

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラムNo.603-2-04

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/
燃料電池・水電解の共通基盤技術開発/
量子ビーム（放射光 & ミュオン）
マルチモーダル計測解析技術の高度化と
オペランドPEFCマルチ計測評価に関する研究開発

発表：2026年07月22日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

三輪寛子

（国）電通大

E-mail: h-miwa@uec.ac.jp TEL: 042-443-5922

事業概要

1. 期間

開始 : 2025年5月 終了（予定） : 2028年3月

2. 最終目標

SPring-8 BL36XUのPEFCマルチモーダル同時系列X線計測評価とJ-PARCミュオンビームラインの負ミュオン特性X線計測をオペランド同時系列計測することが可能な**HERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFS/ミュオン同時系列計測システム**を構築し、システムの計測解析効率化と自律化を行い、燃料電池内電極触媒等の複雑劣化現象の実態解明を達成し、高度評価解析技術の先進事例を提供する。

3. 成果・進捗概要（2025年度）

- ・ PEFC内部で進行する触媒被毒・回復及び劣化現象をPEFC動作下で直接評価するため、**負ミュオンおよび放射光X線を用いたマルチモーダル計測解析技術の高度化**を進めた。
- ・ BL36XUビームラインの**オペランドHERFD-XANES/RIXS/XRD同時系列計測システム**を用いてMEA Pt/CのPtナノ粒子上の**活性酸素種の劣化現象の可視化手法**を確立した。
- ・ 標準試料の**負ミュオン特性X線元素分析・化学状態分析**を実施し、PEFC構成元素であるC、O、F、S、Co、Pt等の**軽い元素から重い元素までを一気通貫に計測評価する手法の開発**を遂行した。



放射光硬X線による吸着種・局所構造・電子状態解析と、負ミュオンによる軽元素から重元素までの深さ方向元素分布計測・化学状態分析を相補的に組み合わせ、実PEFC内部の劣化現象の実態を多階層的・多次元視点で解明するための基盤の一部を構築した。

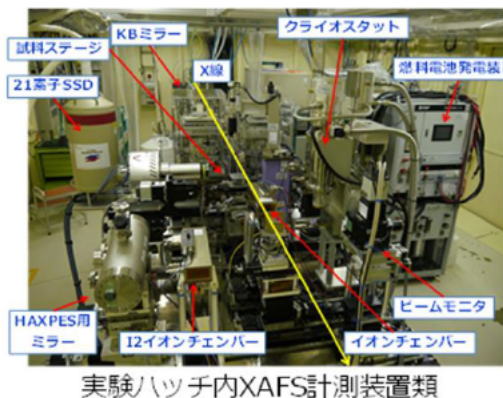
1. 事業の位置付け・必要性

研究目的：

これまでのNEDO事業において実現した世界唯一・世界最高性能のオペランドPEFC計測用のSPRING-8 BL36XUビームラインのマルチモーダル同時系列X線計測評価システムに加え、それと相補的な、放射光硬X線では出来ない軽い元素から重い元素までの情報を一気通貫に提供できる、J-PARCミュオンビームラインの負ミュオン特性X線元素計測システムを用いて、他の手法では得られない動作下のPEFC内電極触媒等の複雑劣化現象の実態解明を行い、新たな開発材料を評価・解析し、産業界、学术界の課題解決に貢献する中核的評価解析技術となる先進事例をいち早く提供する。

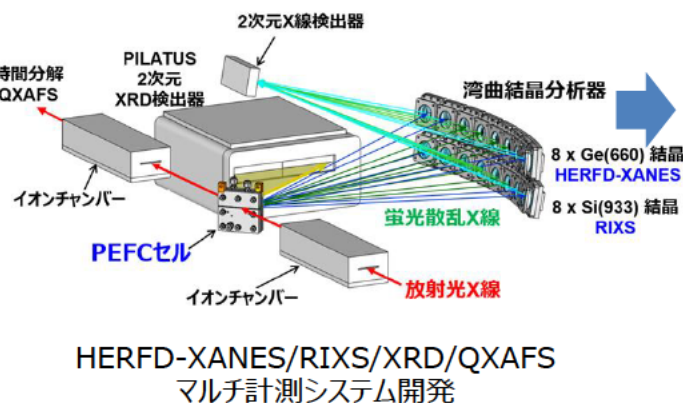
1. 放射光オペランドHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFSマルチモーダル計測システムの高度化とオペランドPEFCマルチ解析評価
2. 負ミュオン(μ^-)によるオペランド3D元素分布と3D化学状態分布の評価解析技術の高度化とPEFC内部のオペランド劣化解析評価

NEDO事業
(2010-2014年度、2015-2019年度)



実験ハッチ内XAFS計測装置類

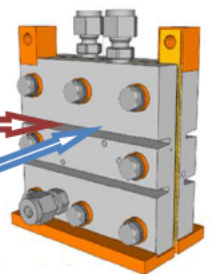
NEDO事業
(2020-2024年度)



HERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFS
マルチ計測システム開発

本提案

1. マルチモーダル同時系列X線計測@SPRING-8
2. 負ミュオン特性X線元素分析@J-PARC



産業界ニーズ

- ・高電位による触媒劣化の影響評価
- ・触媒層劣化構造変化
- ・MEA-RDE活性ギャップ
- ・不純物・被毒の影響評価

SPRING-8 BL36XUビームラインのPEFCマルチモーダル同時系列X線計測評価システム

2. 研究開発マネジメントについて (1)

実施体制

NEDO

国立大学法人 電気通信大学

(三輪、岩澤、梅垣、佐々木、吉田、岡部)

