

NEDO水素・アンモニア成果報告会2025

発表No.A1-6

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/共通課題解決型基盤技術開発/

固体酸化物形燃料電池スタックの 高度評価・解析技術の研究開発

発表者名 堀田照久

団体名

(委託先)

国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学、国立大学法人九州大学、国立大学法人東北大学、イムラ・ジャパン株式会社

(共同実施先)

京セラ株式会社、森村SOFCテクノロジー株式会社、株式会社デンソー、大阪ガスマーケティング株式会社、東京瓦斯株式会社、東邦ガス株式会社、日産自動車株式会社

(再委託先)

千葉工業大学、慶應義塾大学

発表日 2025年7月15日

連絡先：堀田照久
国立研究開発法人産業技術総合研究所
(E-mail: t.horita@aist.go.jp)



事業概要

1. 期間

開始 : 2020年8月
終了 : 2025年3月

2. 最終目標

- 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の普及・適用性拡大に必要な、高度なスタック評価・解析技術確立する
- SOFCスタックの13 万時間超運用、65%超の高効率、再エネ調整力応用としての負荷変動や急速起動など、スタック運用限界に近い状態を的確に評価し、長期寿命や運用性限界を予測する高度な評価・解析技術を開発

3. 成果概要

- 固体酸化物形燃料電池(SOFC)複数スタックの高効率運転(効率65%相当、燃料利用率85%)を2万時間以上成功
- スタック性能劣化の主たる抵抗増大がオーム損と空気極過電圧であることを解明、長期運転での燃料極劣化傾向も観測
- スタックの長期寿命を予測するため、各部材や材料の劣化メカニズムの時間依存性や複合効果を整理し、総合的評価確立
- 複合劣化とマルチスケールシミュレーション技術確立
- 急速起動や負荷変動に対応するための評価装置と応力シミュレーションが完成、プロトコルへの基盤技術完成
- 機械学習の適用：電極微構造の画像からの劣化を予測する基盤技術や性能波形からスタック耐久を予測することに成功



1. 事業の位置付け・必要性

1) 事業の背景と目的：

- SOFCシステムは、家庭用が普及段階、業務・産業用が導入段階で、本格普及には、高効率・耐久などの性能向上が必要
- 電源設備として耐久15年、分散電源として効率65%以上を同時に満たし、負荷変動や起動停止などの運用性向上が必要
- 上記の性能を満たす長寿命・高効率SOFCスタックを的確・適正に評価できる方法・解析法はまだなく、先進的な評価・解析法、寿命予測法を開発することが目的。評価・解析法を開発する中で、開発企業のセルスタック開発が同時に促進されることも視野にいれる

2) 事業の意義・必要性：

- 企業が開発中の先進スタック(性能目標：耐久15年、効率65%以上、負荷変動・起動などの運転可能)を的確に評価する方法はまだなく、スタック開発企業が必要としている。
- 出荷前や長期運転時の適正評価や高性能システム設計が容易になり、生産性向上、適用性拡大・普及促進に寄与。
- 本事業を推進することでSOFCシステムの本格普及と適用性・市場拡大、社会実装に寄与し、評価・解析法をリバーシブルセルや電解セルなどにも適用することで、低炭素社会、脱炭素社会へとつながる重要な技術を提供できる。

2. 研究開発マネジメントについて

1) 研究開発の目標と目標設定の考え方（根拠）

脱炭素に向けたトランジェント及び水素利用への高効率発電として、SOFCが重要。

電力設備としての定置用燃料電池の寿命は15年以上が必要、また集中火力の大型ガスタービンの効率は65%程度で、その効率を分散電源で実現し、大幅な温室効果ガス削減に寄与する。

長寿命・高効率SOFCスタックを評価するための高度評価・解析法はまだまだなく、共通課題として進め、評価法・解析法を確立する。

2) 研究開発のスケジュール

2020年～2021年： 評価・解析法構築のための基礎データの収集・解析

2021年～2023年： 長寿命・高効率スタックの寿命予測法、診断法などの基礎技術開発、基盤完成

2024年： 長寿命・高効率スタックの寿命予測・診断法の確立

3) 研究開発の実施体制

産学官連携の総合的なプロジェクト体制：実スタック、評価・解析、改良のサイクルを回す

7 委託機関（2研究機関、4大学、1企業）、7共同実施(スタック開発企業、ユーザ)、

2再委託（2大学）

4) その他：

研究開発進捗は、テーマごと及び個別技術課題に対応するワーキンググループで推進

全体会議を3か月ごとに開催し、進捗管理と共有情報により開発の加速を図る

研究データ・知財管理の知財運営委員会で新規発表などを管理して研究データの適正管理

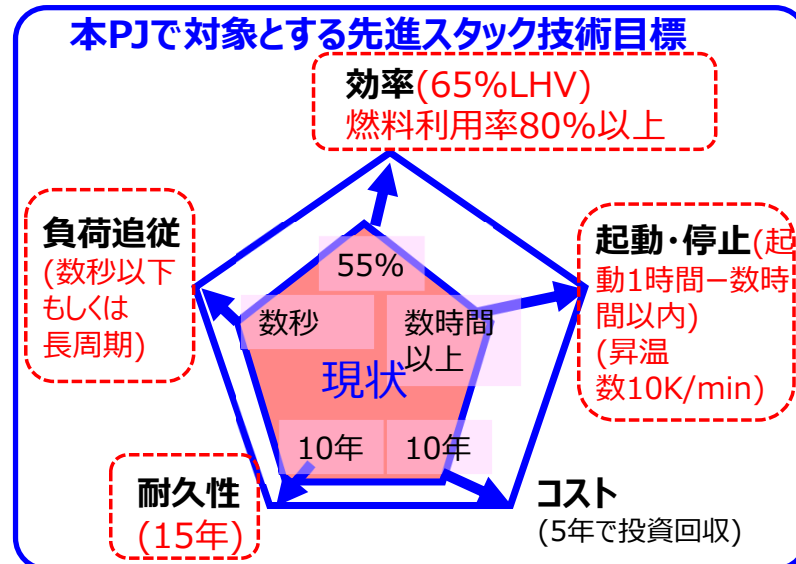


2. 研究開発マネジメント (1) 目標と設定根拠

目標：スタック開発企業が使える劣化評価・解析法の確立 (13万時間耐久、急速起動)

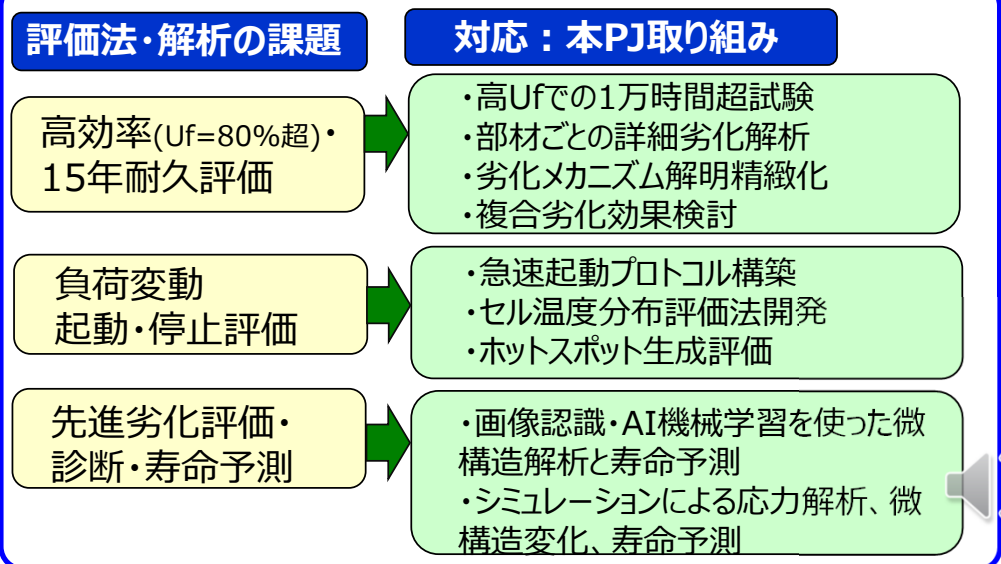
- 燃料電池ユーザーニーズ：カーボンニュートラルに向けたトランジェントでの低炭素化、高効率発電が必要
- SOFC開発企業ニーズ1：高効率・長寿命スタックの高効率・長期運転時の耐久評価法が必要
- SOFC開発企業ニーズ2：先進スタックの動特性や負荷変動、急速起動などの運用性に関する評価法・新規劣化診断法が必要
- これまでの取り組み：部材ごとの劣化機構解明、9万時間耐久予測法の確立 各部材・要因の劣化機構解明、スタック運転で劣化10%の見通し
- **中間目標(2022年6月)**：ニーズを満たす先進スタックに適用するための評価法の基礎データ収集
- **最終目標(2024年度末)**：ニーズを満たし、先進セルスタック開発に寄与できる高度な評価・解析法の確立

