

発表No.A1-14

# 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

／水素利用等高度化先端技術開発

／アニオン膜型アルカリ水電解セルの要素研究と実用化技術の確立

宮武 健治

国立大学法人山梨大学

タカハタプレシジョン株式会社

日本化学産業株式会社

パナソニックホールディングス株式会社

富士電機株式会社

2025年7月15日

連絡先：  
国立大学法人山梨大学  
(TEL: 055-220-8618)

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2023年6月

終了 (予定) : 2025年3月

## 2. 最終目標

2030年頃に30 円/Nm<sup>3</sup>程度の水素コストを実現するため、アニオン膜型アルカリ水電解の要素研究を行い、以下の目標を達成する。

### **①アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術**

高アニオン導電率、機械強度、アルカリ安定性、気体透過性、水透過性、を併せ持つアニオン膜・イオノマーを開発する。また、本研究で開発するアニオン膜・イオノマーの量産技術と薄膜形成能の改善を行う。

### **②非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術**

現状の貴金属系触媒と同等以上の活性、耐久性を併せ持つ非貴金属系酸素発生触媒および水素発生触媒を開発する。また、本研究で開発する非貴金属系触媒の量産工程を確立する。

### **③アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化**

本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属触媒を組み合わせたMEA構造の最適化を行い、電解性能としてセル電圧1.7 Vにて2 A/cm<sup>2</sup>の電流密度、1000時間の耐久性を達成する。

### **④アニオン膜型アルカリ水電解セルの構築とスタック化の検討**

アニオン膜型アルカリ水電解セルの大判化のための課題抽出を行う。また高温(~80°C)かつ低濃度のアルカリ環境(~1M KOH)、酸化雰囲気・還元雰囲気に耐えるセル構成を明らかにする。

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2023年6月

終了 : 2025年3月

## 2. 最終目標

2030年頃に30円/Nm<sup>3</sup>程度の水素コストを実現するため、アニオン膜型アルカリ水電解の要素研究を行い、以下の目標を達成する。

①	アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術	高アニオン導電率、機械強度、アルカリ安定性、気体透過性、水透過性、を併せ持つアニオン膜・イオノマーを開発する。また、本研究で開発するアニオン膜・イオノマーの量産技術と薄膜形成能の改善を行う。
②	非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術	現状の貴金属系触媒と同等以上の活性、耐久性を併せ持つ非貴金属系酸素発生触媒および水素発生触媒を開発する。また、本研究で開発する非貴金属系触媒の量産工程を確立する。
③	アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化	本事業で開発されたアニオン膜・イオノマーと非貴金属触媒を組み合わせたMEA構造の最適化を行い、電解性能としてセル電圧1.7Vにて2A/cm <sup>2</sup> の電流密度、1000時間の耐久性を達成する。
④	アニオン膜型アルカリ水電解セルの構築とスタック化の検討	アニオン膜型アルカリ水電解セルの大判化のための課題抽出を行う。また高温(~80°C)かつ低濃度のアルカリ環境(~1M KOH)、酸化雰囲気・還元雰囲気に耐えるセル構成を明らかにする。

## 3.成果・進捗概要

産学で共同しながら、①アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術、②非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術、③アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化、④アニオン膜型アルカリ水電解セルの構築とスタック化の検討 に取り組み、以下の成果を得て、目標を達成した。

- ① アニオン導電性高分子およびその親水性酸化物複合膜を作製し、高アニオン導電率を達成した。高品質なアニオン膜・イオノマーの量合成およびロール製膜に成功した。
- ② 高活性なNiFeO系の酸素発生触媒および水素発生触媒の開発に成功し、その活性向上因子を明らかにした。それら触媒の量合成を達成した。
- ③ 本プロジェクトで開発したアニオン膜・イオノマー・非貴金属アノード触媒を用いて高性能・高耐久なアニオン膜型水電解セルを達成した。触媒塗布方法を検討し、膜電極接合体(MEA)の大判化に成功した。
- ④ 中規模サイズのMEAの作製と単セル特性評価に成功した。さらに、中規模サイズMEAのスタック化を行い、単セルと同程度の性能を得ることができた。

## 3.成果・進捗概要

産学で共同して事業のテーマに取り組み、各々の成果を得て目標を達成した。

①	アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術	アニオン導電性高分子およびその親水性酸化物複合膜を作製し、 <b>高アニオン導電率を達成</b> した。高品質なアニオン膜・イオノマーの <b>量合成およびロール製膜に成功</b> した。
②	非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術	<b>高活性なNiFeO系の酸素発生触媒および水素発生触媒の開発に成功</b> し、その活性向上因子を明らかにした。それら触媒の <b>量合成を達成</b> した。
③	アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化	本プロジェクトで開発したアニオン膜・イオノマー・非貴金属アノード触媒を用いて <b>高性能・高耐久なアニオン膜型水電解セルを達成</b> した。触媒塗布方法を検討し、 <b>膜電極接合体(MEA)の大判化</b> に成功した。
④	アニオン膜型アルカリ水電解セルの構築とスタック化の検討	<b>中規模サイズのMEAの作製と単セル特性評価に成功</b> した。さらに、 <b>中規模サイズMEAのスタック化</b> を行い、 <b>単セルと同程度の性能</b> を得ることができた。

# 1. 事業の位置付け・必要性

水素の社会実装を実現するためには、低コストで大量に水素を供給できる技術の開発が急務である。水素製造技術として、再生エネルギーを水素に変換(グリーン水素)する水電解装置は最も有力な候補の一つとして挙げられる。

アニオン膜型アルカリ水電解装置は、アルカリ水電解の利点（貴金属触媒が不要、大規模化が容易）と高分子膜型水電解の利点（高電流密度が可能、再生エネルギー変動に対する応答性が高い、得られる水素が高純度）を併せ持ち、現在実用化が進められているプロトン膜型水電解装置に比べて高効率化と低コスト化を両立できる高いポテンシャルを持っている。しかし、これまで耐久性に優れるアニオン膜およびそれと組み合わせ高性能を発揮できる非貴金属系触媒がなく、水電解装置としてその利点と特徴が十分に発揮できていない。

本研究ではこの課題を解決してアルカリ水電解セルの高性能化と高耐久化を達成し、我が国の水素社会実現を見通すための基幹技術として大きく貢献することを目的とした。

# 1. 事業の位置付け・必要性

水素の社会実装を実現するためには、低コストで大量に水素を供給できる技術の開発が急務である。水素製造技術として、再生エネルギーを水素に変換(グリーン水素)する水電解装置は最も有力な候補の一つとして挙げられる。

アニオン膜型アルカリ水電解装置は、

- ・ **アルカリ水電解の利点** (貴金属触媒が不要、大規模化が容易)
- ・ **高分子膜型水電解の利点** (高電流密度が可能、再生エネルギー変動に対する応答性が高く、得られる水素が高純度)

