




FC-DynaMo概要説明書

長谷川 茂樹^a、金 尚弘^b、影山 美帆^a、河瀬 元明^a

^a京都大学 大学院工学研究科 化学工学専攻 反応工学分野

^b東京農工大学 工学研究院 応用化学部門

アジェンダ

1. 背景
 - ・ 燃料電池(FC)システム概要
 - ・ 開発プロセスにおける課題
2. 統合FCシステムシミュレータ  FC-DynaMo
3. モデル化手法
 - ・ FCモデル
 - ・ FCシステムモデル (エア・水素・冷却システム)
 - ・ MATLAB/Simulinkへの実装手法
 - ・ モデル内パラメーター同定手法
 - ・ モデル精度検証
4. FCシステム制御器
5. シミュレーション結果
6. 今後の課題
 - ・ モデル機能拡張
 - ・ 多用途展開へ向けたシミュレータ一流通

アジェンダ

1. 背景

- ・燃料電池 (FC) システム概要
- ・開発プロセスにおける課題

2. 統合FCシステムシミュレータ FC-DynaMo

3. モデル化手法

- ・FCモデル
- ・FCシステムモデル (エア・水素・冷却システム)
- ・MATLAB/Simulinkへの実装手法
- ・モデル内パラメーター同定手法
- ・モデル精度検証

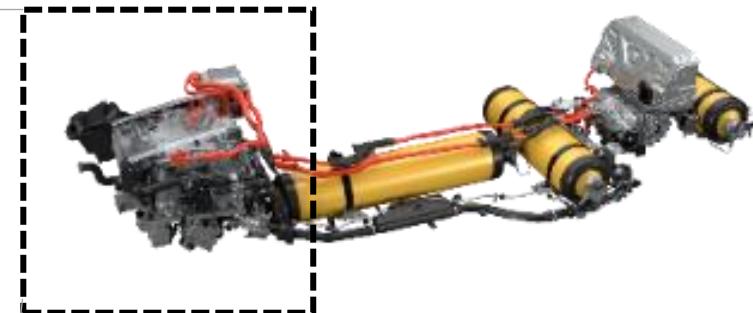
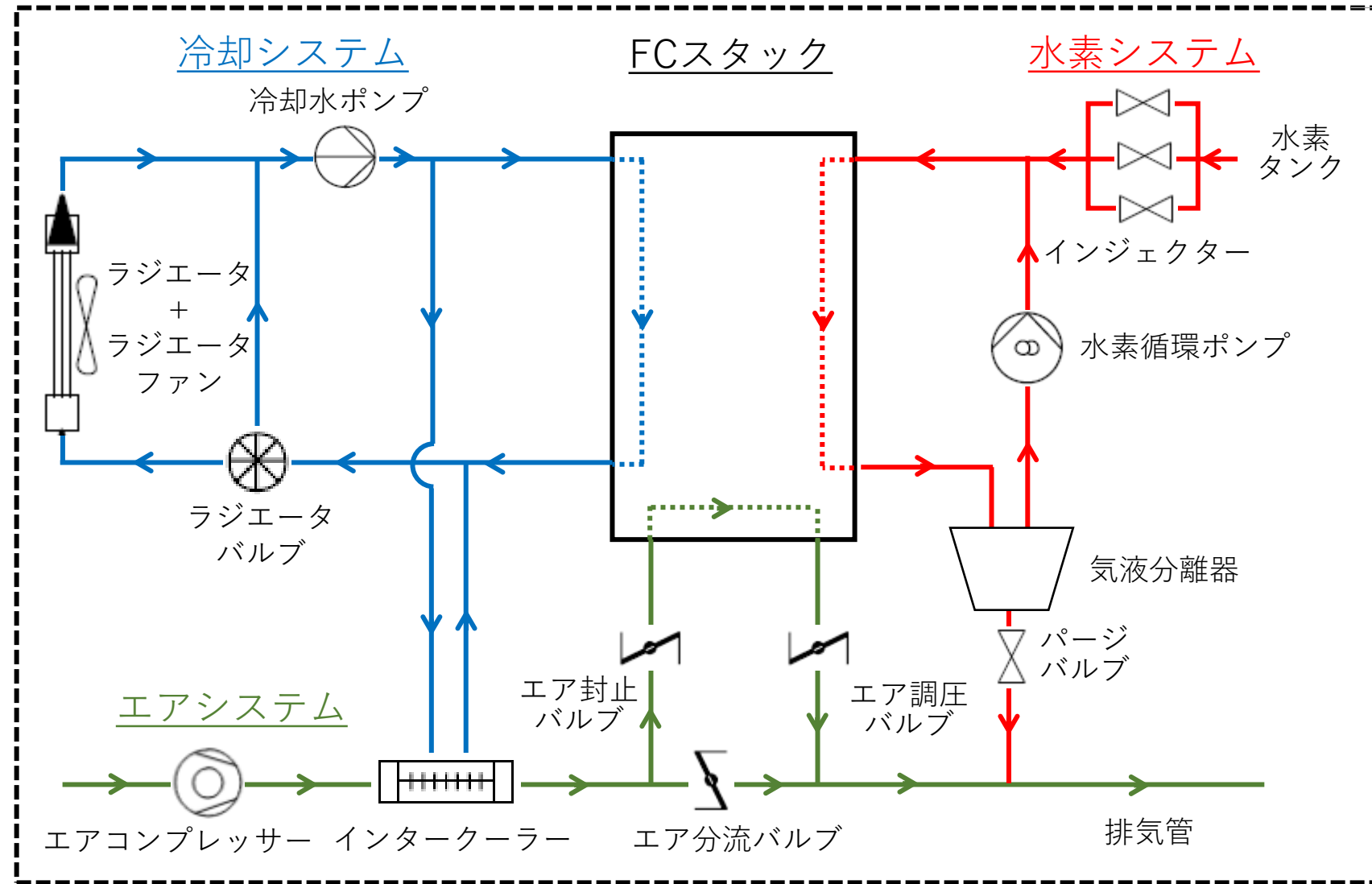
4. FCシステム制御器

5. シミュレーション結果

6. 今後の課題

- ・モデル機能拡張
- ・多用途展開へ向けたシミュレータ一流通

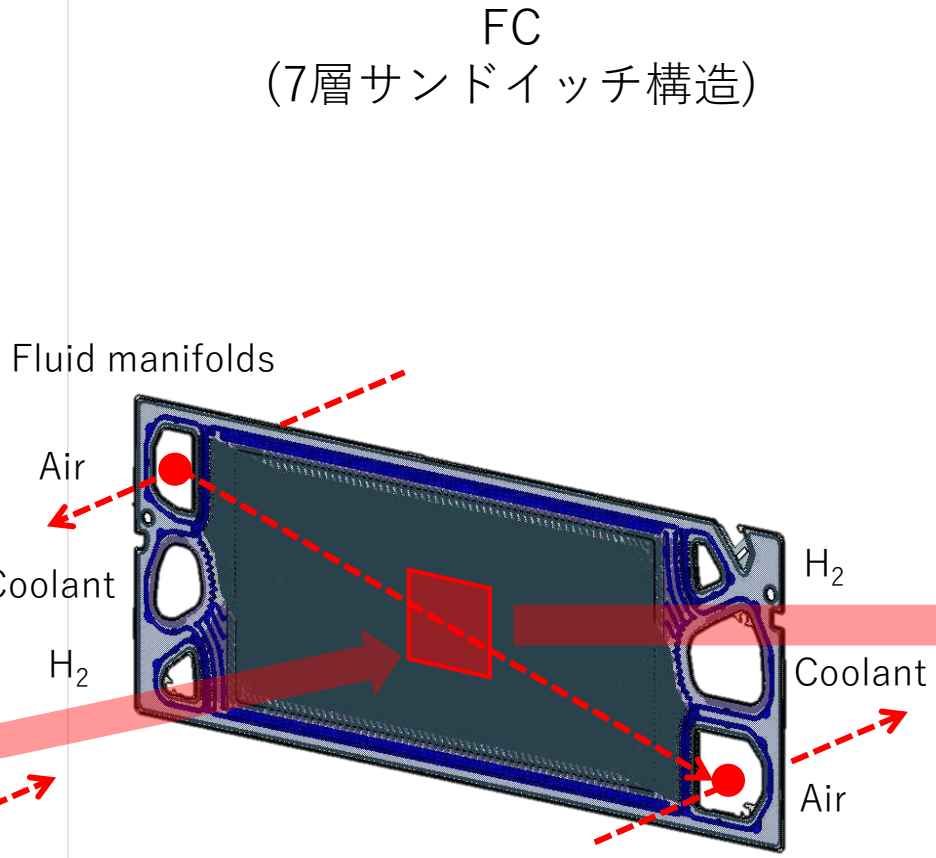
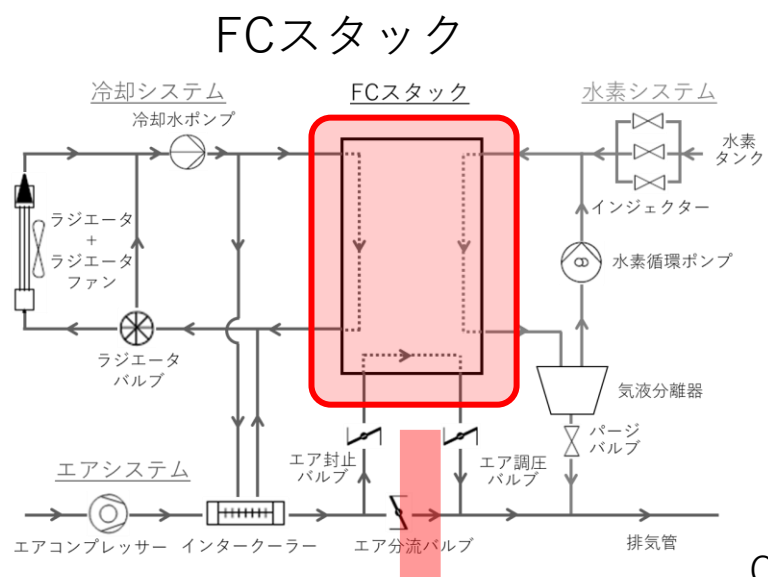
1. 背景：燃料電池 (FC) システム概要



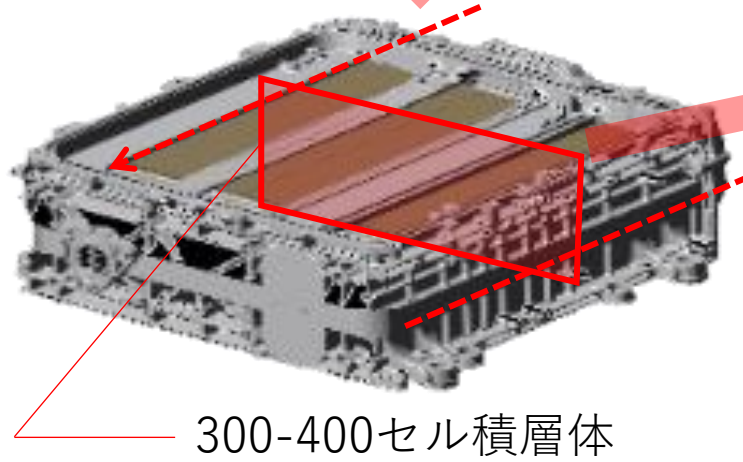
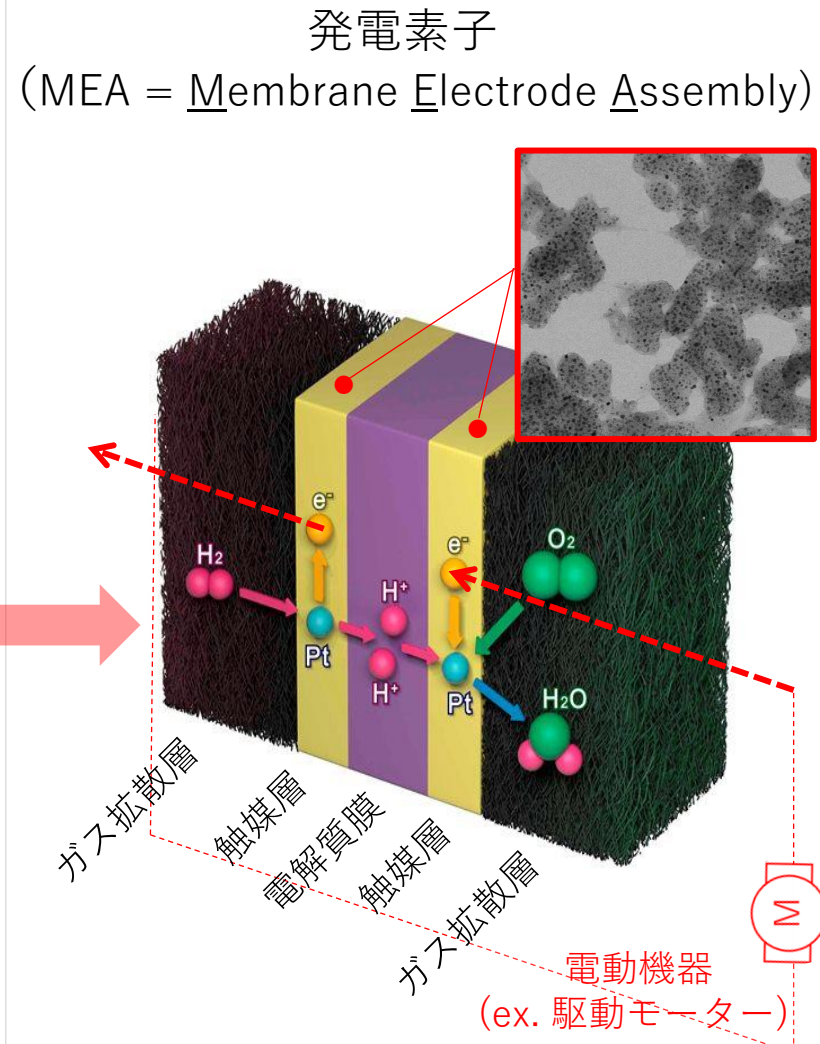
	内燃機関システム	FCシステム
主機	内燃機関エンジン	FCスタック
補機システム	エア吸気系	エア系
	燃料噴射系	水素系
	冷却系	冷却系

FCシステム = 主機のFCスタック + 3系統の補器システムからなる「発電機システム」製品である「電力」を最大効率 (最小水素量) で製造することを使命とする化学プラント

1. 背景：燃料電池 (FC) システム概要



- セパレーター兼ガス流路
- チタン箔、厚さ0.1 mm
 - 流路パターンをプレス成型
 - 表面に耐腐食コーティング



燃料ガス (H₂ · O₂) を流路を介して発電素子 (MEA) へ供給し電力を製造
外部回路に接続された電動機器へ電力を供給

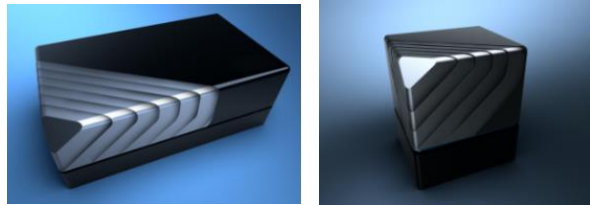
1. 背景：開発プロセスにおける課題

第2世代 燃料電池自動車(FCEV)