・ 研究実施場所：

電気通信大学 燃料電池・水素イノベーション研究センター

SPring-8 BL36XUビームライン

J-PARC ミュオンビームライン

・ 支援協力機関：JASRI/SPring-8、J-PARC、

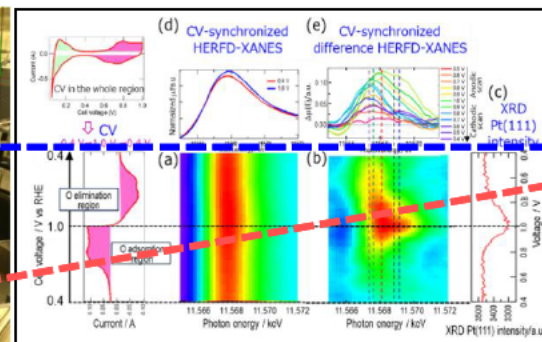
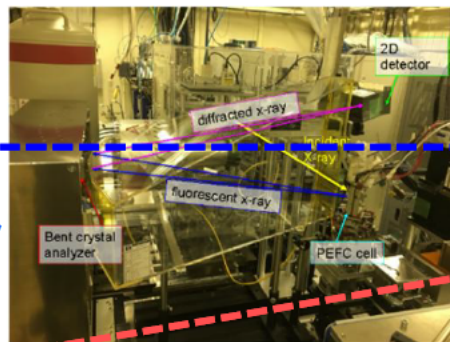
東京大学新領域創成科学研究科

・ 研究項目：量子ビーム（放射光&ミュオン）マルチモーダル計測解析技術の高度化とオペランドPEFCマルチ計測評価

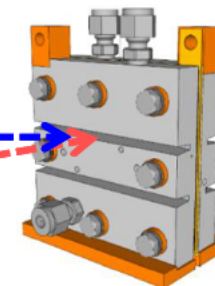
オペランドHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFSマルチモーダル計測システム

放射光X線

BL36XUビームライン



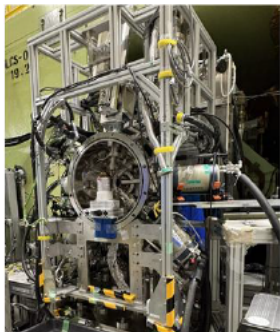
時間分解HERFD-XANESマップ/XRD同時計測
ACS Catal. 15, 9856–9869 (2025).



オペランド放射光X線/
ミュオンX線計測セル

負ミュオン

ミュオンビームライン



負ミュオン特性X線元素分析法の特長：

PEFC MEA内の軽い元素から重い元素まで（C、O、F、S、Co、Pt、Ce等）を一気通貫に多元素同時計測が可能。元素分布と酸化状態分布を動作下で計測評価が可能。非破壊でのPEFC内部計測が可能。

2. 研究開発マネジメントについて (2)

研究開発のスケジュール

研究開発テーマ	2025年度				2026年度				2027年度			
	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期
MEAカソード層劣化現象の解明のための放射光オペランドHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFSマルチモーダル同時系列計測解析評価			MEAカソード触媒層劣化現象解明のためCV同期Ptナノ粒子酸素吸着構造変化、Pt-O反結合・結合状態、劣化現象実態のマルチ計測評価									
J-PARCミュオンビームラインと負ミュオン特性X線計測システムの高度化			J-PARCミュオンビームライン制御系改善、負ミュオン特性X線元素分析検出器のバージョンアップと効率化、及び計測セル設計・製作									
MEAカソード層劣化現象の解明のための負ミュオン特性X線多元素同時計測解析評価				標準試料の測定		MEA劣化状態の軽元素から重元素の多元素同時計測						
										MEA劣化状態の多元素同時計測と3D可視化・解析評価		

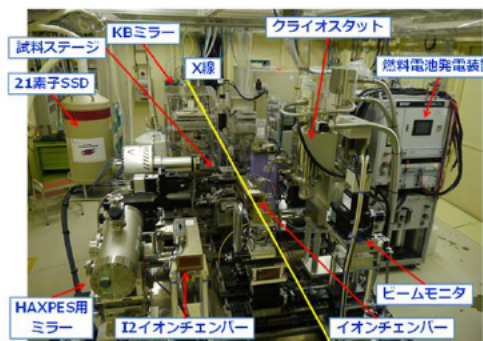
3. 研究開発成果について (参考)

他の施設では、動作下、同一試料を同時系列でマルチモーダル計測は困難で行われていない。
特に、本提案のマルチモーダルHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFS/ミュオン同時系列計測を行う取り組みは国内外に存在せず、世界唯一のアプローチである。

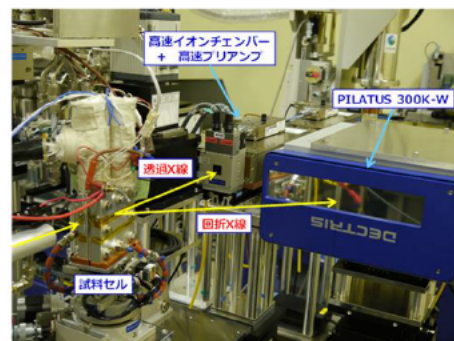
電通大が開発整備したBL36XUにおけるPEFCマルチモーダル同時系列X線計測評価システム群

Pt α_1 及びPt $_{III}$ 端発光分光によりPt-O, Pt-F, Pt-Sなどの結合の吸着サイト別の定量評価が可能

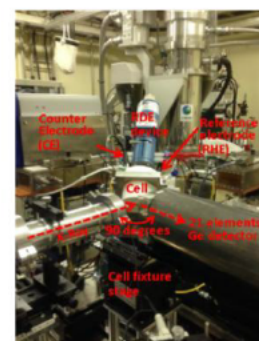
類似施設：
米国ブルックヘブン国立研究所放射光施設 Light Source II 燃料電池、触媒計測用のビームライン等。
←マルチモーダル同時系列計測に対応していない



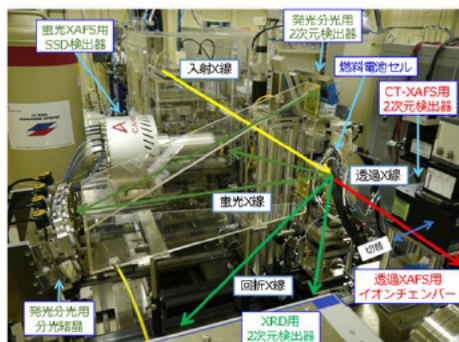
実験ハッチ内XAFS計測装置類



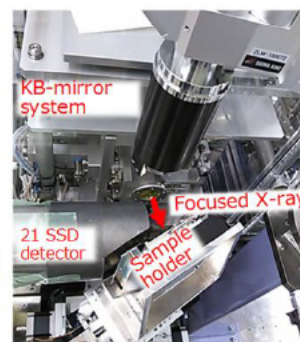
In situ 時間分解XAFS-XRD同時計測システム



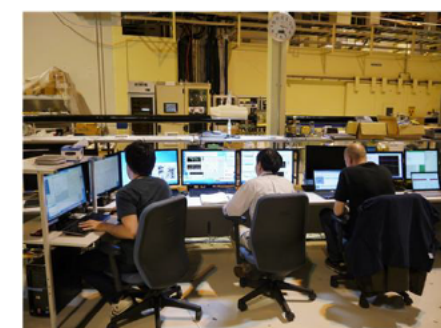
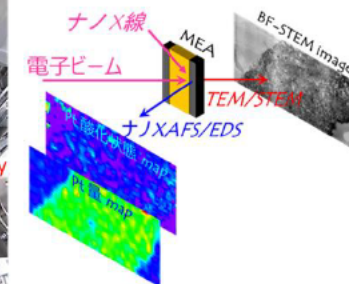
In situ RDE XAFS計測システム



