

発表No.D-6

## 水素利用等先導研究開発事業／ 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／ アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電 解装置の開発

発表者名 伊藤 博  
団体名 国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
学校法人 早稲田大学  
国立大学法人 北海道大学大学院工学研究院  
発表日 2022年7月29日

連絡先：伊藤博  
産業技術総合研究所  
(E-mail: ito.h@aist.go.jp)

# 事業概要

---

## 1. 期間

開始 : 2018年7月

終了（予定） : 2023年3月

## 2. 最終目標

- アニオン交換膜（AEM）水電解装置において、電解質内物質移動を含む電解機構を解明し、かつ電極触媒の性能発現を図ることで、電解装置の高効率化を図る。
- 劣化機構の高度解析、電解槽および補機類の劣化機構、劣化評価法に関する共通的解析を行い、耐久性向上へフィードバックする。
- 補機を含めたシステム全体のコストを詳細に検討し、精度の高いコスト見通しと低コスト化への課題を明らかにする。

## 3. 成果・進捗概要

- AEM水電解中の膜内水分移動が電解挙動に及ぼす影響を定量的に確認した。
- 無電解析出プロセスの適用により、カソード触媒層作製技術を確立した。
- 電析によるアノード触媒層作製に取り組み、触媒組成最適化に向けた足掛かりを得た。
- ナノ気泡の評価、および電極近傍の濃度過電圧を算出した。
- 800時間以上の定常連続運転および2,000サイクルの負荷変動試験における性能安定性を確認した。
- Ni濃度の高いSUS310Sと純Niの耐食性を調査
- 1MWシステムの製造コスト試算を実施。

# 1. 事業の位置付け・必要性

## • 本事業を実施する背景や目的

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、再生可能エネルギーのみをエネルギー源として製造される水素、いわゆる「**グリーン水素**」導入拡大が望まれている。「**水電解**」はグリーン水素製造にとって、最も現実的で重要な技術である。

水電解をより汎用的で使い勝手の良い技術とするため、装置価格の低減、安全性の確保、電解性能の向上が必要不可欠である。

本事業では、これらの要求に応える水電解装置として、アルカリ性アニオン交換膜(AEM)を用いた水電解装置の開発に取り組む。

## • 本事業の位置づけや意義、必要性

ここで開発対象とする「**AEM水電解**」は、既存水電解技術である「**アルカリ水電解**」、および「**プロトン交換膜(PEM)水電解**」双方の長所を取り込むことで、低装置価格かつ高性能水電解技術を実現できる可能性がある次世代水電解技術である。近年その有望性が広く認知され、国内外で精力的に研究開発が実施されている。また本装置主要部材であるAEMは、国内企業からの供給が見込まれ、国内産業育成の意義も有する。

本事業では、AEM水電解について、PEM水電解に匹敵する電解性能を実現するとともに、補機を含めたシステム全体のコストを詳細に検討し、主要電解技術としての地位を確立することを目指す。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### • 研究開発の実施項目

#### 1. アニオン交換膜(AEM)水電解装置の高効率化

- 1-1 電解機構の解明および電解性能の改善【産業技術総合研究所】
- 1-2 水素発生カソード触媒層開発【早稲田大学】
- 1-3 酸素発生アノード触媒層開発【早稲田大学】
- 1-4 アノード触媒層気泡離脱挙動解析【北海道大学】

#### 2. アニオン交換膜 (AEM) 水電解装置の耐久性評価

- 2-1 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価【産業技術総合研究所】
- 2-2 構成部材の耐食性評価および防食技術開発【北海道大学】

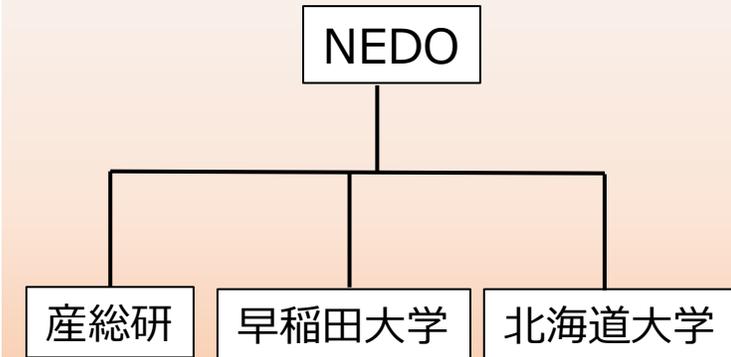
#### 3. 水素製造コスト評価

- 3-1 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価【産業技術総合研究所】

### • 研究開発の進捗管理および知的財産管理

- ✓ 3実施機関（産総研，早大，北大）が一堂に会する進捗報告会を2回/年の頻度で実施。（コロナ以前は対面，コロナ後はWeb会議）
- ✓ NEDO・PLフォローに対応。
- ✓ 知財出願および外部発表は，全実施機関が情報を共有。