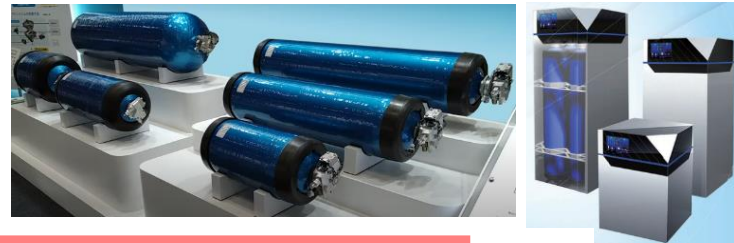


システム再構成

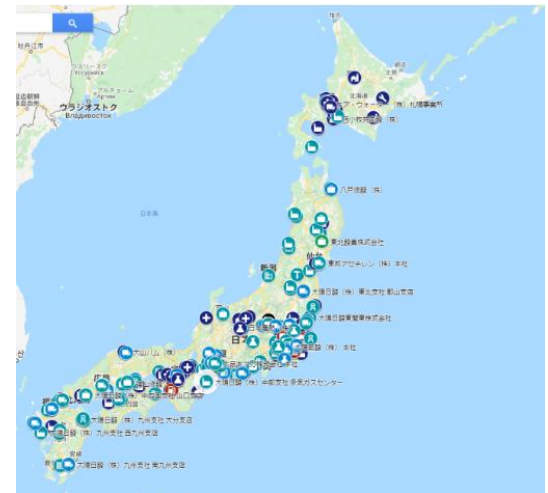
FCシステムモジュール



水素タンクモジュール



水素インフラ事業者



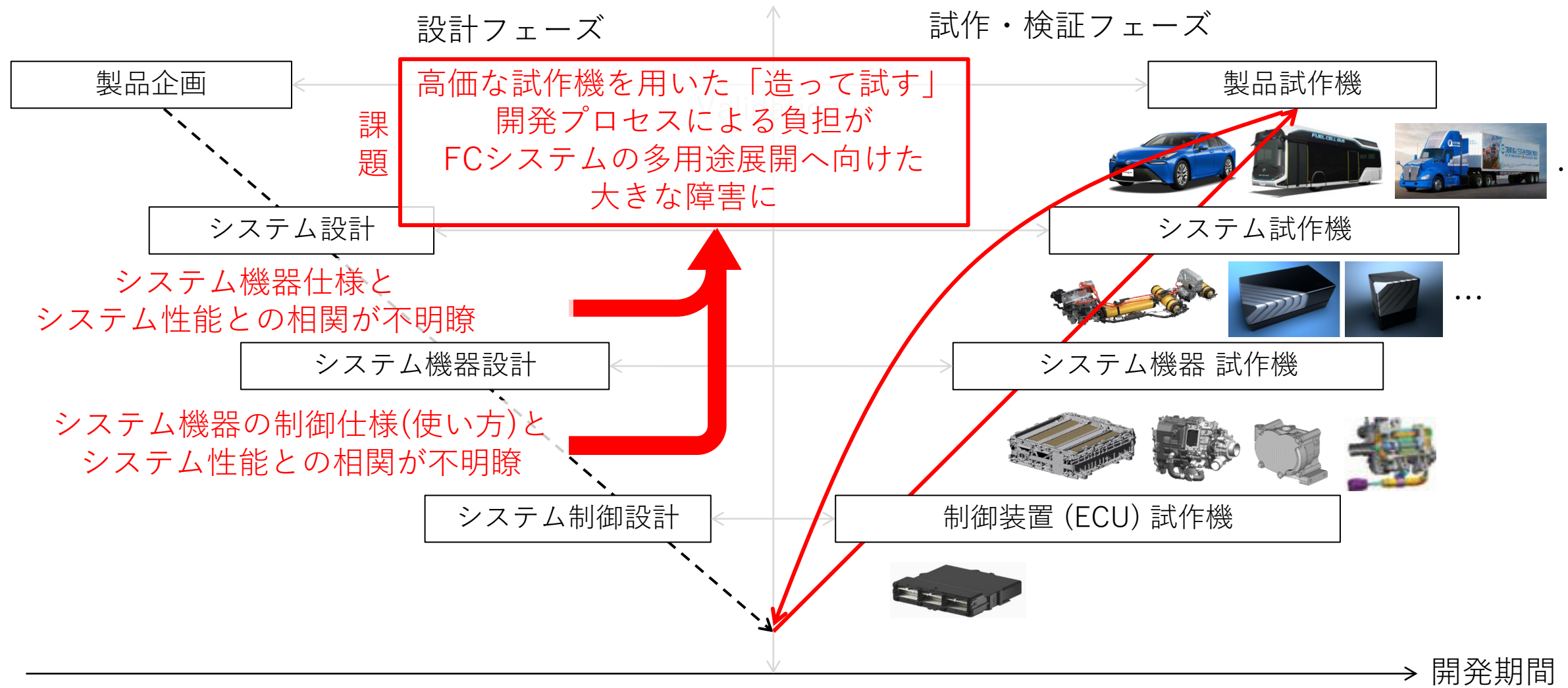
多用途展開



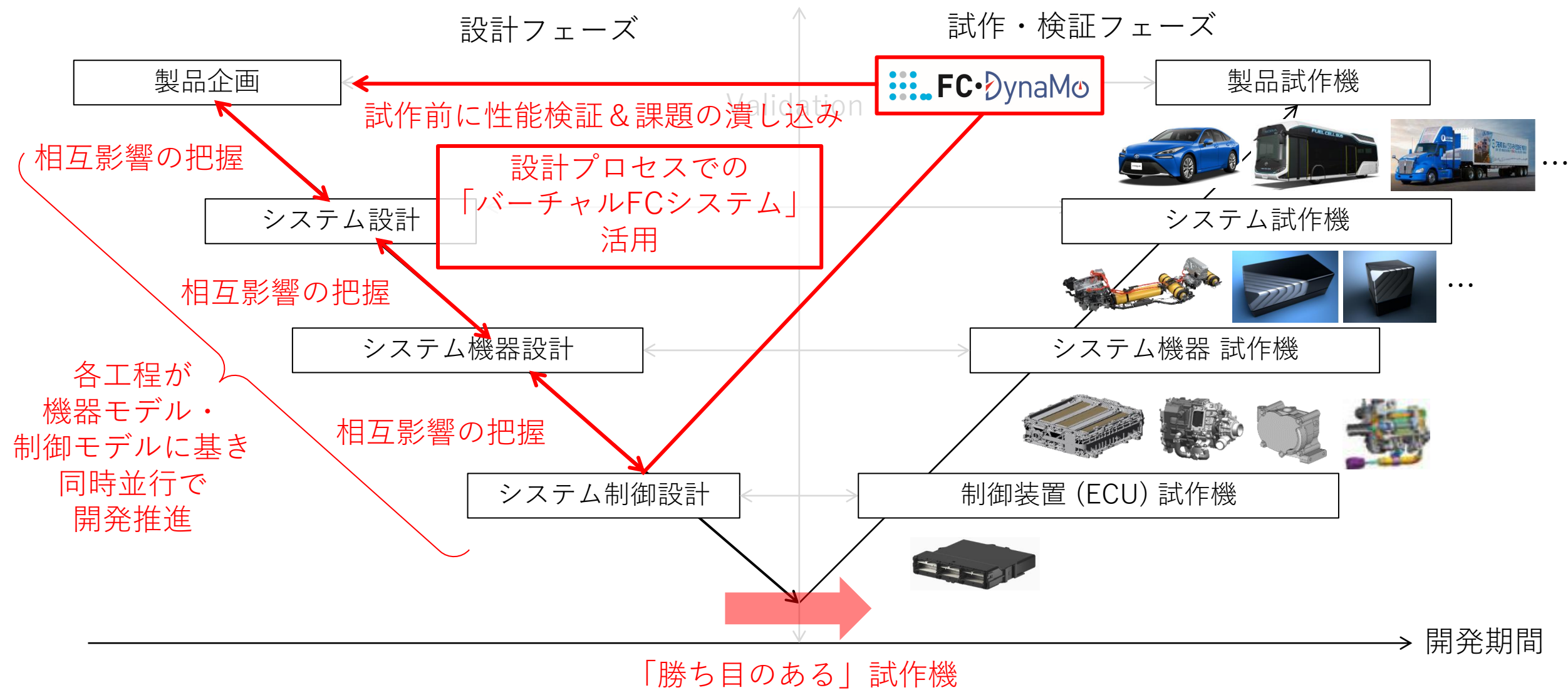
チャレンジ

- 水素利用促進へ向けて、多用途へのFCシステム活用展開
- 多様なFCシステム製品を、リソース増加を抑制しつつ、同時並行で開発する

1. 背景：開発プロセスにおける課題



1. 背景：開発プロセスにおける課題



研究目的：実機による「造って試す」開発プロセスのための開発費用・期間の低減

アジェンダ

1. 背景

- ・燃料電池(FC)システム概要
- ・開発プロセスにおける課題

2. 統合FCシステムシミュレータ FC-DynaMo

3. モデル化手法

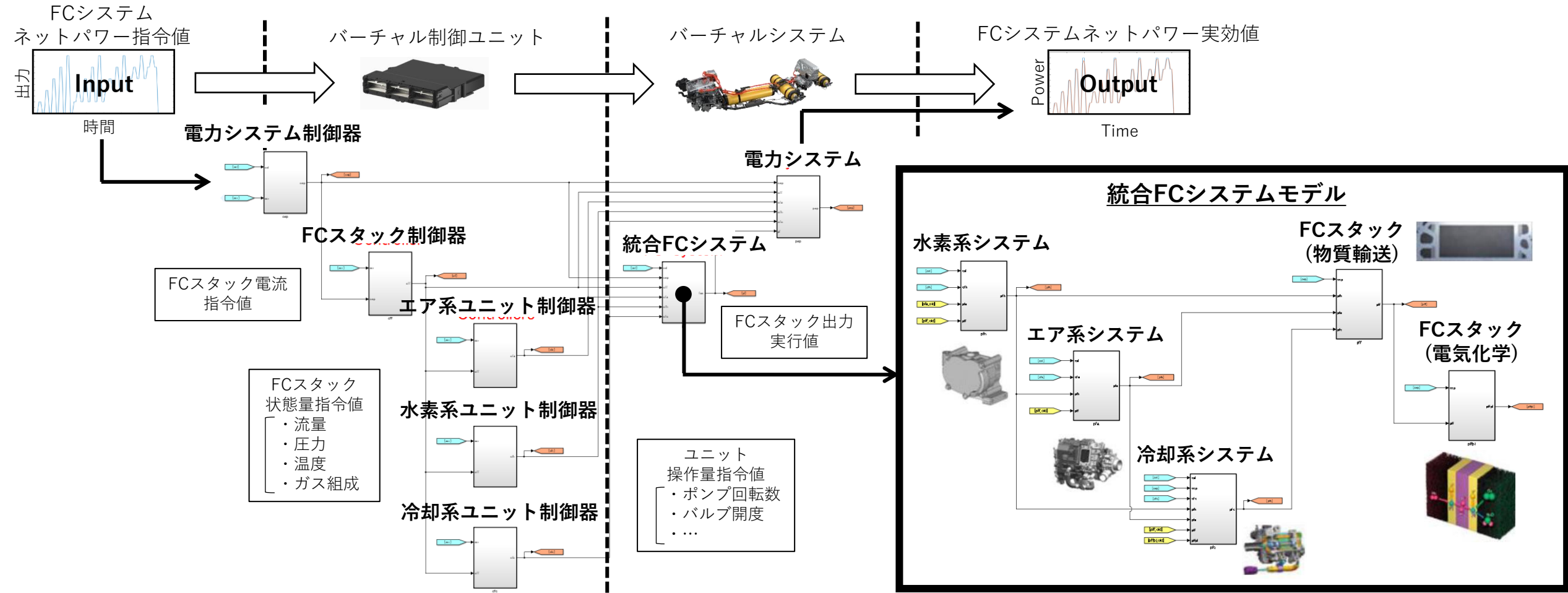
- ・FCモデル
- ・FCシステムモデル (エア・水素・冷却システム)
- ・モデル内パラメータ同定手法
- ・MATLAB/Simulinkへの実装手法
- ・モデル精度検証

4. FCシステム制御器

5. シミュレーション結果

6. 今後の課題

- ・モデル機能拡張
- ・多用途展開へ向けたシミュレータ一流通



特徴 (≒ FC材料・システム開発現場で活用されるための要件)

- ① 網羅性 : ユニット(m) ~ 触媒粒子 (nm) の物理モデルと制御器を包含、FC材料~部品~制御(使い方)をワンストップで検討
- ② 非定常 : システム全体の動特性をシミュレーション可能、**負荷変動の大きいモビリティ**含む種々の用途への展開が可能
- ③ 演算速度 : 将来の年単位のシステム耐久性のシミュレーションに対応、汎用PCで実時間の1/50の演算時間
- ④ 精度 : 市販FCEV (第2世代MIRAI) の実機データによる検証実績、**ユーザーは精度への懸念なく活用**に専念できる
- ⑤ 拡張性 : ブロック・パラメータの組み換えにより、MIRAI仕様から「**レゴブロック的**」にカスタマイズが可能
- ⑥ ユーザビリティ : MATLAB/Simulink のみで動作、**環境構築が容易 & 複数ソフト・言語の習得が不要**、専門領域・強みに専念できる

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

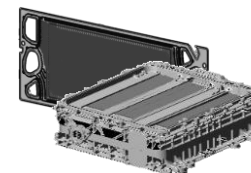


システム機器開発部署

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

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



共通言語



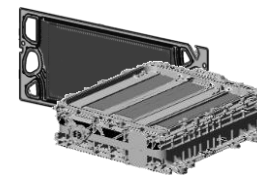
システム機器開発部署

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

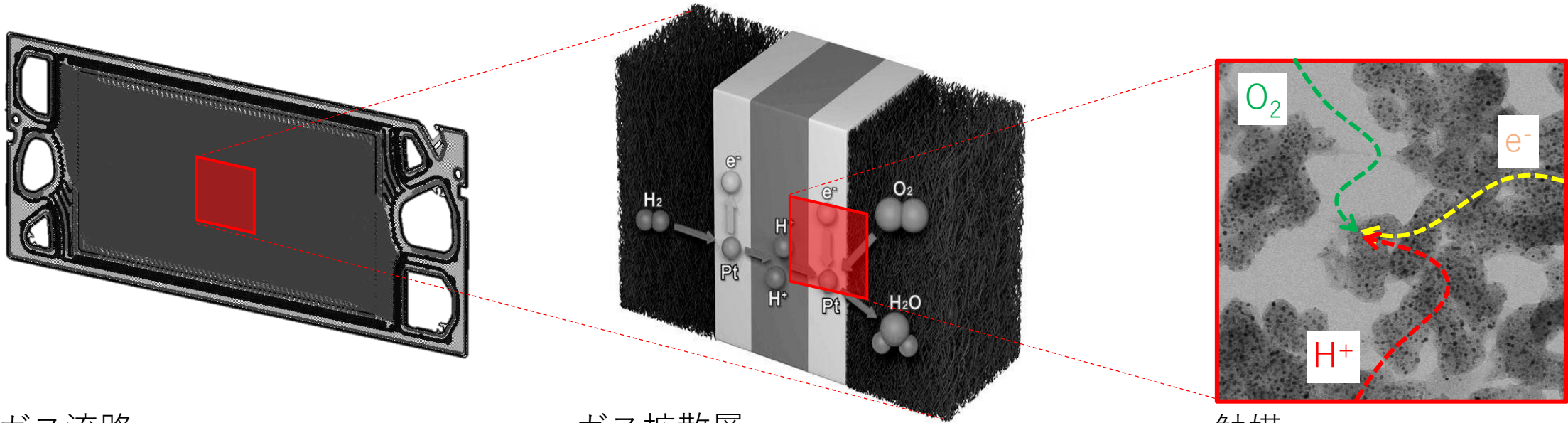


目指す姿：「共通言語」となる開発ツールを介して各専門家間の密な連携を促進協業によるシナジーを生み、システム進化/深化 & 幅広いアプリケーション創出

アジェンダ

1. 背景
 - ・ 燃料電池(FC)システム概要
 - ・ 開発プロセスにおける課題
2. 統合FCシステムシミュレータ  FC-DynaMo
3. モデル化手法
 - ・ FCモデル
 - ・ FCシステムモデル (エア・水素・冷却システム)
 - ・ モデル内パラメータ同定手法
 - ・ MATLAB/Simulinkへの実装手法
 - ・ モデル精度検証
4. FCシステム制御器
5. シミュレーション結果
6. 今後の課題
 - ・ モデル機能拡張
 - ・ 多用途展開へ向けたシミュレータ一流通

3. FCスタックモデル：セル内部の物理現象とモデル化手法



ガス流路

- 保存則
 - 運動量保存
 - モル保存
 - エネルギー保存
- 面内分布
- 流路内の液滴閉塞による圧損増加

ガス拡散層

- 多孔質内の多成分ガス拡散
- 電気伝導

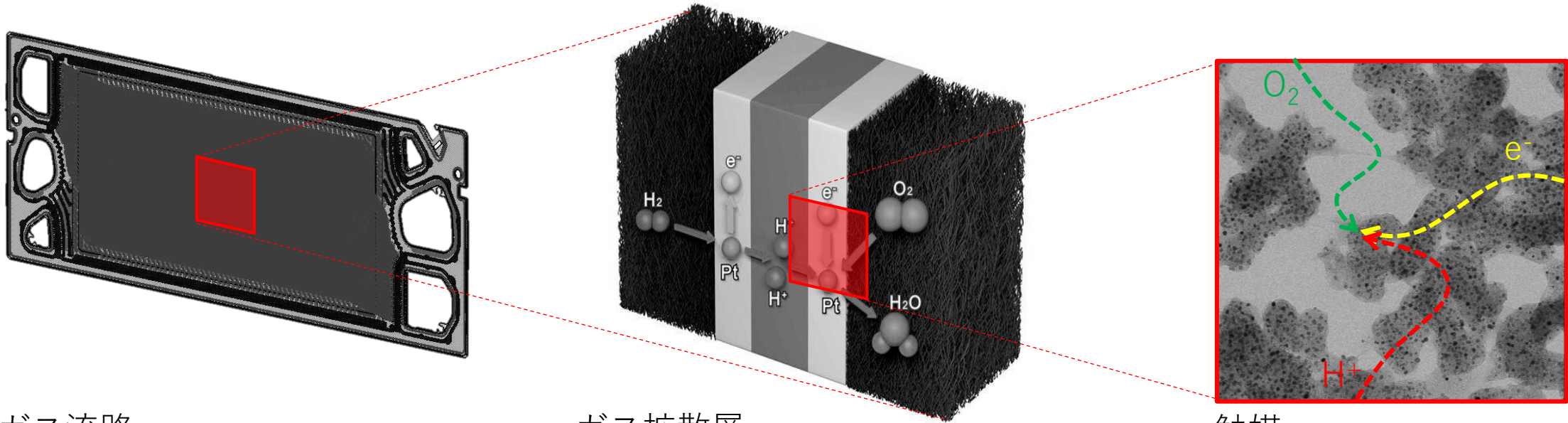
電解質膜

- H₂O輸送
 - 界面での吸着・脱離
 - 拡散
 - 電気浸透
- O₂, H₂, N₂輸送
- H⁺輸送

触媒

- 電解質の感度を考慮した H⁺ 輸送律速
- 電解質の乾燥・細孔内の液滴閉塞を考慮した O₂, H₂ 輸送律速

3. FCスタックモデル：セル内部の物理現象とモデル化手法



ガス流路

- 保存則
 - 運動量保存
 - モル保存
 - エネルギー保存
- 面内分布
- 流路内の液滴閉塞による圧損増加

ガス拡散層

- 多孔質内の多成分ガス拡散
- 電気伝導

電解質膜

- H₂O輸送
 - 界面での吸着・脱離
 - 拡散
 - 電気浸透
- O₂, H₂, N₂輸送
- H⁺輸送

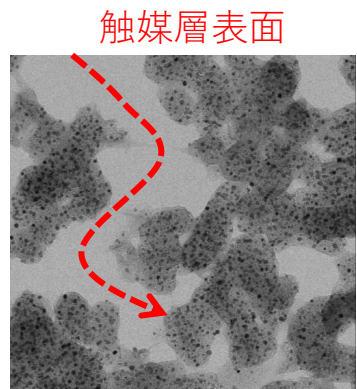
触媒

- 電解質の感想を考慮した H⁺ 輸送律速
- 電解質の乾燥・細孔内の液滴閉塞を考慮した O₂, H₂ 輸送律速

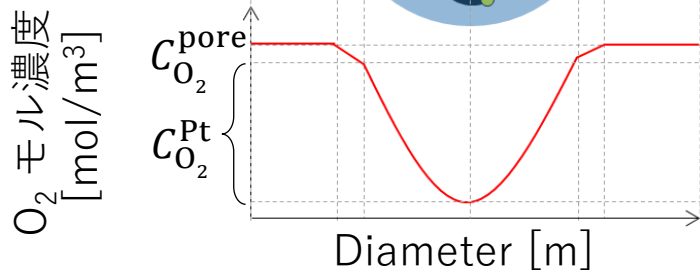
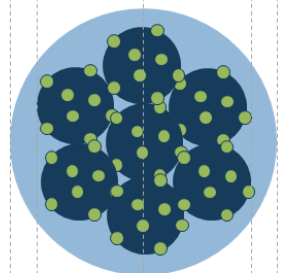
高速演算を目的に、数値計算手法に収束計算が必要な物理モデルを工学モデルで表現

3. FCスタックモデル：触媒層内のO₂/H₂ 輸送の工学モデル化

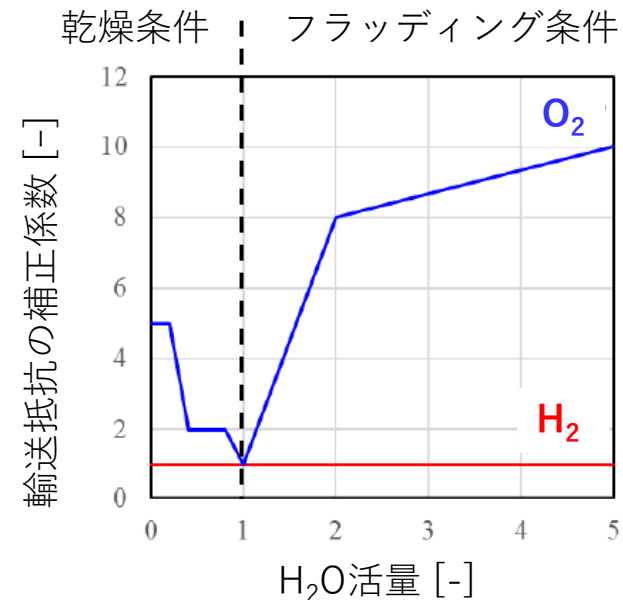
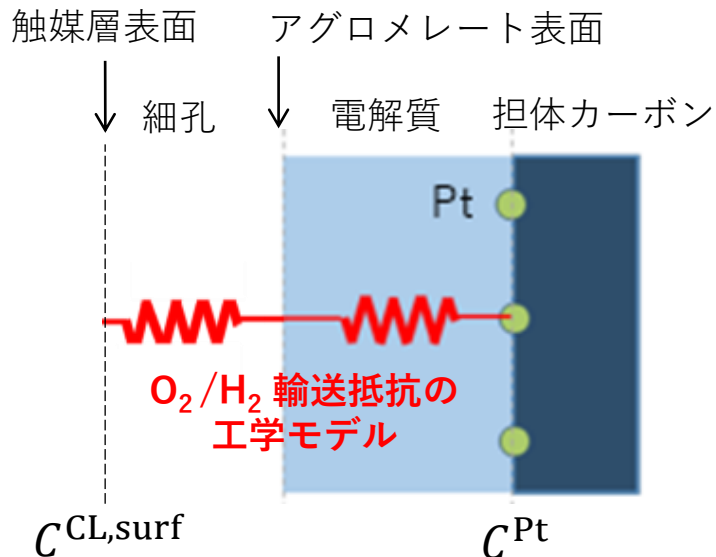
微小細孔・アグロメレート内のO₂/H₂輸送



アグロメレート表面



O₂/H₂ 輸送抵抗モデル



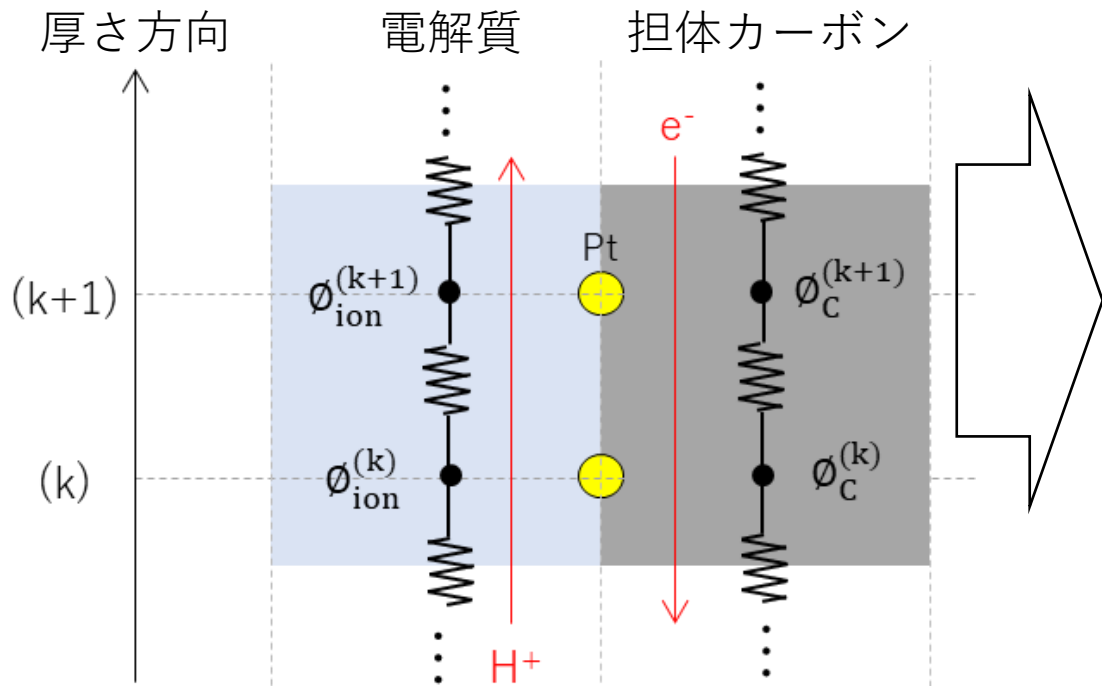
濃度過電圧 (Butler-Volmer式)