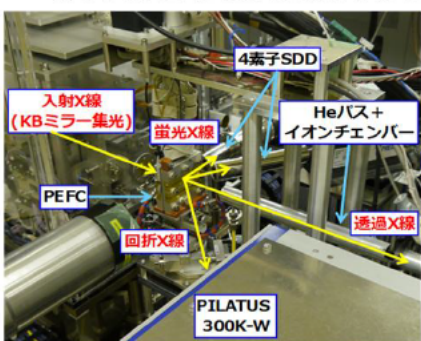
In situ X線発光(HERFD-XANES-RIXS)-XAFS-XRD同時系列計測システム



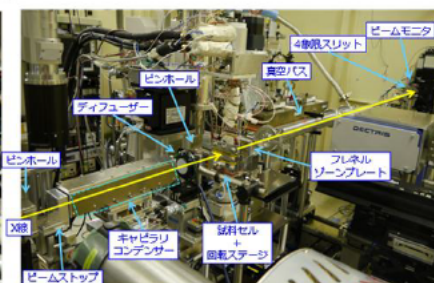
同視野ナノXAFS-STEM-EDS計測セットアップ



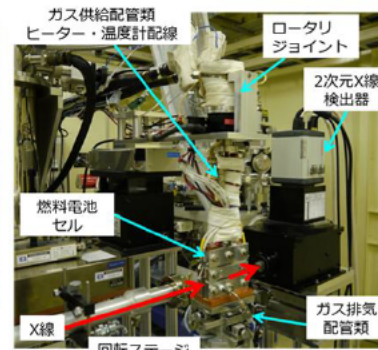
計測システム制御及び計測・解析PC群



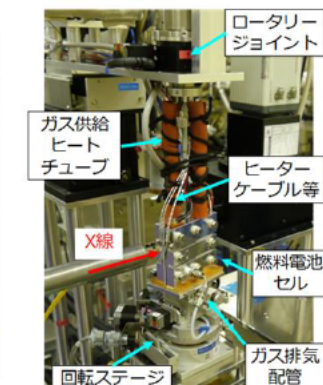
In situ 走査型蛍光XAFS-CT-XRD同時計測システム



In situ 3D結像型XAFS-CT計測セットアップ



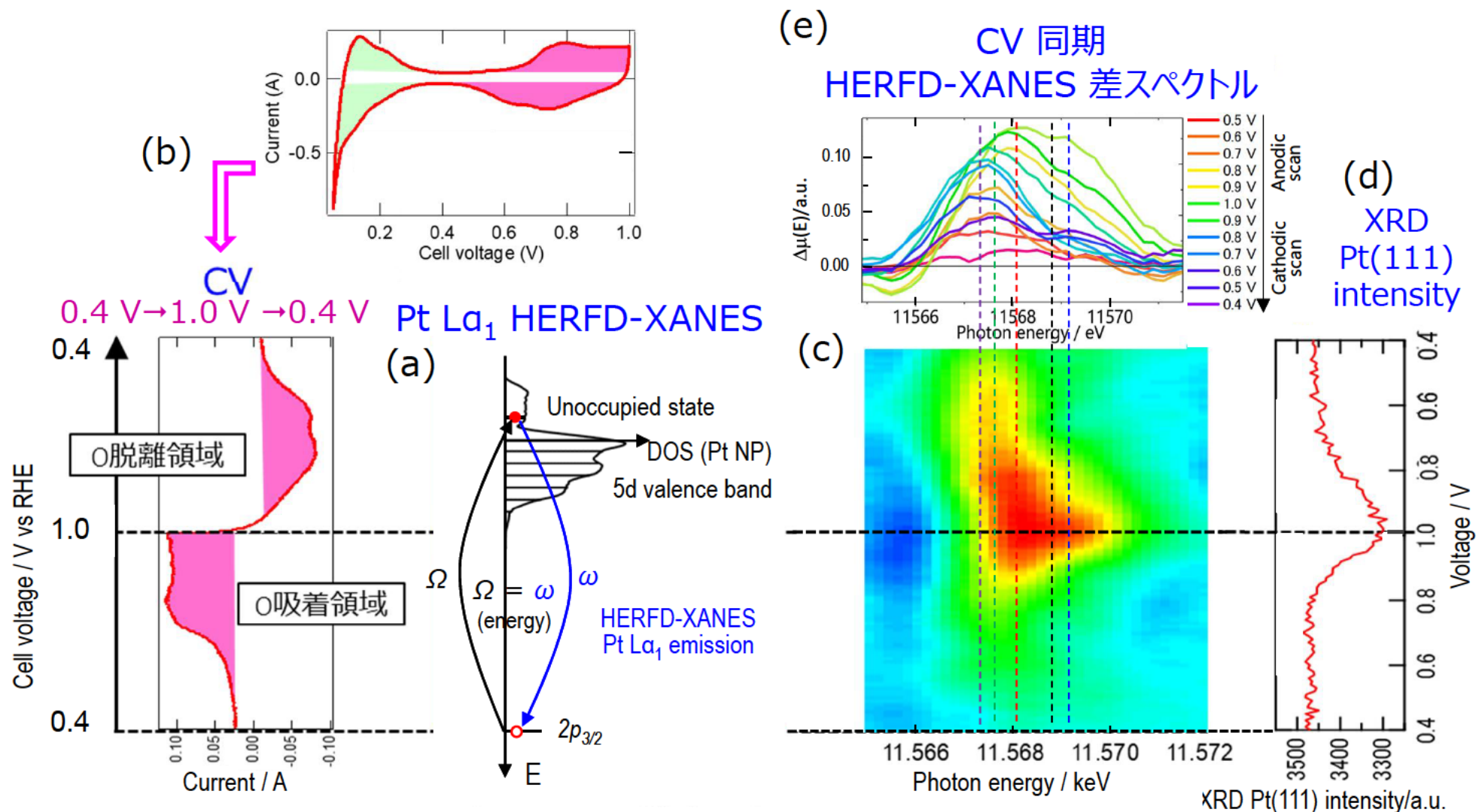
In situ 3D透過型XAFS-CT計測セットアップ



In situ 3D投影型XAFS-CT計測セットアップ

3. 研究開発成果について (1-1)