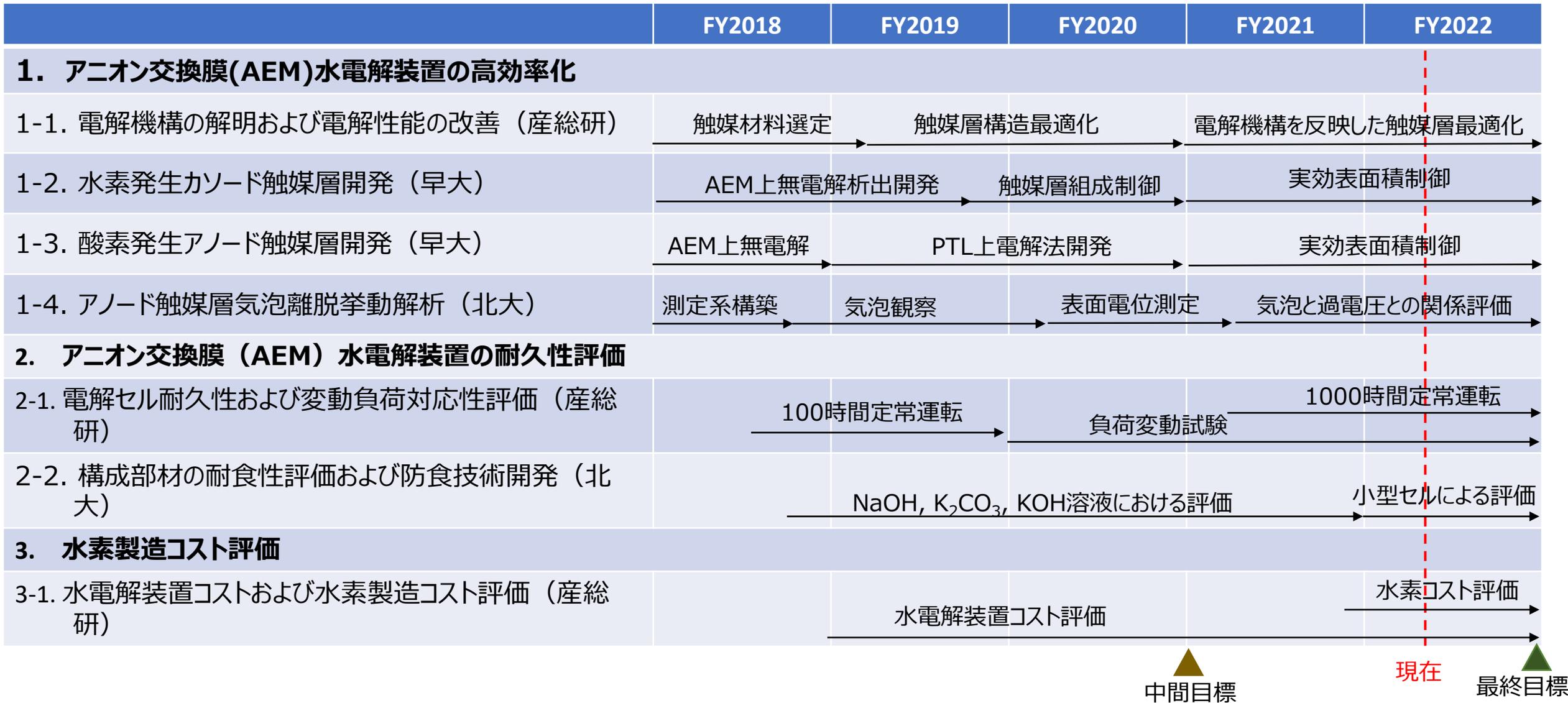
### • 実施体制



- ✓ 3機関共同委託事業
- ✓ 3機関の緊密な相互連携のもと，効率的な研究開発を実施。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### ・ 研究開発のスケジュール



