



2025年 9月 26日 第17回 FC-Cubicオープンシンポジウム

燃料電池システムの先端研究と多様な製品開発の加速を目指した 統合システムシミュレーター FC-DynaMo の開発

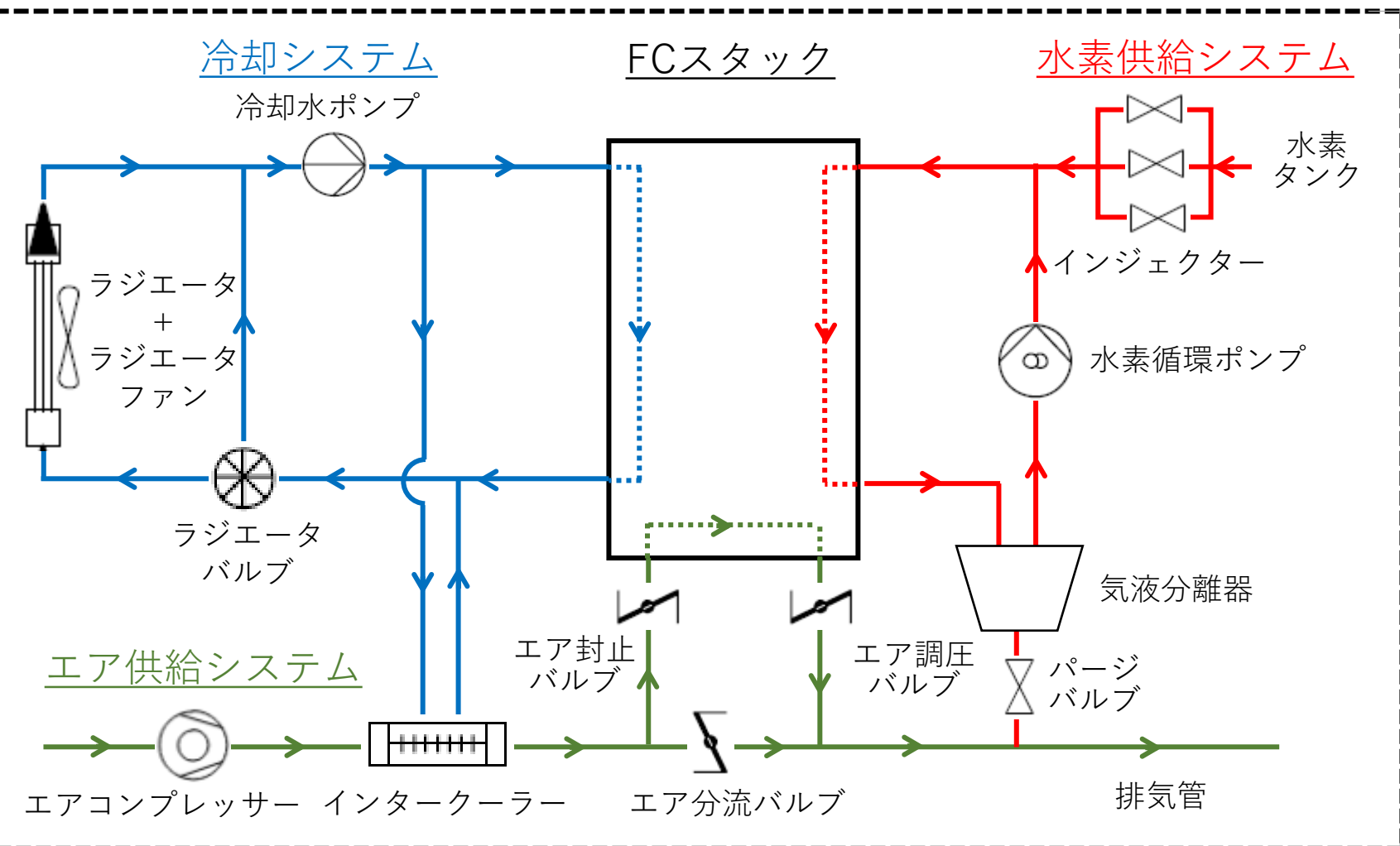
長谷川 茂樹^{*}, 金 尚弘^{**}, 影山 美帆^{*}, 河瀬 元明^{*}

^{*} 京都大学 大学院工学研究科 化学工学専攻 反応工学分野

^{**} 東京農工大学 大学院工学研究院 応用化学部門

s.hasegawa@cheme.kyoto-u.ac.jp

1. 背景：燃料電池 (FC) システム概要と開発課題



システム	補機
FCスタック	—
エア供給	エアコンプレッサ 調圧・分流・封止バルブ インタークーラー
水素供給	インジェクタ 水素循環ポンプ パージバルブ
冷却	冷却水ポンプ 分流バルブ ラジエータ+ファン
高電圧	DC/DCコンバーター モーター・インバーター

FCシステムの性能は、FCスタック自体の性能に加え、補器損失や冷却性能も影響
 各機器の制約条件を考慮し、システム全体を「パッケージ」として設計するプロセスが必要
 → [課題] 種々の組み合わせを「造って試す」プロセスによる開発費・期間の負担大

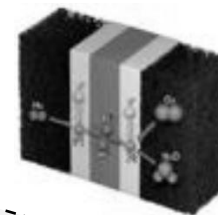
1. 背景：FC分野での専門家間の連携面での課題

制御開発部署

ソフトウェア工学
最適化数学



MEA (発電素子)開発部署



材料科学
電気化学

MATLAB
& SIMULINK

gPROMS

AMESim



Simscape

GT Gamma Technologies

STAR-CCM+

Ansys

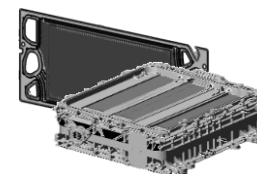


システム機器開発部署

機械力学
熱力学



セル・スタック開発部署



流体力学
材料力学

FCシステム開発には学際的な専門家の結集・密な連携が不可欠も、
他分野の専門家間の知識ギャップ&分野ごとの開発ツールの学習コストが連携を阻害

1. 背景：FC分野での専門家間の連携面での課題

制御開発部署

ソフトウェア工学
最適化数学



MEA開発部署

材料科学
電気化学



MATLAB
& SIMULINK

共通言語



gPROMS

AMESim



GT
Gamma Technologies



Ansys

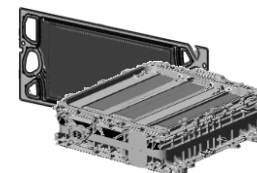
システム機器開発部署

機械力学
熱力学

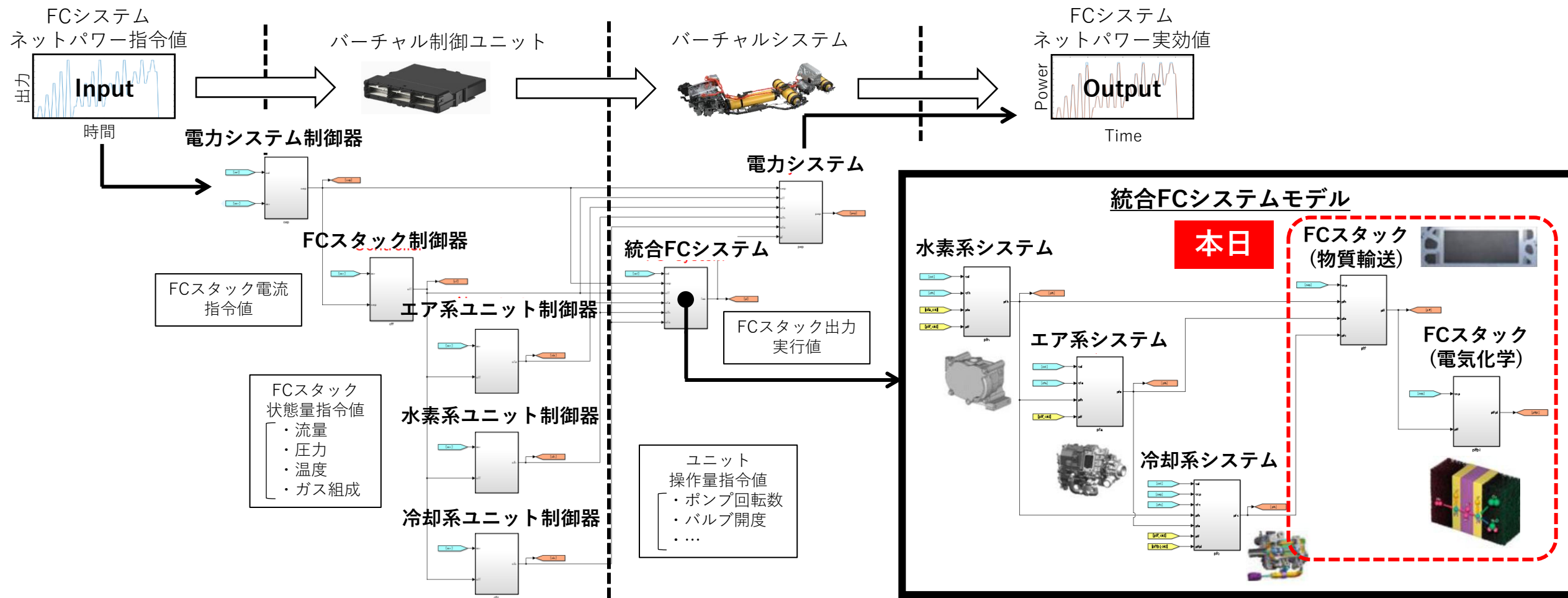


セル・スタック開発部署

流体力学
材料力学



目指す姿：「共通言語」となる開発ツールを介して各専門家間の密な連携を促進協業によるシナジーを生み、システム進化/深化 & 幅広いアプリケーション創出



特徴

ユーザーのメリット

- | | | |
|-------|-----------------------------------|----------------------------|
| ① 網羅性 | FC材料～システム部品～制御(使い方)モデルを包含 | 複数ツールの学習コスト不要 |
| ② 精度 | 市販FCEV (第2世代MIRAI) の実機データによる検証実績 | ユーザー毎の精度検証が不要 |
| ③ 速度 | 汎用PCで実時間の40倍の演算時間 | 1年間の耐久評価を1週間で代替可能 |
| ④ 運用性 | 工学分野のデファクト言語 MATLAB/Simulinkのみで動作 | 特別な計算機・ソフト導入や環境構築の負担なく活用可能 |