の特徴を併せ持ち、現在実用化が進められているプロトン膜型水電解装置に比べて

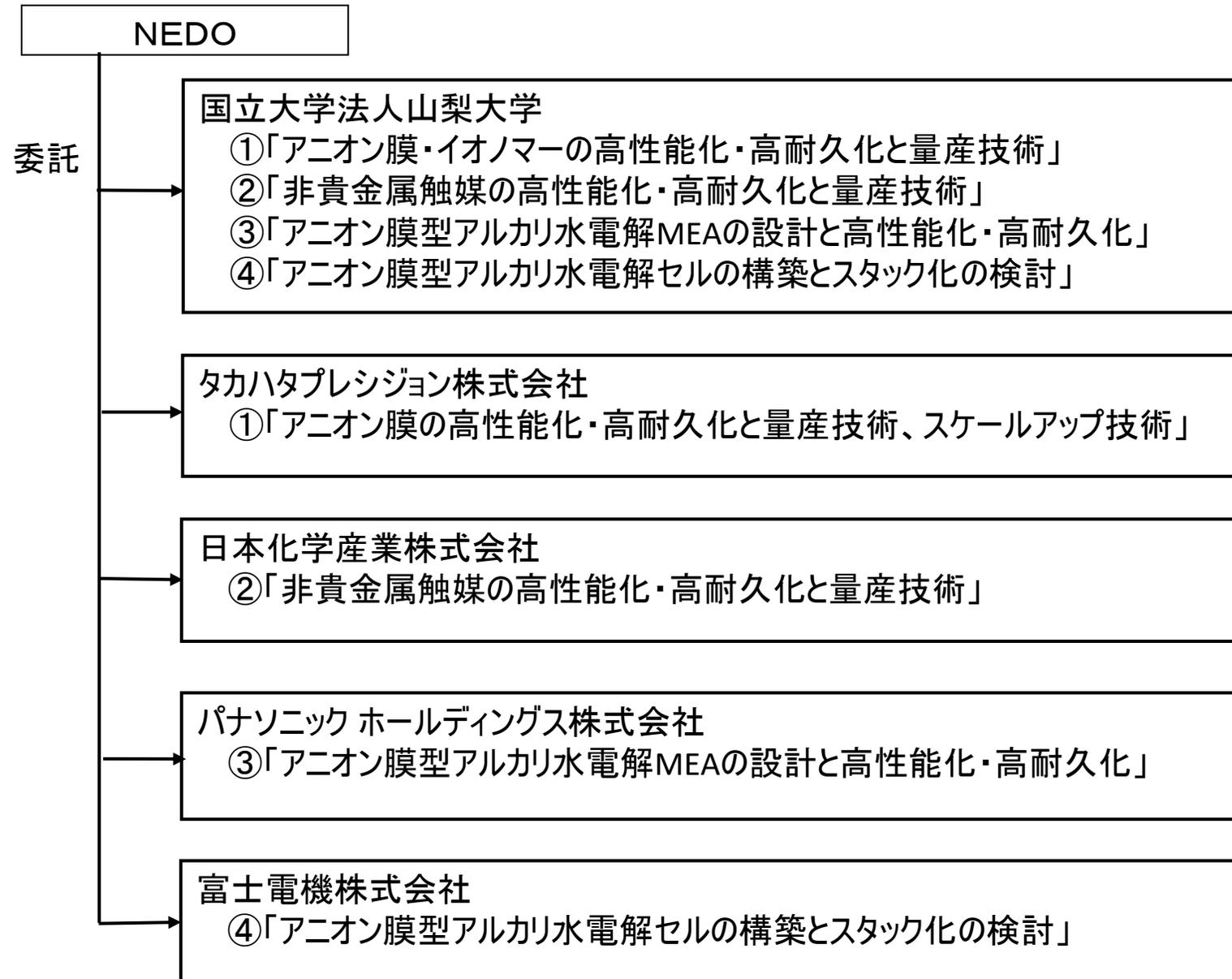
- ・ **高効率化と低コスト化**

を両立できる高いポテンシャルを持っている。

しかし、これまで耐久性に優れるアニオン膜およびそれと組み合わせて高性能を発揮できる非貴金属系触媒がなく、水電解装置としてその利点と特徴が十分に発揮できていない。

本研究ではこの課題を解決してアルカリ水電解セルの高性能化と高耐久化を達成し、我が国の水素社会実現を見通すための基幹技術として大きく貢献することを目的とした。

## 2.1 研究開発体制

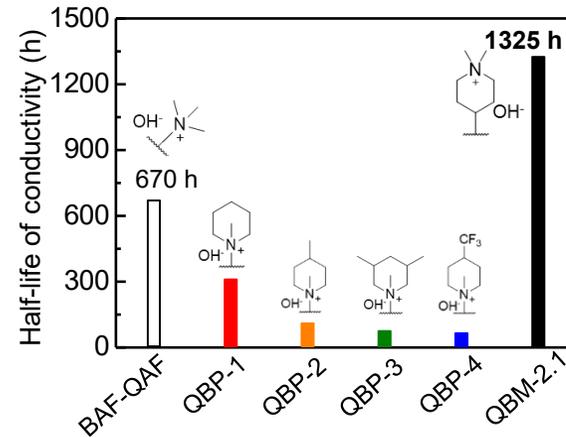
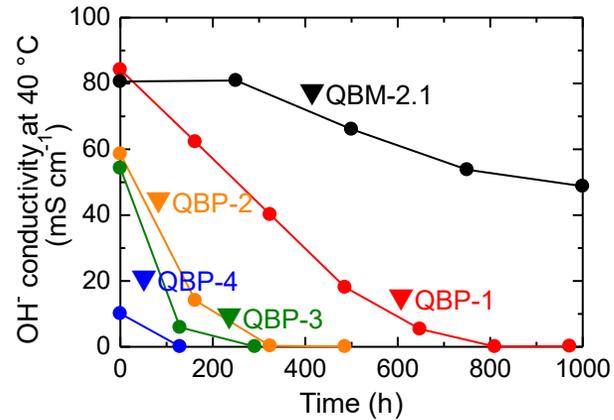
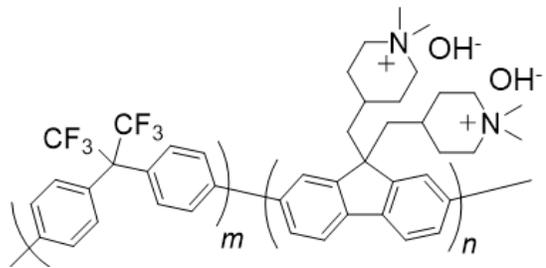


