

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラム603-3-10

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／ 高温水蒸気電解評価解析プラットフォームの技術開発

発表：2026年7月23日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 堀田 照久 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

(一社)電力中央研究所、(国)東北大学、(国)東京大学、(国)京都大学、(国)九州大学

問い合わせ先 (国研)産業技術総合研究所 E-mail: t.horita@aist.go.jp TEL:050-3522-6520

事業概要

1. 期間

開始 : 2025年9月

終了(予定): 2030年3月

2. 最終目標

- ・高温水蒸気電解(SOEC)に特有の劣化要因とその機構解明をおこない、対策を提示
- ・長期運転に対応可能なSOEC性能評価法、劣化評価法、評価基準の提示とその確立
- ・複合劣化やマルチスケールシミュレーション等の高度な評価・解析法の確立

3. 成果・進捗概要

① マネジメントグループによるプロジェクト運営

プロジェクト推進・研究開発推進の定期的な会議開催、他プロジェクトの連携推進

② 運転評価・解析法の開発

標準的な長期試験法の提案、スタック劣化評価法、従来の性能評価法の整理

③ 劣化・耐久性評価法の開発

劣化機構解明、劣化予測のための機械学習、シミュレーション技術の高度化

④ 機械的信頼性評価の開発

SOEC部材・材料レベルの機械的データ、セル損傷のミクロレベル解析、スタック積層・運転時の機械的信頼性、シミュレーション技術の高度化

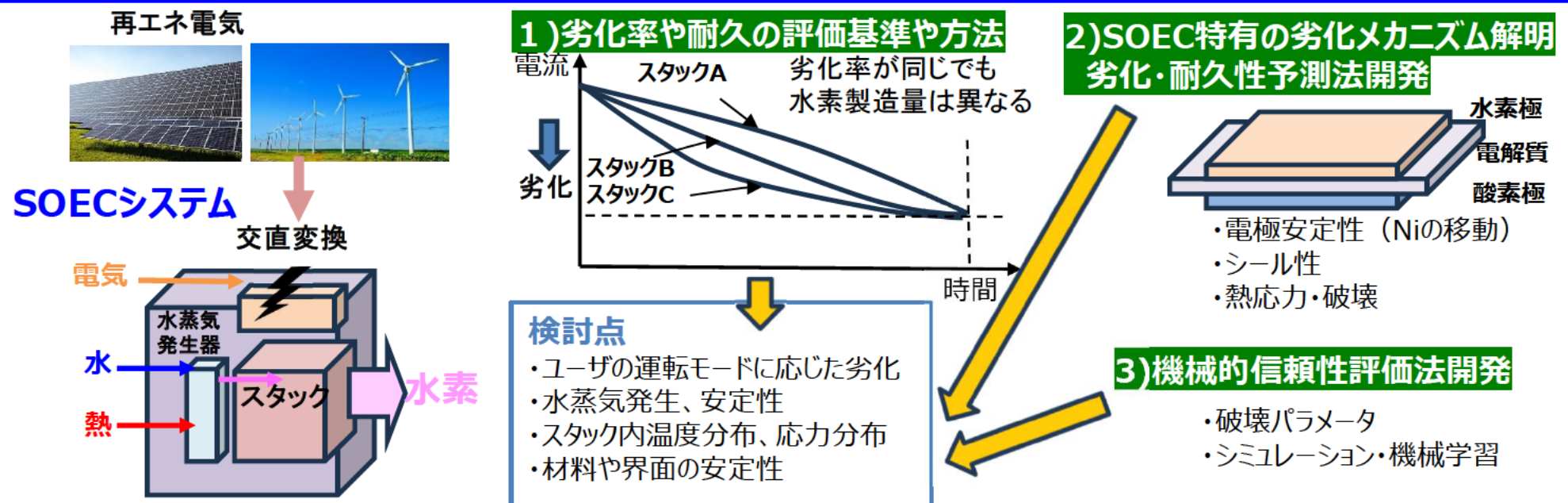
1. 事業の位置付け・必要性：背景と目的

背景と目的

高温水蒸気電解(SOEC)セルスタック及びシステムでの劣化メカニズムは不明な点があり、これを解明して高耐久化を図る。開発企業が使う性能評価法・劣化評価法について共通的に使える方法を開発し、産業競争力の維持と開発の加速に貢献する

解決しようとする課題とその意義

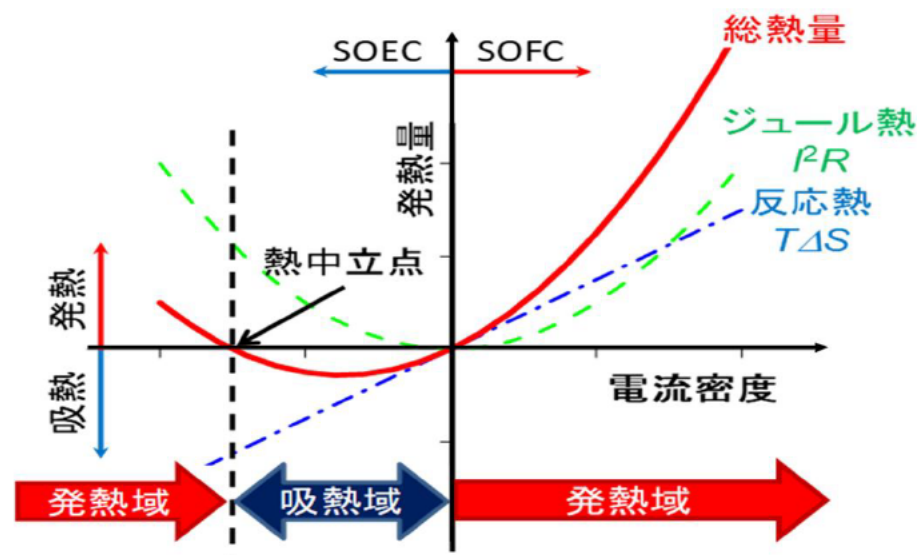
- 1)劣化率提示のための評価基準と予測法確立→経済的な水素コスト実現、電解技術の普及
- 2)特有の劣化メカニズムの解明と対策→部材の耐久性向上、長寿命化、機械的破壊の予見
- 3)長時間の劣化予測や複合劣化を考慮した予測法 →開発が容易に、加速化、競争力UP



1. 事業の位置付け・必要性：技術課題

- 高温水蒸気電解(SOEC)は作動電圧・電流で吸熱・発熱領域あり：運転条件最適化
- 劣化率表示に関する基準は不明確：標準となる劣化率の提示
- 評価解析プラットフォームの標準・参考となる評価法・解析法で産業競争力強化・開発加速

SOECでの電流密度と熱マネジメント



熱中立点からの運転開始と長期運転時の調整

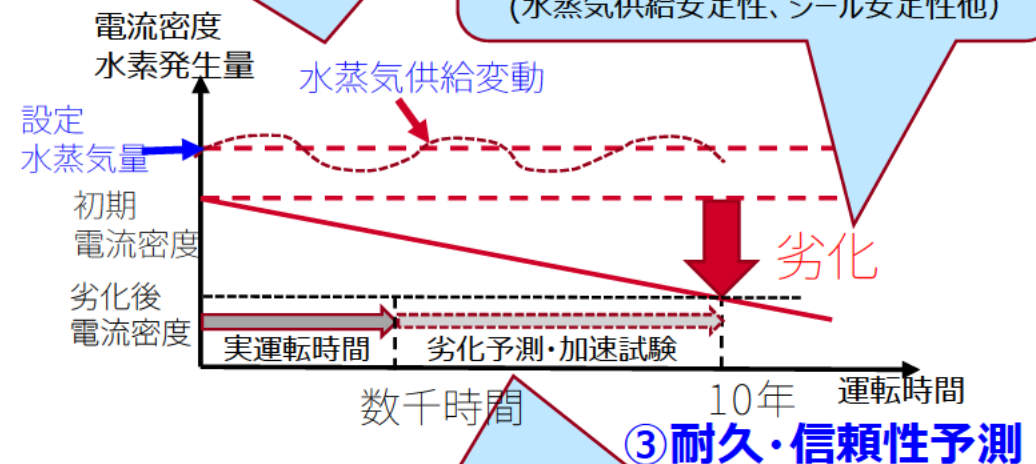
SOECでの劣化評価注目点

① ガスの性状

1. 水蒸気発生法(不純物も)
2. 水素発生量評価(シール含)

② 劣化率の評価

1. 劣化率の提示(例：評価項目提示)
(最適電圧、電流、温度、他)
2. 測定法・条件 (何%変化を受容か)
(水蒸気供給安定性、シール安定性他)



③ 耐久・信頼性予測

1. 数千時間運転(加速劣化の予測基礎データ)
2. 機械的信頼性：破壊・応力に関する基礎データ

適性な劣化率の表示、長期運転時の課題抽出

2. 研究開発マネジメント：目標

目標とその設定の考え方

目標：特有の劣化機構解明、長期寿命予測可能な評価法を確立

- 1) 高温、高電流密度、高水蒸気など、SOEC特有の作動条件での劣化機構解明
- 2) 性能評価法（電流、電圧一定での注意点、温度分布や応力分布）の確立
- 3) 劣化評価法の標準化
- 4) 寿命予測法の確立（シミュレーション、機械学習）

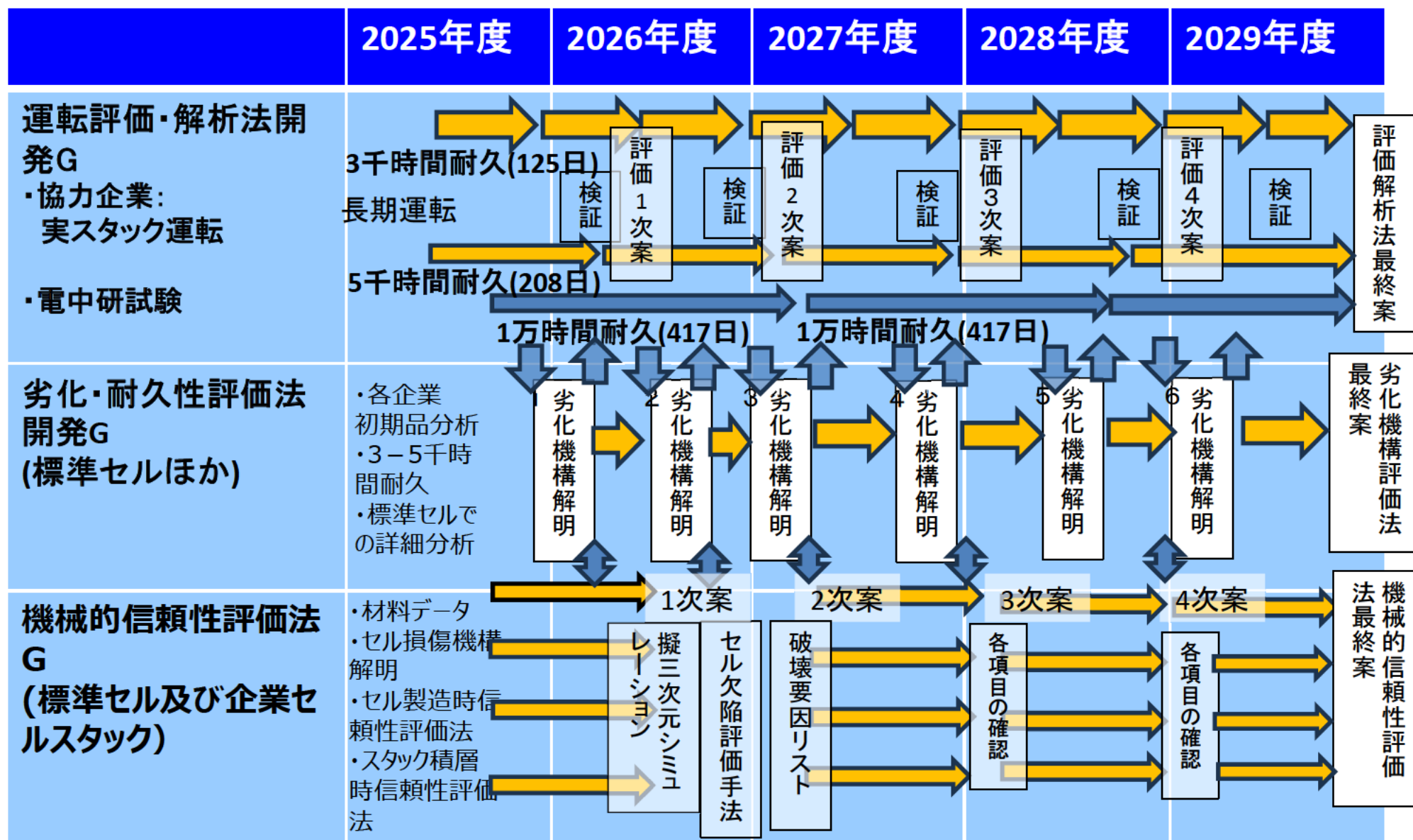
設定の考え方：SOFCで培った劣化評価法を応用・技術向上

- 1) システム開発、セルスタック開発企業、ユーザー、装置開発企業、アカデミアが結集して産学官連携でSOECの評価解析プラットフォームを形成
このプラットフォームで評価法の基準を示し、プロトコルとする。
国際標準（IEC, ISO）への技術データとして提供（産業競争力の維持）
- 2) 劣化大；高電流密度、強還元、吸熱・発熱域の存在
- 3) SOEC運転条件・劣化評価の方法やその評価基準が不明で基準を示す必要
- 4) 評価の基準を示すことで、開発の加速、性能の信頼性向上
（社会実装加速と産業競争力向上へ）

