	1 $\mu$ m	1 $\mu$ m	○	×	<i>In situ</i> 3D計測
3D 結像型XAFS-CT	3 h	50 nm	100 nm	○	×	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

赤: 世界初 青: 世界最高レベル

# SPring-8に燃料電池解析評価専用の新ビームライン(BL36XU)を建設 およ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。

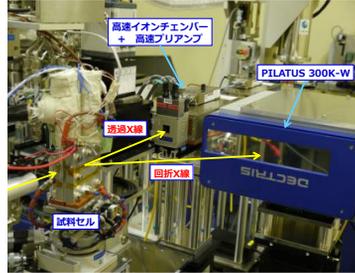
# BL36XUで開発整備された燃料電池計測システム群：世界オンリーワン・世界最高性能のマルチ同時系列計測システム

## ポイント：

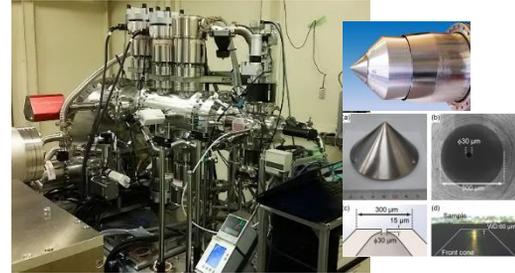
- ①最先端可視化計測技術開発・高度化を推進。
- ②その場マルチ同時系列計測システムの開発・整備。
- ③世界的にも例のない燃料電池のその場可視化診断技術を開発。
- ④世界を先導する世界唯一のBL36XUビームラインを用いた研究推進を基に産業界の研究開発加速。

(2015-2019年度NEDOプログラム)

2016年後半から運用開始

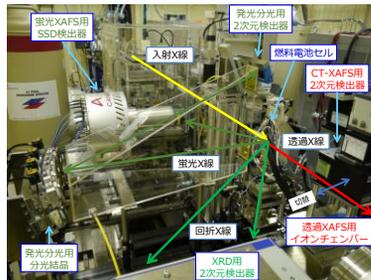


時間分解XAFS-XRD同時計測システム



霧困気制御型HAXPES計測装置

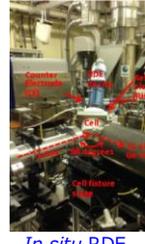
球面アナライザ (R=820 mm)  
HR-XANES用: Ge(660) 8台  
RIXS用: Si(933) 8台



