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／
Collaborative Industry-Academia-Government R&D Project for Solving Common Challenges Toward Dramatically Expanded Use of Fuel Cells and Related Equipment/
共通課題解決型基盤技術開発／
Development of Fundamental Technologies for Solving Common Fuel Cell Challenges/

第5回 FC-Cubic オープンシンポジウム

モデルベースFCシステム開発用シミュレータ開発

京都大学 工学研究科 化学工学専攻
長谷川 茂樹

報告内容

1. FCEV開発現場での課題
2. ソリューション提案：FCシステム統合シミュレーター
   - どのようなものか
   - どう貢献するか
3. 「MIRAIシステムシミュレータ」から、
   「オールジャパンFCシステムシミュレータ」へ
4. 今後の展望

報告内容

1. FCEV開発現場での課題

2. ソリューション提案：FCシステム統合シミュレーター

・どのようなものか

・どう貢献するか

3. 「MIRAIシステムシミュレータ」から、
「オールジャパンFCシステムシミュレータ」へ

4. 今後の展望

1. FCEV開発プロセスの課題

設計フェーズ

評価フェーズ

製品企画

システム設計

ユニット設計

制御設計

試作車

システム試作機

ユニット試作機

ECU試作機

実機適合＆手直し
の繰り返し

…

システム検証 (ハードと制御のマッチング等)は試作完了まで不可

期間

課題：複雑なシステム構成 ＆ 十分な知見の蓄積無し
→「造って試す」に頼ったプロセスでの開発負担大

1. FCEV開発プロセスの課題

設計フェーズ

評価フェーズ

製品企画

バーチャルFCEV

試作車

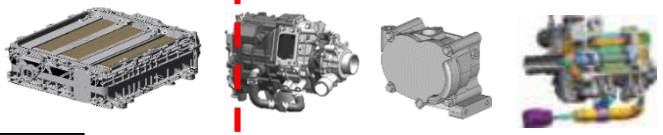
広範なユニット・制御の仕様を
試作機を作ることなく机上で確認
↓
設計段階で
費用をかけずに有望な
仕様を造りこむ

システム設計

システム試作機

ユニット設計

ユニット試作機



制御設計

ECU試作機

評価ではこれまでの知見になかった新規の現象や課題をあぶりだす
→ 四隅のシビア条件により時間をかけることができるようになる

期間

狙い：机上で有望なユニット・制御仕様の造りこみを可能とする「バーチャルFCEV」
→ 材料開発・システム設計のための試作コスト・検討期間を低減する

報告内容

1. FCEV開発現場での課題

2. ソリューション提案：FCシステム統合シミュレーター

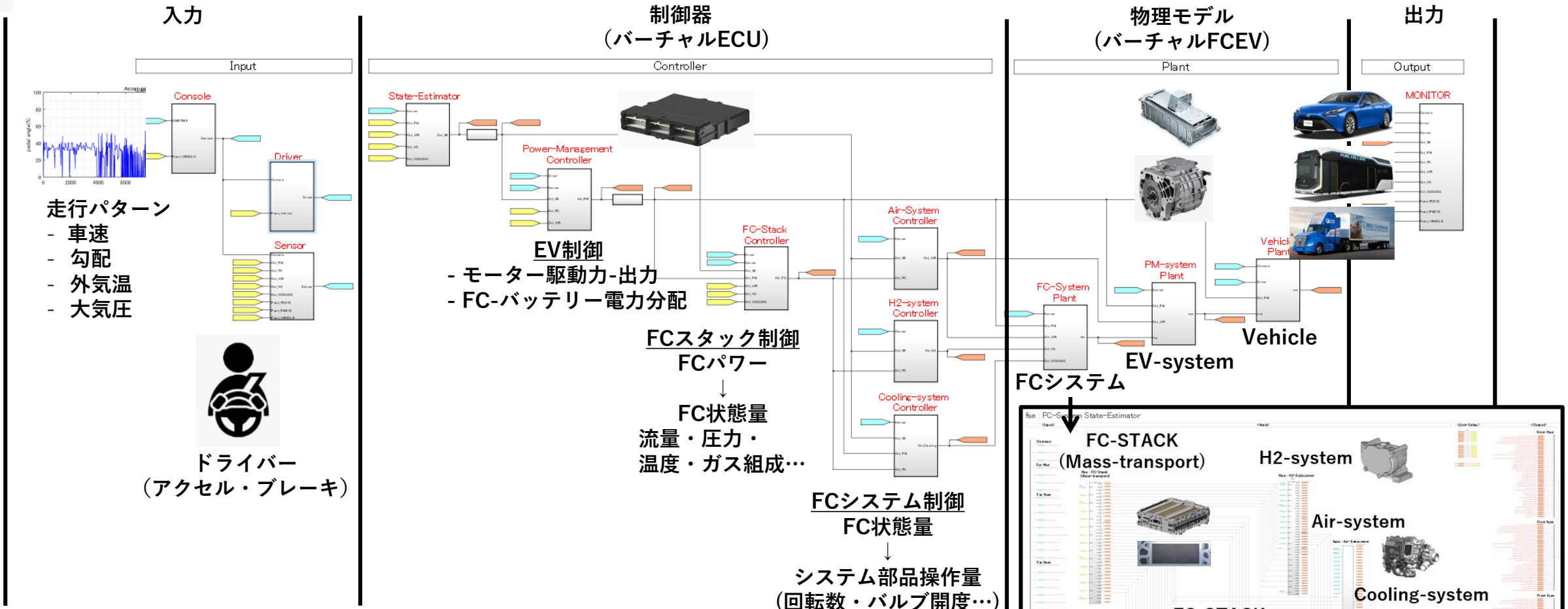
・どのようなものか

・どう貢献するか

3. 「MIRAIシステムシミュレータ」から、
「オールジャパンFCシステムシミュレータ」へ

4. 今後の展望

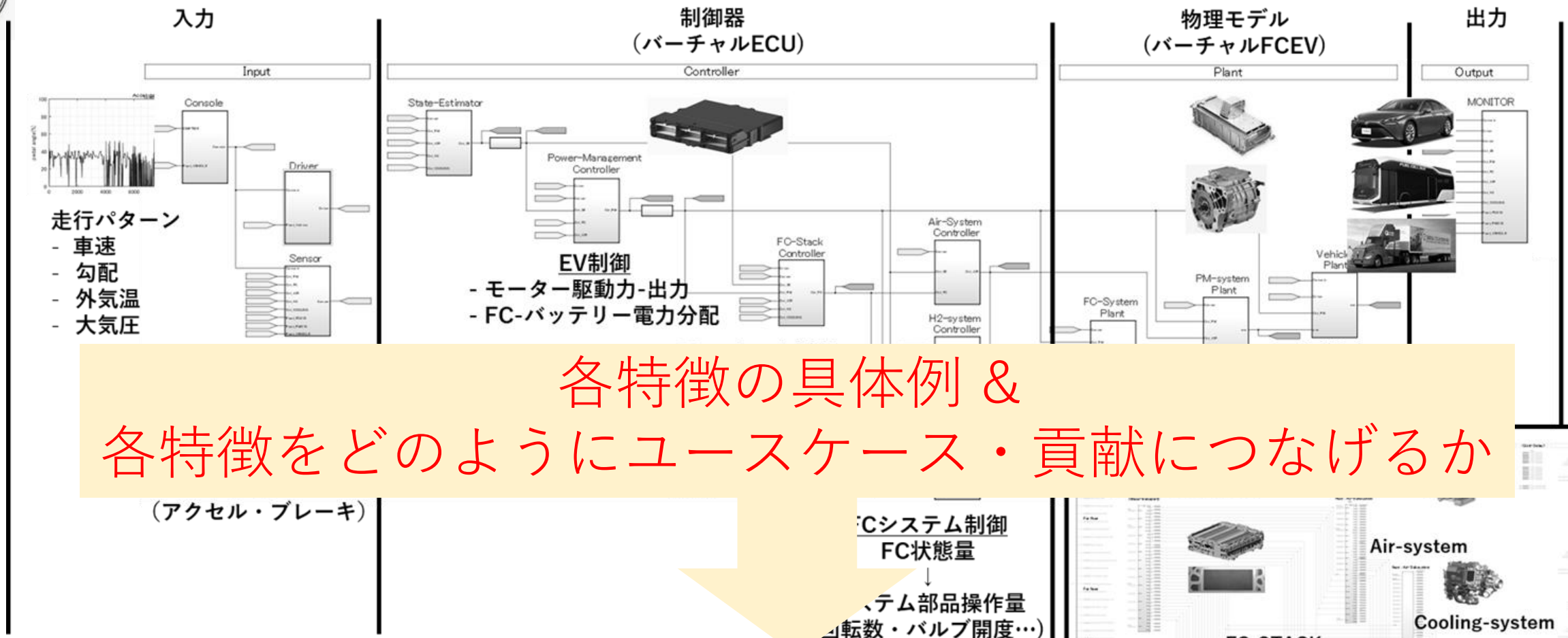
2. ソリューション：FCEV統合システムシミュレータ



<特徴>

- 材料物性 (nm) -車両体格(m) の一気通貫モデル → 材料物性-製品性能が明確
- ハード・制御一体モデル →「材料の特性」と「使い方」を同時に検討
- 「レゴブロック的」に種々の部品を変更可能なプログラム構造 → MIRAI以外のシステムにも容易にカスタマイズ可能
- MIRAI実機での広範な動作条件（常温～高温、低負荷～高負荷)に対しての精度検証完了 →「活用」に専念できる
- 全プログラムを、デファクト言語 (MATLAB)を用いて内製・ホワイトボックスで開発 → モデル配布・流通性〇