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

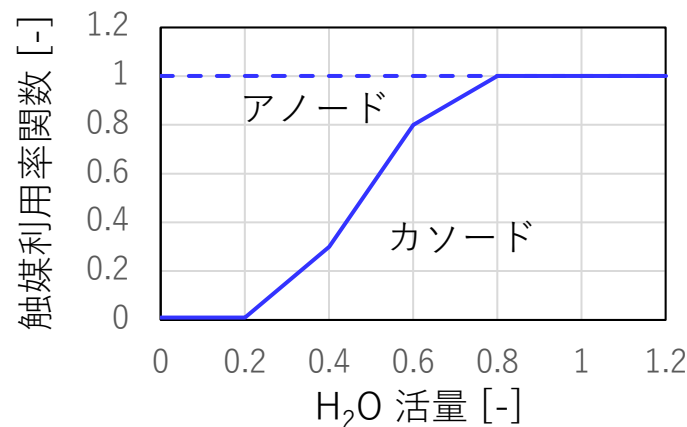
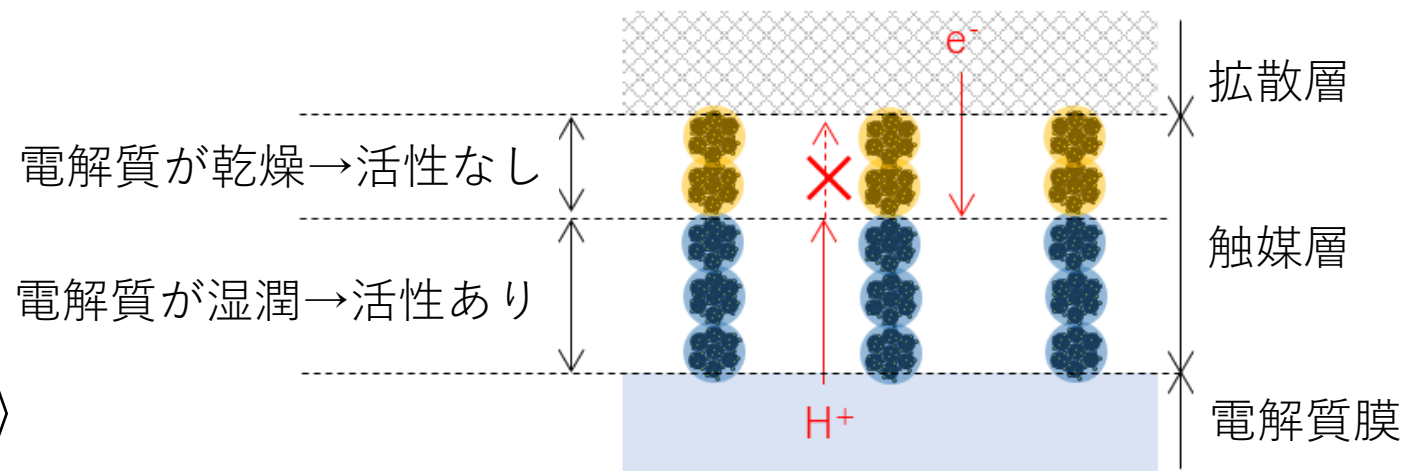
微小細孔・アグロメレート内のO₂/H₂輸送の微分方程式を解くための収束演算にかかるコストを、工学モデル導入により回避する

3. FCスタックモデル：触媒層内のH⁺輸送の工学モデル化

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)

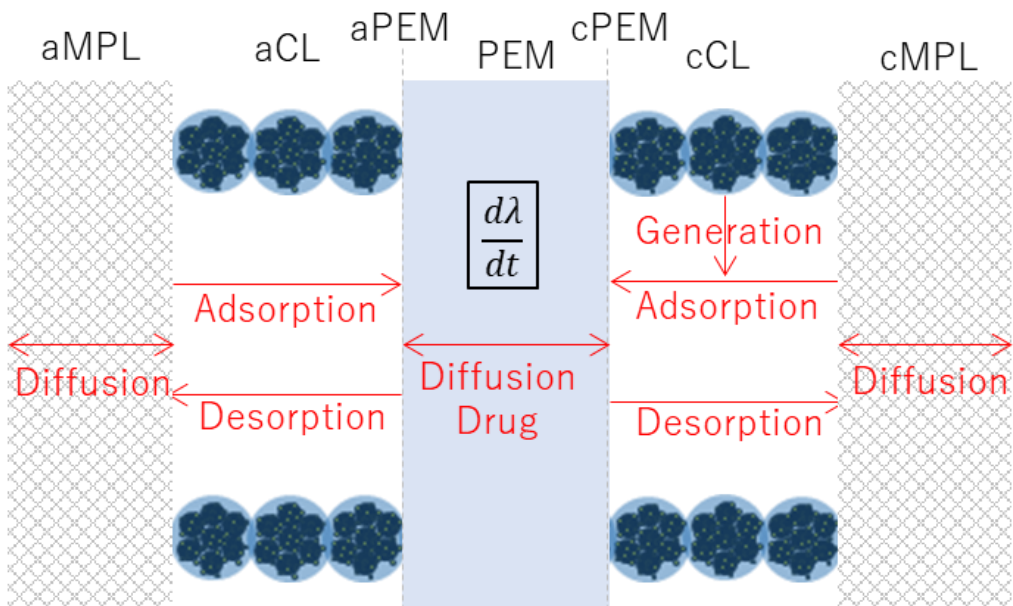
$$\Delta\Phi = \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right)$$

触媒活性パラメータ
(交換電流密度)

電解質・単体カーボン内のH⁺/e⁻輸送の微分方程式を解くための収束演算にかかるコストを、工学モデル導入により回避する

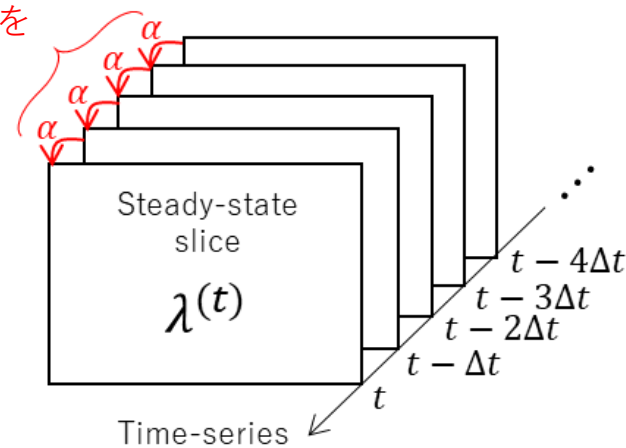
3. FCスタックモデル：PEM内の水の吸収・放出の工学モデル化

PEM内の動的H₂O吸収・放出



吸収・放出速度の擬非定常モデル

定常スライス間を
時定数で接続



定常状態での含水量： $\lambda(t) = \frac{\lambda_{aPEM}^{(t)} + \lambda_{cPEM}^{(t)}}{2}$

吸収・放出の過渡現象を時定数で表現

$$\lambda(t) = \lambda(t) - (\lambda(t) - \lambda^{(t-\Delta t)}) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)$$

$$\approx \alpha \lambda^{(t)} + (1 - \alpha) \lambda^{(t-\Delta t)}, \quad \alpha = \frac{\Delta t}{\tau}$$

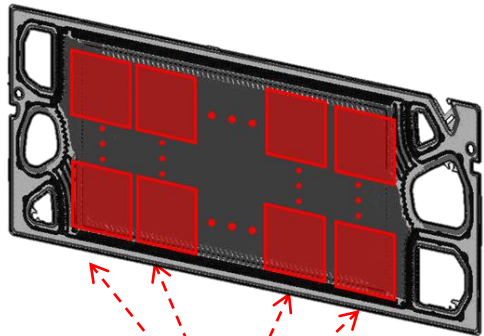
- $\lambda(t) \geq \lambda^{(t-\Delta t)}$, 吸収： $\tau = \tau_{abs}$ (small = fast)
- $\lambda(t) < \lambda^{(t-\Delta t)}$, 放出： $\tau = \tau_{des}$ (large = slow)

PEM内の界面での吸脱着を考慮したH₂O収支の微分方程式を解くための収束演算にかかるコストを、工学モデル導入により回避する

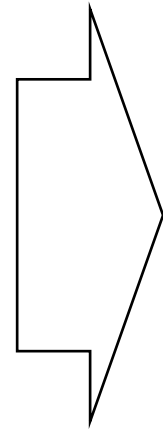
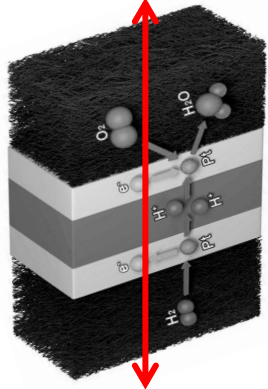
3. FCスタックモデル：セル面内分布の工学モデル化

セル内分布の離散表現

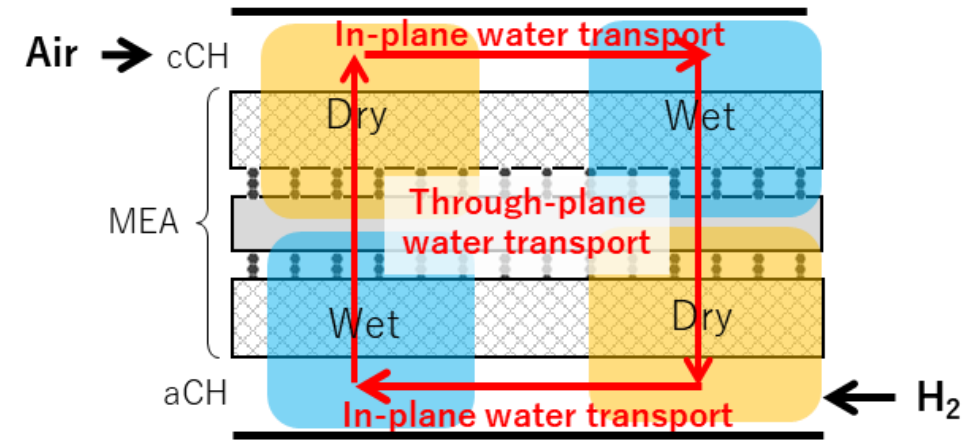
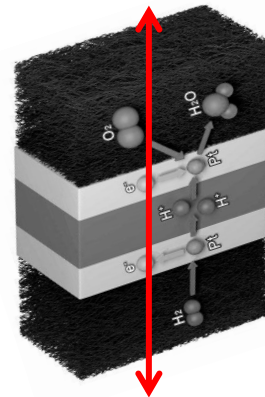
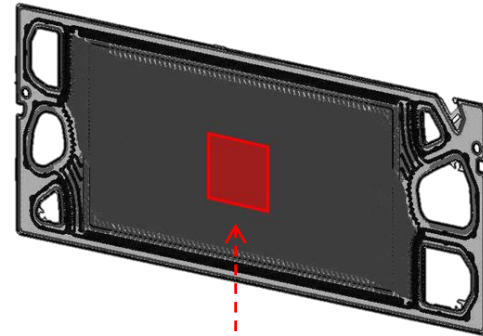
セル面内分布



セル断面分布



積分平均での状態量



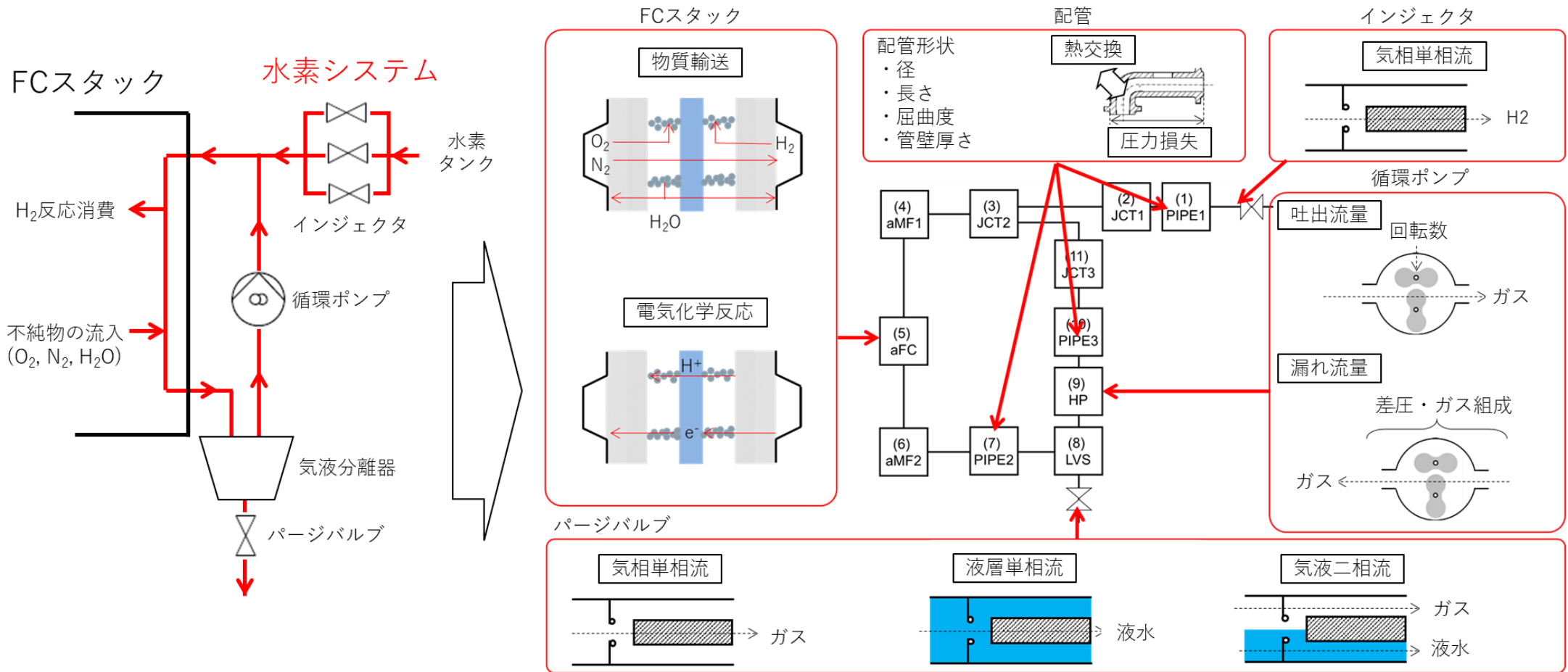
積分平均関数

$$P_i^{\text{CH}} = \alpha P_i^{\text{CH},\text{in}} + (1 - \alpha) P_i^{\text{CH},\text{out}}$$

$$\begin{cases} \text{For } i = \text{O}_2, \text{H}_2, \text{N}_2 & \alpha = 0.5 \\ \text{For } i = \text{H}_2\text{O} & \alpha = 1.0 \end{cases}$$

セル面内のマス・エネルギー・チャージバランスの微分方程式を解くための収束演算にかかるコストを、工学モデル導入により回避する

3. FCシステムモデル：モデリング手法



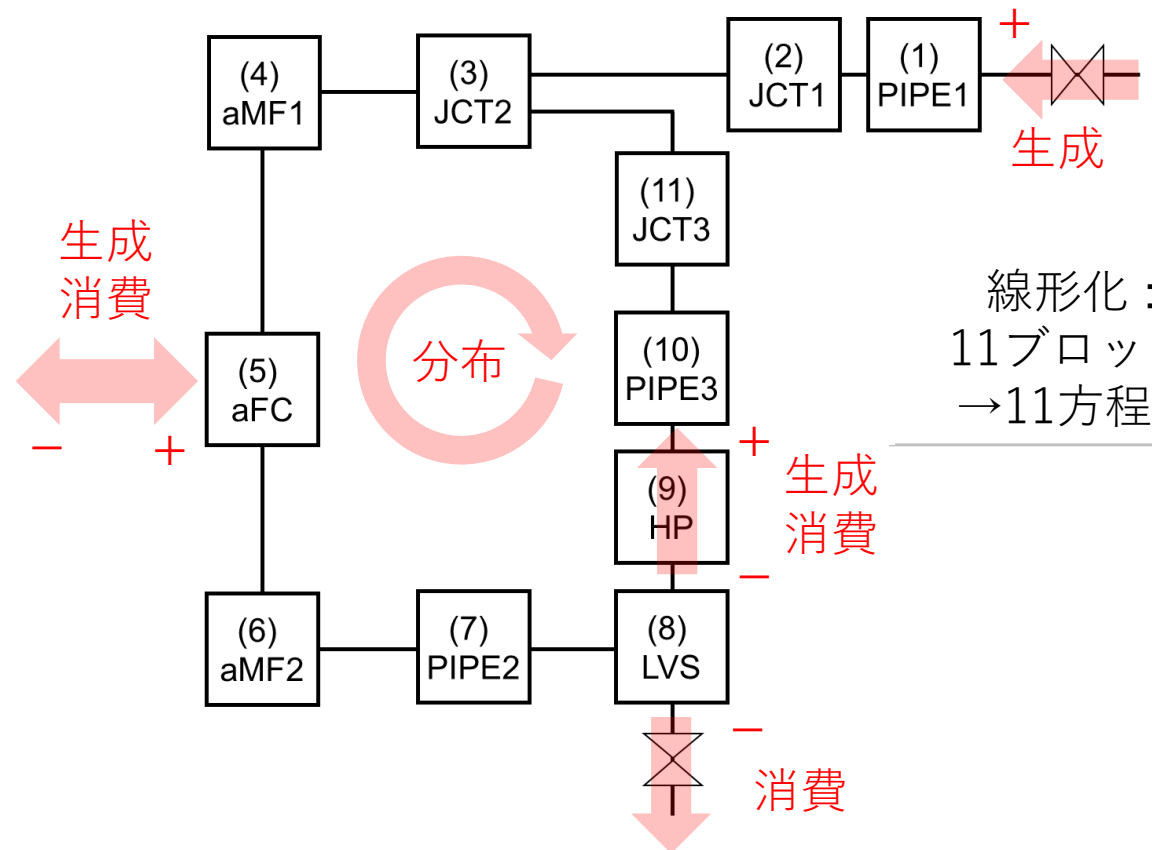
- 機能ブロック図
- システム全体を、「部品単位」の粒度で分解 (部品内部の分布は考慮しない)
 - 各ブロックには、状態量を格納 (流量・圧力・温度・ガス組成)
 - 各ブロックには、部品固有の物理モデルを格納 (物質輸送・熱輸送・反応)

「FC・システム部品による物質・熱の生成・消費の影響が、1時間ステップ内(≒20 ms)でどうシステム全体に伝播したか」を解く

FCスタック材料・部品・制御(使い方)を、「レゴブロック」的にブロックを挿替えることで種々のシステムを容易に表現可能

3. FCシステムモデル：数値計算手法

機能ブロック図



線形化：
11ブロック
→11方程式

マスバランス
(圧力分布)

モルバランス
(O_2, H_2, N_2, H_2O)
の分圧分布

エネルギーバランス
(温度分布)