## 2.2 研究開発のスケジュール

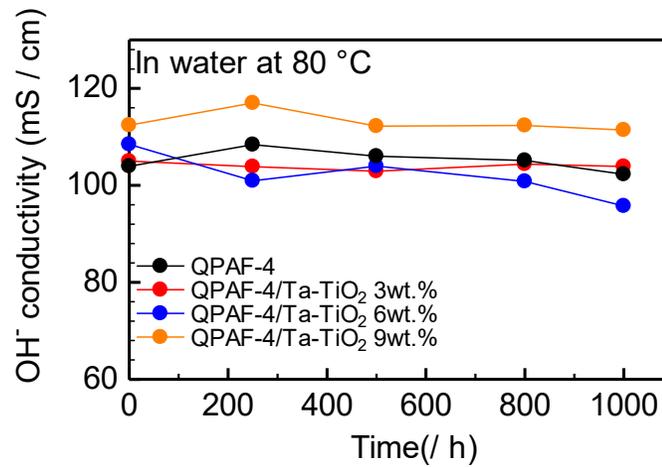
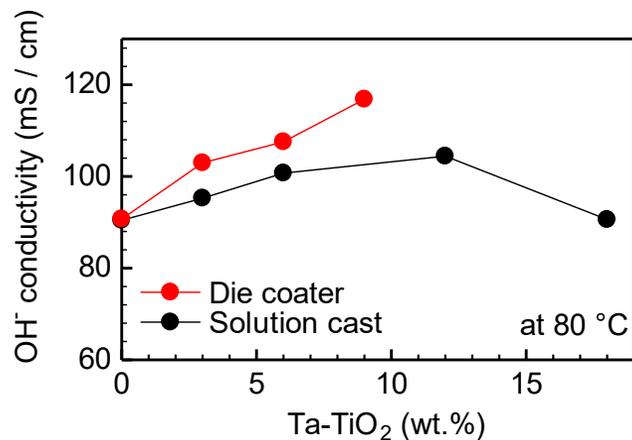
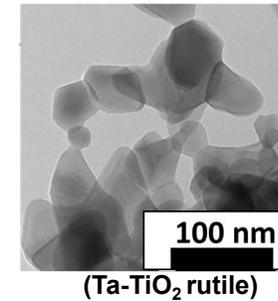
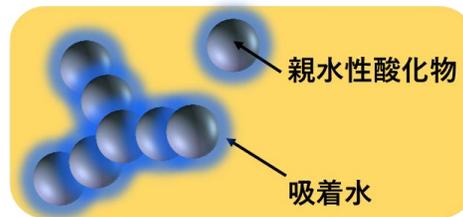
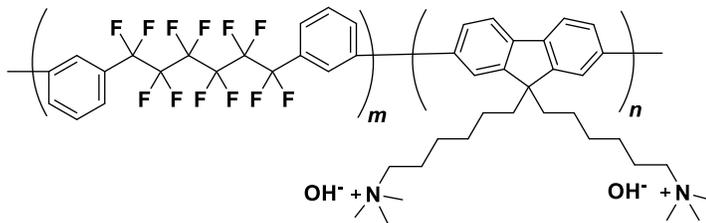
		FY23			FY24			
		8-9月	10-12月	1-3月	4-6月	7-9月	10-12月	1-3月
		#1初期性能評価 (IV特性、プロトン導電性 (膜)、OER活性 (触媒) 耐久性)	#1耐久評価		#2初期性能評価 (IV特性、プロトン導電性 (膜)、OER活性 (触媒) 耐久性)	#2耐久評価		仕様確立
マテリアル検討	①アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術	多機能性アニオン膜およびイオノマー設計仕様設定 小型膜での原理検証、製膜装置構築			多機能性アニオン膜およびイオノマー設計改良 アニオン膜・イオノマーの量合成、製膜法の確立			材料仕様確立
	②非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術	非貴金属系アノード・カソード触媒設計仕様設定 新規熱処理炉および量産用評価技術の開発			非貴金属系アノード・カソード触媒設計改良 アノード・カソード触媒の量合成法技術の確立			材料仕様確立
アッセンブリ検討	③アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化	触媒層輸送メカニズム、膜/電極界面状態解明 大面積塗工機設計およびプロセス構想			耐久性評価による性能発現・劣化メカニズム解明 MEA最適化設計導出・プロセス基盤技術構築			
実用化検討	④アニオン膜型アルカリ水電解セルの構築とスタック化の検討	水素先導Proj成果の落とし込み AEM-WEセル・スタック評価系構築			AEM-WEセルスタックに好適部材の検討 AEM-WEセルスタック化時及びスタック運転時の課題抽出と指針策定			

# 3. 研究開発成果

## ① アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術



新型電解質膜QBM-2.1がアルカリ耐久性1325時間を達成

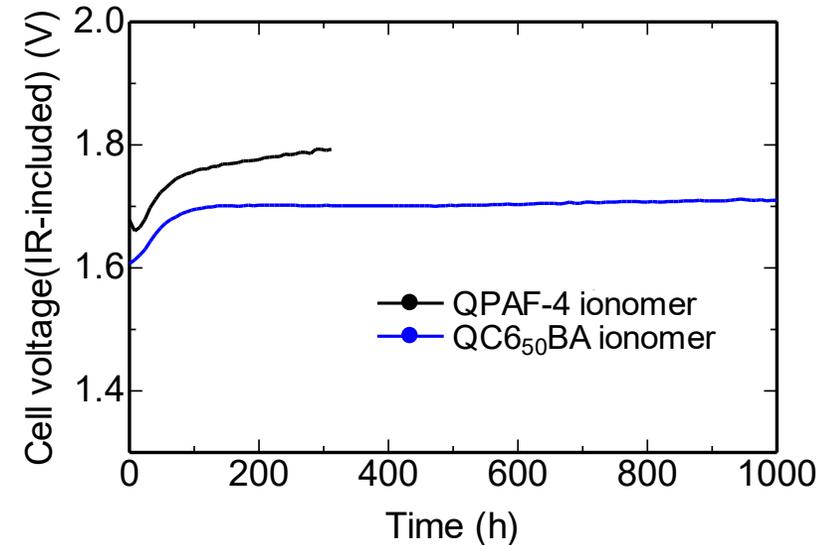
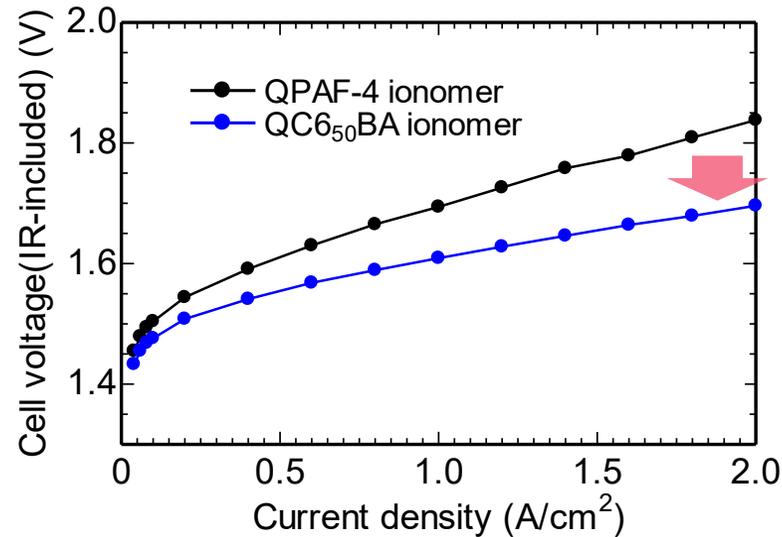
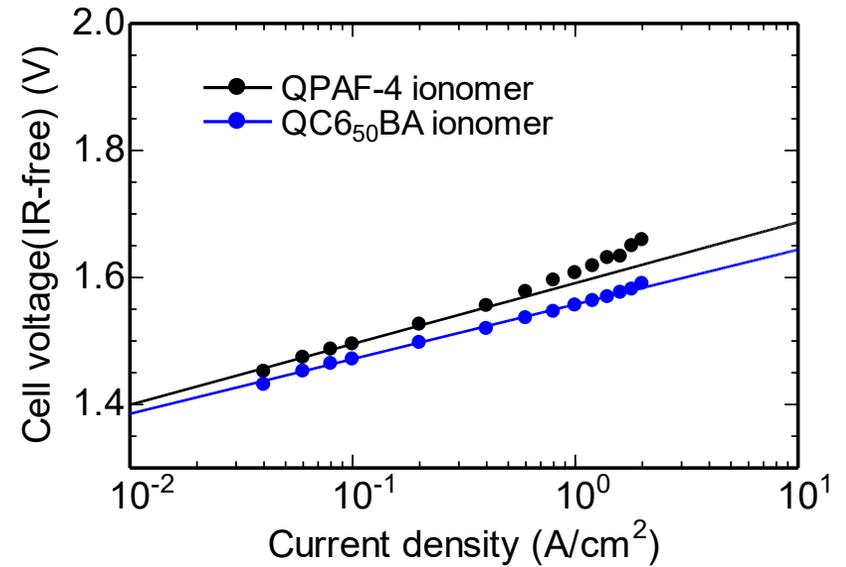
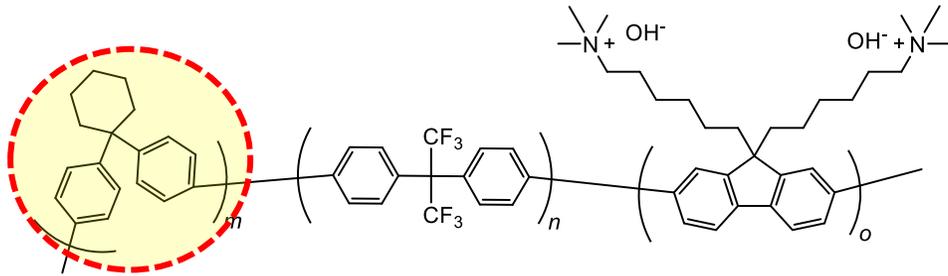