2. ソリューション：FCEV統合システムシミュレータ

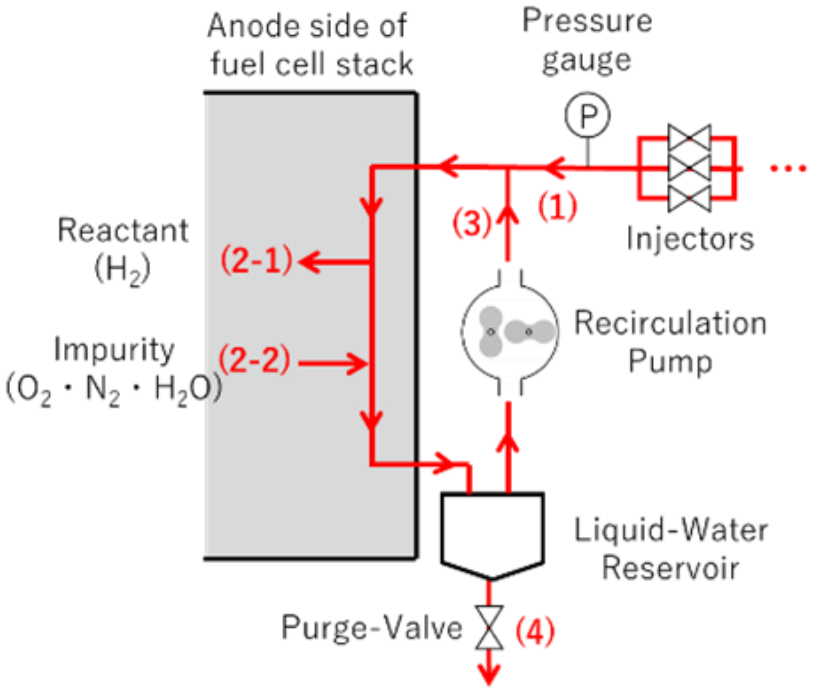


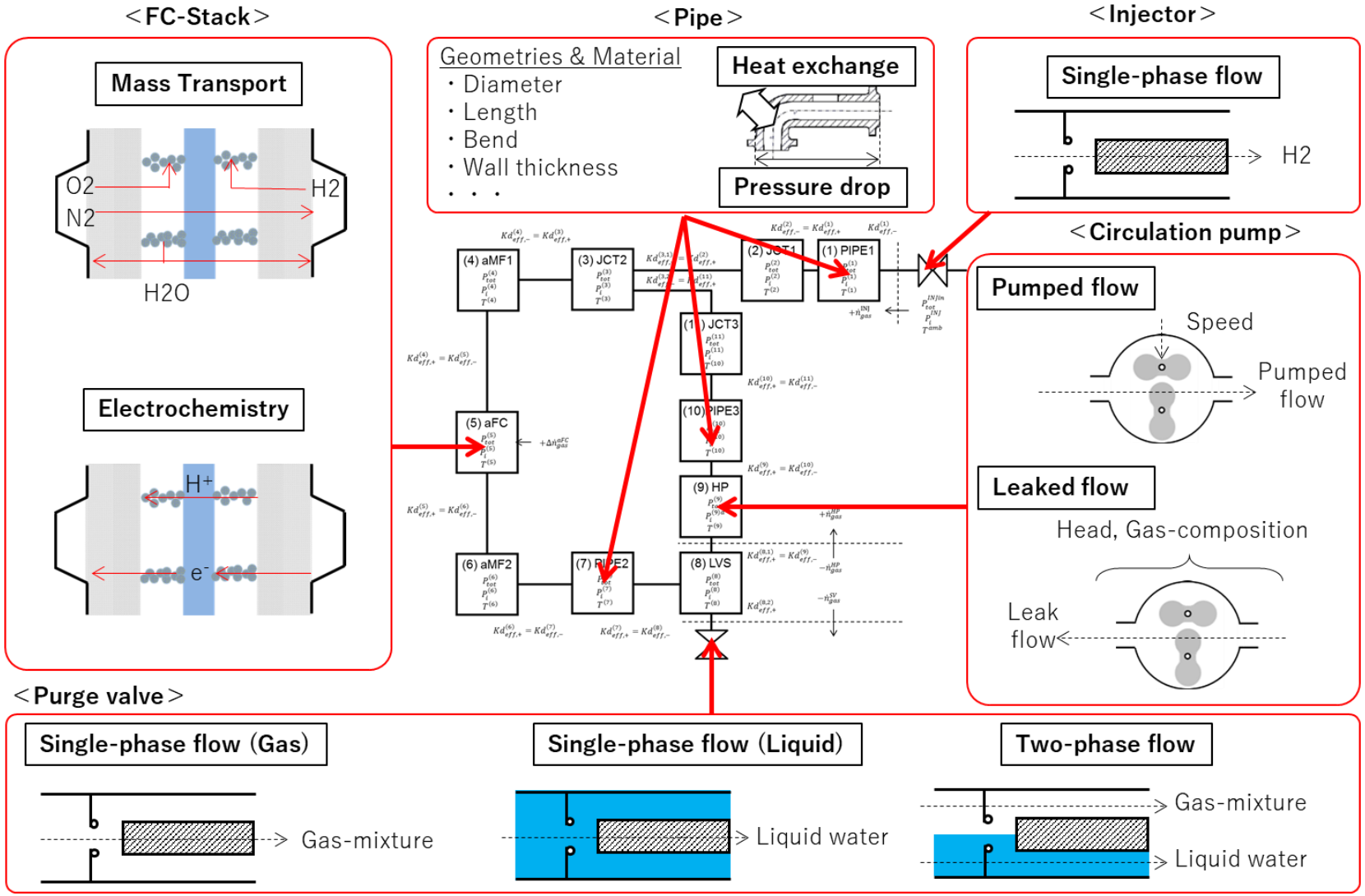
各特徴の具体例 &
各特徴をどのようにユースケース・貢献につなげるか

<特徴>
・材料物性 (nm) -車両体格(m) の一気通貫モデル → 材料物性-製品性能が明確
・ハード・制御一体モデル →「材料の特性」と「使い方」を同時に検討
・「レゴブロック的」に種々の部品を変更可能なプログラム構造 → MIRAI以外のシステムにも容易にカスタマイズ可能
・MIRAI実機での広範な動作条件（常温～高温、低負荷～高負荷)に対しての精度検証完了 →「活用」に専念できる
・全プログラムを、デファクト言語 (MATLAB)を用いて内製・ホワイトボックスで開発 → モデル配布・流通性〇

2. 拡張性・カスタマイズ性：プログラム構造

MIRAI システム構成
(FCスタック＋水素系システム)





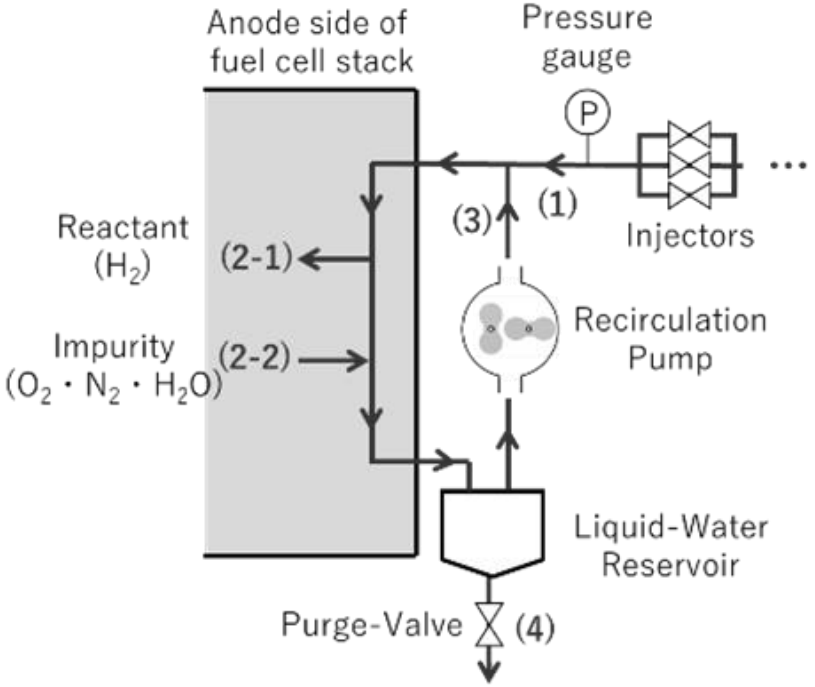
機能ブロック図モデリング
- 状態量（流量、圧力、ガス組成、温度）
- 物理モデル（スタック・ポンプ・バルブ…）