線形代数方程式

$$\begin{matrix}
 (1) \text{ PIPE1} \\
 (2) \text{ JCT1} \\
 (3) \text{ JCT2} \\
 (4) \text{ aMF1} \\
 (5) \text{ aFC} \\
 (6) \text{ aFC2} \\
 (7) \text{ PIPE2} \\
 (8) \text{ LVS} \\
 (9) \text{ HP} \\
 (10) \text{ PIPE3} \\
 (11) \text{ JCT3}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 p_{tot}^{(1)} \\
 p_{tot}^{(2)} \\
 p_{tot}^{(3)} \\
 p_{tot}^{(4)} \\
 p_{tot}^{(5)} \\
 p_{tot}^{(6)} \\
 p_{tot}^{(7)} \\
 p_{tot}^{(8)} \\
 p_{tot}^{(9)} \\
 p_{tot}^{(10)} \\
 p_{tot}^{(11)}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 a^{(1)(1)} & a^{(1)(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a^{(2)(1)} & a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a^{(3)(2)} & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(3)(11)} \\
 0 & 0 & a^{(4)(3)} & a^{(4)(4)} & a^{(4)(5)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & a^{(5)(4)} & a^{(5)(5)} & a^{(5)(6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(6)(5)} & a^{(6)(6)} & a^{(6)(7)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & a^{(7)(8)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(7)} & a^{(9)(8)} & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} \\
 0 & 0 & a^{(11)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)}
 \end{pmatrix}^{-1}
 \begin{pmatrix}
 b^{(1)} \\
 b^{(2)} \\
 b^{(3)} \\
 b^{(4)} \\
 b^{(5)} \\
 b^{(6)} \\
 b^{(7)} \\
 b^{(8)} \\
 b^{(9)} \\
 b^{(10)} \\
 b^{(11)}
 \end{pmatrix}$$

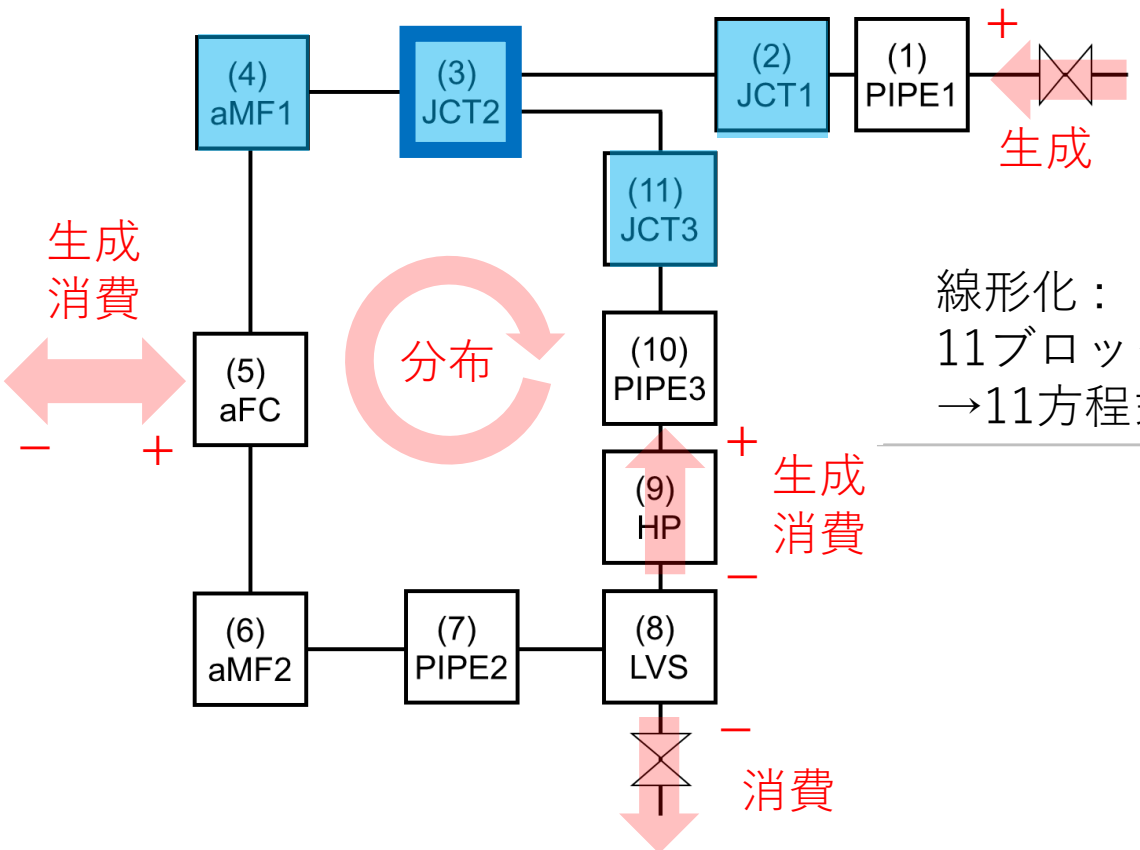
$$\begin{matrix}
 (1) \text{ PIPE1} \\
 (2) \text{ JCT1} \\
 (3) \text{ JCT2} \\
 (4) \text{ aMF1} \\
 (5) \text{ aFC} \\
 (6) \text{ aFC2} \\
 (7) \text{ PIPE2} \\
 (8) \text{ LVS} \\
 (9) \text{ HP} \\
 (10) \text{ PIPE3} \\
 (11) \text{ JCT3}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 p_i^{(1)} \\
 p_i^{(2)} \\
 p_i^{(3)} \\
 p_i^{(4)} \\
 p_i^{(5)} \\
 p_i^{(6)} \\
 p_i^{(7)} \\
 p_i^{(8)} \\
 p_i^{(9)} \\
 p_i^{(10)} \\
 p_i^{(12)}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 a^{(1)(1)} & a^{(1)(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a^{(2)(1)} & a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a^{(3)(2)} & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(3)(11)} \\
 0 & 0 & a^{(4)(3)} & a^{(4)(4)} & a^{(4)(5)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & a^{(5)(4)} & a^{(5)(5)} & a^{(5)(6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(6)(5)} & a^{(6)(6)} & a^{(6)(7)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & a^{(7)(8)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(7)} & a^{(9)(8)} & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} \\
 0 & 0 & a^{(11)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)}
 \end{pmatrix}^{-1}
 \begin{pmatrix}
 b_i^{(1)} \\
 b_i^{(2)} \\
 b_i^{(3)} \\
 b_i^{(4)} \\
 b_i^{(5)} \\
 b_i^{(6)} \\
 b_i^{(7)} \\
 b_i^{(8)} \\
 b_i^{(9)} \\
 b_i^{(10)} \\
 b_i^{(11)}
 \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix}
 (1) \text{ PIPE1} \\
 (2) \text{ JCT1} \\
 (3) \text{ JCT2} \\
 (4) \text{ aMF1} \\
 (5) \text{ aFC} \\
 (6) \text{ aFC2} \\
 (7) \text{ PIPE2} \\
 (8) \text{ LVS} \\
 (9) \text{ HP} \\
 (10) \text{ PIPE3} \\
 (11) \text{ JCT3}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 T^{(1)} \\
 T^{(2)} \\
 T^{(3)} \\
 T^{(4)} \\
 T^{(5)} \\
 T^{(6)} \\
 T^{(7)} \\
 T^{(8)} \\
 T^{(9)} \\
 T^{(10)} \\
 T^{(11)}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 a^{(1)(1)} & a^{(1)(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a^{(2)(1)} & a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a^{(3)(2)} & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(3)(11)} \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & a^{(8)(9)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(7)} & a^{(9)(8)} & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} \\
 0 & 0 & a^{(11)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)}
 \end{pmatrix}^{-1}
 \begin{pmatrix}
 b^{(1)} \\
 b^{(2)} \\
 b^{(3)} \\
 T^{aFC1} \\
 T^{aFC1} + T^{aFC2} \\
 T^{aFC1} \\
 b^{(7)} \\
 b^{(8)} \\
 b^{(9)} \\
 b^{(10)} \\
 b^{(11)}
 \end{pmatrix}$$

「1時間ステップ内に、生成・消費の影響がシステム全体にどのように伝播したか」を、マスバランス・モルバランス・エネルギーバランスの線形代数方程式で表現する

3. FCシステムモデル：数値計算手法

機能ブロック図



マスバランス
(圧力分布)

線形化：
11ブロック
→11方程式

モルバランス
(O_2, H_2, N_2, H_2O)
の分圧分布

エネルギーバランス
(温度分布)

線形代数方程式

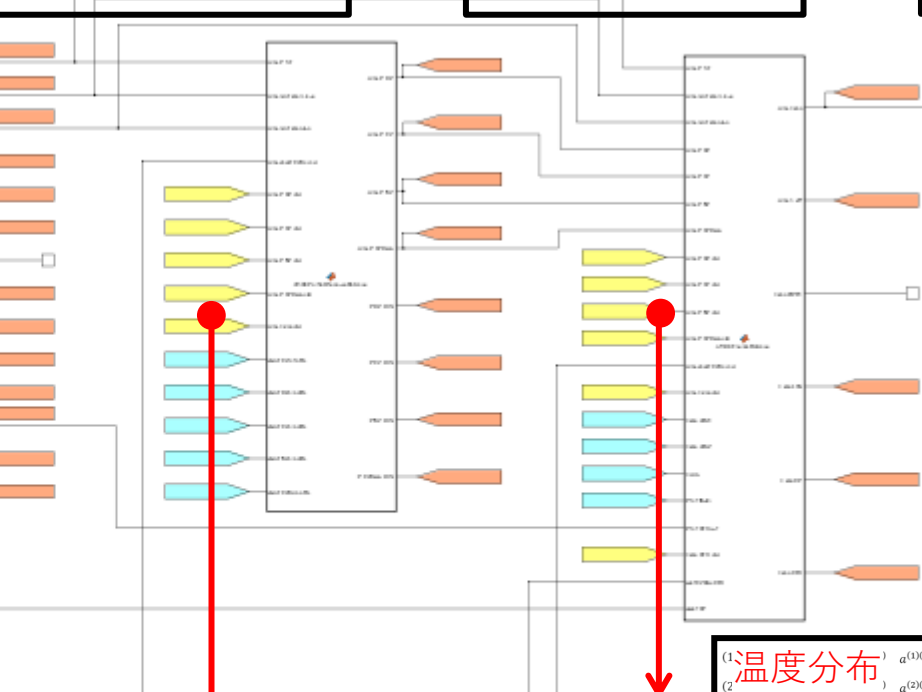
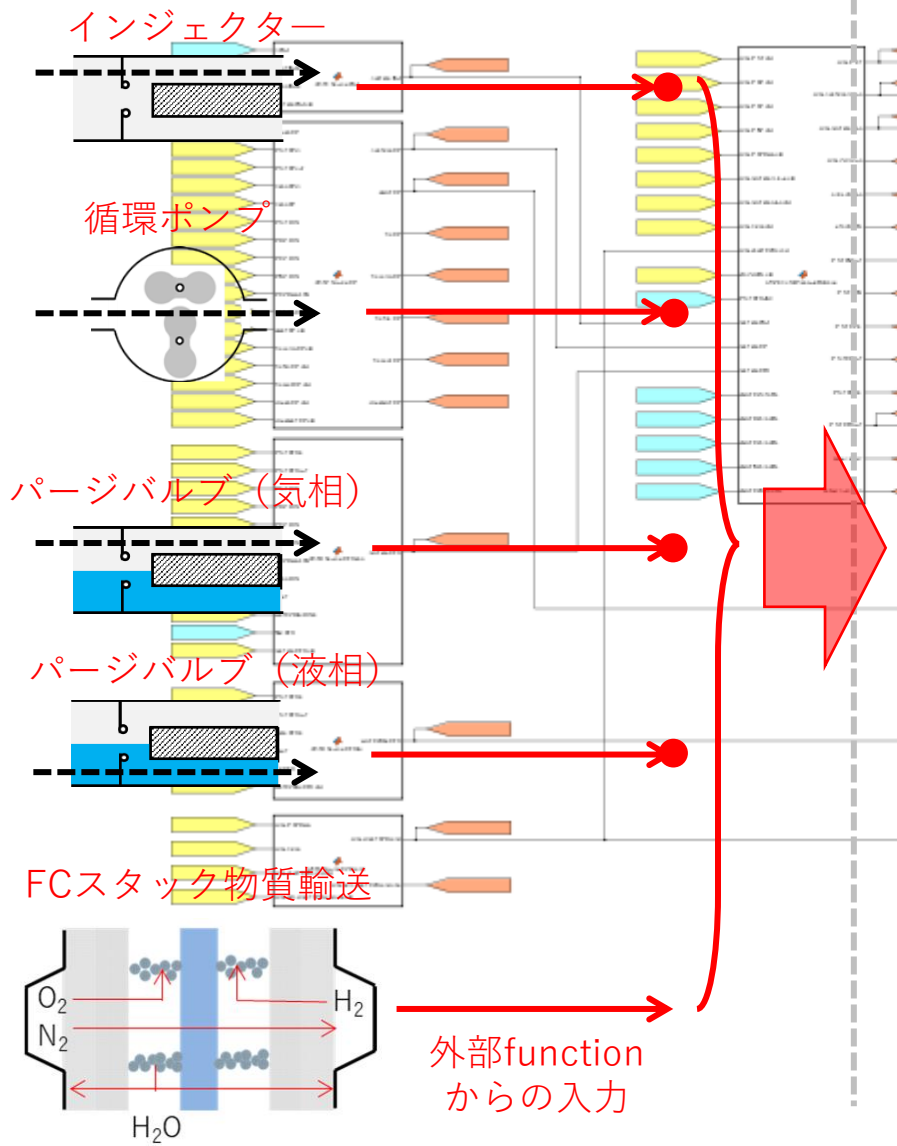
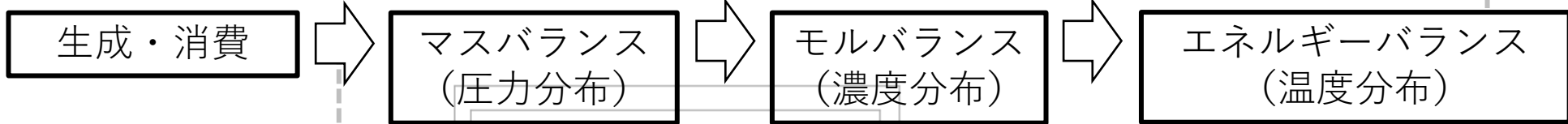
$$\begin{matrix}
 (1) \text{ PIPE1} \\
 (2) \text{ JCT1} \\
 (3) \text{ JCT2} \\
 (4) \text{ aMF1} \\
 (5) \text{ aFC} \\
 (6) \text{ aFC2} \\
 (7) \text{ PIPE2} \\
 (8) \text{ LVS} \\
 (9) \text{ HP} \\
 (10) \text{ PIPE3} \\
 (11) \text{ JCT3}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 p_{tot}^{(1)} \\
 p_{tot}^{(2)} \\
 p_{tot}^{(3)} \\
 p_{tot}^{(4)} \\
 p_{tot}^{(5)} \\
 p_{tot}^{(6)} \\
 p_{tot}^{(7)} \\
 p_{tot}^{(8)} \\
 p_{tot}^{(9)} \\
 p_{tot}^{(10)} \\
 p_{tot}^{(11)}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 a^{(1)(1)} & a^{(1)(2)} & a^{(1)(3)} & a^{(1)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a^{(2)(1)} & a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & a^{(2)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a^{(3)(2)} & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & a^{(4)(5)} & a^{(4)(6)} & a^{(4)(7)} & a^{(4)(8)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(5)(6)} & a^{(5)(7)} & a^{(5)(8)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(6)(5)} & a^{(6)(6)} & a^{(6)(7)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & a^{(7)(8)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} \\
 0 & 0 & a^{(11)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)}
 \end{pmatrix}^{-1}
 \begin{pmatrix}
 b^{(1)} \\
 b^{(2)} \\
 b^{(3)} \\
 b^{(4)} \\
 b^{(5)} \\
 b^{(6)} \\
 b^{(7)} \\
 b^{(8)} \\
 b^{(9)} \\
 b^{(10)} \\
 b^{(11)}
 \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix}
 (1) \text{ PIPE1} \\
 (2) \text{ JCT1} \\
 (3) \text{ JCT2} \\
 (4) \text{ aMF1} \\
 (5) \text{ aFC} \\
 (6) \text{ aFC2} \\
 (7) \text{ PIPE2} \\
 (8) \text{ LVS} \\
 (9) \text{ HP} \\
 (10) \text{ PIPE3} \\
 (11) \text{ JCT3}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 p_{tot}^{(1)} \\
 p_{tot}^{(2)} \\
 p_{tot}^{(3)} \\
 p_{tot}^{(4)} \\
 p_{tot}^{(5)} \\
 p_{tot}^{(6)} \\
 p_{tot}^{(7)} \\
 p_{tot}^{(8)} \\
 p_{tot}^{(9)} \\
 p_{tot}^{(10)} \\
 p_{tot}^{(11)}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 a^{(1)(1)} & a^{(1)(2)} & a^{(1)(3)} & a^{(1)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a^{(2)(1)} & a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & a^{(2)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a^{(3)(2)} & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & a^{(4)(5)} & a^{(4)(6)} & a^{(4)(7)} & a^{(4)(8)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(5)(6)} & a^{(5)(7)} & a^{(5)(8)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(6)(5)} & a^{(6)(6)} & a^{(6)(7)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & a^{(7)(8)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} \\
 0 & 0 & a^{(11)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)}
 \end{pmatrix}^{-1}
 \begin{pmatrix}
 b^{(1)} \\
 b^{(2)} \\
 b^{(3)} \\
 b^{(4)} \\
 b^{(5)} \\
 b^{(6)} \\
 b^{(7)} \\
 b^{(8)} \\
 b^{(9)} \\
 b^{(10)} \\
 b^{(11)}
 \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix}
 (1) \text{ PIPE1} \\
 (2) \text{ JCT1} \\
 (3) \text{ JCT2} \\
 (4) \text{ aMF1} \\
 (5) \text{ aFC} \\
 (6) \text{ aFC2} \\
 (7) \text{ PIPE2} \\
 (8) \text{ LVS} \\
 (9) \text{ HP} \\
 (10) \text{ PIPE3} \\
 (11) \text{ JCT3}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 T^{(1)} \\
 T^{(2)} \\
 T^{(3)} \\
 T^{(4)} \\
 T^{(5)} \\
 T^{(6)} \\
 T^{(7)} \\
 T^{(8)} \\
 T^{(9)} \\
 T^{(10)} \\
 T^{(11)}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 a^{(1)(1)} & a^{(1)(2)} & a^{(1)(3)} & a^{(1)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a^{(2)(1)} & a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & a^{(2)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & a^{(3)(2)} & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & a^{(8)(9)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(8)} & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} & 0 \\
 0 & 0 & a^{(11)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)}
 \end{pmatrix}^{-1}
 \begin{pmatrix}
 b^{(1)} \\
 b^{(2)} \\
 b^{(3)} \\
 T^{aFC1} \\
 \frac{T^{aFC1} + T^{aFC2}}{2} \\
 T^{aFC2} \\
 b^{(7)} \\
 b^{(8)} \\
 b^{(9)} \\
 b^{(10)} \\
 b^{(11)}
 \end{pmatrix}$$

「1時間ステップ内に、ソースの影響がシステム全体にどのように伝播したか」を、マスバランス・モルバランス・エネルギーバランスの線形代数方程式で表現する

3. FCシステムのモデリング手法：MATLAB/Simulinkへの実装



(1) 分圧分布

$$\begin{pmatrix} (1) & (2) \\ (2) & (3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^{(1)(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b^{(1)} \\ b^{(2)} \end{pmatrix}$$

