

燃料電池・水電解における 中性子散乱・イメージング技術の活用と課題



<https://www.tytlabs.co.jp/>

株式会社 豊田中央研究所
執行職 長井 康貴



QRコード：デンソーウェーブと
豊田中央研究所が1994年
に共同開発しました

- 1. 会社紹介**
2. 豊田中研の量子ビーム活用
3. 燃料電池への中性子活用
4. 水電解への中性子活用
5. まとめと今後の展望

会社概要

- ◆ 創立 1960年11月
- ◆ 代表取締役CEO 古賀 伸彦
- ◆ 代表取締役所長兼CRO 志満津 孝
- ◆ 資本金 30億円
- ◆ 株主会社(9社) 豊田自動織機、トヨタ自動車、愛知製鋼、ジェイテクト
トヨタ車体、豊田通商、アイシン、デンソー、トヨタ紡織

長久手キャンパス



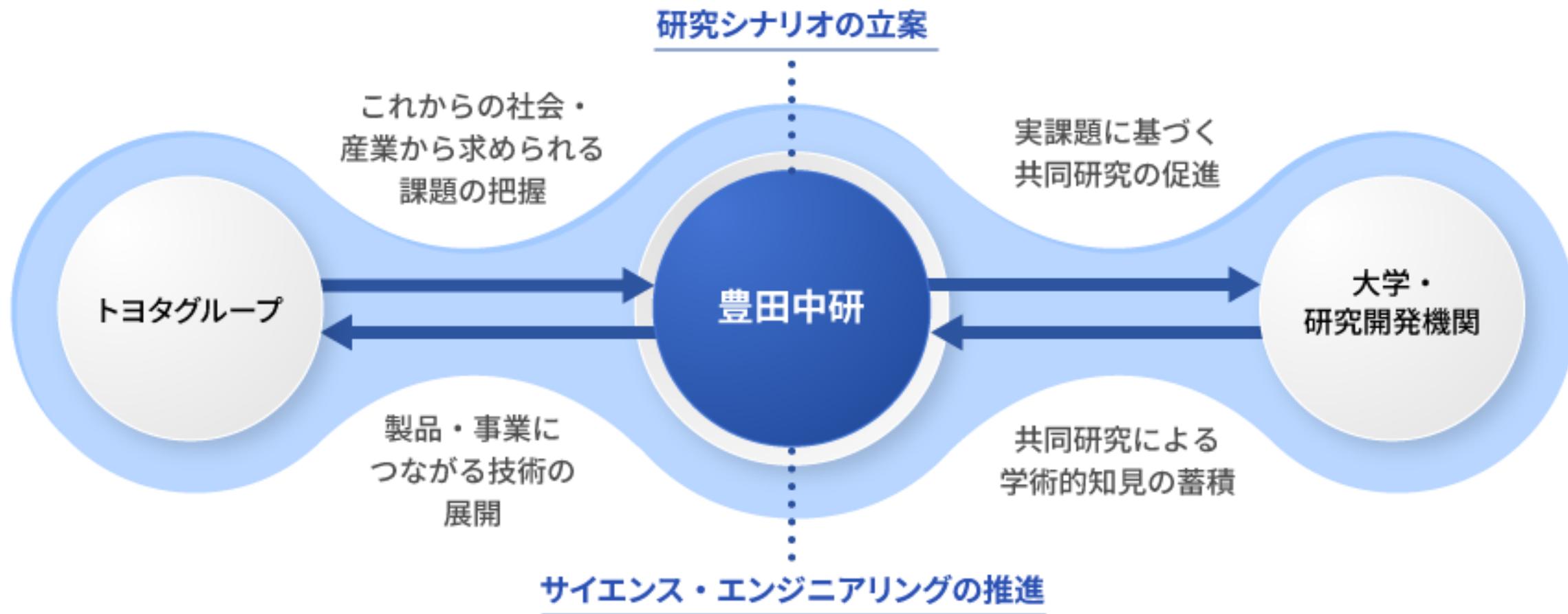
- ◆ キャンパス : 愛知 (長久手)
東京 (水道橋)
- ◆ 従業員数 : 約1,000名

継続的に研究員採用を行っています

研究総合力の発揮を目指して



研究ハブ機能



【サイエンスとエンジニアリングとをつなぐ研究機関】
① 社会や産業から求められる課題と最先端の学術動向に基づいて研究シナリオを立案
② トヨタグループや大学や研究開発機関と連携することで、研究力や有用な知見を蓄積
③ トヨタグループを通じて社会実装へと着実につなげる

研究ハブ機能

QUP (量子場計測システム国際拠点)

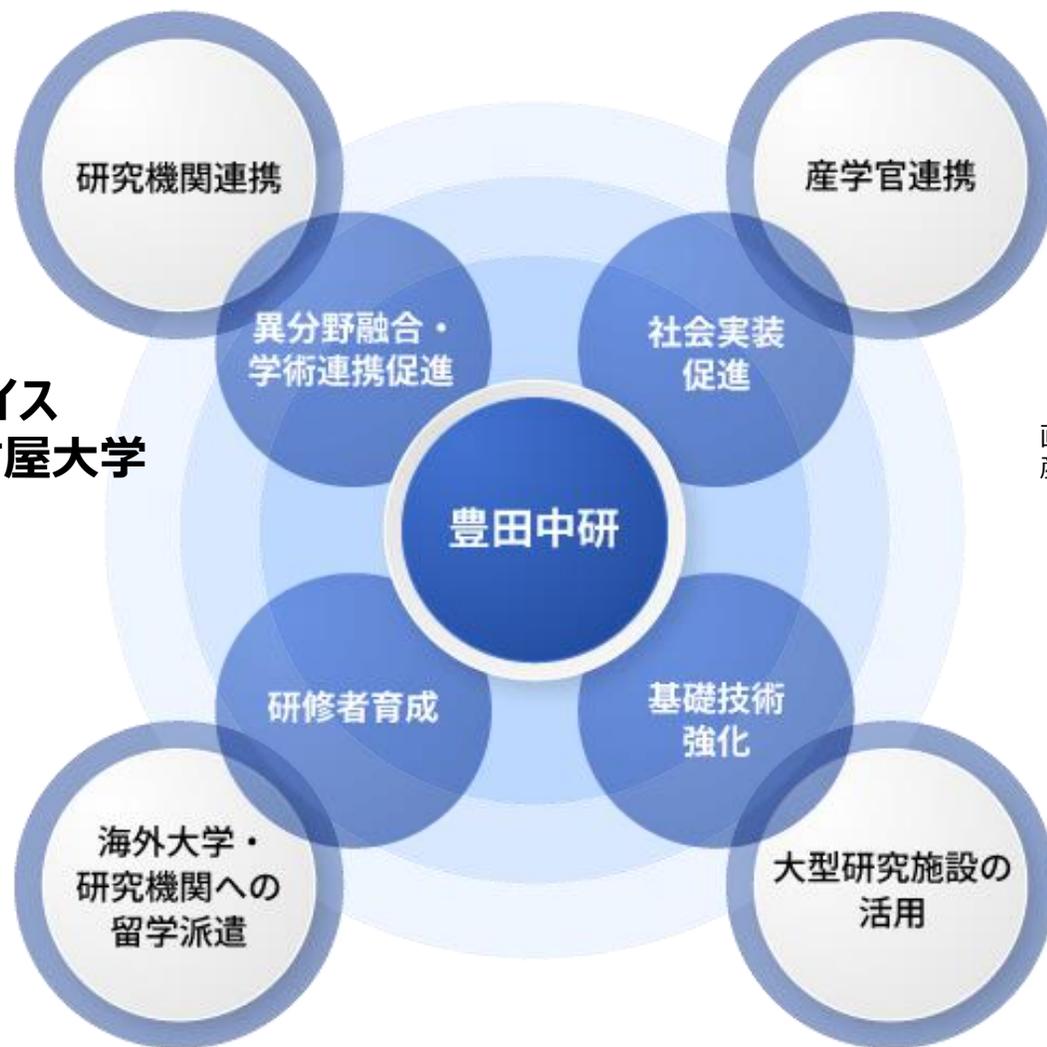


画像提供：高エネルギー加速器研究機構

豊田中研GaNパワーデバイス 産学協同研究部門@名古屋大学



画像提供：名古屋大学未来材料・システム研究所 (C-TEFs)



FC-Cubic



画像提供：FC-Cubic

産業技術総合研究所



画像提供：©国立研究開発法人産業技術総合研究所

J-PARC



画像提供：J-PARCセンター

SPring-8

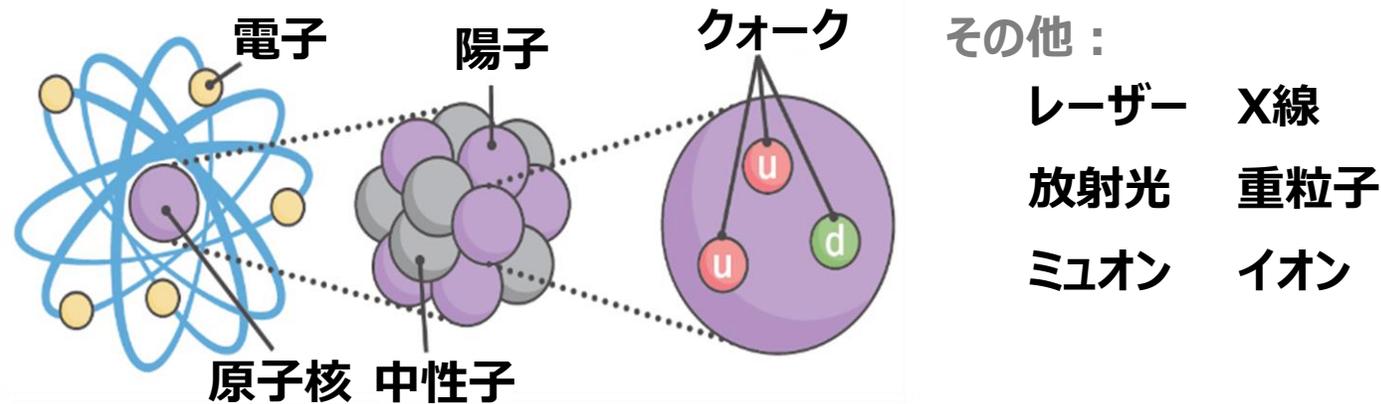


今後も、必要とされる技術を外部研究機関との連携を通じて創出し、社会に貢献

1. 会社紹介
- 2. 豊田中研の量子ビーム活用**
3. 燃料電池への中性子活用
4. 水電解への中性子活用
5. まとめと今後の展望

量子ビーム

粒子と波の性質をあわせ持つ
電子、陽子、中性子、光子など
の集団が同じ方向になす**ビーム**状流れ



豊田中研：

放射光X線

中性子

ミュオン

特徴：非破壊で、部品・材料内部の構造・状態を可視化

世界の量子ビーム施設を活用

Phase 1
外部施設の活用

1999



世界規模で実験、要素技術習得し、地歩固め

量子ビームプラットフォーム

Phase 2 2009



発生原理



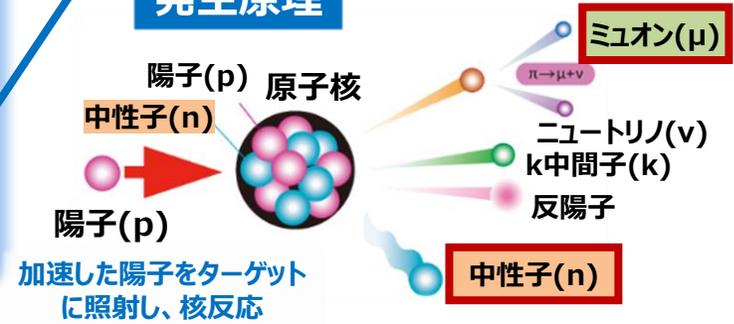
主な対象：
排ガス触媒
燃料電池
二次電池
PCU

放射光X線

Phase 3 2019



発生原理



中性子

ミューオン

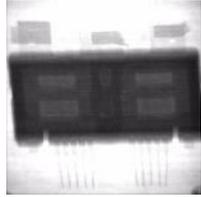
主な対象：
燃料電池
二次電池
水電解

Spring 8 に豊田BL設置

J-PARCとの共研開始

各量子ビームの位置づけ

き裂・氷/水

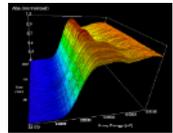


構造

機能

電子状態

価数



放射光X線

- ・極めて明るい(ラボX線の1億倍)
- ・拡がりにくい
- ・高空間分解能観察が可能

ミュオン

- ・局所磁場
- ・重い電子



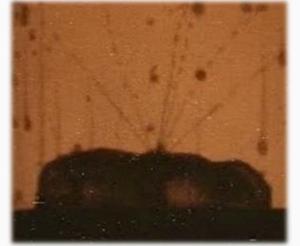
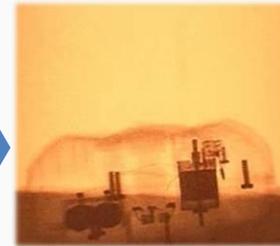
中性子