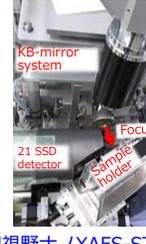
In situ XES-XAFS-XRD-CT同時系列計測システム



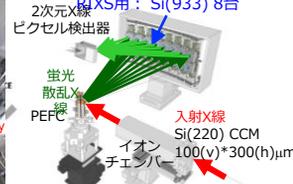
計測システム制御及び計測・解析PC群



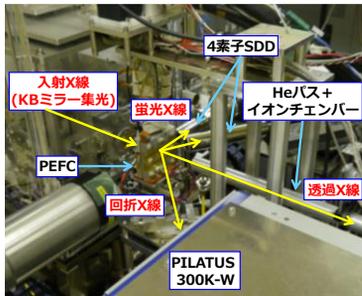
In situ RDE XAFS計測システム



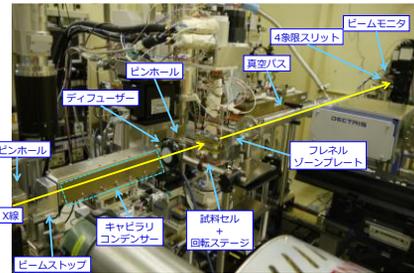
同視野ナノXAFS-STEM-EDS計測セットアップ



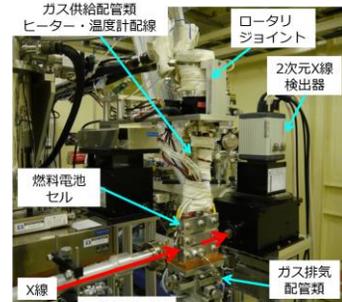
In situ HR-XANES-RIXS計測システム



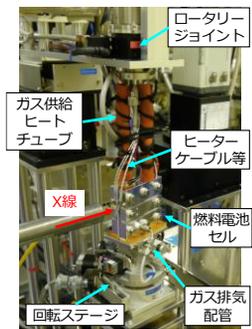
In situ 走査型蛍光XAFS-CT-XRD同時計測システム



In situ 3D結像型XAFS-CT計測セットアップ

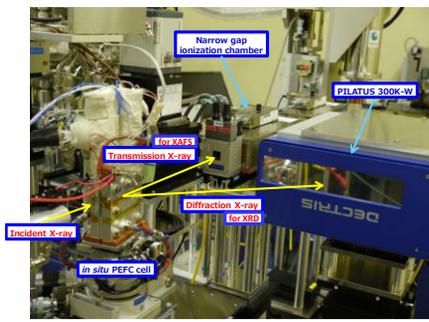


In situ 3D透過型XAFS-CT計測セットアップ



In situ 3D投影型XAFS-CT計測セットアップ

# BL36XUを用いた最近の研究成果から



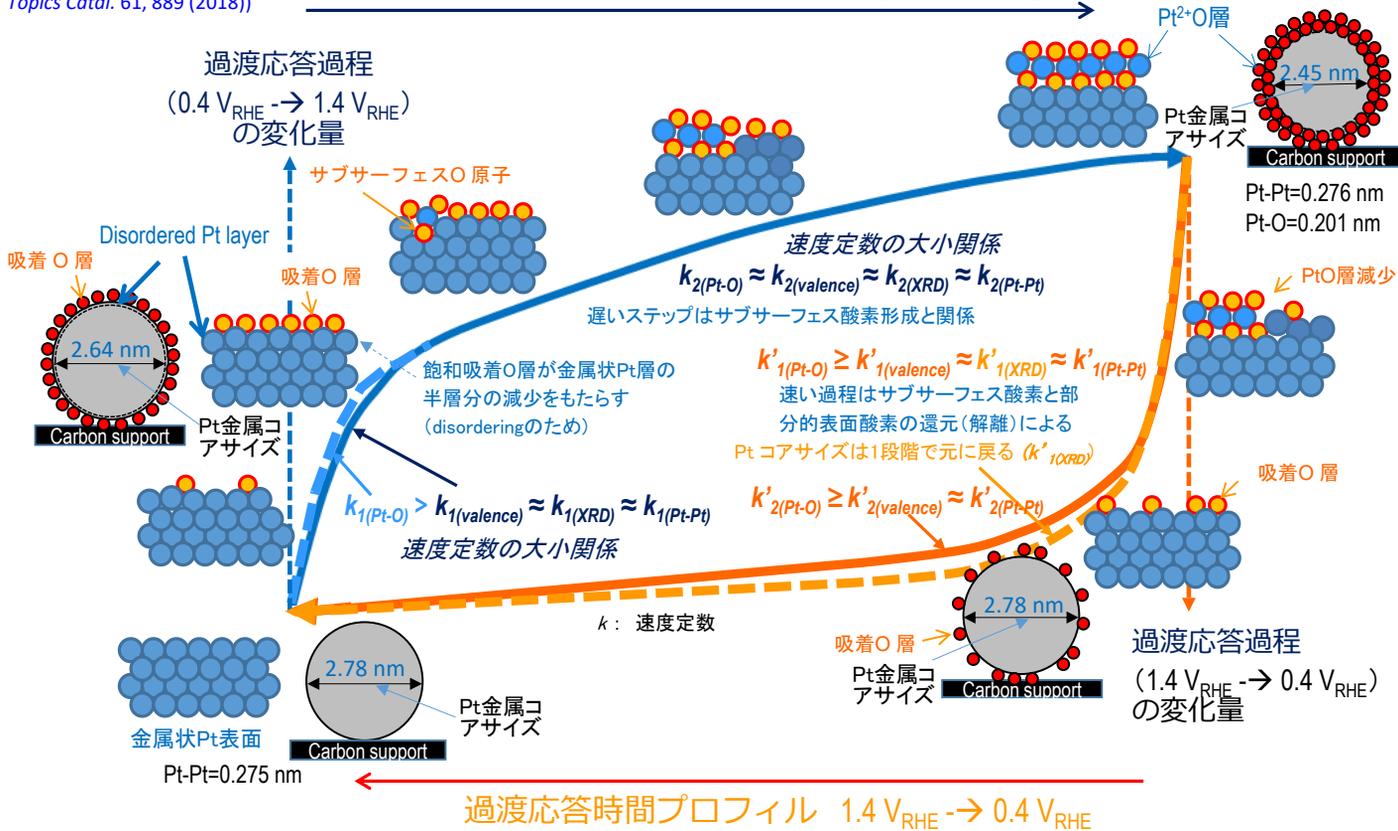
- 1 cycle 時間分解能 : 60 ms (個々は20 ms時間分解)