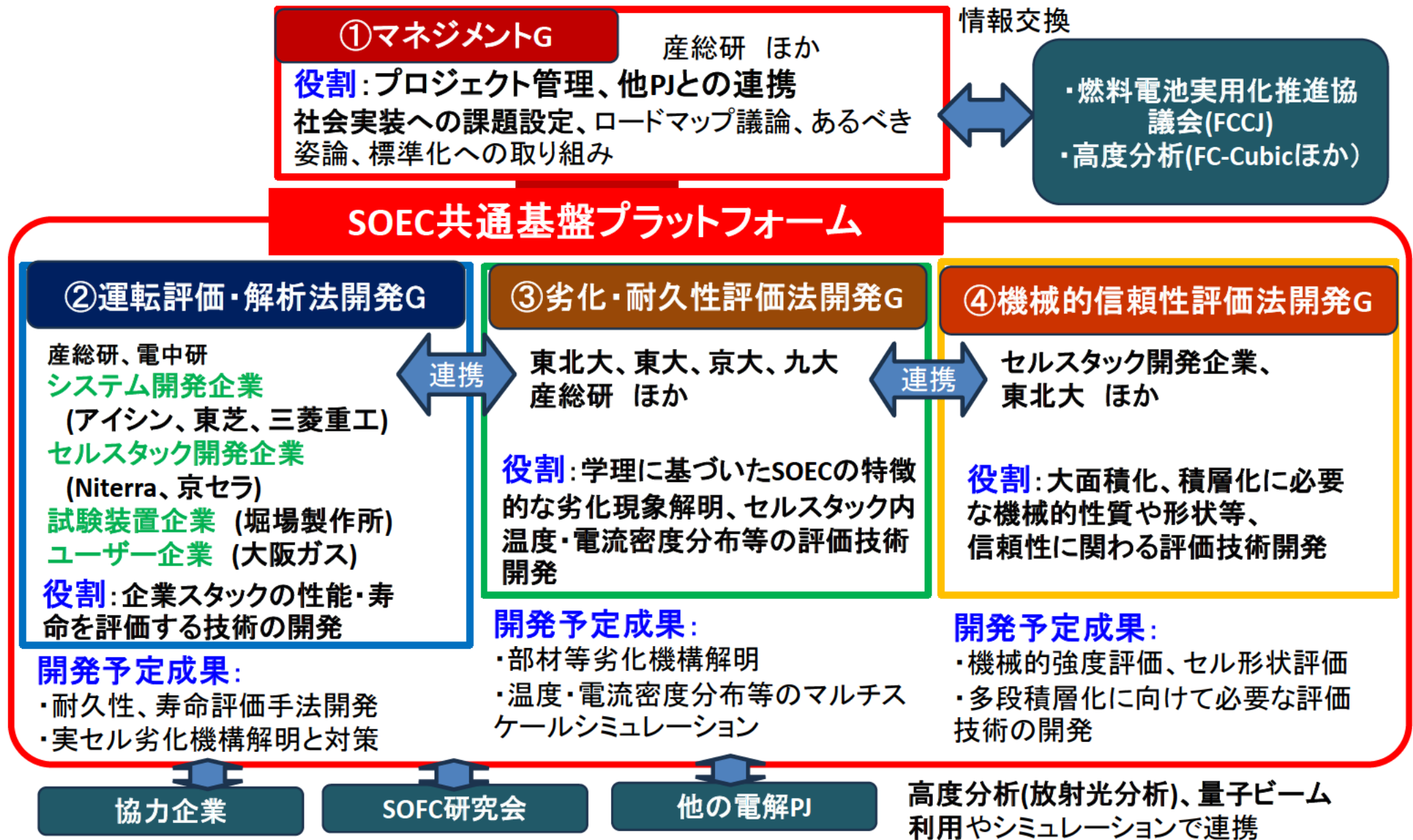
2. 研究開発マネジメント：スケジュール

評価試験設定→耐久→劣化分析→劣化評価検証 のサイクルを回す

(2027年度、2029年度までに何度か評価法案ができ、その検証を行いながら推進)



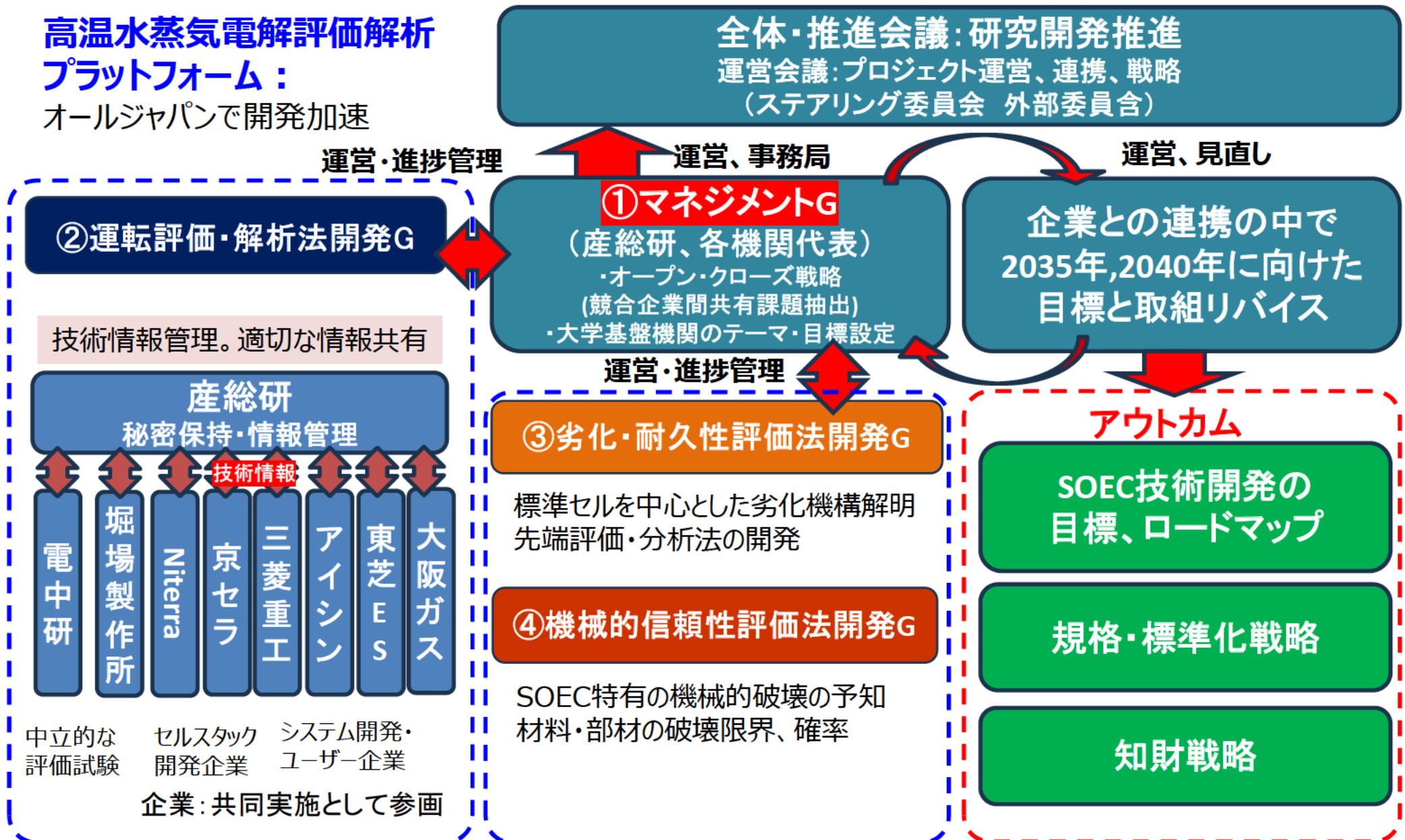
2. 研究開発マネジメント：実施体制



2. 研究開発マネジメント：実施体制

高温水蒸気電解評価解析 プラットフォーム：

オールジャパンで開発加速



3. 研究開発成果

各テーマの概要一覧を示す

項目	目標(2027年度)	達成状況	アプローチ	達成度
①マネジメントG	プロジェクトの研究開発推進・進捗管理、課題の整理	・全体会議等でのプロジェクト推進 ・プロトコルへの連携開始	・各テーマの進捗確認 ・参画企業との意見交換・方向性確認	○
②運転評価・解析法開発G	SOECスタック、システムの評価すべき項目と評価方法を提示	民間企業でのスタック試験に有効な劣化評価法の第1次案検討	・各社からのヒアリングで、参考にできる標準的な方法の提示	○
③劣化・耐久性評価法開発G	SOEC特有の劣化メカニズムの解明とその対策、長期寿命予測への基盤データを蓄積する	・劣化を予測する機械学習の高度化を開始 ・セルスタックシミュレーションの高度化を開始 ・Ni-YSZ電極でのNi凝集機構の解明を開始	・SOFCで培った高度な分析技術の展開 ・機械学習の高度化 ・シミュレーション技術の展開	○
④機械的信頼性評価法開発G	(1)材料のマクロ挙動解明 (2)材料劣化のミクロレベルからの解明 (3)セル製造時および(4)スタックとしての信頼性の課題の抽出とその評価・解析の手法の開発	・マクロ強度データの評価装置整備、集積の開始 ・ミクロレベルのセル損傷機構の測定法検討(マイクロカンチレバーなど) ・セル製造時、運転時の信頼性評価法の検討開始	・ワイブル統計を入れた破壊確率 ・新規評価法によるミクロレベルセル損傷解明 ・製造から運転までを含めた機械特性	○

3. 研究開発成果

①マネジメントG

目標:プロジェクトの研究開発推進・進捗管理、課題の整理

- プロジェクトの研究推進、参画メンバーとの情報共有、技術データ管理
- 他プロジェクトとの連携
- SOEC技術の社会実装に向けての意見・合意形成

1. 研究開発の進捗管理

●全体会議(推進会議)

2025年9月29日 第1回全体会議(キックオフ会議) 産総研臨海副都心センター

2026年3月26日ー27日 第2回全体会議 産総研つくばセンター

●テーマ会議

毎月1回程度: テーマごと、企業との打ち合わせ・情報交換

●コアメンバー会議

毎月1回 委託機関(大学・研究機関)の代表者による意見交換・情報交換

●ステアリング会議

適宜 PLとの意見交換会

2. 他事業との連携、目標設定と社会実装ロードマップの議論

- ・高度分析に関して 他事業と連携
- ・プロトコル作成 FCCJの活動と連携

3. 研究開発成果

②運転評価・解析法開発G

目標: スタック、システムの評価項目と方法を提示

- SOEC技術の使われ方の観点から、ユーザー企業、システム開発企業、セルスタック開発企業、装置開発企業の立場での劣化評価・解析法へのニーズ・必要性
- 評価解析法が社会実装に有効である議論や、評価法の妥当性・適用性
- 共通理解を形成するとともに、課題設定・評価方法の見直し・再設定

参画機関	セルスタック	開発項目	目標
電中研	燃料極支持平板形	耐久予測性能表示式、加速試験法	耐久予測、加速試験法確立
アイシン	燃料極支持平板形	長期耐久試験法、劣化機構解明	試験法適用、劣化機構解明
東芝ES	燃料極支持平板形	長期耐久試験法、劣化機構解明	試験法適用、劣化機構解明
三菱重工	円筒横縞形	長期耐久試験法、劣化機構解明	試験法適用、劣化機構解明
日本特殊陶業	燃料極支持平板形	長期耐久試験法、劣化機構解明	試験法適用、劣化機構解明
京セラ	筒状平板形	長期耐久試験法、劣化機構解明	試験法適用、劣化機構解明
堀場製作所	燃料極支持平板形	長期耐久試験法、評価装置開発	高性能評価装置の提供
大阪ガス		SOECシステムの適用性評価	SOECの最適運転・価値明示