- ・高透過能(金属など)
- ・軽元素(Hなど)に高感度
- ・大視野観察が可能

金属部分

プラスチック部分



噴水のおもちゃ

X線

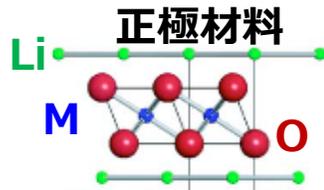
中性子

J-PARC 提供

nm(ナノ)

μm(ミクロン)

mm(ミリ)



材料

スケール

部品



材料～部品までの機能(構造・組成・電子状態)を可視化

豊田中研の量子ビーム活用

量子ビーム活用

電動化のコア技術



モーター



電池



パワーコントロールユニット



FCスタック



高圧水素タンク



充電器



エンジン

FCEV

燃料電池車

BEV

バッテリー
電動車

PHEV

プラグイン
ハイブリッド車

HEV

ハイブリッド車



©iStock.com; Secondary use prohibited

https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/report/er/er20_jp.pdf#page=9

非破壊で部品・材料内部の構造・状態を可視化 →
原理・原則に基づき開発/高品質・高性能なあらゆるクルマ開発へ活用

量子ビーム活用の今後の展望

産業界：カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーの実現

カーボンニュートラル

全セクターのエネルギー管理 「つくる・ためる・はこぶ・つかう」 に波及

(エネルギー、製造:自動車、電機、
運輸・流通、情報通信)