親水性酸化物の担持により、導電率の大幅な増大を達成

# 3. 研究開発成果

## ① アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術

QC6BA (高気体透過性アニオンイオノマー)



QC6BAイオノマーをアノード触媒層に用いて、高電流密度でのセル電圧増大を抑制、さらに1000時間の耐久性を達成

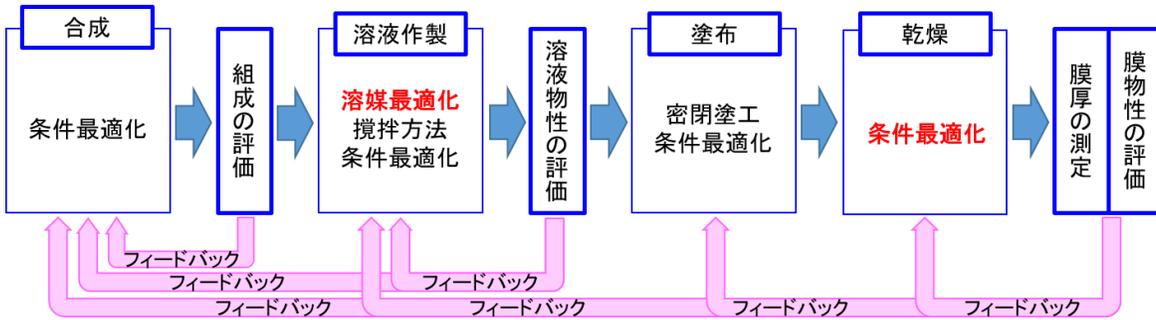
# 3. 研究開発成果

## ①アニオン膜・イオノマーの高性能化・高耐久化と量産技術

本事業における最終目標値

「イオノマーを400g/月で製造できる技術を開発する。」 「アニオン膜を10m<sup>2</sup>/月で製膜できる技術を開発する。」

→ 時間をかけて安定した品質を達成、品質を保持したまま製造速度を向上



乾燥時間短縮のための方針

- ①良溶媒 + 低沸点溶媒の混合溶媒を使用
- ②乾燥温度の高温化

懸念点

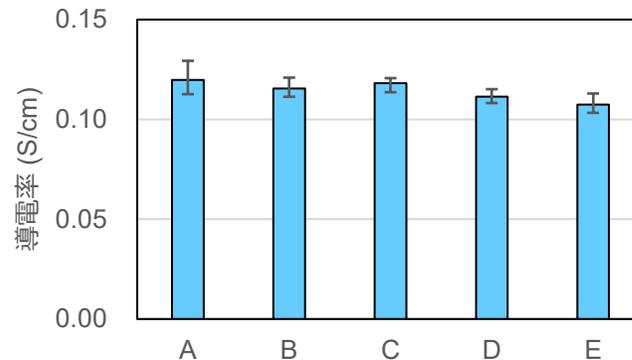
- ・ 分解が生じないか (特にイオン基)
- ・ 良好な高次構造が形成できるか

### 混合溶媒と高温乾燥の併用の検討

- ①製膜用溶媒の選定,
  - ②乾燥温度の高温化
- を組み合わせる検討を実施した。

	製膜用溶媒	乾燥温度
A	高沸点良溶媒	ベース温度
B		ベース温度 + 90°C
C		ベース温度 + 120°C
D	高沸点良溶媒 + 低沸点溶媒	ベース温度 + 90°C
E		ベース温度 + 120°C

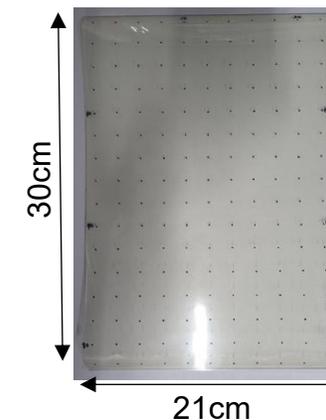
水酸化物イオン導電率 (80°C, 脱気超純水中)



従来条件(A)と同程度の導電率を示した。

- ・ 分解は進行しない
- ・ 良好な高次構造を形成

### 評価用サンプルの作製



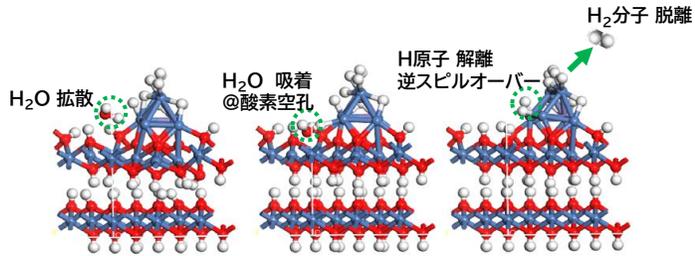
作製した膜は、  
CCM作製・セル評価  
に使用

# 3. 研究開発成果

## ②非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術

### HER活性を大幅に向上 メカニズムを検討

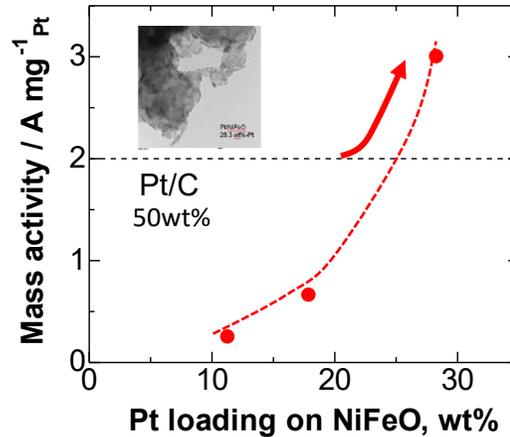
HER律速反応の促進 (DFT計算からの予測)