(2) 温度分布

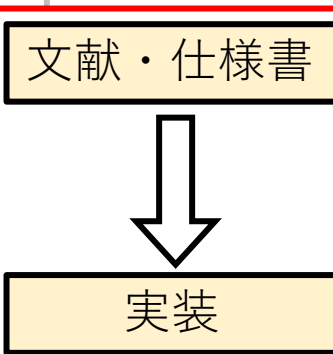
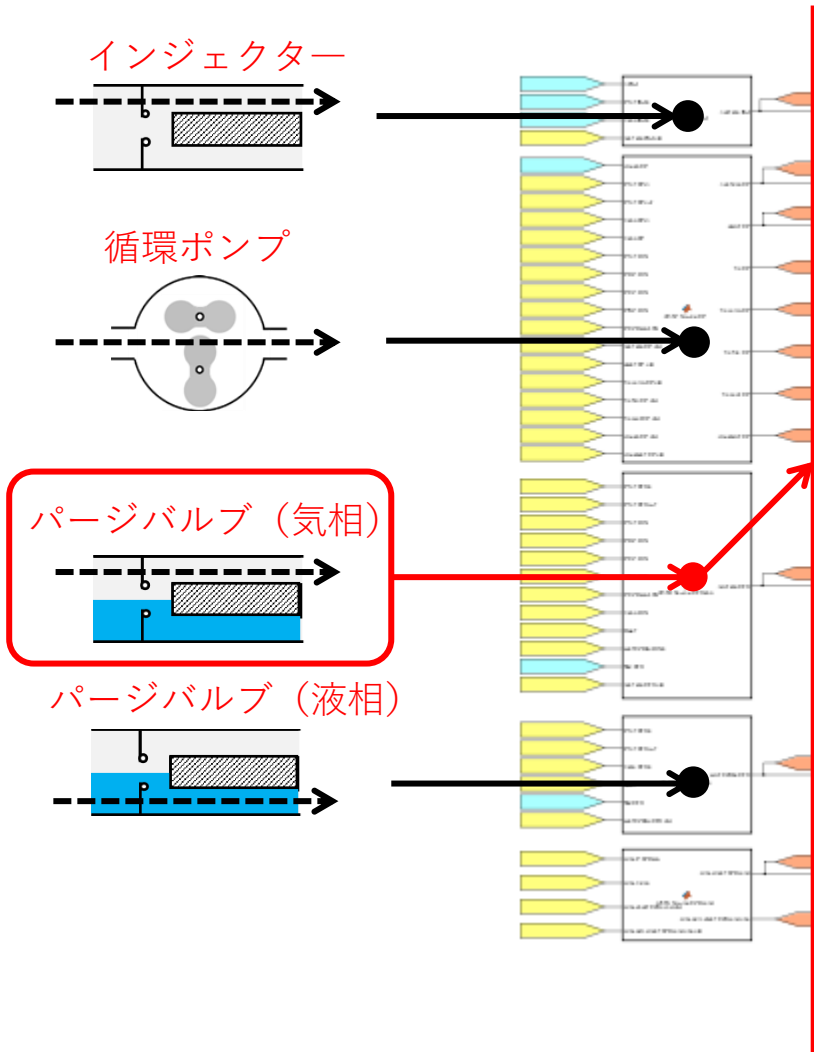
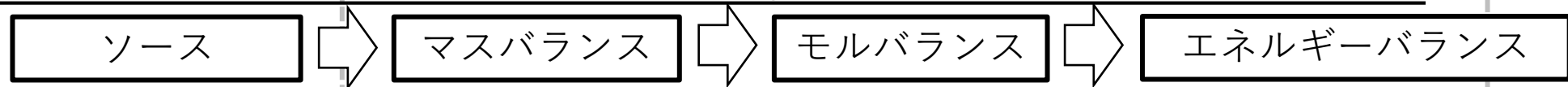
$$\begin{pmatrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) & (9) & (10) & (11) \\ (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) & (9) & (10) & (11) & (12) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^{(1)(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^{(4)(3)} & a^{(4)(4)} & a^{(4)(5)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^{(5)(4)} & a^{(5)(5)} & a^{(5)(6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(6)(5)} & a^{(6)(6)} & a^{(6)(7)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & a^{(7)(8)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(8)} & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b^{(1)} \\ b^{(2)} \\ b^{(3)} \\ b^{(4)} \\ b^{(5)} \\ b^{(6)} \\ b^{(7)} \\ b^{(8)} \\ b^{(9)} \\ b^{(10)} \\ b^{(11)} \end{pmatrix}$$

(3) 圧力分布

$$\begin{pmatrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) & (9) & (10) & (11) \\ (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) & (9) & (10) & (11) & (12) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^{(1)(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a^{(2)(2)} & a^{(2)(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^{(3)(3)} & a^{(3)(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^{(4)(3)} & a^{(4)(4)} & a^{(4)(5)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^{(5)(4)} & a^{(5)(5)} & a^{(5)(6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(6)(5)} & a^{(6)(6)} & a^{(6)(7)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(7)(6)} & a^{(7)(7)} & a^{(7)(8)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(8)(7)} & a^{(8)(8)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(9)(8)} & a^{(9)(9)} & a^{(9)(10)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(10)(9)} & a^{(10)(10)} & a^{(10)(11)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a^{(11)(10)} & a^{(11)(11)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b^{(1)} \\ b^{(2)} \\ b^{(3)} \\ b^{(4)} \\ b^{(5)} \\ b^{(6)} \\ b^{(7)} \\ b^{(8)} \\ b^{(9)} \\ b^{(10)} \\ b^{(11)} \end{pmatrix}$$

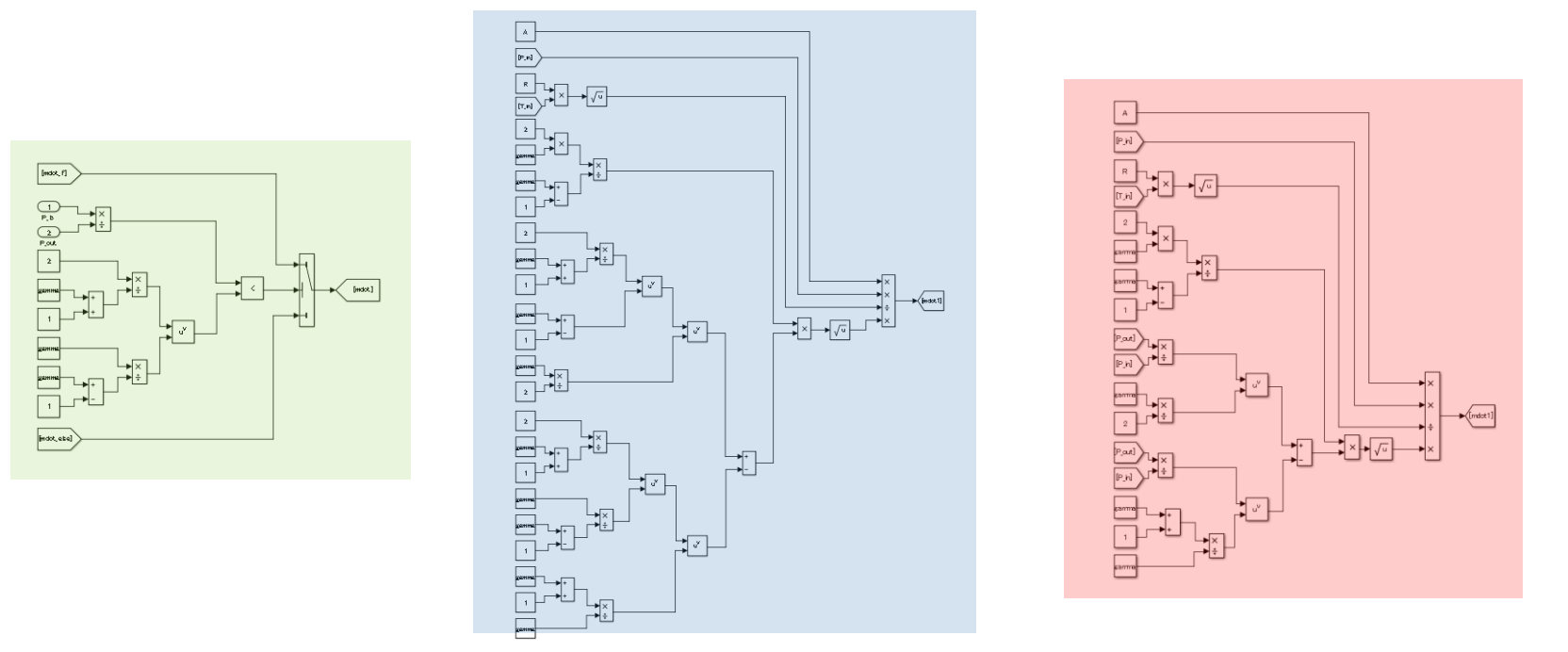
外部functionからの入力

3. FCシステムモデル：MATLAB/Simulinkへの実装手法



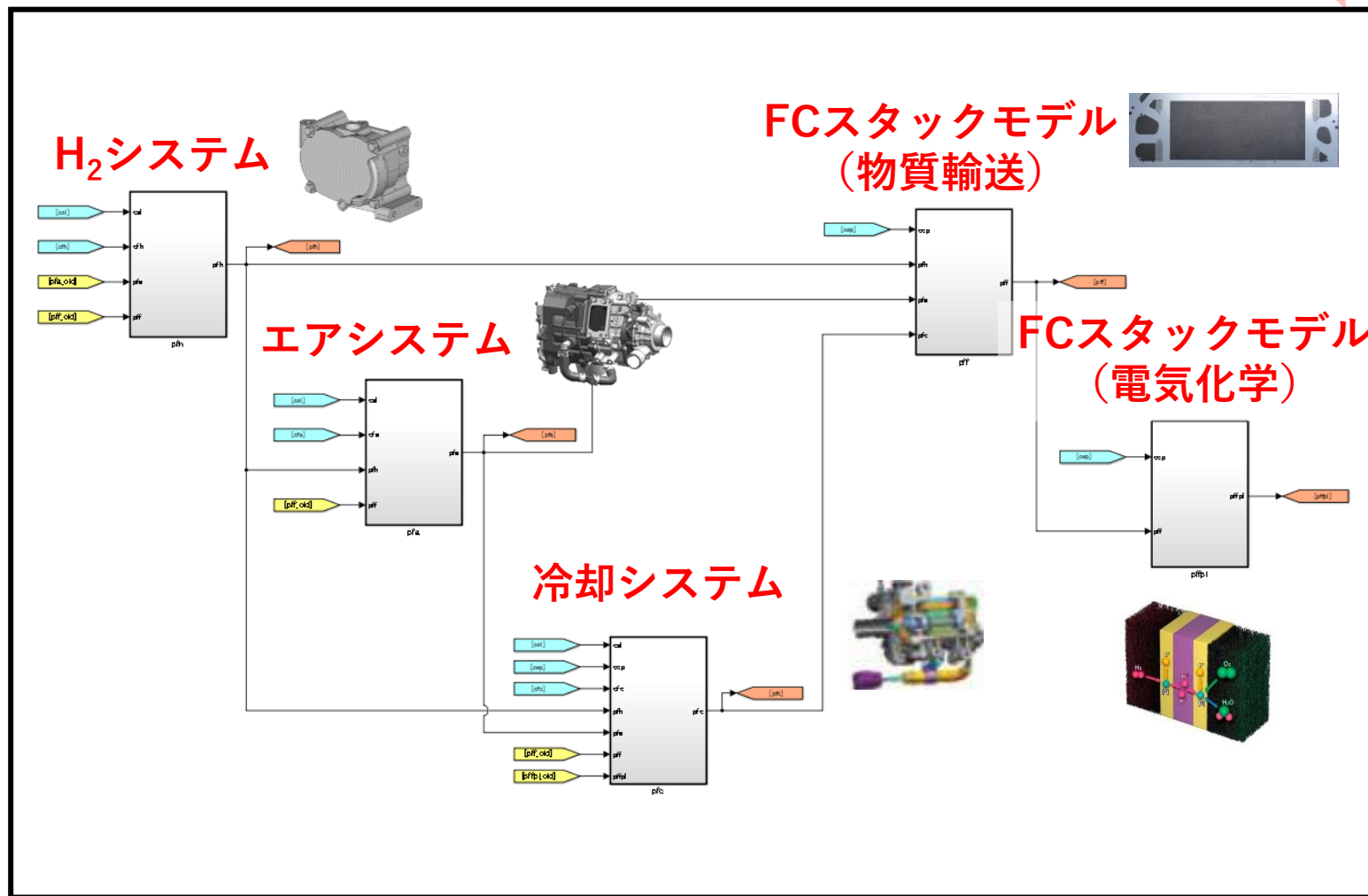
$$\text{if } \frac{p_{tot}^{HEVout}}{p_{tot}^{HEVin}} < \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \cong 0.5283, \quad \dot{m}_{gas}^{HEV} = A_{HEV}^{eff} \frac{p_{tot}^{HEVin}}{\sqrt{R_{gas}^{HEVin} T_{gas}^{HEVin}}} \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}\right) \left[\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

$$\text{else } \dot{m}_{gas}^{HEV} = A_{HEV}^{eff} \frac{p_{tot}^{HEVin}}{\sqrt{R_{gas}^{HEVin} T_{gas}^{HEVin}}} \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}\right) \left[\left(\frac{p_{tot}^{HEVout}}{p_{tot}^{HEVin}}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_{tot}^{HEVout}}{p_{tot}^{HEVin}}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$



「ハイブリッドコーディング」 = 物理式間の相互影響はSimulink + 物理式自体はMATLAB-functionで実装
 → 物理式の直接的な記載による、コーディング・レビューの工数低減

統合FCシステムプラントモデル (Simulink)



各物理現象間の相互影響
(Simulinkブロック図)

```
function [array_P_tot, array_ndot_gas_minus, array_ndot_gas_plus, array_Zd_minus, array_Zd_plus, eta_Zd_aFO,
        P_tot_H2Out, P_tot_LVS, P_tot_HPIn, P_tot_HPOut, P_tot_HEVin, P_tot_HEVout]
    = thea20_TotalPressureBalance(array_P_tot_old, array_P_O2_old, array_P_H2_old, array_P_H2Ovap_old,
        eta_Zd_aFO_old, P_tot_H2, array_ndot_gas_minus_old, array_ndot_gas_plus_old, array_Zd_aFOcond,
        ndot_gas_HP, P_tot_H2, ndot_gas_HEV, ndot_gas_H2O, dndot_H2cra_aFO, dndot_H2cra_aFO, dndot_H2cra_aFO,
        dndot_H2cra_aFO, dndot_H2cra_aFO) %Codegen

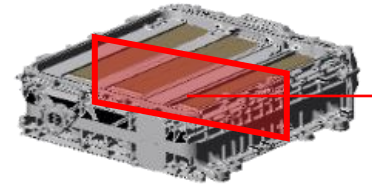
% <function>
% - Calculation of Darco's gas transfer resistance at each component
% - Calculation of total pressure at each component
% - Calculation of molar flowrate of gas-mixture into/from each component
%
% (Input)
% - array_P_tot_old : Array of total pressure at each component (Old value) [Pa]
% - array_P_O2_old : Array of O2 partial pressure at each component (Old value) [Pa]
% - array_P_H2_old : Array of H2 partial pressure at each component (Old value) [Pa]
% - array_P_H2Ovap_old : Array of H2O partial pressure at each component (Old value) [Pa]
% - array_ndot_gas_minus_old : Array of molar flowrate at upper-stream side of each component (Old value) [mol/Sec]
% - array_ndot_gas_plus_old : Array of molar flowrate at lower-stream side of each component (Old value) [mol/Sec]
% - array_Zd_minus : Array of Darco's gas transfer resistance at upstream side of each component [mol/Sec]
% - array_Zd_plus : Array of Darco's gas transfer resistance at downstream side of each component [mol/Sec]
% - eta_Zd_aFO : Direction ratio of Darco's gas transfer resistance at HP-cathode channel considering liquid-water plugging [7/100]
% - P_tot_H2 : Total pressure at H2-inlet [Pa]
% - P_tot_H2Out : Total pressure at H2-outlet [Pa]
% - P_tot_LVS : Total pressure at LVS [Pa]
% - P_tot_HPIn : Total pressure at HP-inlet [Pa]
% - P_tot_HPOut : Total pressure at HP-outlet [Pa]
% - P_tot_HEVin : Total pressure at HEV-inlet [Pa]
% - P_tot_HEVout : Total pressure at HEV-outlet [Pa]
%
% (Output)
% - array_P_tot : Array of total pressure at each component [Pa]
% - array_ndot_gas_minus : Array of molar flowrate at upstream side of each component [mol/Sec]
% - array_ndot_gas_plus : Array of molar flowrate at downstream side of each component [mol/Sec]
% - array_Zd_minus : Array of Darco's gas transfer resistance at upstream side of each component [mol/Sec]
% - array_Zd_plus : Array of Darco's gas transfer resistance at downstream side of each component [mol/Sec]
% - eta_Zd_aFO : Direction ratio of Darco's gas transfer resistance at FO-cathode channel considering liquid-water plugging [7/100]
% - P_tot_H2Out : Total pressure at H2-outlet [Pa]
% - P_tot_LVS : Total pressure at LVS [Pa]
% - P_tot_HPIn : Total pressure at HP-inlet [Pa]
% - P_tot_HPOut : Total pressure at HP-outlet [Pa]
% - P_tot_HEVin : Total pressure at HEV-inlet [Pa]
% - P_tot_HEVout : Total pressure at HEV-outlet [Pa]
%
% (Global-Functions)
```

FCシステム内の物理現象
(MATLABプログラム)

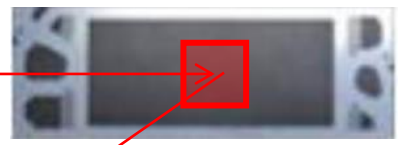
個々の物理現象 → FCスタック・補器システムモデル → 統合FCシステムモデル に組上げ
→ システム構成の変更発生時には、必要な箇所のみを「レゴブロック的」にカスタマイズ可能

3. モデルパラメータ同定手法：FCスタック

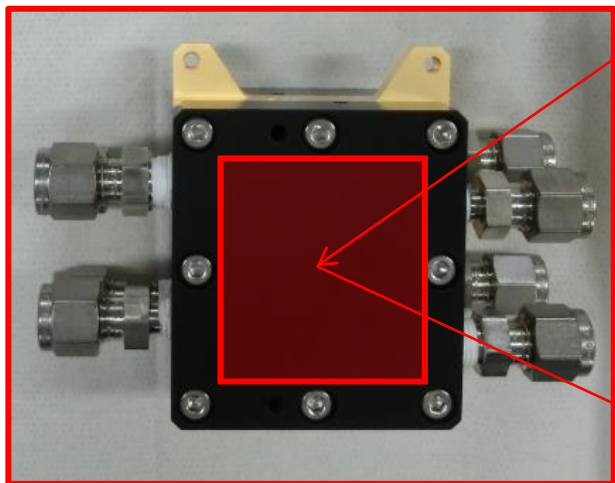
FCスタック



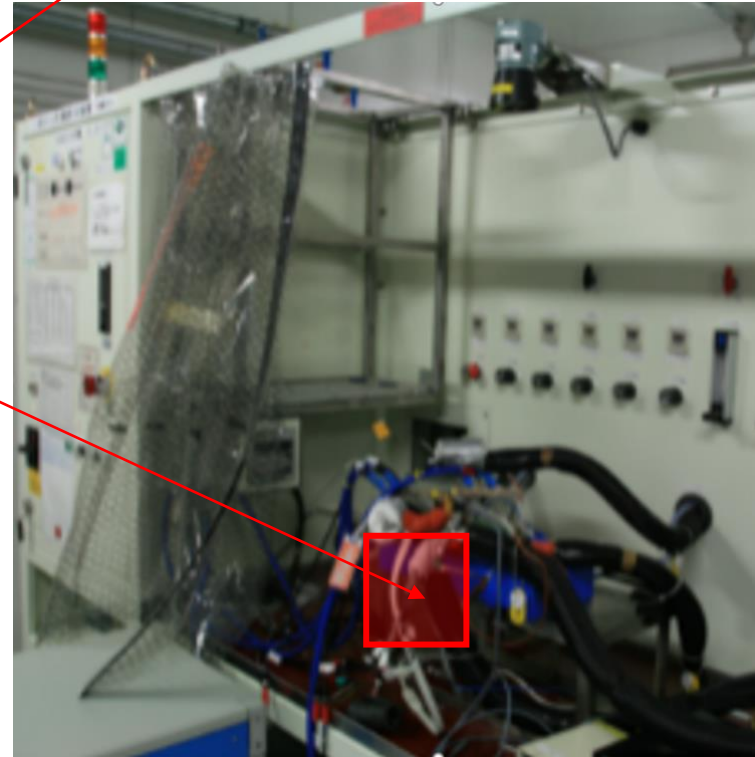
単セル



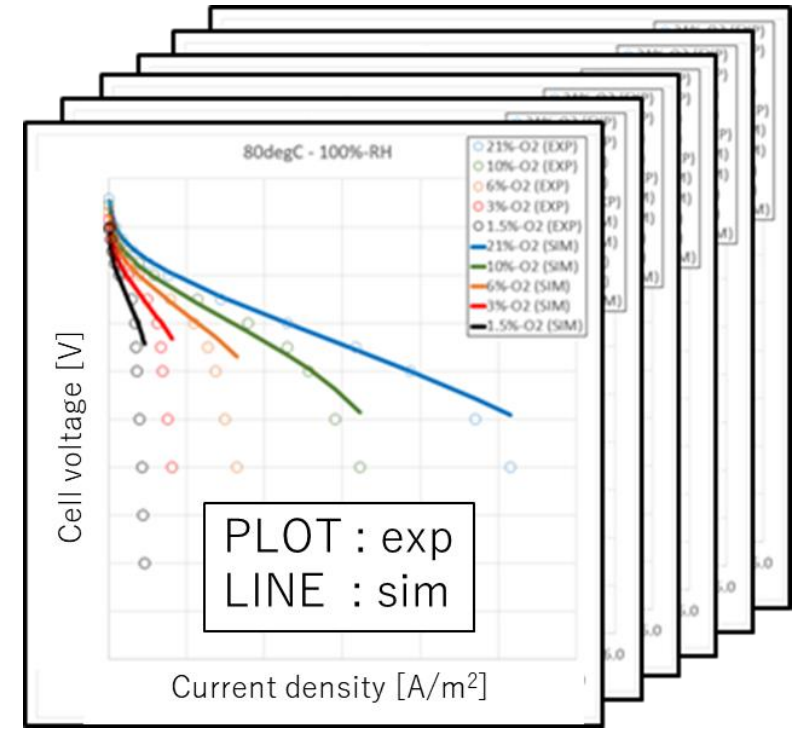
小セル (1cm²)