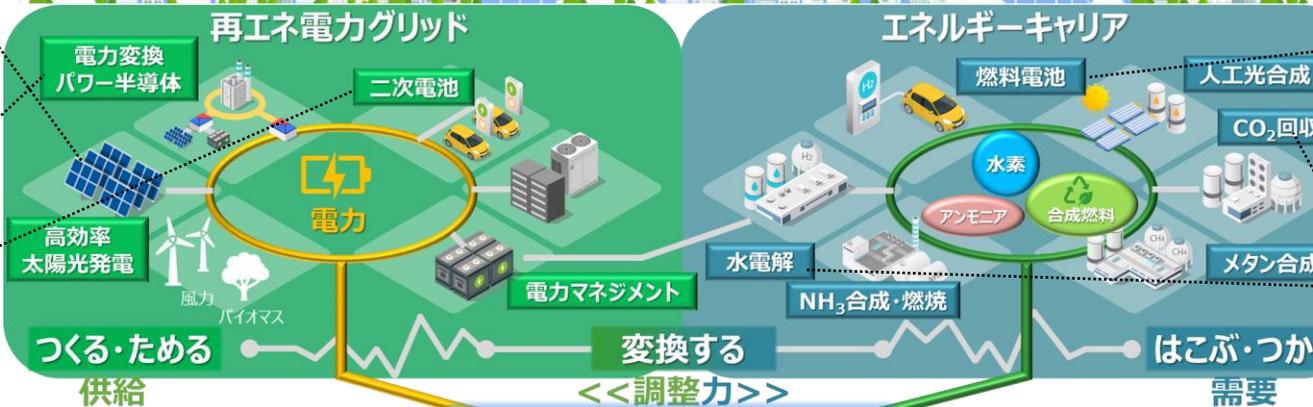
つくる・はこぶ

高効率太陽電池・パワー半導体：
構造・物性解析による高効率化



ためる

リチウム二次電池：材料解析、充放
電解析による高性能・高安全技術



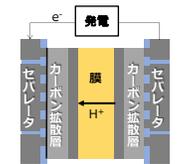
つかう

燃料電池：反応状態可視化による
高効率・高耐久化設計



つくる・はこぶ

CO₂資源化燃料電池・水電解
反応解析による高効率プロセス技術



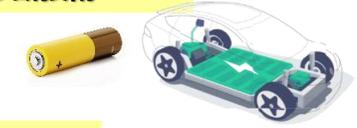
サーキュラーエコノミー

Recycle

金属材料リサイクルの
選別技術



電池・ユニット部品の再利用の
劣化診断技術 Reuse



樹脂再生の
素材分析技術 Refurbish

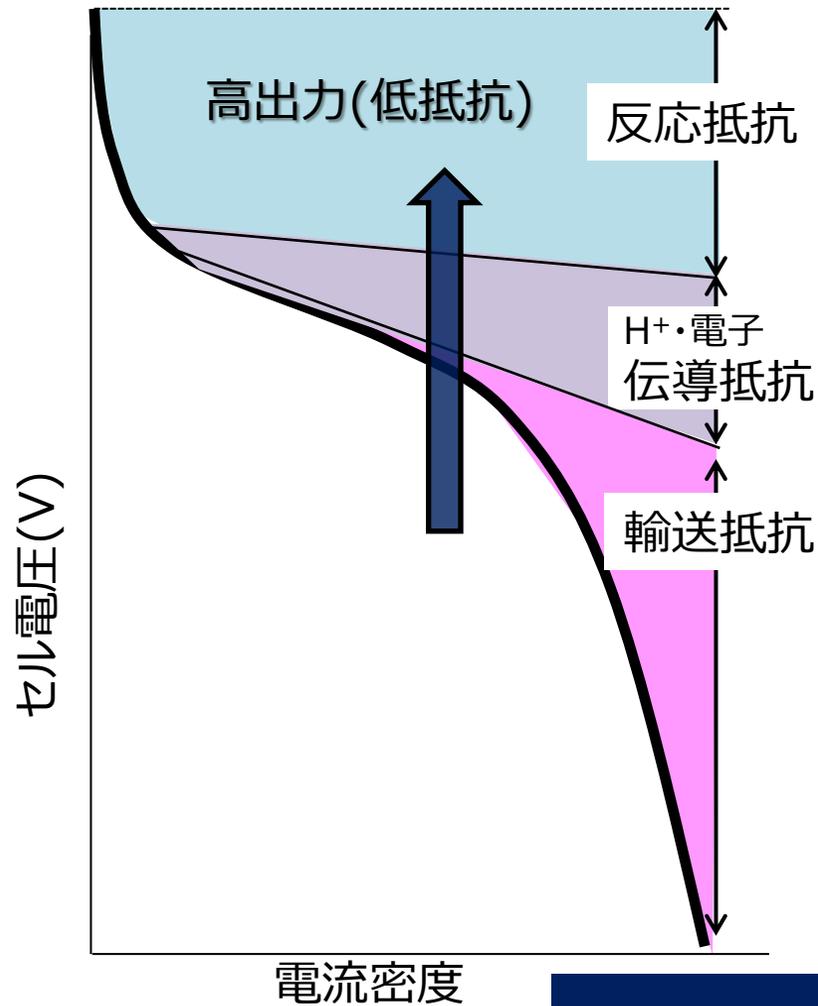


解明すべき現象の広がり

ほぼ全ての素材・部品・加工メーカーに波及

1. 会社紹介
2. 豊田中研の量子ビーム活用
- 3. 燃料電池への中性子活用**
4. 水電解への中性子活用
5. まとめと今後の展望

燃料電池への中性子活用



中性子解析の対象

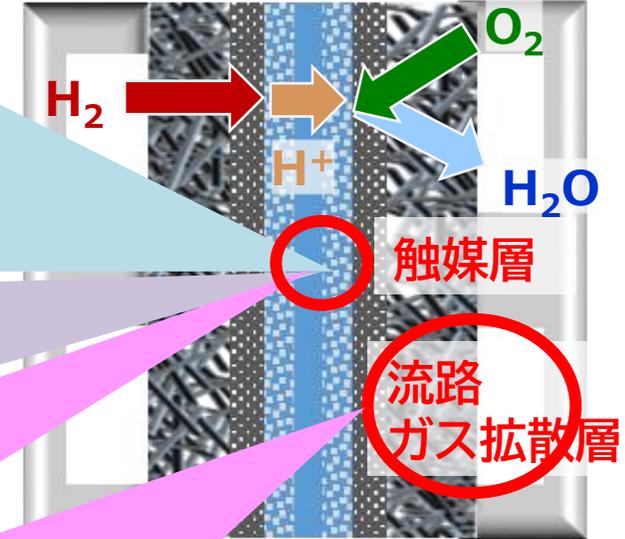
カーボン-アイオノマ界面構造

アイオノマ内のH⁺拡散機構
アイオノマの厚さ分布

触媒層内の液水

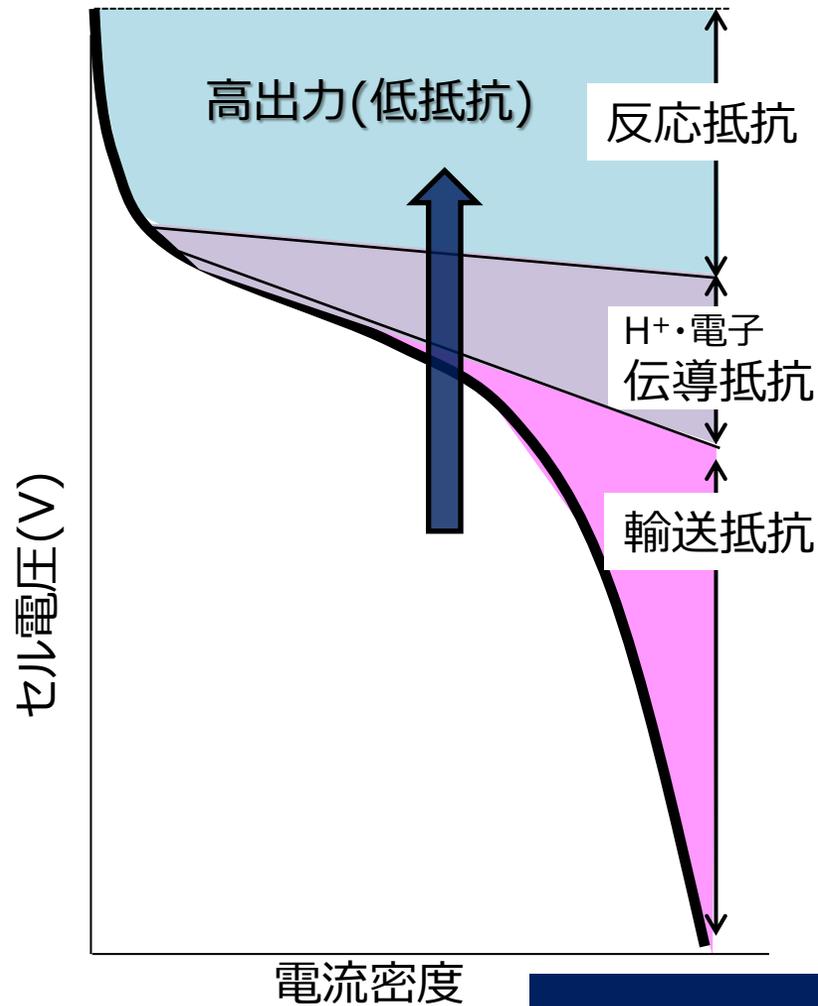
セル内部の水の分布

氷点下始動時の水の凍結挙動



中性子解析は、全ての抵抗の解析に有効

燃料電池への中性子活用



中性子解析の対象

カーボン-アイオノマ界面構造

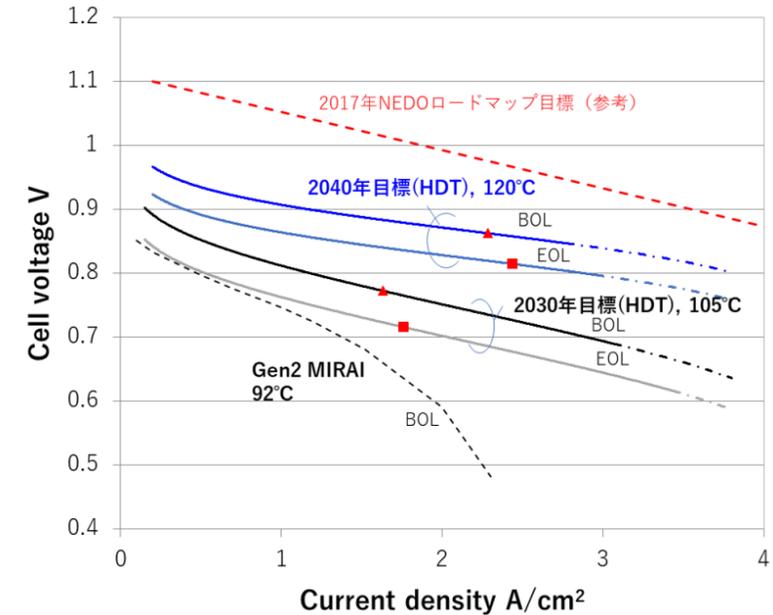
アイオノマ内のH⁺拡散機構
アイオノマの厚さ分布

触媒層内の液水

セル内部の水の分布

氷点下始動時の水の凍結挙動

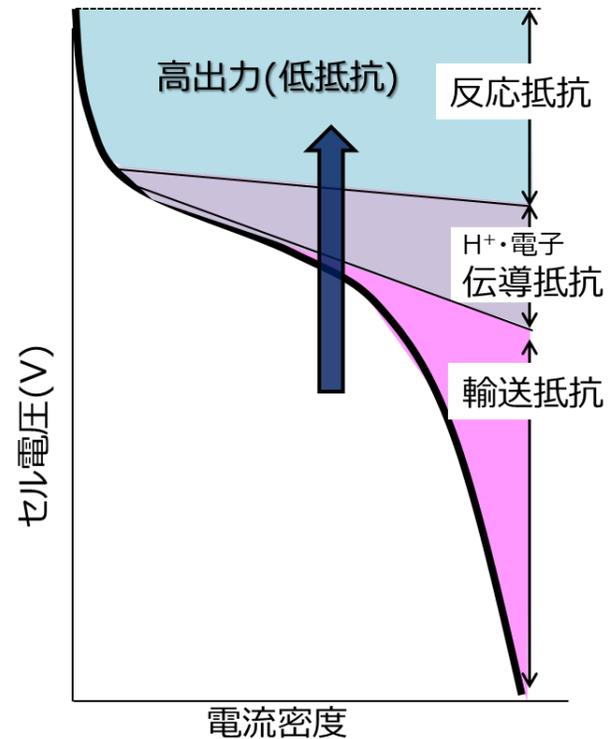
NEDOロードマップ目標



<https://www.nedo.go.jp/content/100956711.pdf>

NEDOロードマップ目標達成には、全ての抵抗を低減する必要がある

各抵抗に関する解析技術の概要

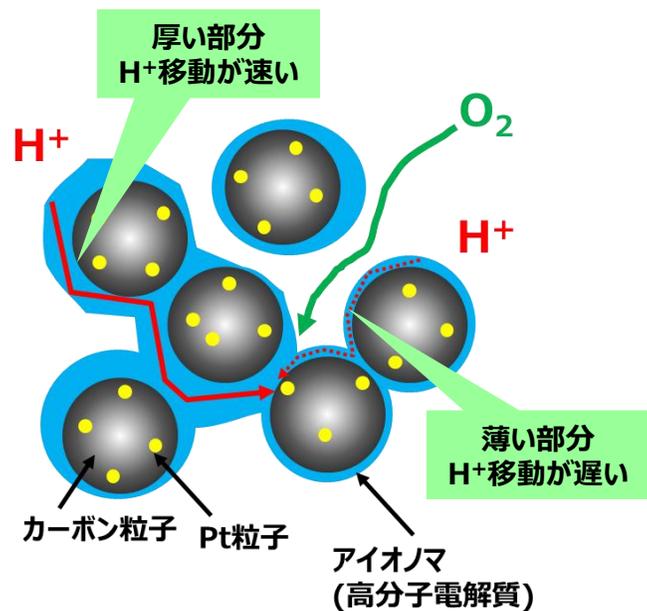


	中性子解析の対象	測定手法
反応抵抗	カーボン-アイオノマ界面構造	反射率
H ⁺ ・電子伝導抵抗	アイオノマ内のH ⁺ 拡散機構	準弾性散乱
輸送抵抗	アイオノマの厚さ分布	小角散乱
	触媒層内の液水	イメージング
	セル内部の水の分布	イメージング
	氷点下始動時の水の凍結挙動	イメージング

中性子小角散乱法によるアイオノマ分布解析

課題

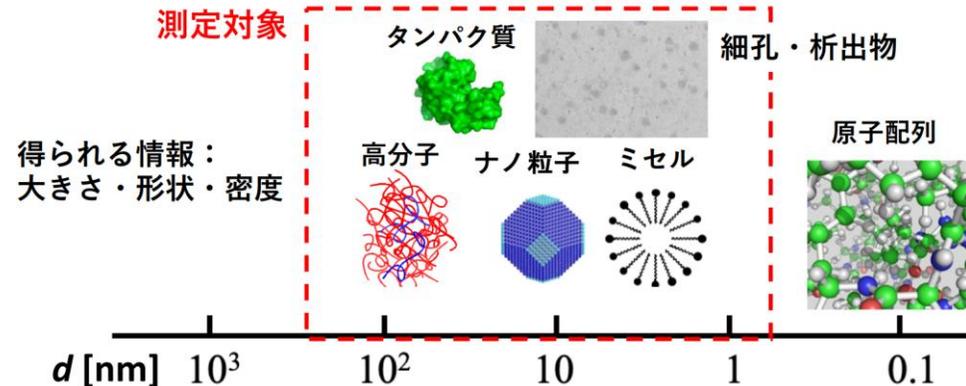
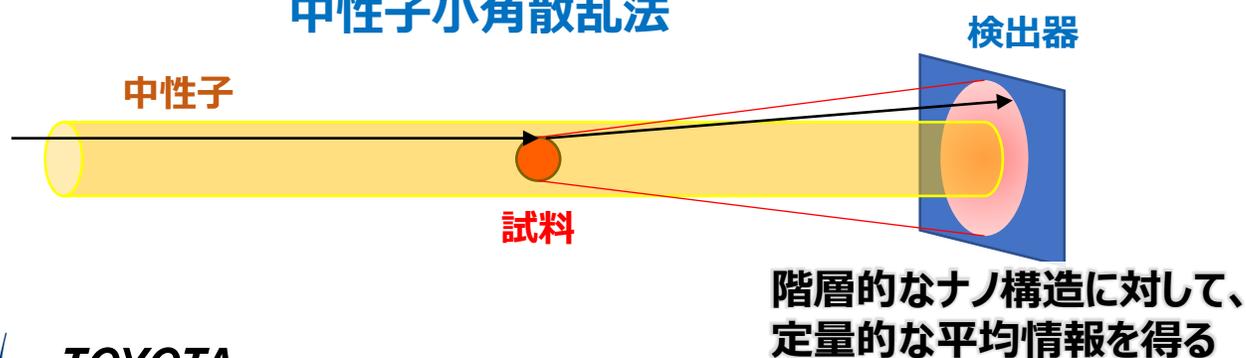
触媒層内のアイオノマを介したH⁺抵抗の低減