▲ 中間目標

現在

▲ 最終目標

## 2. 研究開発マネジメントについて

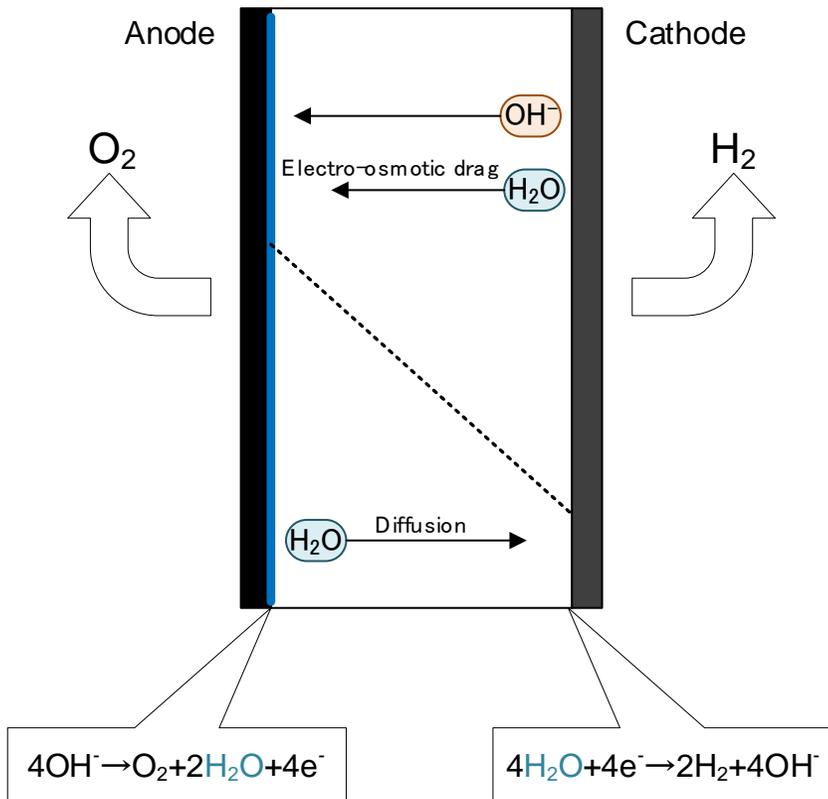
### ・ 研究開発の目標と目標設定の考え方

	担当	中間目標 (FY2020)	中間目 標達成 度	最終目標 (FY2022)	最終目標設定理由
1-1. 電解機構の解明および電解性能の改善	産総研	1.9V@ 1.0A/cm <sup>2</sup>	○	1.8V@ 1.0A/cm <sup>2</sup> 以下	PEM水電解と同等性能
1-2. 水素発生カソード触媒層開発	早大	多孔性導電層形 成方法の確立	○	現行電極と同程度又は 0.9倍電圧値@-0.5 A/cm <sup>2</sup>	新規電極部材が現行部材と同 程度性能を示す必要性により
1-3. 酸素発生アノード触媒層開発	早大	組成、構造制御の 方法論検討	○	現行電極と同程度又は 0.9倍電圧値@ + 0.5 A/cm <sup>2</sup>	新規電極部材が現行部材と同 程度性能を示す必要性により
1-4. アノード触媒層気泡離脱挙動解析	北大	気泡発生 of 動的 挙動評価	○	気泡による電圧損出の算 出	省電力電解装置開発への展開
2-1. 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価	産総研	劣化要因の特定	○	電解電圧上昇率 25μV/h以下	約1万時間の耐久性実現を見通 す
2-2. 構成部材の耐食性評価および防食技術開発	北大	腐食速度 0.05mm/year 以下	○	腐食速度 0.03mm/year以下	鉄鋼材料の腐食速度を参照
3-1. 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価	産総研	小型装置コスト見 積	○	水素製造コスト見積	事業目標に対する達成度評価