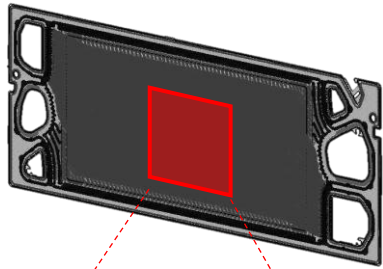
3. FCスタックモデル：概要

対象部品

考慮する物性

対象とする物理現象

セル

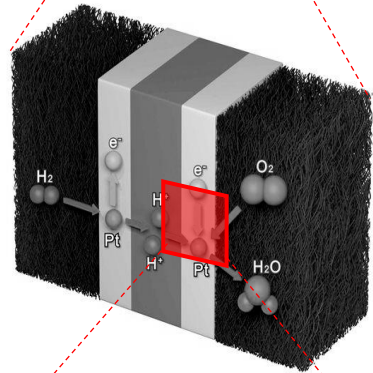


流路

- ・ 流路幅
- ・ リブ幅
- ・ 長さ

- ・ 圧損（フラッディング考慮）
- ・ 面内分布を考慮した H_2 , O_2 , N_2 , H_2O の平均状態量（→積分平均ガス分圧）

MEA



GDL, MPL

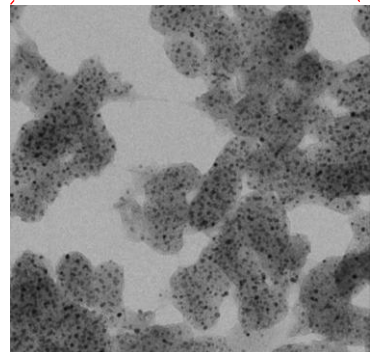
- ・ 厚さ
- ・ 気孔率
- ・ 平均細孔径

PEM

- ・ 厚さ
 - ・ EW
 - ・ 乾燥密度
 - ・ 含水特性
 - ・ H^+ 伝導度
- 湿度
依存性

- ・ GDL, MPLでの濃度変化
- ・ PEM含水量
- ・ クロスオーバー流量 (H_2 , O_2 , N_2)
- ・ H_2O 流量（生成, ドラッグ, 拡散）
- ・ 過電圧（抵抗）

触媒層

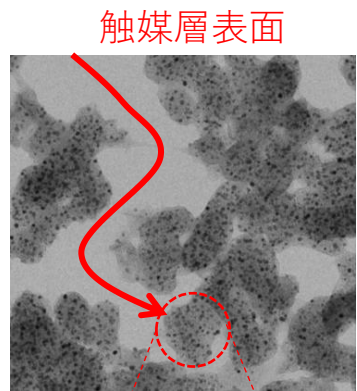


- ・ ガス輸送抵抗
 - ・ H^+ 輸送抵抗
 - ・ Pt物性
 - ・ 表面積
 - ・ 比活性
- 湿度
依存性

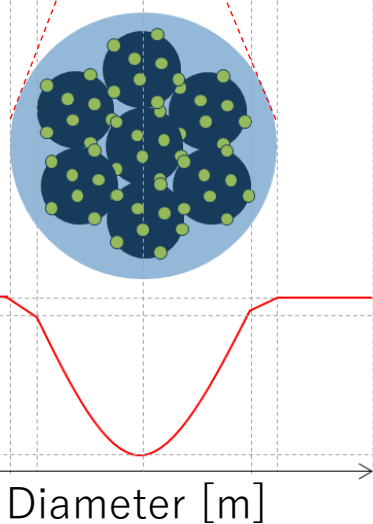
- ・ 触媒層表面→Pt表面の濃度変化
- ・ 厚さ方向のPt利用率分布
- ・ 過電圧（活性化, 濃度）
- ・ 発熱速度
- ・ 直接燃焼反応速度（→始動停止時の電圧変化）

3. FCスタックモデル：触媒層内のガス輸送モデル

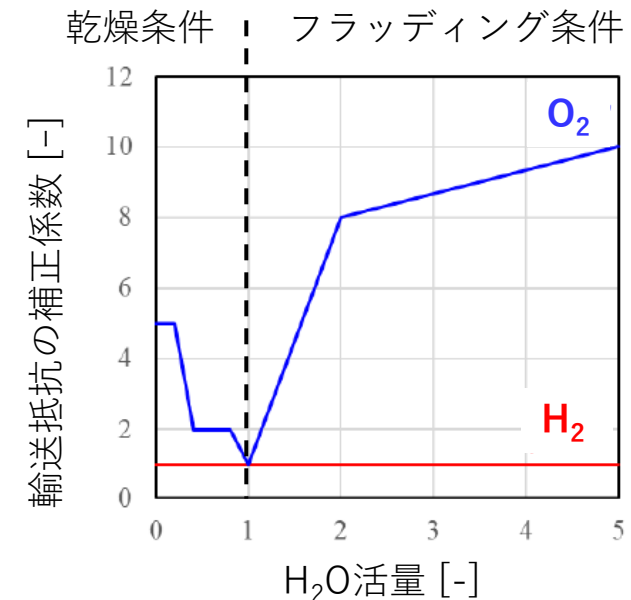
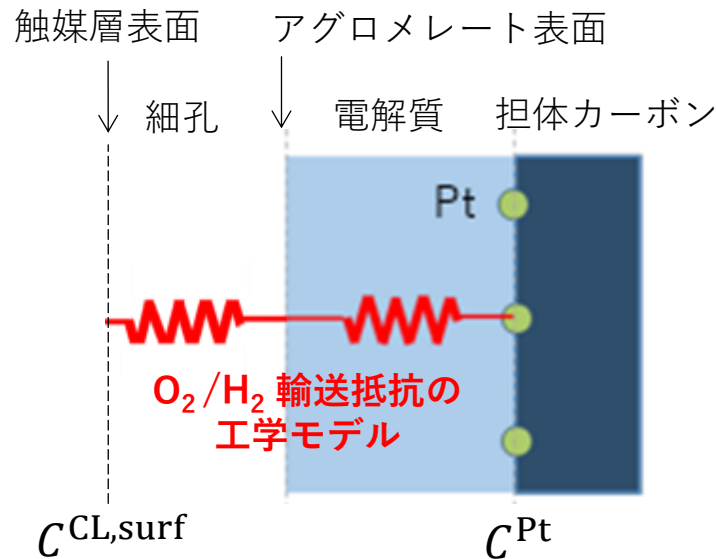
微小細孔・アグロメレート内の O_2/H_2 輸送



触媒層表面
アグロメレート表面



O_2/H_2 輸送抵抗モデル



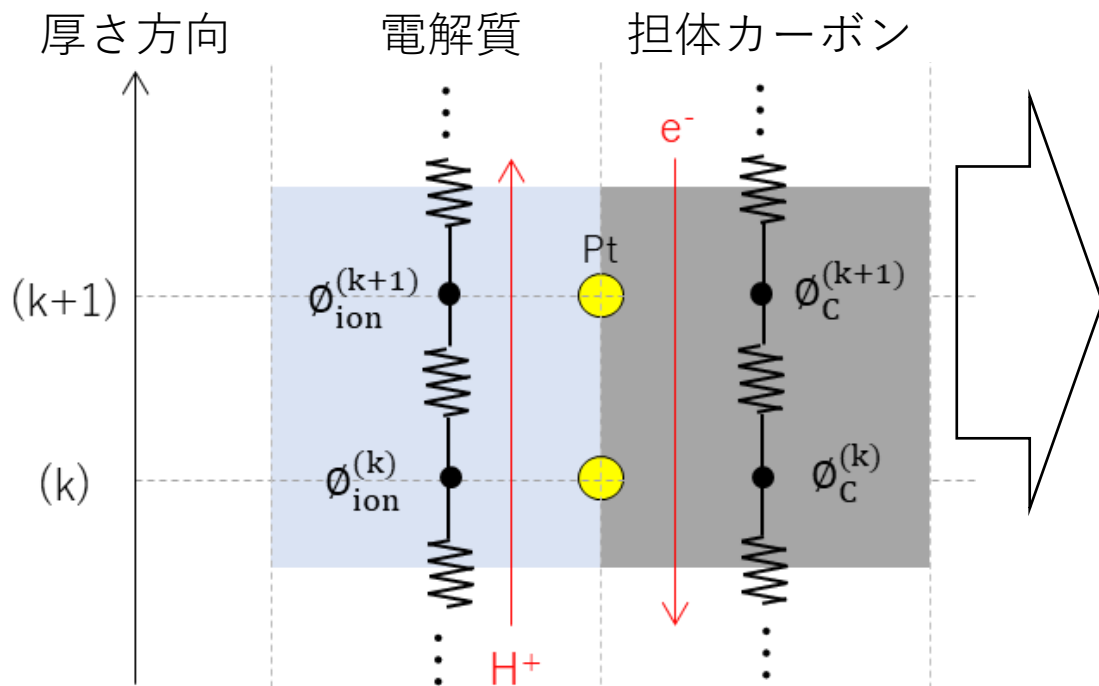
濃度過電圧 (Butler-Volmer式)

$$\Delta\Phi = -\gamma \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left\{ \frac{C^{CL,surf}}{C^{ref}} \left(1 - \frac{i}{\frac{4FC^{CL,surf}}{R_{O_2}^{eff}}} \right)^{\tau_{agg}} \right\}$$