触媒層全体のH⁺伝導を説明するためにはアイオノマ分布の平均情報が必要

アプローチ

中性子小角散乱法

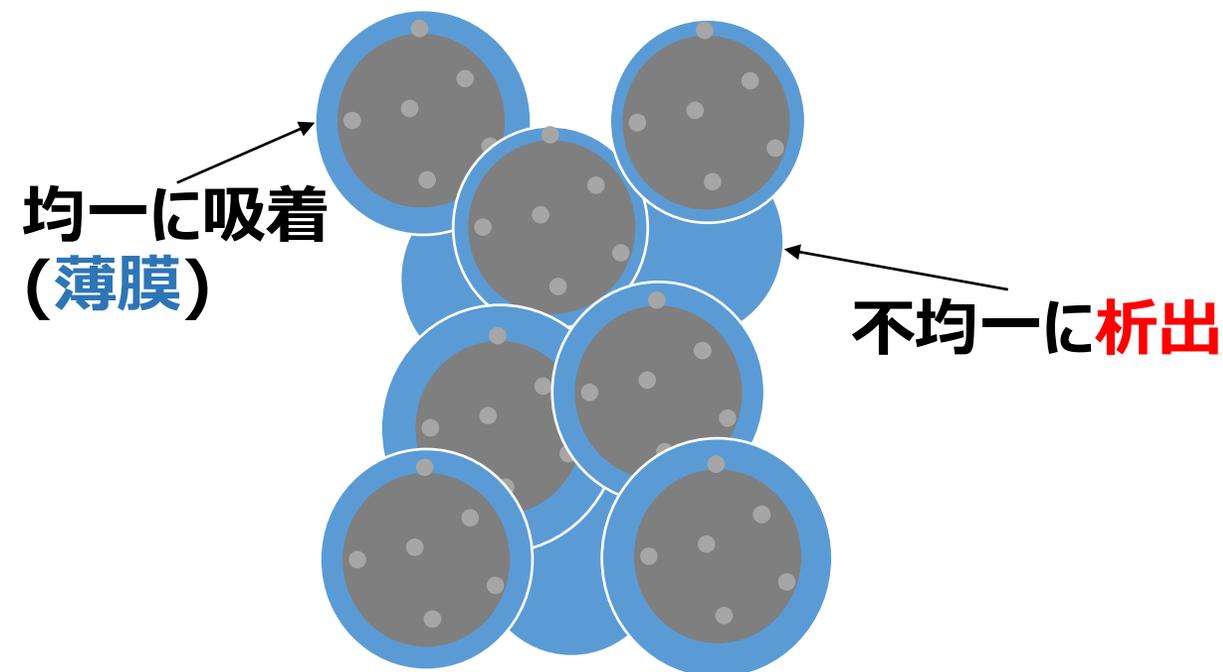
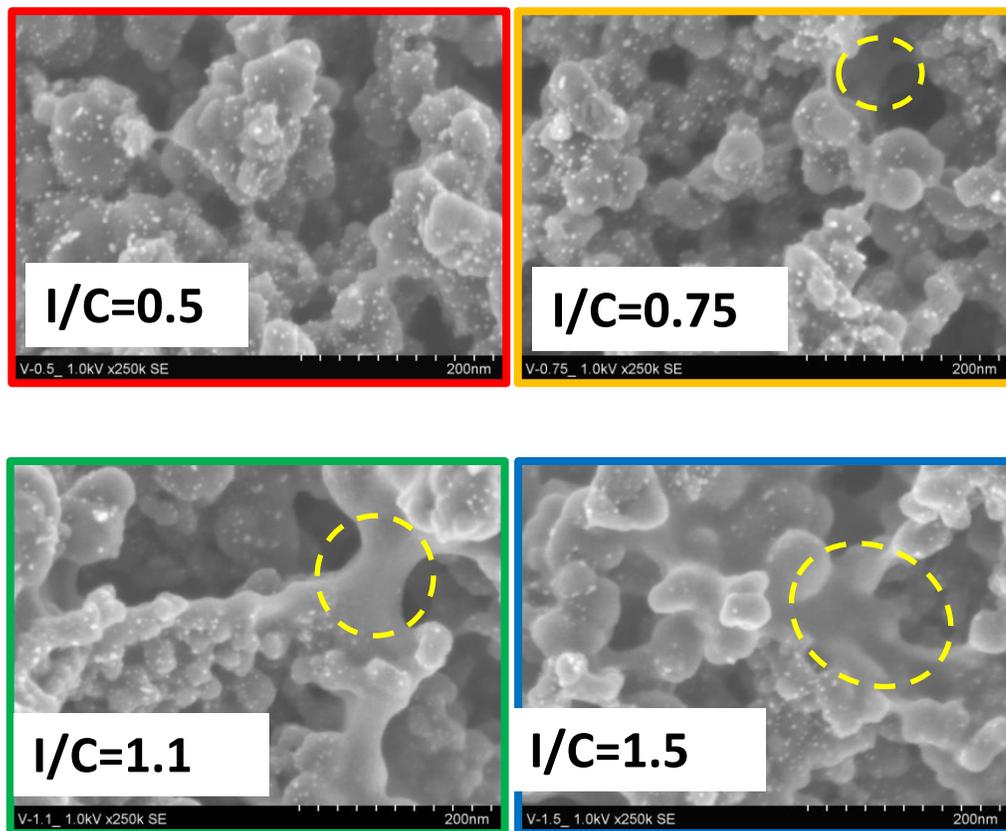


引用元：中性子実験技術基礎講習会（レベル1講習会）

中性子小角散乱法によるアイオノマ分布解析

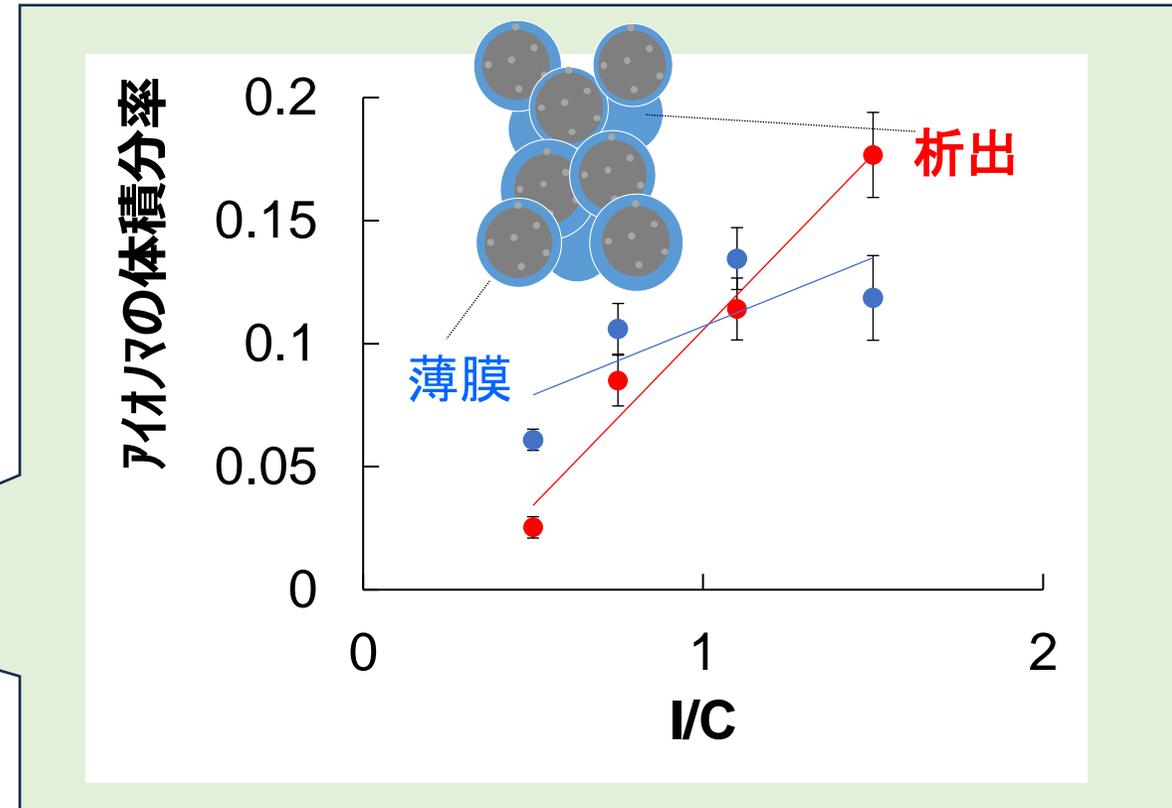
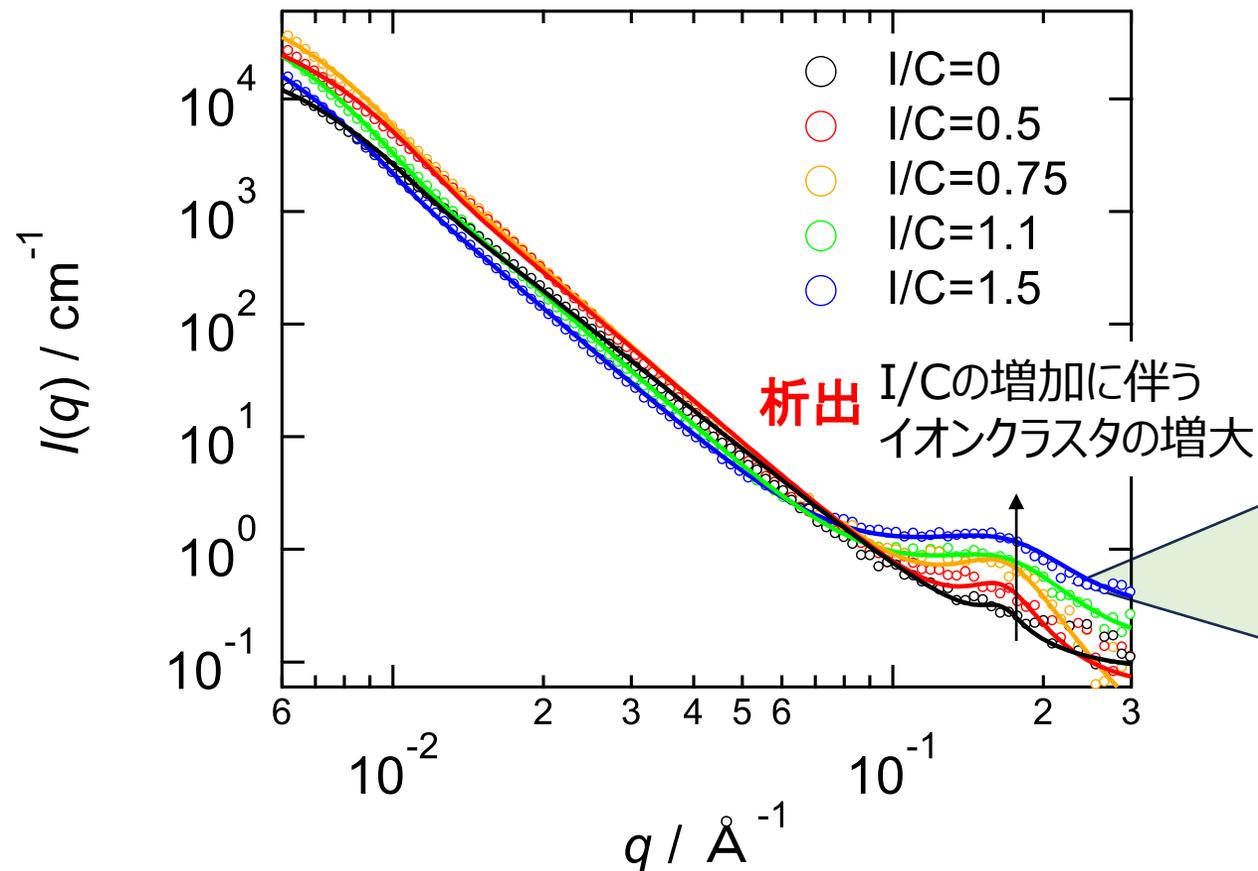
アイオノマ添加量 (アイオノマとカーボンの比I/C) が異なる触媒層を作製

SEM観察

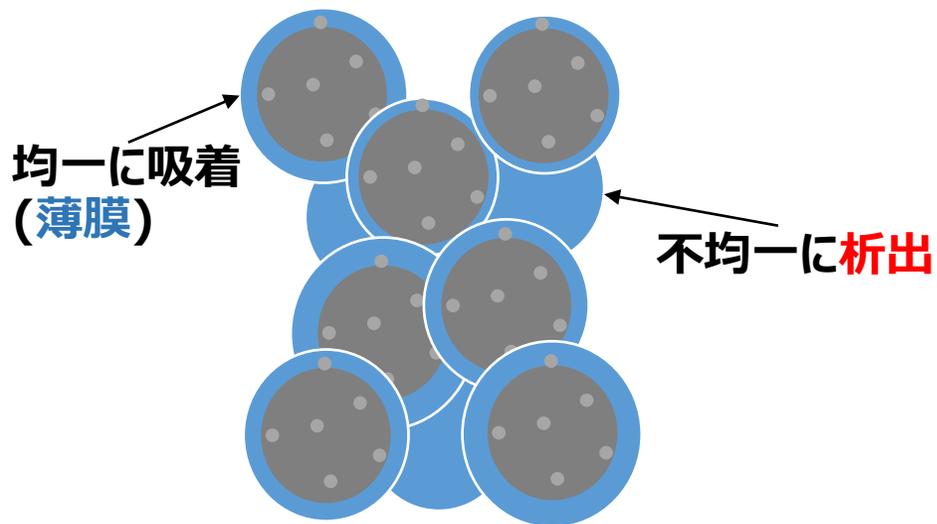


中性子小角散乱法によるアイオノマ分布解析

アイオノマ添加量 (I/C) の増大に伴うイオンクラスタのピークから、
アイオノマの薄膜部と析出部の体積分率を定量的に算出



中性子小角散乱法によるアイオノマ分布解析



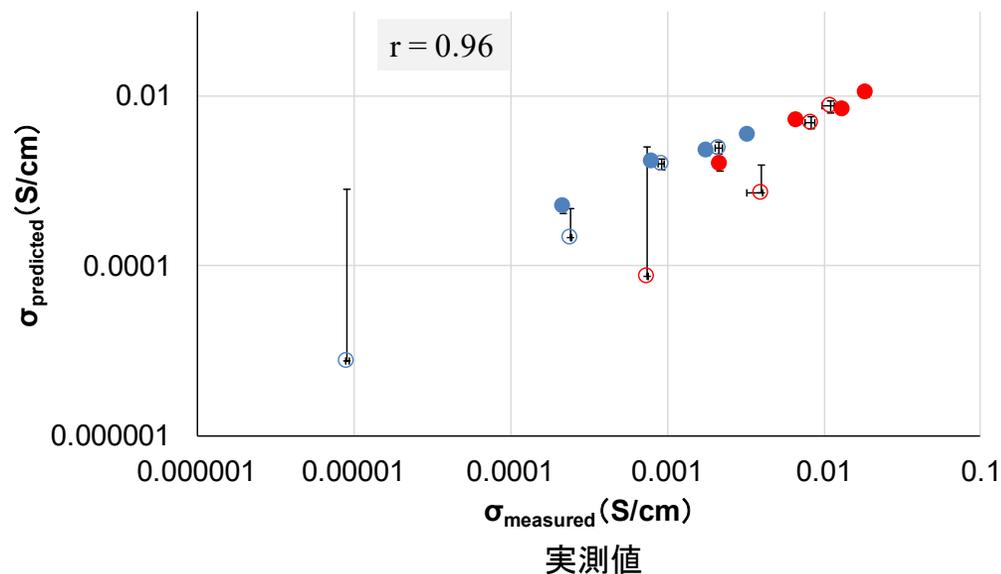
析出の体積分率 (中性子測定) 薄膜の体積分率 (中性子測定)