(現状)世界で実現しているSOFCシステム：
システム効率55~60%以上、耐久10年

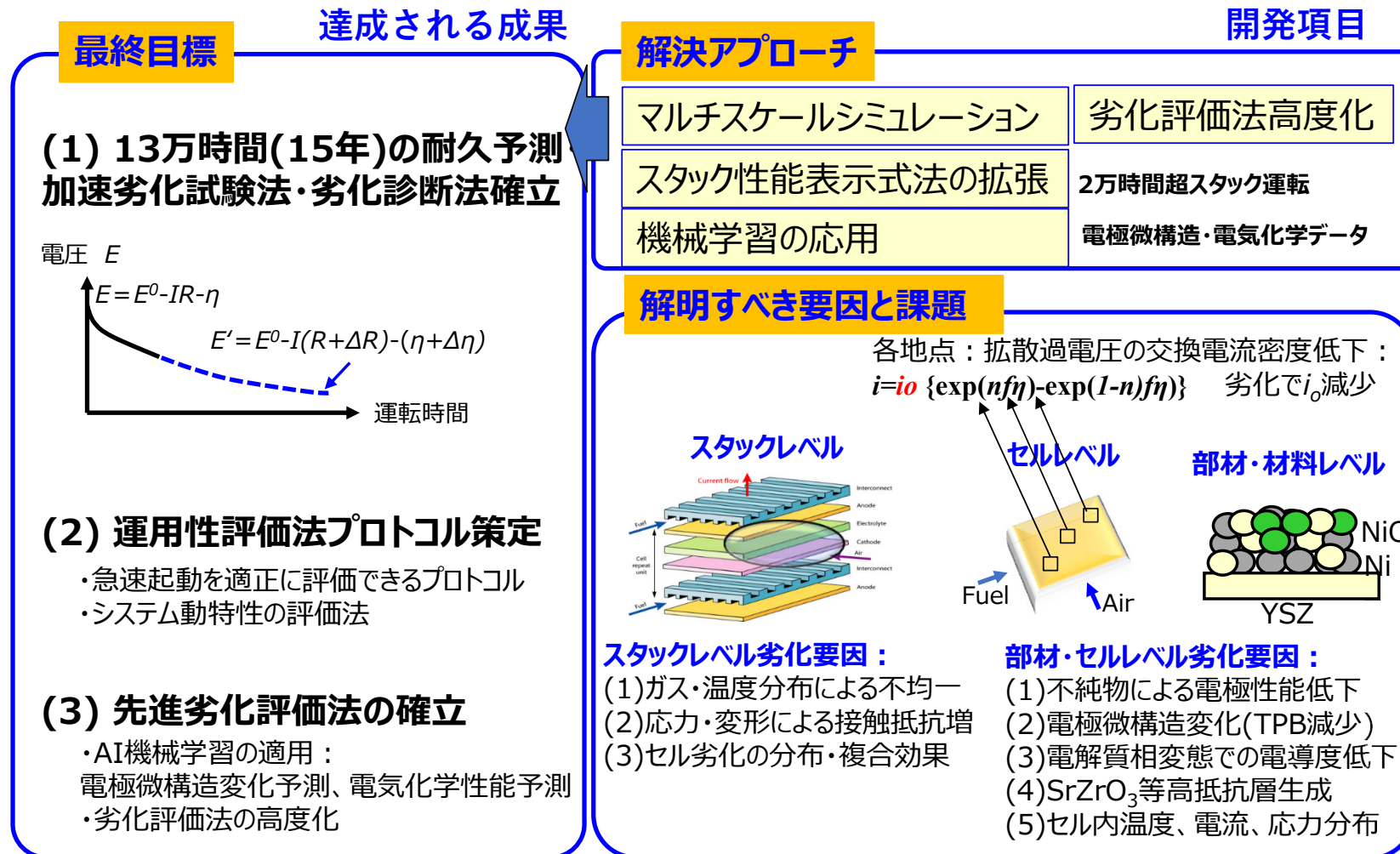


急速起動の意義：再エネの変動調整、DSS対応、モビリティ展開

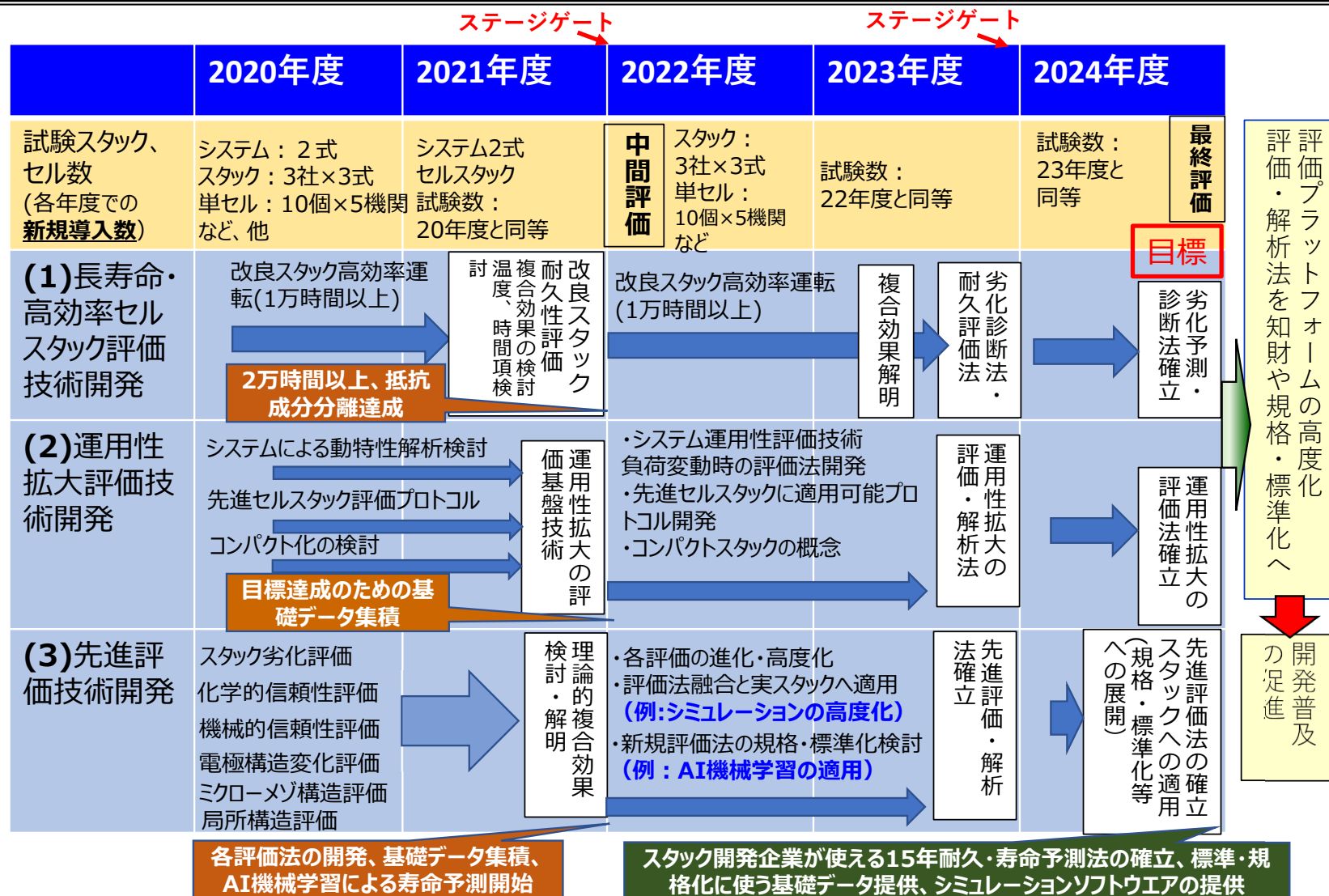
先進スタック評価法・解析への課題と取り組み



2. 研究開発マネジメント (2) 最終目標、達成見込み成果、対応する開発項目



2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発スケジュール



2. 研究開発マネジメント (4) 実施体制

- 13万時間耐久・高効率スタックの評価技術・劣化診断法を確立するため、**産学官連携体制構築**
- 7委託機関、3スタック開発企業・4ユーザー企業(共同実施)、2再委託先(2大学)
- 3つのテーマの評価技術開発が連携して、次世代スタック・システム開発に役立つ評価技術を開発

グループリーダー：堀田照久(産総研)

会議頻度：全体会議3か月ごと

①長寿命・高効率セルスタック評価技術開発

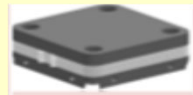
- ア) 筒状平板形スタック耐久性評価
電中研、産総研(京セラ)
- イ) 中温平板形スタック耐久性評価
電中研、産総研(森村SOFCテクノロジー)
- ウ) 業務用平板形スタック耐久性評価
電中研、産総研(デンソー)



筒状平板形
(京セラ)



中温平板形
(森村SOFC
テクノロジー)



業務用平板形
(デンソー)

連携

耐久
サンプル

劣化要因分析
改良点示唆

知財運営委員会

知財管理・データ管理、審議、承認
成果発表の審議、承認

②運用性拡大評価技術開発

- ア) システム動特性解析研究開発
電中研、産総研(京セラ、森村SOFCテクノロジー、デンソー)
- イ) 先進セルスタック評価プロトコル
