

発表No.A1-9

# 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／常温水电解の実用化基盤研究プラットフォームの構築

発表者名 黒田 義之

団体名 国立大学法人横浜国立大学, 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立大学法人京都大学, 大阪公立大学, 国立大学法人東京大学, 学校法人立命館, デノラ・ペルメレック株式会社, 国立研究開発法人物質材料研究機構, 技術研究組合F C - C u b i c  
JFEテクノリサーチ株式会社

発表日 2025. 7. 15

連絡先：横浜国立大学

[ynugr-cel@ynu.ac.jp](mailto:ynugr-cel@ynu.ac.jp)

# 事業概要

## 1. 期間

開始：2023年6月

終了：2025年3月

## 2. 最終目標

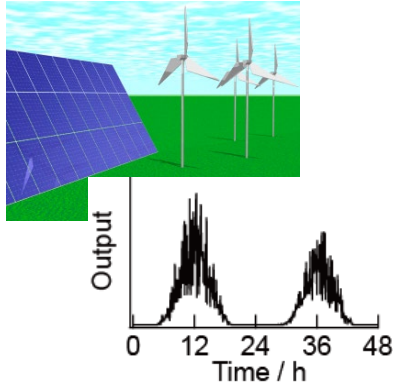
2030年以降の高効率、高耐久、低コストの水電解システムを実現するための協調領域の基盤技術のプラットフォームを開発し水電解技術の競争力を強化することを目的とし、材料及びセル評価技術、電極触媒の高度解析及び材料開発手法、ならびにマルチスケールシミュレーション手法を開発し、これらの協調領域の基盤技術を共有する体制を構築する。

## 3. 成果・進捗概要

本研究では常温水電解実用化基盤研究プラットフォームの基礎技術として材料評価技術、高度解析技術、モデリング技術を開発し、その水電解研究開発への有効性を検証した。材料評価においては、AWEの起動停止模擬試験法を応用して剥離モードを抑制する高耐久電極を開発し、その有効性を示した。実機構造を模擬した電解槽における気泡解析から各種現象を分離解析可能な等価回路モデルを構築すると共に、気泡の接触角測定技術を確立した。PEMWEにおいて倍率50倍に達する加速劣化試験法を確立し、加圧条件下での電解槽劣化に関する知見をまとめた。また、AWE及びPEMWE用長期運転試験サイトを構築し、各サイト間での測定誤差を10%以内に抑える試験体制を整備した。設計圧力5 MPaの高圧PEMWE試験装置を開発し、設置すると共に、高圧ガス保安法をはじめとする各種法規対応プロセスを詳細にまとめた。高度解析技術では発生気泡を除去し、時間分解能50 msのオペランド解析技術を確立し、Ir系触媒の活性発現におけるメカニズムを明らかにした。また、酸化物表面における構造変化や、起動停止耐久性を考慮したスペクトル、電気化学データを用いたMI解析を実施し、高活性・高耐久なAWE用触媒を得た。モデリング技術では、電解槽の容量を利用した電力の変動吸収の可能性を見出した。小規模電解槽試験のデータから電解槽スタックの劣化分布を予測するモデルを構築した。

# 1. 事業の位置付け・必要性

## 水電解技術開発における課題

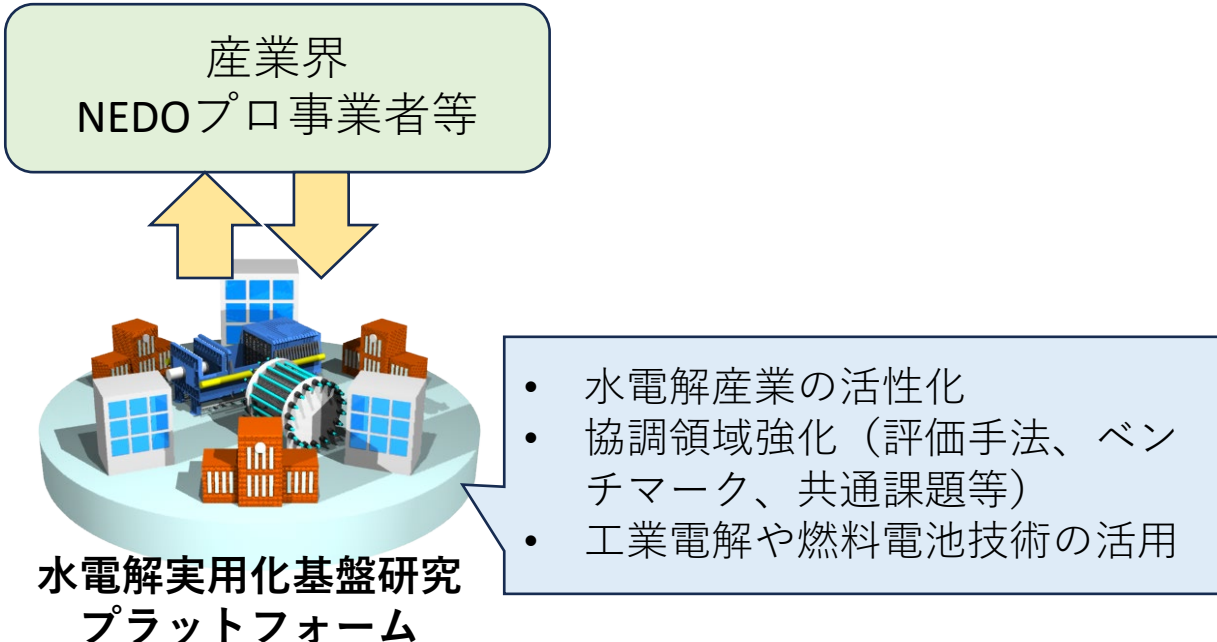


- 長期耐久性及び変動耐性
- 貴金属資源による制約
- 高効率な材料・装置・システム  
開発基盤の構築
- 加圧水電解の試験設備構築

## 水電解槽の導入規模見通し

- IEAによる2030年想定 134 GW
- 水素基本戦略による  
日本関連企業の2030年導入目標 15 GW
- 日本のカーボンニュートラルに  
必要な国内外水電解槽の推定<sup>[1]</sup> 600 GW

## 本事業：常温水電解実用化基盤研究プラットフォーム



## 協調領域を形作る水電解基盤研究プラットフォーム

- 材料評価手法の提供
- 高度解析手法の提供
- 電解槽・システムシミュレーション手法の提供
- 性能発現、劣化機構に関する知見の集約
- 水電解槽要求事項の集約

## 産業競争力強化、周辺分野の新規参入促進による国内水電解産業の活性化

[1] 光島ら, 水素エネルギーシステム, 49, 68 (2024).

## 2. 研究開発マネジメントについて---プラットフォームの目的と実施体制

性能発現や劣化機構解析に基づく材料の評価・解析・開発並びに再エネ利用水電解水素製造プロセス最適化のプラットフォームを構築し、産官学の共通認識の醸成と新規参入拡大を図る

### ②電極触媒の高度解析及び材料評価手法の開発

耐久試験プロトコルのバリデーション、MIへのデータインプットに対応したオペランド高度解析手法の確立

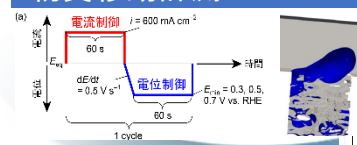
| 材料レベル                           | 電極/触媒層<br>部材レベル | 電極-隔膜<br>/ MEA-PTL | 単セル<br>/ ラボスタック | 電解システム<br>(AWE/PEMWE共通) | 連係システム<br>(AWE/PEMWE共通)                         |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>常温水电解の実用化基盤研究プラットフォームの構築</b> |                 |                    |                 |                         | 再生可能エネルギーシステム<br>環境下での水电解<br>評価技術基盤<br>構築(FREA) |

### ①材料及びセル評価技術の開発

加速倍率50倍の劣化試験法を確立するとともに、中立な評価プラットフォームの構築



- 標準試験法(ADT等)
- 耐久評価装置仕様/拠点
- ベンチマークデータ(耐久等)
- 物質移動計測



セル特性

### ③マルチスケールシミュレーション手法の開発

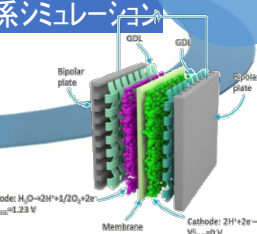
小型試験用電解槽 (cm<sup>2</sup>級) から大型電解槽 (m<sup>2</sup>級)、水素製造システムまでを含むマルチスケールシミュレーションモデル開発