$$\sigma_{\text{predicted}} = \sigma_{\text{depo}} \Phi_{\text{depo}} + \sigma_{\text{adso}} \Phi_{\text{adso}}$$

厚い部分の伝導率 (文献値*) 薄い部分の伝導率 (文献値*)

中性子で測定した析出と薄膜の体積分率と、文献値による伝導率から、触媒層全体のH⁺伝導率を予測するモデルを構築

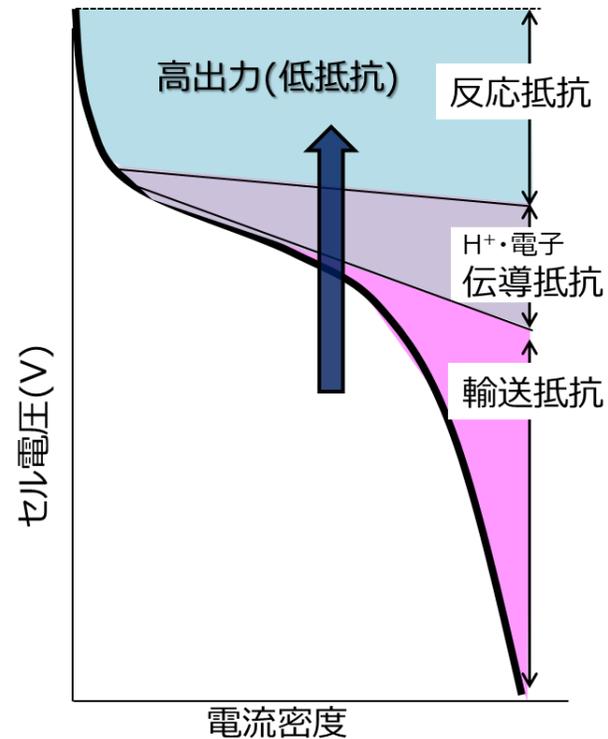
予測値



実測の伝導率との比較からモデルの妥当性を確認
→現在、アイオノマ被覆構造の設計、開発品の評価に活用

燃料電池への中性子活用

各抵抗に関する解析技術の概要

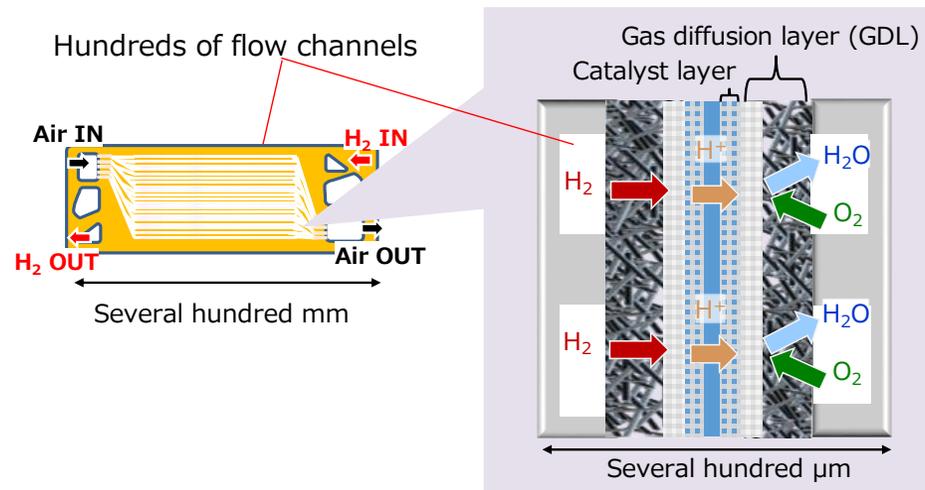


	中性子解析の対象	測定手法
反応抵抗	カーボン-アイオノマ界面構造	反射率
H ⁺ ・電子伝導抵抗	アイオノマ内のH ⁺ 拡散機構	準弾性散乱
	アイオノマの厚さ分布	小角散乱
輸送抵抗	触媒層内の液水	イメージング
	セル内部の水の分布	イメージング
	氷点下始動時の水の凍結挙動	イメージング