# 3. 研究開発成果について

## 1-1. 電解機構の解明および電解性能の改善 (産総研)

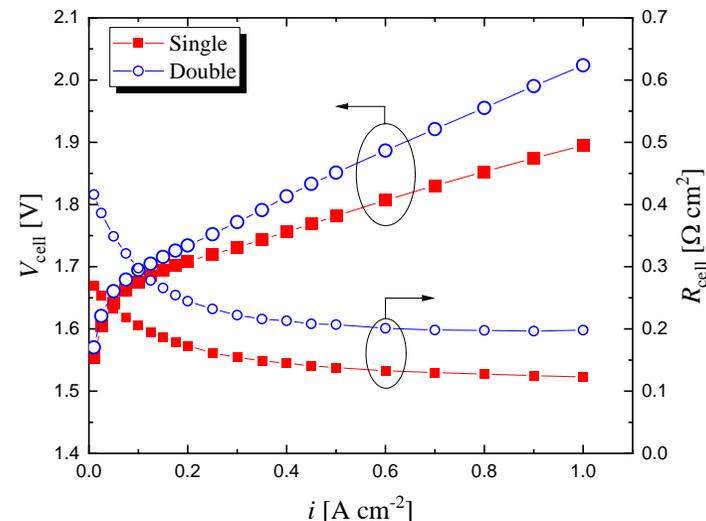
### AEM水電解における水分移動メカニズム解析



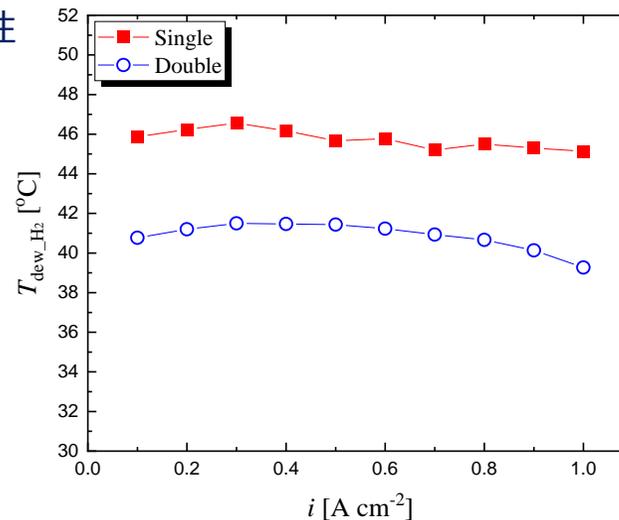
- ✓ カソードドライ運転の実現
- ✓ 濃度過電圧の低減
- ✓ 稼働電流密度域の特定
- ✓ 膜厚の最適値の特定

AEM1枚および2枚で水電解セルを作製し、電解性能を比較

電流-電圧特性



電流-水素露点特性



膜内水分拡散が、  
 ✓ 濃度過電圧  
 ✓ 生成水素含水量  
 に影響を及ぼすことを  
 定量的に把握することが  
 できた。

### 3. 研究開発成果について

## 1-2. 水素発生カソード触媒層開発（早大）

本項目では、アイオノマー結着によってAEMに固定された従来材料よりも高い密着性と耐久性を有する触媒層の形成を目的に、無電解析出法を用いてAEM膜へNiFeP合金薄膜を形成する新規電気化学プロセスの開発と、その高度化に取り組んでいる。

#### 【目標（2022年度末）】

- YNU電解セル試験において、 $-0.5 \text{ A/cm}^2$  でPt/C電極と同程度もしくは0.9倍程度の電圧値を達成

#### 【2021年度までの結果】

- 開発を進めてきた無電解製カソード触媒の性能向上を目的とする実効表面積制御にむけ、種々の添加剤種の効果を検証し、特にサッカリン添加のプロセスが有効であることを特定した。
- 電気化学インピーダンス計測の結果に基づき、形成されたカソード触媒層が多孔質構造を有している示唆を得た。
- YNU電解セル試験（@  $-0.5 \text{ A/cm}^2$ ）において、Pt/C電極と同程度の電圧値を達成（**22年度目標を前倒して達成**）。

#### 【2022年度計画】

- 脱合金化プロセスとの併用も視野に入れた添加剤利用プロセスの最適化を推進、形態制御による更なる性能向上を企図。

今年度の検討を通じ、開発する触媒層が従来触媒と同等の性能を示すに至った。今後の更なる性能向上により、従来のAEM装置電極において指摘された触媒性能、耐久性、低コスト化に関する課題の克服が期待される。