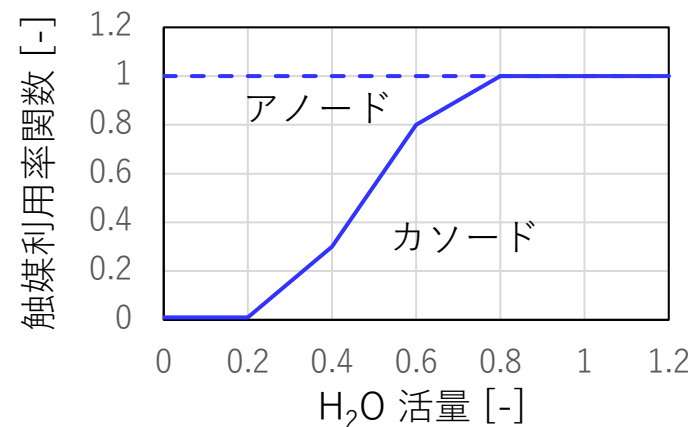
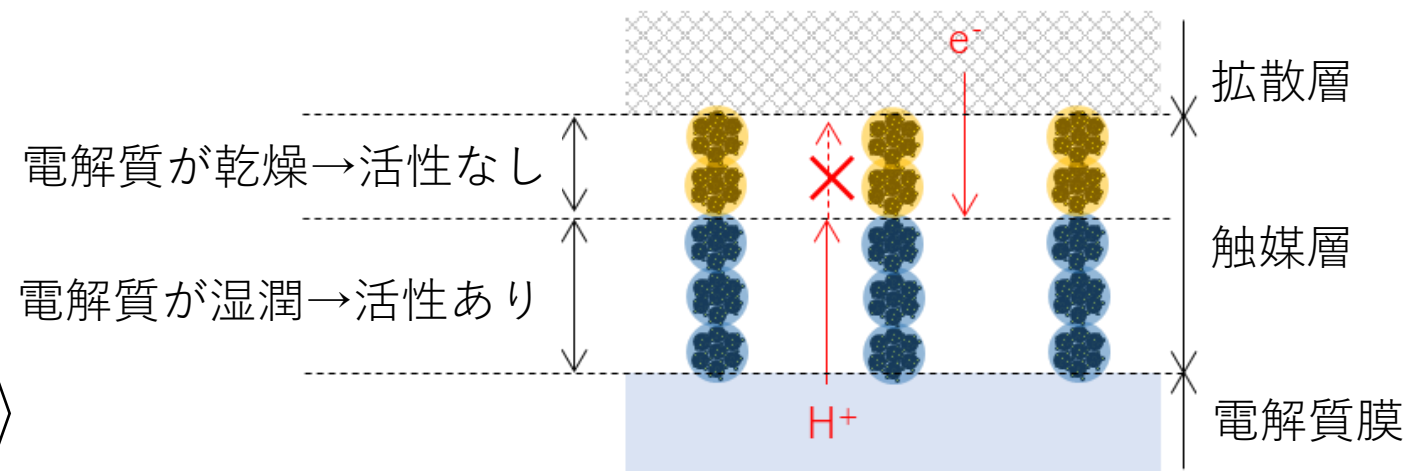
局所のガス経路（細孔径・アイオノマ厚さ・屈曲構造）やその分布の計測・定量化は困難
→ 半物理モデル表現により、実務で使いやすい粒度の物性定義・収束演算回避による速度向上

3. FCスタックモデル：触媒層内のH⁺輸送モデル

厚さ方向のH⁺, e⁻の電荷保存



厚さ方向の触媒利用率の工学モデル



活性化過電圧 (Butler-Volmer式)

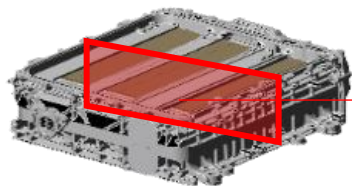
$$\Delta\Phi = \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right)$$

触媒活性パラメータ
(交換電流密度)

局所のH⁺経路（アイオノマ厚さ・カーボン径・屈曲構造）やその分布の計測・定量化は困難
→ 半物理モデル表現により、実務で使いやすい粒度の物性定義・収束演算回避による速度向上

3. FCスタックモデル：パラメータ同定

FCスタック

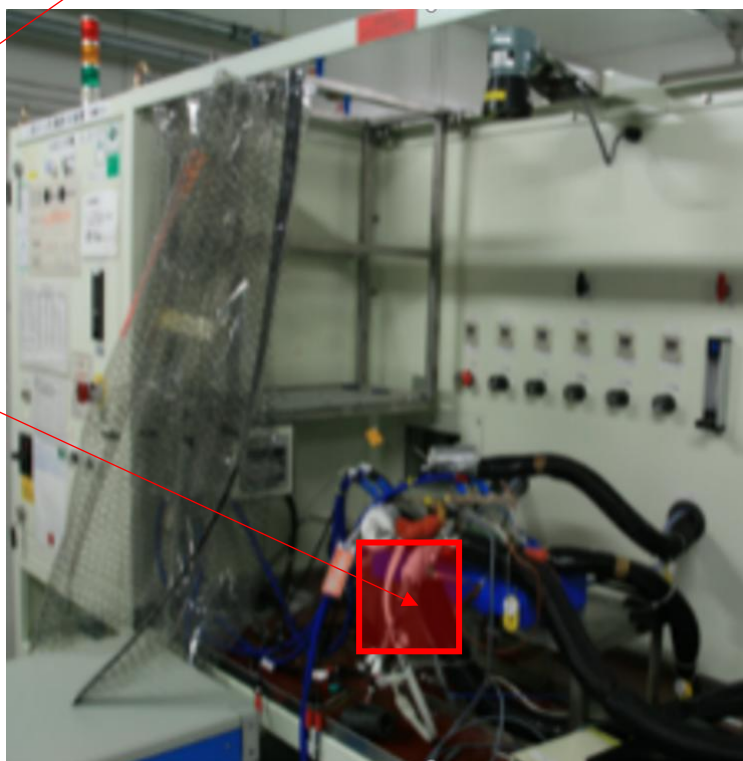


単セル

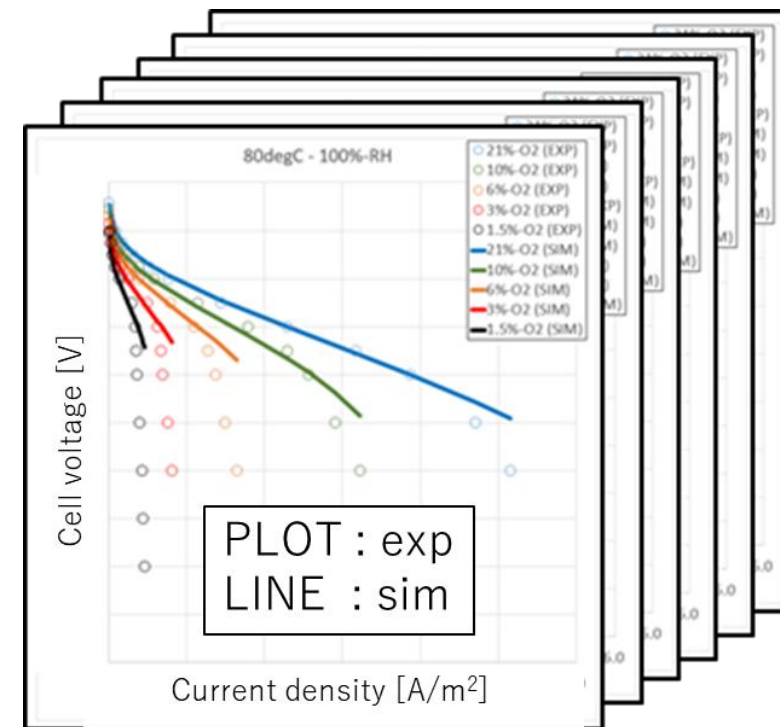


小セル (1cm²)

小セルベンチ



小セル実験データ (MIRAI MEA)



小セル境界条件

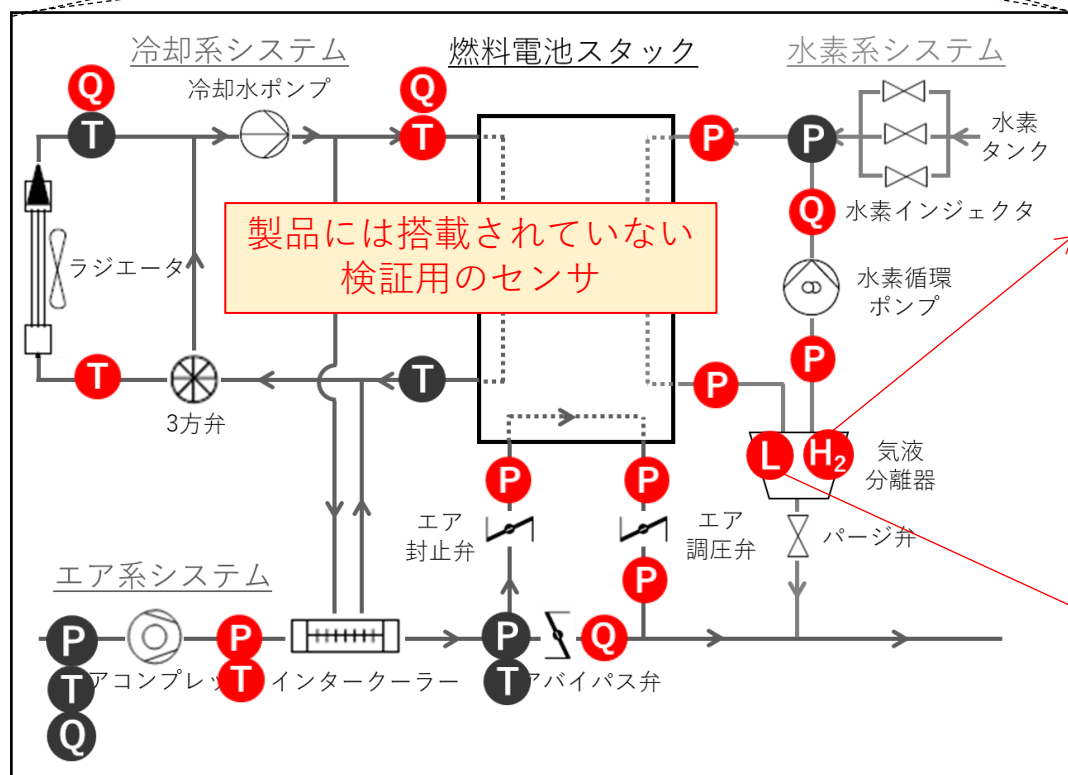
27条件の
I-V、I-R特性
(5 × 5 + 2)