中性子イメージング法による液水分布解析

課題

燃料電池内における酸素ガス拡散抵抗の低減



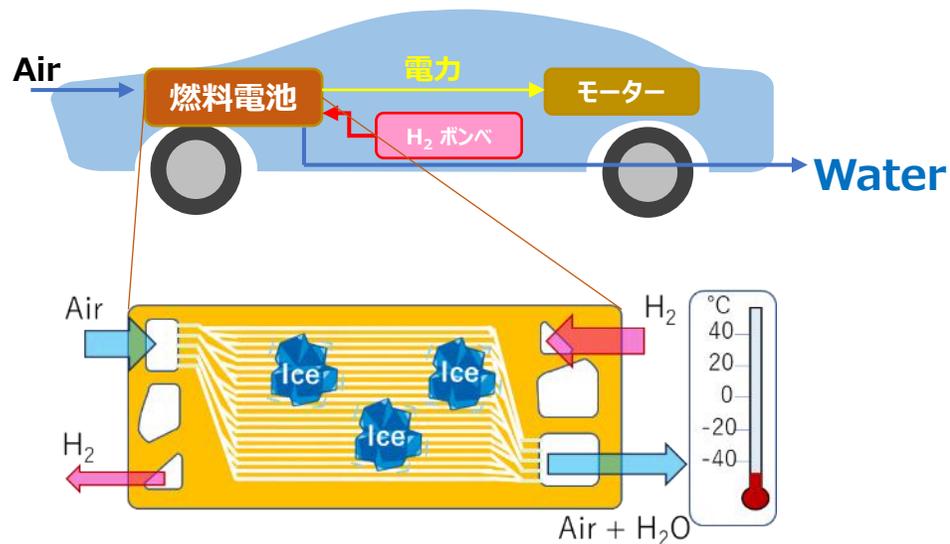
ガス拡散抵抗を議論するには液水分布の情報が必要

アプローチ

中性子イメージング法

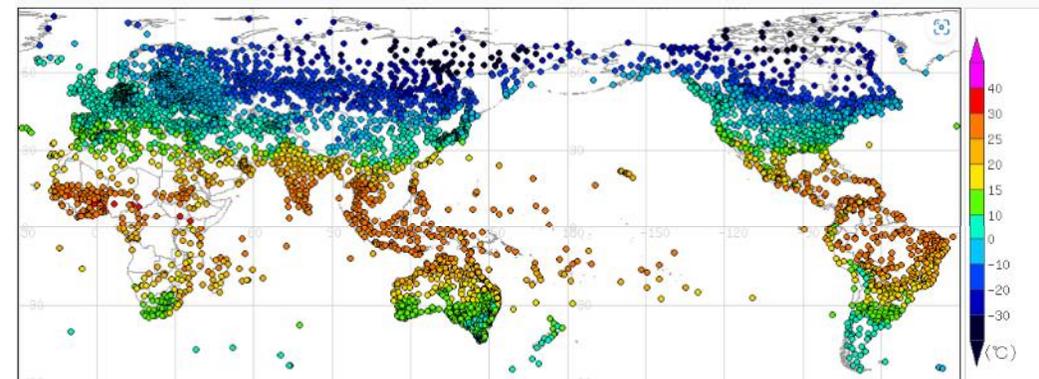


中性子イメージング法による液水分布解析



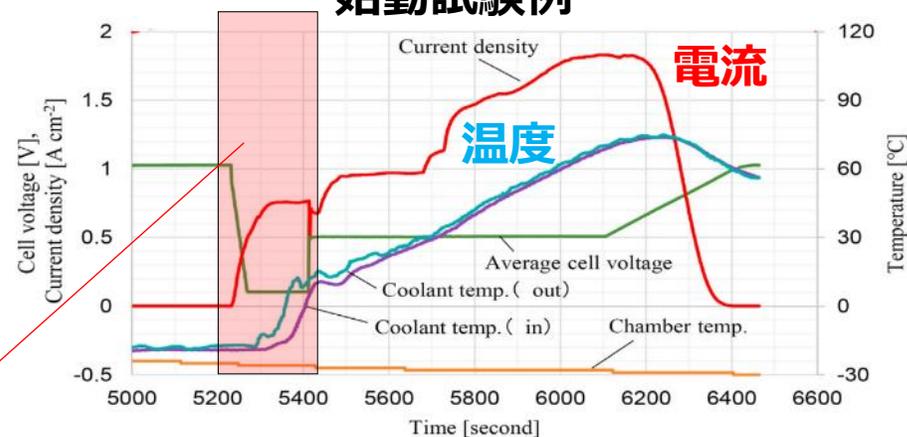
低温時燃料電池内で凍結
→正常動作が妨げられる：**抑制必要**

問題が顕在化する前に0°C以上に昇温：**急速暖気**
→ FC自身の自己発熱で昇温



気象庁HP

始動試験例



T. Takahashi et al. Int. J. Hydrog 47 (2022) 4111-4123

氷点下環境での、セル内の水/氷の分布挙動を可視化し、
氷点下始動における動作条件や構造を最適化し、効率upを目指す

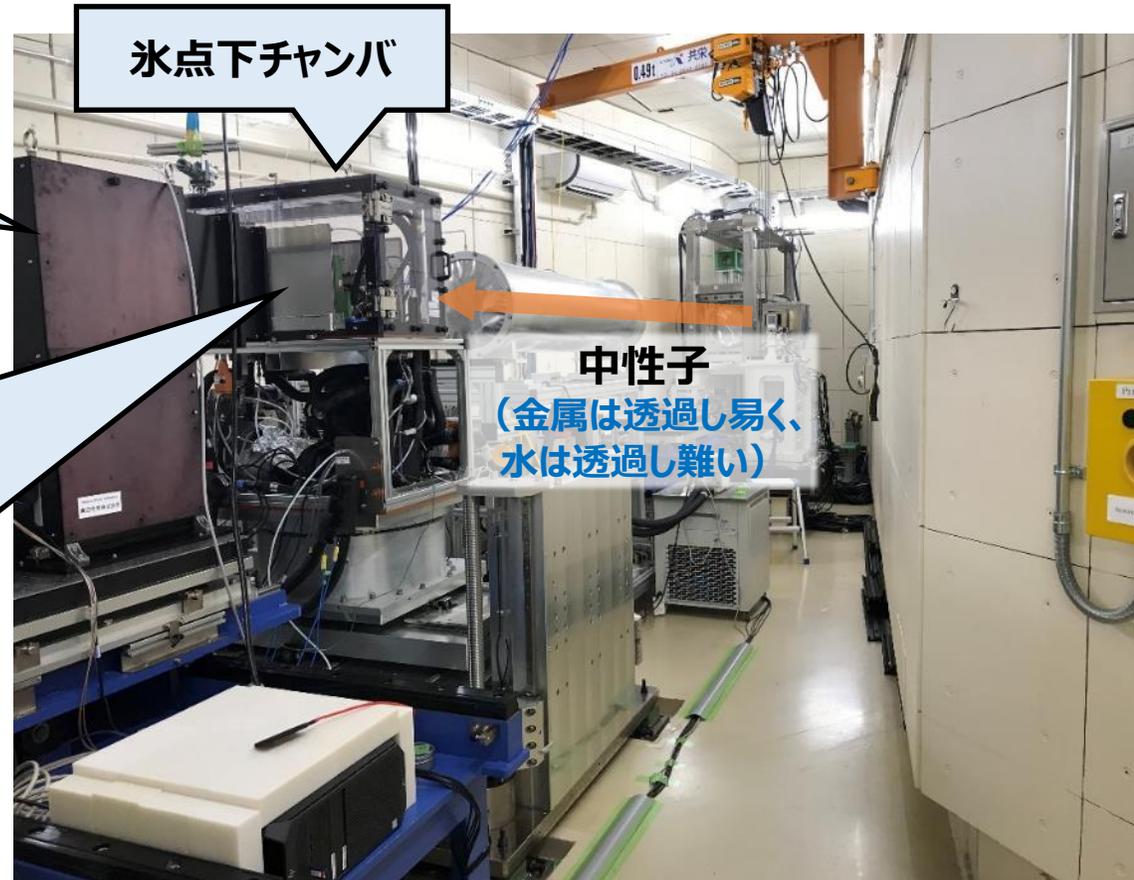
中性子イメージング法による液水分布解析

氷点下環境の水分布の変化を観察

第2世代MIRAIセル



実験ハッチ内の様子 (RADENビームライン)



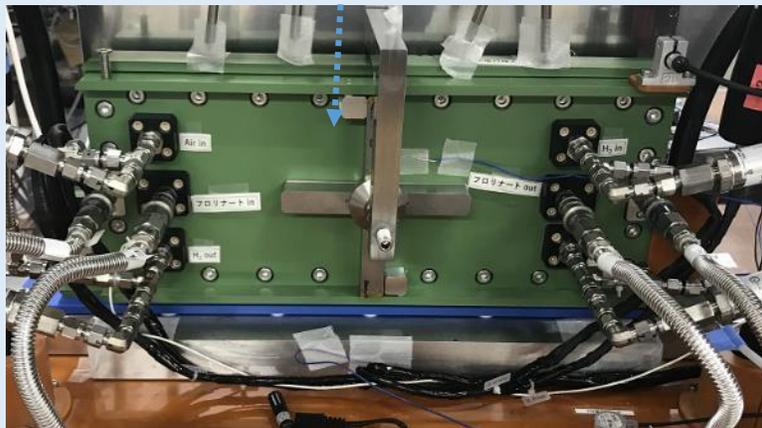
氷点下チャンバ

検出器

中性子

(金属は透過し易く、
水は透過し難い)

氷点下発電治具：温調したフロリナートを内部に供給し、セルの温度を -30°C ~ 65°C まで制御。



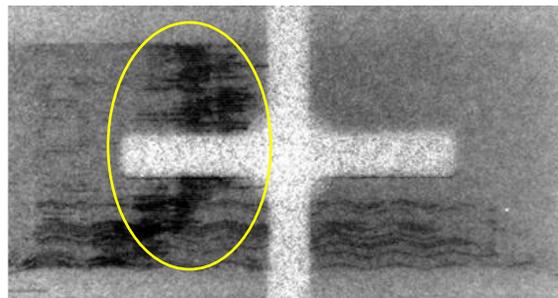
中性子イメージング法による液水分布解析

氷点下始動に必要な自己発熱を設計するために、「発熱不足時の停止挙動」を観察。



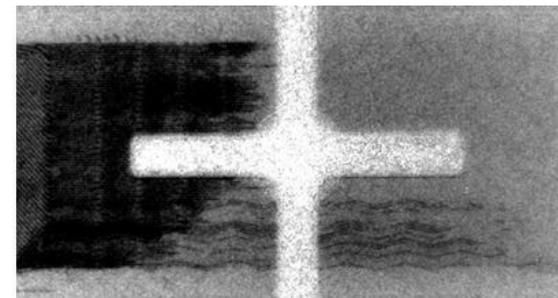
セル

始動 1.2分後

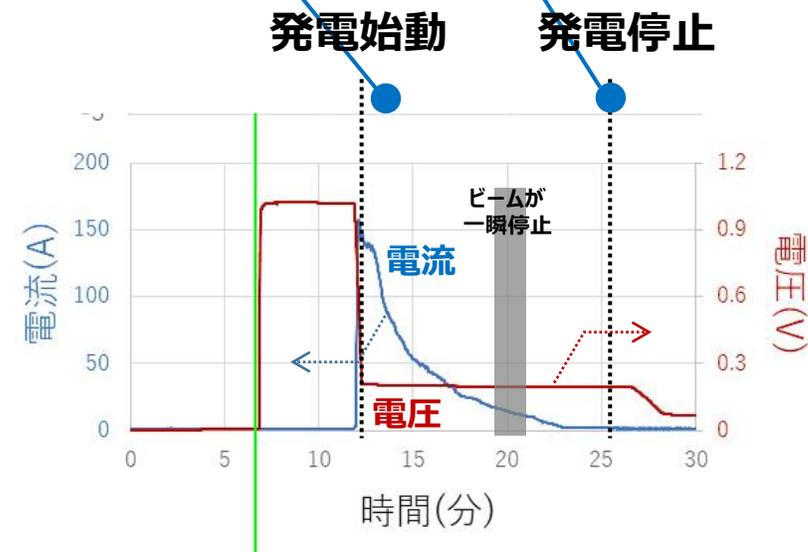
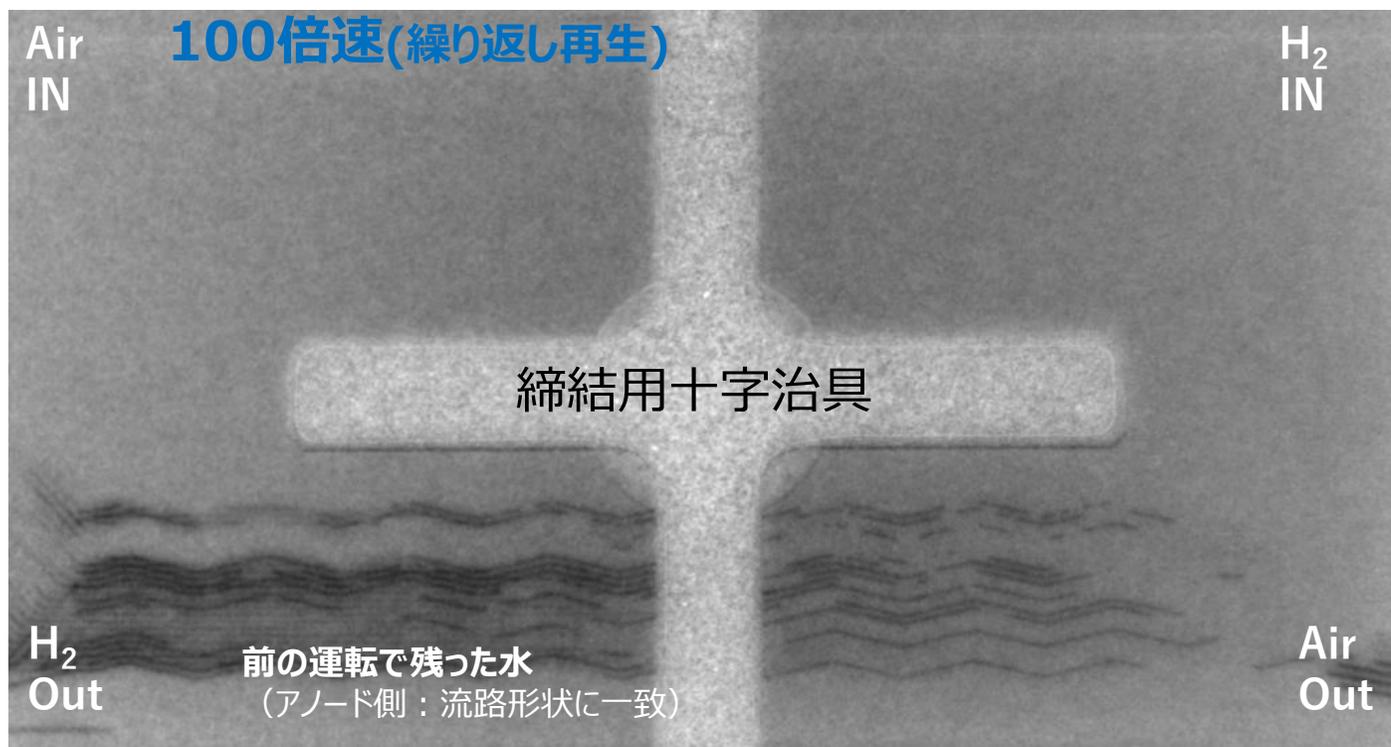


カソード流路内への水の蓄積を確認
(カソードの流路形状と一致)