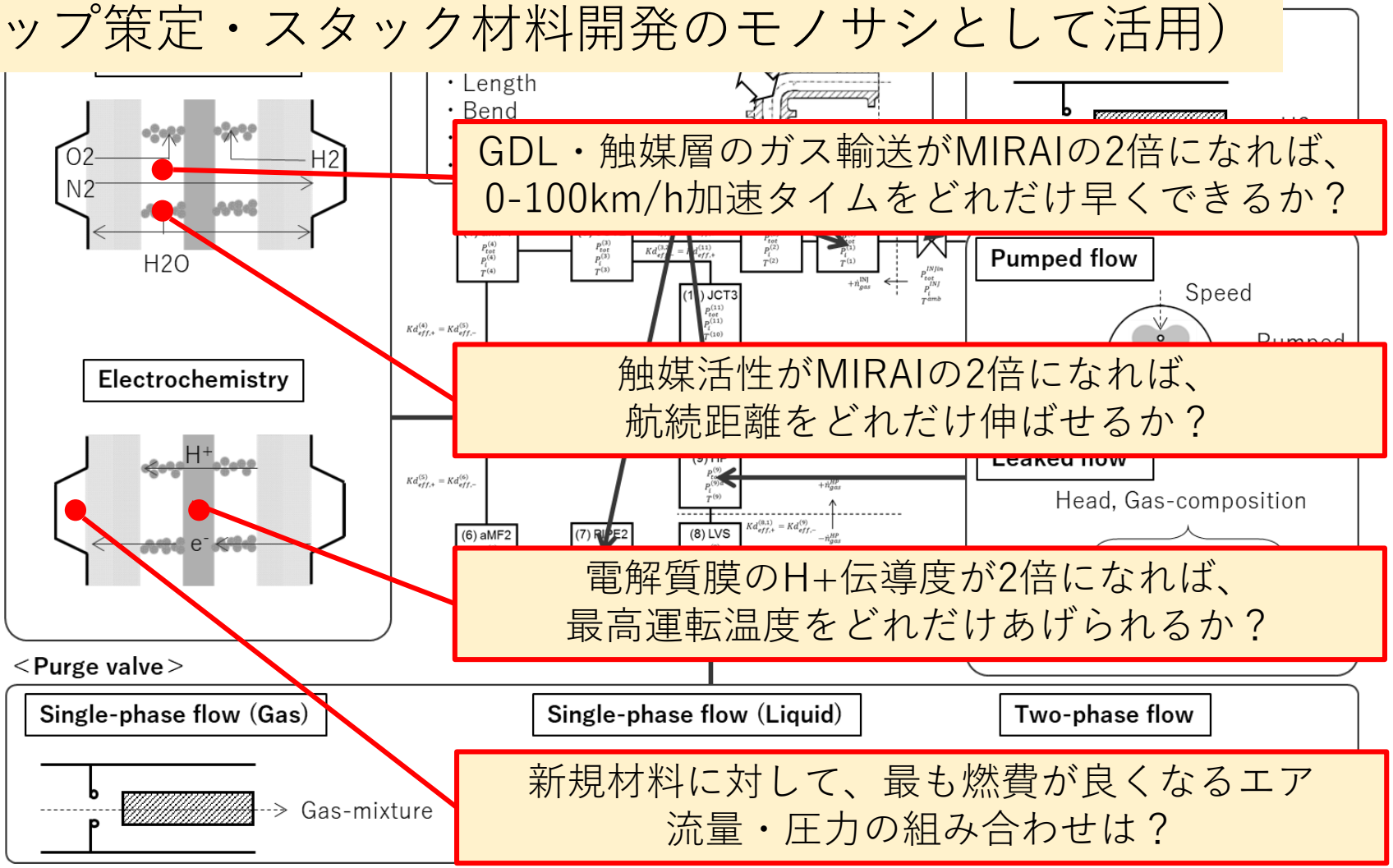
ミクロ～マクロの
材料物性＆部品特性を
「レゴブロック的」に差替え

2. 拡張性・カスタマイズ性：プログラム構造

ユースケースのイメージ
（研究開発ロードマップ策定・スタック材料開発のモノサシとして活用）

MIRAI システム構成
（FCスタック＋水素系システム）





GDL・触媒層のガス輸送がMIRAIの2倍になれば、
0-100km/h加速タイムをどれだけ早くできるか？

触媒活性がMIRAIの2倍になれば、
航続距離をどれだけ伸ばせるか？

電解質膜のH+伝導度が2倍になれば、
最高運転温度をどれだけあげられるか？

新規材料に対して、最も燃費が良くなるエア
流量・圧力の組み合わせは？

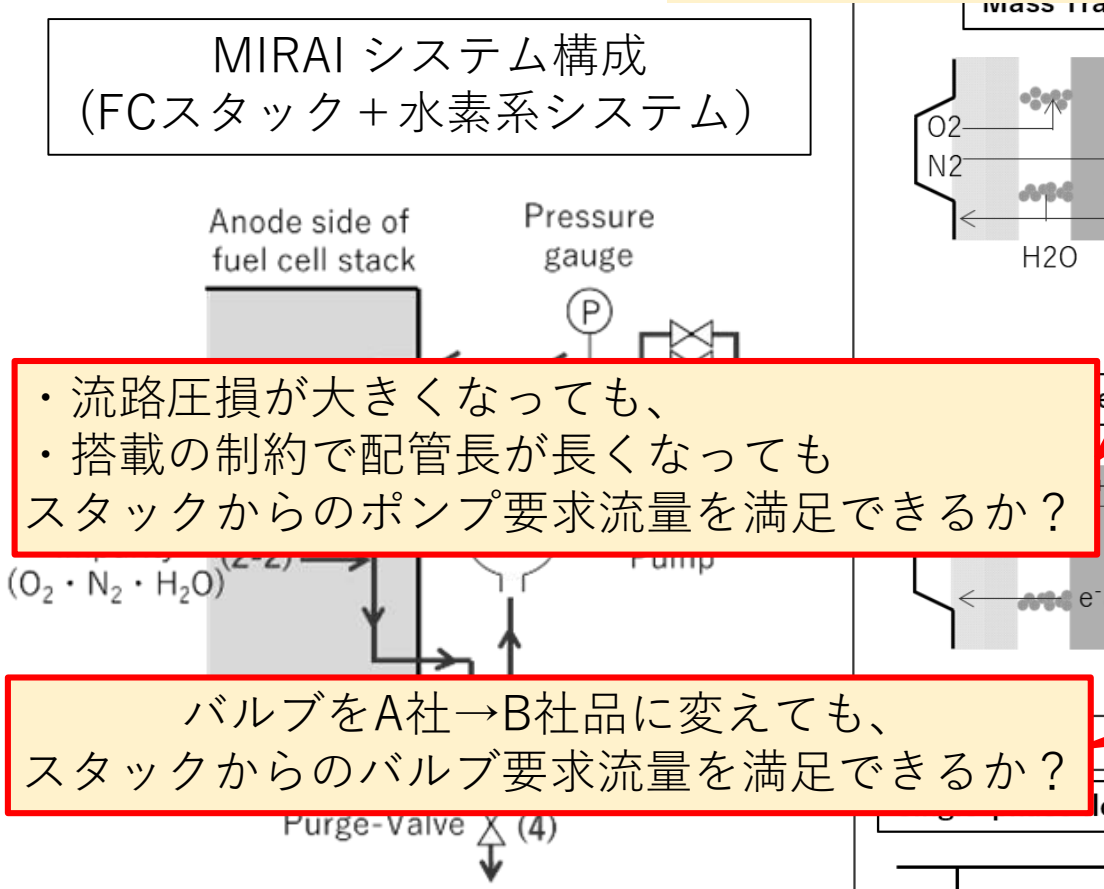
機能ブロック図
モデリング
- 状態量（流量、圧力、ガス組成、温度）
- 物理モデル（スタック・ポンプ・バルブ…）

ミクロ～マクロの
材料物性＆部品特性を
「レゴブロック的」に差替え

2. 拡張性・カスタマイズ性・プログラム構造

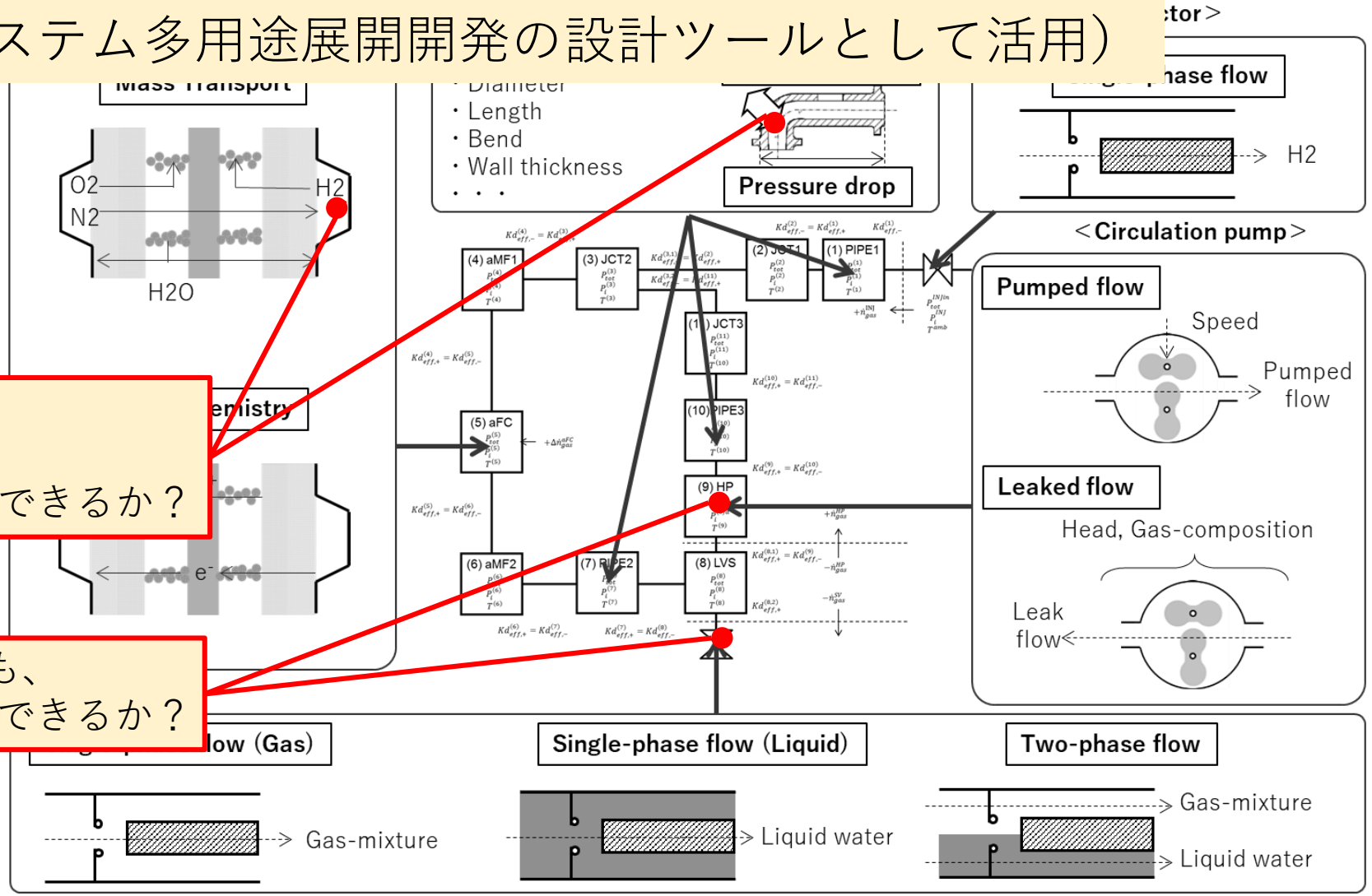
ユースケースのイメージ
（システム多用途展開開発の設計ツールとして活用）

MIRAI システム構成
（FCスタック＋水素系システム）



・流路圧損が大きくなっても、
・搭載の制約で配管長が長くなっても
スタックからのポンプ要求流量を満足できるか？

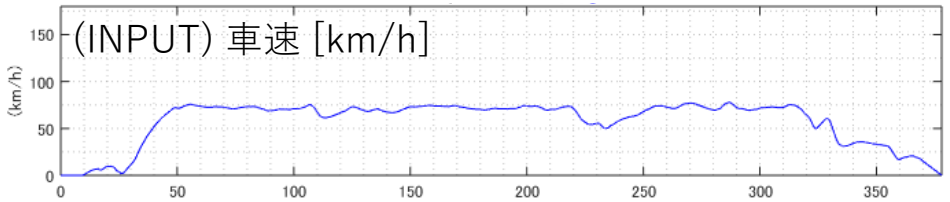
バルブをA社→B社品に変えても、
スタックからのバルブ要求流量を満足できるか？

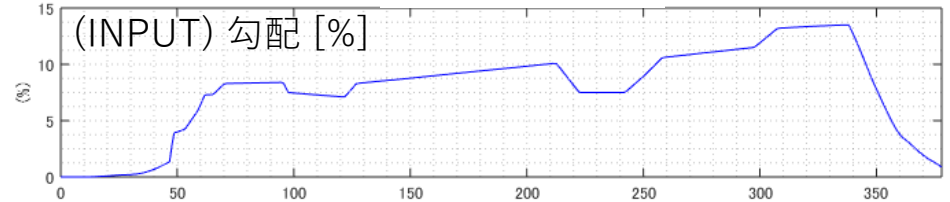


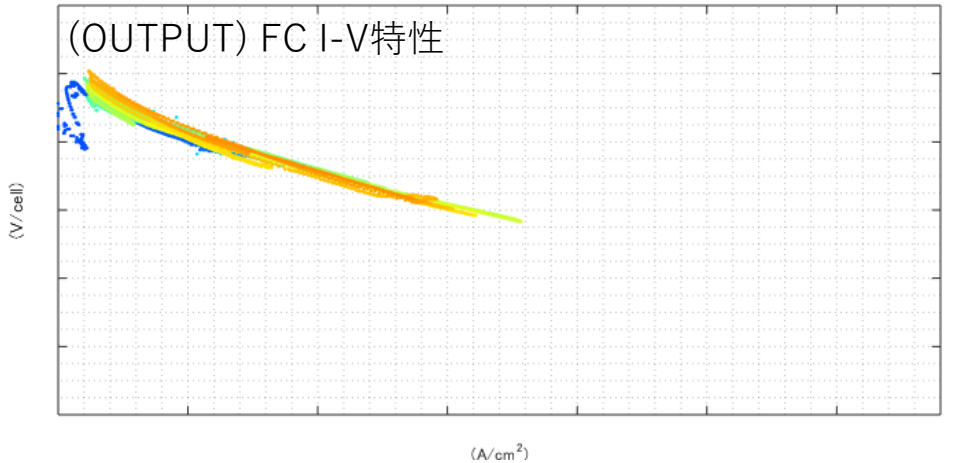
機能ブロック図
モデリング
- 状態量（流量、圧力、ガス組成、温度）
- 物理モデル（スタック・ポンプ・バルブ…）