## 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。

ACS Sus. Chem. Eng. 5, 3631 (2017)  
Topics Catal. 61, 889 (2018)

過渡応答時間プロフィール 0.4 V<sub>RHE</sub> → 1.4 V<sub>RHE</sub>



過渡応答時間プロフィール 1.4 V<sub>RHE</sub> → 0.4 V<sub>RHE</sub>

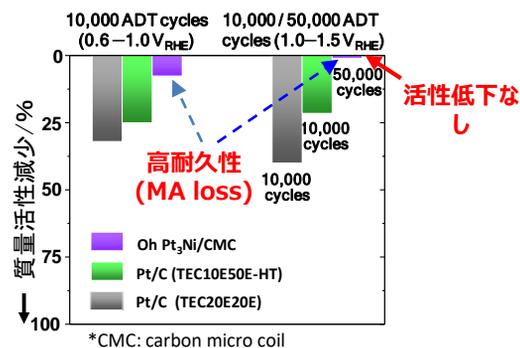
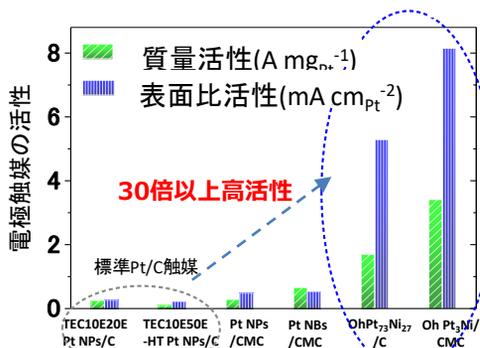
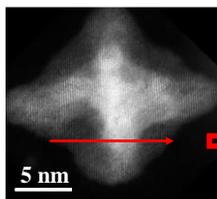
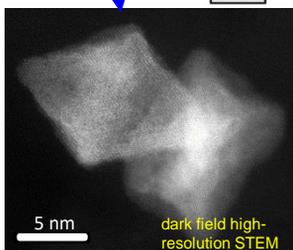
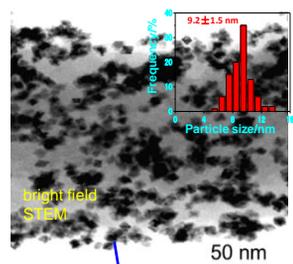
- \* 時間分解XAFS/XRD同時計測によりMEA Pt/Cの過渡応答過程（電位変化）の反応メカニズムが確定した。
- \* MEA Pt/Cの過渡応答は、表面（活性因子）が1秒程度であるが、サブサーフェス酸素形成（劣化因子）は10秒のオーダーである。従って、実走下の高電位変動が1秒以内に抑えれば劣化は抑制可能。

# BL36XUを用いた最近 の研究成果から

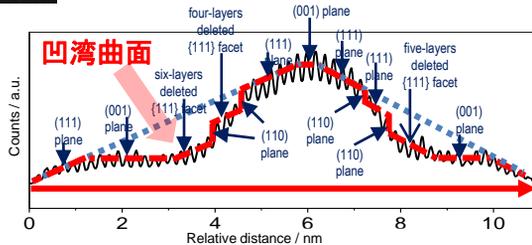
## 極めて活性が高く耐久性も高い湾曲型新規Pt<sub>3</sub>Ni/CMC触媒を開発