始動 11分後 発電停止



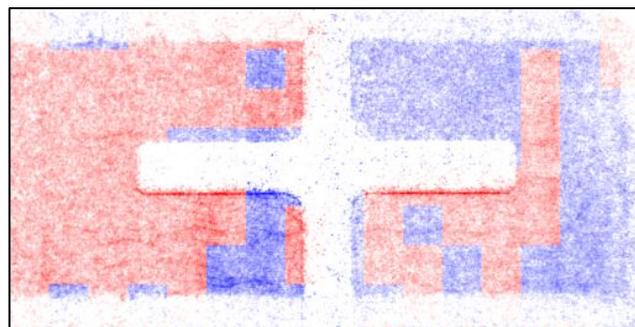
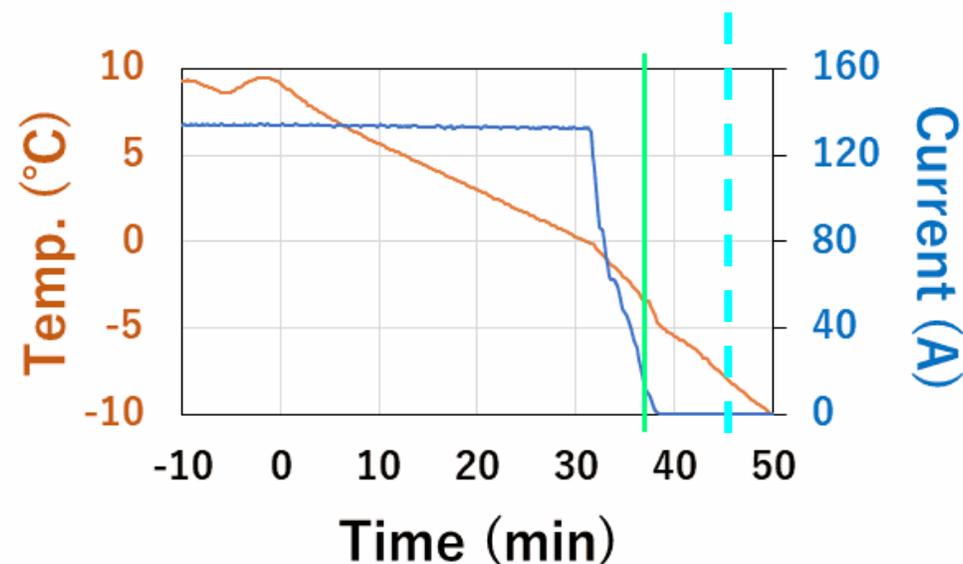
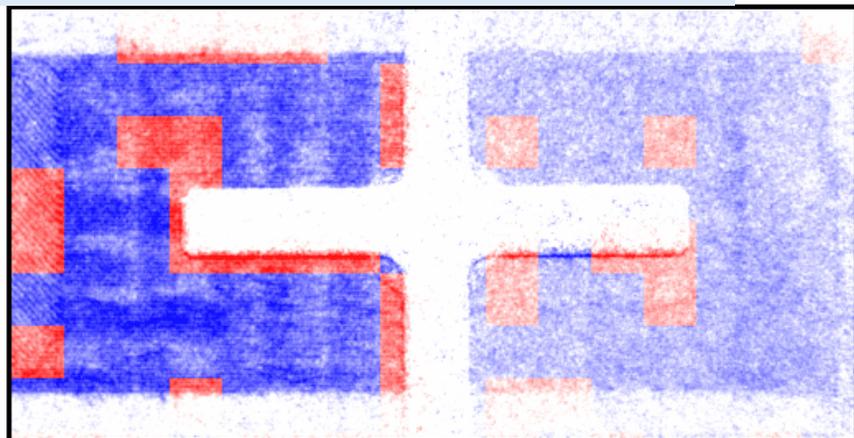
カソード流路が閉塞、発電停止
(酸素供給が止まり発電できなくなる)



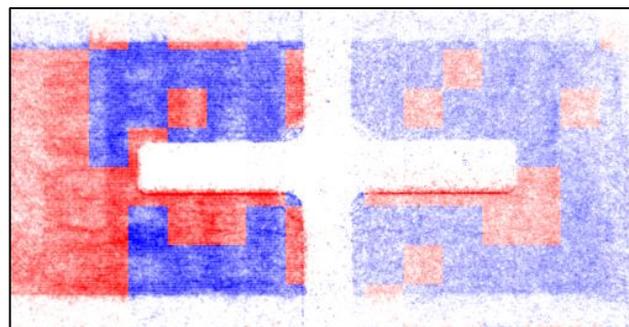
中性子イメージング法による液水・氷分布解析

氷点下始動プロトコル設計のために、
「発電中の再凍結挙動」を観察。

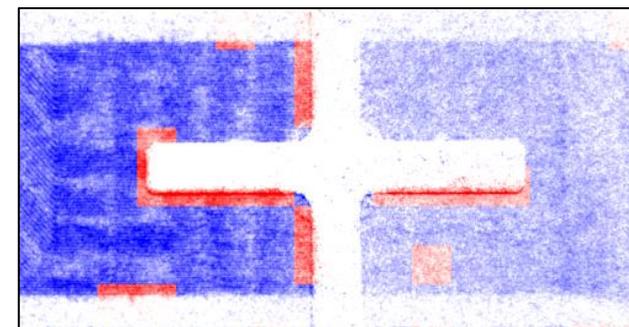
■ Water
■ Ice



Freezing from right.
And blockage in middle CA channels



Increasing water
and freezing toward left
and current down



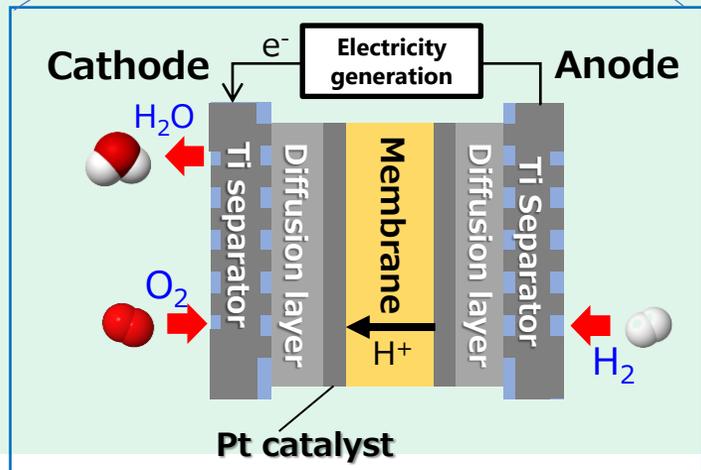
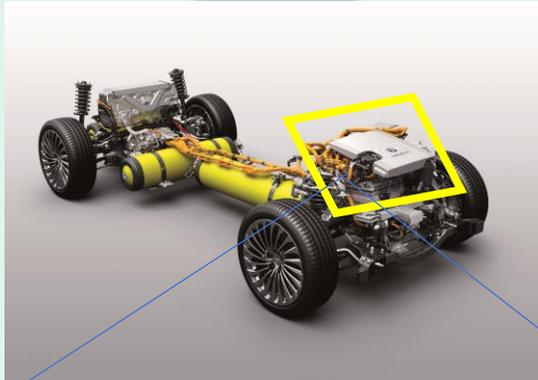
All feezed and shutdown

1. 会社紹介
2. 豊田中研の量子ビーム活用
3. 燃料電池への中性子活用
- 4. 水電解への中性子活用**
5. まとめと今後の展望

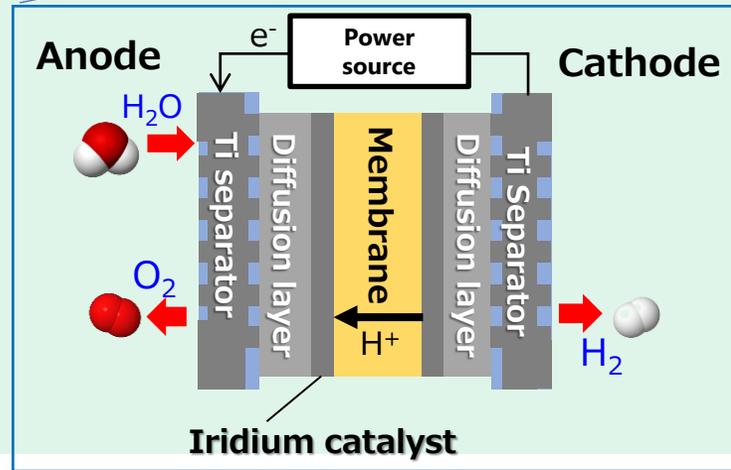
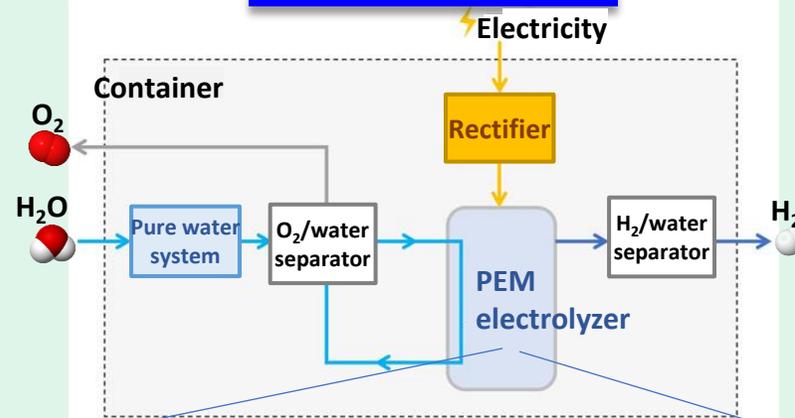
背景

Applying the technology cultivated through FC to water electrolysis systems to build key PtG technology

Fuel Cell



Water Electrolyzer



Preliminary Research
(TCRDL & TOYOTA)

Design of a hydrogen production system using a water electrolyzer stack



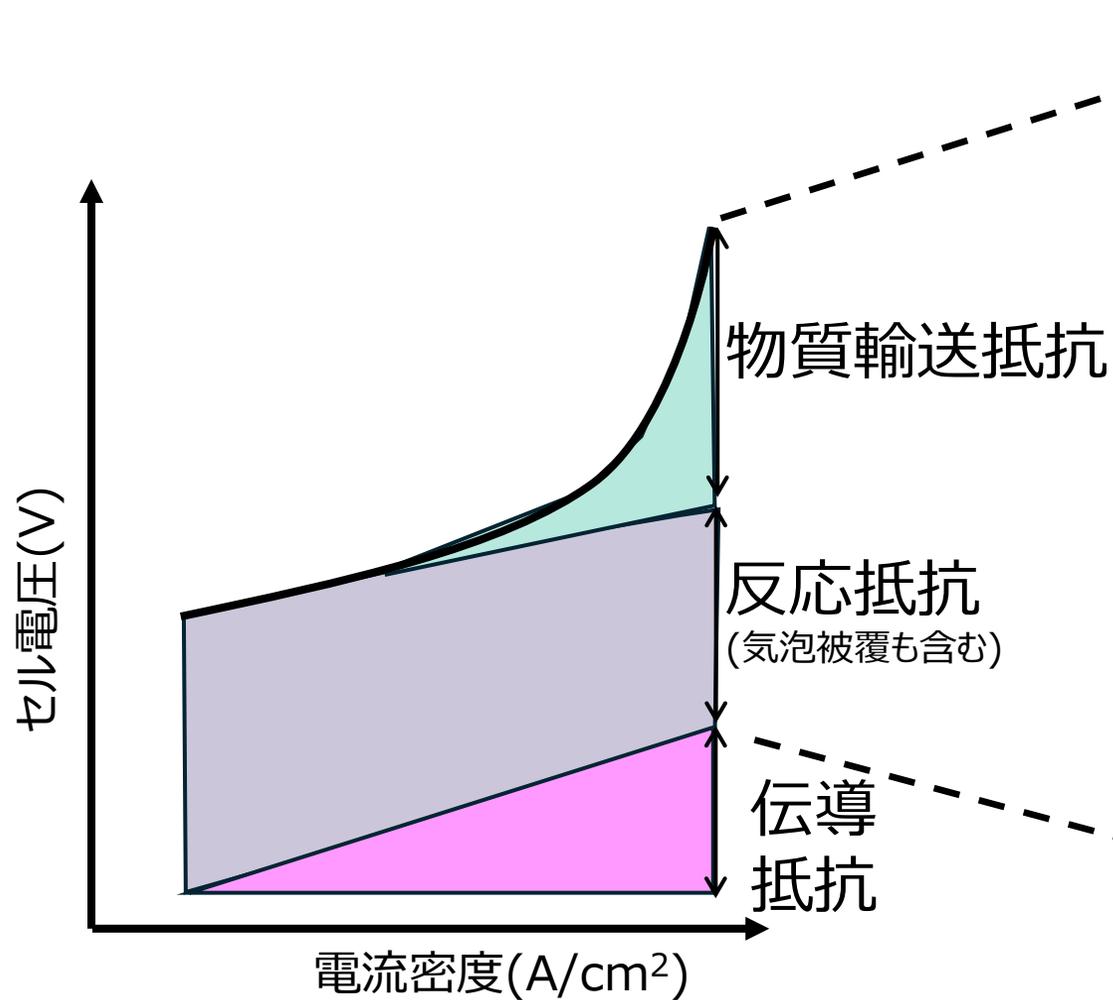
NEDO proj.
(TOYOTA & DENSO group)