- 5 湿度 (100, 80, 60, 40, 20%)
- 5 O₂ 濃度 (21, 10, 6, 3, 1%)
- 3 冷却水温度 (80 + 40, 60 °C)

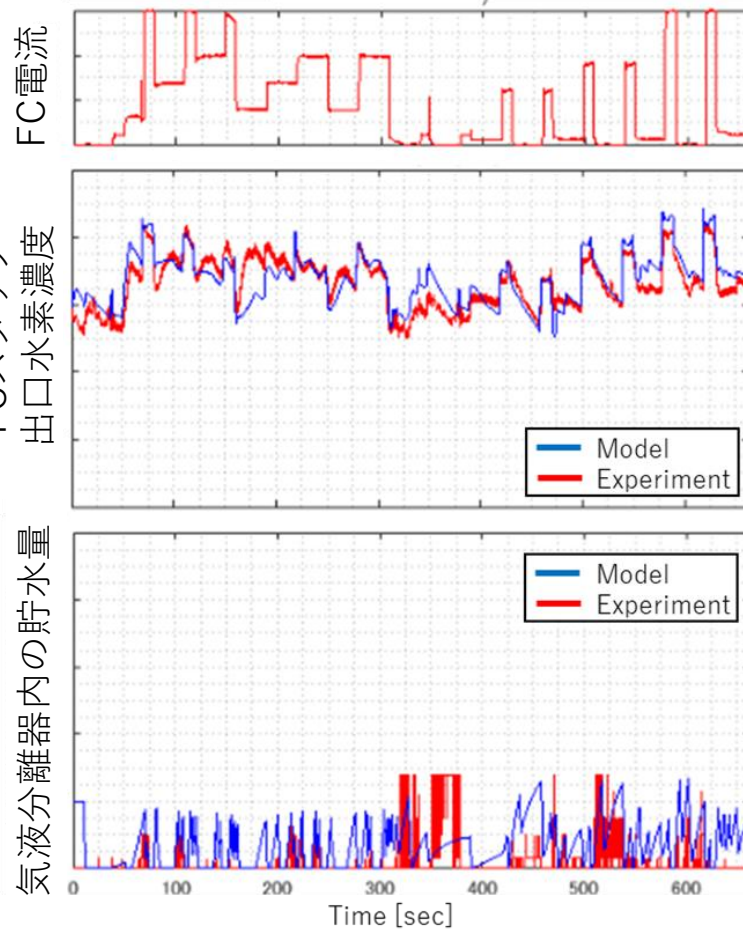
SEM画像 (厚さ・気孔率・気孔径 etc.) + 小セルデータから、FC材料パラメータを決定
パラメータ決定のために、フルサイズのセル・スタックでの試験データを必要としない