小セルベンチ



小セル実験データ (MIRAI MEA)



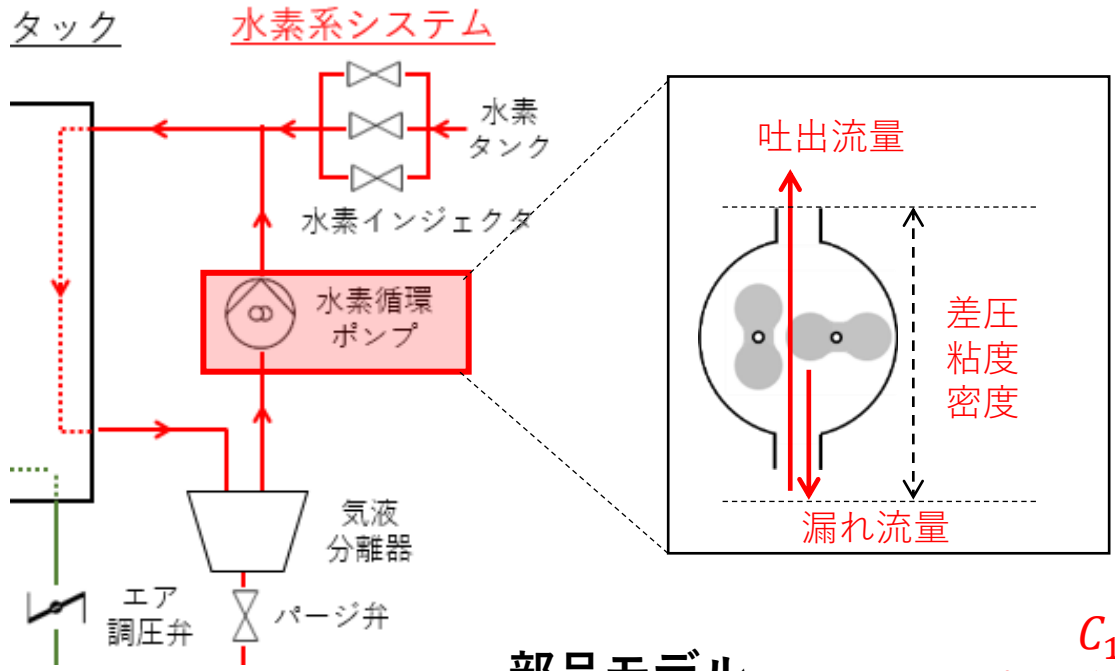
小セル境界条件

- 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. モデルパラメータ同定手法 (FCシステム部品)

MIRAIシステム部品

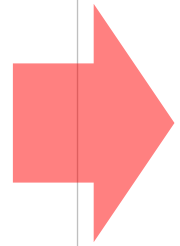


部品モデル

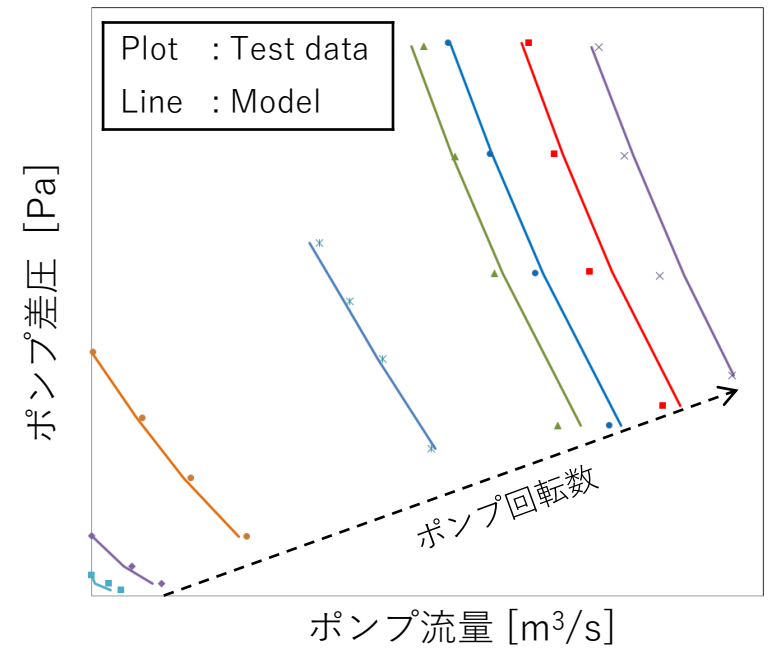
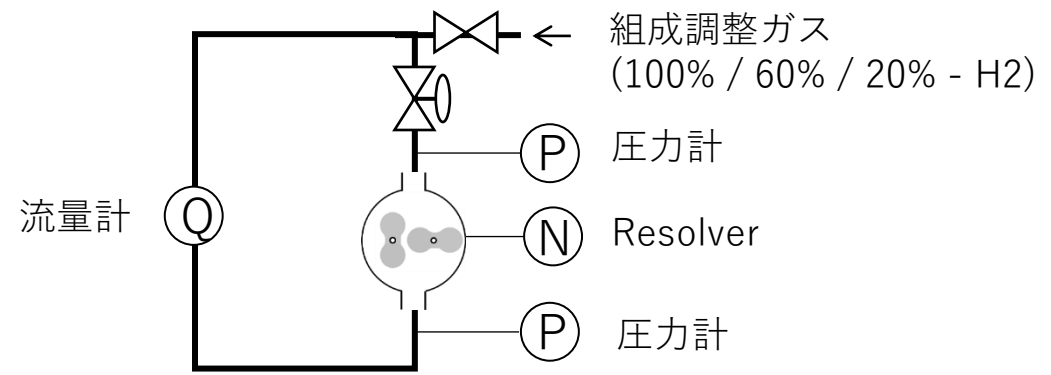
$$\text{総流量 } \dot{v} = C_1 N - C_2 \frac{\Delta P^{C_3}}{\mu^{C_4} \rho^{C_5}}$$

回転数 差圧
 粘度 密度

$C_1 - C_5$
 パラメータ同定
 非線形最小二乗法



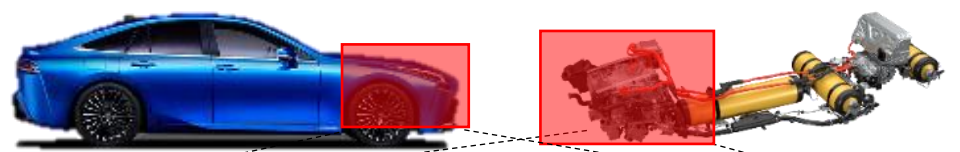
単体試験データ取得 (≠システムデータ)



部品単体で体系的に取得された実験データを基に、部品モデルのパラメータを同定
 パラメータ決定のために、**車両・システムでの試験データを必要としない**

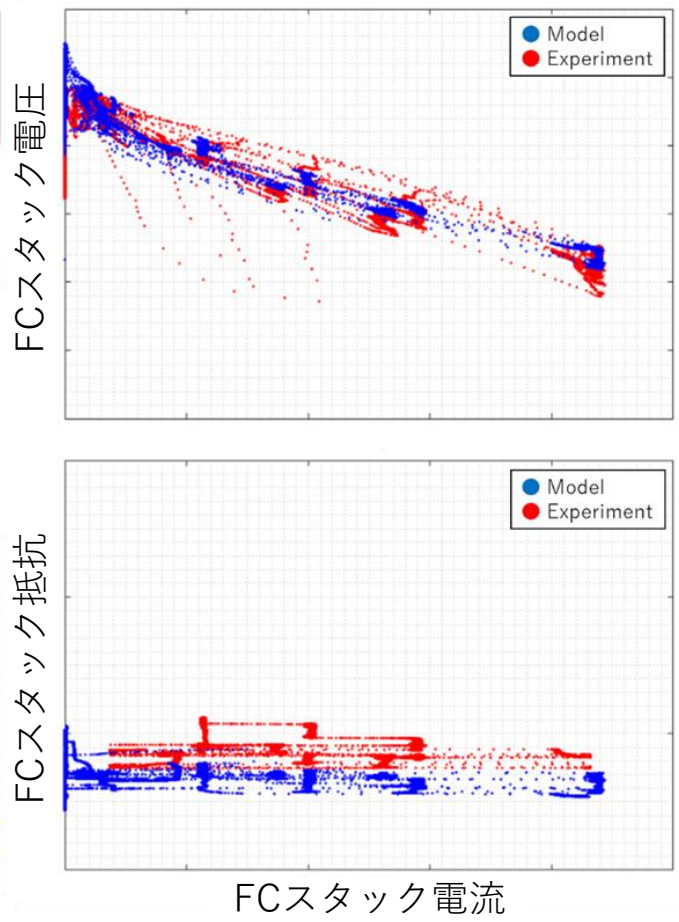
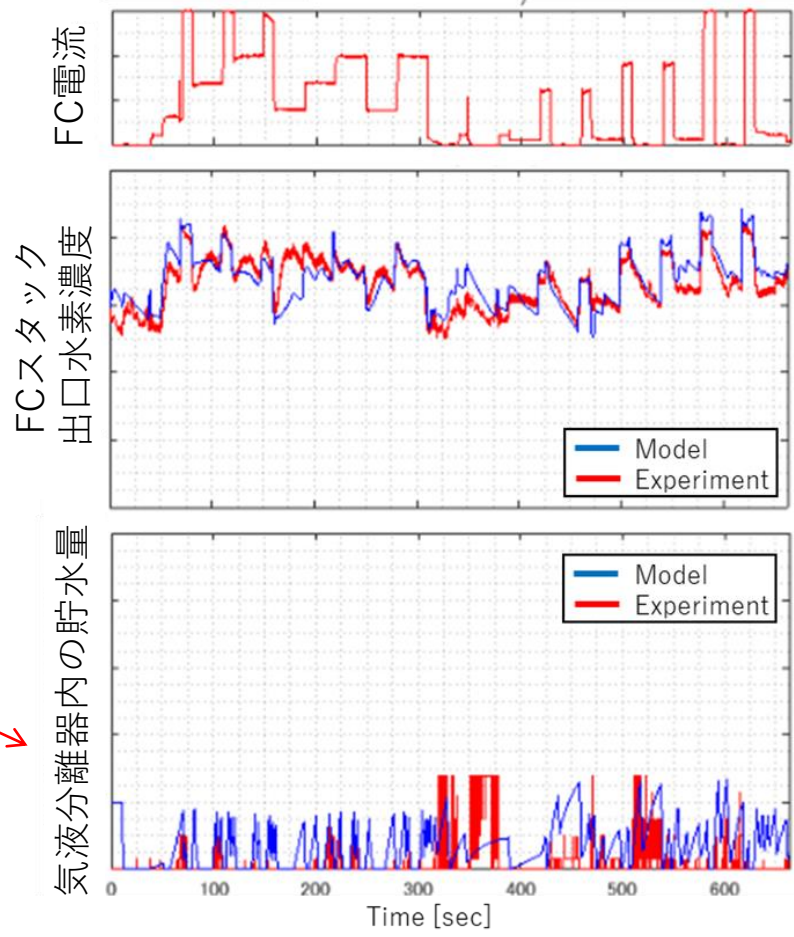
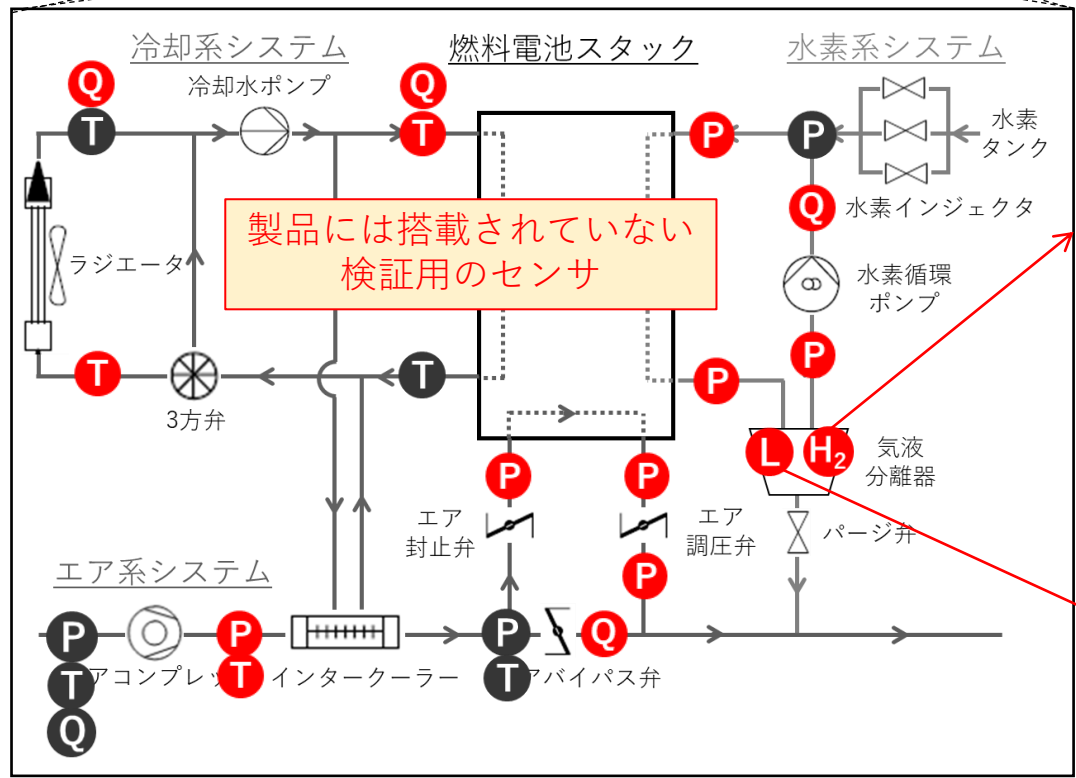
3. モデル精度検証

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

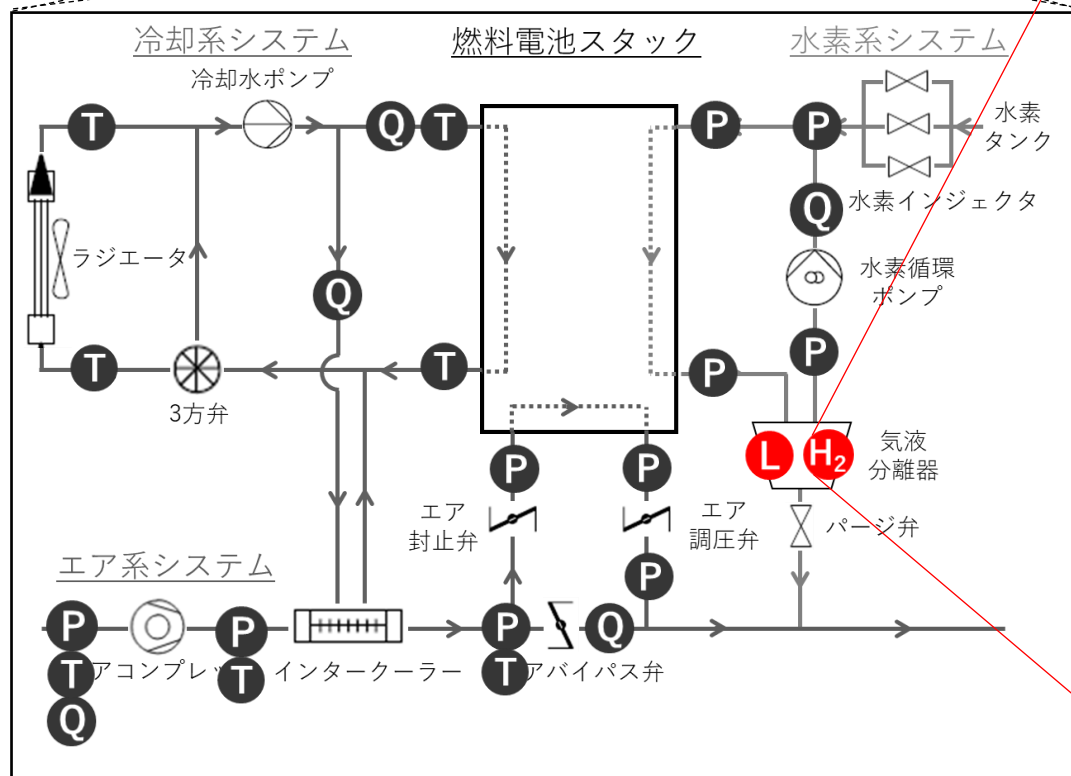
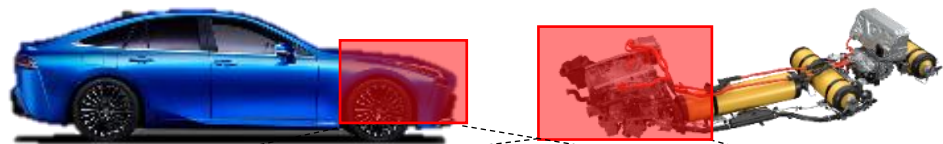


常温 - 高温 (~95°C)、低 - 高負荷 (~130 kW)、定常 & 過渡の大規模データベースに基く精度検証の実績

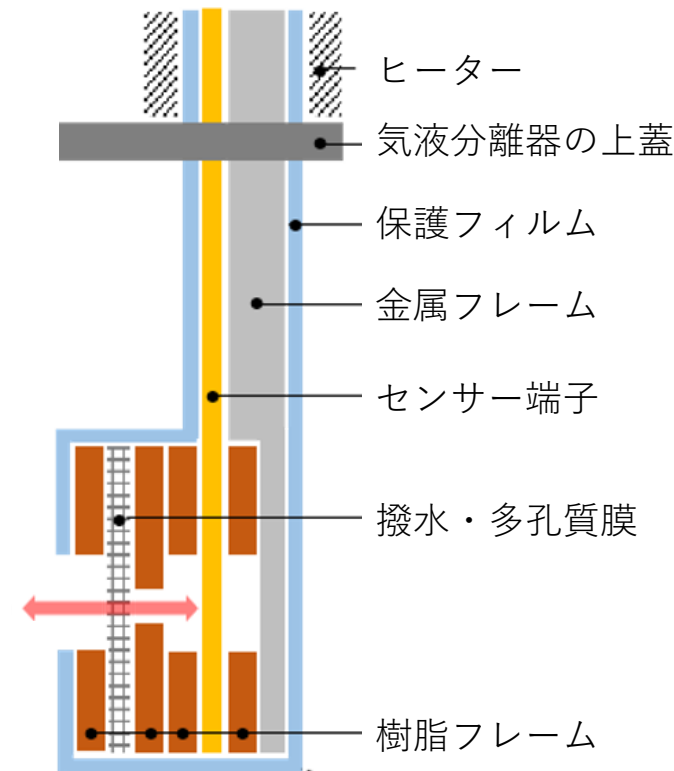
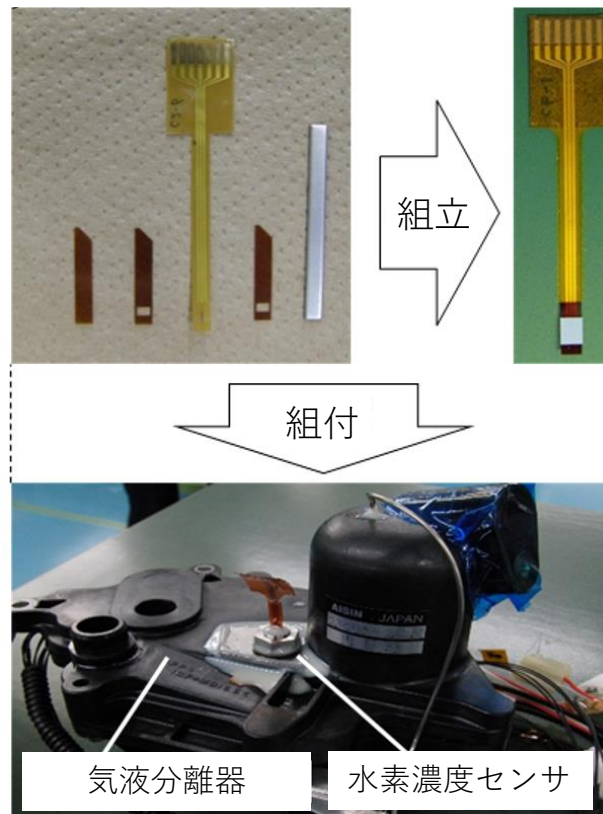
- ・ 個別のFC材料・システム部品モデルを結合することで、システム全体のモデルが構築できた
- ・ モデル「検証」の懸念・手間を省き、FC材料・システム開発のためのモデル「活用」に専念できる