- 物質移動シミュレーション
- セル・スタックシミュレーション
- プロセスシミュレーション
- 再エネ・電力系統連係シミュレーション

システム特性

システム設計  
電解槽構造  
材料選択



大型電解槽



個別技術情報  
開発支援  
材料開発プロジェクト A

個別技術情報  
開発支援  
材料開発プロジェクト B

個別技術情報  
開発支援  
材料開発プロジェクト E

個別技術情報  
開発支援  
材料開発プロジェクト F

個別技術情報  
開発支援  
電解槽開発プロジェクト C

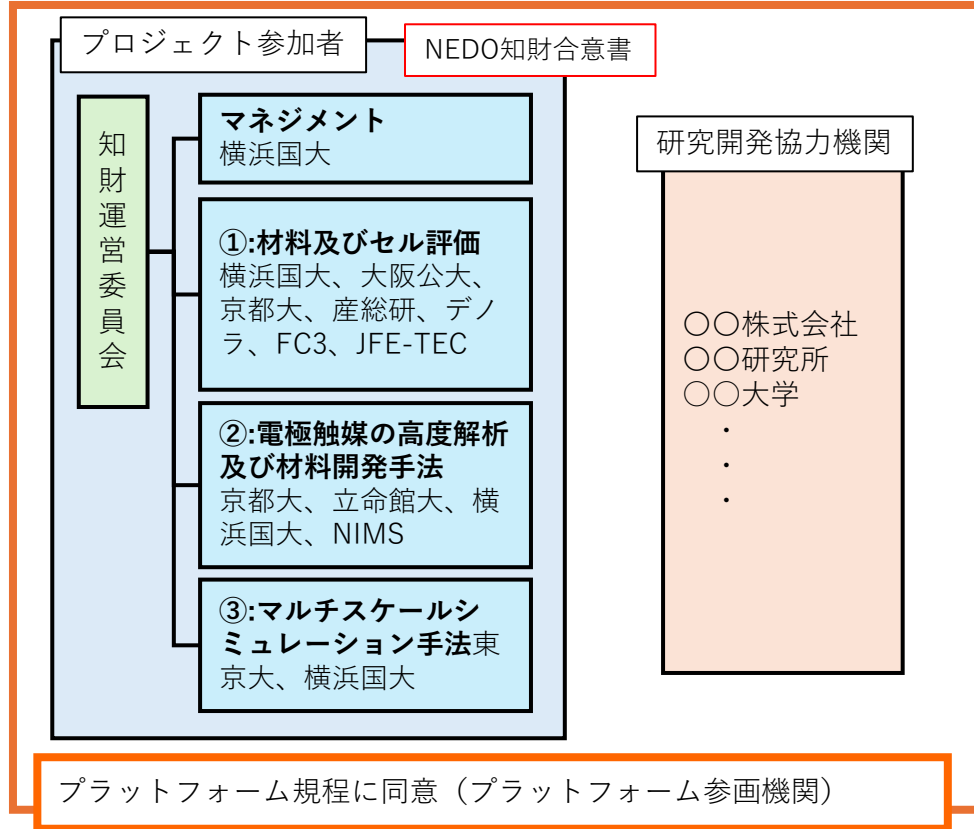
個別技術情報  
開発支援  
電解槽開発プロジェクト G

個別技術情報  
開発支援  
システム開発プロジェクト D

個別技術情報  
開発支援  
システム開発プロジェクト H

## 2. 研究開発マネジメントについて---常温水电解基盤研究プラットフォーム

### プラットフォームの概要



水电解に関連する企業、研究所、大学等とプラットフォーム規定（NDA）を締結し、サンプル評価、プロトコル作成への協力等の相互連携、拡大研究開発推進会議による情報交換等の活動を実施

### プラットフォームの実績

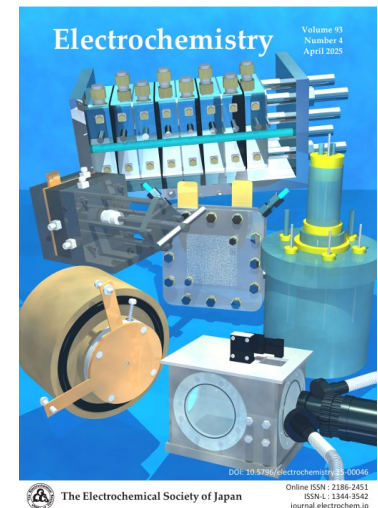
#### 拡大研究開発推進会議

- NDA締結機関のみが参加するクローズドな会議として半年に1回の全体会議を実施
- プロジェクト参加機関にて開発した評価法や機能発現・劣化機構等の研究成果の共有
- 研究開発協力機関からの課題共有や技術紹介といった情報提供

#### 水电解評価法（英語版）の公表

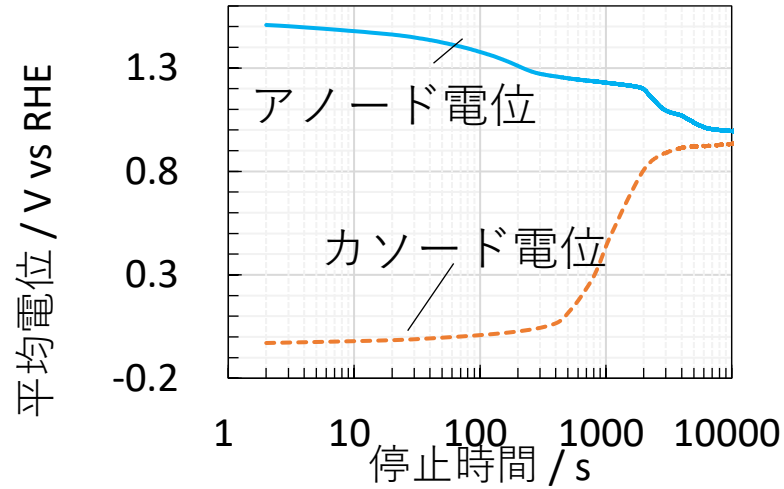
- 水电解評価法について英文でまとめたレビューをElectrochemistry誌に報告

*Electrochemistry*, **93**, 046001 (2025).