3. シミュレーション結果：精度検証（輸送・反応速度）

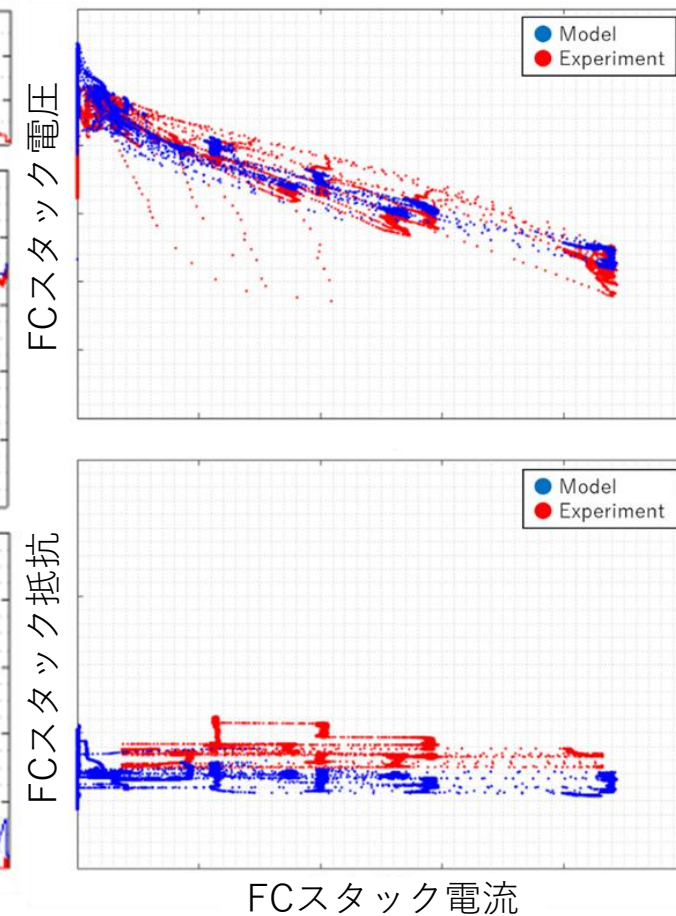
プロト車両・システム



システム動特性（水素系）



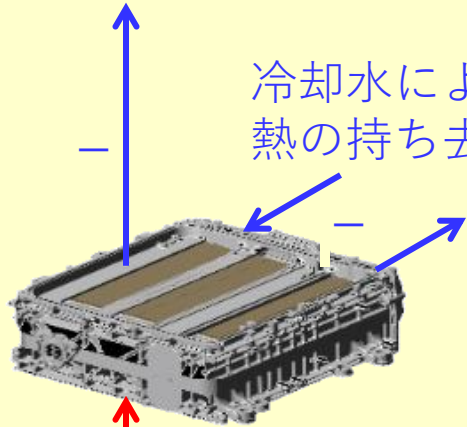
FCスタック性能



I-V特性に加え、アノード・カソードのガス組成、排水量を精度よく再現
→ 水マネ・排気水素損失を考慮しつつ、FC材料・システム機器・制御を最適設計できる

FCスタック熱バランス

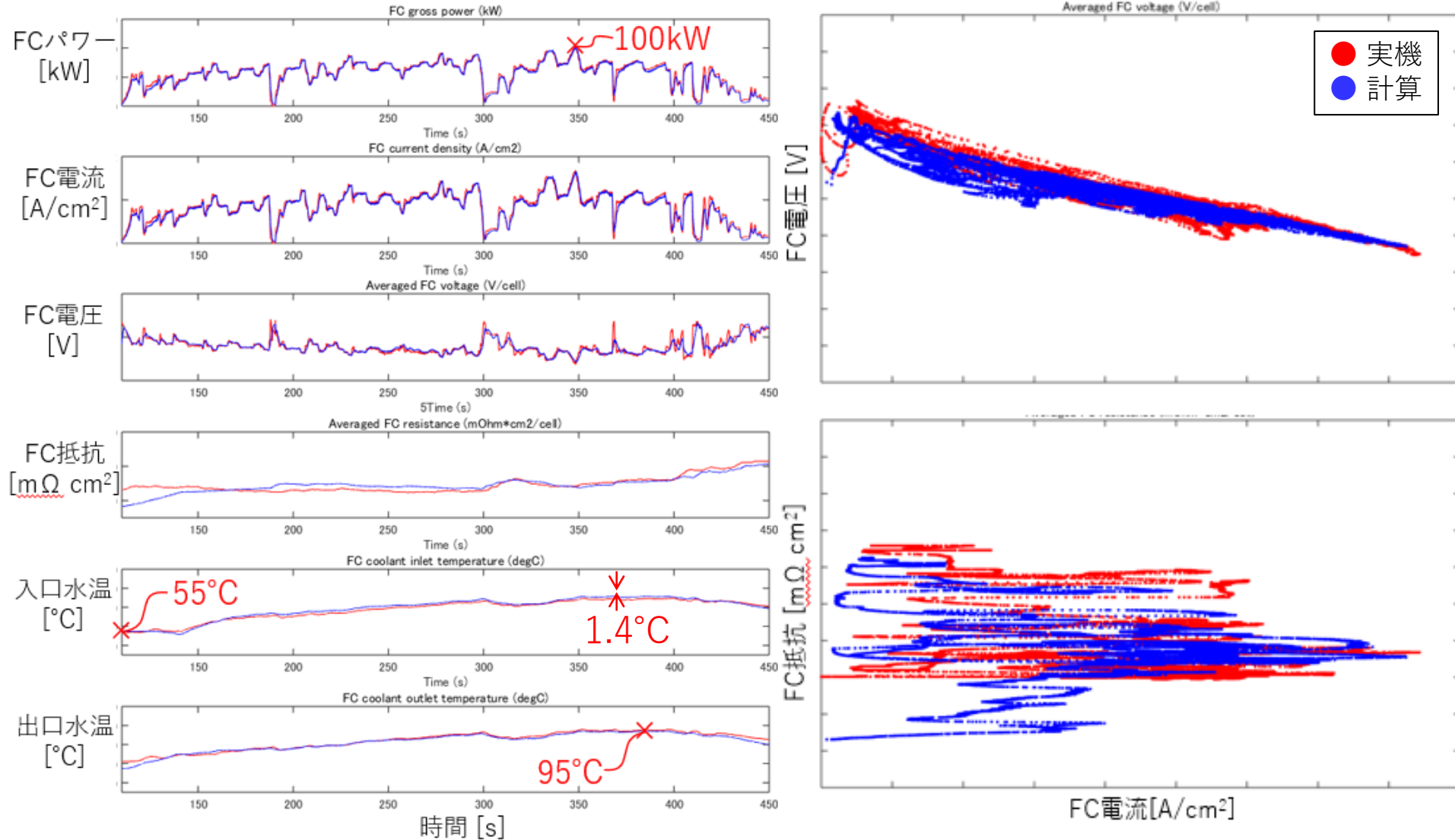
外表面からの
熱の持ち去り



冷却水による
熱の持ち去り

- ・電気化学反応
- ・直接燃焼反応
- ・生成水中の
蒸気/液水割合

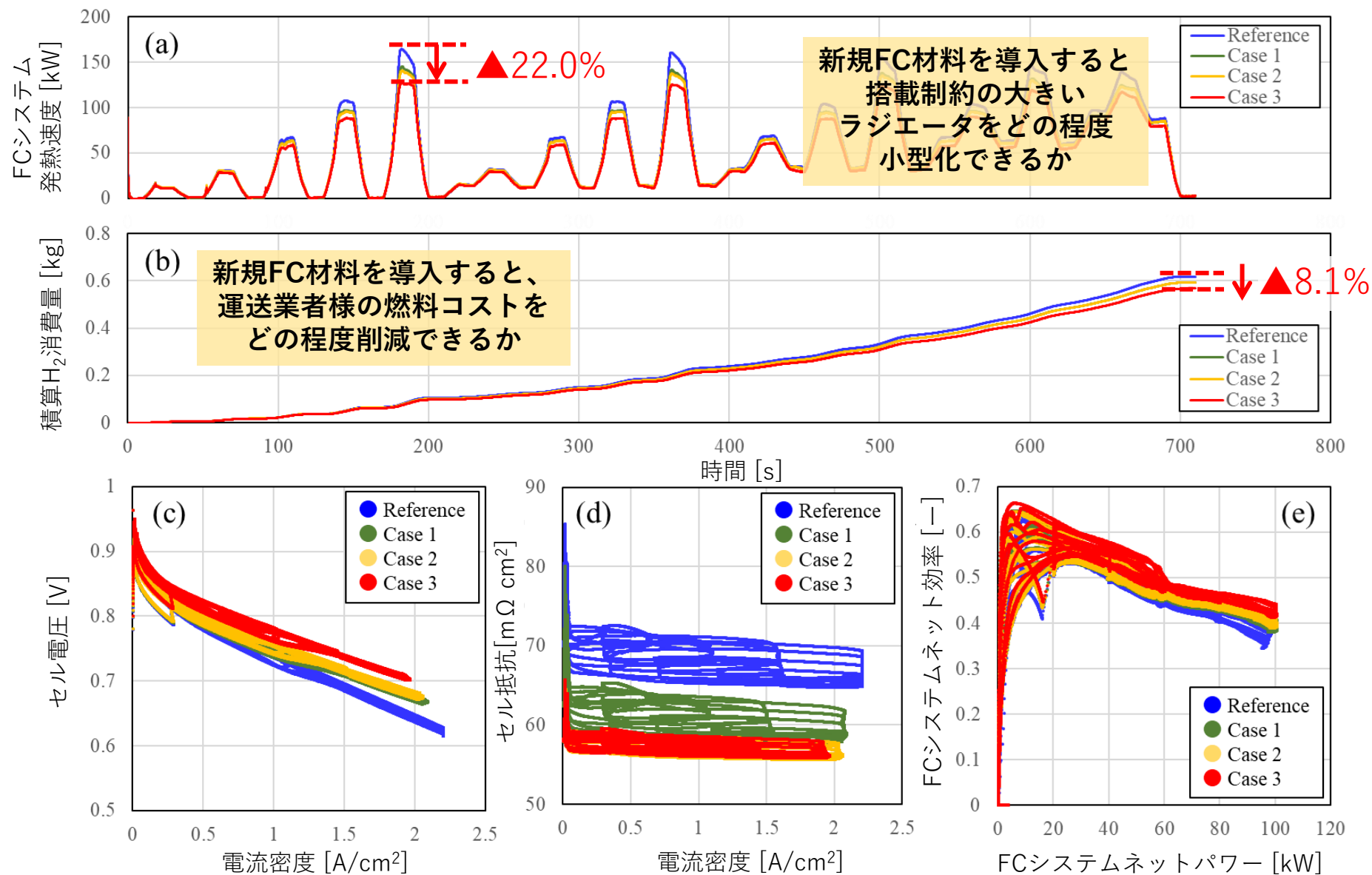
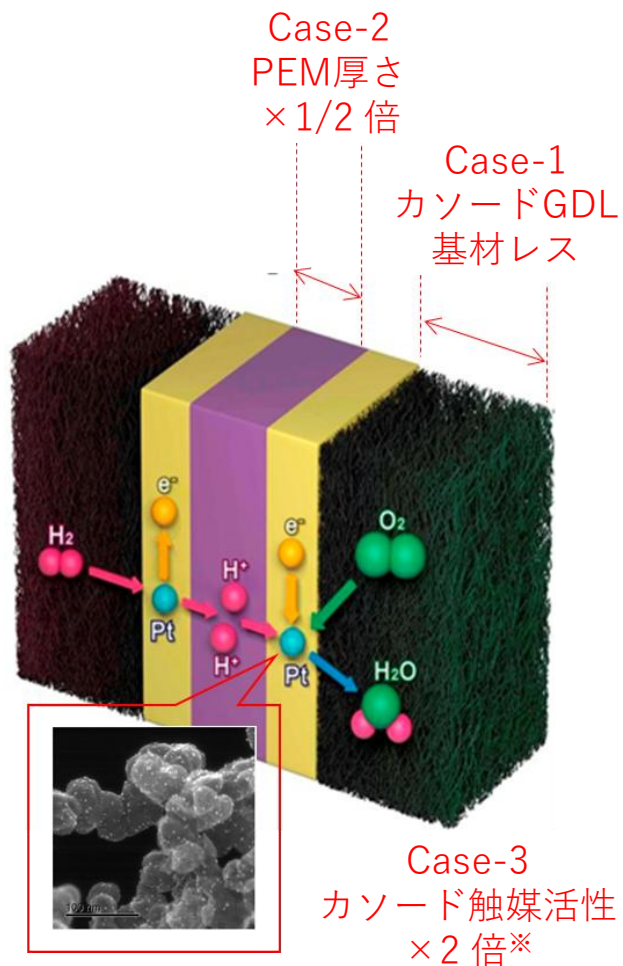
反応熱