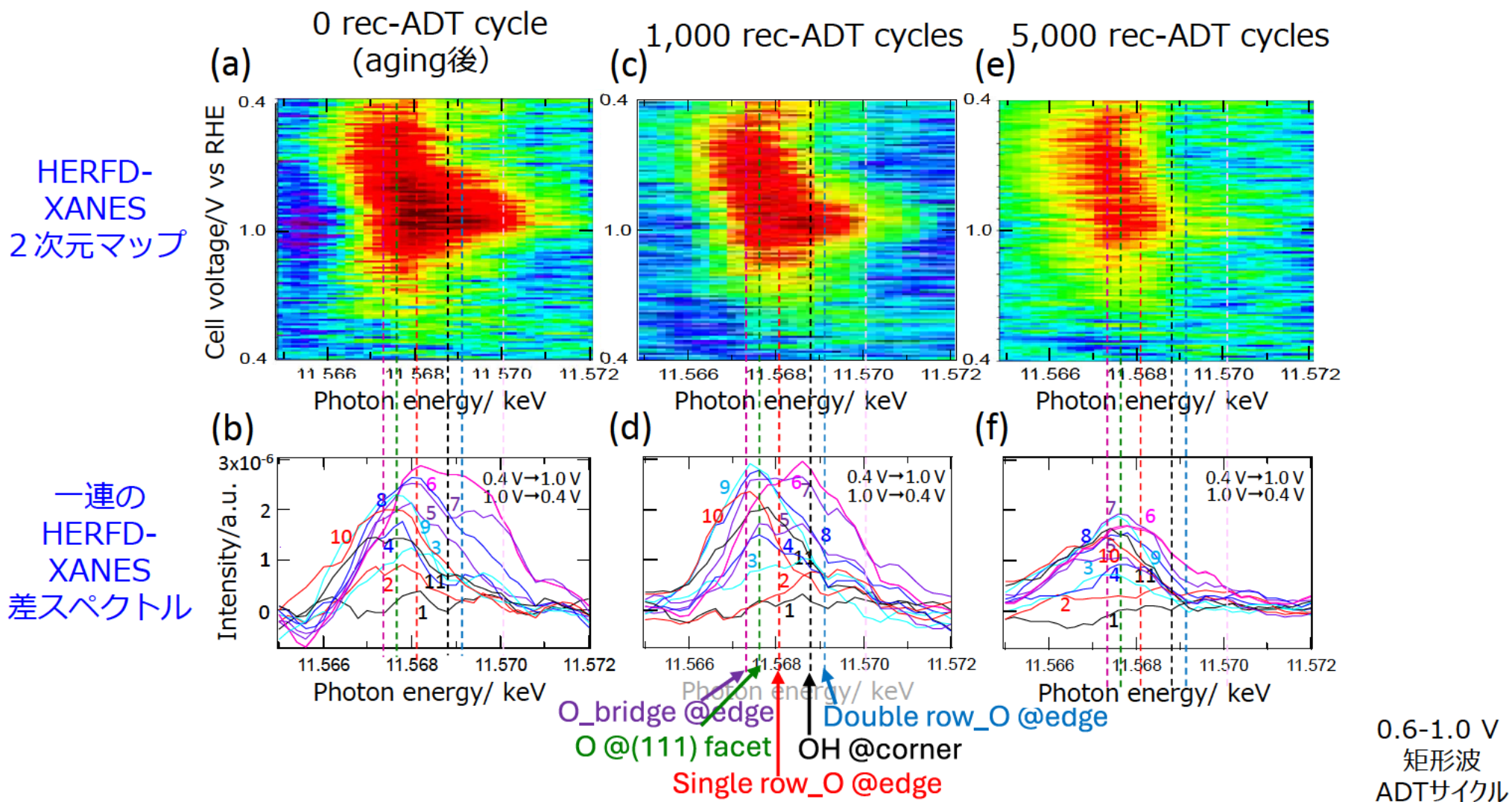
MEA Pt/Cカソード触媒劣化過程におけるCV同期HERFD-XANES/XRD計測



H. Ariga-Miwa, Y. Iwasawa et al. *ACS Catal.* 15, 9856 (2025).

3. 研究開発成果について (1-2)

