NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026
発表No.：a-11

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

団体名：国立大学法人電気通信大学
発表日：2026年7月22日

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、学術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。

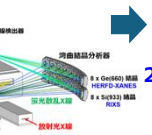
１．放射光オペランドHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFSマルチモーダル計測システムの高度化とオペランドPEFCマルチ解析評価

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）

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

NEDO事業（2020-2024年度）

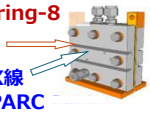


HERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFSマルチ計測システム開発

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

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

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						負ミュオン特性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モーダル計測評価					
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			

研究開発成果・1

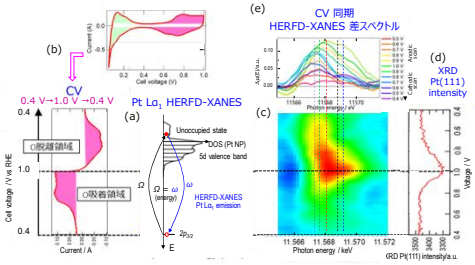
他の施設では、動作下、同一試料を同時系列でマルチモーダル計測は困難で行われていない。特に、本提案のマルチモーダルHERFD-XANES/RIXS/XRD/QXAFS/ミュオン同時系列計測を行う取り組みは国内外に存在せず、世界唯一のアプローチである。

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

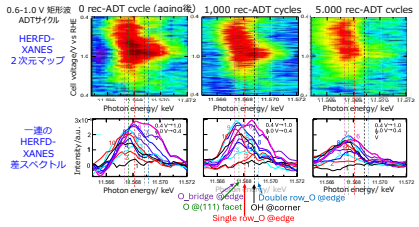
Ptα_1及びPt$_{III}$端発光分光によりPt-O, Pt-F, Pt-Sなどの結合の吸着サイト別の定量評価が可能

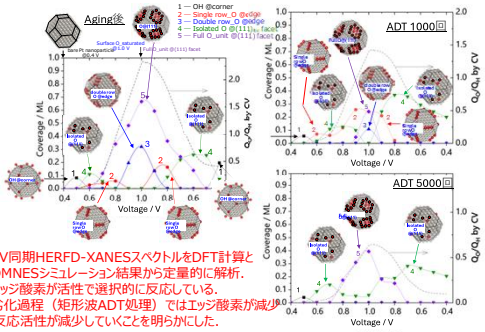
類似施設：米国ブルックヘブン国立研究所放射光施設 Light Source II 燃料電池、触媒計測用のビームライン等。←マルチモーダル同時系列計測に対応していない

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



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）





- 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.

H. Ariga-Miwa, Y. Iwasawa et al. *ACS Catal.* 15, 9856 (2025).
H. Ariga-Miwa, K. Higashi, Y. Iwasawa, under review (invited Account)

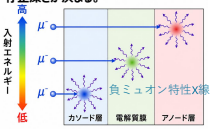
研究開発成果・2

ミュオン特性X線元素分析法

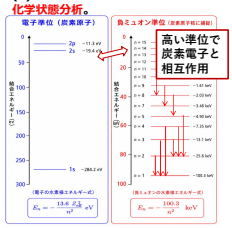
素粒子	電荷	スピン	質量	寿命	
μ⁺	+1	1/2	106 MeV/c²	2.2 μs	質量が1/9のH⁺
μ⁻	-1	1/2	106 MeV/c²	2.2 μs	質量が200倍の電子

① MEAへの負ミュオン照射

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。



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

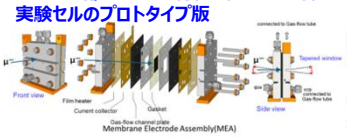
複数の元素を同時測定可能

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

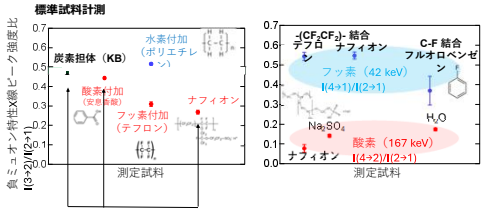
元素	ミュオン特性X線エネルギーE_n/keV
Pt	5518
Ce	4098
Fe	1256
C	75
O	133
F	168
S	517

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.

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―



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H_2Oを酸素のピーク強度比から定量評価が可能。

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。

国立大学法人電気通信大学　三輪寛子
連絡先：h-miwa@uec.ac.jp