3. モデル精度検証

搭載制約の大きい実機システム内に必要なセンサを格納できるように、
小型センサを新規に開発し、検証に活用

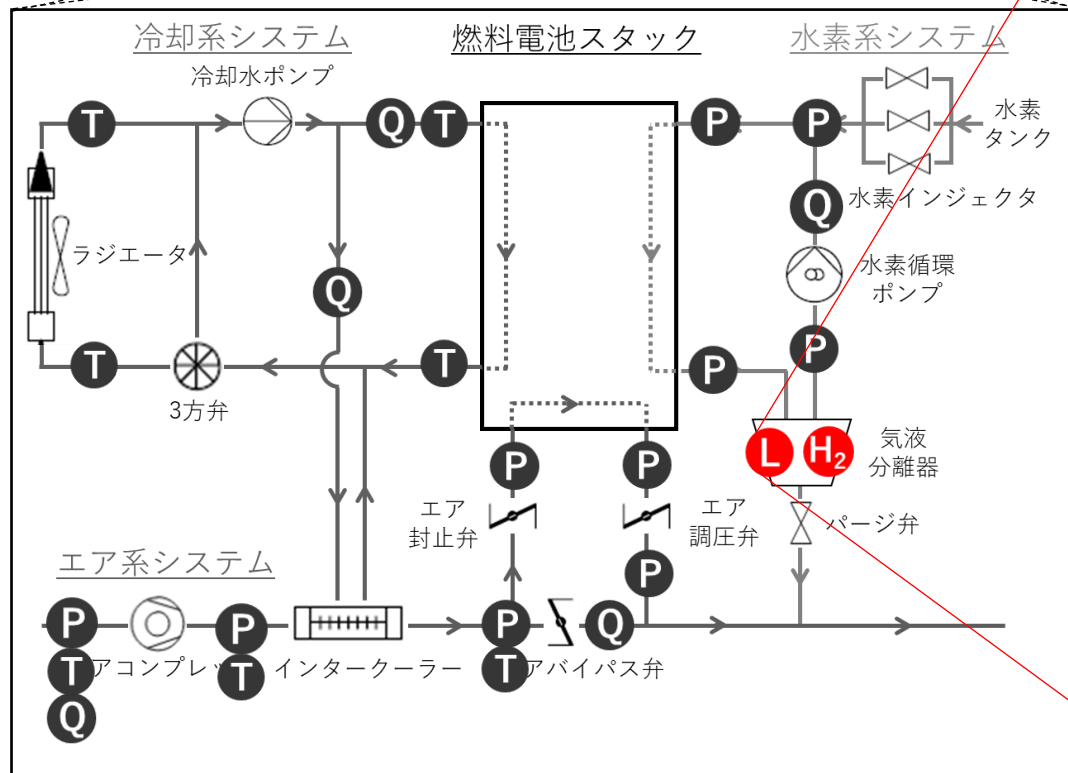
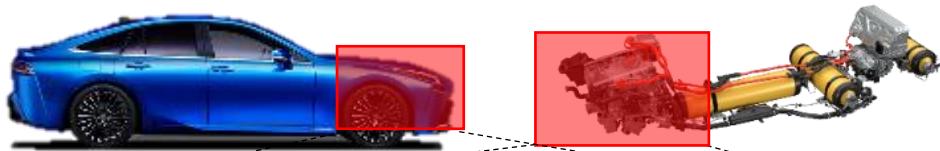


水素濃度センサー



3. モデル精度検証

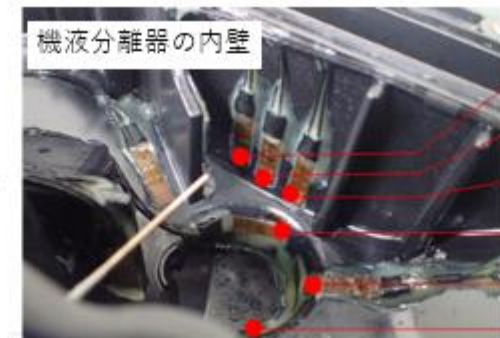
搭載制約の大きい実機システム内に必要なセンサを格納できるように、
小型センサを新規に開発し、検証に活用



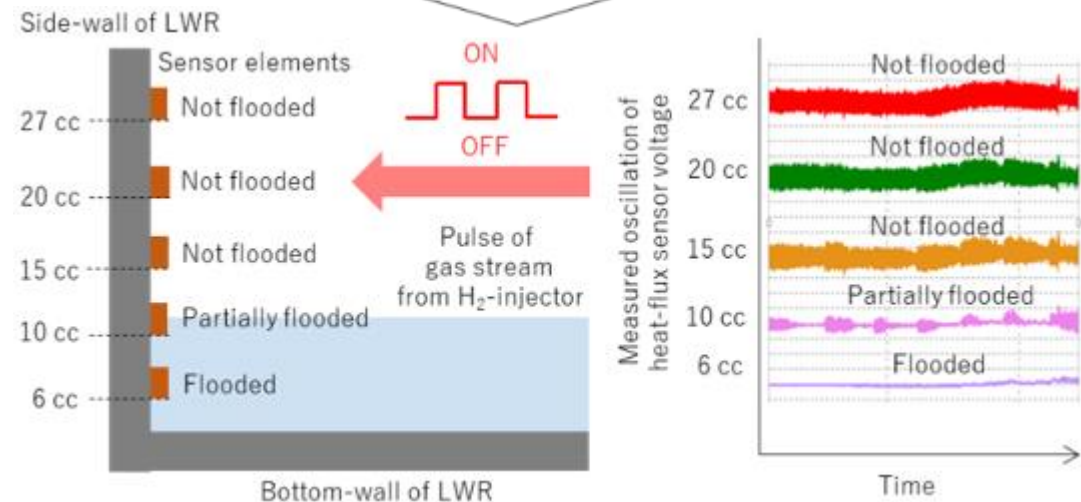
水位センサー




組立



組付

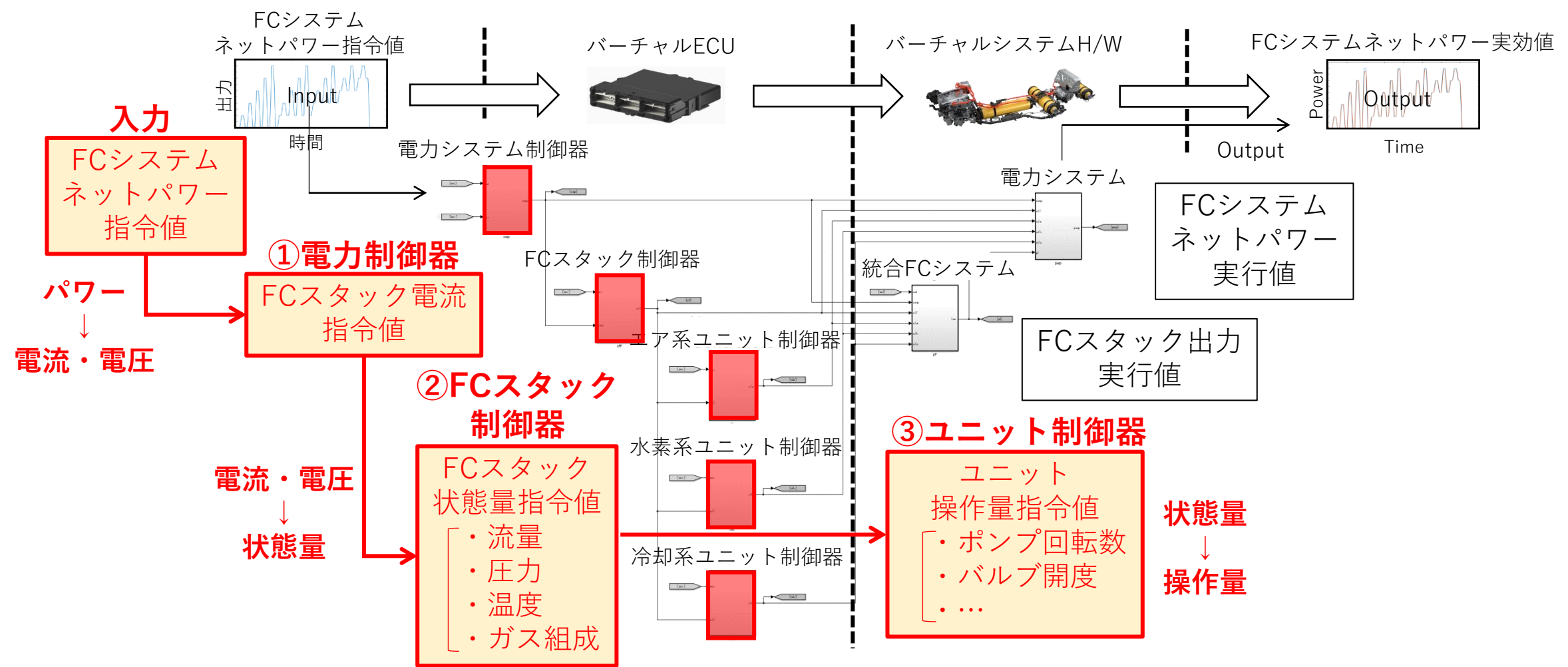


アジェンダ

1. 背景
 - ・ 燃料電池(FC)システム概要
 - ・ 開発プロセスにおける課題
2. 統合FCシステムシミュレータ  FC-DynaMo
3. モデル化手法
 - ・ FCモデル
 - ・ FCシステムモデル (エア・水素・冷却システム)
 - ・ モデル内パラメータ同定手法
 - ・ MATLAB/Simulinkへの実装手法
 - ・ モデル精度検証
4. FCシステム制御器
5. シミュレーション結果
6. 今後の課題
 - ・ モデル機能拡張
 - ・ 多用途展開へ向けたシミュレータ一流通

4. FCシステム制御器：全体概要

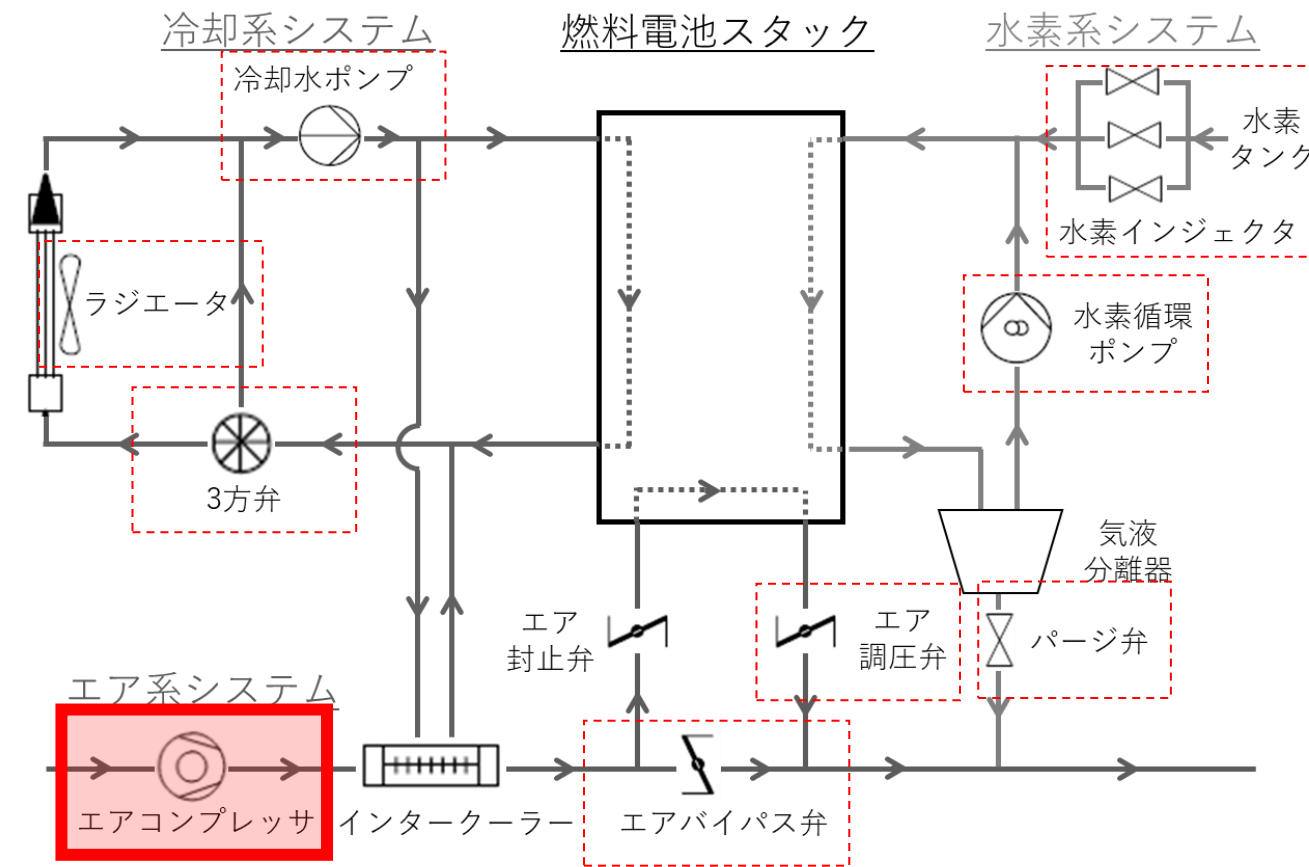
今後、企業・アカデミアで独自の制御器を実装していくためのベースとなる、拡張性の高い制御器を統合



- ① 指令システムネットパワーを実現させるための電力制御器
 - ② FCスタックを高効率で動作させるための状態量制御器
 - ③ 狙いの状態量を実現するためのユニット操作量制御器
- 部品の変更が生じた場合
対象部品の制御器・定数を変更するだけで
「レゴブロック的」に変更が完結する機能配置

4. FCシステム制御器：各ユニットの役割定義

- ・ 制御システム全体の役割：① 目標FCシステムネットパワーに追従、② FCシステムを高効率に維持
- ・ 実現のための手段：FCシステムアクチュエータの操作量（ポンプ回転数・バルブ開度 etc.）

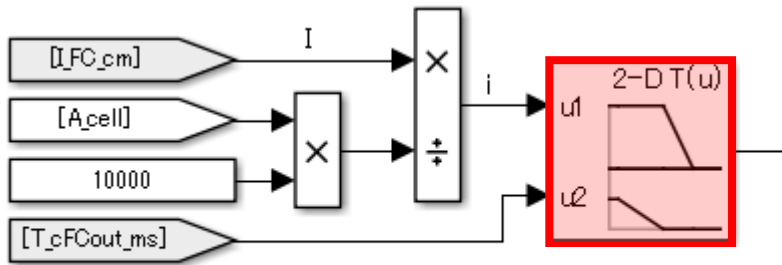


	ユニット	制御対象
エア系	エアコンプレッサ	総エア流量
	エア調圧弁	FCスタックエア圧力
	エアバイパス弁	バイパスエア流量
	エア封止弁	システム停止時の封止
水素系	インジェクタ	FCスタック出口水素分圧
	パージ弁	FCスタック出口水素分圧
	水素循環ポンプ	循環水素流量
	気液分離器	排気中のミスト分離+貯水
冷却系	冷却水ポンプ	FCスタック出口温度
	3方弁	FCスタック入口温度
	ラジエータ(+ファン)	放熱

4. FCシステム制御器：FCスタック制御器

FCスタックを最大発電効率で作動させられる境界条件
(流量・圧力・温度・ガス組成) を定義

目標エア流量



- 入力：
- 目標FC電流密度
 - FC冷却水温度の実効値

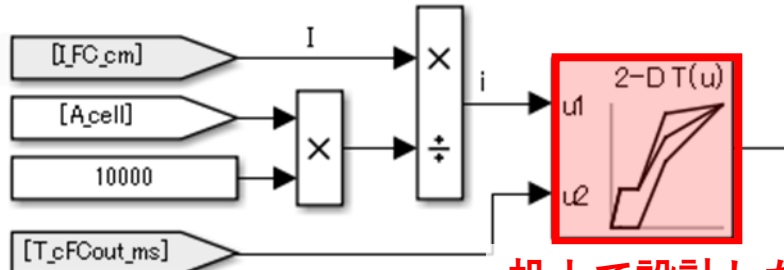
机上で設計した
作動条件マップ

目標エア圧力 [kPa]	FC冷却水温度の実効値 [°C]	目標FC電流密度 [A/cm ²]				
		0	0.2	0.5	1.0	2.0
65	70	100	100	100	180	250
70	70	100	150	150	210	250
95	70	100	150	150	240	250

補機消費電力の最小化

O₂ 供給 & セル内部の乾燥抑制

Target air pressure



机上で設計した
作動条件マップ

目標エアストイキ比 [-]	FC冷却水温度の実効値 [°C]	目標FC電流密度 [A/cm ²]				
		0	0.2	1.0	1.0	2.0
50	65	1.7	1.7	1.7	1.5	1.5
65	65	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
80	65	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
85	65	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3

流路内の液滴による閉塞抑制

セル内部の乾燥抑制

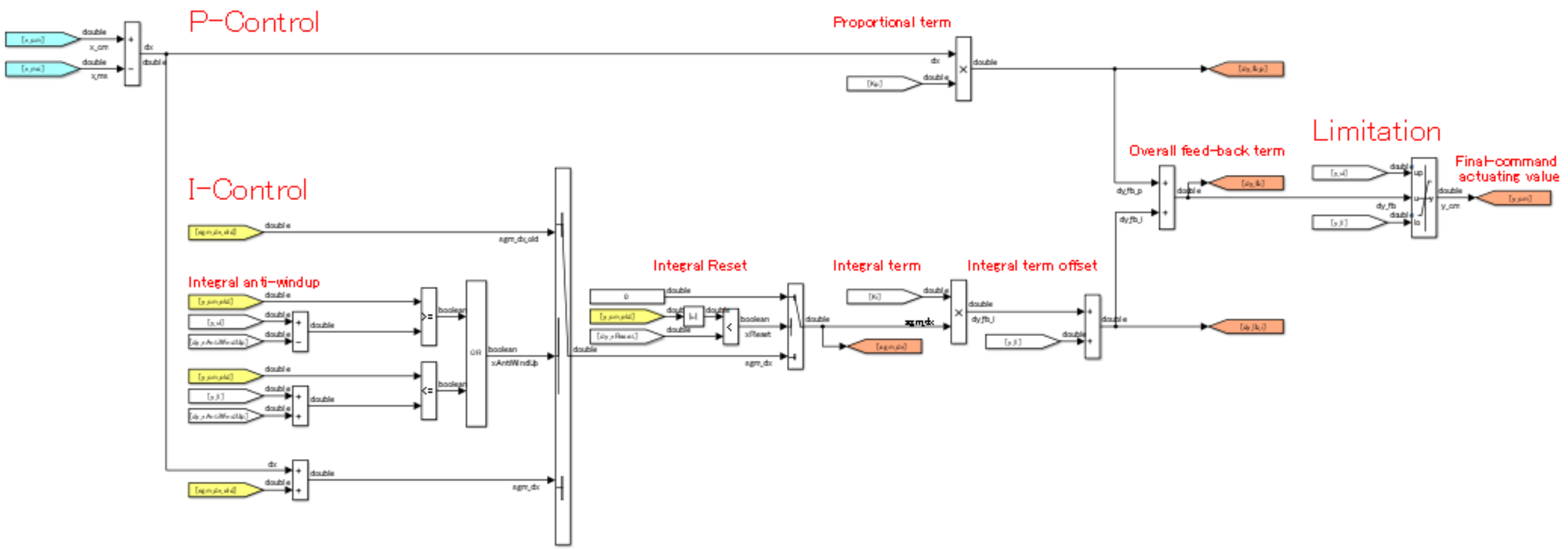
FCスタック・システム部品の物理現象を考慮した設計者の意図を反映しやすい
& 機器仕様の変更時に変更が容易な制御器構成