I-V特性に加えて、高温・高負荷運転中の過渡の温度上昇挙動を精度よく再現

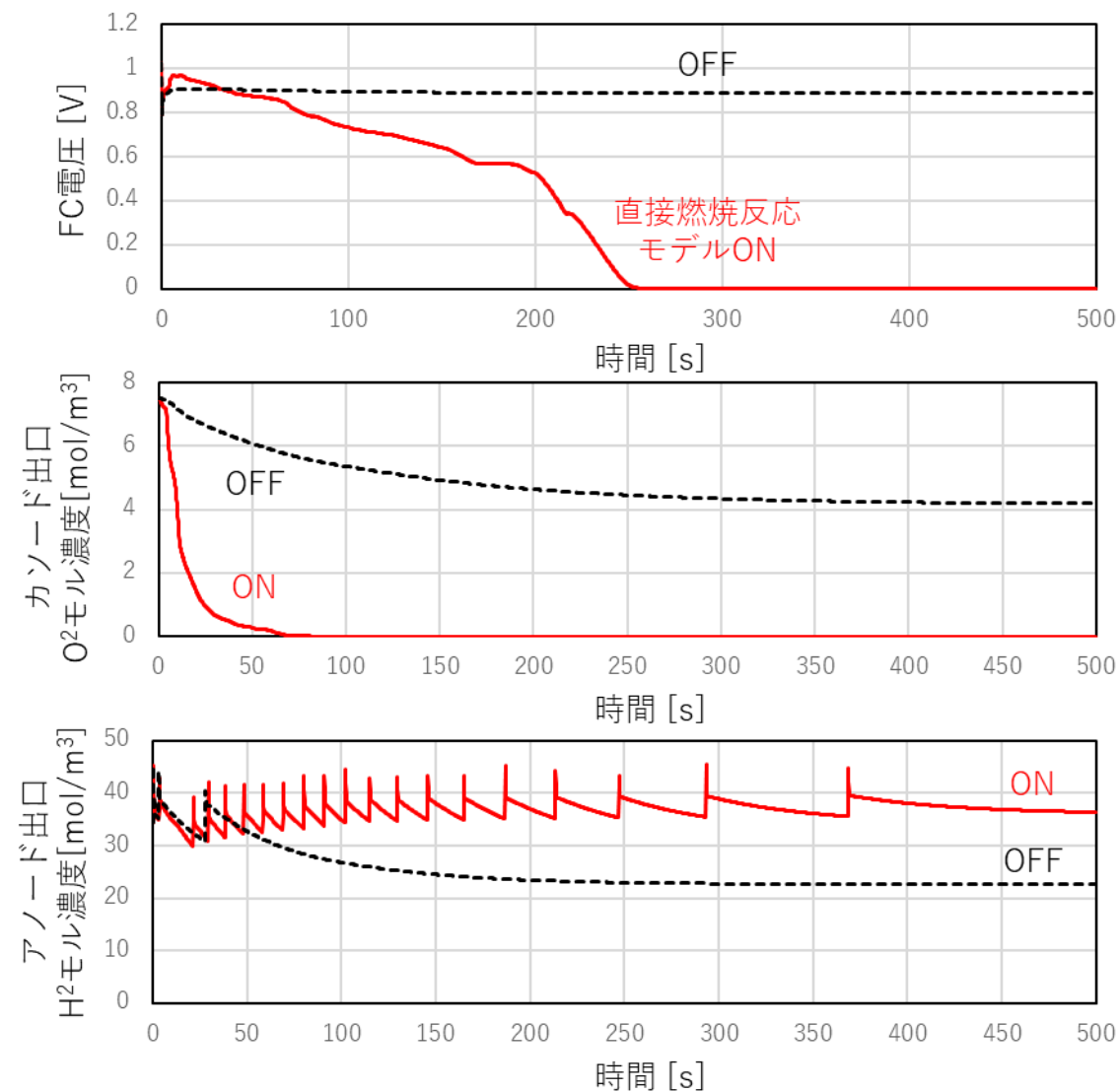
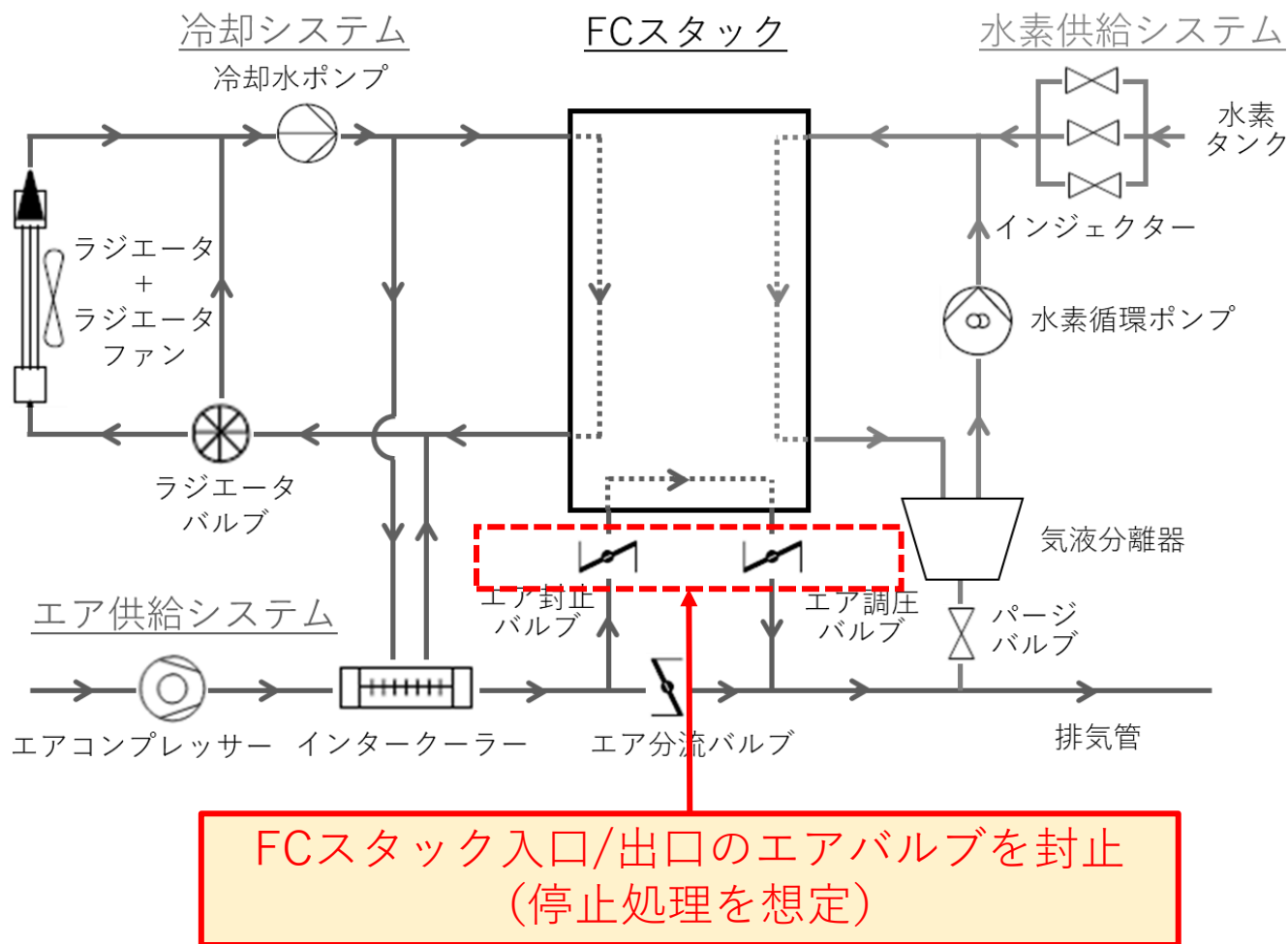
→ システム性能に影響大の熱制約を考慮しつつ、FC材料・システム機器・制御を最適設計できる

3. シミュレーション結果：活用事例（材料-システム連成計算）



FC材料特性-システム全体の性能との相関関係を明確化 「先端材料の導入でMIRAI燃費を〇〇%向上できる」
→ 「システム性能の未達分を、FC材料・システム部品・制御の改善にどう割り付けるか」の机上検討が可能

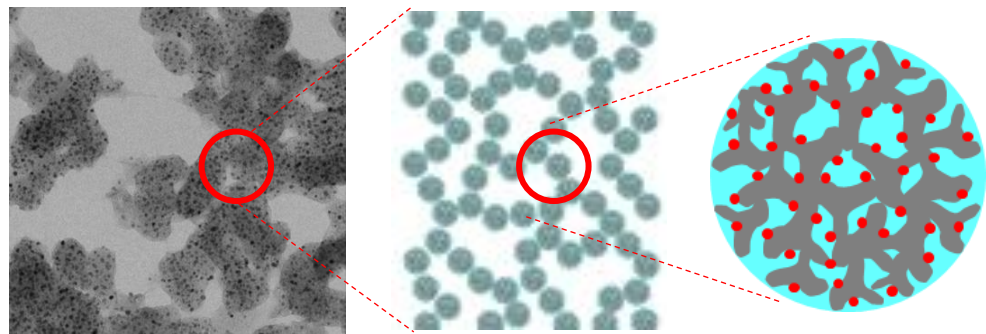
3. シミュレーション結果：活用事例（停止処理中の電圧挙動解析）



セル・MEA内の物質輸送・発電モデルに加えて、クロスオーバー・直接燃焼反応によるガス消費を表現
→ 直接燃焼反応に伴う停止処理中の過渡の電圧挙動や、燃費影響等の幅広い活用が可能

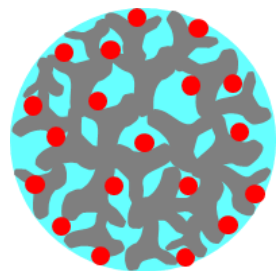
3. シミュレーション結果：FC材料劣化モデル (Pt, 担体カーボン)

初期状態 (BOL)