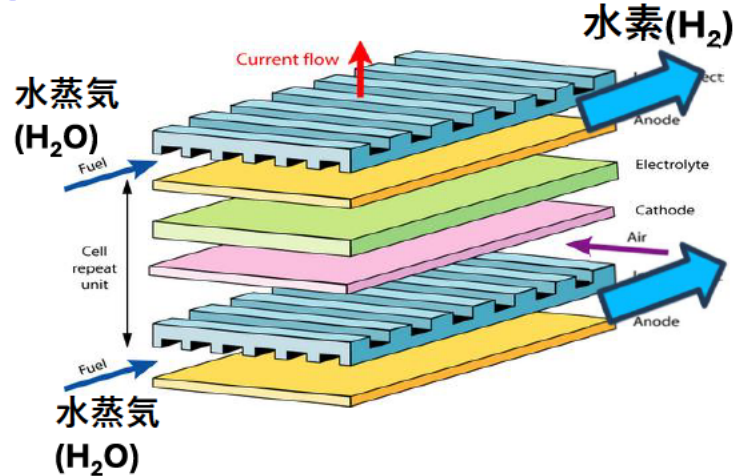
3. 研究開発成果

②運転評価・解析法開発G

目標: スタック、システムの評価項目と方法を提示

数種類の実用SOECセルスタックの運転を通じて、性能・劣化評価法の開発

(a) 平板形スタックの概念図



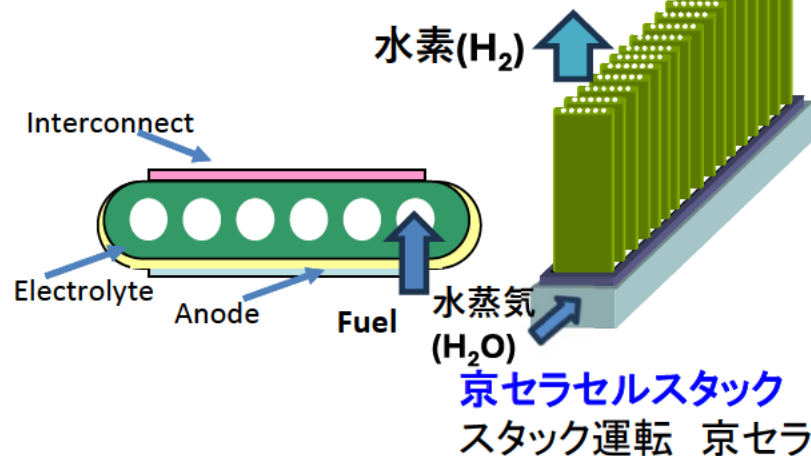
(b) 平板形 燃料極支持型



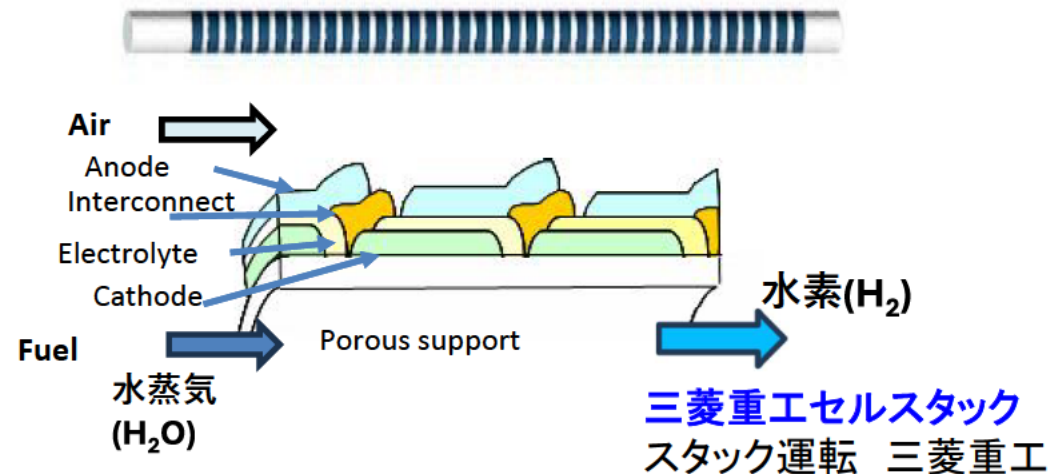
日本特殊陶業セルスタック

- スタック運転(システム模擬)
 - ・アイシン
 - ・東芝
- スタック運転(条件設定)
 - ・日本特殊陶業
 - ・電中研
 - ・堀場製作所
 - ・産総研

(c) 筒状平板形スタックの概念図



(d) 筒状横縞形スタックの概念図



3. 研究開発成果

②運転評価・解析法開発G

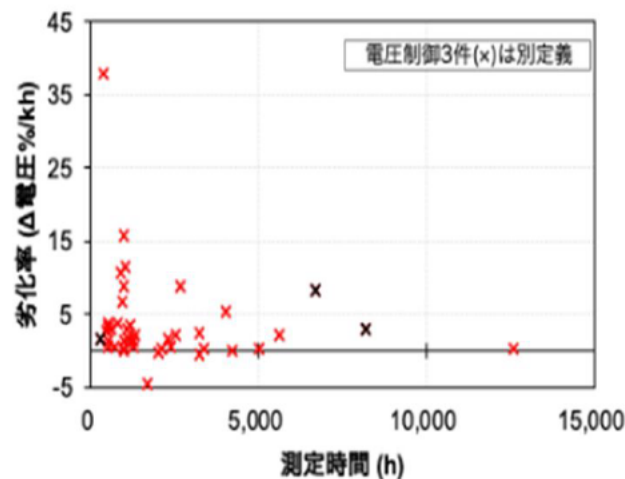
目標: スタック、システムの評価項目と方法を提示

ア) SOEC評価法適用性検討 (プロトコル構築への予備検討)

イ) 実用ホットモジュール・セルスタックの評価法開発

- これまでのSOECスタック・システム運転の調査と参画企業の意見聴取
- 共通とすべき評価指標、運転方法などの整理

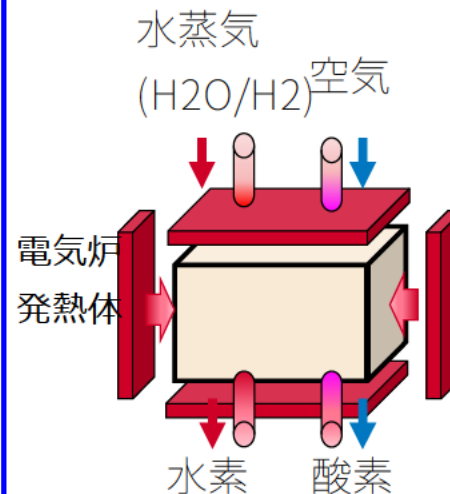
文献調査による劣化率



- ・最長試験は1-2万時間程度
- ・電流一定で電圧上昇を劣化とする
- ・燃料極支持、電解質支持型のセルスタック検討

長期耐久と劣化率表示：電気炉試験での注目点

電気炉内試験



セルスタック測定上の注意点

- 1) 導入ガス余熱：水蒸気/水素が設定温度か
標準条件例 H₂O/H₂=90または80で800°C、750°C
- 2) 利用率：電流密度、設定電圧、温度で
標準条件例 利用率70-90% 1A/cm²、1.3V
- 3) 断熱条件：スタックの熱容量（IC熱伝導度、スタック熱伝導度）とスタック壁面と電気炉壁面間での熱出入
- 4) セルスタック内の電流・温度分布：セル面内、スタック内の分布あり。どのレベルまでを示すのが適切か
- 5) 劣化の表示：設定温度での電流減少、電圧上昇などで劣化を観測。劣化率として抵抗増大で示すべきか

3. 研究開発成果

②運転評価・解析法開発G

目標：SOECスタック、システムの評価すべき項目と評価方法を提示

ウ)スタック性能評価共通基盤技術及び加速試験法の開発（電中研）

- スタックの抵抗成分分離法の開発
- これまでのSOFCスタック運転評価法を展開：SOEC特有の課題を注意

表 耐久試験におけるセルスタック性能評価法および特性評価法

	取得タイミング	評価	劣化指標
性能評価法	(電流規制下) 短期試験:500h 長期試験:1000h	・SOEC性能表示式による性能評価 ・劣化要因毎の経時変化	性能要因毎の変化率
特性評価法	日毎(電流規制下)	セル電圧の経時変化	セル電圧変化率
	週毎(電流規制下)	面積固有抵抗(ASR: Area Specific Resistance) (交流インピーダンス法による取得)の経時変化	ASRの変化率
	(電流規制下) 短期試験:500h 長期試験:1000h	セル電圧の温度依存性	温度毎にセル電圧変化率
	(電圧規制下) 短期試験:500h 長期試験:1000h	熱中性電圧での電流密度の温度依存性	温度毎に電流密度の変化率

$$V_{EC} = E_{EC} + \eta'_{ne} + \eta'_{ir} + \eta'_c + \eta'_a$$

$$= E_{EC} + \eta'_{ne} + (R'_{ir} + R'_c + R'_a) \times J$$

$$E_{EC} = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \quad \text{ネルンストの式}$$

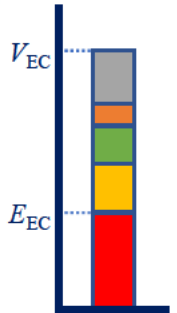
SOECに適用される各電極反応抵抗式

$$R'_c = c'_0 \times P_{H_2}^{\alpha'} \times P_{H_2O}^{\beta'}$$

$$R'_a = a'_0 \times P_{O_2}^{\beta'}$$

- η'_{ne} : ネルンストロス
- η'_a : 酸素極過電圧(酸素極反応抵抗: R'_a)
- η'_c : 燃料極過電圧(燃料極反応抵抗: R'_c)
- η'_{ir} : 内部抵抗ロス(内部抵抗: R'_{ir})
- E_{EC} : 開路電圧、 E° : 標準起電力

V_{EC} : セル電圧、 J : 電流密度、 a'_0, c'_0 : 抵抗パラメータ



3. 研究開発成果

②運転評価・解析法開発G

目標: スタック、システムの評価項目と方法を提示

エ) スタック性能評価試験機による妥当性検討(堀場製作所、産総研)

中間目標(2027年度): エ) SOEC評価装置を用いて耐久試験・性能試験を行う上で、**測定精度に大きな影響を与える要因を抽出し、改善策**を示す。



堀場製作所設備



日本特殊陶業
(SOEC供給)



産総研設備

- SOEC性能評価方法検討: 試験条件に準じた熱中性電圧(V_{th})を断熱条件で試算
 V_{th} (V)

U (%)	700℃	750℃	800℃	850℃
95	1.283	1.285	1.286	1.288
90	1.283	1.285	1.286	1.288
85	1.283	1.285	1.286	1.288
80	1.283	1.285	1.286	1.288
75	1.283	1.285	1.286	1.288
70	1.283	1.285	1.286	1.288
65	1.283	1.285	1.286	1.288
60	1.283	1.285	1.286	1.288

90% H_2O/H_2 , Air等流量供給で断熱条件の場合、水蒸気利用率に依存せず、温度により熱中性電圧は若干変化し、**1.285 V付近**と試算

3. 研究開発成果

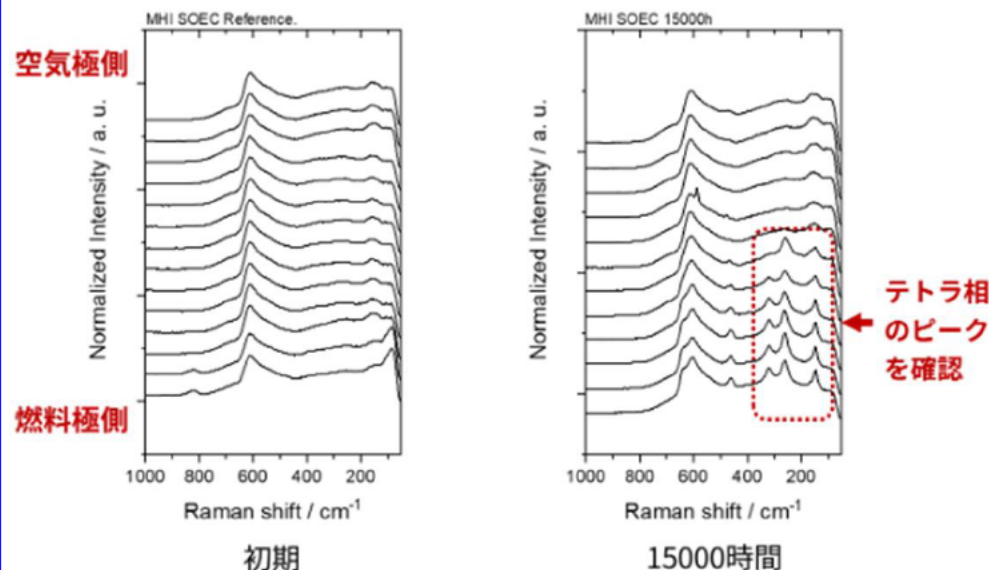
② 運転評価・解析法開発G

目標: SOECスタック、システムの評価すべき項目と評価方法を提示

オ) 実用セルスタック解体分析と適用性検討

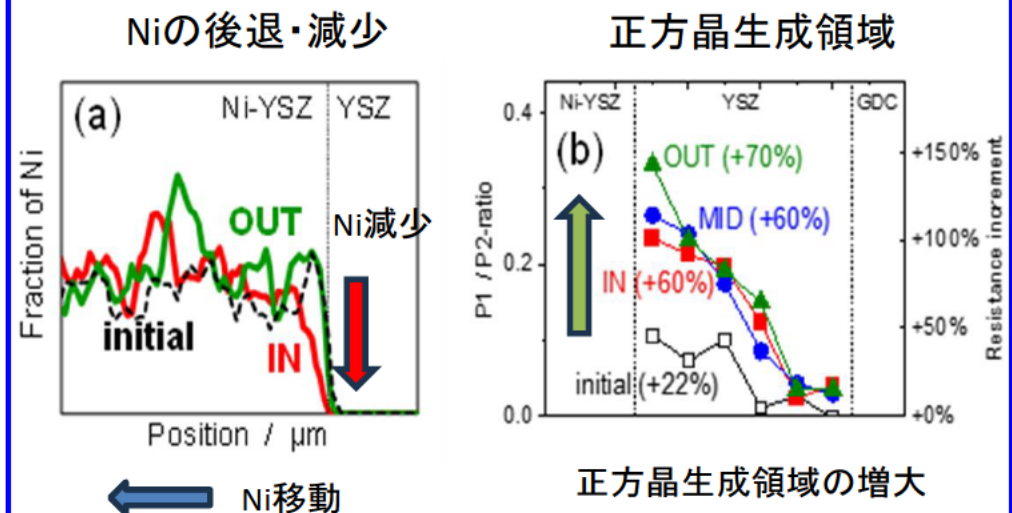
- 企業で運転した実用スタックの解体分析: 個別劣化メカニズムの解明
- 個別課題と標準セルでの解析を連携させて、寿命予測に展開