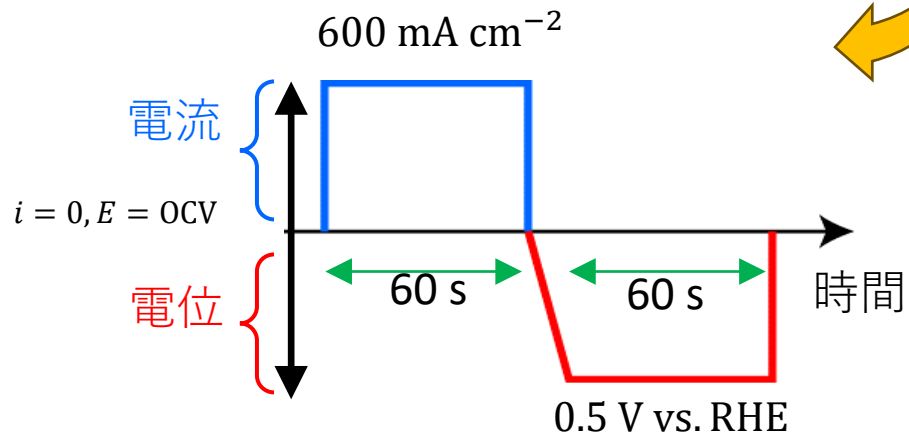


### 3. 研究開発成果について AWE用起動停止模擬試験法の開発

#### 起動停止模擬試験法のコンセプト



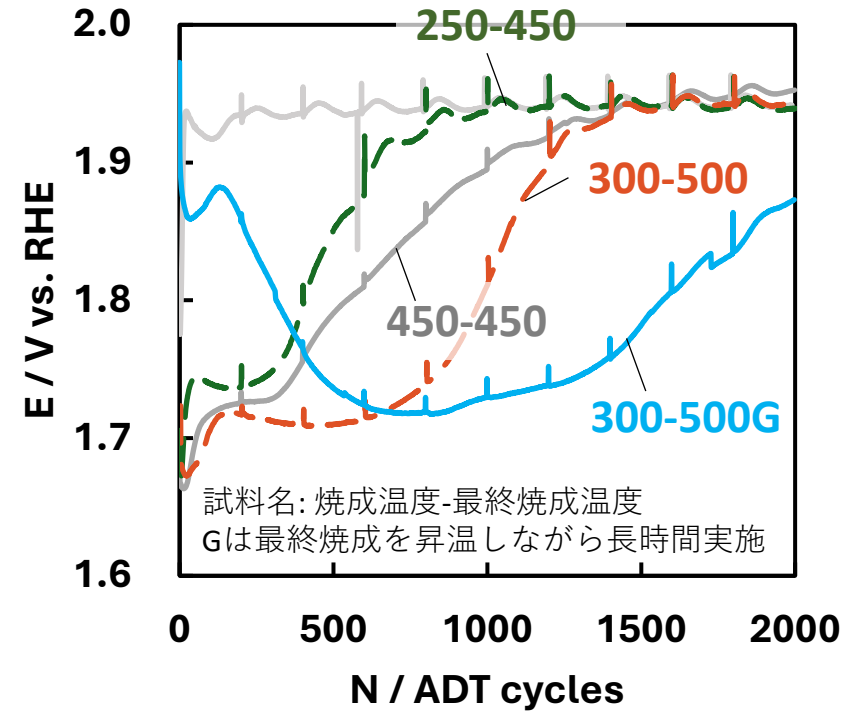
電解停止時の電位プロファイル



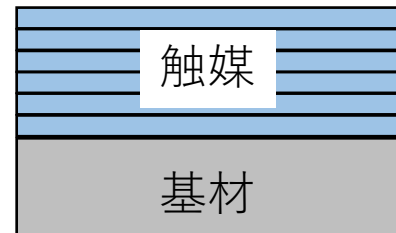
起動停止模擬プロトコル

実測に基づく  
プロトコル策定

#### 高耐久電極開発への応用



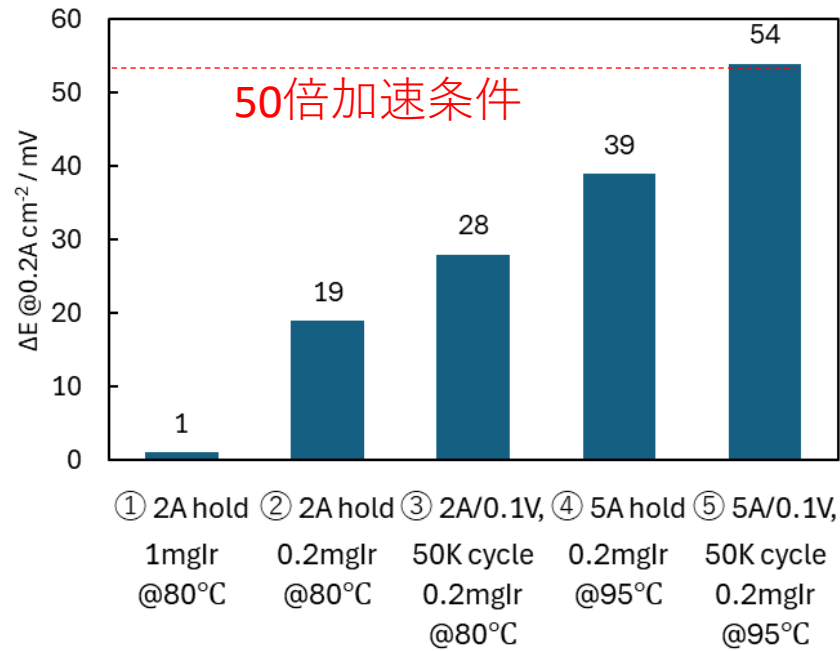
触媒前駆溶液を  
交互に塗布焼成



- 焼成温度・方法による耐久性の変化を定量的に解析可能
- 一定温度での処理 (450-450) よりも低温高温を組み合わせた方が (300-500G) 高耐久

### 3. 研究開発成果について PEMWEの劣化試験法の開発

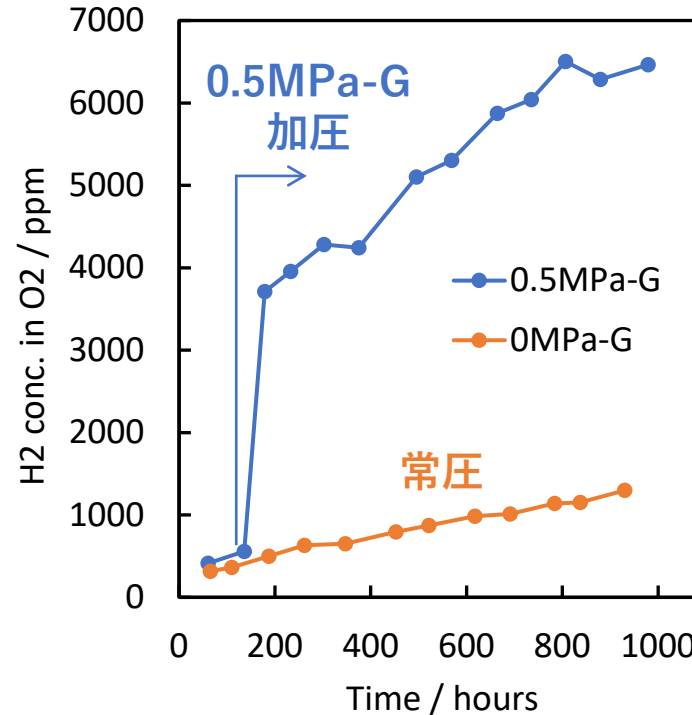
#### 加速劣化プロトコルの開発



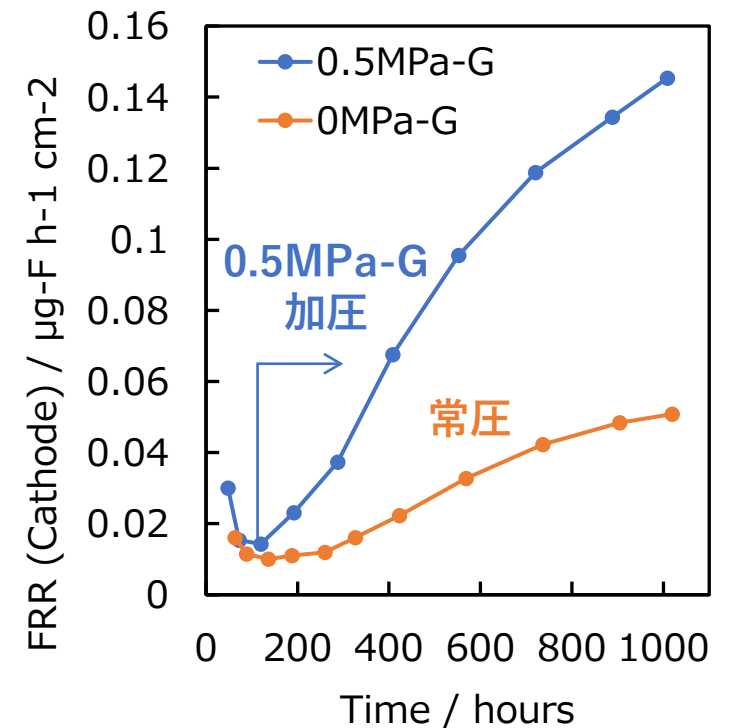
高電流密度化、高温化、起動停止サイクルによりアノード触媒の劣化を加速

#### 水素加圧条件の影響

H<sub>2</sub> 0.5MPa加圧 1000 h@80°C, 2 A/cm<sup>2</sup>定電流電解



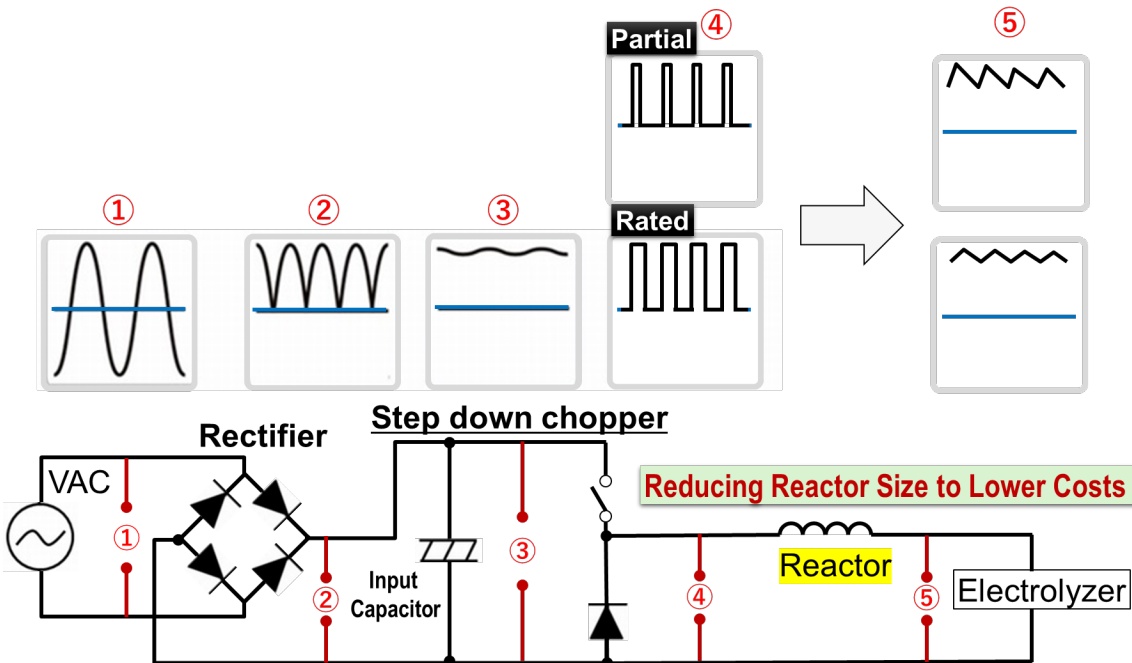
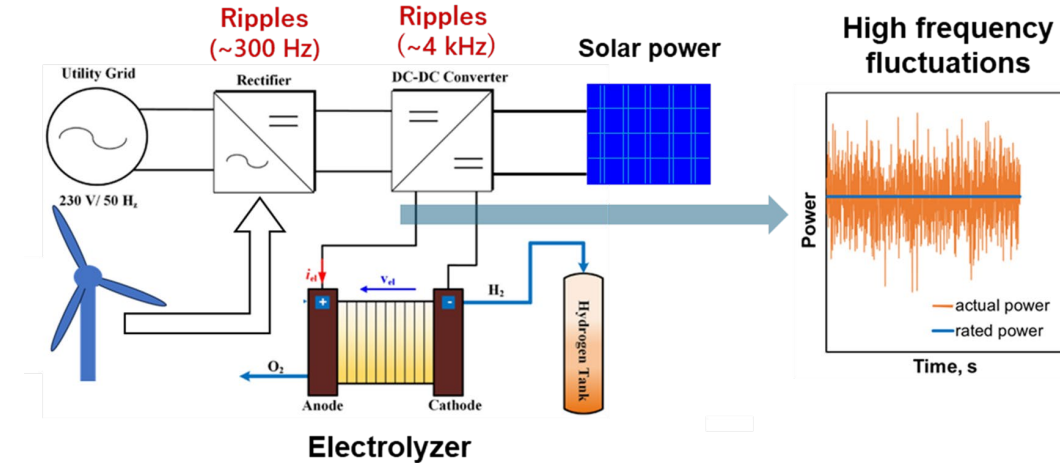
H<sub>2</sub>クロスオーバーの増加