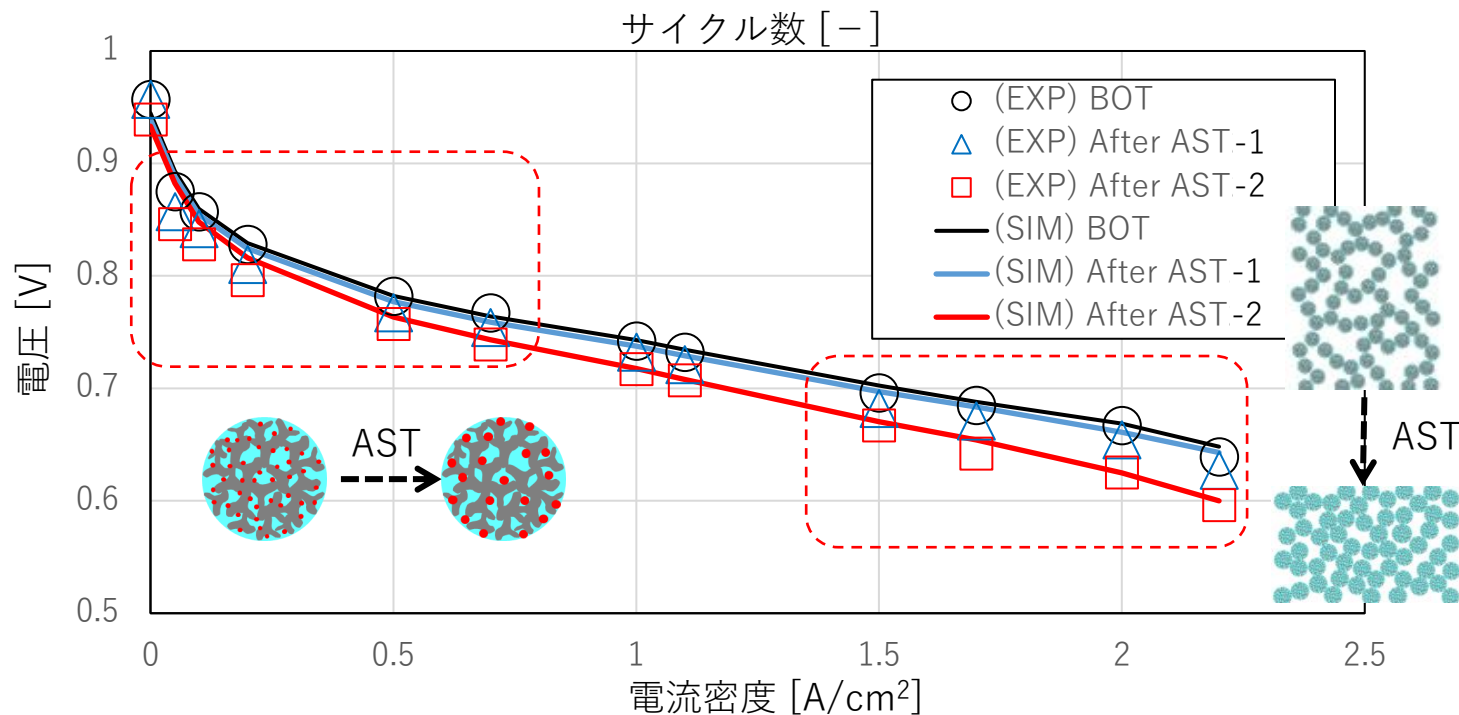
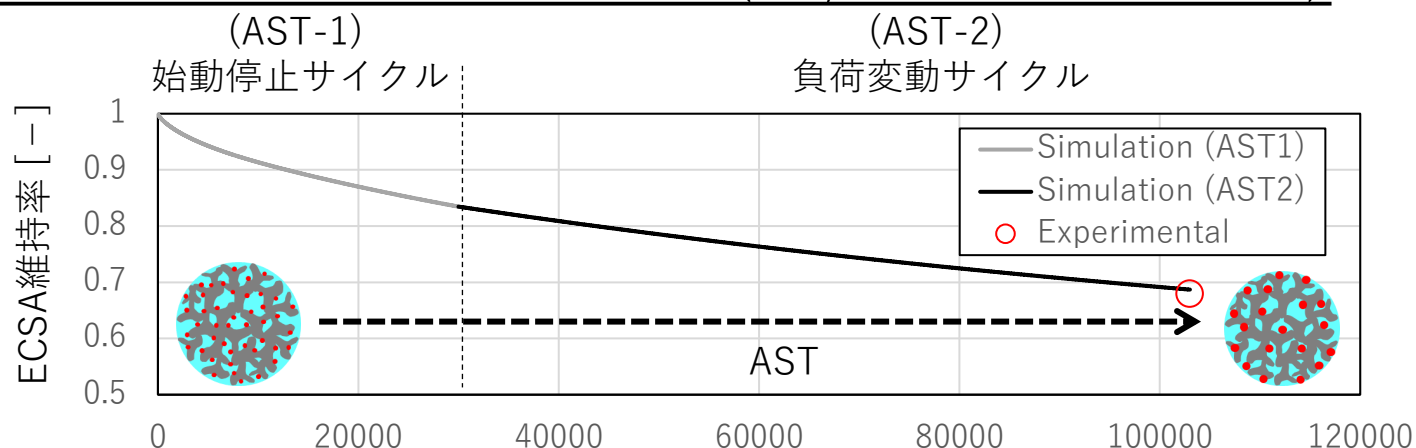
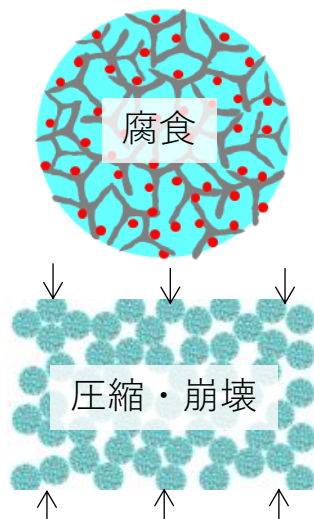


加速試験 (AST)

Pt粒成長



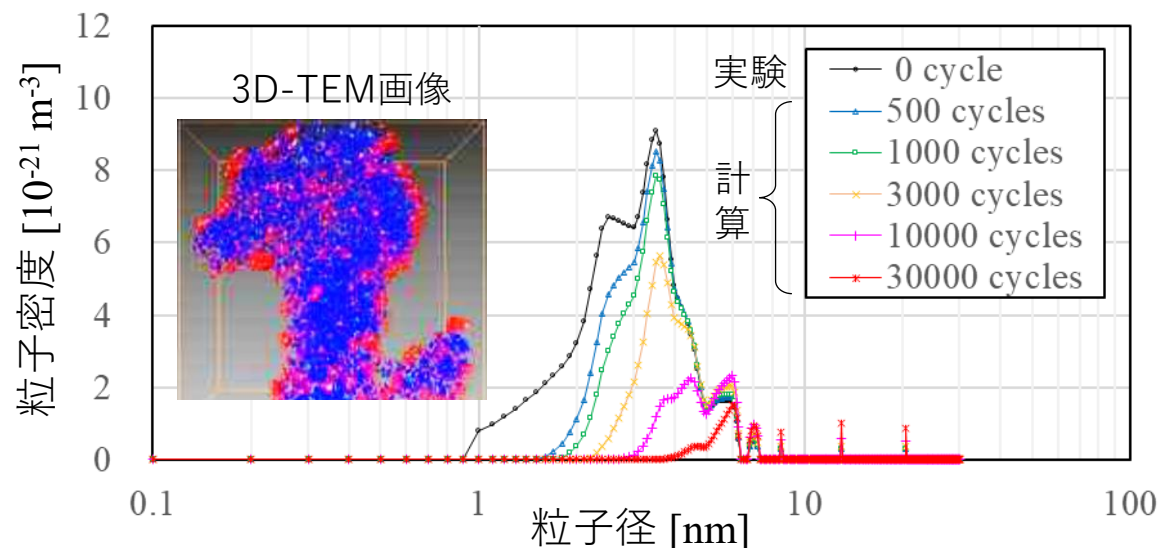
カーボン腐食



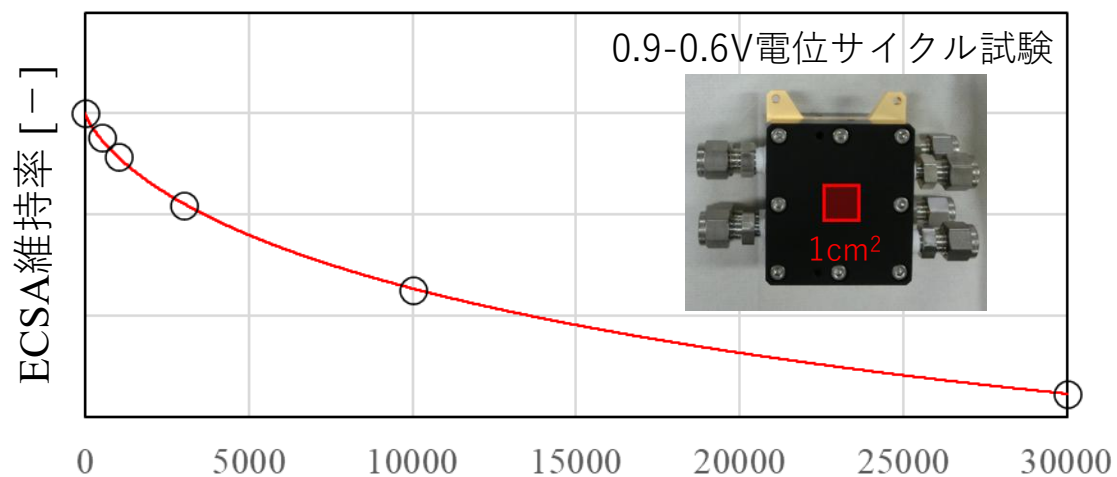
新規開発のPt・C劣化モデルでMIRAIスタック耐久試験の公開データを精度良く再現した

3. シミュレーション結果：FC材料劣化モデル (Pt, 担体カーボン) 15 / 19

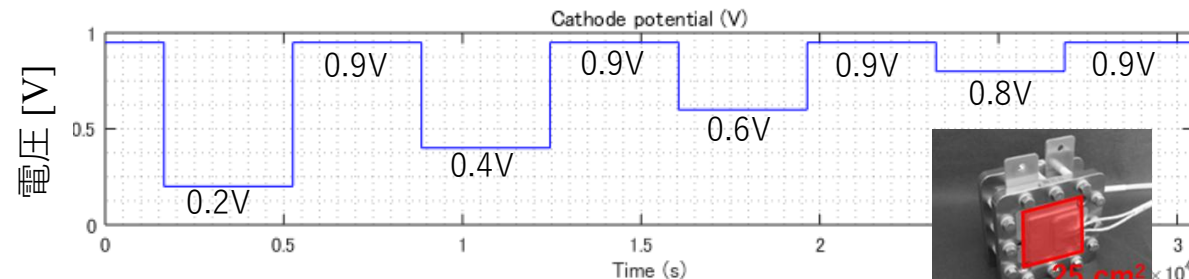
Pt劣化モデル：3D-TEM 初期Pt粒径分布 (FC-Cubic様)