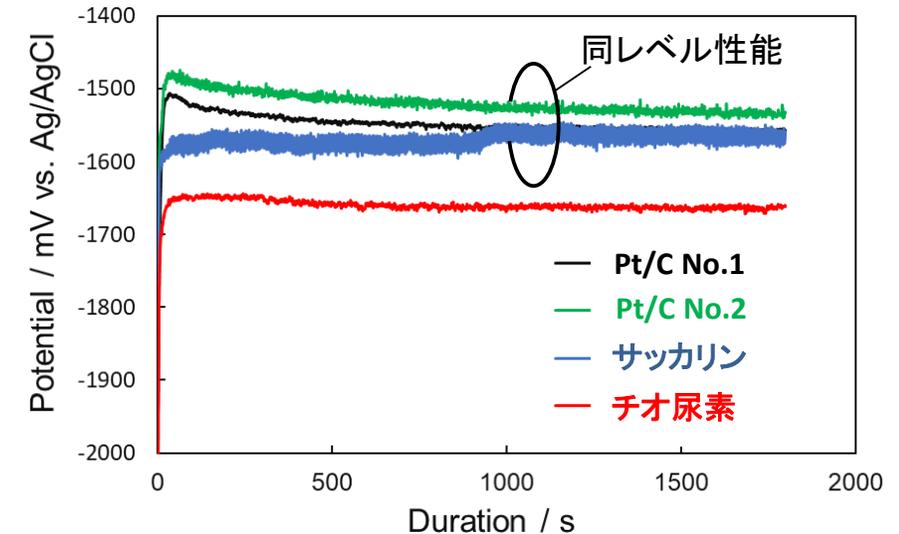


Fig. 21年度開発の触媒層サンプルの性能評価結果（@  $-0.5 \text{ A/cm}^2$ ）

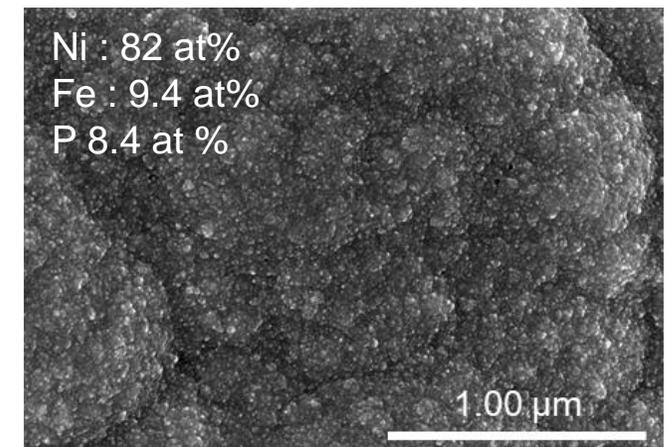


Fig. 作成した触媒層（サッカリン利用）のSEM像

# 3. 研究開発成果について

## 1-3. 酸素発生アノード触媒層開発（早大）

本項目では、カソード触媒層開発同様、電解セル部材に合金材料を直接形成することによって、触媒性能、耐久性の双方を併せ持った新規触媒層の開発を進めている。具体的には、ガス拡散層（GDL）のNiフォーム上にNiFe合金を形成する電解析出プロセスの開発に取り組む。

### 【目標（2022年度末）】

- YNU電解セル試験において、 $+0.5 \text{ A/cm}^2$  で現行電極と同程度もしくは0.9倍程度の電圧値を達成

### 【2021年度までの結果】

- 電解析出プロセスを用いたPTLへの直接触媒合金層形成に対して、パルス電流の利用とその最適化が有用であることが見出されたことから、主にパルスの電流 on time と off time の比、及び電析時間を様々に検討した結果、PTLの多孔構造を閉塞せず、且つ、高い実効表面積を有する触媒層形成を達成。
- YNU電解セル試験（@  $+0.5 \text{ A/cm}^2$ ）において、現行電極を凌駕する電圧値を達成（**22年度目標を前倒して達成**）。
- パルス電流 off time の絶対値のコントロールによる触媒合金層の結晶性の制御により更なる性能向上が見込めるとの示唆を得た。

### 【2022年度計画】

- 電極サイズに関し、現状の  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  スケールから、AIST拠点でのJARIセル試験、ひいては実スケール装置への実装をも可能にするサイズにまで広面積化し性能試験を実施する。

今後更なる高性能化により、カソード触媒層の際と同様、AEM装置の低コスト化、耐久性向上に貢献することが期待される。

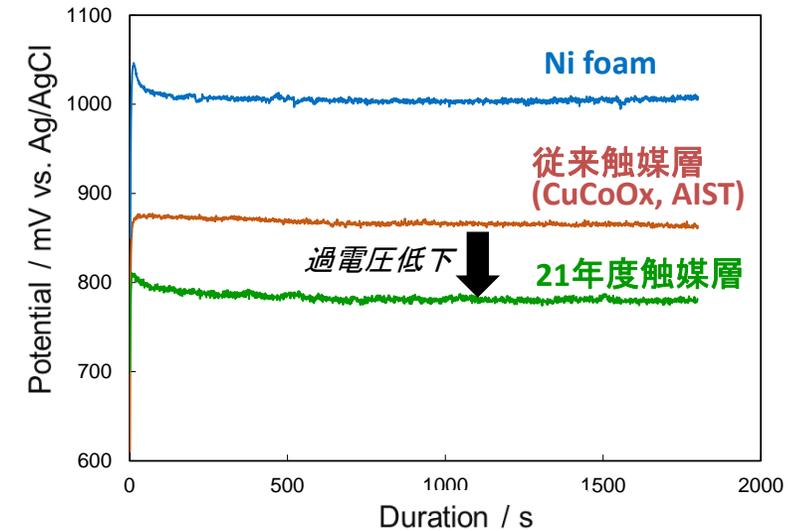


Fig. 21年度開発の触媒層サンプルの性能評価結果 (@  $+0.5 \text{ A/cm}^2$ )