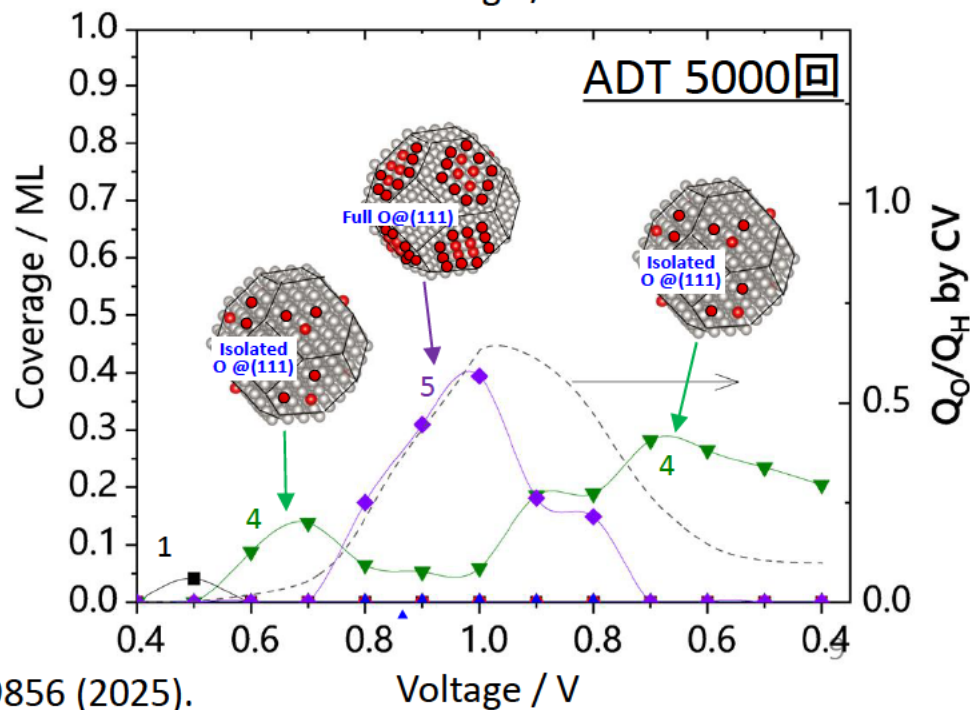
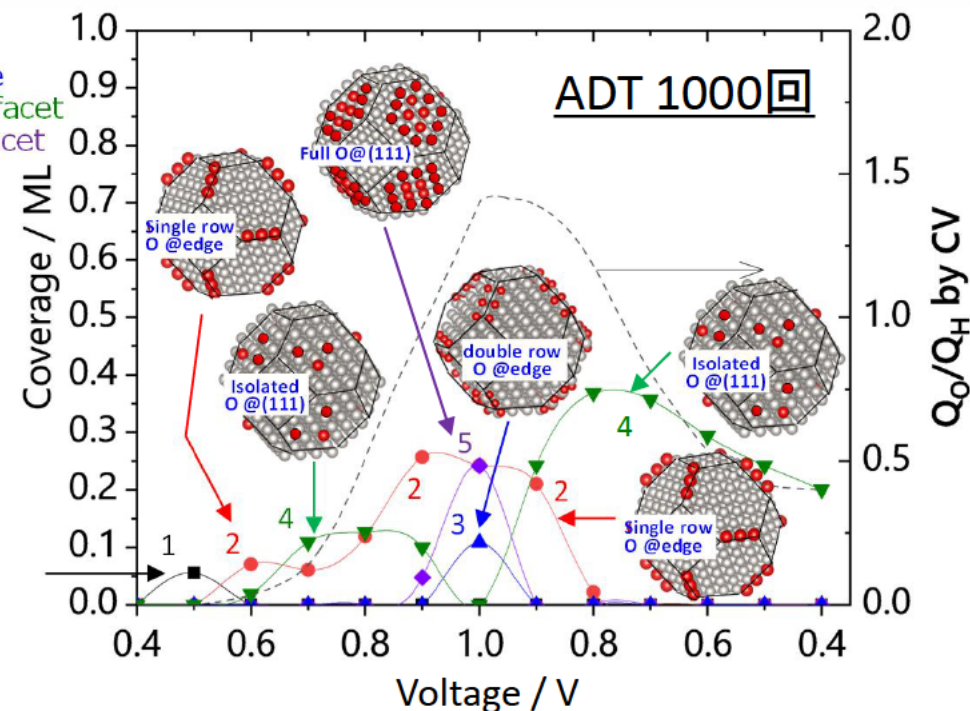
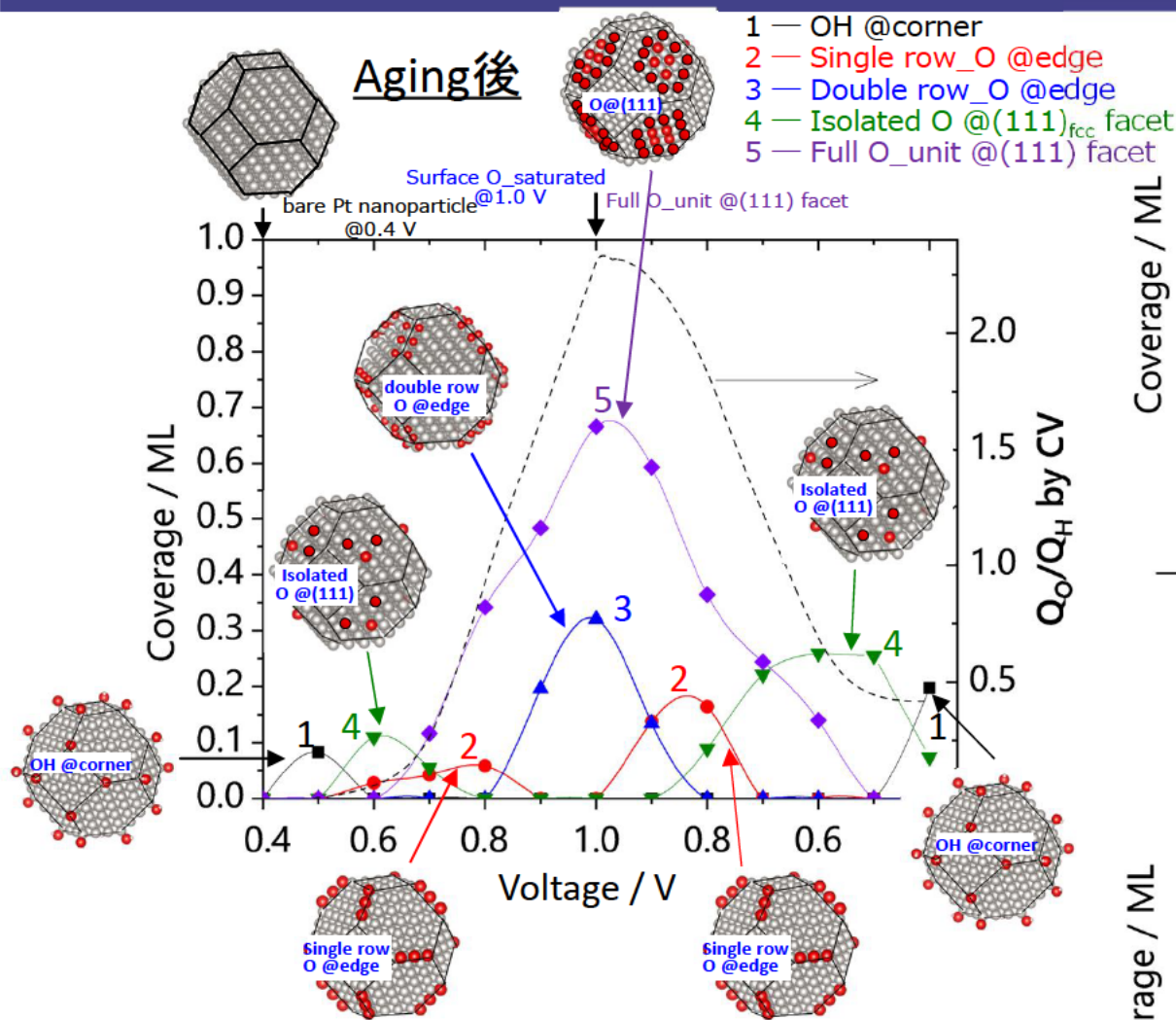
矩形波ADT劣化MEA Pt/Cカソード触媒のCV同期HERFD-XANES可視化マップ
および一連の時間分解HERFD-XANES差スペクトル (5種類の吸着酸素の挙動)