日本経済新聞 2018年4月30日掲載

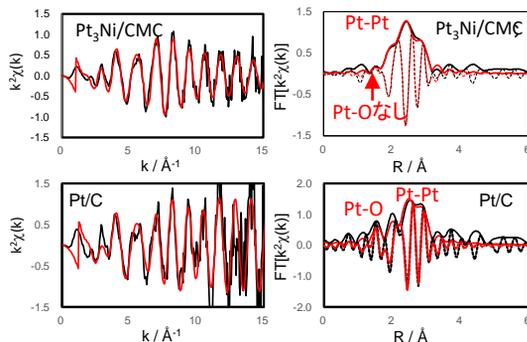
開発したPt<sub>3</sub>Ni/Carbon触媒は市販Pt/Cより30倍以上高活性・高耐久性



### Cross-section analysis



### In situ Pt L<sub>3</sub>-edge EXAFS analysis

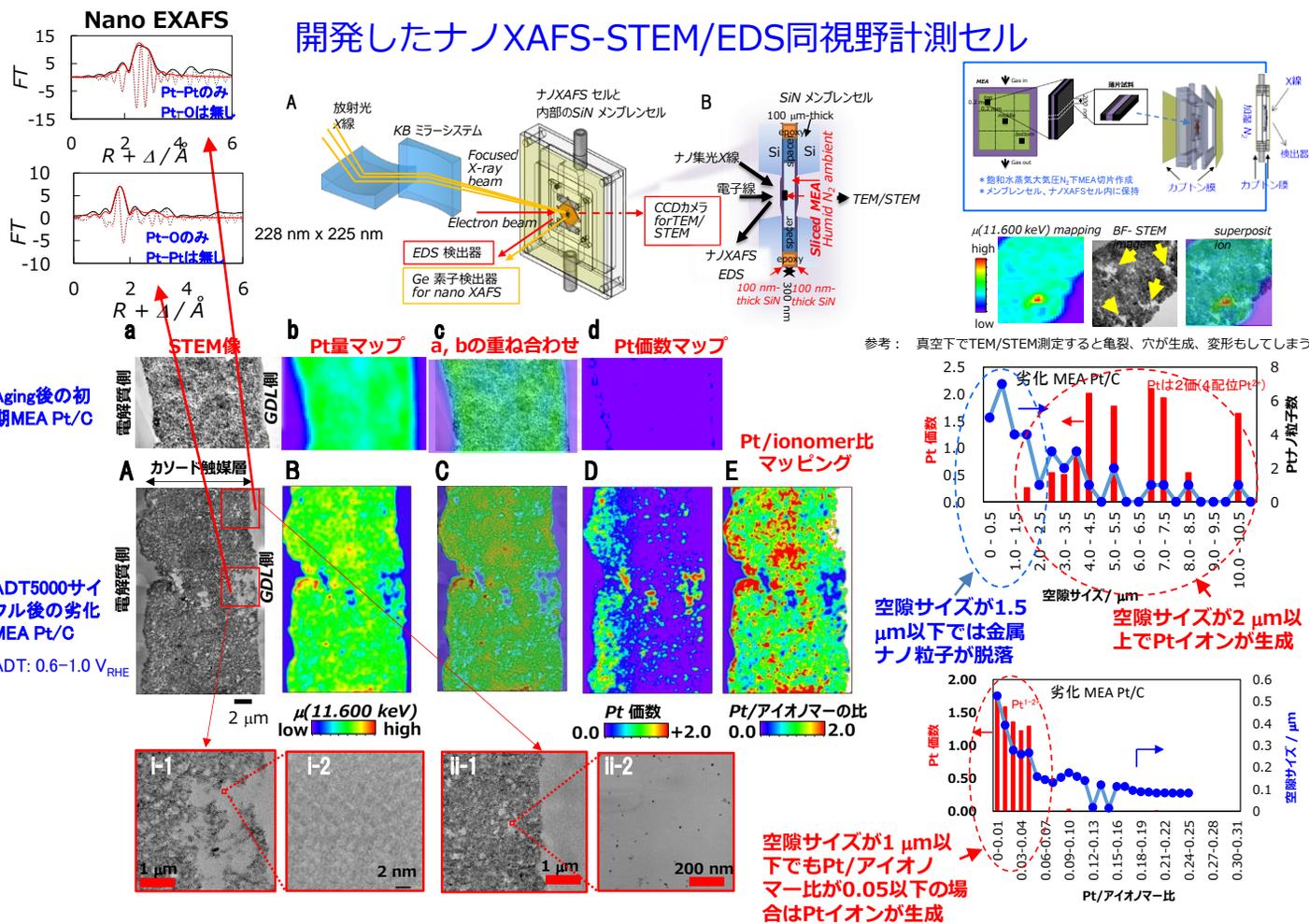


ACS Catal. 7, 4642 (2017); Chem. Record, 19,1337 (2019).

# BL36XUを用いた最近の研究成果から

## 劣化前後のMEAカソードPt/C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XAFS-TEM/STEM-EDS同視野計測に成功し、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