・逆スピルオーバーによる水素生成促進

- ポイント1) 酸素欠陥にてH<sub>2</sub>O/OH吸着・H生成
- ポイント2) 金属サイト等へH原子の逆スピルオーバー

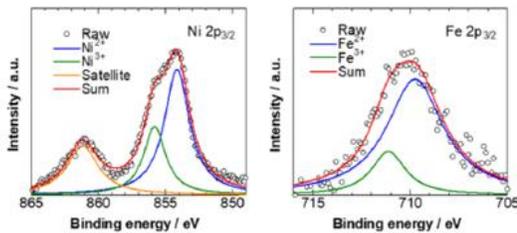
結果: HER活性向上



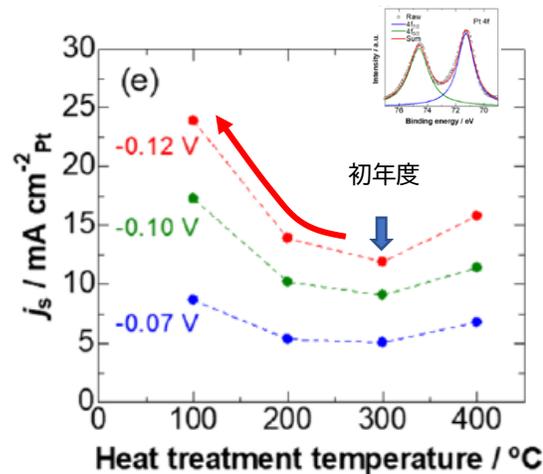
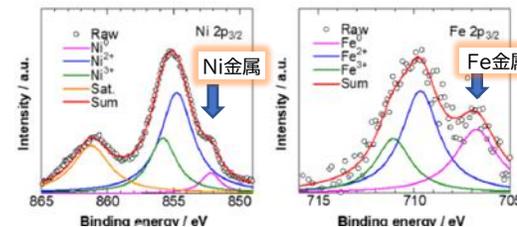
- ・HER活性向上
- ・現状触媒よりPt担持量削減、活性は向上

酸化物層形成 (@最表面) が重要

高活性触媒



低活性触媒

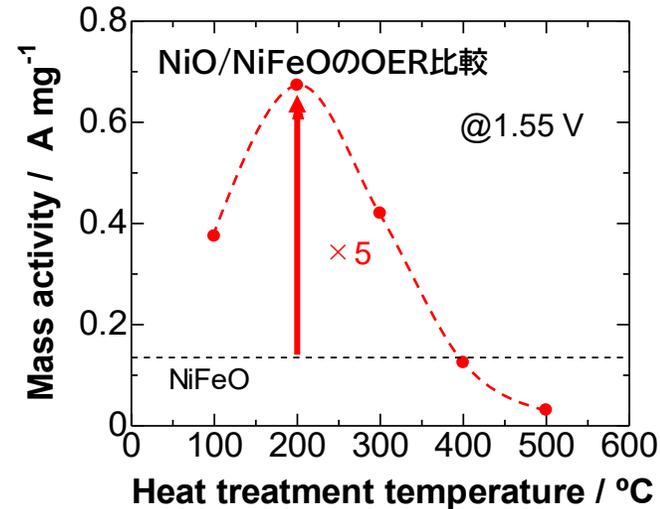
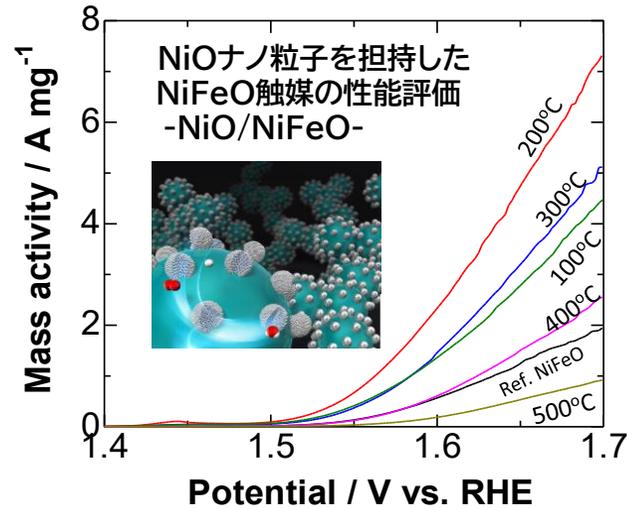


- ・触媒表面制御 (熱処理条件検討)
- ・活性2倍向上 (vs. 初年度)
- ・3倍向上 (vs. 市販触媒)
- ・表面酸化物による水吸着促進
- ・逆スピルオーバー活用

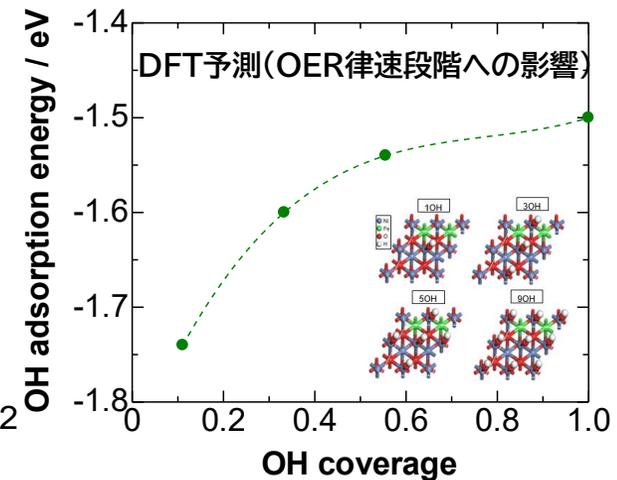
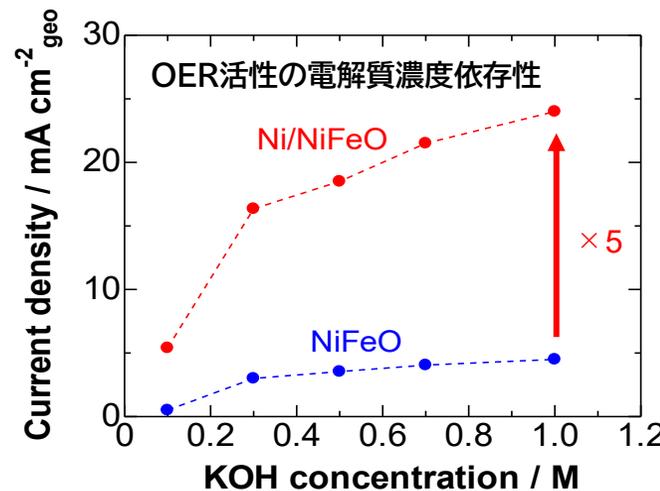
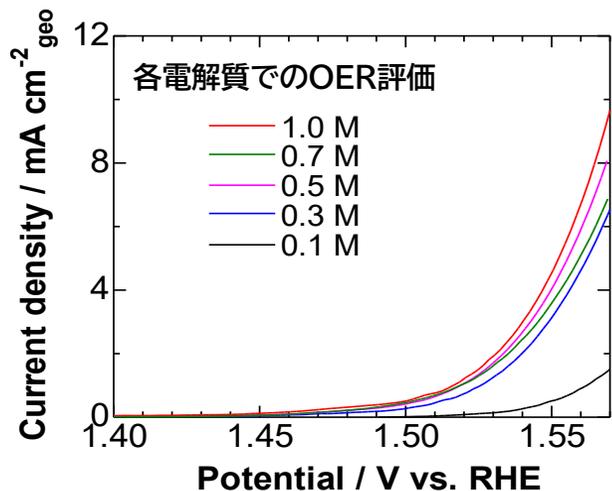
# 3. 研究開発成果

## ②非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術

OER活性を大幅に向上 メカニズムを検討 実用濃度の電解質



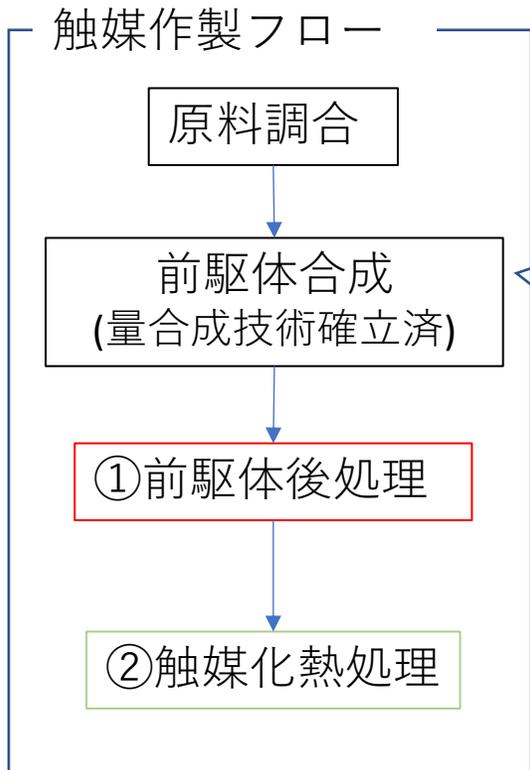
- OER活性向上
- NiOナノ粒子担持・熱処理検討
- 従来触媒よりOER活性5倍向上
- 低濃度アルカリにて高活性維持
- …実用触媒として重要