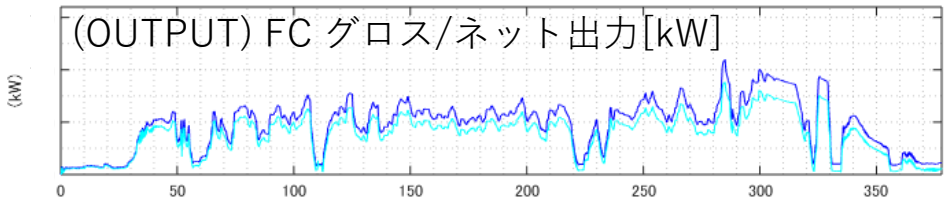
ミクロ～マクロの
材料物性＆部品特性を
「レゴブロック的」に差替え

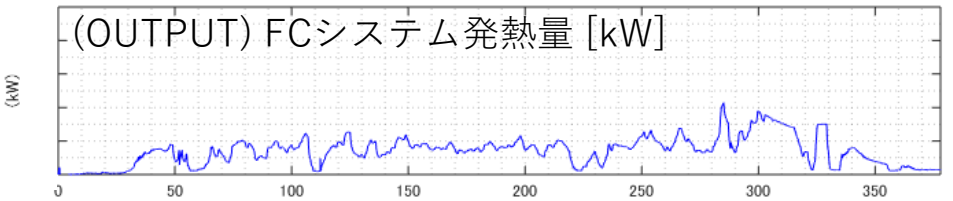
2. 拡張性・カスタマイズ性：解析事例

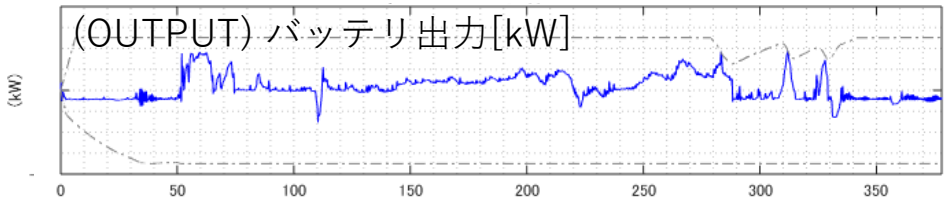


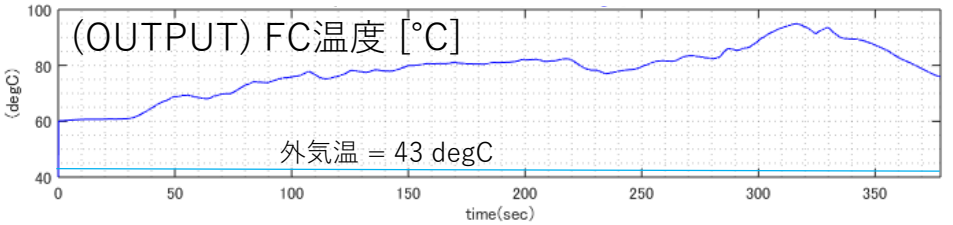


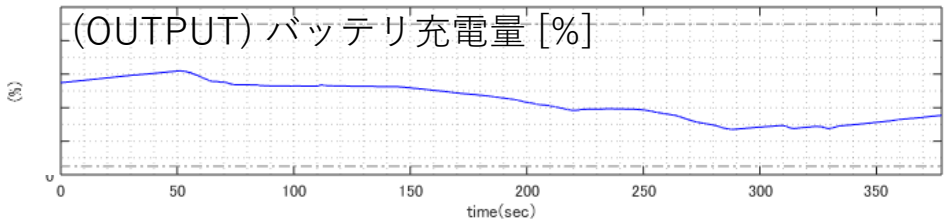


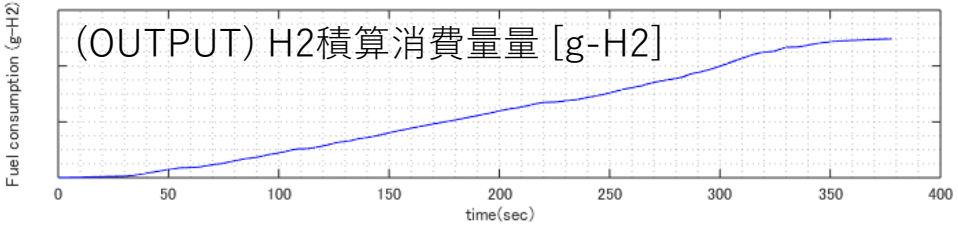








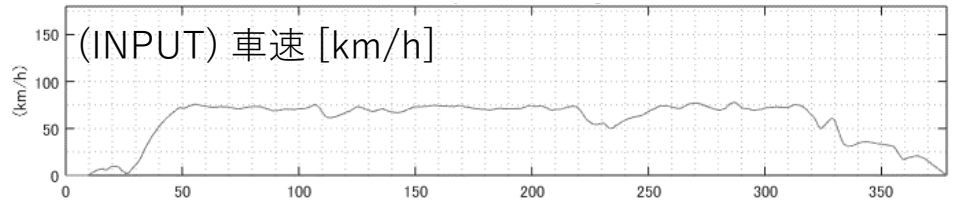


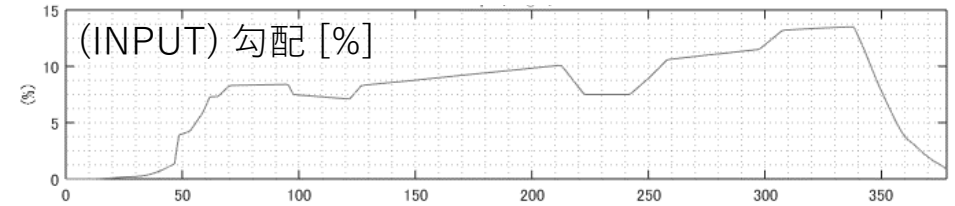


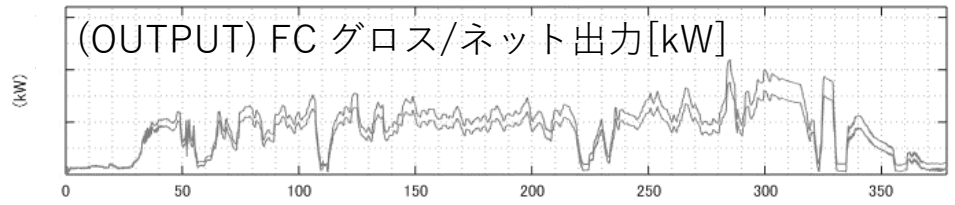
- 任意の作動パターン、環境条件に対するシステムの過渡応答
- MEA材料・システム部品の特性を変えた時の製品性能(燃費・発熱・応答性)への影響