Pt<sup>2+</sup>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。



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

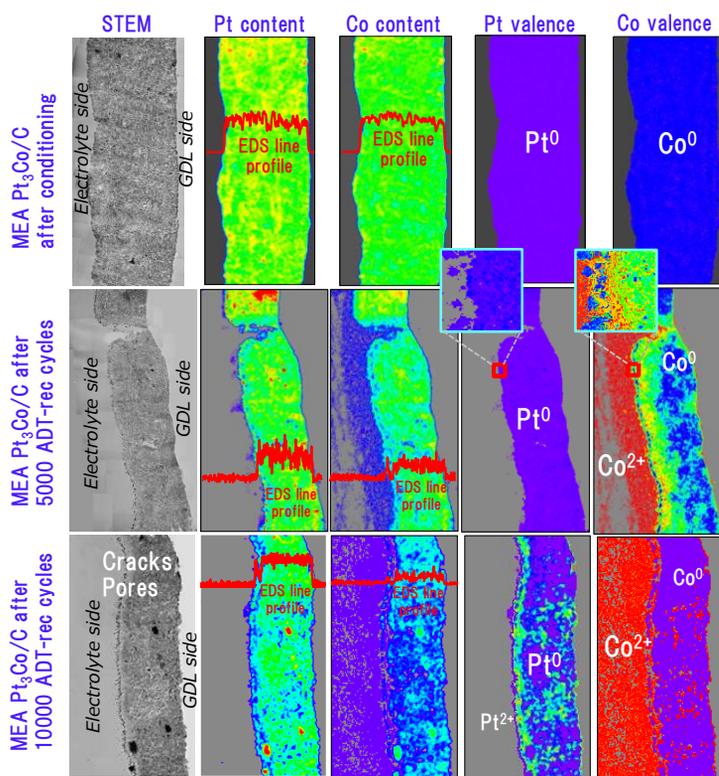
Angew. Chem. Int. Ed. (2014)  
 J. Phys. Chem. Lett. (2015)  
 Topics Catal. (ISHHC-7) (2016)

# BL36XUを用いた最近の研究成果から

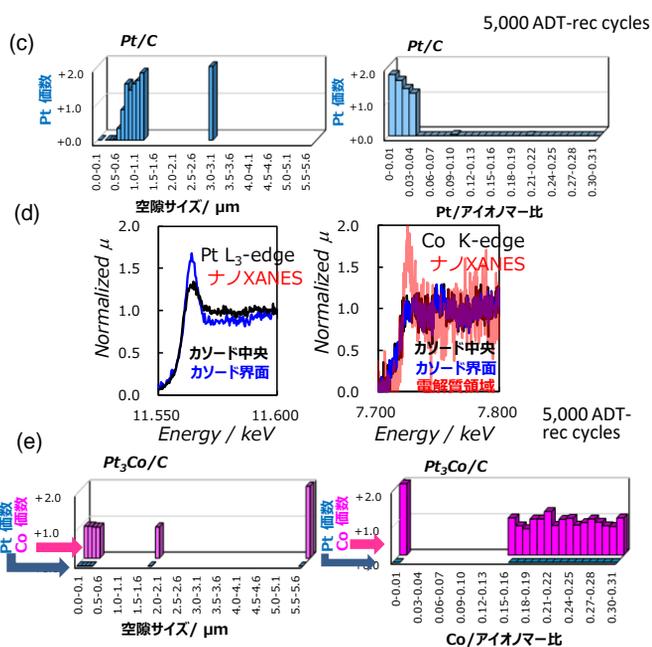
開発したナノXAFS-STEM/EDS同視野計測法を用いてADT劣化過程におけるMEA Pt<sub>3</sub>Co/Cのカソード触媒層と電解質領域のPtとCoの量と酸化状態の変化を可視化