# 3. 研究開発成果

## ②非貴金属触媒の高性能化・高耐久化と量産技術

本事業の最終目標：非貴金属触媒(NiFeOx)を100g/日以上に安定に量合成する技術の確立

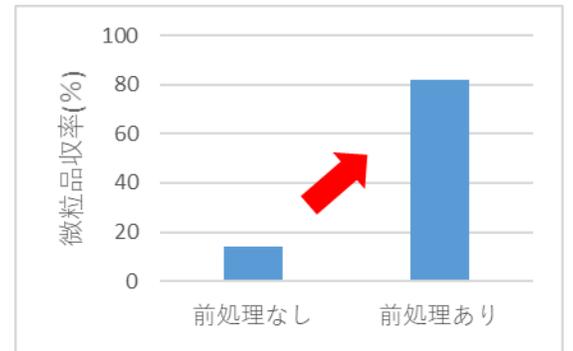


量合成した前駆体

### ①前駆体後処理

量合成化のポイント

- ・スケールアップに伴う粒子粗大化の抑制
- 効果的な前駆体の後処理技術を確立



NiFeOx触媒微粒品の収率を大幅に向上

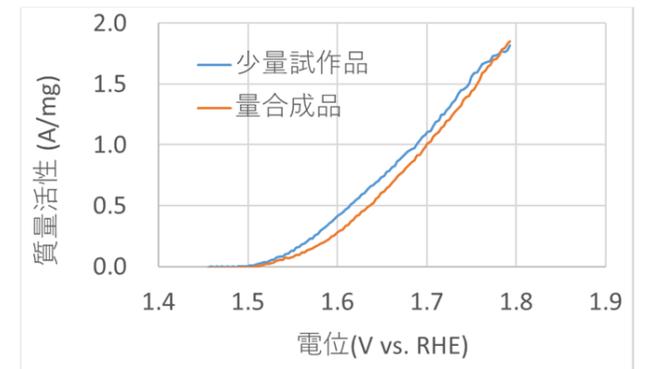
### ②触媒化熱処理

量合成化のポイント

- ・品質を制御する因子の抽出と最適化
- ・製造中、製造後の触媒品質の安定化
- ・スケール因子に直結する製造パラメーターの定量化



量合成したNiFeOx触媒(数百g/バッチ)

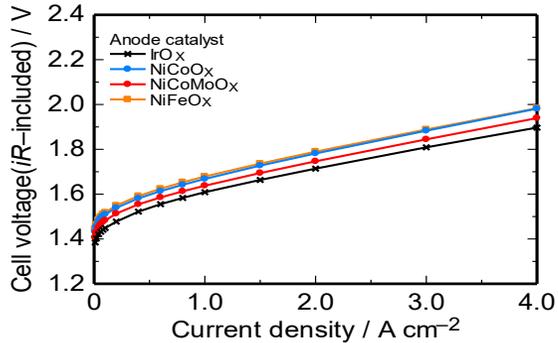


RDE触媒活性評価

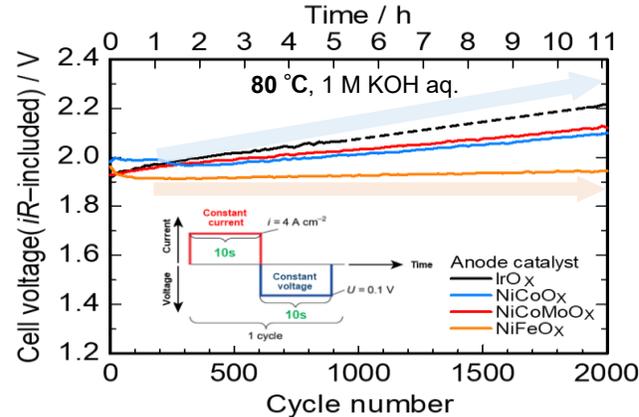
# 3. 研究開発成果

## ③アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化

初期性能

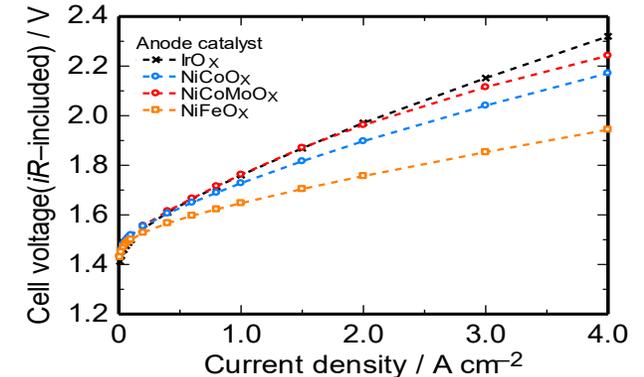


起動停止加速耐久試験



4 A cm<sup>-2</sup> 10 s ⇔ 0.1 V 10 s

耐久試験後性能



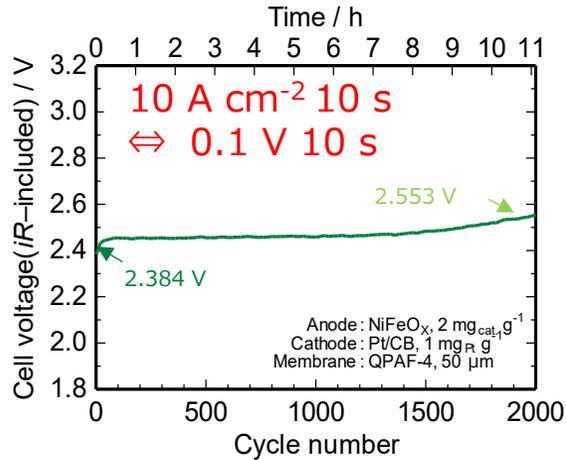
酸素極触媒	触媒活性劣化	物質移動劣化	内部抵抗	劣化率 (mV/cycle, 500-2000cycles)	劣化要因
IrOx,	↗ ↗ ↗	↗ ↗ ↗	↗	<b>0.133</b>	Irの溶出
NiCoOx	↗	↗ ↗	↗	<b>0.0803</b>	触媒層構造変化??
NiCoMoOx	↗ ↗	↗ ↗ ↗	↗ ↗	<b>0.0871</b>	Moの溶出
NiFeOx	↘	→	→	<b>0.0183</b>	ほとんど劣化が見られない

- NiFeOxアノード触媒とQPAF-4電解質膜およびアイオノマーの構成で、目標劣化率を達成
- 1cm<sup>2</sup>セルサイズではあるが、PEMWEの電流密度目標3A/cm<sup>2</sup>よりも高い電流密度4A/cm<sup>2</sup> & 起動停止模擬耐久試験で開発触媒と電解質材料の高い耐久性能が検証できた。