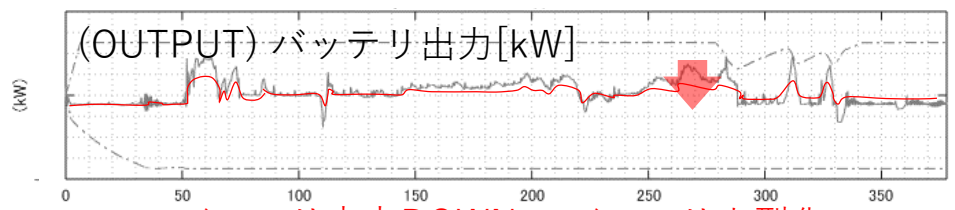
を評価し知見蓄積する

2. 拡張性・カスタマイズ性：解析事例

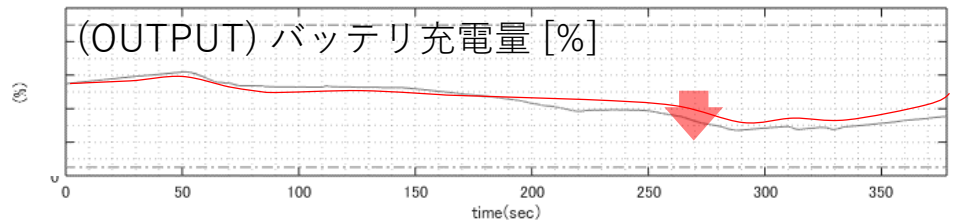


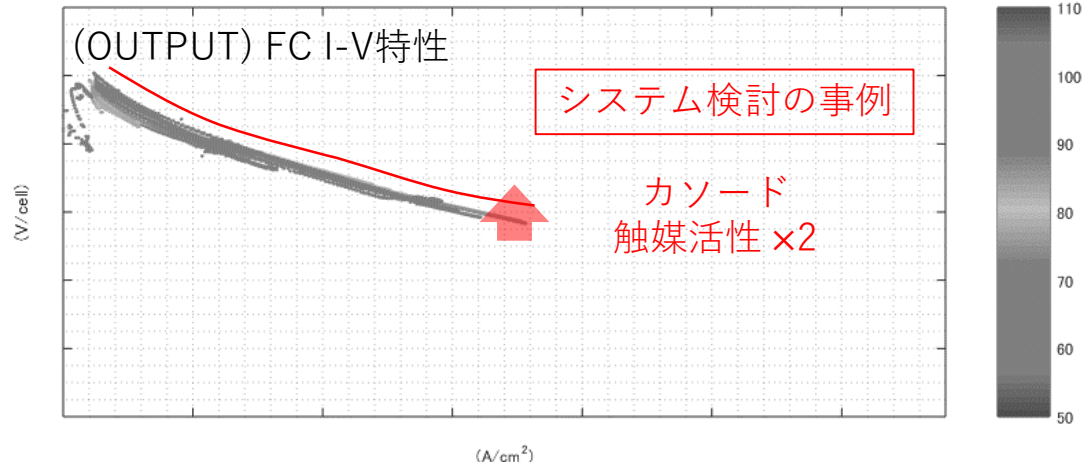


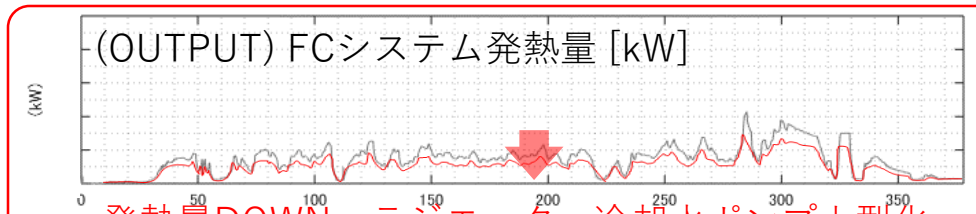




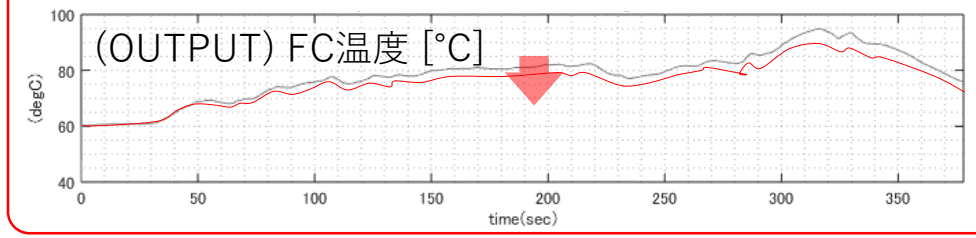
バッテリ出力DOWN→ バッテリ小型化

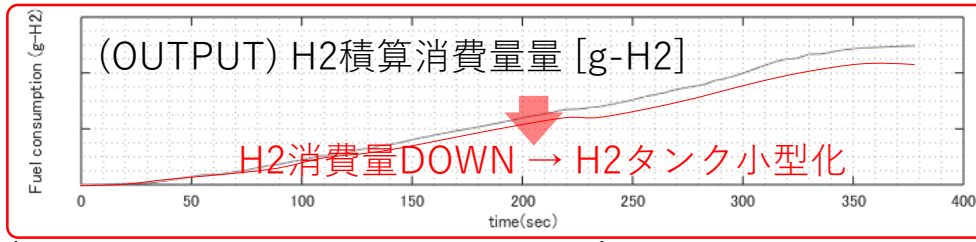






発熱量DOWN→ラジエータ・冷却水ポンプ小型化





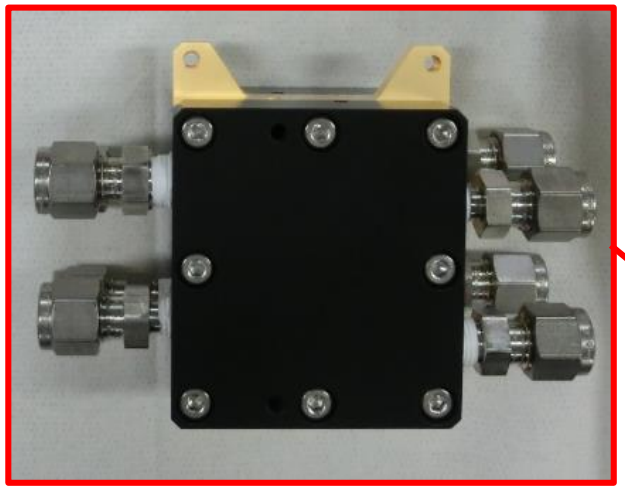
H2消費量DOWN → H2タンク小型化

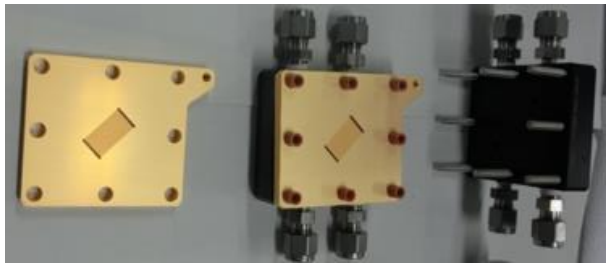
- 任意の作動パターン、環境条件に対するシステムの過渡応答
- MEA材料・システム部品の特性を変えた時の製品性能(燃費・発熱・応答性)への影響

を評価し知見蓄積する

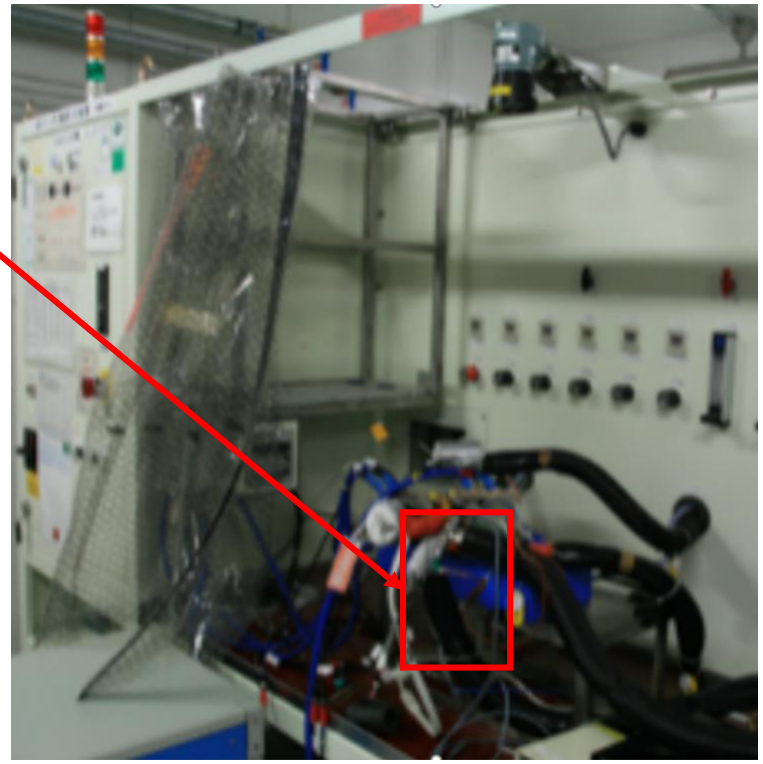
2. 拡張性・カスタマイズ性：モデルパラメータ (FCスタック)

1cm2セル



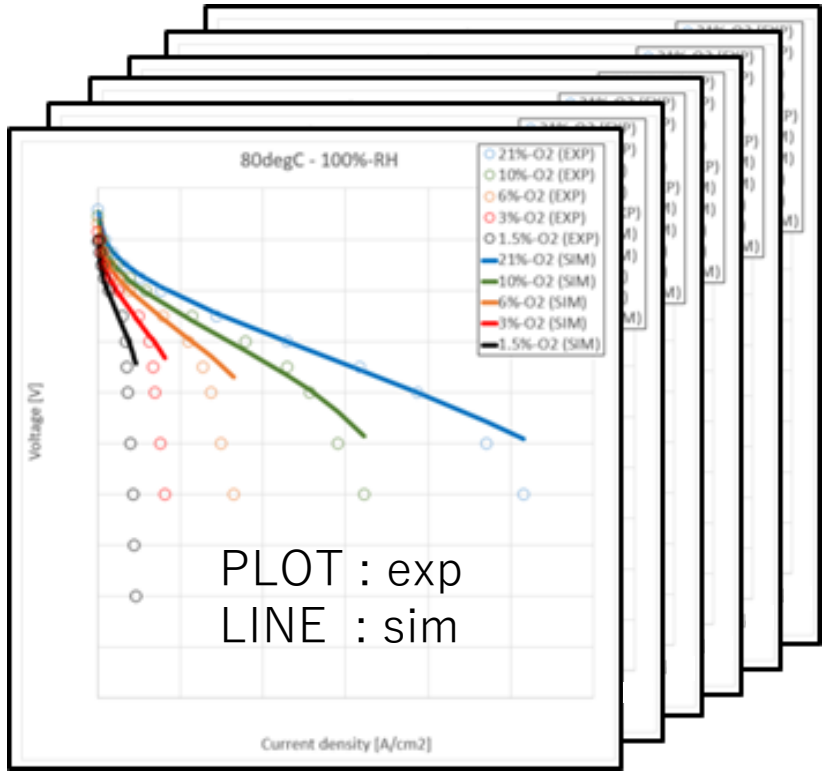


小セルベンチ



自動計測
3日間

試験データ



小セルIV 27条件

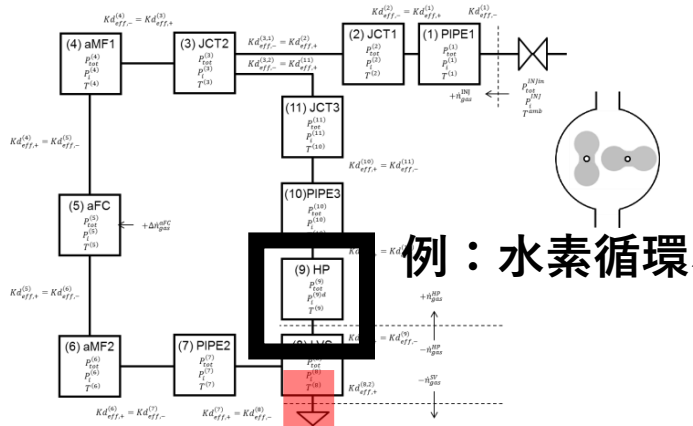
- 湿度　　：5　(100, 80, 60, 40, 20%)
- O_2濃度　：5　(21, 10, 6, 3, 1%)
- セル温度　：3　(80 + 40, 60 °C)

1cm²セル試験結果からのみでパラメータ同定が可能（セル・スタックデータは不要）

活用例：国内外メーカー品の分解評価 → 各社仕様のパラメータ同定・カタログ化

2. 拡張性・カスタマイズ性：モデルパラメータ (システム部品)

システムモデル



例：水素循環ポンプ

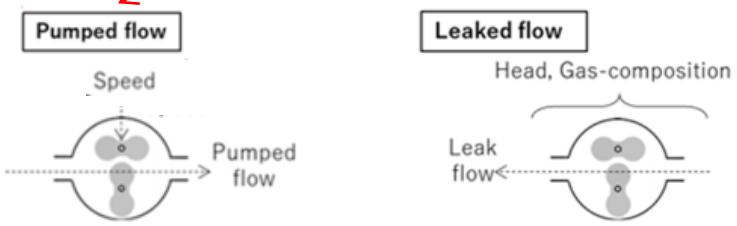
モデル式

吐出圧

流量　回転数

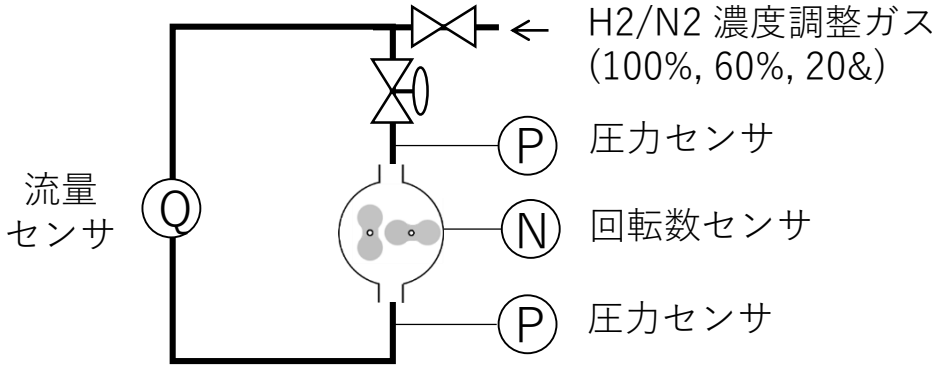
$$\dot{v} = C_1 N - C_2 \frac{\Delta P^{C_3}}{\mu^{C_4} \rho^{C_5}}$$