H. Ariga-Miwa, Y. Iwasawa et al. *ACS Catal.* 15, 9856 (2025).

H. Ariga-Miwa, K. Higashi, Y. Iwasawa, under review (invited Account)

3. 研究開発成果について (1-3)



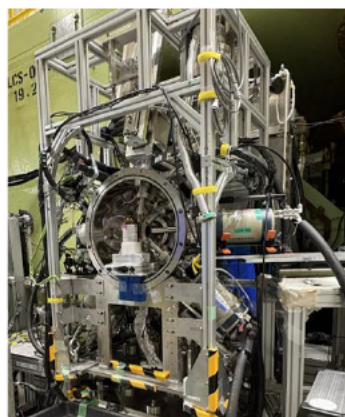
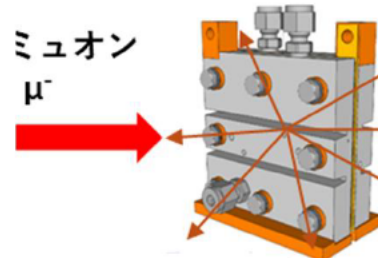
- CV同期HERFD-XANESスペクトルをDFT計算とFDMNESシミュレーション結果から定量的に解析。
- エッジ酸素が活性で選択的に反応している。
- 劣化過程（矩形波ADT処理）ではエッジ酸素が減少し反応活性が減少していくことを明らかにした。

3. 研究開発成果について (2-1)

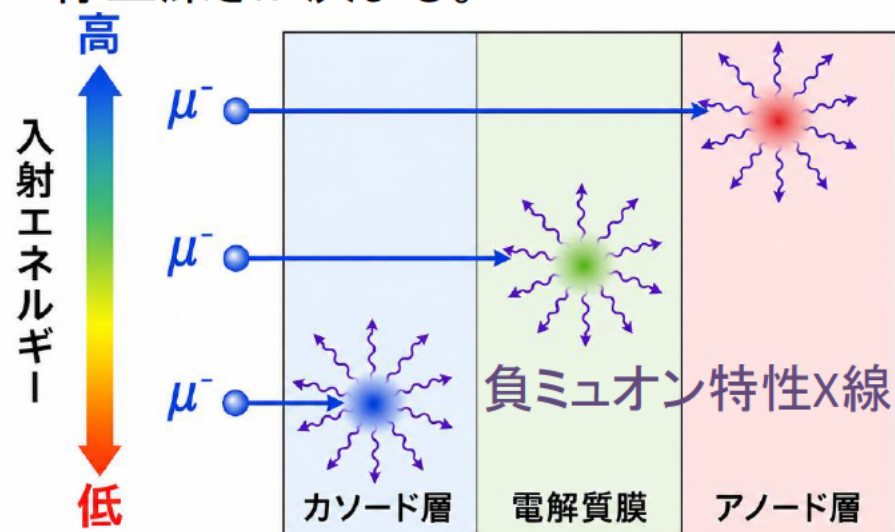
素粒子	電荷	スピン	質量	寿命	
μ^+	+1	1/2	106 MeV/c ²	2.2 μ s	質量が1/9のH ⁺
μ^-	-1	1/2	106 MeV/c ²	2.2 μ s	質量が200倍の電子