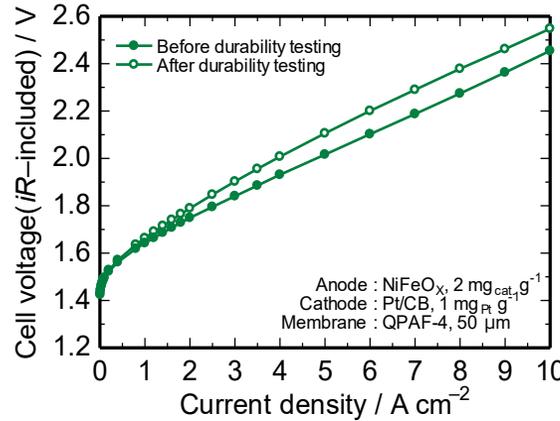
# 3. 研究開発成果

## ③ アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化

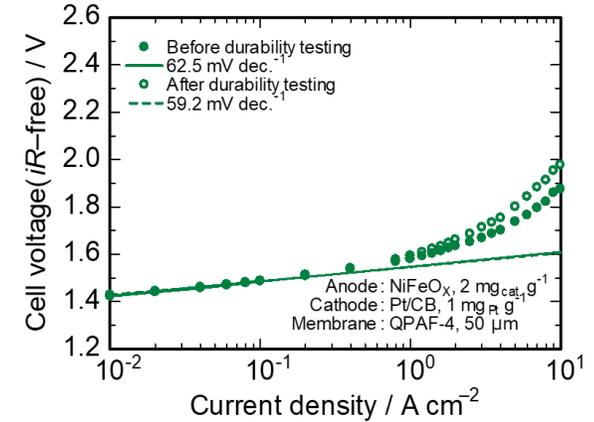
高負荷⇔電解停止サイクル



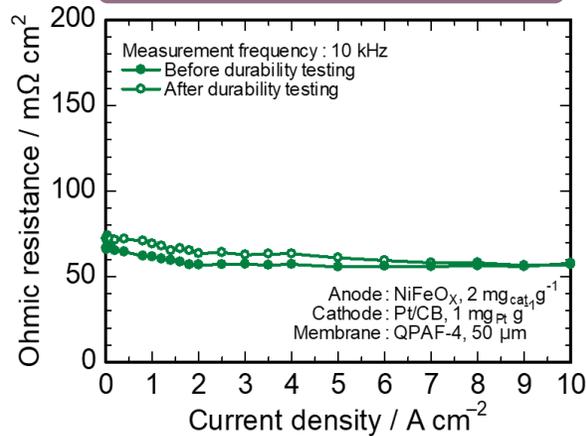
分極曲線



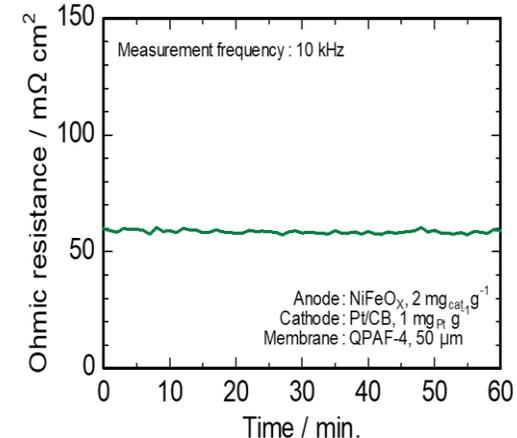
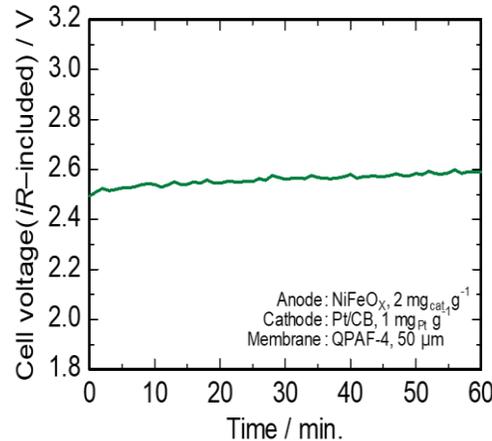
iR-free Tafelプロット



セル抵抗変化



連続電解：セル電圧@10 A cm⁻²



- 高負荷電解停止2Kサイクルおよび連続電解60分で、セル電圧とセル抵抗はほぼ一定
- 1cm<sup>2</sup>セルにおいて高負荷運転(10 A cm<sup>-2</sup>)での気泡による影響は小さい

# 3. 研究開発成果

## ③アニオン膜型アルカリ水電解MEAの設計と高性能化・高耐久化

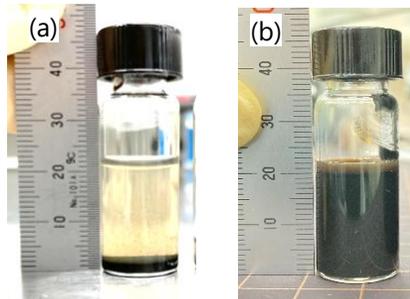
### 大判化：ダイコーター塗工プロセス検証

	項目	FY24目標値	最終	
インク化プロセス	インク粘度	100 cps以上	132 cps	○
	分散安定性	60min 以上	180min	○
塗工プロセス (ダイコーター塗工)	塗布面積	10cm×10cm	10cm×10cm	○
	担持量バラつき	±15.0%	±11.4%	○
	電解性能 (1cm×1cm)	1.7V @2.0A/cm <sup>2</sup>	1.7V @2.0A/cm <sup>2</sup>	○

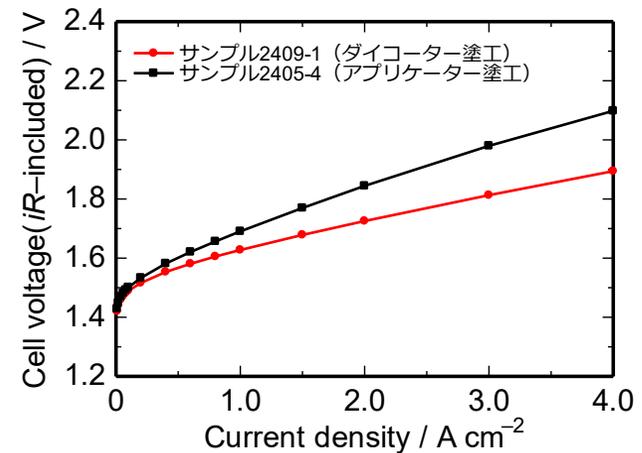
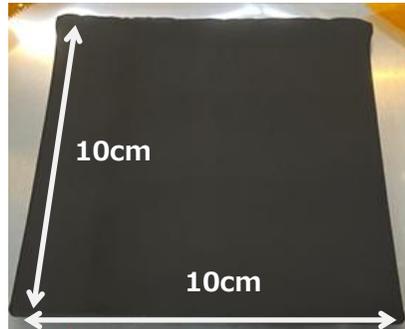
インク化プロセス

塗工プロセス (ダイコーター)