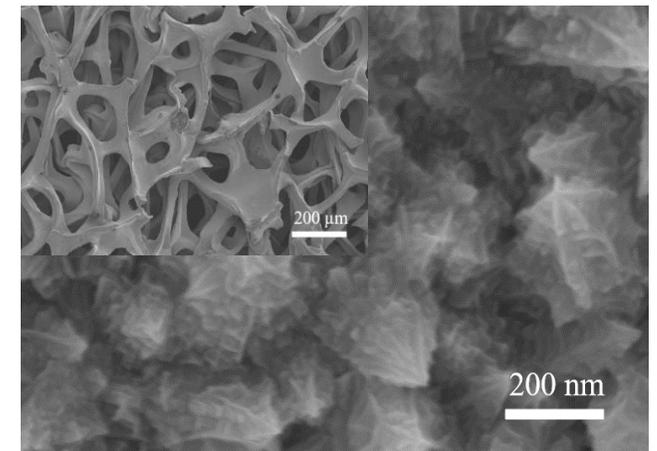


Fig. GDL上に作成した触媒層のSEM像

### 3. 研究開発成果について

#### 1-4. アノード触媒層気泡離脱挙動解析 (北大)

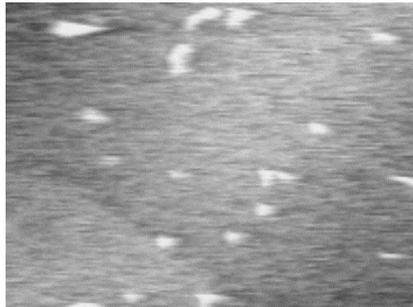
##### <実験>

純水中で親水性および疎水性HOPG電極を作用極として用い、表面に発生したナノ気泡を高速原子間力顕微鏡で観察。

(対極：Pt板、参照極：Pd-H、電解電位：-0.7 V)

高速AFM画像から被覆率および気泡圧を試算した。

- ・ 疎水性基板は約18%、親水性基板は約7%の被覆率であった。
- ・ ラプラス式よりナノバブルの気泡圧は約150気圧（過飽和度150相当）であった。  
→ 濃度過電圧 約68mV であった。