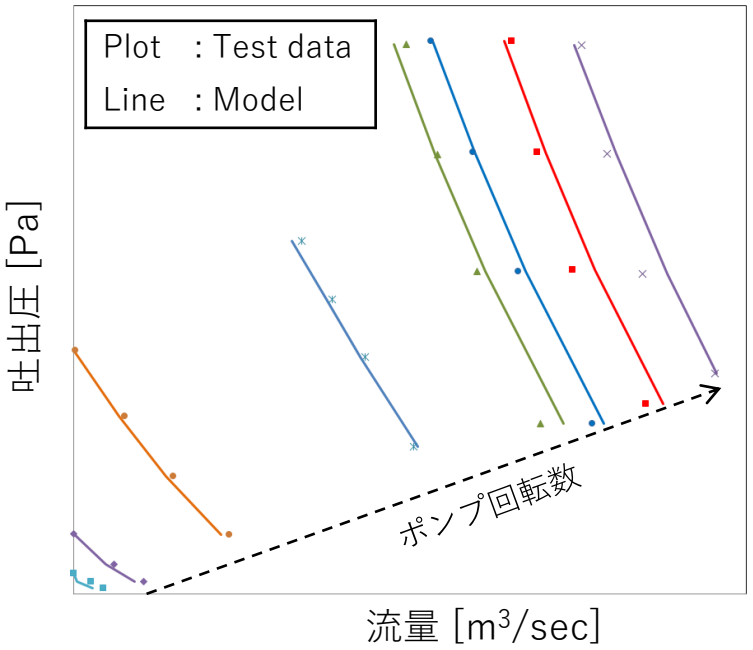
粘度　密度



C_1-C_5 フィッティング

部品担体試験 ≠ システム試験





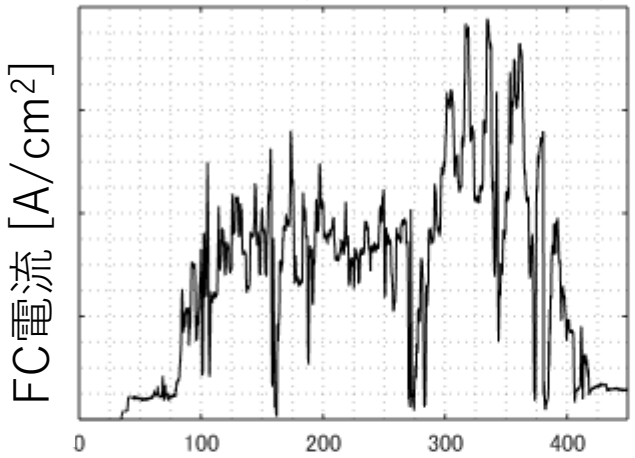
全部品パラメータは、部品担体での試験データから同定可能（システム試験は不要）

活用例：FC参入を希望される部品メーカー様が自社部品のシステム成立性を机上確認

2. モデル性能（計算精度）

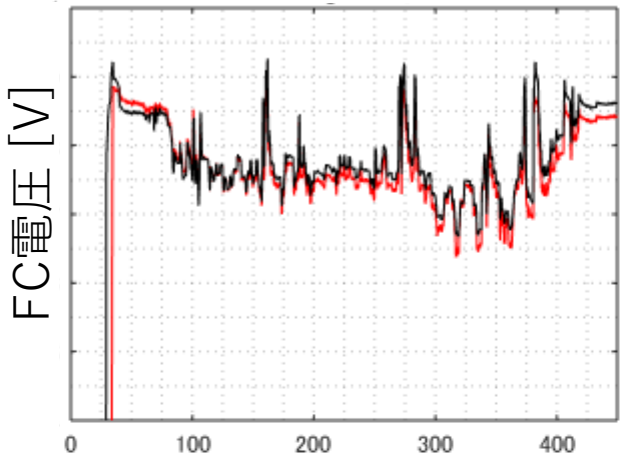
入力

FC電流 (時系列データ)

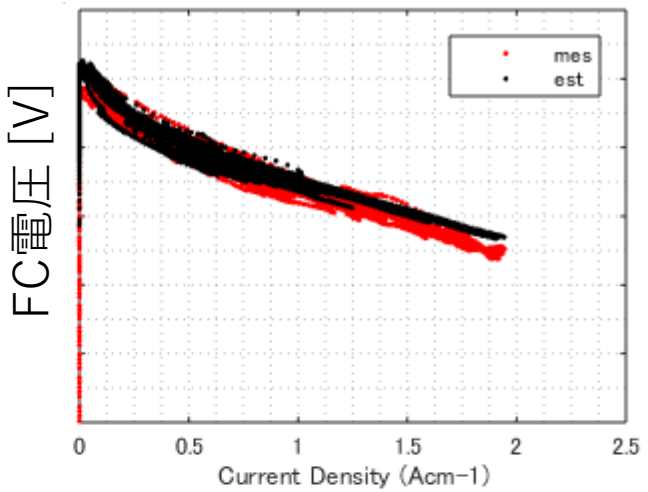


出力

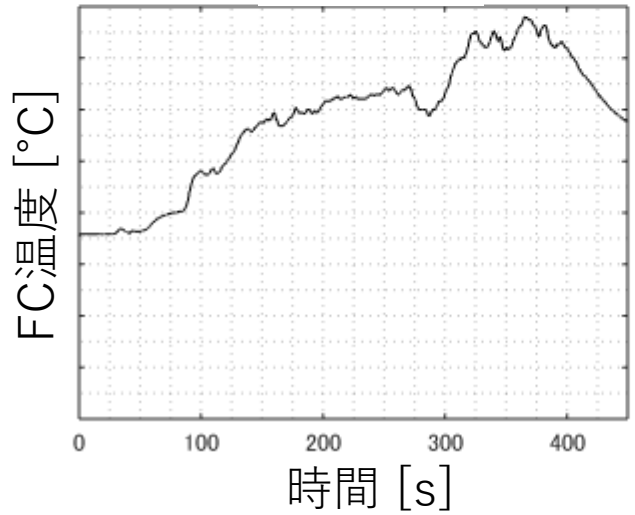
FC電圧 (時系列データ)



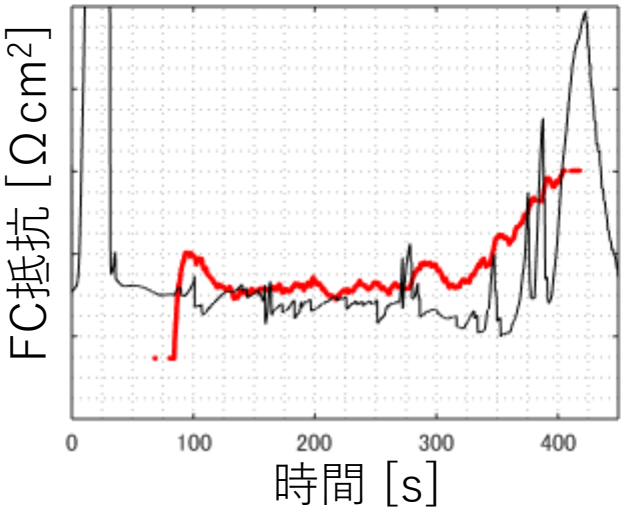
FC電圧 (I-V特性)



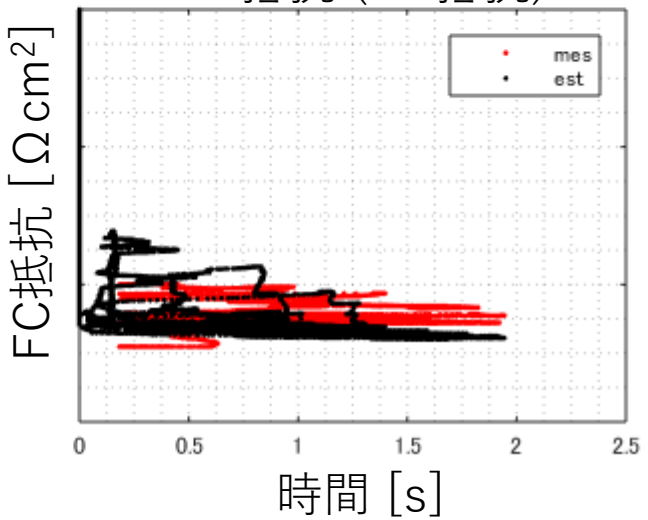
FC温度 (時系列データ)



FC抵抗 (時系列データ)



FC抵抗 (I-R抵抗)



低～高負荷・低～高温の広範な条件で取得したMIRAI車両データに対して検証完了

→ ユーザーはモデル活用に専念できる

2. モデル性能（精度速度）

PCスペックと計算時間まとめ

計算機仕様	CPU	Intel® Xeon® CPU E3-1230 v5 @ 3.40GHz, 3.41GHz
	RAM	8.00 GB
ソフトウェア仕様	OS	Windows 10® Enterprise
	MATLAB®	R2015a (8.5.0.197613)
	SIMULINK®	Version 8.5 (R2015a)

実機データ (MIRAI車両データ)	計測時間	700 秒
	計測点数 (時間刻み)	42724点 (0.016384 秒 / ポイント)
SIMに要した時間		13.2 秒

加速倍率 ＞ 50倍 vs 実時間

・システム全体の詳細な物理演算を、実時間に対して50倍以上の演算速度で実施可能
・標準的なスペックの計算機上で実行可能、同時並行で複数候補の計算を実行可能

活用例： 劣化モデルと組み合わせて、耐久解析のための年単位の走行SIMにも活用可能

報告内容

1. FCEV開発現場での課題
2. ソリューション提案：FCシステム統合シミュレーター
   - どのようなものか
   - どう貢献するか
3. **「MIRAIシステムシミュレータ」から、「オールジャパンFCシステムシミュレータ」へ**
4. 今後の展望