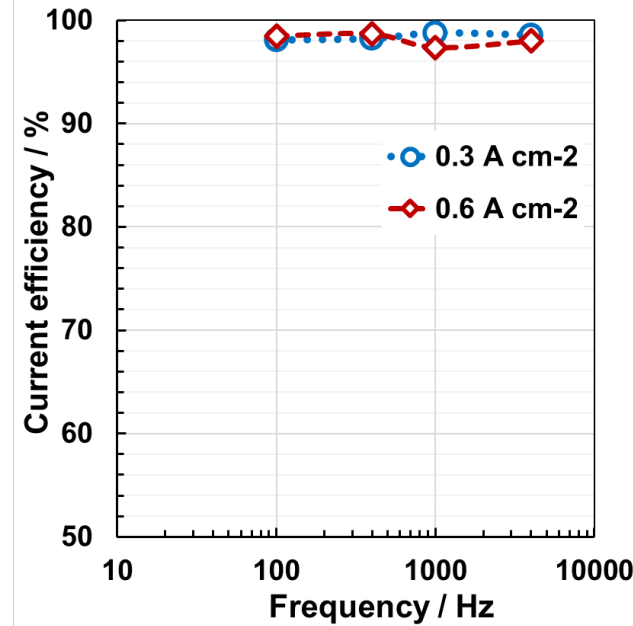
フッ素溶出の増加

### 3. 研究開発成果について AWEへの電源リップルの影響

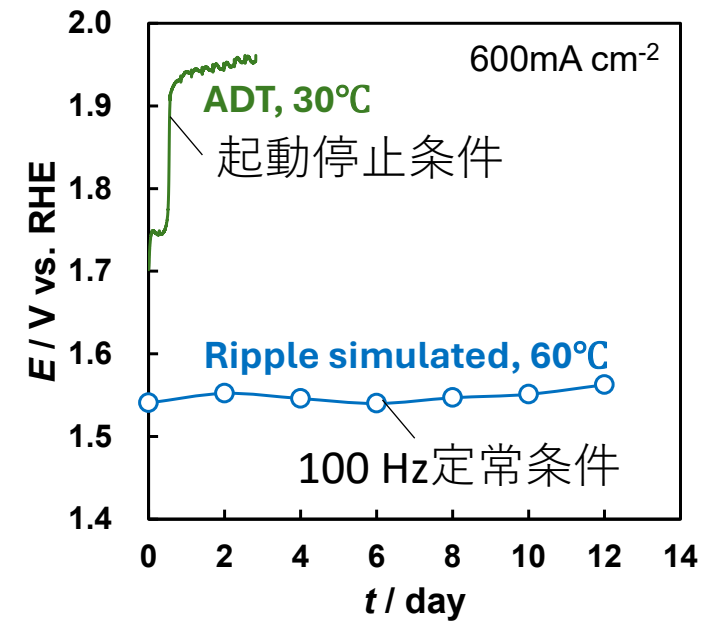
#### 整流器による交流電源の直流化概念図



#### 水素生成効率



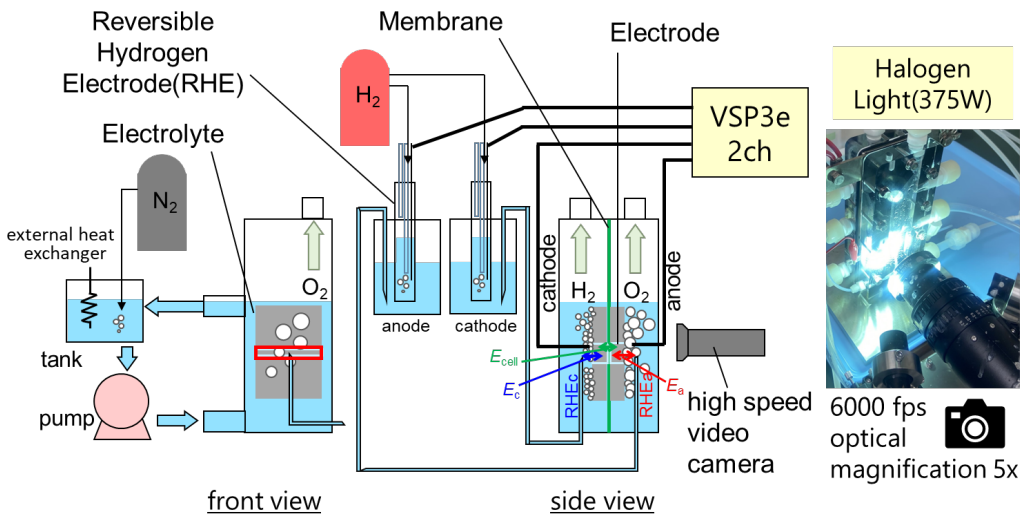
#### アノード耐久性



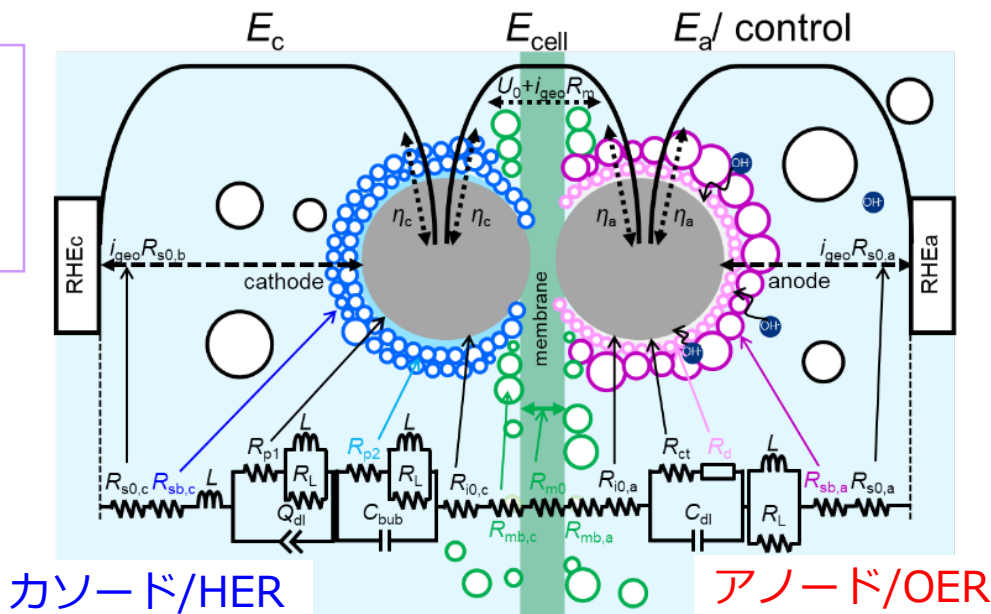
- 電源装置の低コスト化に向け、水電解槽への電圧リップルの影響を評価
- 水素生成効率への実質的な影響は殆ど見られず、変動による電極劣化への懸念も小さかった。

# 3. 研究開発成果について 電極近傍気泡計測による物質輸送の評価

## ・可視化AWEセルとダブルRHE計測による気泡挙動解析

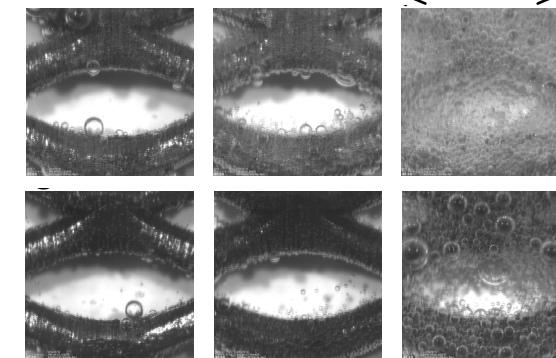


セル内物質  
輸送抵抗の  
等価回路モ  
デル



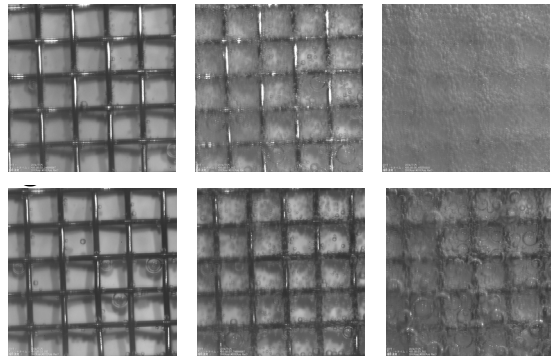
## 気泡生成の高速度顕微観察

Ni Ex-mesh (800μm)