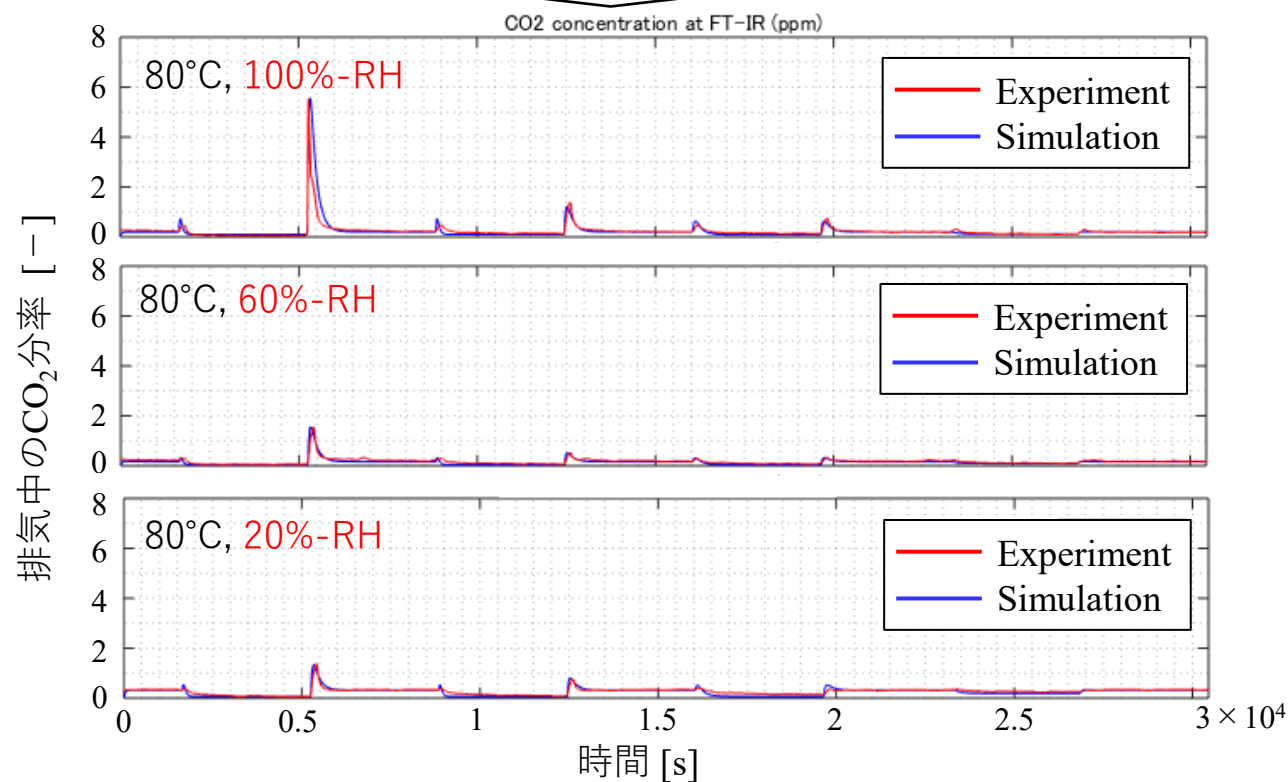
速度パラメータ同定



C担体劣化モデル：FT-IR セル出口CO₂計測 (京大, JARI様)



速度パラメータ同定



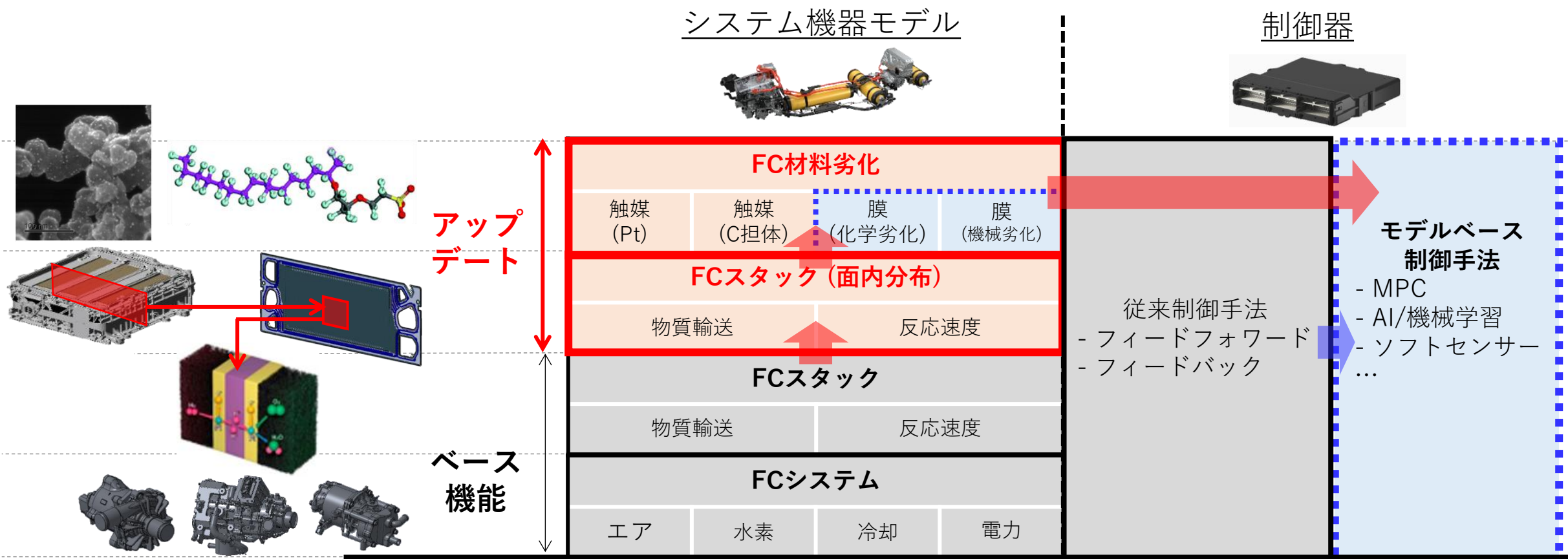
パラメータ同定にはT/Pデータのみ使用、フルサイズセル・スタックデータは不要

3. シミュレーション結果：計算速度

シミュレーション構成	計算速度
ベースモデル	42 倍
ベースモデル + Pt劣化モデル	37 倍
ベースモデル Pt劣化モデル C担体劣化モデル	37 倍

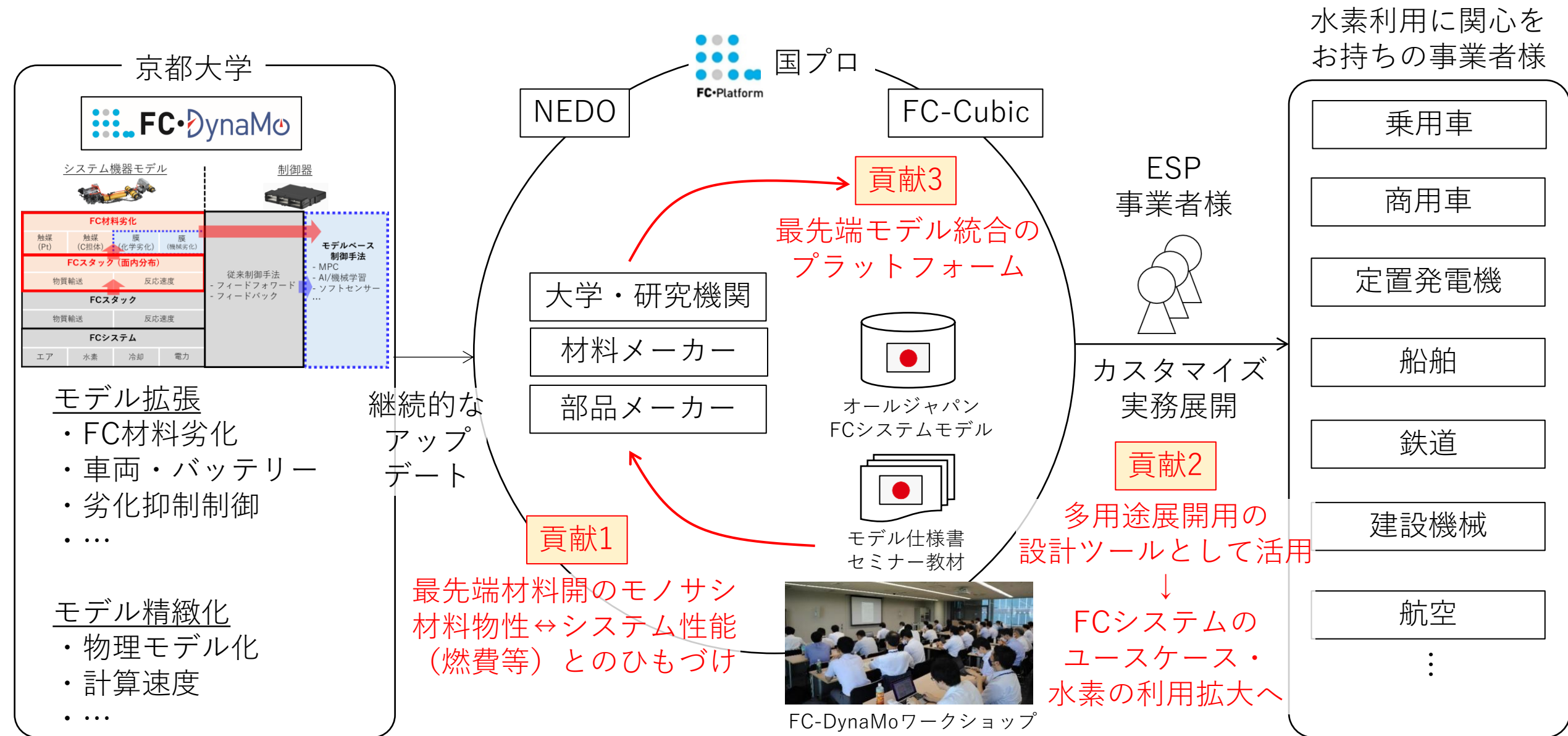
1年間の耐久シミュレーションを1週間程度で完了できる計算速度
後継プロジェクトでさらなる速度向上へ向けたモデル改善を検討中

4. 今後の方針：FC・DynaMo 開発ロードマップ



- 劣化モデルの機能拡張 : 膜化学劣化・機械劣化モデルの開発・統合
 - 劣化抑制制御 : 性能(動力・燃費・熱)を維持しつつ劣化抑制が可能な制御方法、最新材料の使いこなし
 - 耐久パターン : 車両+バッテリーモデルの追加、車速を入力とした実路パターンによるシミュレーション
- ユーザーからのフィードバックを受けて継続的なアップデートを実施する

4. 今後の方針：オールジャパンモデル開発&活用



謝 辞

本研究は、NEDO 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  **FC-Platform** の一環で実施されました。

ユーザーの皆様からのご活用結果のフィードバックやニーズ発信、
FC-Cubic様からのご支援・プロジェクトメンバーの先生方からのご指導を
受けて開発方針の企画と日々のモデル改善を進めて参りました。