3. モデル展開

FC-Platformプロジェクト

トヨタ

サポート人員
(例)
・FCモデルエンジニア
・FCシステムエンジニア
・FCスタックエンジニア
…

FCVモデル
（ソースコード）

社内エンジニア育成教材
（モデル解説書等）

経産省

エネ庁

FC-CUBIC

大学・研究機関

材料メーカー

部品メーカー

NEDO

貢献1
最先端モデル統合の
プラットフォーム

オールジャパン
FCVモデル

モデル仕様書
セミナー教材

貢献2
・最先端材料開のモノサシ
・ロードマップ策定ツール

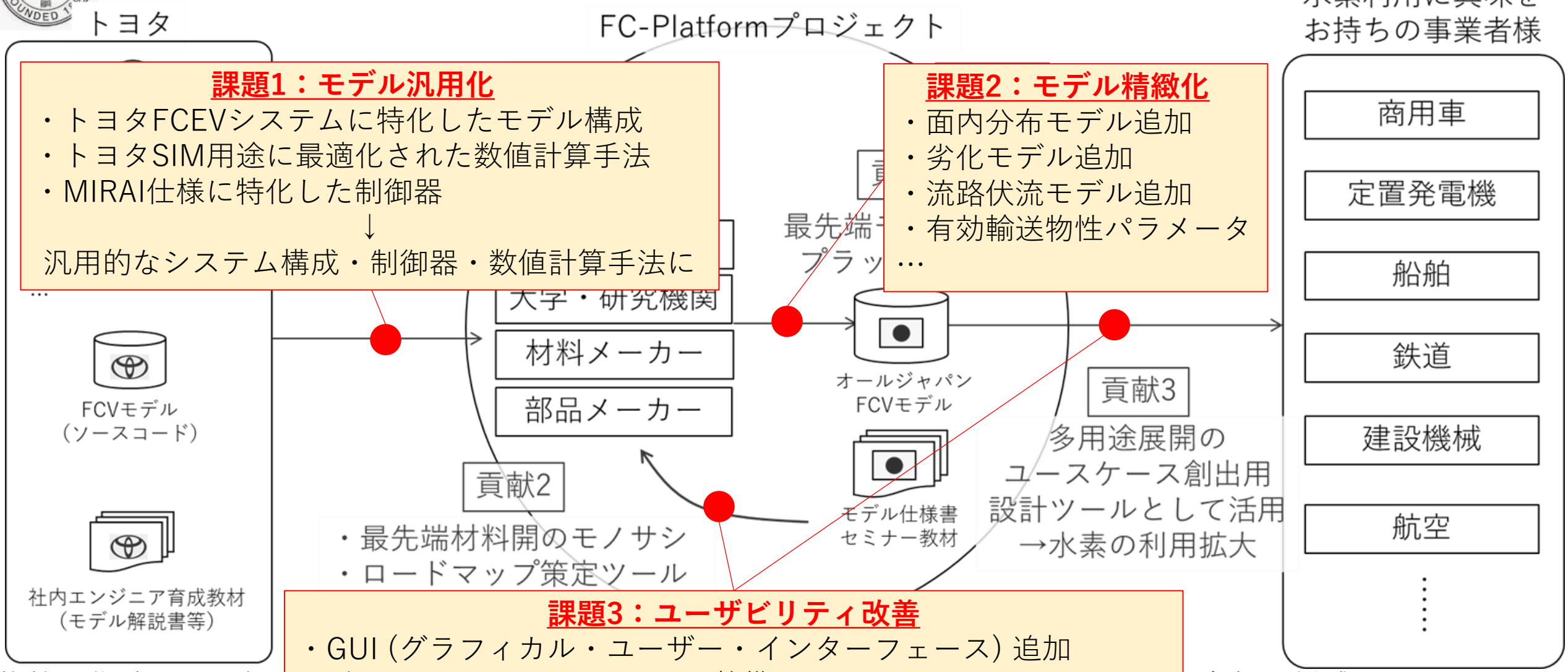
貢献3
多用途展開の
ユースケース創出用
設計ツールとして活用
→水素の利用拡大

水素利用に興味を
お持ちの事業者様

- 商用車
- 定置発電機
- 船舶
- 鉄道
- 建設機械
- 航空
- ……

複雑な作動原理を有する、FCEVシステム全体のモデルを、ゼロから開発するための期間・負担を低減する
①「オールジャパンFCEVモデル」を、国プロで開発される最先端モデル統合のプラットフォームにする
② 最先端FC材料開発のモノサシ、ロードマップ策定ツールとして活用する
③ 多用途展開のユースケース創出用の設計ツールとして活用し、水素利用拡大につなげる