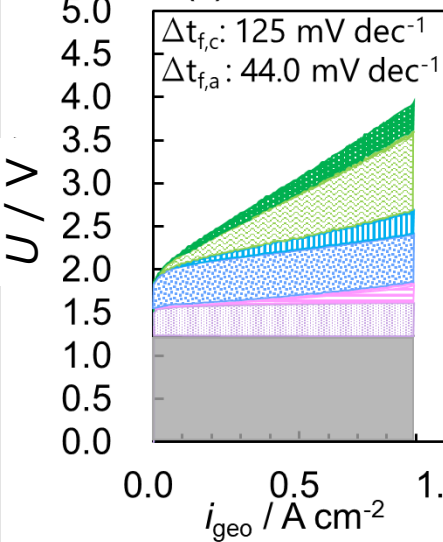
$i_{geo} = 0.03 \text{ A cm}^{-2}$   $0.1 \text{ A cm}^{-2}$   $1.0 \text{ A cm}^{-2}$

Ni Plain weave #30 mesh  
(φ150μm)

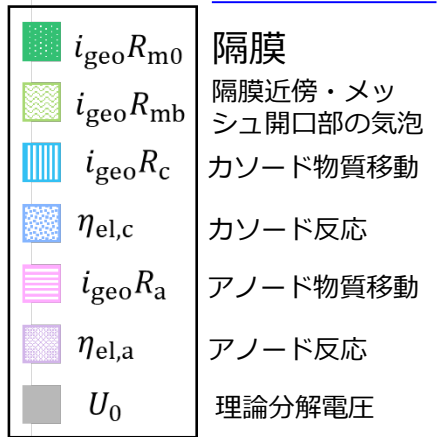
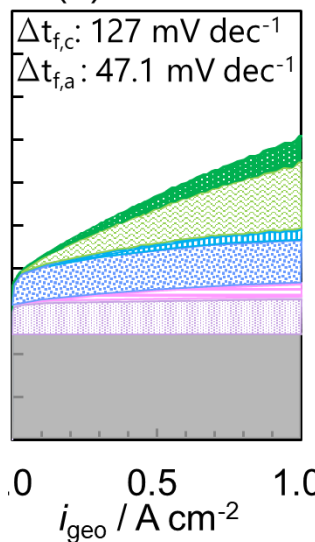


$i_{geo} = 0.03 \text{ A cm}^{-2}$   $0.1 \text{ A cm}^{-2}$   $1.0 \text{ A cm}^{-2}$

(a) Ex-mesh



(b) 50mesh



過電圧の内訳

@2M KOH, 30℃

ダブルRHE計測による過電圧分解

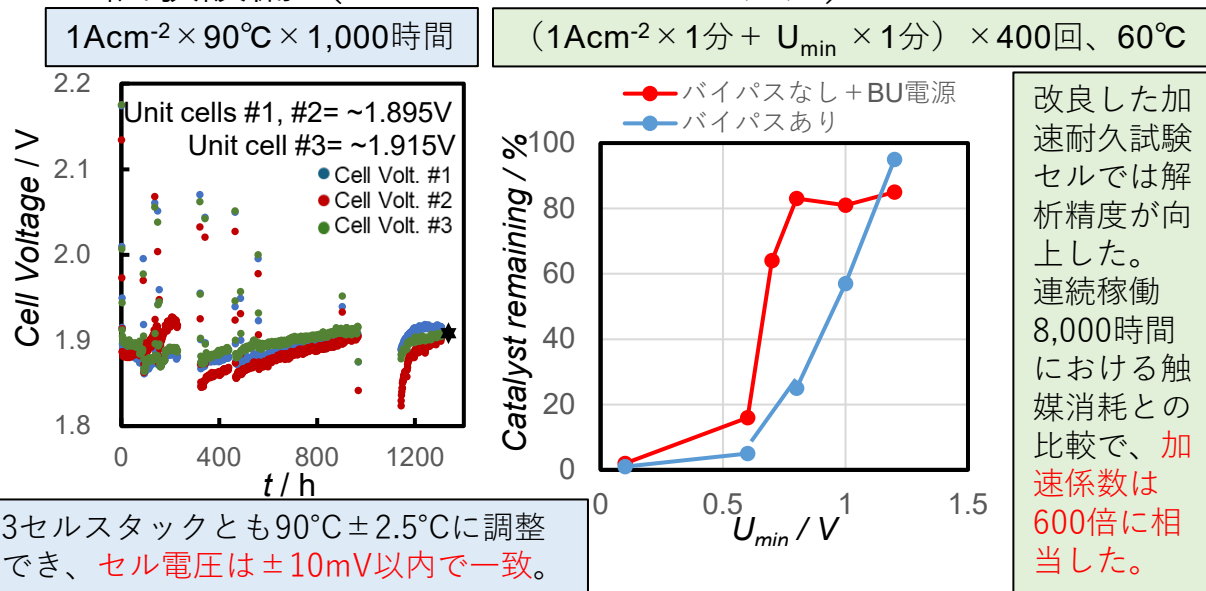
物質移動過電圧は、イオン抵抗と拡散抵抗の和

### 3. 研究開発成果について 長期運転試験サイトの整備

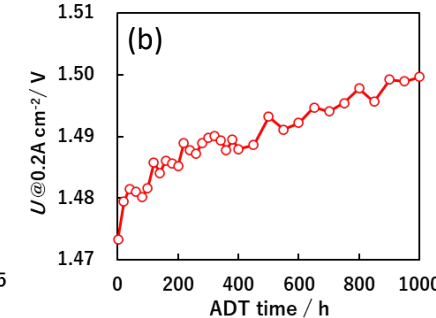
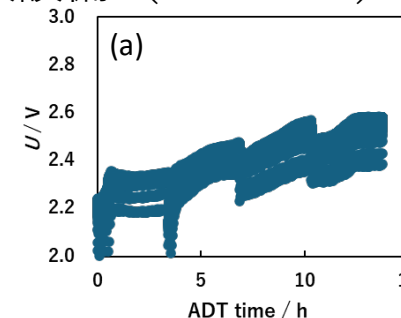
各種電解槽部材の長期試験並びに評価法のバリデーションデータの取得を目的とし、電解槽試験設備の拠点設置を進めた。

- 長期運転設備の共通仕様策定
- 同仕様装置・MEAを用いた際の異サイト間での評価値誤差10%以内を達成
- 3セルスタックの各セル独立制御設備の構築
- 再エネ模擬パターンを入力した1000 h耐久試験

#### AWE試験設備（デノラ・ペルメレック）

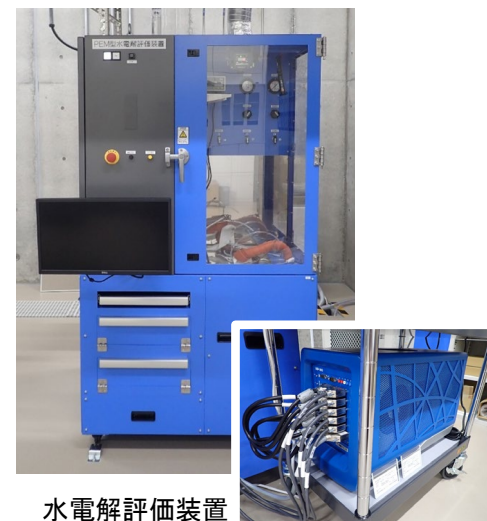


#### AWE/PEMWE試験設備（AIST FREA）



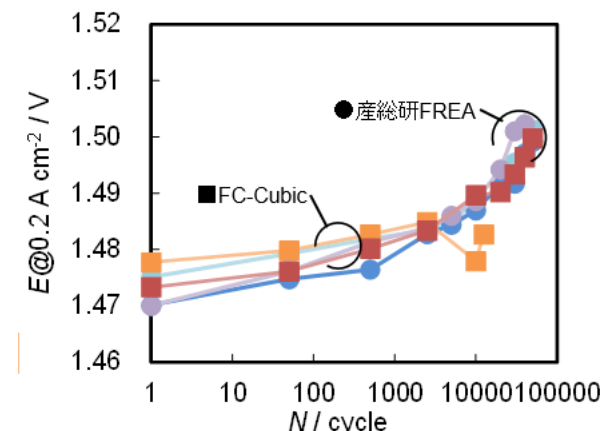
構築したAWE(上)とPEMWE(下)評価設備

#### PEMWE試験設備（FC-Cubic）



水電解評価装置

ポテンシostat VSP-300  
ブースターボード5枚内蔵 50 A仕様



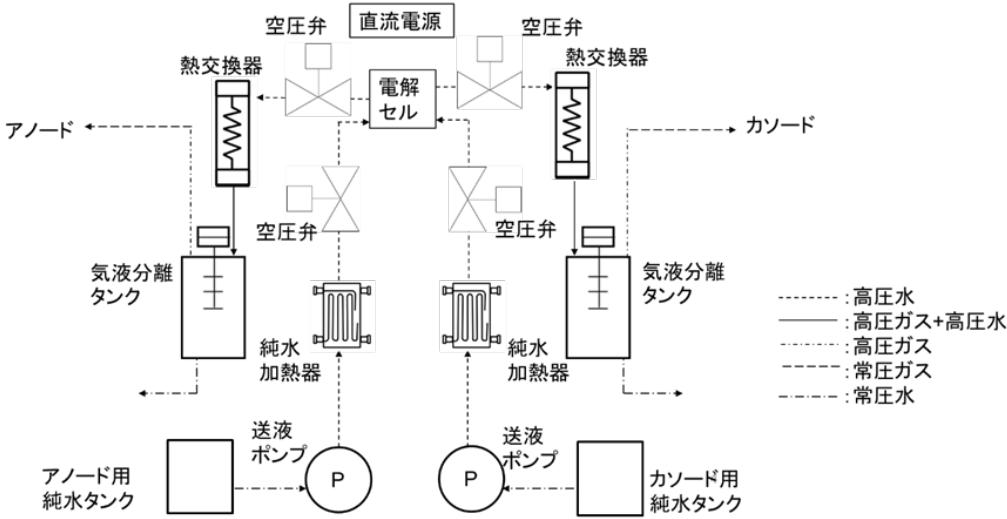
- 加速劣化試験2回目は産総研FREAと同等の結果
- 一回目は設備トラブルにて中断