イムラ・ジャパン、東北大、オブザーバー：産総研(京セラ、森村SOFCテクノロジー、デンソー、日産自動車)
- ウ) コンパクト化のためのフィジビリティスタディ
東北大、産総研(大阪ガスマーケティング))

連携

評価プラットフォーム：企業セル分析と先端技術開発

③先進評価技術開発

- | | |
|----------------|-----------|
| ア) スタック劣化評価解析 | 電中研 |
| イ) 化学的信頼性評価解析 | 産総研 |
| ウ) 機械的信頼性評価解析 | 東北大(慶応大学) |
| エ) 電極微構造変化評価解析 | 東大(千葉工大) |
| オ) ミクロメゾ構造評価解析 | 京大 |
| カ) 局所構造評価解析 | 九大(東京ガス) |

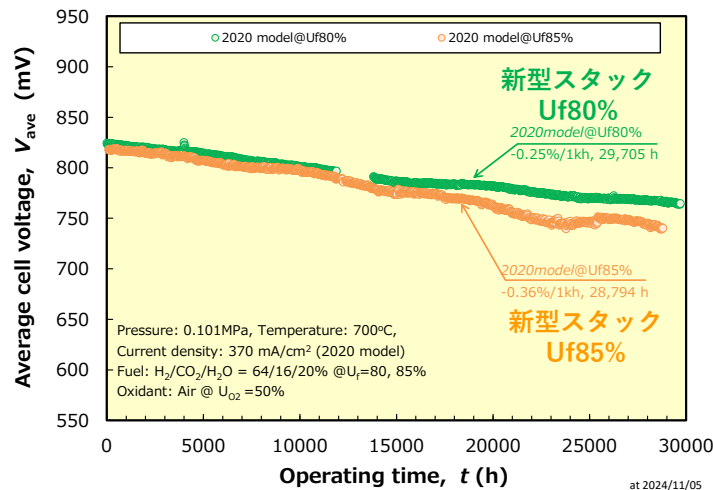
技術課題解決のために、テーマを超えて取り組みワーキンググループを構築し活動

3. 研究開発成果：（1）SOFCスタックの長期試験（Uf85%で2万時間以上。世界最長）

中温平板形スタック耐久性評価：電力中央研究所、産業技術総合研究所(森村SOFCテクノロジー)

- 高効率スタック（新モデル）試験：燃料利用率 $U_f=80\%$ で3.0万時間、 $U_f=85\%$ で2.9万時間の耐久達成
- 新モデルでの高効率運転耐久性を確認。0.2%/kh台を達成
- 高燃料利用率試験でも安定に作動、抵抗成分分離に成功：IR損と空気極過電圧が主たる劣化要因

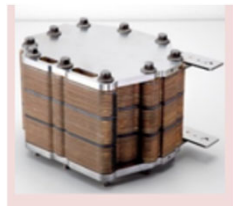
平均セル電圧時間推移



中温平板形スタック外観
(旧型スタック)



スタック外観
(新型スタック)

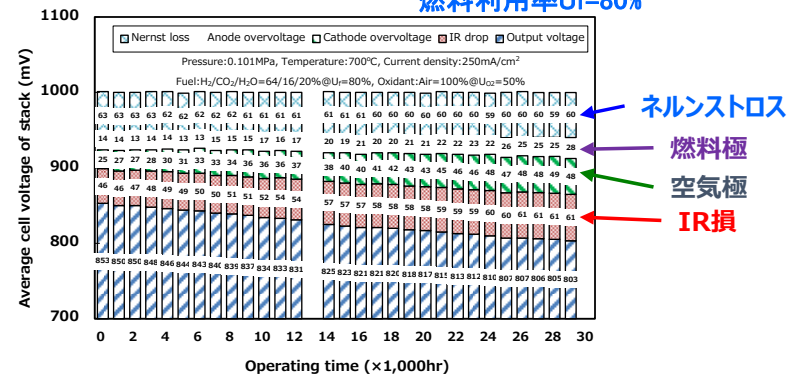


劣化解析を受けて企業にて改良

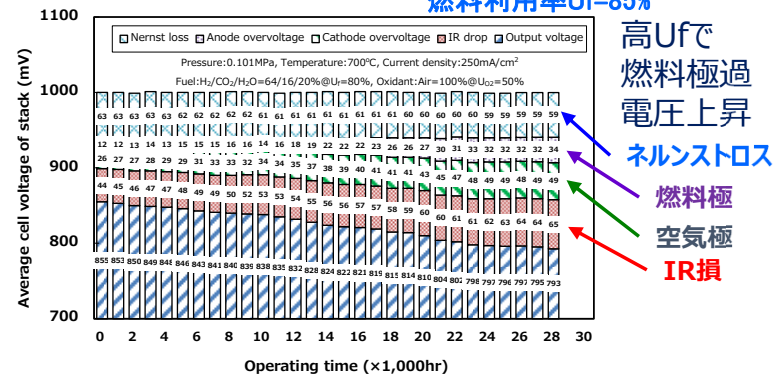
2020年より新型スタック(軽量・高効率)：旧セルスタックで現出したセル劣化要因を改善しスタック形状変更