疎水性基板



親水性基板

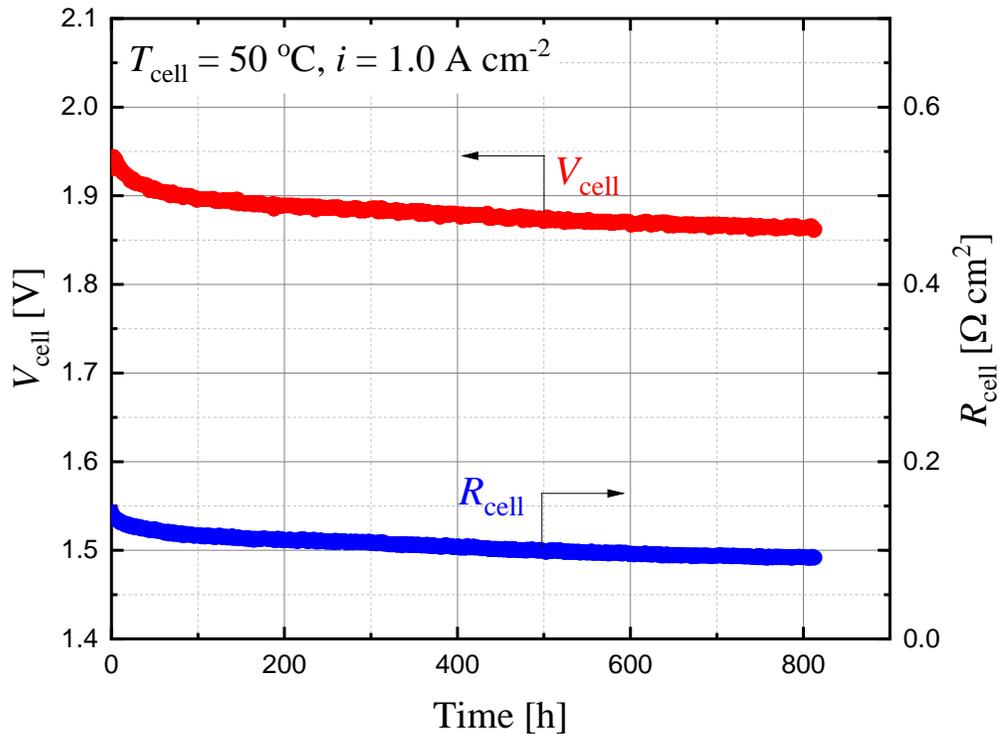
##### 気泡周りの濃度勾配および流動様子



### 3. 研究開発成果について

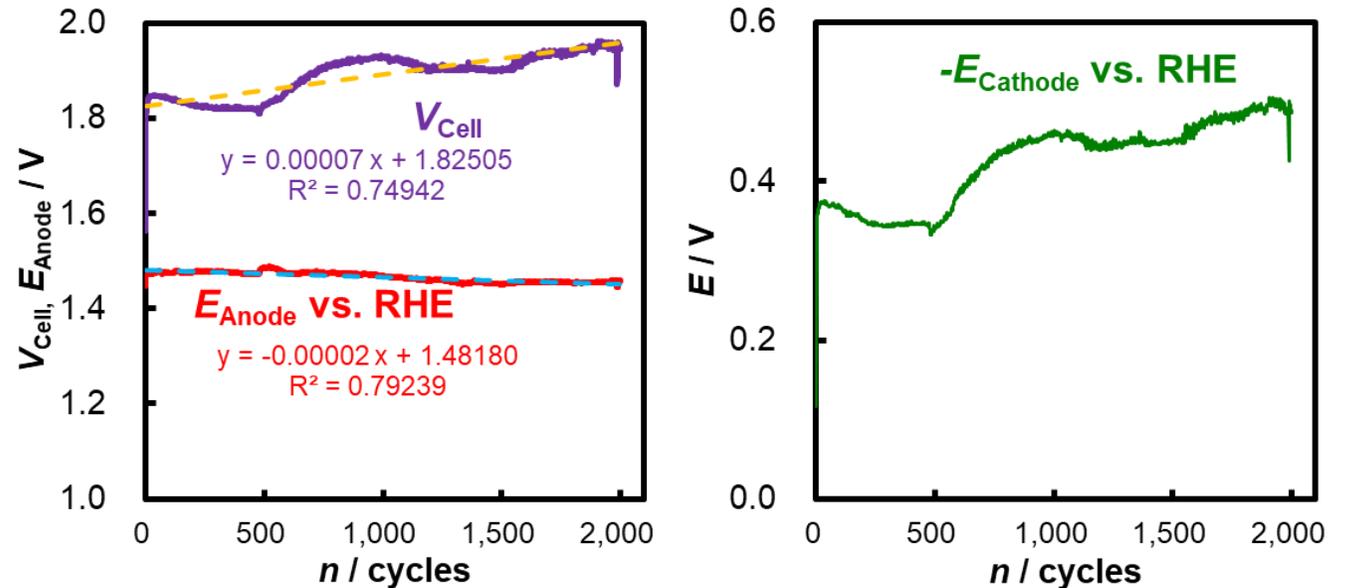
## 2-1. 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価 (産総研)

### 一定電流連続運転試験 (JARIセル) (1.0A/cm<sup>2</sup>)



- 電解液はK<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (10wt.%)で両極にステンレス製セパレータ使用.
- 概ね抵抗および電圧は漸減傾向を維持.

### 変動負荷サイクル試験 (YNUセル) (2,000サイクル)



- セル電圧は2,000サイクルで約0.15V上昇.
- アノード電位は、安定もしくは若干低下しているため、セル電圧の上昇はカソード電位の上昇に起因する.

→ セルの劣化主要因はカソードにあり、カソード電極の安定性が耐久性向上の主要課題となる.