### 3. 研究開発成果について 高圧水電解試験サイトの整備

- 高圧ガス保安法の法規制に対応するための許認可プロセスを整理
- リスクアセスメントの結果を加えて加圧**PEMWE**評価試験設備を製作

#### 開発した加圧PEM水電解評価装置

| 項目   | 設定値等                                                 | 備考                |
|------|------------------------------------------------------|-------------------|
| 設計圧力 | 5MPa                                                 | 両側加圧可能(基本は両側等圧運転) |
| 常用圧力 | 3MPa                                                 |                   |
| 常用温度 | 80℃                                                  | 水を加熱して供給          |
| 電極面積 | 4cm <sup>2</sup>                                     |                   |
| 電解質膜 | 予め差圧耐圧試験で限界圧力を求めた膜(ex Nafion <sup>TM</sup> 117)は交換可能 |                   |



加圧PEM水電解試験設備のフロー図

高圧ガス保安協会(設備に関する規定)

- 高圧ガス接触部品認定試験
  - 強度計算
  - 気密試験
  - 耐圧試験

耐圧試験は**設計圧力の1.5倍**で実施  
気密試験圧力は設計圧力で実施

相談・折衝

JFEテクノリサーチ  
横浜国立大学

- 装置／セル設計・製造

相談・折衝

横浜市消防局(設置に関する規定)

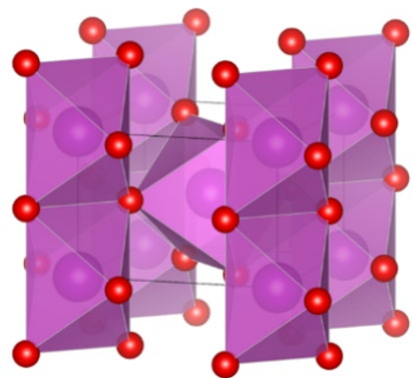
- 高圧ガス製造設備設置許可
- 気密試験(常用圧力以上)

加圧PEM水電解試験装置開発スキーム

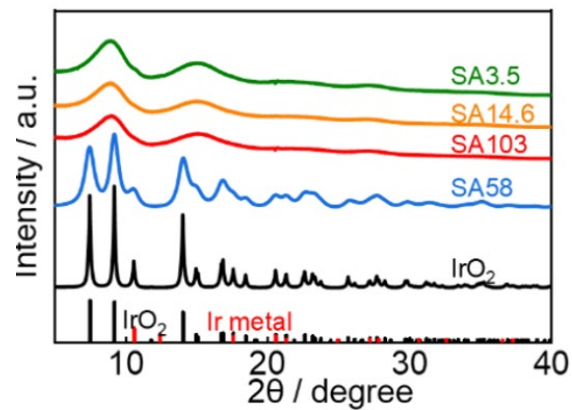


加圧PEM水電解評価設備

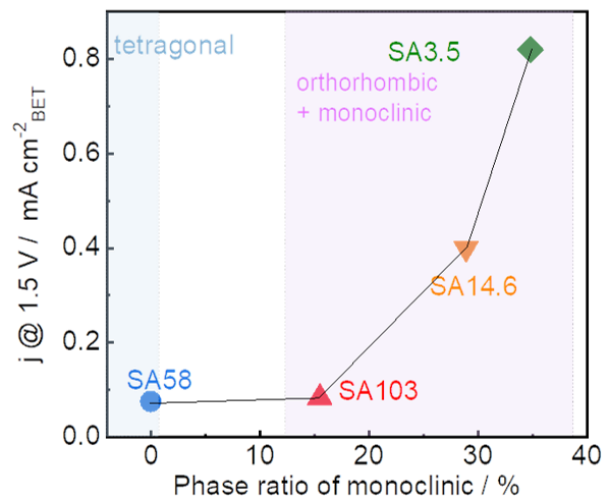
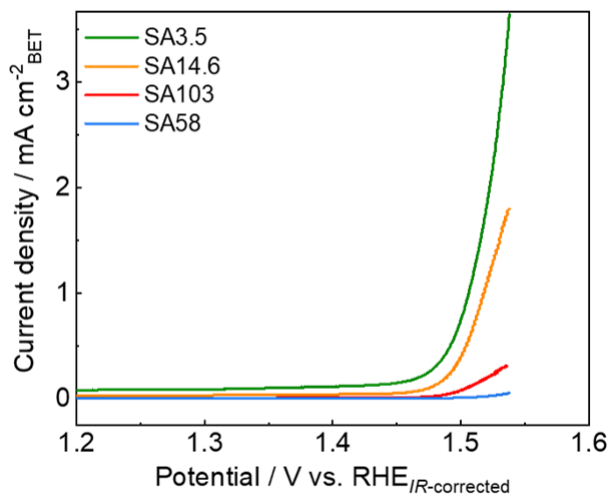
### 3. 研究開発成果について 放射光高度解析によるIrO<sub>x</sub>の活性発現機構解明



rutile IrO<sub>2</sub>

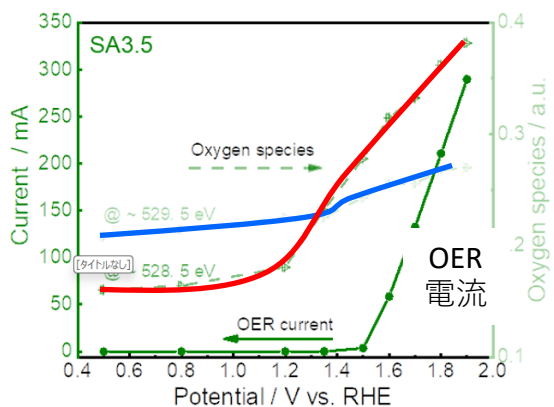
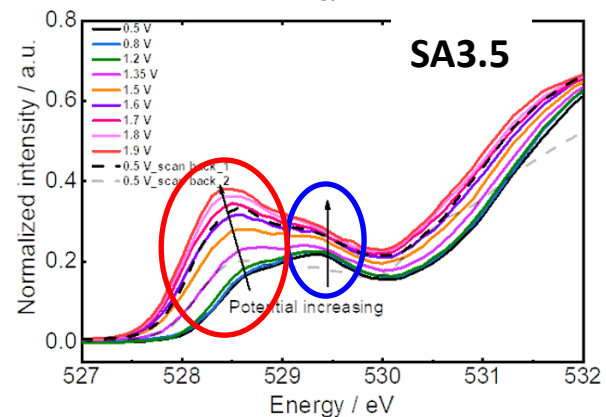
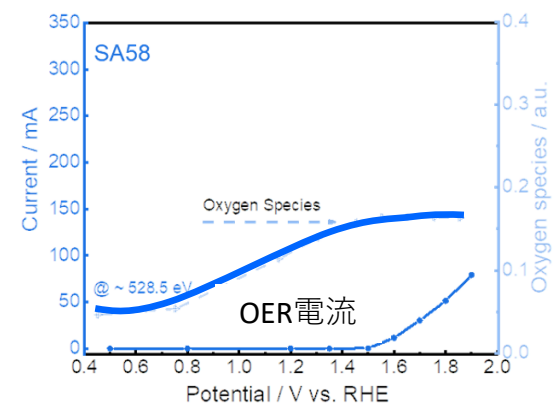
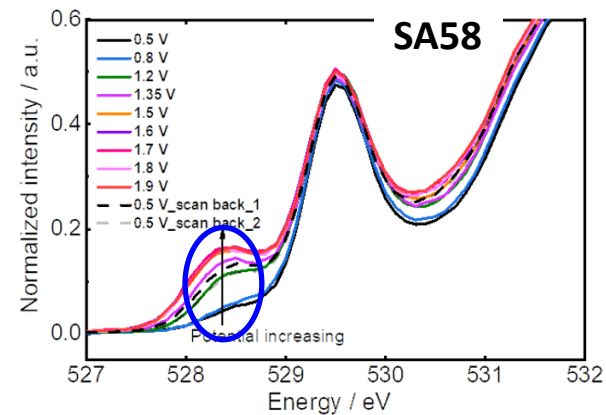