3. モデル展開



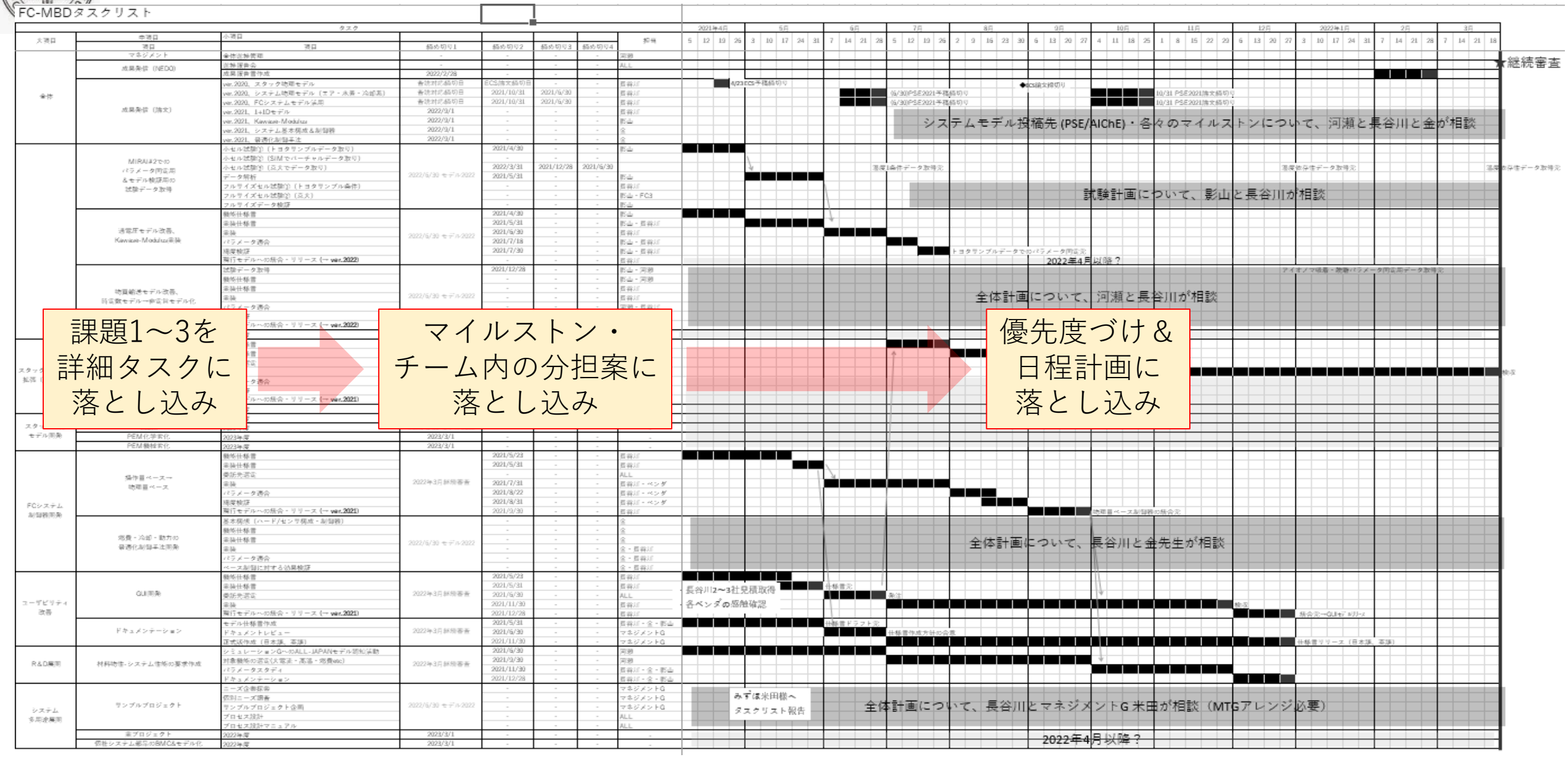
複雑な作動原理を有す ・負担を低減する

①「オールジャパンFCEVモデル」を、国プロで開発される最先端モデル統合のプラットフォームにする

② オールジャパンモデルを、最先端FC材料開発のモノサシ、ロードマップ策定ツールとして活用する

③ オールジャパンモデルを、多用途展開のユースケース創出用の設計ツールとして活用し、水素利用拡大につなげる

3. 計画立案



課題対応のための全体計画を詳細タスクリストへ落とし込み完 → 計画通り順調に推移中

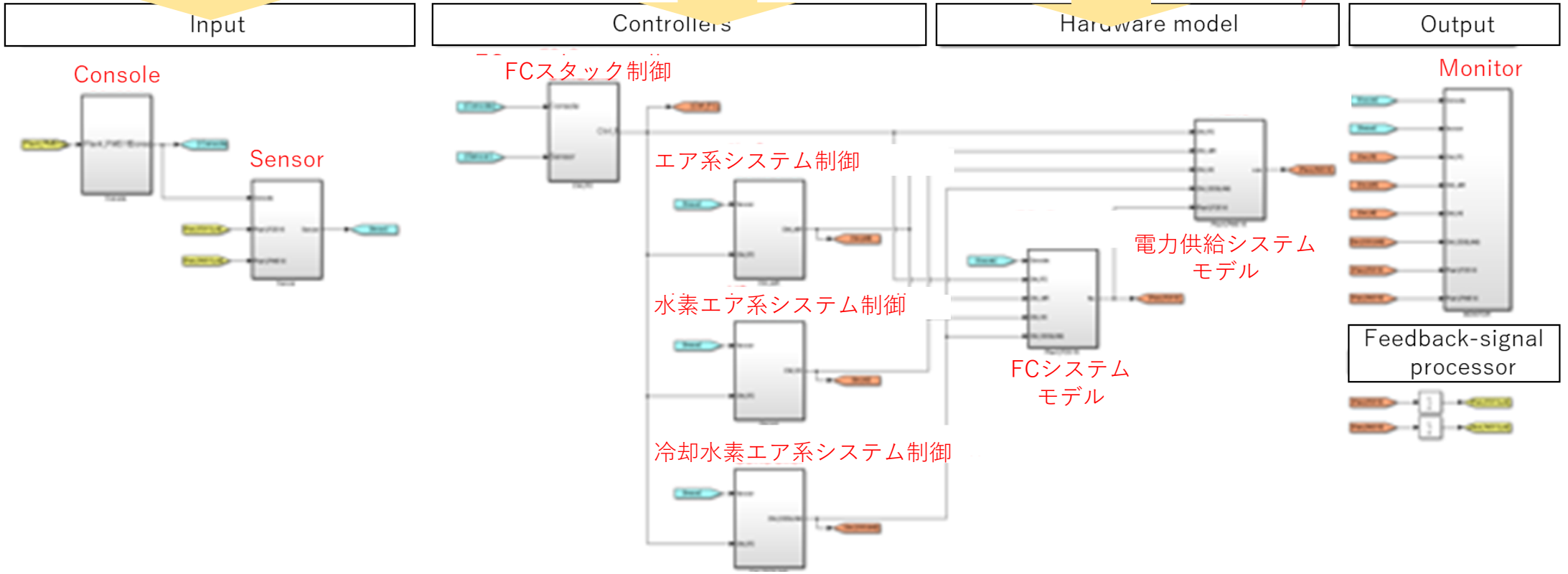
3. 直近のタスク推進状況１：モデル汎用化

汎用的なシステム構成
（FCシステム＋電力供給システム）

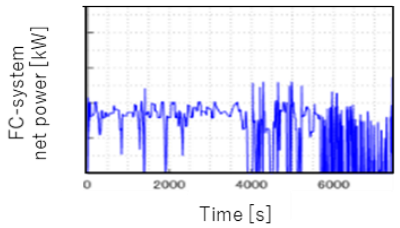
「教科書通り」の制御手法
（PI制御ベース）

「教科書通り」の
数値計算手法

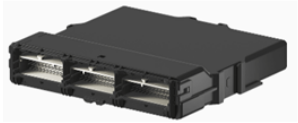
カスタマイズ容易な
シミュレータ構成



FC目標出力の時系列データ

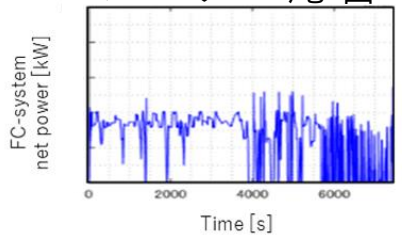


バーチャル制御ユニット



バーチャルFCシステム

システム応答



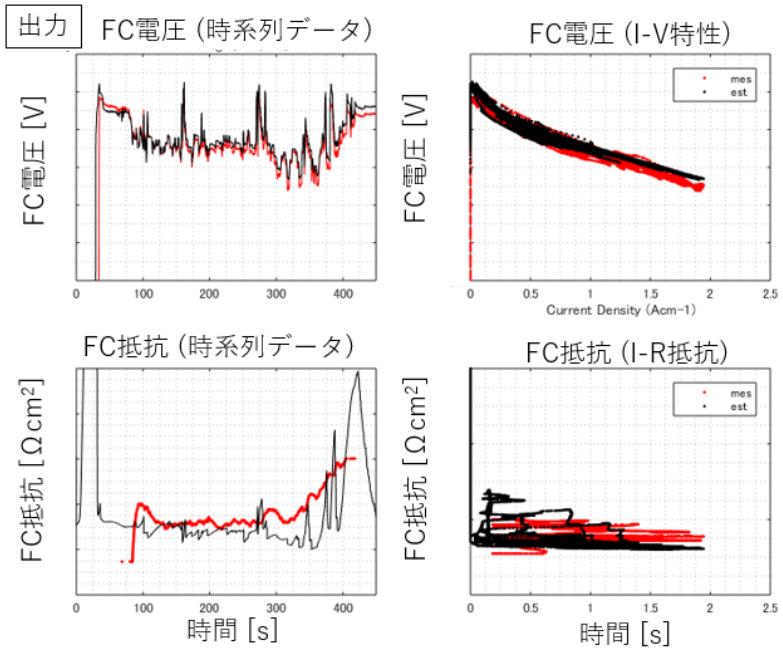
汎用化モデル開発70%完了 → 9末デバッグ完了・試行運用のためのモデルリリース予定

3. 直近のタスク推進状況２：ユーザビリティ改善

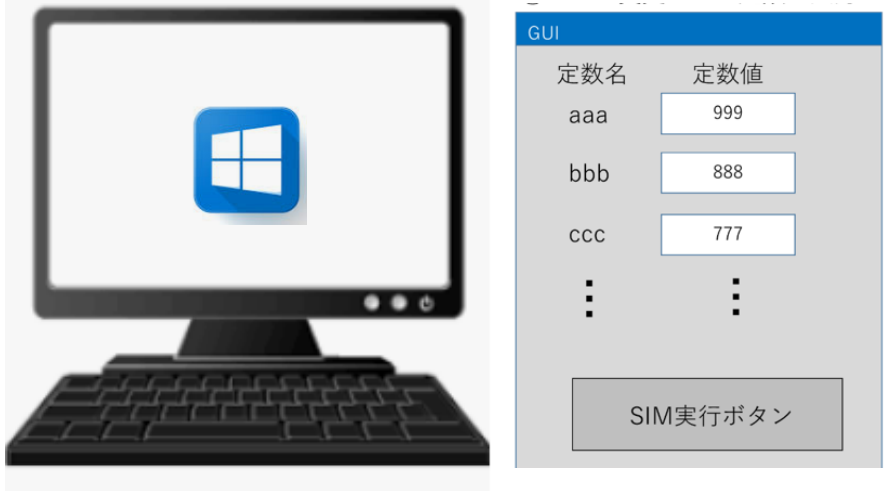
MATLABプログラム
・パラメータ設定＆実行
・グラフ描画

MATLAB/Simulink
インストールした
Windows端末

MATLAB/Simulinkコマンドベースでの
シミュレーション設定＆実行



Windowsアプリ化
（MATLAB不要）



Windows上でのマウス操作ベースでの
シミュレーション設定＆実行

ツール仕様書発行完了し7月より業務着手 → 11月に実ユーザーによる施行運用開始予定

報告内容

1. FCEV開発現場での課題
2. ソリューション提案：FCシステム統合シミュレーター
   - どのようなものか
   - どう貢献するか
3. 「MIRAIシステムシミュレータ」から、
   「オールジャパンFCシステムシミュレータ」へ
4. **今後の展望**

4. モデル連携

本トピックス

(STEP1)
車両目標を達成可能な
システム構成＆使い方
↓
・システム1Dモデル
・システム構成
最適化アルゴリズム

車両諸元
走行条件
・車両諸元
・走行パターン
・環境条件（外気温・大気圧）
×
要求を満足する
最適システム構成
・体格
・質量
・コスト
・・・

システム構成最適化アルゴリズム
システム1Dモデル
ドライバ
制御モデル
部品1D物理モデル

(STEP2)
システム目標を達成可能な
スタック部品要求＆制御要求
↓
部品1D物理モデル

1Dモデル(物質輸送・電気化学・材料劣化）＆物性パラメータ
・膜H+伝導度 vs 湿度マップ
・圧損(等価直径) vs 湿度マップ
・2D→1D縮退マップ
・・・

FC冷却特性
ラジ前風速
ファン出力
車速
ラジ熱交換係数
ラジ前風速
冷却水流量

FC補機特性(例:ポンプ)
揚程
回転数
流量

他トピックス

(STEP3)
部品要求を達成可能な
部品構造
↓
・部品3Dモデル
・材料ミクロモデル
・材料劣化モデル

セルマクロSIM
セル
3D形状
(CAD)
発電分布・圧損分布etc
材料ミクロSIM
分子構造
材料物性
34 nm

加速劣化手法・ミクロSIM

3D-車両通風SIM

3D-ラジ通風SIM

3D-流体SIM
流量-圧力特性(例：ポンプ)
流量（吐出・漏れ）
回転数
揚程

[目指す姿] 1D FCVシステムモデル + 評価P/F構築
・今ある部品の要素試験結果から1Dモデル用のパラメータを決定
・部品特性を同定するための共通評価P/F(FC小セル評価、ポンプ単体試験 …)

[目指す姿(中長期)] 1D & ミクロ-3Dツールチェーン
・未知の材料・部品の構造設計から部品目標パラメータを決定
・1D & ミクロ-3D-SIMのパラメータが共通（一気通貫で活用可能）

4. モデル連携

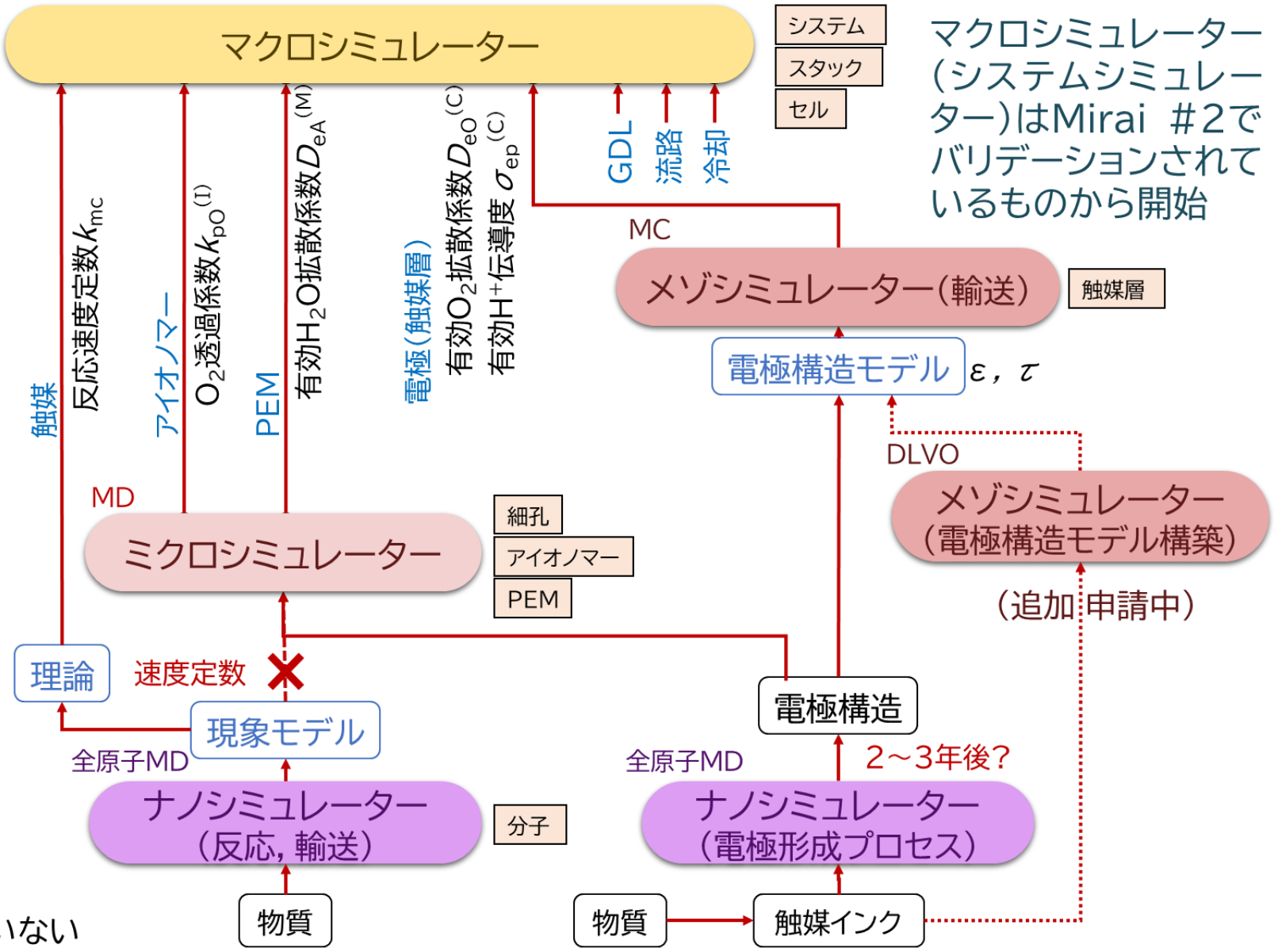
FC•Platform

ナノメートルスケール～マクロスケールのすべての層のモデリング，シミュレーター開発を同時並行で進める

各層の間の情報の受け渡しが連携の鍵
有効輸送物性値に集約

マクロシミュレーターでは，必要なパラメーターを仮決め，ミクロシミュレーションの結果が出れば差し替えていく

注．本図には計測は示していない



マクロシミュレーター（システムシミュレーター）はMirai ＃2でバリデーションされているものから開始

まとめ・今後へ向けた抱負

1. FCシステムの複雑性 → 試作＆評価に大きく頼った
   開発プロセスが、FC業界活性化へ向けた障壁の一つとなっている
2. ソリューションとして、
   材料物性・部品特性－システム使い方－製品性能を一気通貫で
   繋げるFCシステム統合シミュレーションを開発・利活用する
3. 現状の「MIRAIシステムシミュレータ」から、ユーザビリティも
   考慮した「オールジャパンFCシステムシミュレータ」にする
4. FC業界活性化に加え、最先端のミクロ-メゾモデル間を繋ぐ
   「糊」の役割も果たし、アカデミア活性化にも貢献する