## 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二次元可視化



MEA内Pt/CのPt価数(Ptイオン化溶出)とPt<sup>0</sup>(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Pt<sup>2+</sup>+4配位イオンに酸化・溶出。



MEA内Pt<sub>3</sub>Co/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Co<sup>2+</sup>+6配位イオンに酸化・溶出。

ACS Appl. Mater. Interfaces, 12, 2299 (2020)

# BL36XUを用いた最近 の研究成果から

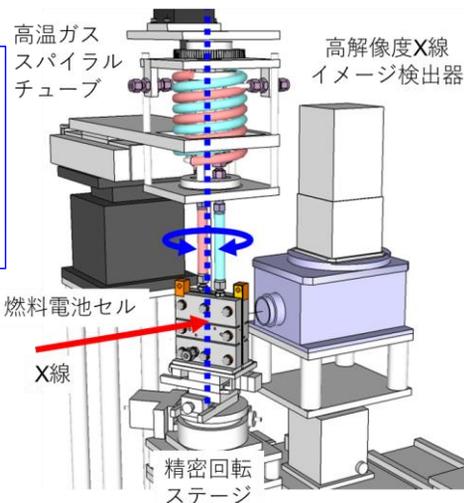
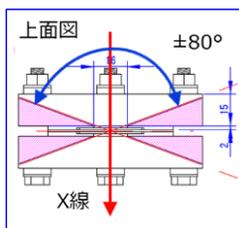
## In situ 3次元投影型CT-XAFS計測

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  $\mu\text{m}$ 、観察視野:  $\sim 500 \mu\text{m}$

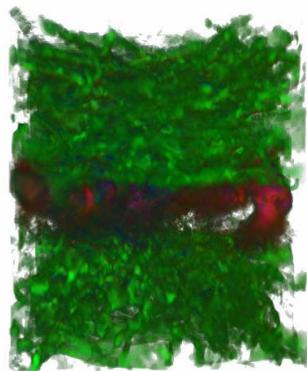
計測方法の迅速化・高精度化 (2.5 hr  $\Rightarrow$  0.8 hr)

- 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

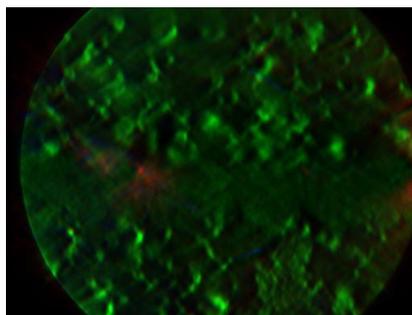


解析方法の迅速化・高精度化 (数ヶ月  $\Rightarrow$  3日)

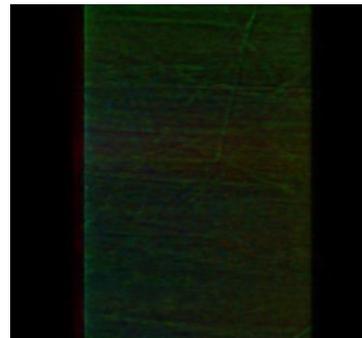
- 検出器各画素に対しXAFS解析を行い、得られたPt吸収量、XANESピーク強度、吸収端前強度を3次元再構成し、Pt分布、Pt価数分布、モルフォロジーを直接計算 (名大開発)