SA58以外はIrO<sub>2</sub>と異なる単斜晶短距離秩序構造



単斜晶相の割合とOER活性に高い相関

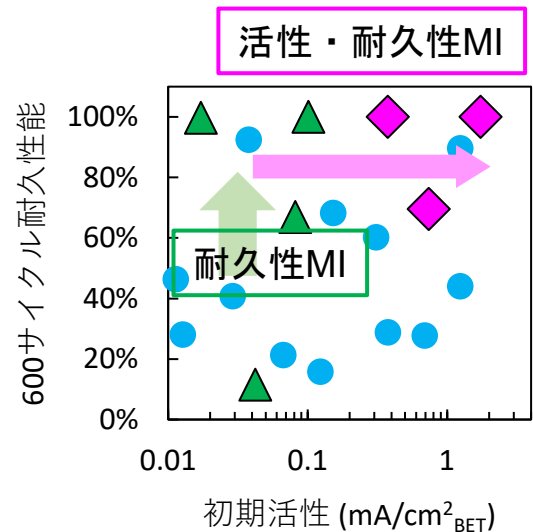
#### Operando O-K edge XAFS



単斜晶IrO<sub>x</sub>に水の求核攻撃に有利な\*O-OH中間体(O<sup>-</sup>種)が形成され、高活性OERの起源となることを解明

# 3. 研究開発成果について マテリアルズインフォマティクスによる触媒探索手法の開発

## 前プロジェクトからの課題



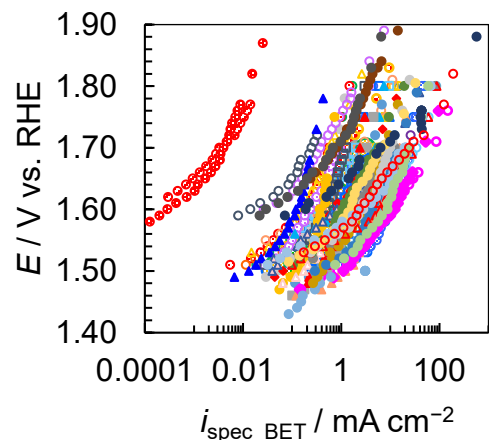
### 前PJでの成果

- 電気化学測定データと元素情報から高耐久・高活性な材料を予測

### 残課題

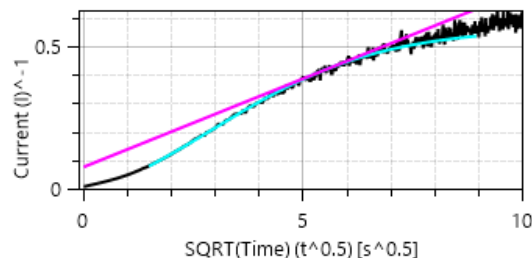
- 内挿的探索から外挿的探索に進むため、物理化学的性質を反映したデータが必要
- データ取得効率の向上

## データ取得方法の統一化



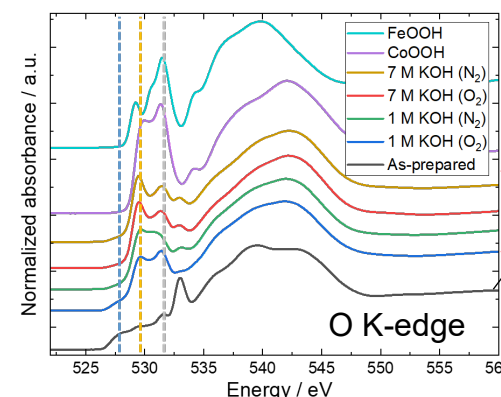
電気化学データの例

CA profile



- 粉末触媒評価条件の確立
- 触媒2種/週の評価プロトコル
- 時間外挿法の解析支援プログラムの構築
- ペロブスカイト触媒への添加元素による高耐久化

## 電解条件を模したスペクトル測定



表面電子状態

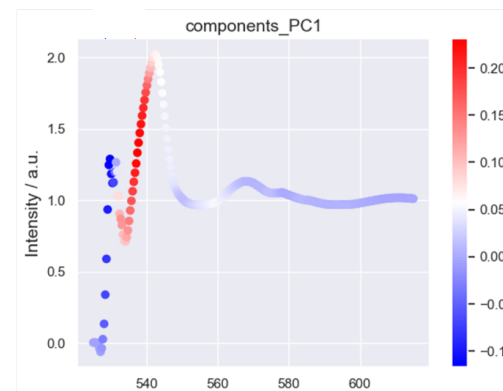
アルカリ処理後触媒

未処理触媒

- X線吸収・光電子分光により種々のアルカリ条件での表面電子状態を測定
- バルク構造ではなく、活性に寄与する表面電子構造の実験データを蓄積

次元圧縮による情報抽出

## 生スペクトルをフルに使った電気化学データ解析技術確立



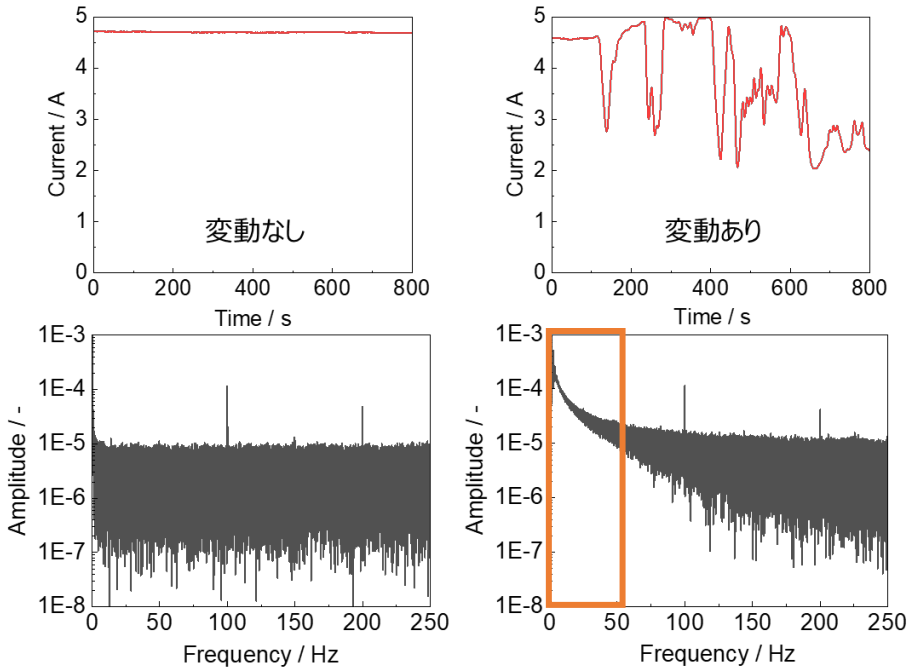
スペクトル主成分分析

- 次元圧縮により点数の多いスペクトル全データから特徴量を抽出
- XAFSスペクトル及び電解データより、活性と関連する因子を決定
- 人による指紋認証的解析を超えてMI手動の活性支配因子抽出を実現。

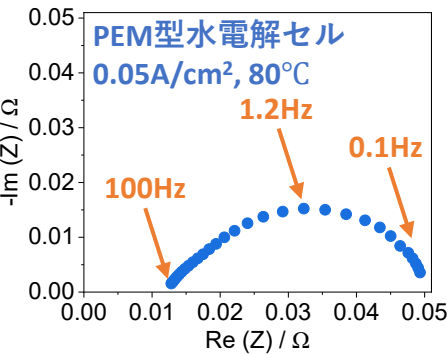
# 3. 研究開発成果について システムモデル及び電解槽シミュレーション

## 再エネ利用水電解水素製造システムモデル

太陽光発電変動評価（50Wパネル）



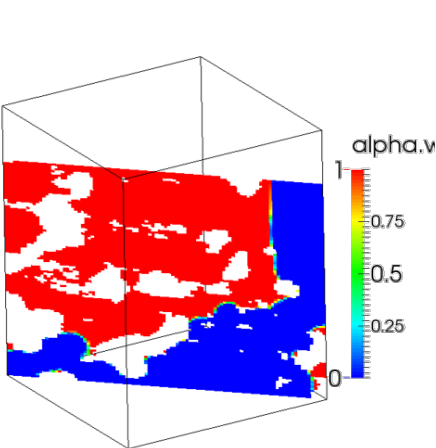
雲による出力変動の多い日では0.1Hz～数十Hzの高速微細振動が含まれることを確認



現状の水電解装置は変動電力入力に対する水電解セルのメリットを活かせておらず、BoP再構成による変動追従の実現可能性を示した

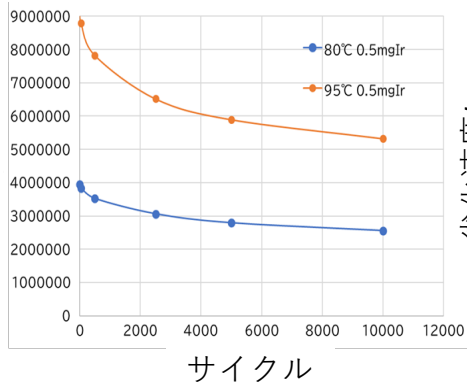
## マルチスケール水電解槽シミュレーション

- 気泡の生成，成長からセル性能までを一貫してつなぐマルチスケールなシミュレーション手法を開発
- 複数の一定条件での劣化試験（産総研）からサイクルごとの劣化速度への影響を数式化． 反応分布・熱物質輸送と劣化速度を連成しサイクルごとの劣化分布をシミュレーション．