性能表示式による経時的な性能要因分析

燃料利用率 $U_f=80\%$



燃料利用率 $U_f=85\%$



高 U_f で
燃料極過
電圧上昇
ネルンストロス
燃料極
空気極
IR損



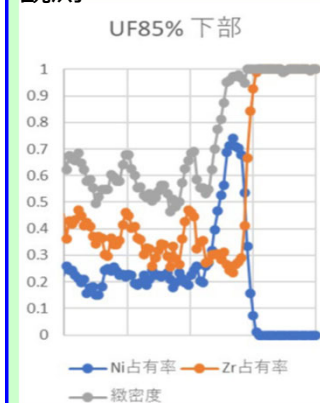
3. 研究開発成果：（2）高精度分析：分析技術の結集、機械学習による画像解析（産総研、東大、東北大、京大他）

- 実スタック燃料極劣化：高燃料利用率(高Uf)及び通電下でのNi/YSZ燃料極におけるNiの移動
- Ni/YSZ燃料極微構造変化：モデルNi/YSZ界面での接触角評価、移動の評価
- 電解時接触角> 燃料電池時接触角：電場と雰囲気との相互作用が影響、シミュレーションに反映

実スタックでの燃料極劣化観測

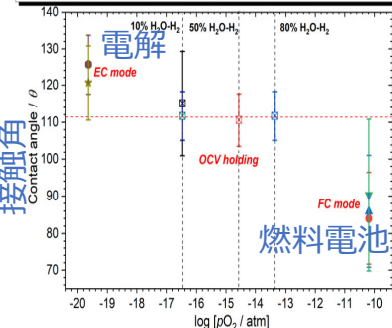
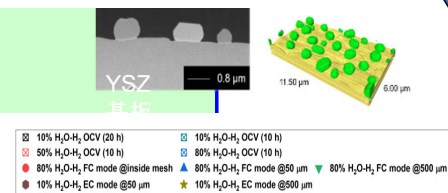
(産総研、電中研)

高Ufで過電圧増大: Niの移動・凝集
観測



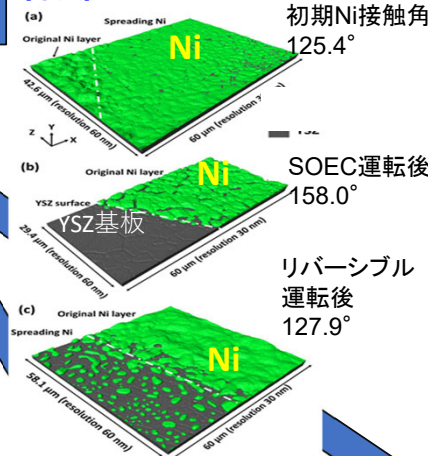
実スタックの高Uf長期
運転でNi濃集挙動
→高効率長期運転時
の劣化に影響

Ni/酸化物界面の
接触角評価(京大)



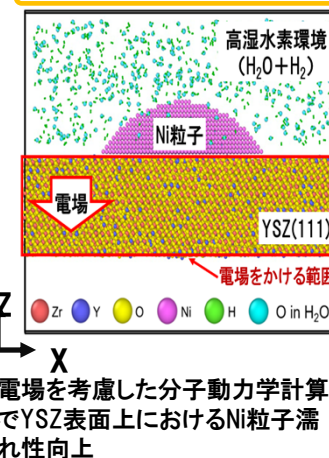
接触角の
酸素分圧依存性
@1000 °C
(OCV保持,
FC, ECモード)

レーザー顕微鏡の凹凸像
(東大)

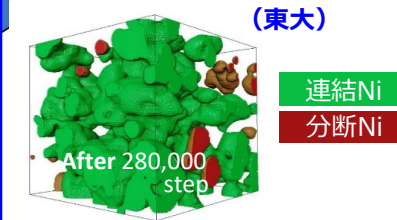


分子動力学法の予測
(東北大)

電場高湿水素下の
Ni粒子/YSZ(111)モデル



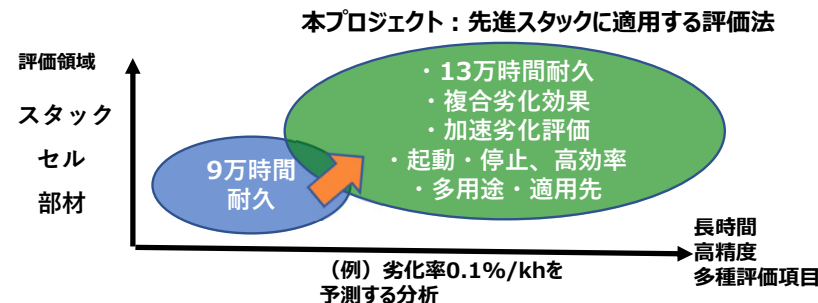
機械学習:電極3D像
(東大)



3. 研究開発成果：（3）先進的な劣化評価・解析法を開発

評価法項目：

- ・スタック長時間耐久評価(複合効果・マルチスケール)
- ・劣化評価・診断法の高度化
- ・急速起動などの運用性評価
- ・機械学習などの高度評価技術



◎：目標超
○：目標達成
2025年3月時点

劣化評価・解析法	進捗・達成内容	達成度
1.セルスタックの複合劣化シミュレーション	・劣化要素反応データの集積でスタックレベル劣化表現：IR、過電圧増大 ・信頼性デジタルツイン構築、代理モデルの適用・Fluent等商用ソフトへの適用	◎
2.性能表示式法	・ $U_f=85\%$ で2万時間以上耐久運転の抵抗成分分離に適用可能、時間項追加で寿命予測可能に ・実データとの比較検証中	◎
3.加速劣化試験法	・矩形波変動で劣化の促進を確認。温度加速も検討して加速因子の特定	○
4.急速起動停止・負荷変動評価法	・急速起動：過酷試験装置にて実データ取得、急速起動プロトコル構築中 ・動特性解析：スタックレベルの動特性モデル完成。システム化へ	○
5.革新評価・解析法	・損傷リスク評価、製造過程セル表面欠陥検出可能、機械学習適用 ・2次元画像からの3次元予測、酸化還元変化予測可能、長時間変化後のNi-YSZ電極微構造変化予測の検討	◎
6.高精度劣化分析法	・雰囲気、電場などの効果を実験と3D解析で解明 ・微量不純物、伝導種の挙動解明：長期劣化に対する影響解明 ・ボタンセル、モデル材の解析を実セル局所分析に適用	◎