ミュオン特性X線元素分析法

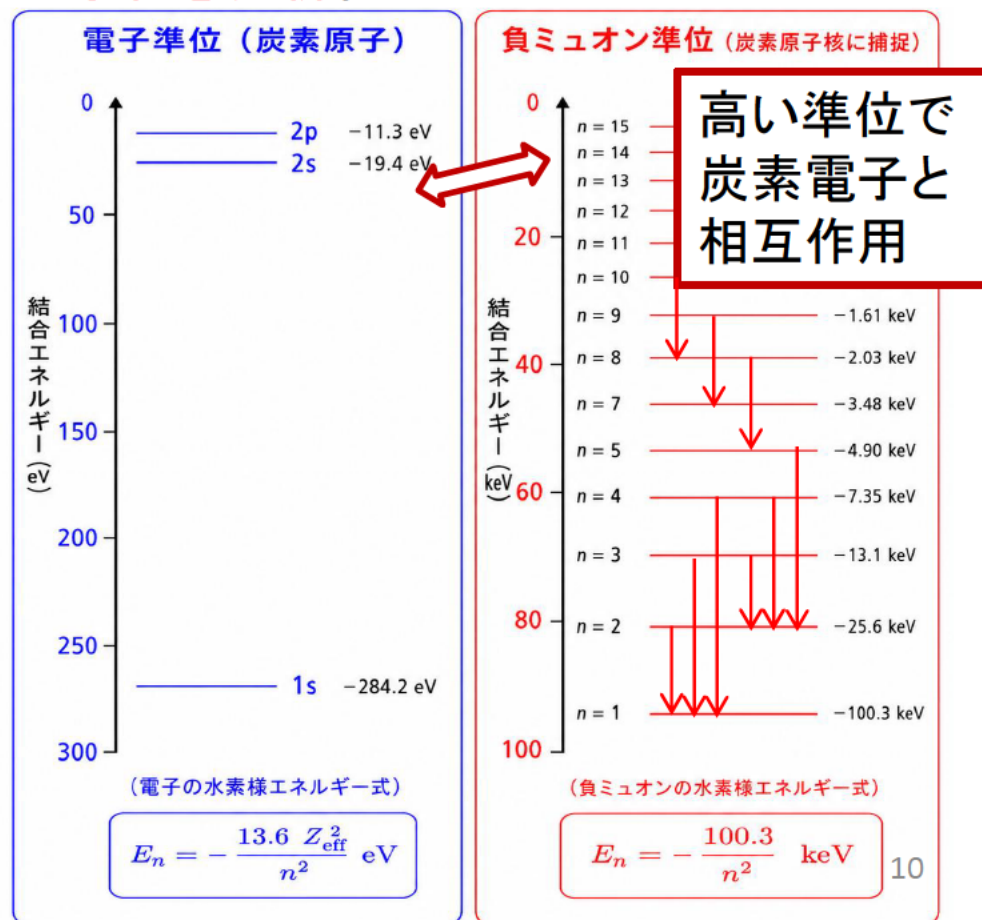
① MEAへの負ミュオン照射 試料



② 入射エネルギーに応じて負ミュオンの 停止深さが決まる。



- ③(1)負ミュオン特性X線エネルギーで軽い元素から重い元素まで一気通貫な**元素分析**。
(2)異なる遷移に由来する特性X線強度比から、**化学状態分析**。



3. 研究開発成果について (2-2)