三菱重工セルでの相変態



長期運転でYSZ電解質の正方晶化進む
⇒ 直流成分抵抗増大に影響

日本特殊陶業セルでのNi移動・相変態



Ni-YSZ電極中のNiの移動(a)とYSZ中の相変態(b)
⇒ 直流成分の抵抗増大と過電圧増大に影響

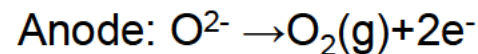
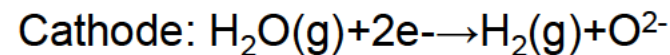
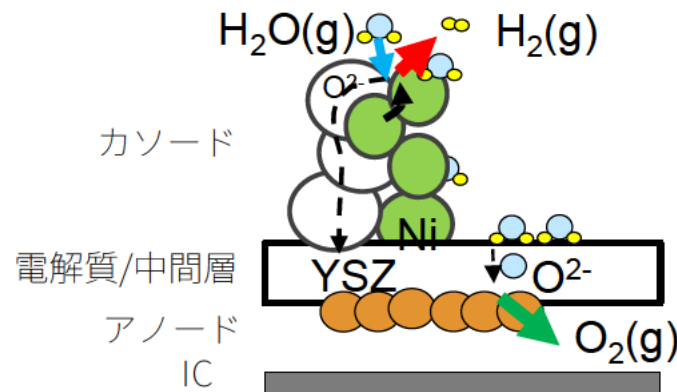
3. 研究開発成果

③劣化・耐久性評価法開発G

目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

セルレベルでの劣化要因と解析：SOFCでの解析を転用可能

部位・材料	劣化要因	メカニズム	分析方法
カソード・Ni-YSZ	Ni移動と微構造変化	TPBでのNi減少、電場効果の駆動力	SEM, FIB-SEM接触角
	Ni凝集・飛散	水蒸気によるNi(OH)(g)生成	SEM, TEM
	不純物被毒	例: Siなどによる被毒	SEM、TEM
電解質	相変態	立方晶→正方晶による伝導度低下	ラマン分光
	固溶体生成	CeのZrO ₂ への拡散	ラマン分光、SEM
中間層/電解質解明	絶縁層生成	SrZrO ₃ の生成	SEM、TEM
アノード・空気極	不純物被毒	例: Crによる被毒	SEM、TEM
インターコネクト	酸化皮膜・不純物生成	皮膜の電気伝導低下、Cr蒸気の生成	SEM、TEM



3. 研究開発成果

③劣化・耐久性評価法開発G

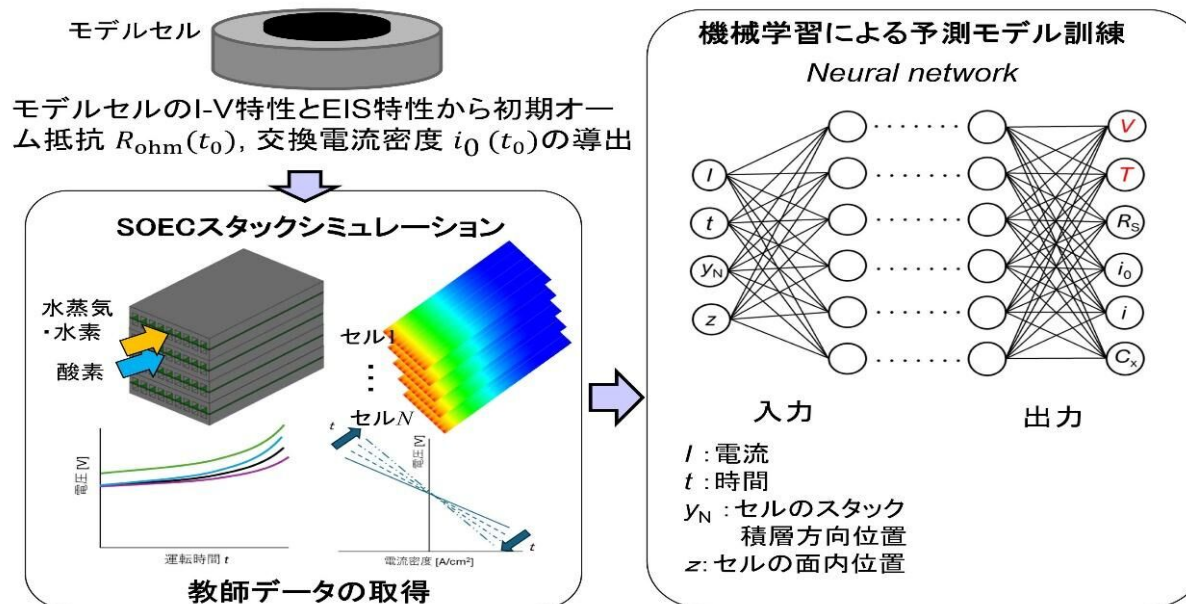
目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

■開発項目

- ア) DX 技術を活用した高度劣化予測技術・高度分析技術の開発
(担当: 東京大学、京都大学、産業技術総合研究所)
- イ) スタックシミュレーション技術開発
(担当: 京都大学、東北大学、産業技術総合研究所、電力中央研究所)
- ウ) 水素極の劣化機構解明 (担当: 産業技術総合研究所、京都大学、東京大学)
- エ) 酸素発生極関連の劣化現象解明 (担当: 産業技術総合研究所、東北大学)
- オ) SOEC金属部材の安定性評価技術の開発(担当: 九州大学 (日本製鉄株式会社))

ア)DX技術を活用した高度劣化予測技術の開発

PINNによるSOECスタック劣化要因の評価方法 1



機械学習によりSOECセルスタックの劣化予測を迅速に行う手法を開発

3. 研究開発成果

③劣化・耐久性評価法開発G

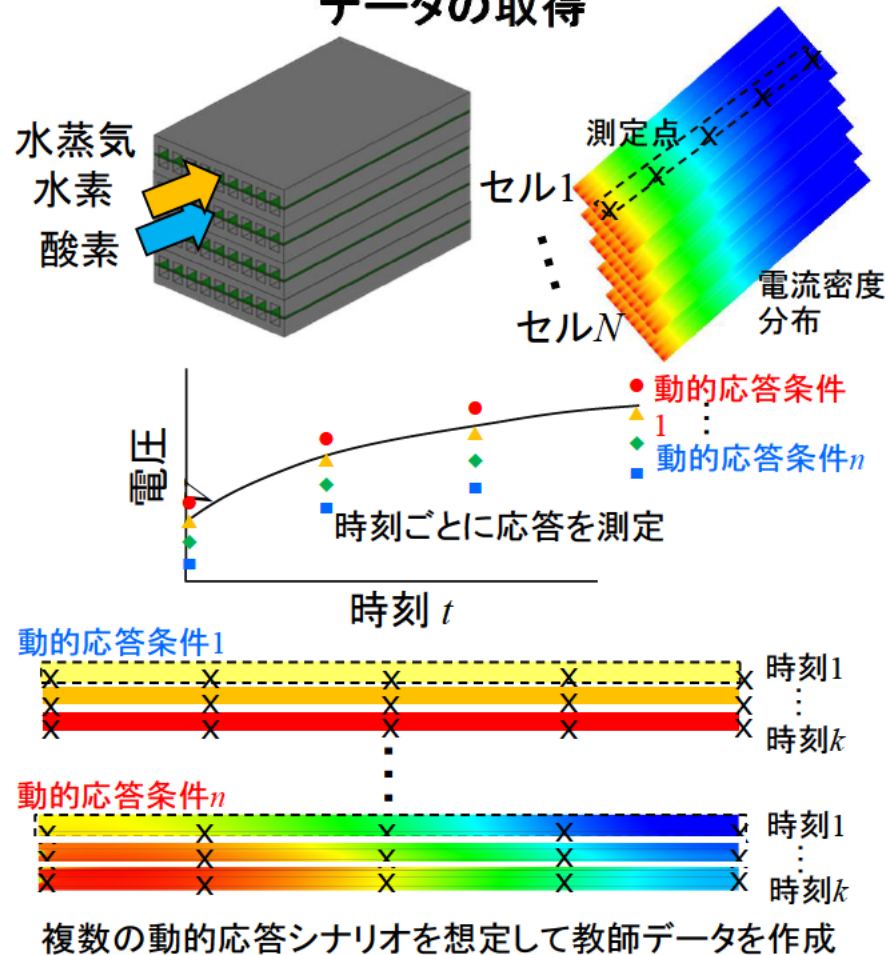
目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

ア) DX技術を活用した高度劣化予測技術の開発

Physics Informed Neural Networks (PINN)を用いた

計測が容易な変数によるSOECスタック劣化因子のモニタリング (東大)

数値シミュレーションによる教師
データの取得

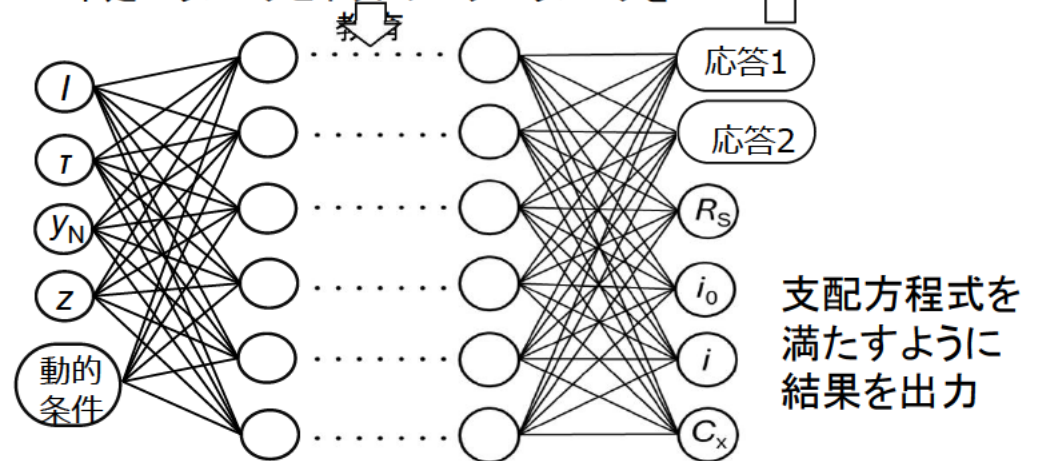


動的応答からオーム抵抗と分極抵抗を同定

PINNの損失 = 教師データ (V と T の応答) との誤差
+ 出力変数が満たすべき支配方程式の残差

教師データと支配方程式を満たすように、
未定パラメータとネットワークパラメータを

支配方程式
境界条件、
初期条件



入力

I : 電流
 T : 運転時間
 y_N : セルのスタック
積層方向位置
 z : セルの面内位置

出力

応答 n :
 R_s : オーム抵抗
 i_0 : 交換電流
 i : 電流密度分布
 C : 濃度分布

3. 研究開発成果

③劣化・耐久性評価法開発G

目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

ア) DX技術を活用した高度劣化予測技術の開発

2025年度成果 (京大)

- 電極多孔質構造のPersistent Homology (PH) 位相情報解析から、構造を特徴づける低次元量の抽出手法構築
- 位相情報に対して主成分分析 (Principal component analysis: PCA) 適用し、構造情報のさらなる低次元化達成
- 低次元の構造特徴量から電極性能を予測する機械学習モデルを構築し、性能予測に成功

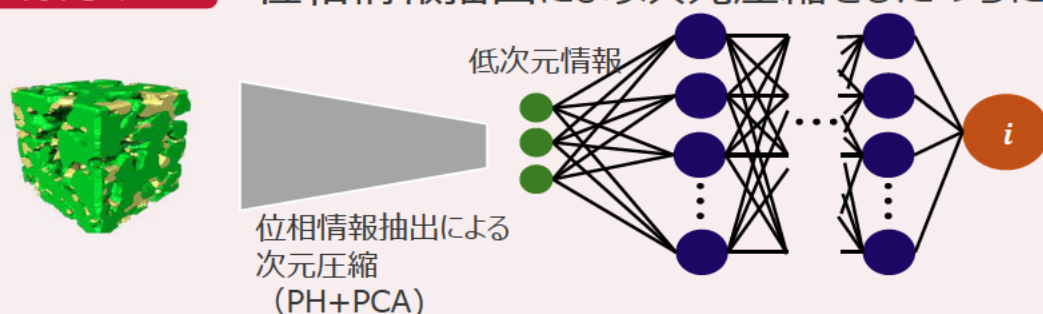
電極構造の潜在特徴量抽出

電極構造の位相情報を抽出し、性能予測を行った。

NNへの入力情報の低次元化により、NNのスリム化が可能
→ 訓練データ数や計算資源の節減が期待できる。

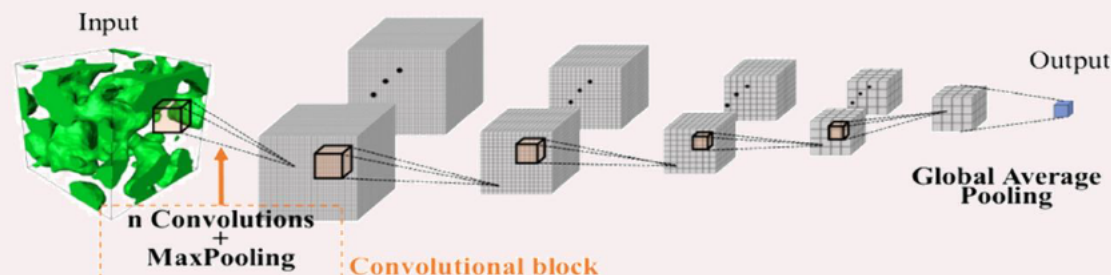
提案手法

位相情報抽出により次元圧縮をしたのちにNNに入力

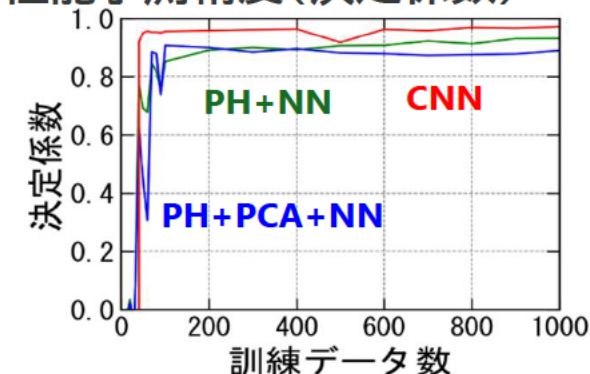


従来手法

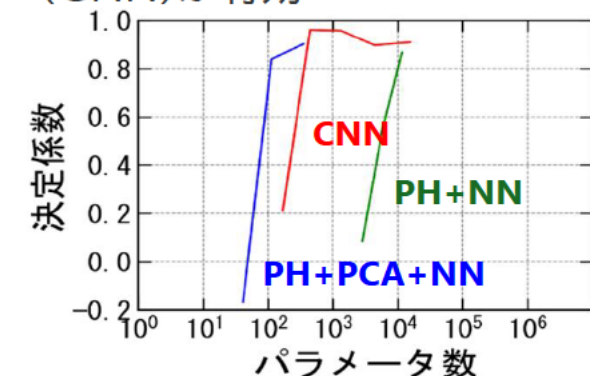
構造情報をそのままCNNに入力



性能予測精度 (決定係数)