評価法が
社会実装へ

1) 寿命予測法

2) シミュレーション法

3) 個別革新評価法

→次世代セルスタック開発へ適用・促進

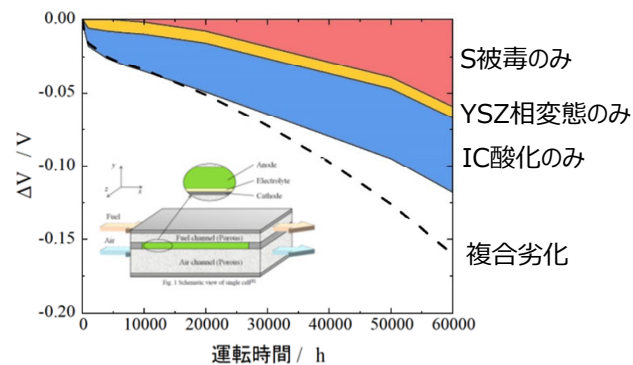
→商用ソフトに組み込んで、広く性能予測や応力評価に適用

→知財化や企業との共同研究で性能向上に寄与

3. 研究開発成果：スタック劣化予測：複合劣化・マルチスケールシミュレーション

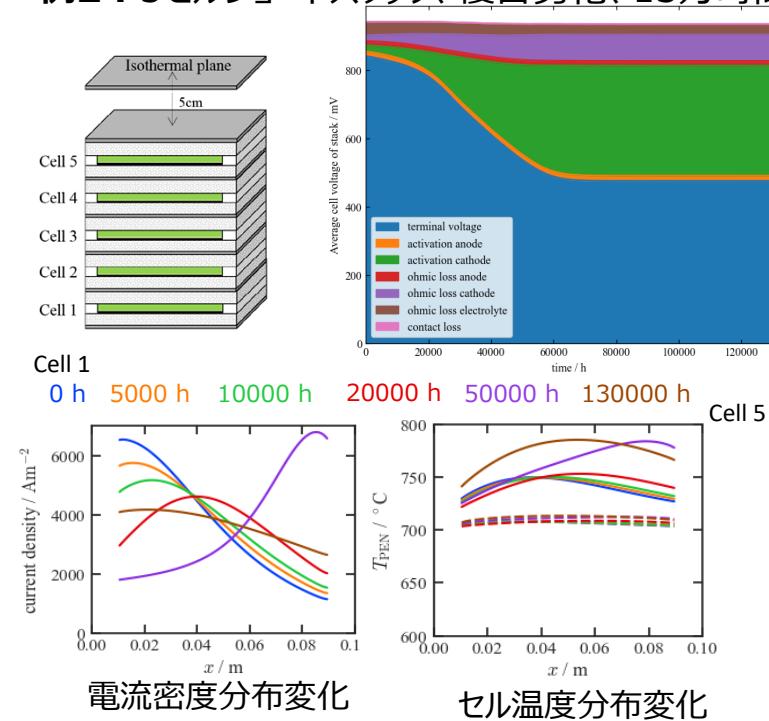
- 擬三次元SOFCスタックシミュレーションコード開発：構成要素を2次元でモデル化、積層でスタック表現
- 劣化モデルを適用することで長時間運転時の劣化挙動を再現
温度や局所過電圧を駆動力とする劣化モデルを構築・適用
ショートスタックシミュレーション（1～10セル）
複数の劣化モデルを適用した複合劣化解析(LSCFのS被毒＋セパレータ酸化＋YSZ相変態)

例1：単セル、個別劣化と複合劣化の比較



- 温度分布や電流密度分布に応じた劣化量分布推定
- 劣化にともなう所量分布の変化を明確化
- 複数の劣化が同時に生じる複合劣化の予測可能に
- 温度や電流密度の不均一が生じるスタックでのセルごとの劣化程度やその進展を推定

例2：5セルショートスタック、複合劣化、13万時間



3. 研究開発成果：スタック劣化予測 性能表示式による寿命予測

電力中央研究所

- 性能表示式の時間依存項の導出には、内部抵抗損、カソード過電圧では10,000時間までのデータ、アノード過電圧では15,000時間までのデータを用いることにより、20,000時間以降のデータを予測
- 15,000時間までのデータを用いた $U_f=80\%$ のスタックの耐久目安(初期セル電圧から10%低下)は $U_f=80\%$ 条件で13万時間程度と予測される。

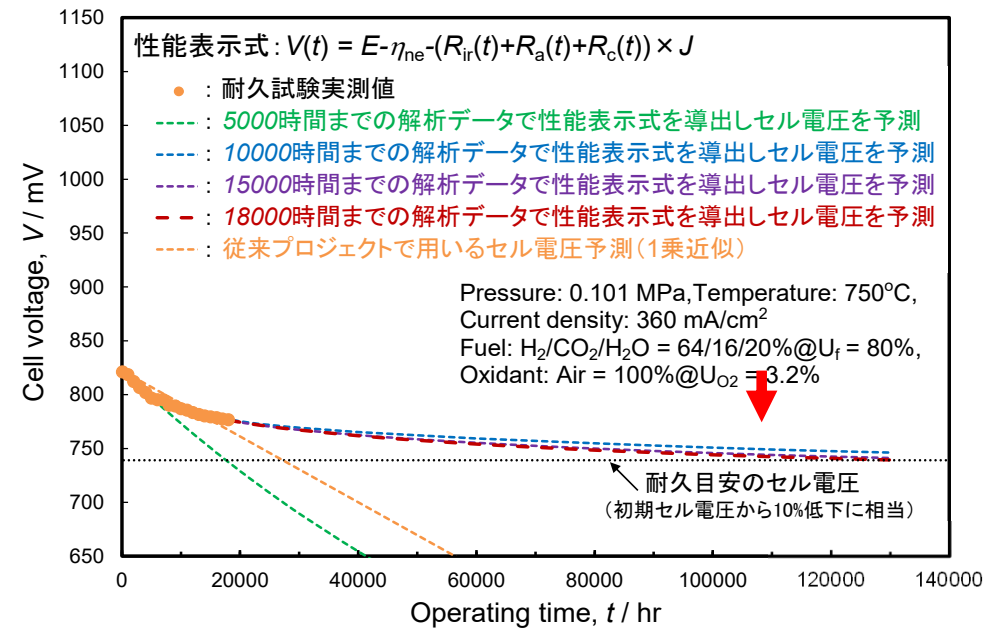
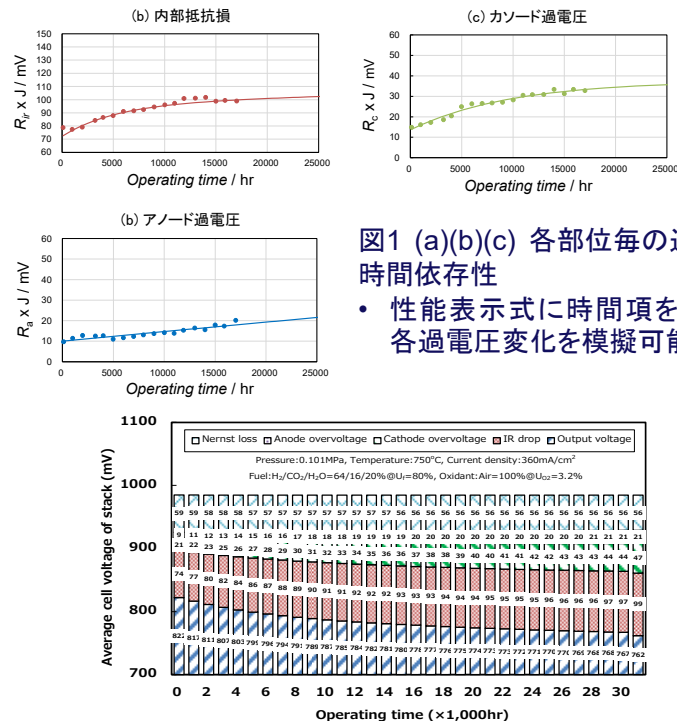
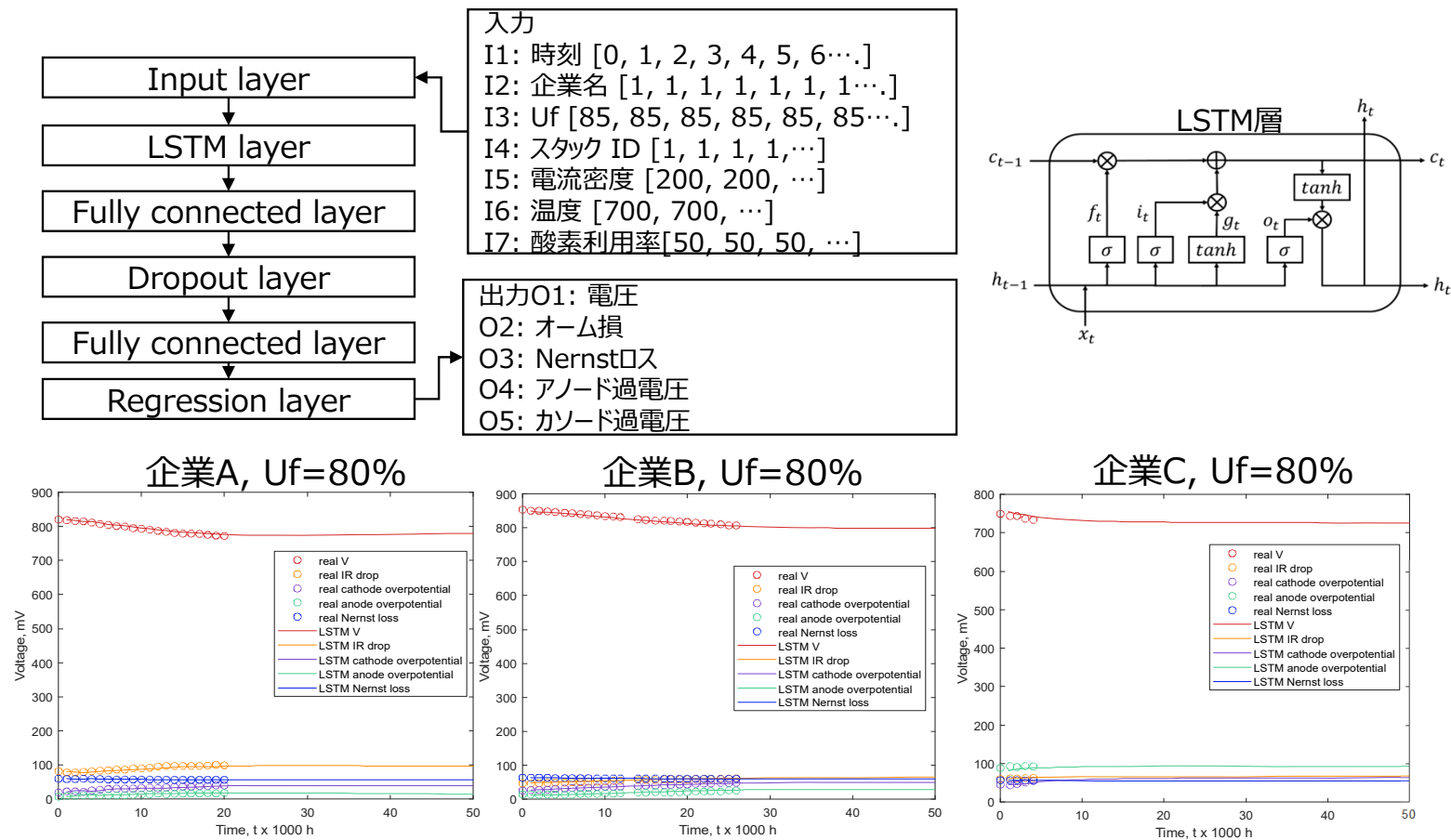