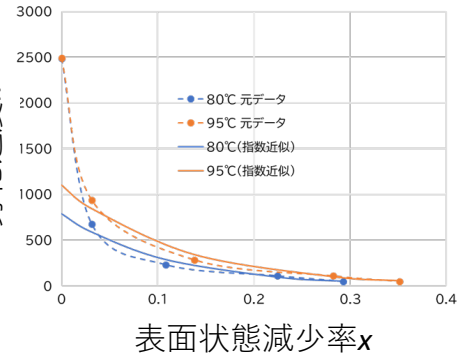


PTL中の気相体積分率

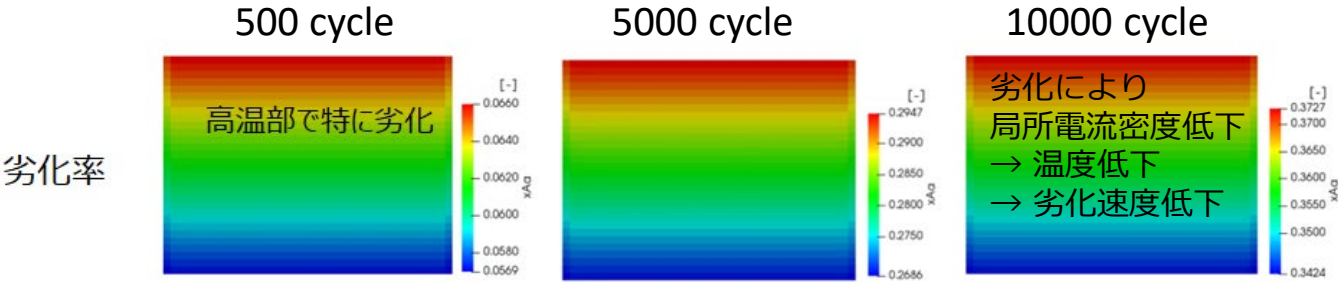
交換電流密度×有効反応面積



劣化温度依存性(実測)



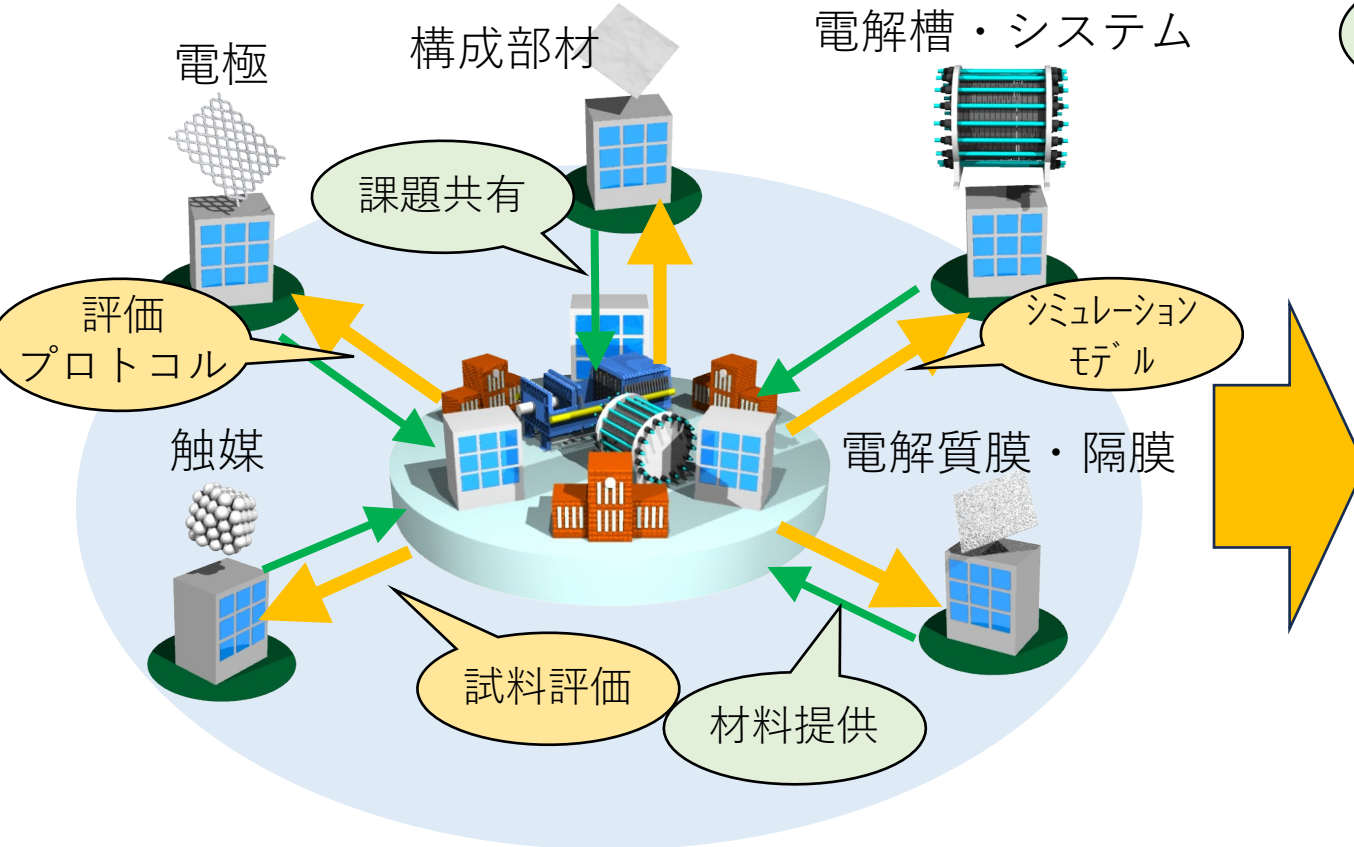
劣化速度(数式化)



劣化分布のシミュレーション結果

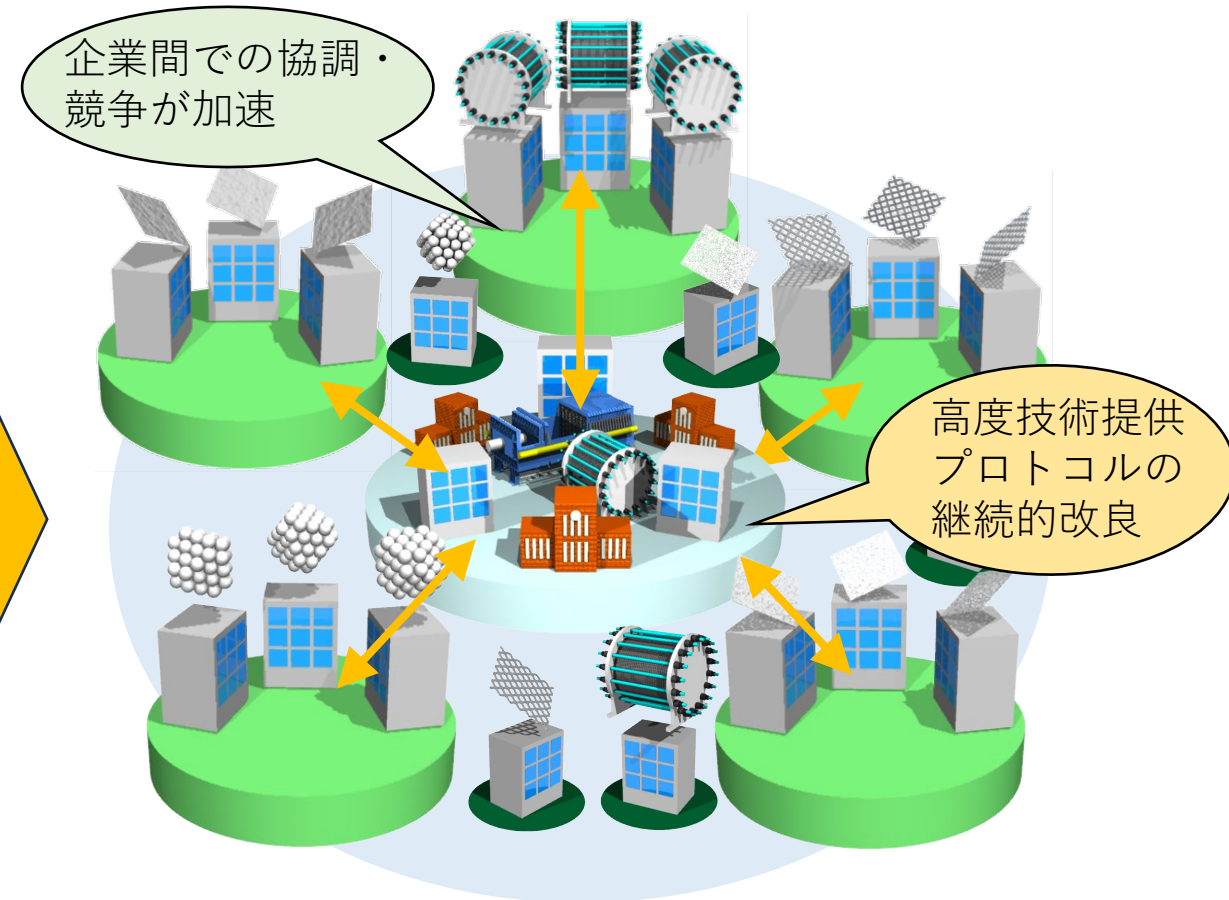
## 4. 今後の見通しについて

### 現在のプラットフォームの役割



- プロトコル活用、材料評価支援による開発加速
- 拡大研究開発推進会議による情報共有、横連携

### プラットフォームの将来像



- 産業界における企業間での議論の加速
- 協調領域の基盤としてのプラットフォーム実装