計算資源が豊富な場合は従来手法
(CNN)が有効



訓練データ数や計算資源に制約が
ある場合、提案手法に優位性

3. 研究開発成果

③劣化・耐久性評価法開発G

目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

- SOFCセルスタックの劣化評価での成果をSOECに適用
- SOEC特有の劣化パラメータの導入とNiの凝集、移動現象メカニズムの解明
- 劣化に及ぼす不純物の影響の解明

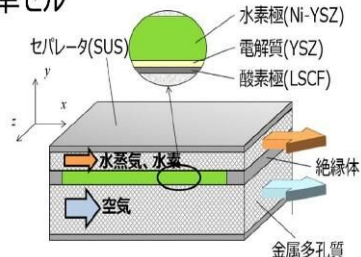
イ) スタックシミュレーション開発

中間目標 (2027年度)

イ) SOFC用に開発したコードをSOEC用への展開を完了し、運転条件等が内部の物理量分布におよぼす影響を明らかにする。また、単一要素起因の劣化モデルを組み込み、内部物理量分布に基づき、劣化リスク領域を予測する。(京都大学・東北大学)

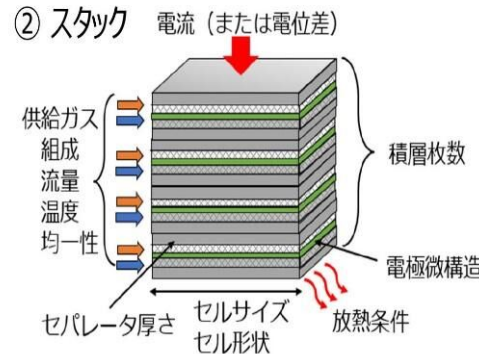
SOFC用コードのSOECへの展開

① 単セル



運転条件: 温度、利用率、熱的境界条件
内部物理量: 温度、ガス分圧、電流密度

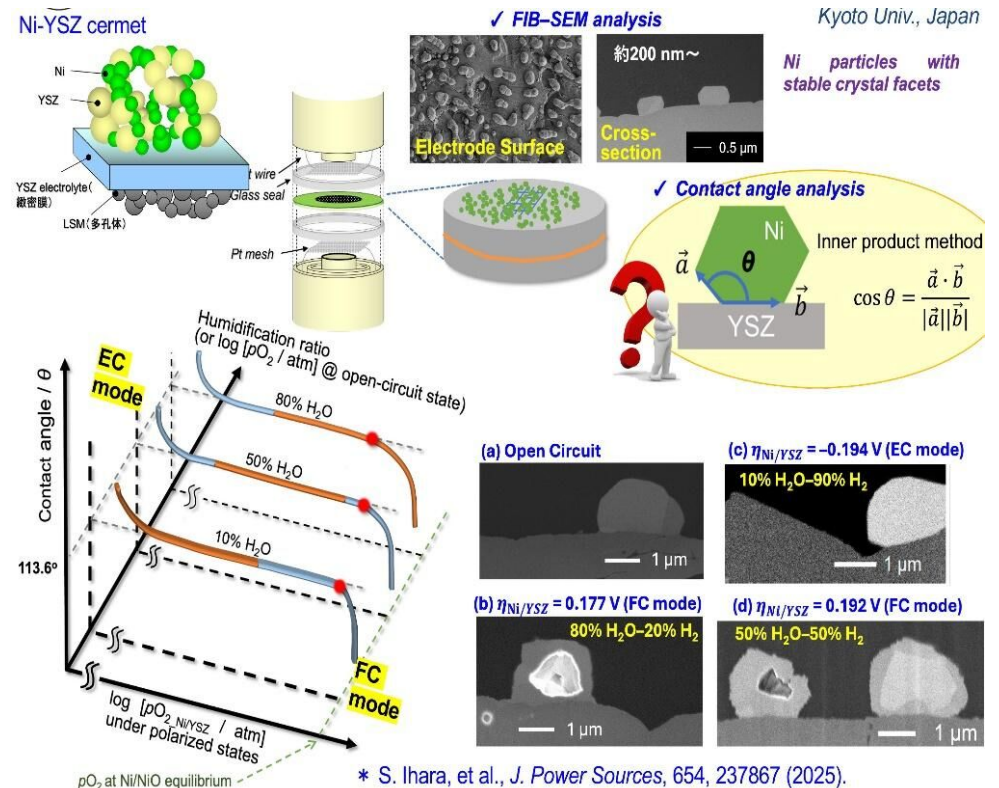
② スタック



単一要素起因の劣化モデル

現時点では電解質相変態モデルの適用を予定
水素極、特に下流域での還元雰囲気の影響 (劣化リスク)

ウ) 水素極の劣化機構解明



3. 研究開発成果

③劣化・耐久性評価法開発G

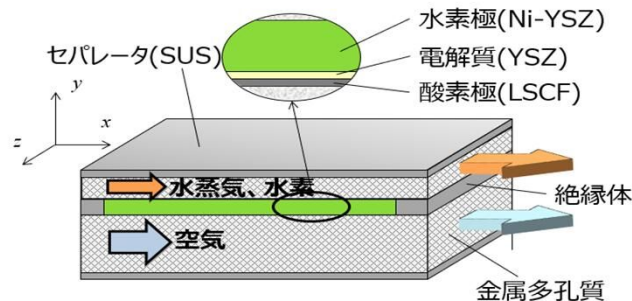
目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

イ) スタックシミュレーション開発

2025年度成果 (京大)

- 擬三次元SOFCコードを改変、水素-水蒸気系で作動するSOECの単セルシミュレーションコード整備
- 劣化モデルのうち、SOECへの適用可能性のあるものを精査、YSZ相変態モデルを組み込み
- YSZ相変態を伴うSOEC単セル劣化シミュレーションの試計算を実施し、整合性のある計算結果

SOFC単セルコードのSOECへの展開

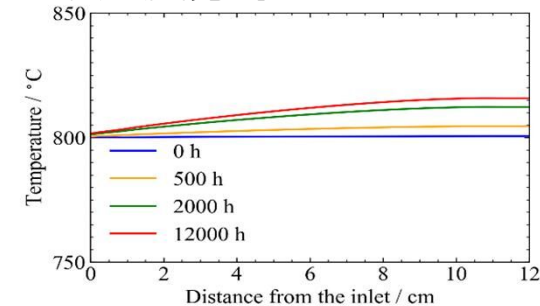


- 入口ガス組成: (水素極) $H_2:H_2O = 0.10:0.90$
(空気極) $O_2:N_2 = 0.21:0.79$
- 入口ガス温度: 800 °C
- 燃料利用率: 75 %, 空気比: 0.50 (出口で酸素が1.5倍に)
- 平均電流密度: 1000 mA cm⁻² ※初期状態で熱中立
- 完全断熱

YSZ相変態モデルの適用

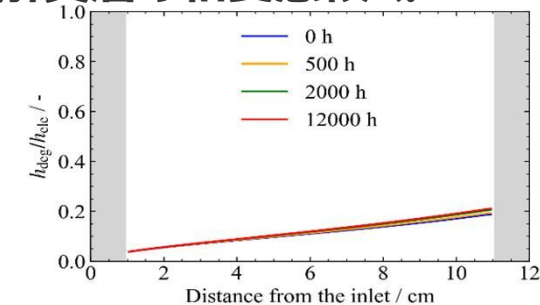
還元雰囲気下でYSZが立方晶から正方晶へ相変態
電解質層、Ni-YSZ水素極中の電解質
FCの劣化シミュレーションで使用したモデルを適用

PENの温度分布



劣化に伴う損失（発熱）の増加により
時間経過とともに下流で温度上昇

電解質層の相変態領域



還元雰囲気が強い下流で相変態領域が広い
(上流で相変態領域が広いFCとは逆)

3. 研究開発成果

③劣化・耐久性評価法開発G

目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

ウ) 水素極の劣化機構解明

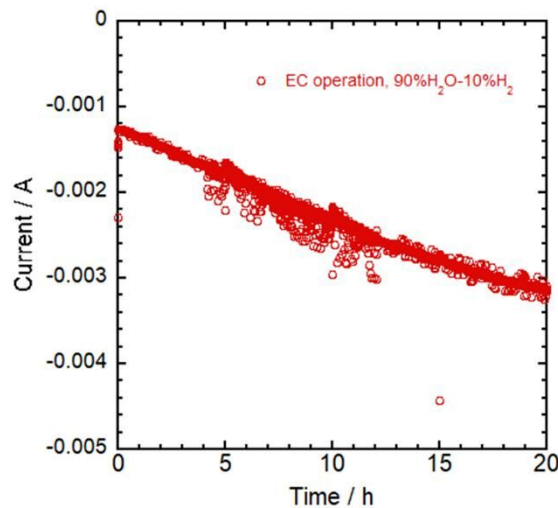
SOEC特有の劣化機構解明

2025年度成果 (京大)

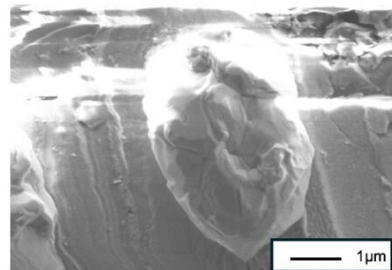
- Ni-YSZ サーマット燃料極での劣化とNi移動・凝集の劣化メカニズム解明・基礎データ集積
- Ni-GDC電極での安定性や特異なNi移動について考察
- Ni-燃料極の移動メカニズム、安定性の総合的理解と仮説を検討

✓ Ni/Oxide接触角解析

Ni/YSZ system: 90% H₂O-10% H₂
EC mode, 20 h operation @ 1000°C



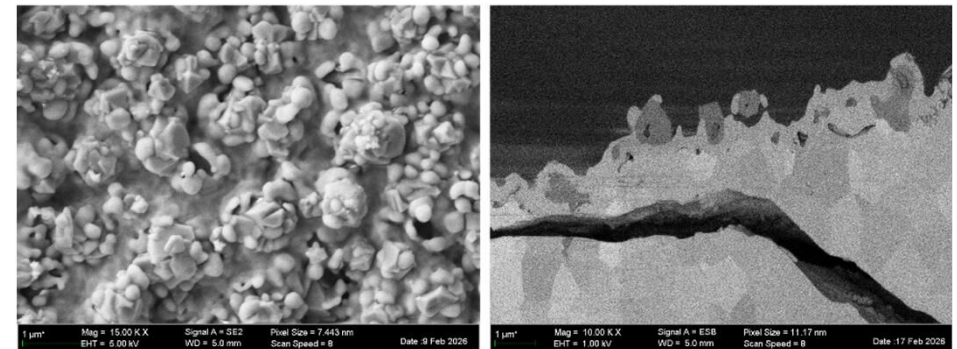
$\theta = 99.5 \pm 10.0^\circ$
(OCV保持: $\theta = 113.6^\circ$)



高加湿環境下ECモードにおけるNi/YSZ接触角解析
接触角がOCV時と比較して減少傾向。

✓ Ni/GDC電極の形態変化

Ni/GDC system: 90% H₂O-10% H₂
Annealing 20 h @ 1000°C



高加湿環境下で熱処理で、Ni粒子上をGDCが被覆
加湿量・時間に依存する現象であることを見出した。

3. 研究開発成果

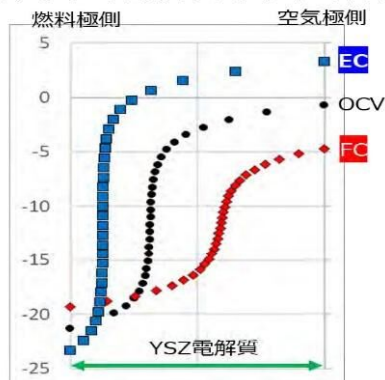
③劣化・耐久性評価法開発G

目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

エ) 酸素発生極関連の劣化現象解明

空気極性能に対する過電圧の影響評価

電解質中の酸素ポテンシャル分布計算



SOFCとSOECでは、電解質/空気極界面での
酸素ポテンシャルが大きく異なる
SOFC: 還元側 SOEC: 高圧側

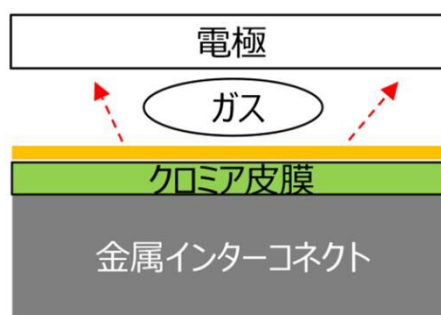
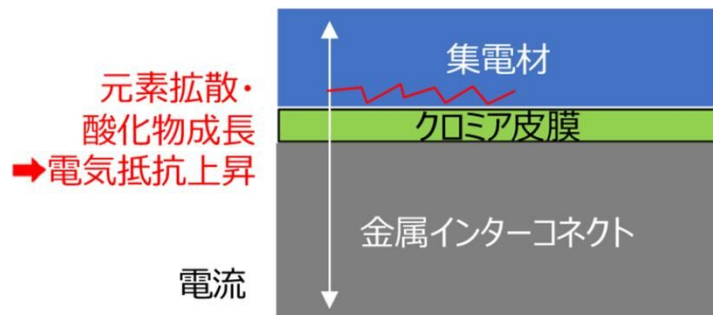
動作中のイオンの流れ