### 3. 研究開発成果について

#### 2-2. 構成部材の耐食性評価および防食技術開発（北大）

##### <実験>

60°CのKOH溶液（pH=13）の中でSUS310Sステンレス鋼を試験極として用い、100時間電解を行う。

（対極：Pt板、参照極：Hg/HgO、電解電位：1.0V）

電解後の試料に対してX線光電子分光法とGD-OES測定から

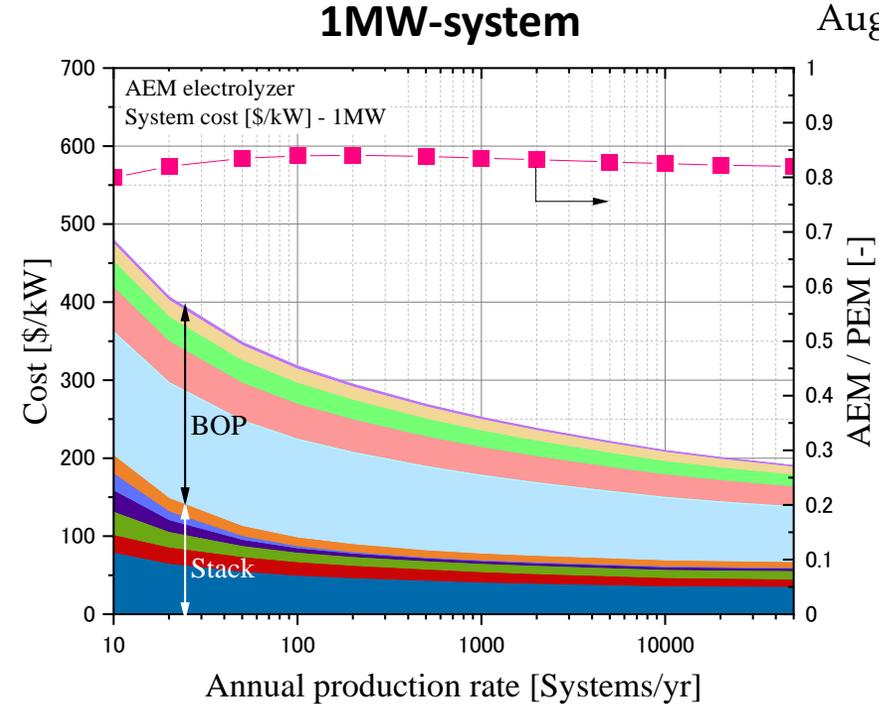
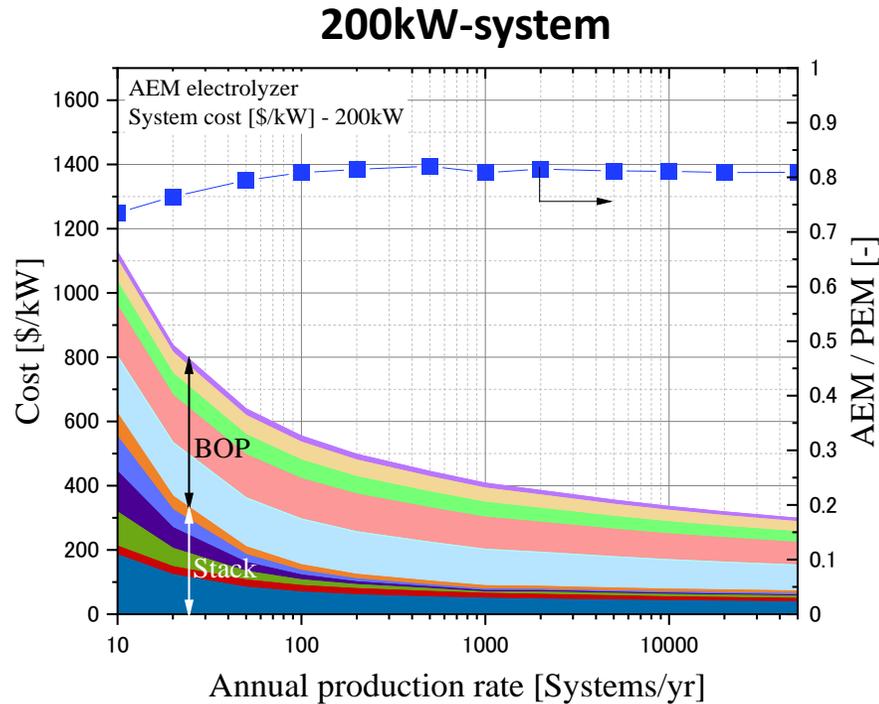
	SUS304L	Ni(OH) <sub>2</sub> 、Fe(III)oxide、FeOOH、Fe(II)oxide	
腐食生成物	SUS310S	Ni(OH) <sub>2</sub> の他にNi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、NiO、Fe(III)oxide、FeOOH、Fe(II)oxide	
	純Ni	Ni(OH) <sub>2</sub> の他にNi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ni酸化物の形成が耐食性に寄与しているのか?!
腐食層の厚さ	SUS304L > SUS310S > 純Ni		※純Niが腐食しないわけではない
	Ni濃度の増加により耐食性が向上した		

# 3. 研究開発成果について

## 3-1. 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価（産総研）

参考文献  
A. Mayyas et al.  
NREL Technical Report  
BREL/TP-6A20-72740  
August 2019

### NREL reportを元にしたAEM水電解システム製造コストの試算



今回の試算結果によると、

- ✓ 製造台数の増加によりkW当たりの製造コストは減少する。特に100台/年までの減少率大きい。
- ✓ AEM水電解システムは、PEM水電解システムと比較して、200kWシステムではおおよそ2割、1MWシステムでは1.5-2割程度のコスト削減が見込まれる。
- ✓ 1MWシステムでは整流器コストの比重が相対的に大きくなる。

## 4. 今後の見通しについて

項目	本事業終了時の技術レベル
セル・スタック性能	<b>単セルでPEM水電解と同等のI-V性能</b>
	無電解メッキ触媒層作製方法確立
	電析による触媒層作製方法確立
	気泡離脱挙動解析を元にした触媒層構造の最適化
耐久性	1000時間程度初期安定性検証
	負荷変動サイクル加速試験による劣化要因の特定
	<b>腐食速度を元にした使用材料と電解液の選定</b>
コスト	<b>コスト予測において、PEM水電解に対するコスト削減幅を予測</b>
	システムコスト低減に向けたシステム構成、運転方法を特定
	システムコストに占めるBOP割合を把握

### 次に取り組むべき課題

スタック実証運転（漏れ電流、逆電流の検証）

流路構造の最適化

電極触媒材料と電極構造の深堀

膜・アイオノマの高機能化

数万時間の耐久性検証

実条件におけるスタック長期運転試験

材料腐食性、セル性能、耐久性、コストを考慮した使用材料と電解液の再検討

加圧条件下での耐久性試験

市場調査とシステム規模の選定

実証機的设计・製作による試算結果の検証

BOP構成機器のコスト低減化の取り組み

サプライチェーンの構築

現行メンバーに加えて、企業の参画を想定している

- 性能向上
- 高耐久化
- 低コスト化
- スタック化

を促進し、実証機設計、検証に備える