ミュオン特性X線元素分析法の特徴

高効率

エネルギーが
電子由来の200倍高く
X線の収率が良い

非破壊

- ・ 試料を破壊しない
- ・ 試料を放射化しない

元素感度

・ 軽い元素、重い元素
同時分析が可能
Pt, S, P, Fe, Ceなど

ミュオン特性X線元素分析法の特徴

測定の容易さ

・ 空気中や溶液中
様々な環境での
測定が可能

化学状態

価数、結合状態や
電子密度等を分析
可能

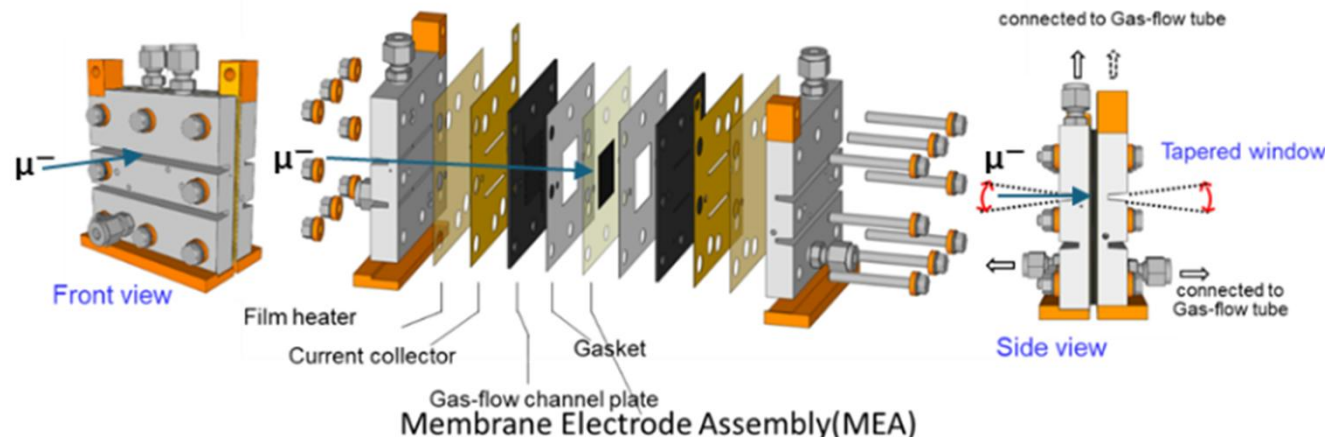
位置選択性

・ 高い透過能
・ 0.1 μm から数cmの任
意の深さの測定が可能

複数の元素を同時測定可能

元素	ミュオン特性X線 エネルギー- K_{α} /keV
Pt	5518
Ce	4098
Fe	1256
C	75
O	133
F	168
S	517

PEFC内部のミュオン特性X線元素分析法に用いる 実験セルのプロトタイプ版

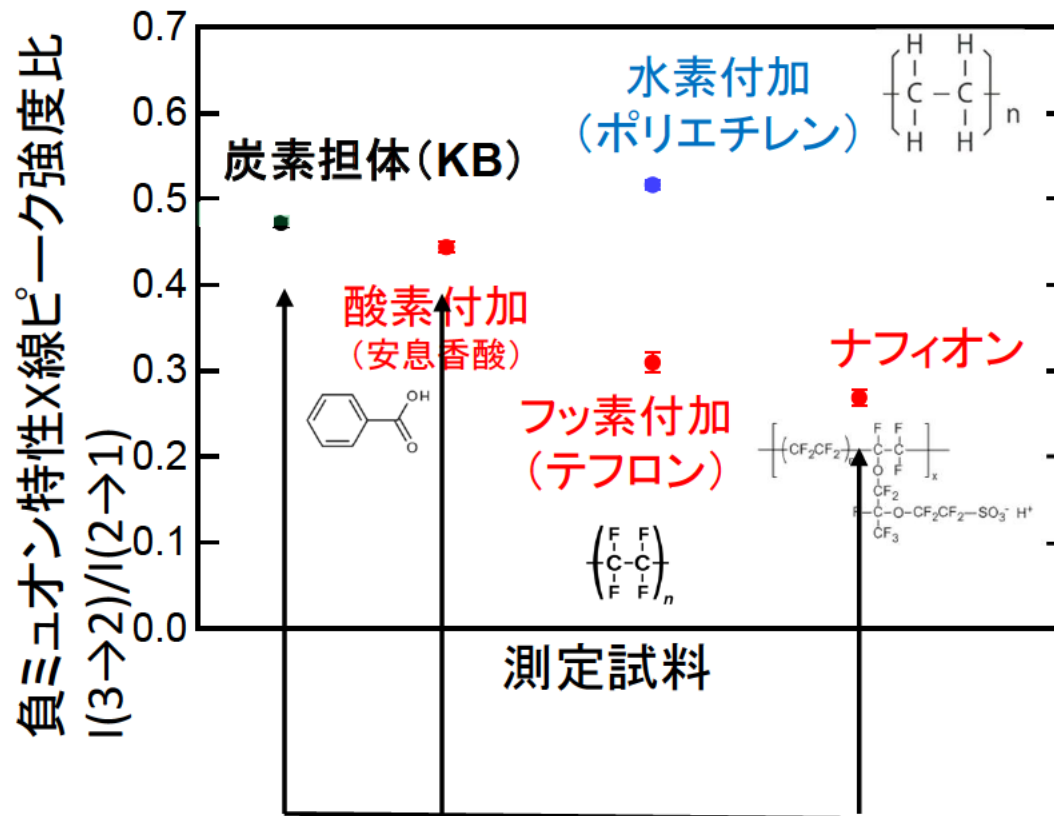


- * MEA内の軽い元素から重い元素まで(C, O, F, S, Fe, Co, Pt, Ceなど)を一気通貫に元素分析が可能.
- * Pt-O, Pt-F, Pt-Sなどの結合や化学状態の定量評価も可能.
- * 劣化MEA内の軽元素から重元素までの多元素同時分析が可能.

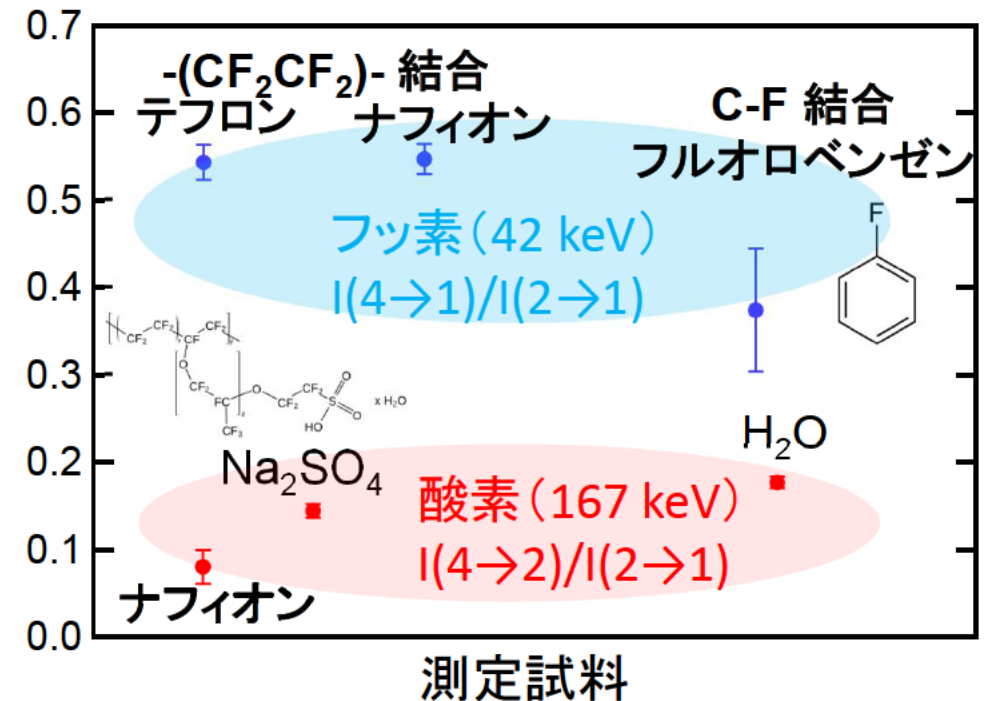
3. 研究開発成果について (2-3)

ミュオンX線によるMEA内に分布する軽い元素～重い元素の非破壊多元素同時分析法 —元素分布と化学状態分布の計測評価法の開発—

標準試料計測



カーボン担体、ナフィオン、酸化炭素の
定量評価が可能。



ナフィオンとH₂Oを酸素のピーク強度
比から定量評価が可能。

4. 今後の研究開発について

2025年度の成果を基礎とした2026年度の研究開発スケジュール：

研究開発テーマ	2025年度				2026年度				2027年度			
	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期
MEAカソード層劣化現象の解明のための放射光オペランドHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFSマルチモーダル同時系列計測解析評価		MEAカソード触媒層劣化現象解明のために 特徴的触媒(メラミン修飾など)の性能・耐久性のマルチ計測評価 、CV同期Ptナノ粒子酸素吸着構造変化							ミュオンX線計測結果から発生した新たな課題に対応するマルチ計測評価			
J-PARCミュオンビームラインと負ミュオン特性X線計測システムの高度化		J-PARCミュオンビームライン制御系改善、負ミュオン特性X線 元素分析検出器のバージョンアップと効率化 、及び計測セル設計・製作							検出器納入日とミュオンビームライン設置の日程調整により四半期遅延。セル製作は予定通り			
MEAカソード層劣化現象の解明のための負ミュオン特性X線多元素同時計測解析評価				標準試料の測定				MEA劣化状態の 軽元素から重元素の多元素同時計測				
				J-PARC施設閉鎖のため半年繰延べ				MEA劣化状態の多元素同時計測と3D可視化・解析評価				

5. まとめ

1. 負ミュオン特性X線計測では、J-PARCにおいて、燃料電池オペランド計測解析技術の高度化(高精度化、効率化、自律化)を遂行中である。
2. 燃料電池計測評価のための標準試料データがこれまで殆ど無いため、現状のミュオンビームラインを用いて様々な標準試料の負ミュオン特性X線元素分析・化学状態分析を実施した。
3. MEAを構成する軽元素から重元素(C、O、N、F、S、Co、Ptなど)のミュオンX線スペクトル分離、ピーク強度解析、化学種(化学状態)判別の手法開発、確立を進めた。
4. 炭素材料、フッ素含有高分子、酸素含有化合物、ナフィオン、コバルト、白金などの標準試料を用いて、カーボン担体、アイオノマー、電解質、水、カソード触媒に由来する負ミュオン特性X線を区別するための参照データを取得した。
5. BL36XUビームラインにおいて、放射光硬X線によるマルチモーダルHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFS同時系列計測により、MEAカソード電極触媒の劣化過程の活性酸素種の吸着構造および結合・反結合電子状態の変化の解析評価法を確立した。
6. 動作下のオペランド放射光硬X線マルチモーダル計測と、負ミュオン特性X線による多元素・化学状態の分布解析を相補的に組み合わせ、実MEA内部の複雑劣化現象を多階層的・多次元視点で解明するための基盤を一部構築した。