SOFCとSOECでは空気極における電極反応、イオンの流れが真逆
SOFC: 酸素の吸着、解離、イオン化→取り込み
SOEC: 酸化物イオンの湧き出し→酸素原子の会合、離散

酸素ポテンシャルに影響を受ける物性、劣化モードが
FCとECでは大きく異なってくることが想定される

オ) 金属部材の安定性評価技術の開発



Cr等の
元素の拡散
→電極の性能低下

クロミア皮膜の
安定性が重要

3. 研究開発成果

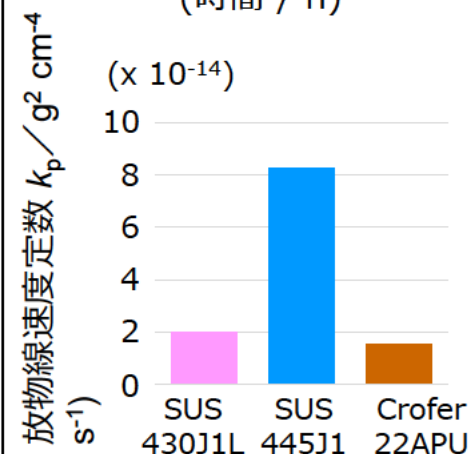
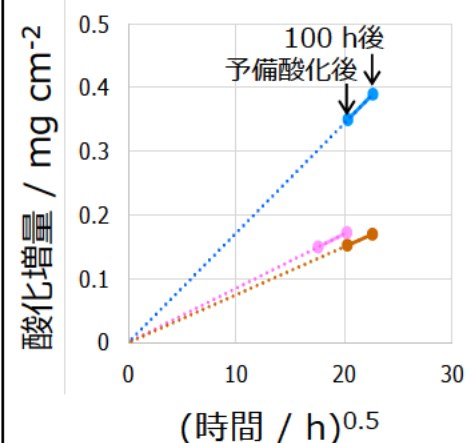
③劣化・耐久性評価法開発G

目標: SOEC特有の劣化メカニズム解明・対策、
長期寿命予測への基盤データ蓄積

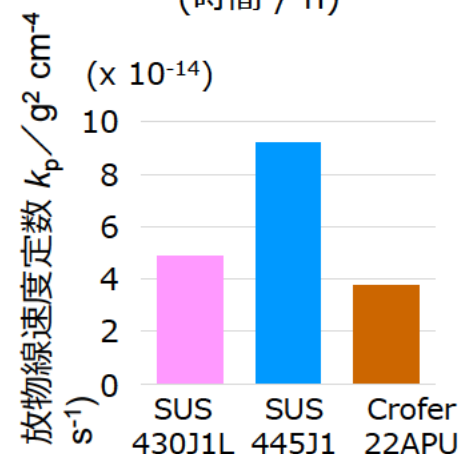
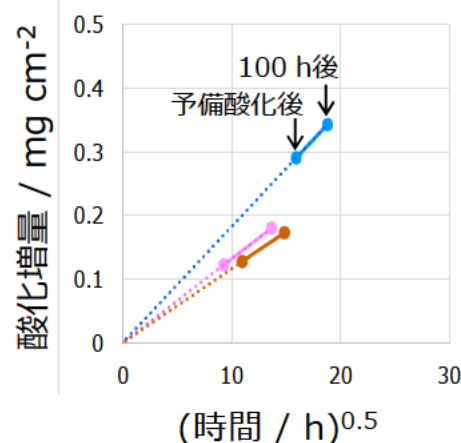
才) 金属部材の安定性評価技術の開発

- SOEC環境下でステンレス・モデル材の酸化挙動を評価し、劣化率の温度、ガス組成依存性のデータを取得。
- 皮膜/合金界面にSi濃集層が成長するものの導電性を維持するSUS430J1Lについて、界面構造を詳細に分析し予備酸化後（耐久前）のCr酸化物の結晶性が低いこと明らかにした。

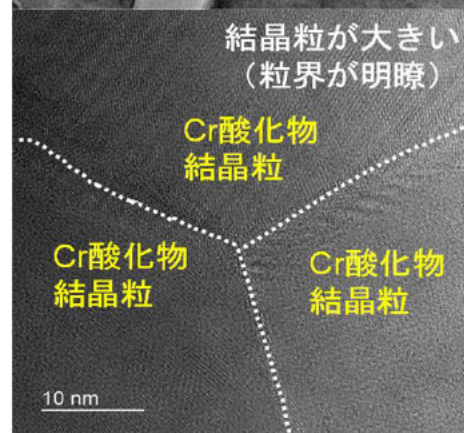
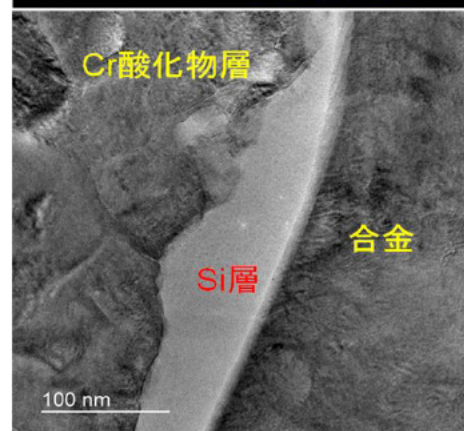
800℃, Dry Dir



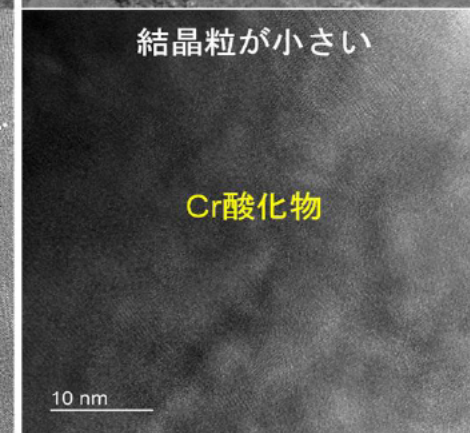
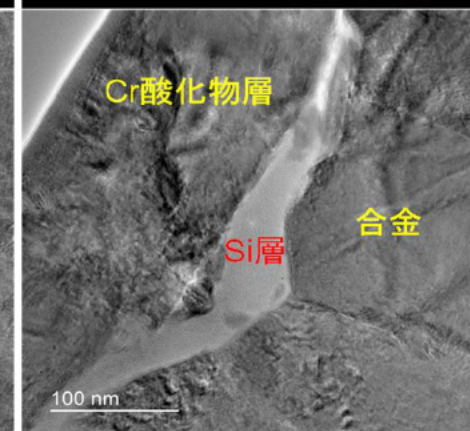
800℃, 50% H₂O-50% H₂



SUS430 予備酸化後



SUS430J1L 予備酸化後



SUS430 (左) およびSUS430J1L (右) の900℃-2 h予備酸化後の表面酸化皮膜／合金界面の高分解能分析

3. 研究開発成果

④機械的信頼性評価法開発G

目標:SOEC材料、セルスタックの機械的な性能解明

研究開発項目4：機械的信頼性評価法の開発グループ!全体構想"

SOFC研究での知見の蓄積

- ⇒ 材料物性値の取得
 - ⇒ 応力分布の計算
 - ⇒ 破壊のリスクの推定
 - ⇒ 実験による検証!
- の手法を開発してきた。

基礎物性取得

熱・化学膨張
熱伝導
物質輸送
弾性率

シミュレーション手法開発

! '# \$ % & '
代理・代替モデル

試験装置開発

熱分布制御過
酷試験

未解明の現象

破壊強度・
破壊機構

破壊強度の温度・雰囲気依存性
破壊機構
長時間使用の影響
通電の影響
積層体としての強度

新たな課題

大出力化で厳しい信頼性要件
(セルの大型化・
スタックの多層化)
変動電力・可逆運転
大電流運転

SOEC 特有
の動作

短期・長期信頼性の確保に向けて、基礎に立ち戻ってアプローチ(実セル・モデルセル)

- ア) 構成材料基礎物性データベースの開発.....マクロ強度データの取得・整理!"東北大#
- イ) セル損傷機構の解明.....ミクロ試験・観察による破壊機構の解明!"東北大・東大・横国大・慶大#
- ウ) セル製造時信頼性評価手法の開発.....「セル」作製時の実用的課題の解決"東北大・東大・千葉工大#
- エ) スタック積層時信頼性評価手法の開発.....「スタック」作製時の実用的課題の解決"東北大・京大・慶大#

3. 研究開発成果

④機械的信頼性評価法開発G

目標: SOEC材料、セルスタックの機械的な性能解明

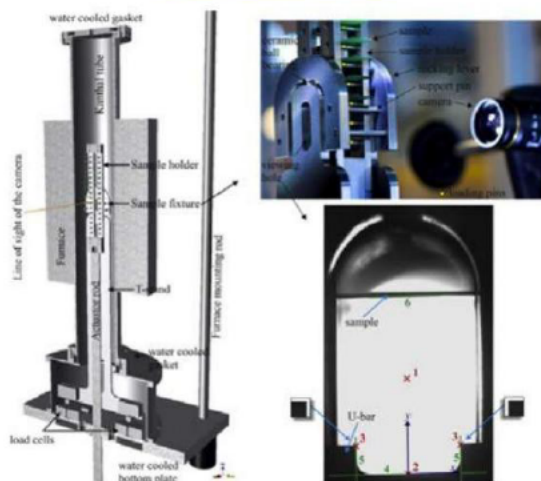
ア) 構成材料基礎データベースの構築

マルチ試料高温環境強度評価装置の開発

N数増=>昇温3h-6h、定常状態2-3h

降温4h-8h=>1試験9h-17h=>5個/週

破壊強度のワイブル係数取得 には
1度に複数の強度評価できる装置が必要



H. L. Frandsen et al. *Journal of Power Sources* 258 (2014) 195e203



多連高温環境強度評価装置全体写真

30個/dayでワイブル
データ取得可能！

プロットに必要な強度

3. 研究開発成果

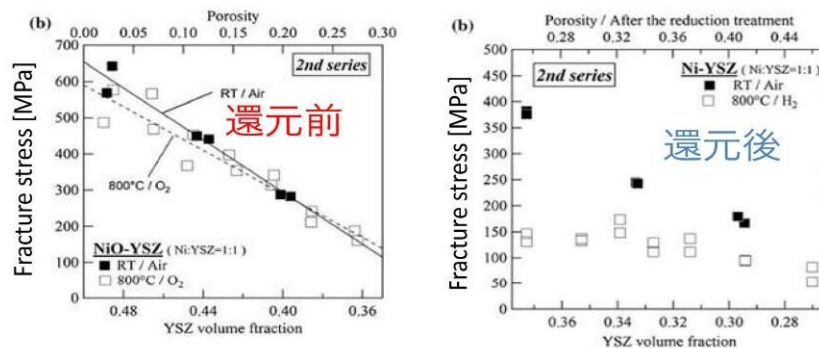
④機械的信頼性評価法開発G

目標: SOEC材料、セルスタックの機械的な性能解明

イ)セル損傷機構の解明

① 発電環境に晒された構成材料の力学特性評価 (バルク体)

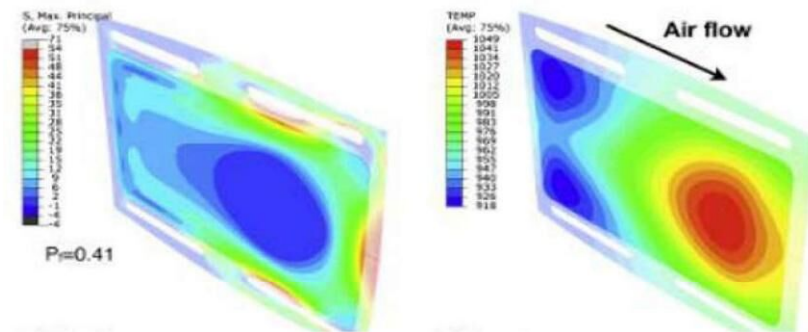
(S. Watanabe et al., J Mater Sci, 55, 8679-8693, 2000)



アノード材料の還元前後の破壊強度

② 有限要素モデルでのSOFCセルの応力や温度分布の予測

(A. Nakajo et al., Journal of Power Sources, 193, 203-215, 2009)



発電時SOFCセルの応力と温度分布

- ✓ 実際のセルとスケールが異なる
=破壊の因子が異なる
- ✓ 他の材料からの影響(積層材料)を考慮できていない

- ✓ より信頼性の高いモデルの作成には
実際のセルの力学特性の理解が必要

使用環境に晒したsocセルの力学特性を測定することが必要

- メソスケールの力学試験によるアプローチ
- Ex-1) マイクロカンチレバー(横浜国立大学 多々見グループ)
- Ex-2) ナノインデンテーション・超微小引張試験(東北大学 市川・久慈グループ)
- Ex-3) In-situ TEM 引張試験(東京大学 栃木グループ)
- 計算科学的手法アプローチ(東北大学 青柳グループ・慶應義塾大学 村松グループ)