図3 性能表示式の導入に用いた実データの時間数の違いにより予測されるセル電圧の時間依存性

性能表示式を用いて抵抗分離して得られた各過電圧に劣化事象の時間依存性を加味し、性能表示式に時間項を導入。各時間におけるセル電圧 $V(t)$ を求め、13万時間に外挿(V:セル電圧、E:ネルンストの式より得られる開路電圧、 η_{ne} :ネルンストロス、 R_{ir} :内部抵抗、 R_a :アノード反応抵抗、 R_c :カソード反応抵抗、J:電流密度)

LSTMでの企業セル劣化予測

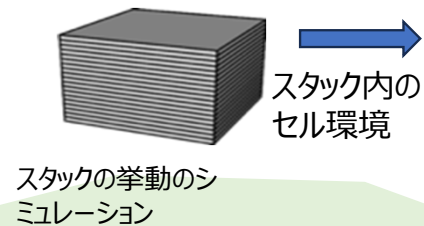
電中研の性能表示式で取得した耐久データを教師データとして寿命予測可能に



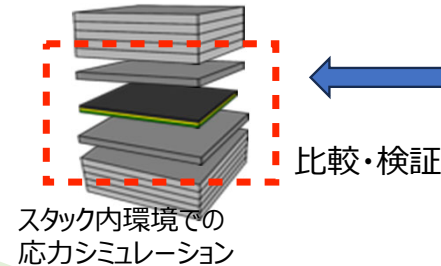
3. 研究開発成果：新規評価 スタック環境セル破壊試験による損傷リスク評価

- スタック内のセル環境(温度分布)を模擬するセル過酷試験試験装置を開発
- シミュレーションで予想する損傷リスクを実験により検証することが可能に

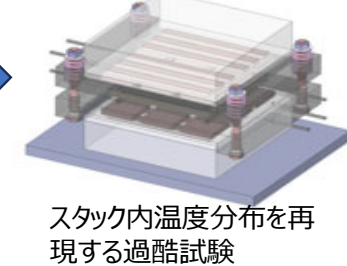
①試験条件の設定



②セルの精密シミュレーション



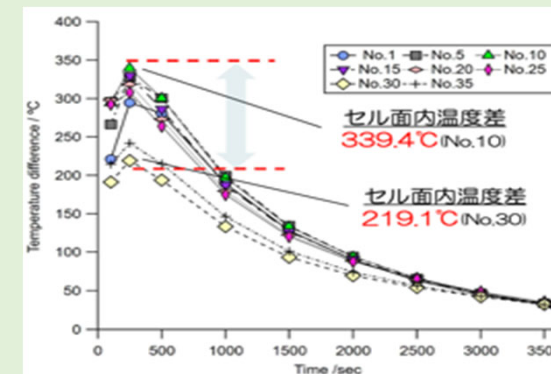
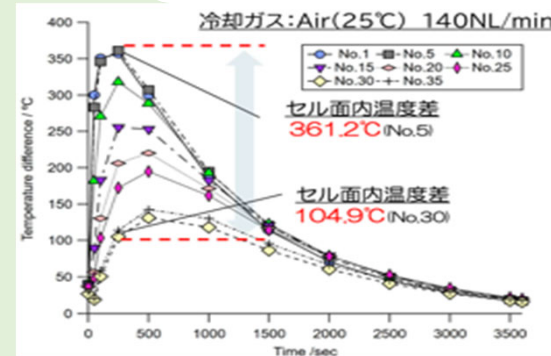
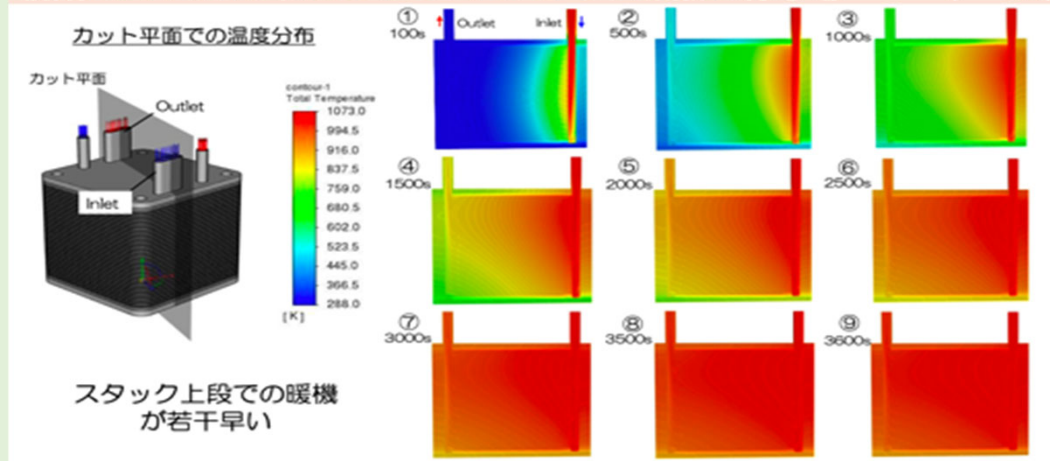
③過酷試験装置開発