電解性能@I-V初期特性



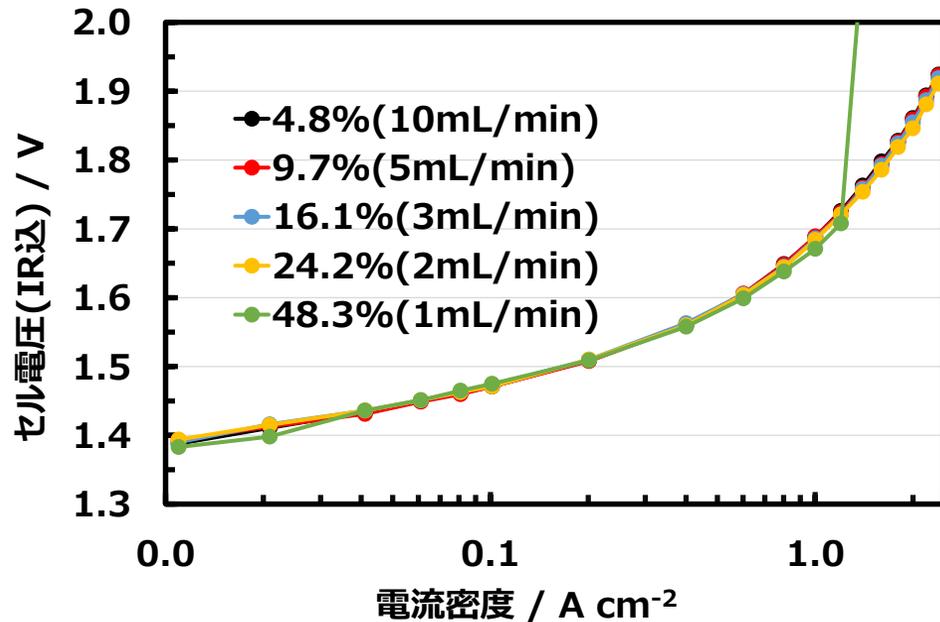
分散安定性の比較 (after 180min)  
(a)水/メタノール系、(b)分散性改善品



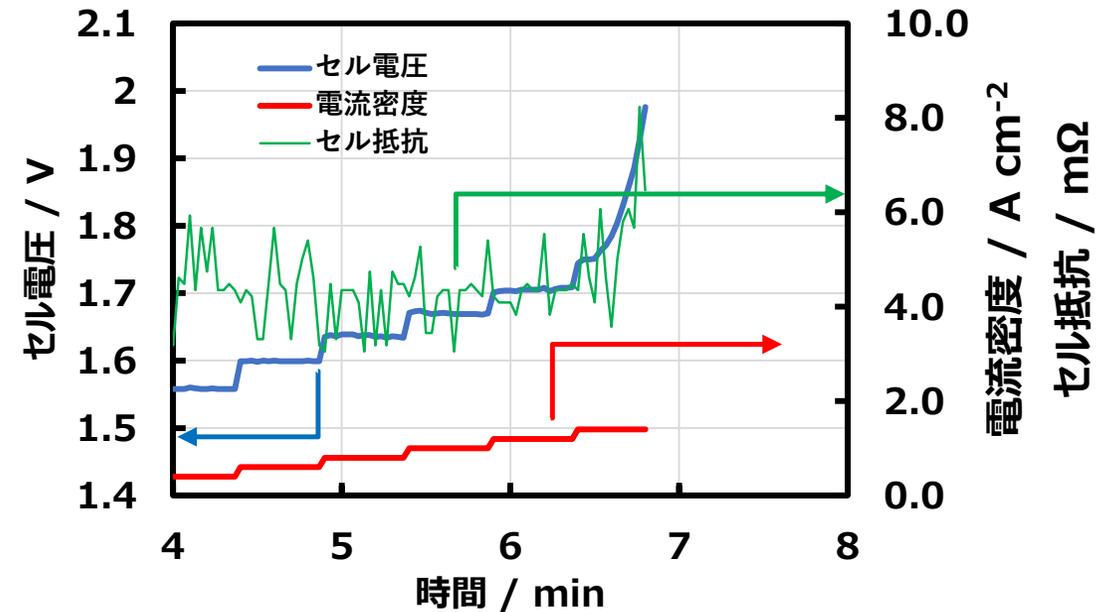
### 3. 研究開発成果

#### ④アニオン膜型アルカリ水電解セルの構築とスタック化の検討

H<sub>2</sub>O利用率影響評価(カソードドライ、25cm<sup>2</sup>)



1 mL/min時の過渡応答曲線



- 補機損低減に重要なH<sub>2</sub>O利用率(通水量の電解消費割合)影響を解析
- カソード非給水条件で10mL/minから2mL/min(水利用率41%@2.4A/cm<sup>2</sup>)まで安定して運転可能。
- 水利用率が48%を超えるとセル抵抗および電圧が増大し、カソードドライアップと推定。

# 3. 研究開発成果

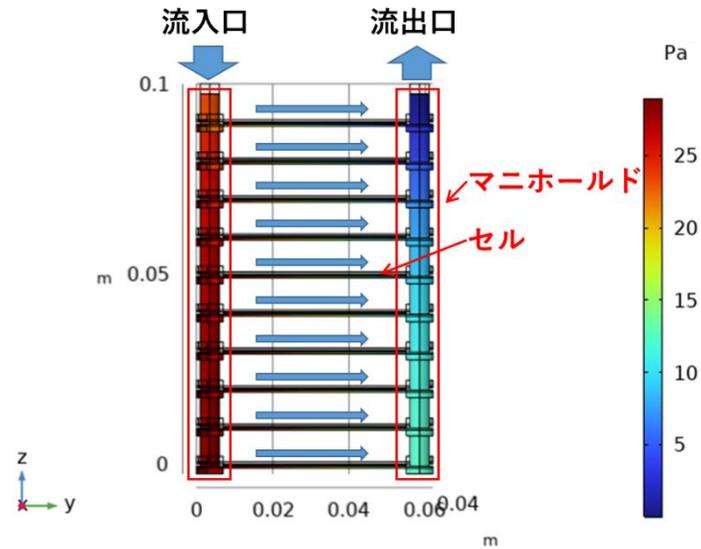
## ④アニオン膜型アルカリ水電解セルの構築とスタック化の検討

- 5セルスタックとして製作
- 各セルの流路構造は昨年度抽出した改善構造を踏襲
- 中間のセパレータはバイポーラプレート構造
- セパレータ角部に各セルに電解液等配、ガス排出用のマニホールドを形成。Sim.を基に各セル内の流速ばらつきを低減可能な構造を構築し、試作品に反映

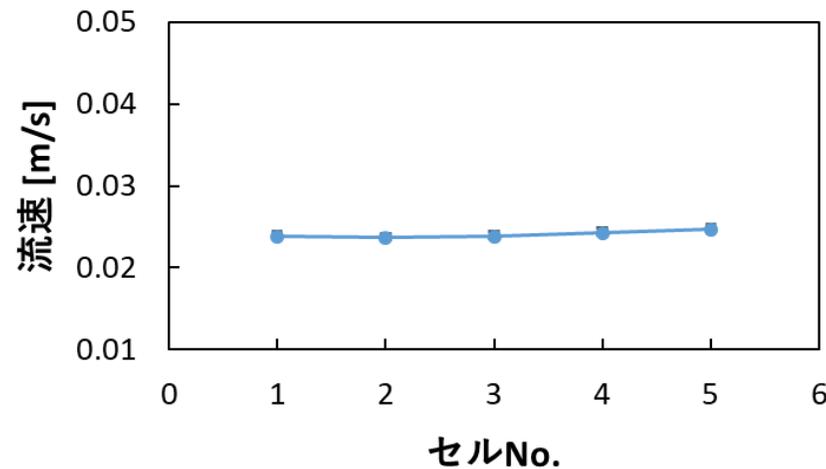
試作スタック写真



Sim.によるスタック内圧力分布計算例



Sim.によるセル間流速ばらつき



### 3. 研究開発成果

	学会発表	査読付き論文	特許出願
2023年度	14	5	0
2024年度	13	6	5

# 4. 今後の見通し