3. 研究開発成果

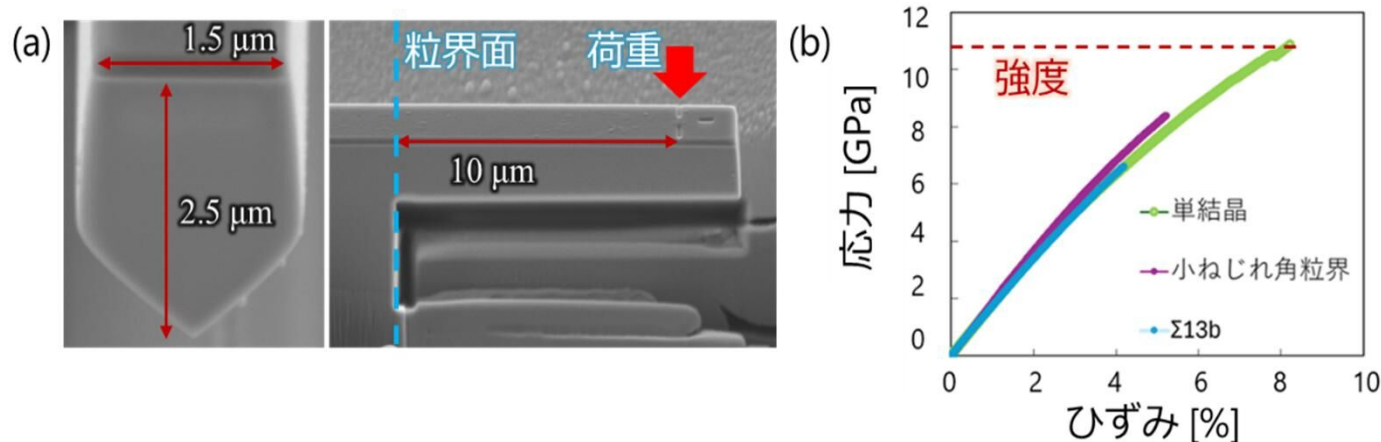
④機械的信頼性評価法開発G

目標: SOEC材料、セルスタックの機械的な性能解明

イ)セル損傷機構の解明: 新規なSOEC材料評価法の開発

マイクロカンチレバーを用いたYSZ曲げ試験

単結晶を接合させた8YSZバイクリスタルを使用



SOEC運転環境下での材料の機械的特性の解明
⇒運転時の強度変化の予測

・運転時の温度分布、多数枚積層構造での機械的信頼性に重要なデータ提供

8YSZ単結晶と(111)ねじれ粒界の曲げ強度 (単位 GPa)

小ねじれ角粒界 (ねじれ角2.6度)	$\Sigma 13b$ 対応粒界	単結晶 (破面 (111))
8.3 $\pm$ 0.2	6.4 $\pm$ 0.2	9.6 $\pm$ 0.6

3. 研究開発成果

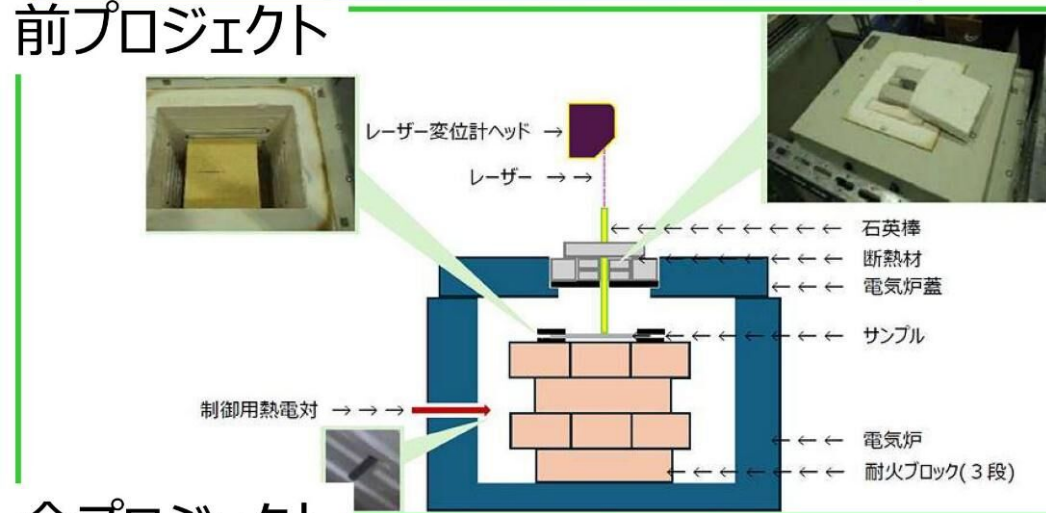
④機械的信頼性評価法開発G

目標: SOEC材料、セルスタックの機械的な性能解明

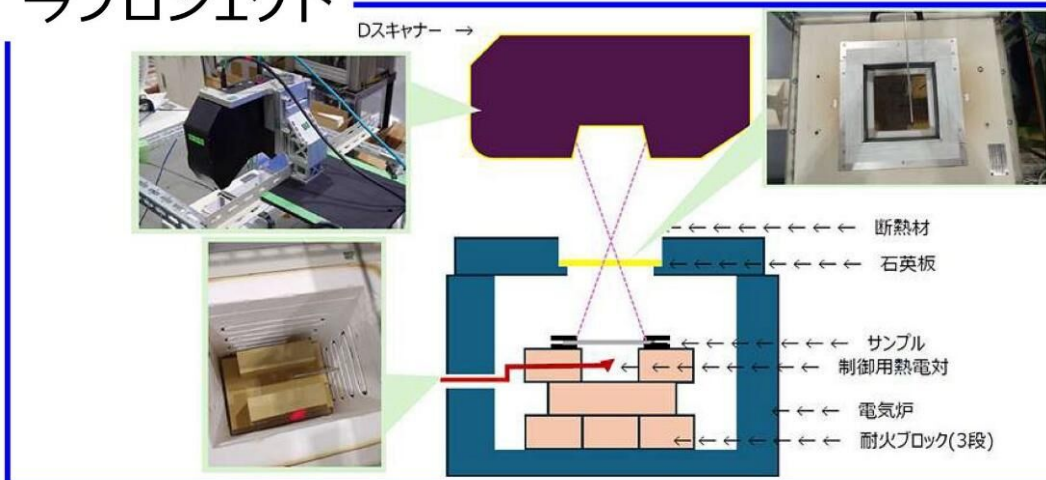
ウ)セル製造時信頼性評価手法の開発

焼成時のセル変形その場観察手法の開発

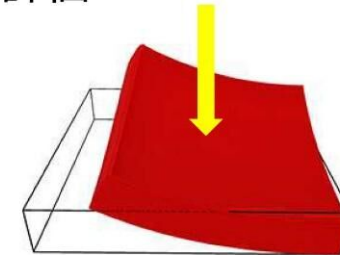
前プロジェクト



今プロジェクト



1点での評価 レーザー

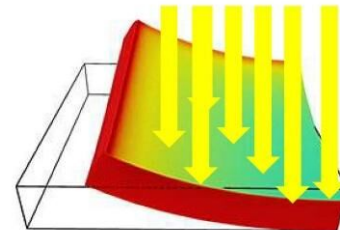


全体をとらえきれず+, 外挿



面での評価

レーザー



全体をとらえる+,

残留応力実験や計算との融合が可能

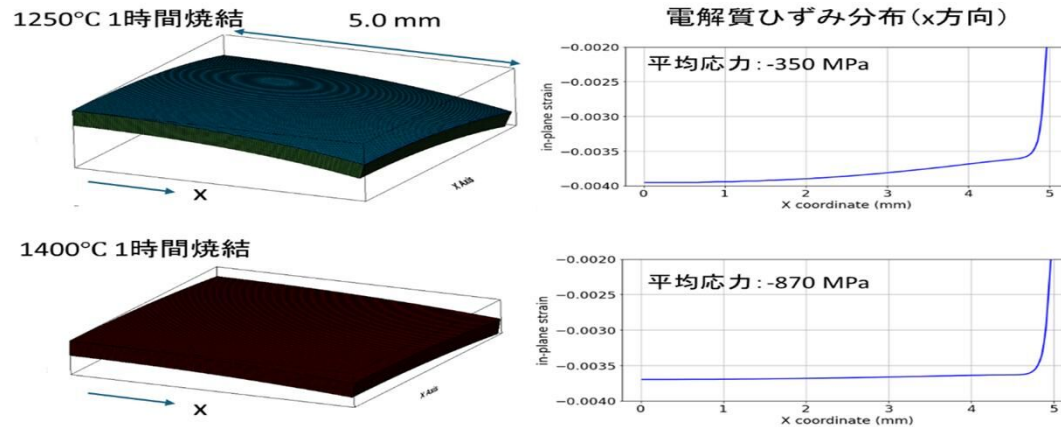
3. 研究開発成果

④機械的信頼性評価法開発G

目標: SOEC材料、セルスタックの機械的な性能解明

ウ)セル製造時信頼性評価手法の開発

YSZ/NiO-8YSZ一体焼結後: そり変形と熱残留ひずみ分布予測



SOECで予想されるセルの大量生産:

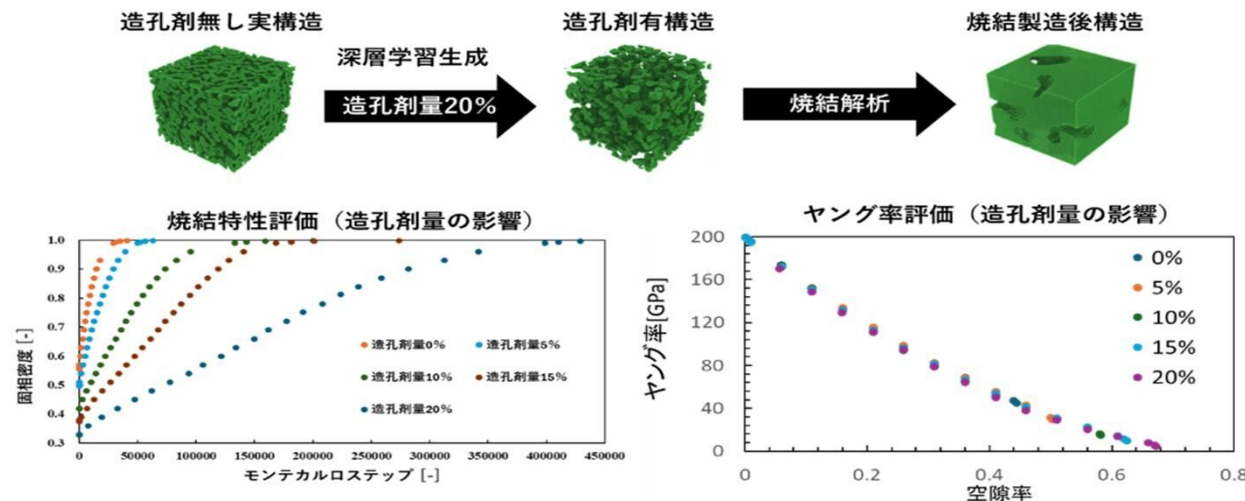
⇒生産時の

- ・セル残留応力
- ・ヤング率

を予想することで、大量生産時への重要データを提供

生産時の不良品率の低減、歩留まり向上に寄与

深層学習生成: 造孔剤含有構造焼結時の緻密化特性とヤング率予測



3. 研究開発成果

④機械的信頼性評価法開発G

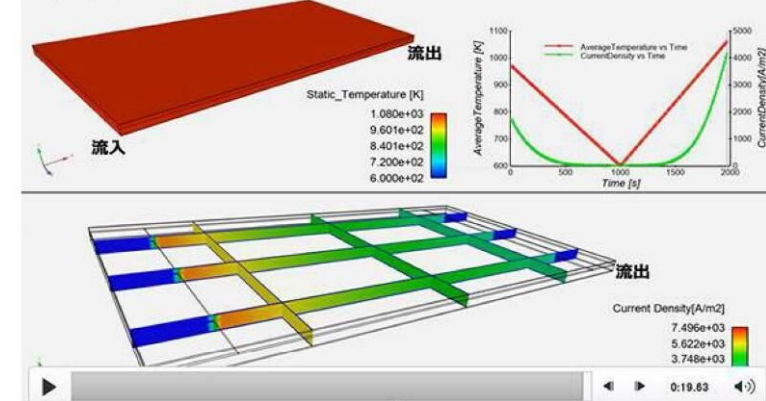
目標: SOECセルスタック、部材・材料の機械的な性能
解明

エ) スタック製造時信頼性評価手法の開発

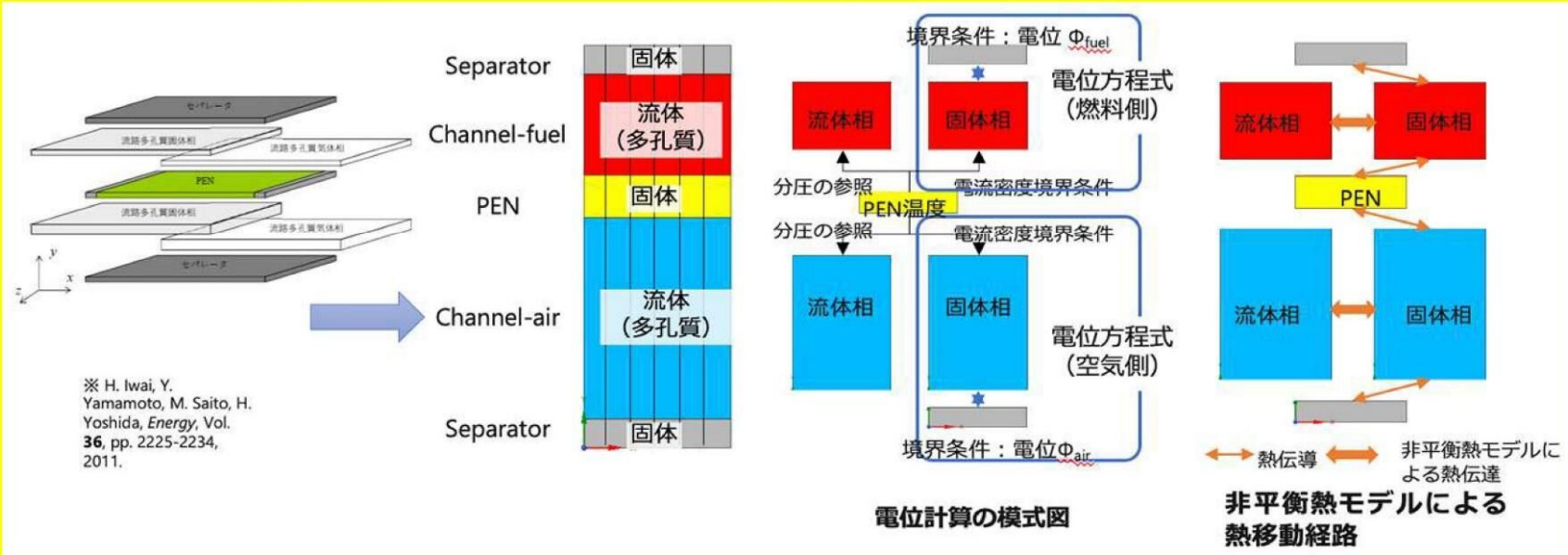
● シミュレーションツールの開発

ANSIS-FLUENTに組み込んだ**擬三次元SOFCシミュレーションツール**（京大で開発したプログラムの考え方を移植）をSOEC用に改変するとともに、ユーザビリティを向上させる。