100  $\mu\text{m}$



膜厚方向断面



膜面方向断面

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

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

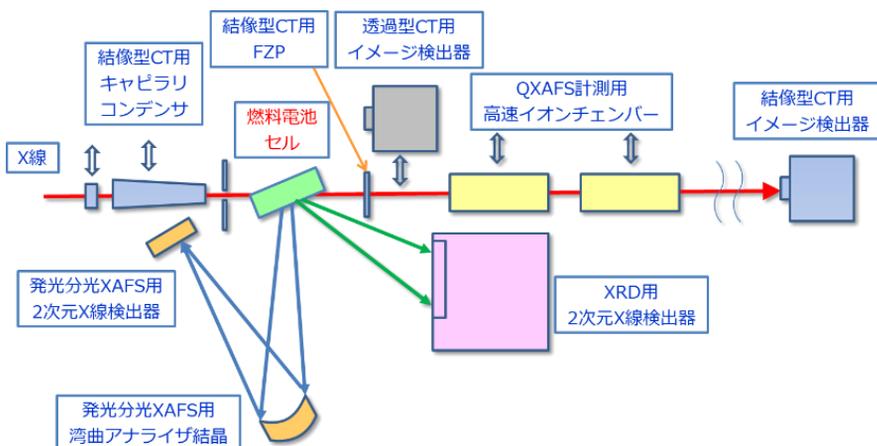
# BL36XUを用いた最近の研究成果から

## In situ 同視野複合同時系列計測システム

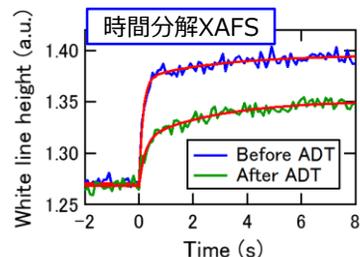
- 燃料電池内の反応・劣化は、空間的に不均一に進行する  
⇒ 同一箇所に対して、できるだけ同状態で、時間分解・空間分解・エネルギー分解計測法により多角的に調べることで、初めて確度の高い情報が得られる

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

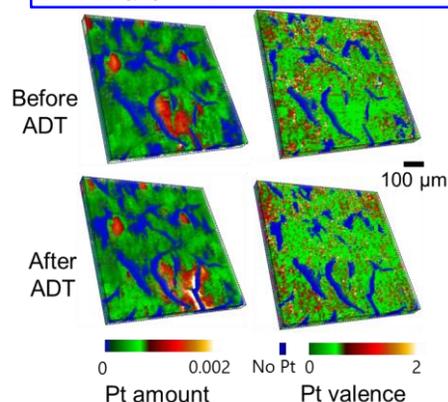
- 電位過渡応答に対する時間分解XAFS/XRD計測により、触媒の反応素過程を調べる
- in-situ XAFS-CT計測により、PEFC内の触媒層・電解質膜層の形態、触媒の3次元化学状態分布を調べる
- CV/HERFD-XAFS同時計測により、触媒粒子表面の吸着種を調べる。



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



## 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. オペラント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次元的に画像化できる*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。*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次元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高時間・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HR-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。*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。(未発表)

産業界からの強いニーズの下、BL36XUの建設・技術開発・運用推進を過去10年に渡って牽引



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**（世界初、世界唯一）。
- オペランドCT-XAFSにより、MEA Pt<sub>3</sub>Co/C劣化過程を可視化し、**インフォマティクスとの連携を実現、ADTによる触媒劣化のイメージング評価に成功**（世界初）。
- 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）。
- **大気圧HAXPES開発・計測**を実現（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

**受賞** アジア化学連合創設 Lectureship 賞2015（2016年）  
 瑞宝中綬章（天皇・内閣総理大臣）（2019年），他

**論文** *J. Am. Chem. Soc.* 137, 12856 (2015) IF: 14.695  
*ACS Catal.* 7, 4642 (2017) IF: 12.221  
*Angew. Chem. Int. Ed.* 56, 9371 (2017) IF: 12.959  
*Acc. Chem. Res.* **51**, 719 (2018) IF: 21.661  
*ACS Catal.* 8, 11979 (2018) IF: 12.221  
*ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 2299 (2020) IF: 8.456, 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



## 電気通信大学Spring-8拠点