Hydrogen production & utilization @ DENSO Fukushima†

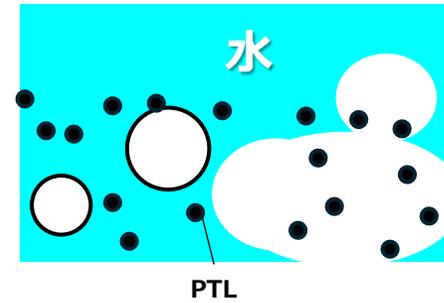
Sharing of Toyota Mirai FC stack components and production facilities

†Source: Toyota Motor Corporation, "Toyota to Accelerate Plant Decarbonization Efforts in Fukushima Using Hydrogen" (Press release dated Mar. 9, 2023)

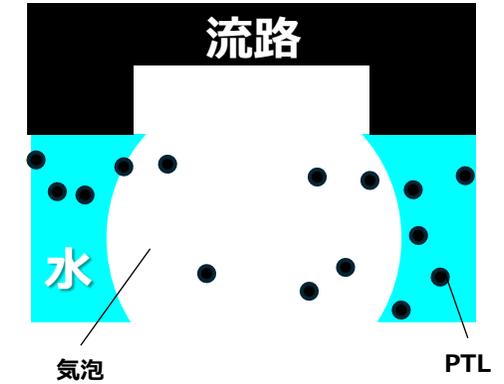
水電解への中性子活用



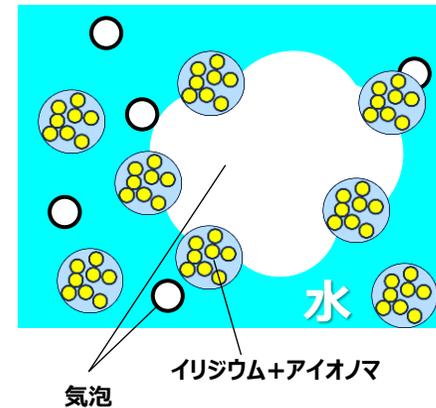
PTL内の気泡詰まり



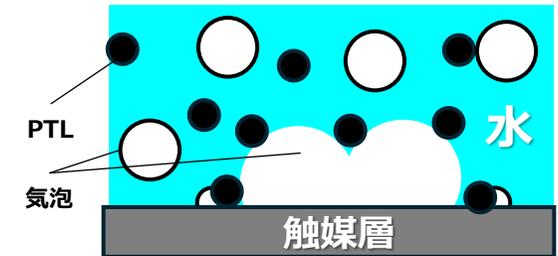
流路内の水枯れ



触媒層内の気泡詰まり



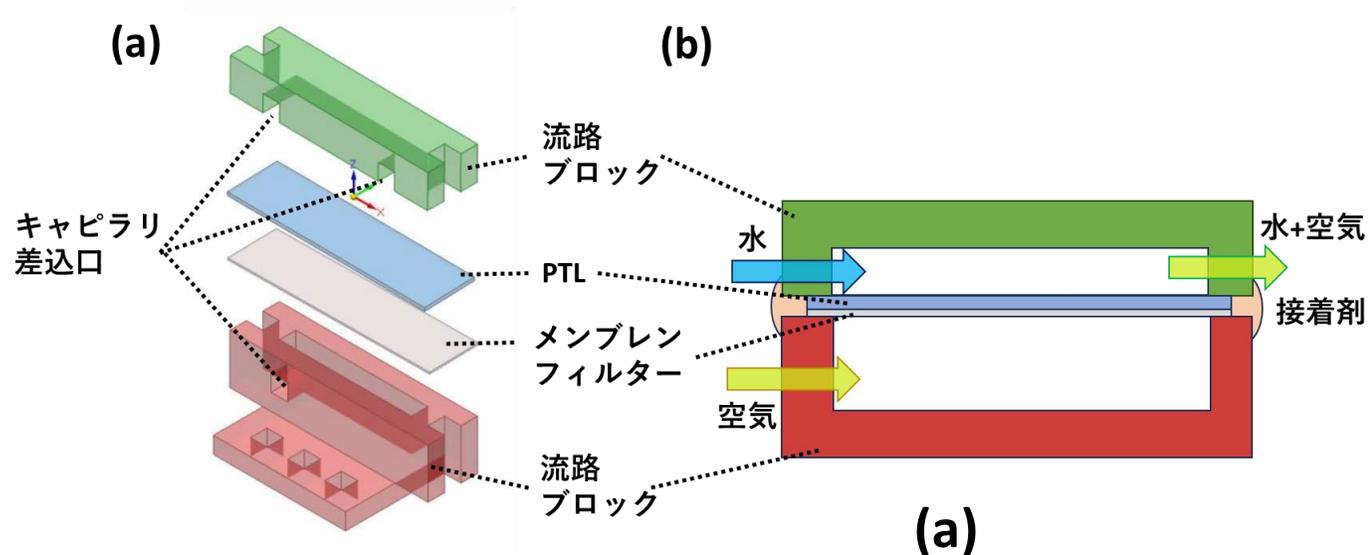
界面の気泡詰まり



電流密度増大に伴うセル電圧の上昇には「泡」が影響する。

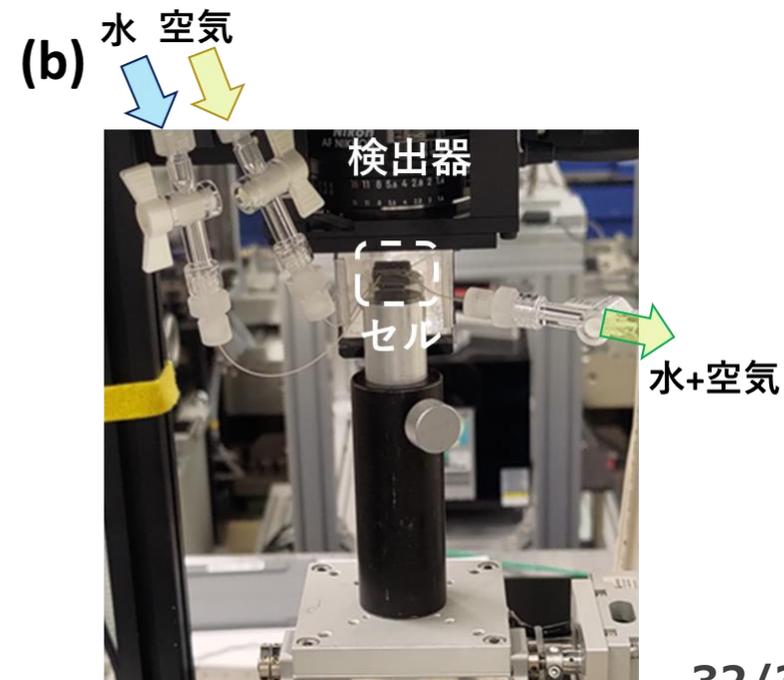
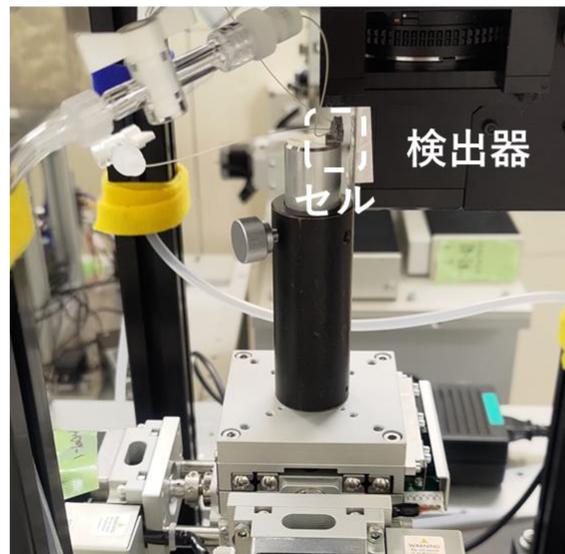
中性子イメージング法による気泡分布解析

模擬水電解セル断面観察測定

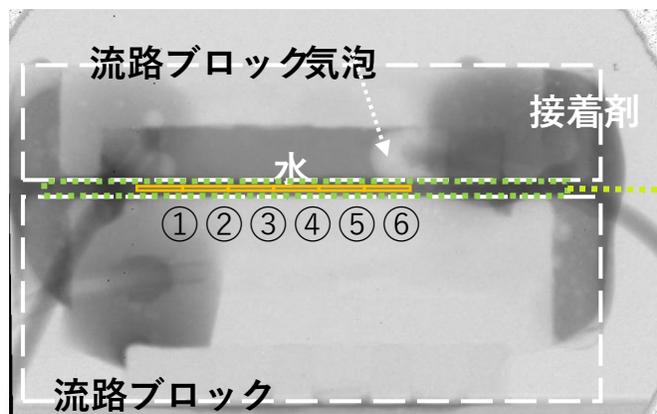


空気を送り込んで
酸素発生⇒PTL⇒流路⇒セル外
を模擬動作

中性子

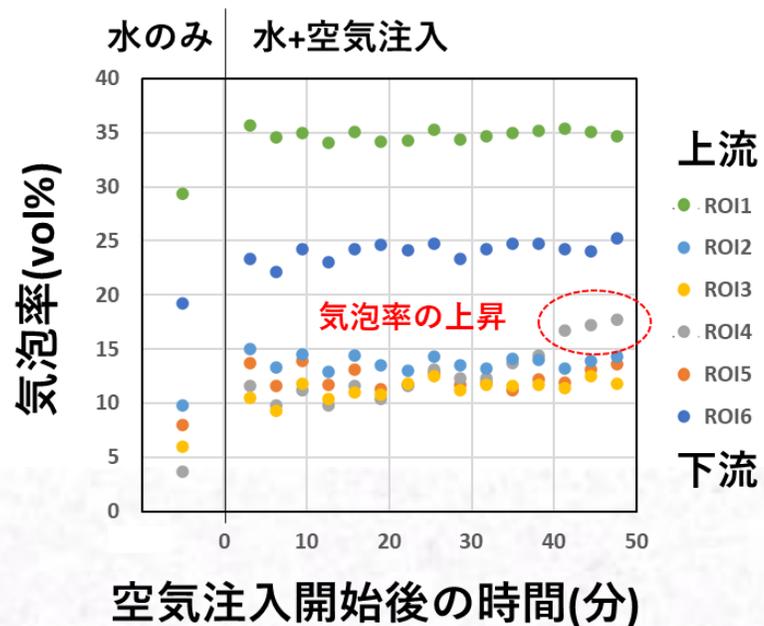


中性子イメージング法による気泡分布解析



接着剤+PTL
+メンブレンフィルター
キャピラリー

15 mm



1. 会社紹介
2. 豊田中研の量子ビーム活用
3. 燃料電池への中性子活用
4. 水電解への中性子活用
5. **まとめと今後の展望**

まとめ

- **J-PARC**は、**トヨタG**の開発において**重要な施設**
- **燃料電池**や**水電解**などの要素技術を含む**CN**や、**CE**の実現のためには、**中性子解析**による開発加速が**不可欠**

今後の展望

- **新設BLの高強度中性子**により、これまで**見えなかったもの**（ex. 触媒層中の水）を**視る**
- **製造プロセス解析**への**中性子活用**に期待
- **電気化学**と**イメージング**を紐づけた**現象理解**