①急速起動停止を想定した試験条件の設定

イムラ・ジャパンが市場調査結果をもとに設定した急速起動停止要件(21°C/min)を想定。スタック内温度分布をシミュレーション
イムラ・ジャパンで、ダミースタック実験により検証

暖機ガス160NL/minでのセルスタック加熱の様子② (~1h)



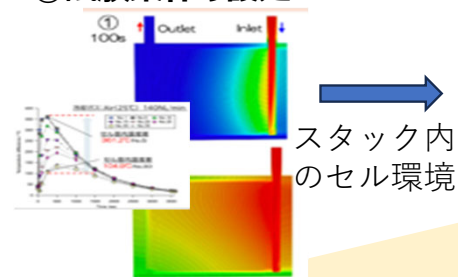
急速起動停止に必要な過酷条件を決定した

セル内最大温度差
起動時
(RT->650°C)
339.4°C
停止時
(665°C->250°C)
361.2°C

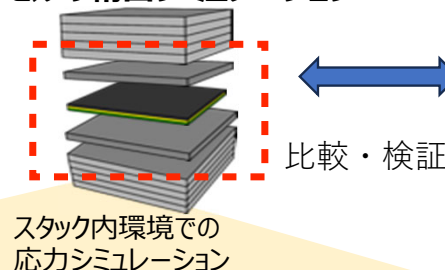
3. 研究開発成果：新規評価 スタック環境セル破壊試験による損傷リスクの評価

- スタック内のセル環境(温度分布)を模擬するセル過酷試験試験装置を開発
- シミュレーションで予想する損傷リスクを実験により検証することが可能に

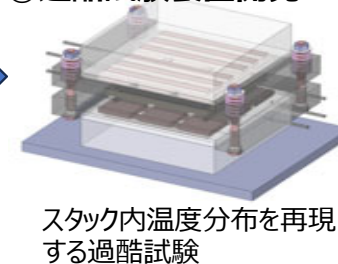
①試験条件の設定



②セルの精密シミュレーション



③過酷試験装置開発



マルチフィジックス解析

化学ひずみや非弾性ひずみを含むSOFCの各種現象をとりいれた応力解析

計算負荷が大きい

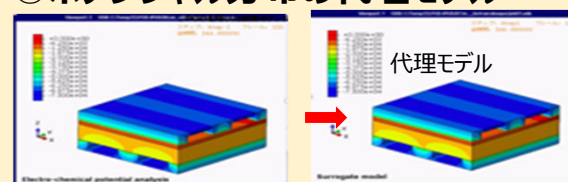
- 代理モデル
- 代替アプローチの併用による計算の簡略化手法開発

ポテンシャル分布に伴う化学ひずみや、塑性変形を考慮した応力解析を、実用的な時間で実施することが可能になった。

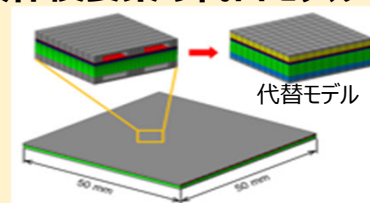
②セルの精密シミュレーション手法開発



○ポテンシャル分布の代理モデル



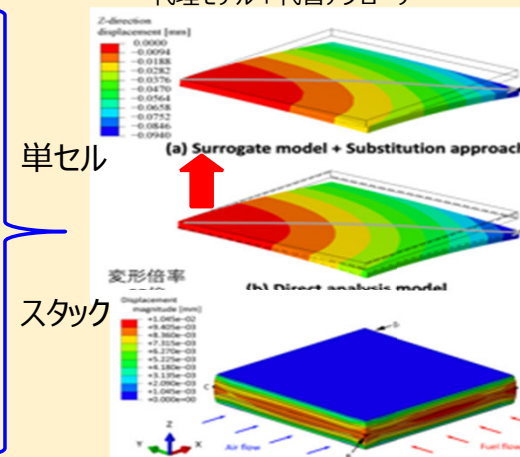
○代表体積要素の代替モデル



体積要素を、数値試験で決定したパラメータをもつ均質層で代替

-ANSYSに固体のイオン・電子導電性を考慮したポテンシャル計算のためのインハウスコード (SIMUDEL-TU) を実装

代理モデル+代替アプローチ



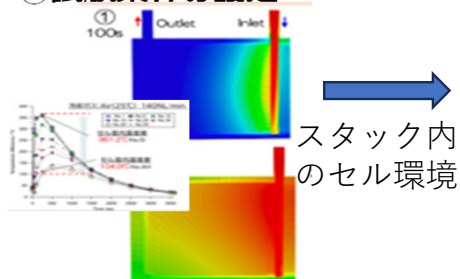
(*注) PODによる代理モデル構築手法をFluentの計算結果に適用して大阪ガスに提供

3. 研究開発成果：新規評価 スタック環境セル破壊試験による損傷リスクの評価

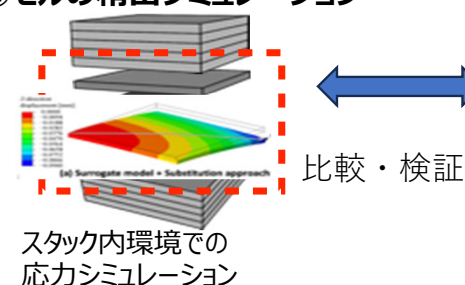
東北大学

- スタック内のセル環境(温度分布)を模擬するセル過酷試験試験装置を開発
- シミュレーションで予想する損傷リスクを実験により検証することが可能に

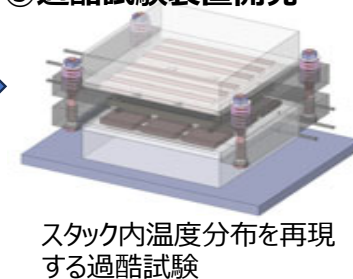
①試験条件の設定



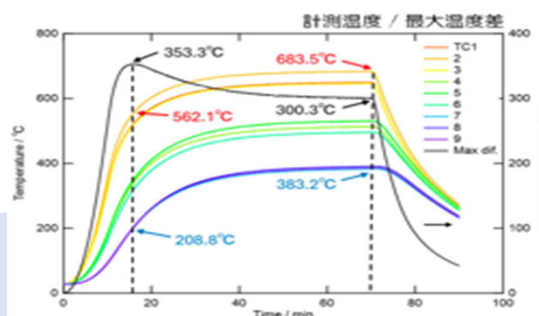
②セルの精密シミュレーション



③過酷試験装置開発

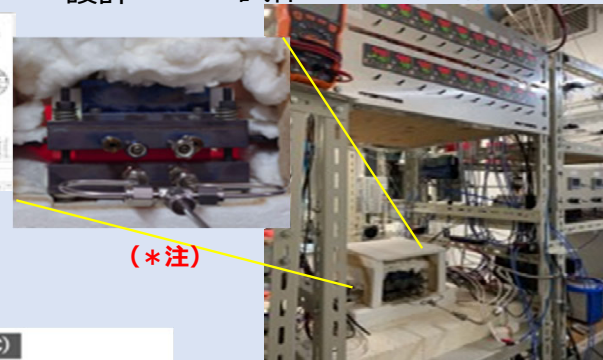
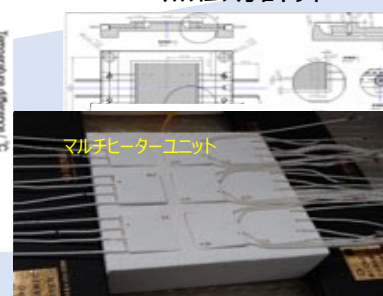