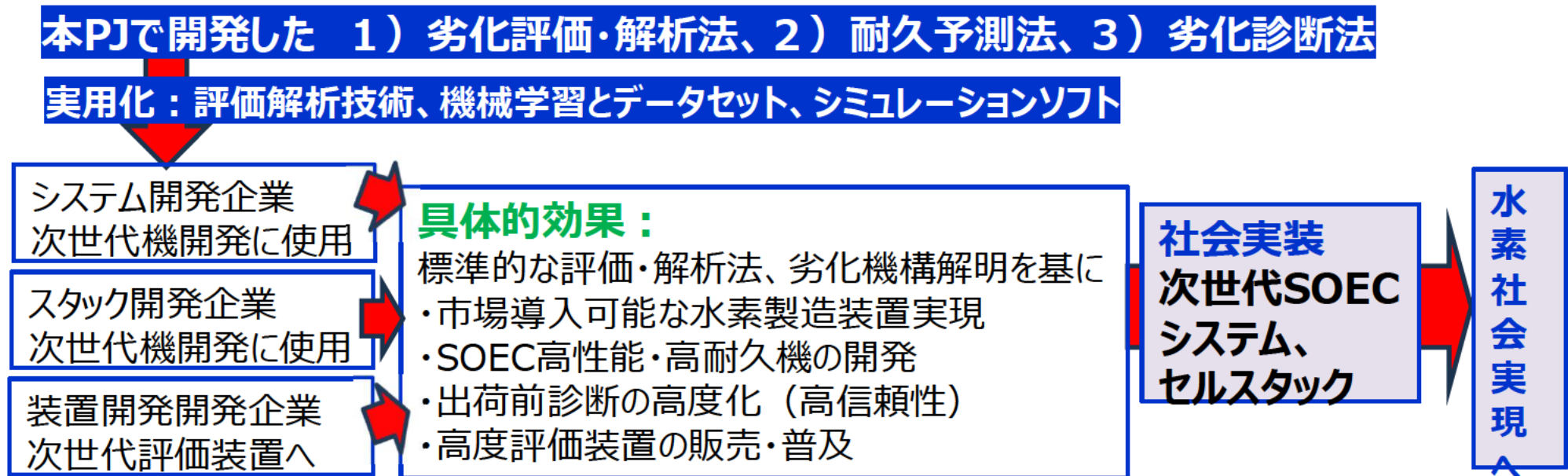
計算例



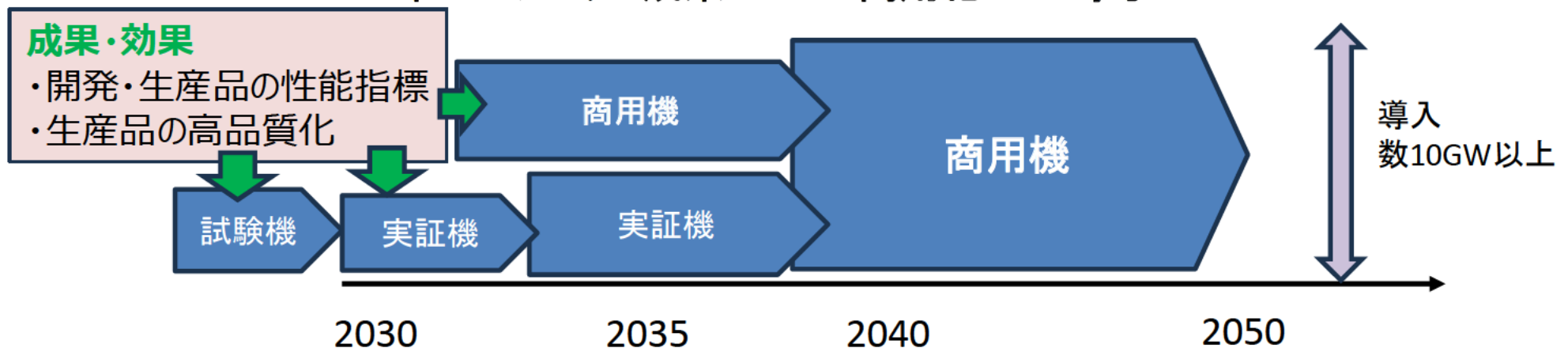
ANSYS-FLUENTでの擬三次元SOFCシミュレーションの考え方



4. 今後の見通し： 事業化のイメージ（社会実装への貢献）



本プロジェクト成果のSOEC商用化への寄与



4. 今後の見通し： 事業化のイメージ(SOECからの水素)

CAPEX 仮想1MW級SOECシステム

セルスタック: $1.3V \times 0.8A/cm^2 \times 81cm^2 = 81W/セル$

11,871枚のセル積層: 50枚で10万円程度 → 2374万円

システム: BOP 5000万円、設置工事費2000万円 合計: 9374万円

(これまでのSOFCシステム250kW高圧で、約9000万円程度)

長期耐久・性能評価法は、SOECシステムからの水素コスト・価値を評価するうえで必要不可欠

OPEX 水素製造・電解能力

4.0kWh/Nm³(蒸気無し)

3.5kWh/Nm³(蒸気あり)

電気代: 3円/kWh

1日12時間稼働、365日/年稼働

水代1000万円/年想定

水素需要(販売):

18円/Nm³で供給

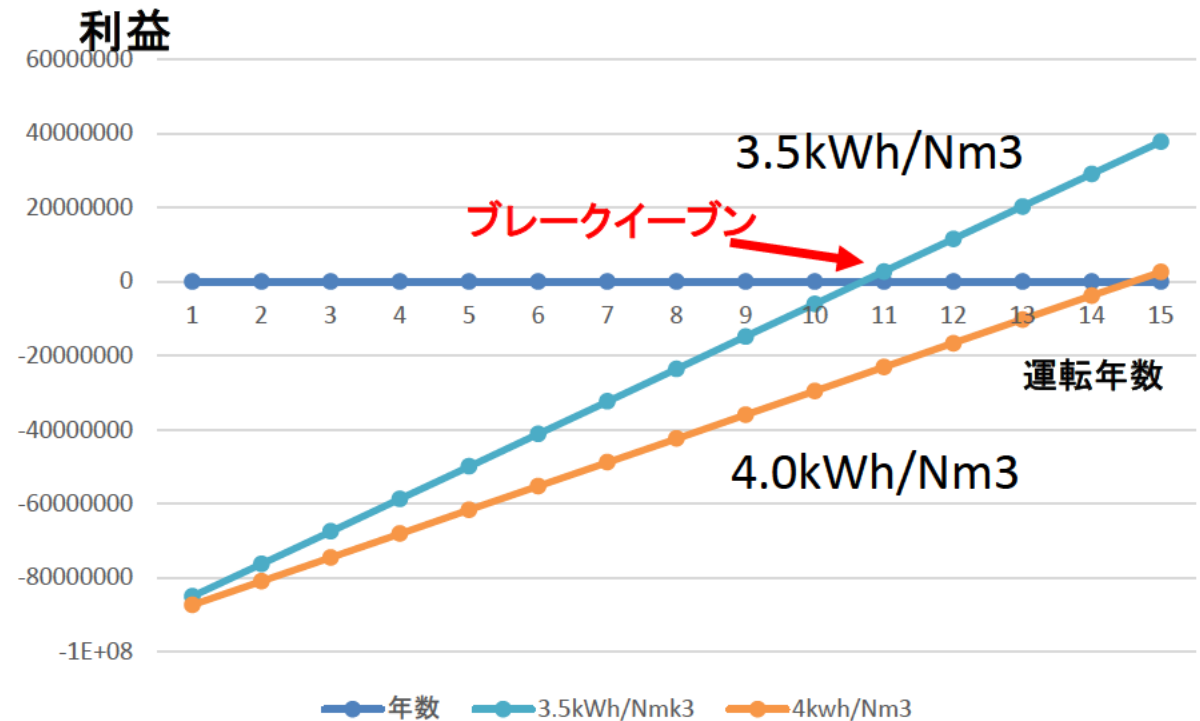
利益(1年あたり):

640万円(4.0kWh/Nm³)

870万円(3.5kWh/Nm³)

人件費やリプレイス含まず

仮想SOECシステムの収支見込み



効率3.5kWh/Nm³システムは、11年でリターンを得られる見通し=長期稼働が重要

4. 今後の見通し： プロトコル構築

SOECの性能・劣化評価をプロトコルとして整備・成果をIECなどに反映

EUのプロジェクトでの成果からの規格案・測定法

JRC VAL IDATED METHODS, REFERENCE METHODS AND MEASUREMENTS REPORT

EU harmonised testing protocols for high temperature steam electrolysis

Performance and durability of stacks and systems

Malkow, T., Pilenga, A JRC129387 Print doi:10.2760/7940

PDF ISBN 978-92-76-61556-9 doi:10.2760/31803

関連する国際標準 IEC-TC105で構築

IEC 62282-3-201：小形定置用FC システム性能試験方法(2025 年9 月にIEC 62282-3-201 ED3発行)

MT203 小形定置用性能 Convenor: 橋本 登 (山梨大学)

IEC 62282-7-2：SOFC 用単セル・スタック性能試験方法

MT104 SOFC 単セル・スタック試験 Convenor: 麦倉 良啓 (電中研) (主なMember: EC-JRC)

IEC 62282-8-101：固体酸化物形燃料電池・電解セル及びスタックシステム

MT206 固体酸化物形電解セル・スタック Convenor: Stephen McPhail (IT) KIWA

IEC 62282-8-201：燃料電池利用エネルギー変換・貯蔵システムの性能試験方法

2024 年7 月 IEC 62282-8-201 ED2 を発行。

MT208 P2P システム Convenor: 亀田 常治 (東芝ESS)

IEC 62282-8-301：メタン合成システム-性能試験方法

MT211 P2M システム Convenor: 堀田 照久 (産総研)

4. 今後の見通し： プロトコル構築（既往の規格とPJ成果反映）

各規格・標準のメンテナンス予定と本プロジェクトの成果反映：

SOEC評価解析PJの最新情報を入れた標準・規格の整備

下記その他、必要に応じて新規の規格・標準を提案し、適切なSOEC技術の普及に貢献

年度	2026	2027	2028	2029	2030
本プロジェクト		中間評価 評価法案 1		最終年度 評価法案 2	
IEC TR 62282-7-3 SOFC 用単セル・スタック性能試験方法	現在は2025年 3月改訂	Stability Date 一部成果反 映			Stability Date 成果反映
IEC 62282-8-101：固体酸化物 形燃料電池・電解セル及びスタックシステム	新規提案			Stability Date 成果反映	
IEC 62282-8-201：燃料電池利 用エネルギー変換・貯蔵システムの性 能試験方法	Ed.3 IS 発行済 (2025 年9 月)		Stability Date 成果反映		
IEC 62282-8-301：メタン合成シ ステム-性能試験方法	Ed.1 発行 (2023 年5 月) Stability Date			Stability Date 成果反映	

5. まとめ

- 1) 「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／高温水蒸気電解評価解析プラットフォームの技術開発」において産学官連携プラットフォーム（**全17機関**；委託6機関、再委託3機関、共同実施8機関）での評価解析法開発を推進した
- 2) SOECの劣化機構解明に関する課題を整理し、適正・標準的な評価・解析法を提案する準備ができ、予備試験・長期試験を開始した。またマルチスケールシミュレーション技術を高度化するとともに機械学習を取り入れた新規な評価法、機械的破壊予測などができる新規評価法を開発する
- 3) SOECでは、吸熱・発熱、水蒸気安定供給、高電流密度など、燃料電池運転モードとは異なる特有の劣化・運転があり、それらに伴う劣化機構を解明する
- 4) SOECに関する高度な評価・解析法により、一定水準以上のセルスタックの開発や量産が可能となり、水素のコスト試算ができ、SOECの社会実装を加速する