スタックの急速起動停止
(<30min.)に必要な条件
セル内温度差
> 350 K
でのセルの過酷試験が可能となった

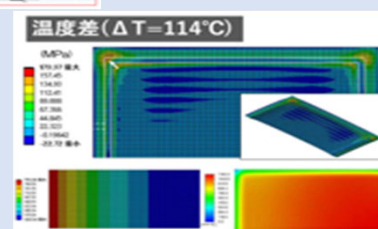


③過酷試験装置の開発

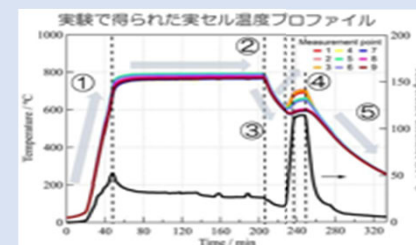
熱伝導計算 → 設計 → 試作 → 予備実験



温度分布
~100°Cでの
セル損傷確
率は低い



セル応力シミュレーション



*) セルホルダのデザインをJapan Mobility Showでのデンソーの展示に利用

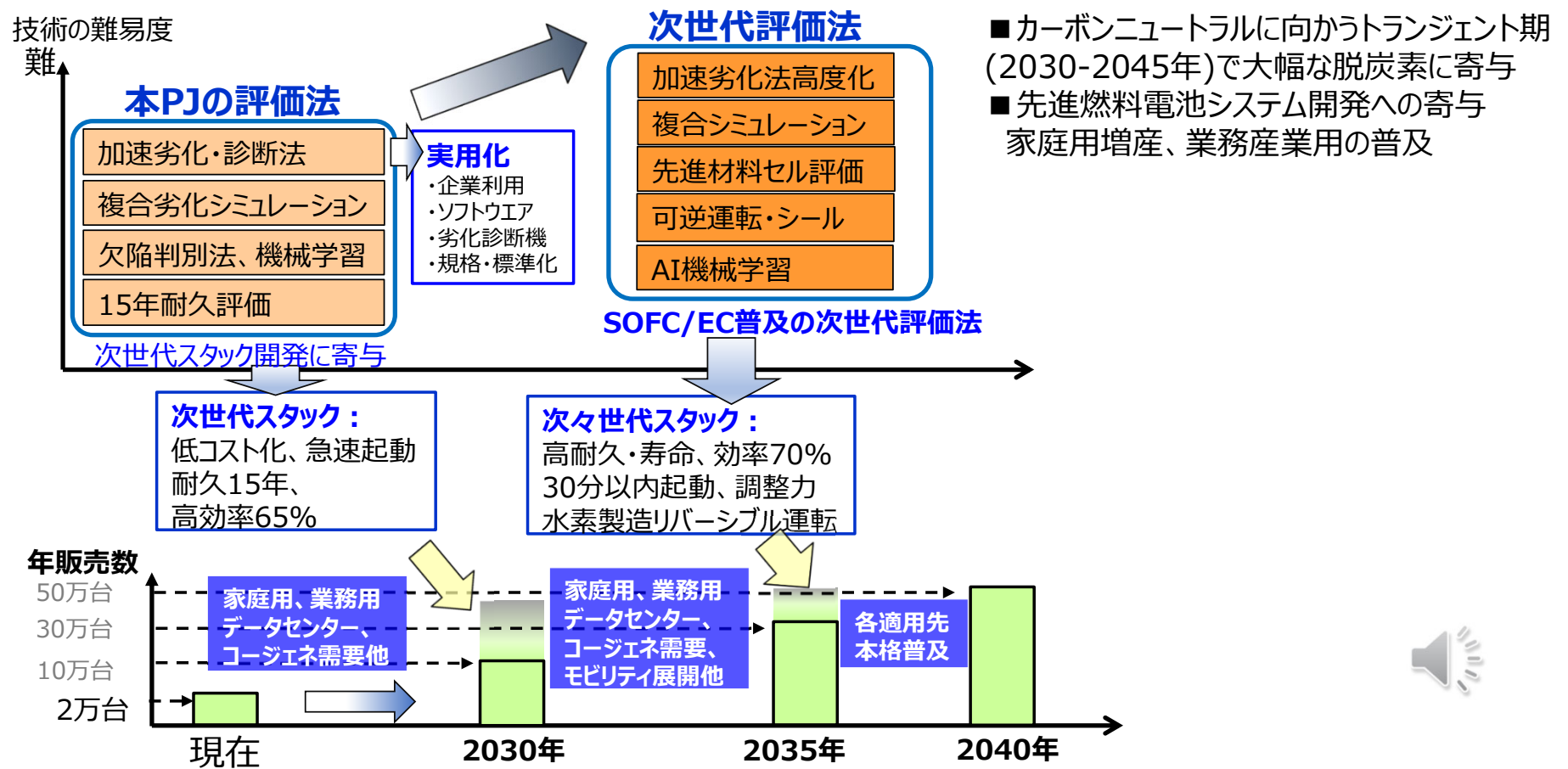
3. 研究開発成果：成果の普及への取り組み

- セルスタックの劣化評価・解析法の開発をおこなうとともに、その劣化メカニズム解明や劣化シミュレーション開発をおこなった。成果はスタック開発企業が持ち帰り、個別のセルスタック開発にフィードバックされ、スタックの性能向上が進んだ。
- 評価・解析法の大部分は、開発セルスタック固有の材料や構造とも関係し秘匿事項が多く、そのため、知財化への取り組みは積極的に行っていなかった。
- 一方、創出される評価法・解析法で一般的な方法や、その原理などは論文化し、注目を集め、学会等での3件の受賞につながった。またシミュレーションソフトなどは汎用ソフトに組み込みを検討した。開発セルの一部は参画企業が知財化を図った。

	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	計
論文(査読付き)	1	18	7	11	8	45件
研究発表・講演	10	40	29	37	37	153件
受賞実績	1	1	0	1	0	3件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0件
展示会への出展	0	0	0	1	0	1件
特許出願				1	1	2件

4. 今後の見通しについて：SOFCシステムの本格普及、適用性拡大、波及効果

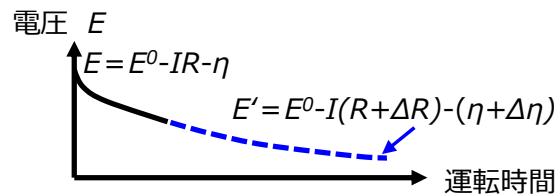
- 開発した評価・解析法の実用化・標準化・高度化を進めることで、さらなる性能向上に寄与
- 開発した評価法を適用して、次世代スタックの開発が進展、高性能化、本格普及に寄与



高効率・長寿命スタックの耐久・寿命を予測できる高度な評価・解析法が確立

目標

① 13万時間(15年)の耐久予測・加速劣化試験法・劣化診断法確立



② 運用性評価法プロトコル策定

- ・急速起動を適正に評価できるプロトコル
- ・システム動特性の評価法

③ 先進劣化評価法の確立

- ・AI機械学習の適用：
電極微構造変化予測、電気化学性能予測
- ・劣化評価法の高度化

成果

- 1) 複合・マルチスケールシミュレーション：
電流分布、応力分布、機械学習
- 2) 性能表示式改良でのスタック耐久予測
- 3) 加速劣化試験法：電流矩形波ほか

- 1) 急速起動プロトコル作成への基礎データ
- 2) システム動特性評価への基礎データ

- 1) AIによる劣化予測可能に
- 2) 電極微構造変化や劣化機構の詳細機構
- 3) 機械的破壊・損傷リスク評価

成果の効果

1. 開発会社に持ち帰り、高耐久・性能化、生産性向上 2030年頃商用へ
2. 開発した評価法シミュレーションは商用ソフトへの組み込みも検討
3. 開発した評価法は、国際標準・規格(IECなど)の技術データへ



ご清聴ありがとうございました