4. FCシステム制御器：システム部品制御器

(例：エア系システム) エアコンプレッサ回転数指令値演算


入力：流量の指令/実行値

出力：回転数



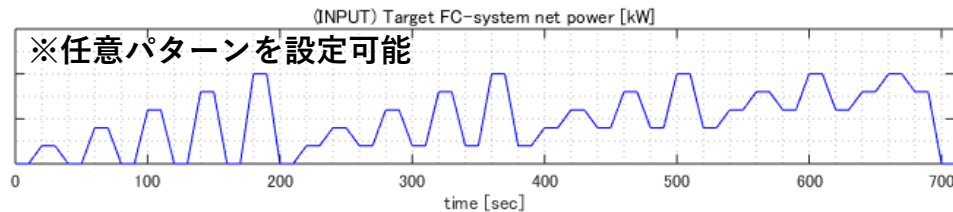
- シンプルなSISOのPI制御で実装 → ユニット変更時はフィードバックゲイン適合のみで修正完了できる
- 応答追従性の機能改善が必要なユーザーは、MPC等の先進制御とレゴブロック的に置換可能

アジェンダ

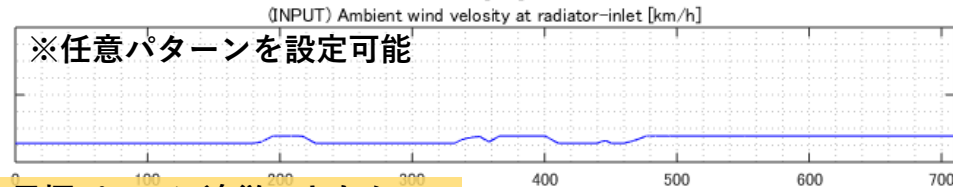
1. 背景
 - ・ 燃料電池(FC)システム概要
 - ・ 開発プロセスにおける課題
2. 統合FCシステムシミュレータ  FC-DynaMo
3. モデル化手法
 - ・ FCモデル
 - ・ FCシステムモデル (エア・水素・冷却システム)
 - ・ モデル内パラメータ同定手法
 - ・ MATLAB/Simulinkへの実装手法
 - ・ モデル精度検証
4. FCシステム制御器
5. シミュレーション結果
6. 今後の課題
 - ・ モデル機能拡張
 - ・ 多用途展開へ向けたシミュレータ一流通

5. シミュレーション結果：システム全体の動特性

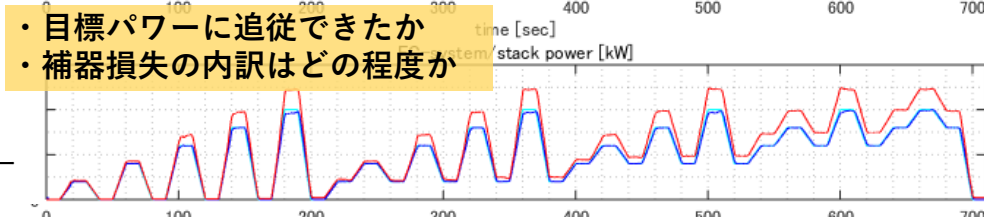
(入力)
FCシステム
ネットパワー
指令値



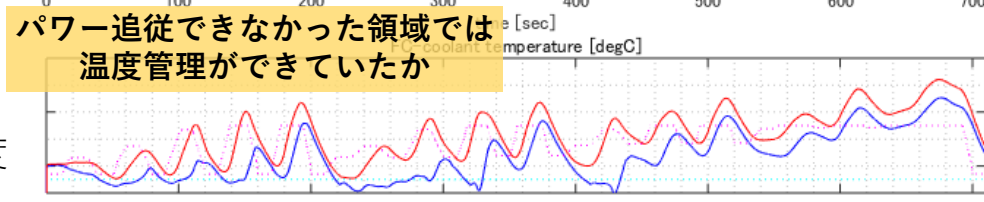
(入力)
ラジエータ
前風速



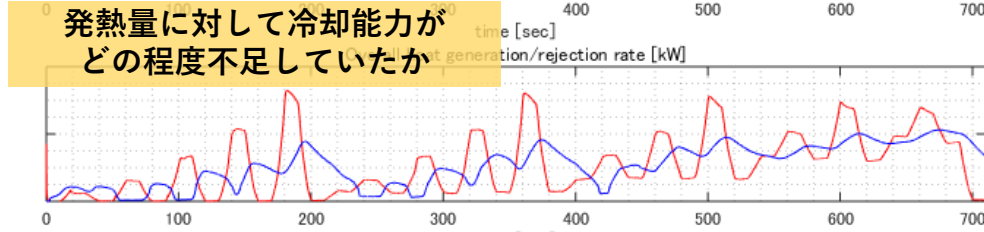
FCシステム・
スタックパワー



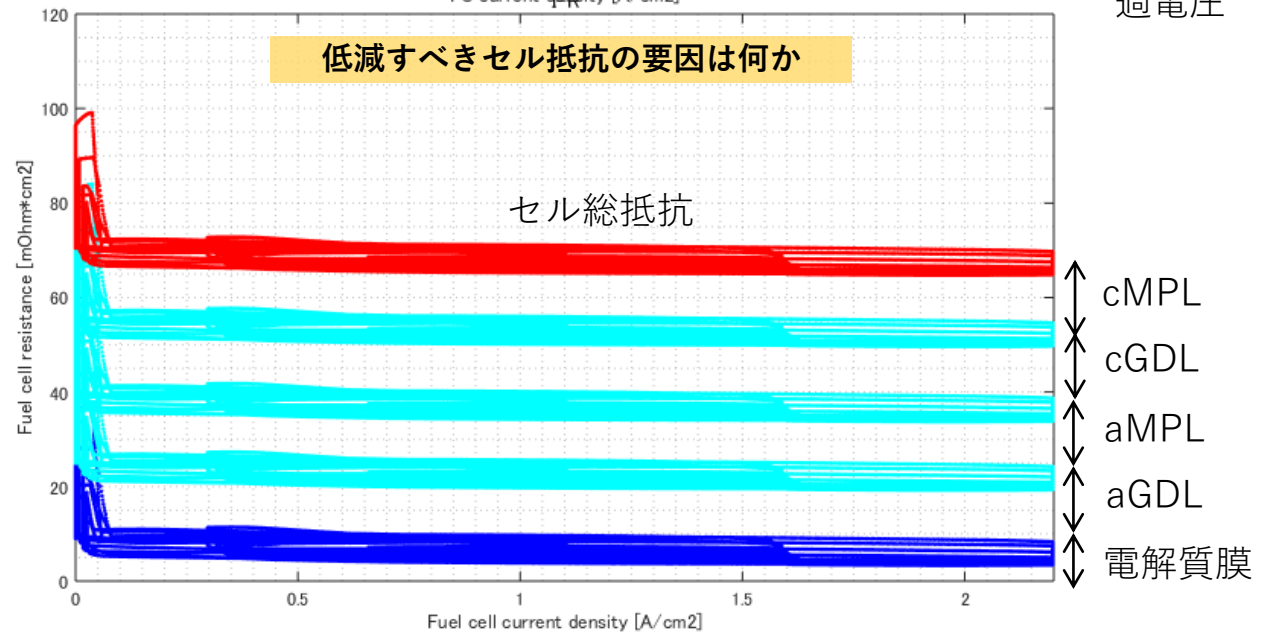
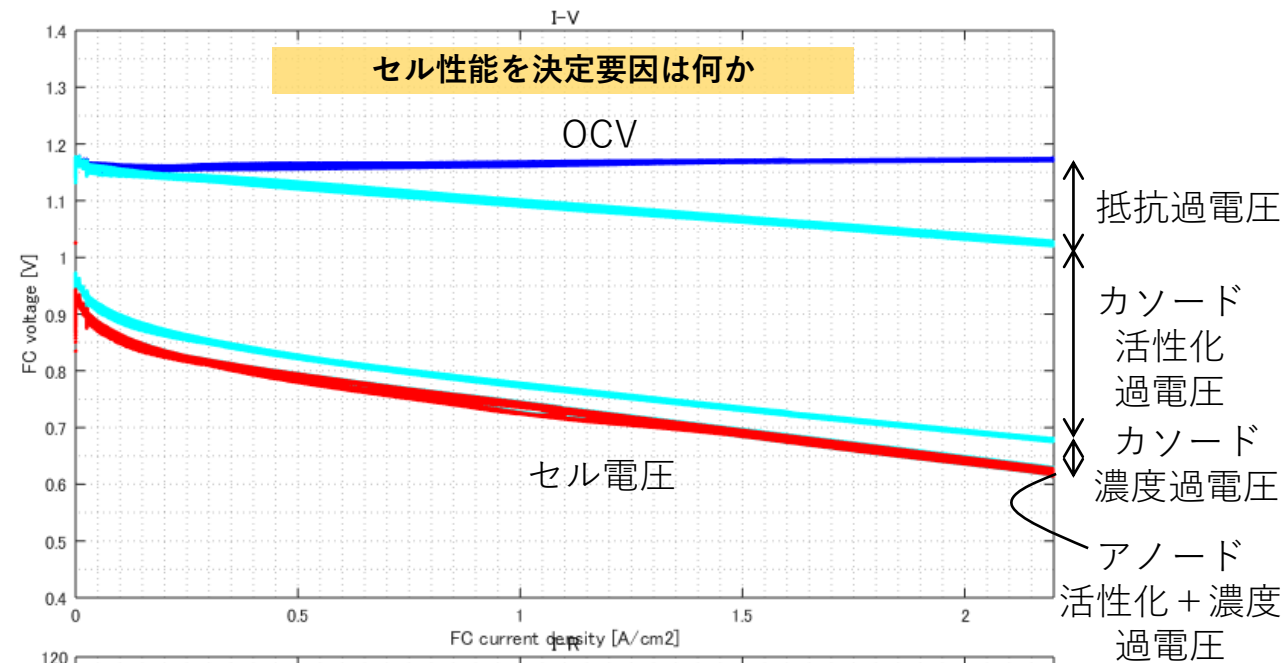
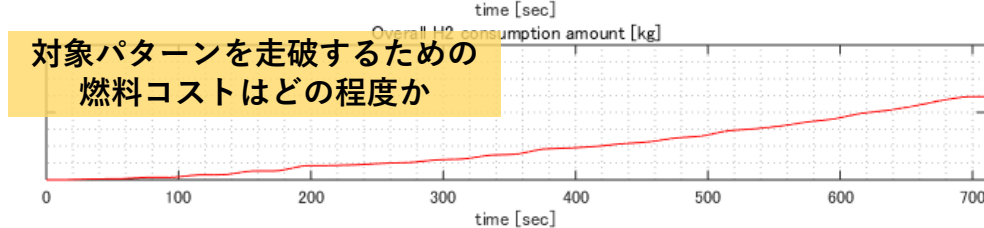
FCスタック
入口/出口温度



FCシステム
発熱/放熱量



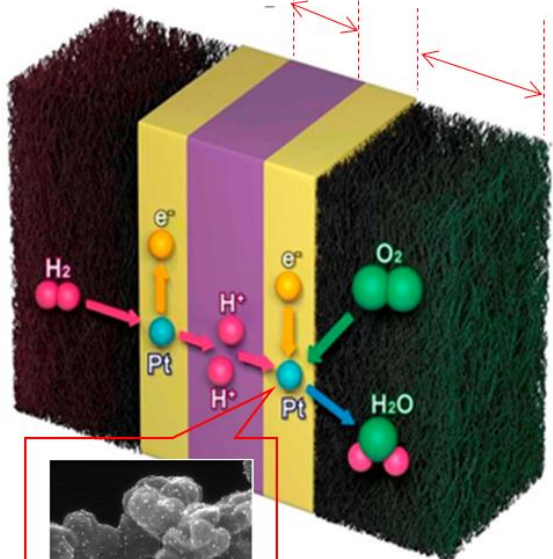
水素消費量
(燃費)



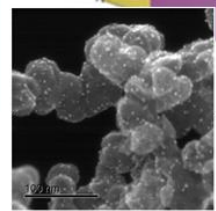
5. シミュレーション結果：FC材料物性-システム性能の相関解析

Case-2
PEM厚さ
×1/2 倍

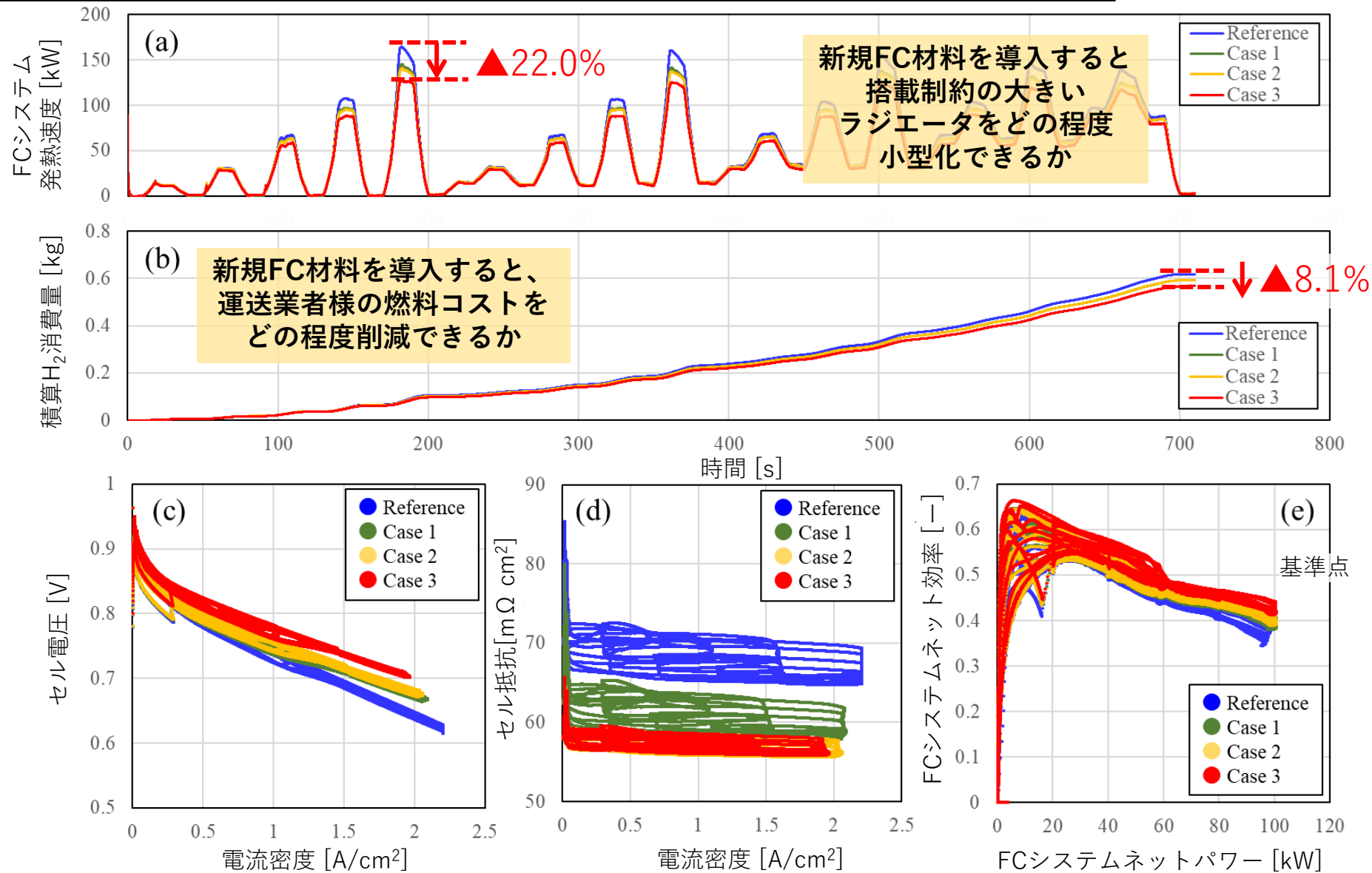
Case-1
カソードGDL
基材レス



Case-3
カソード触媒活性
×2 倍*



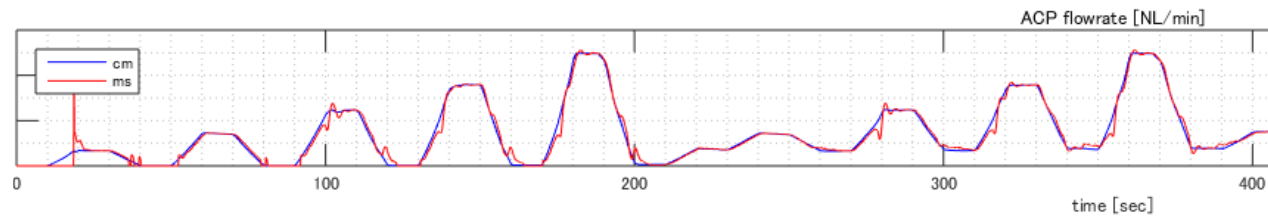
※O₂・H⁺輸送と触媒活性の
相互影響は未考慮



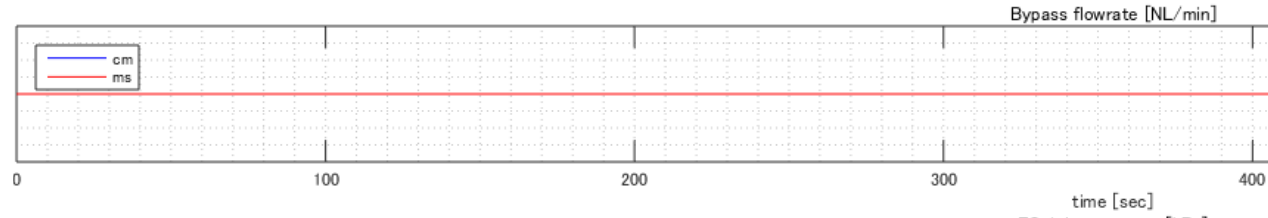
FC材料特性-システム全体の性能との相関関係を明確化 「先端材料の導入でMIRAI燃費を〇〇%向上できる」
 → 「目標性能への未達分を、FC材料・システム部品・制御の改善にどう割り付けるか」の机上検討が可能

5. シミュレーション結果：エアシステム制御設計

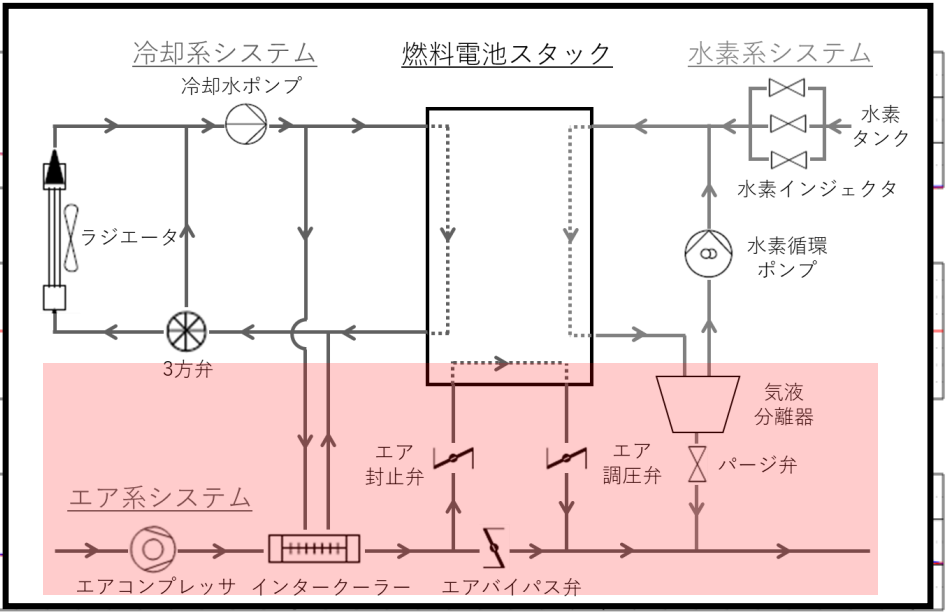
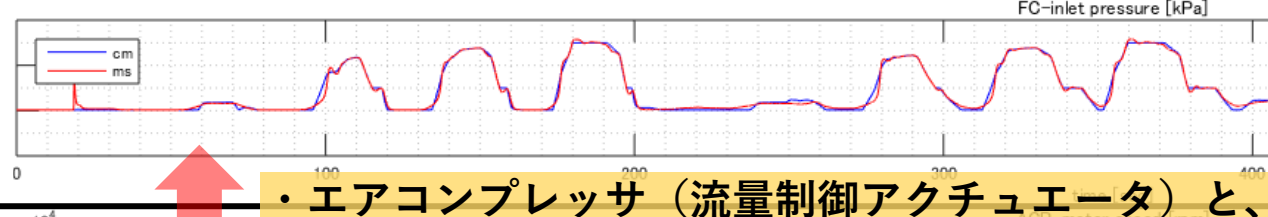
FCスタック
エア流量
(指令/実行)



バイパス
エア流量
(指令/実行)

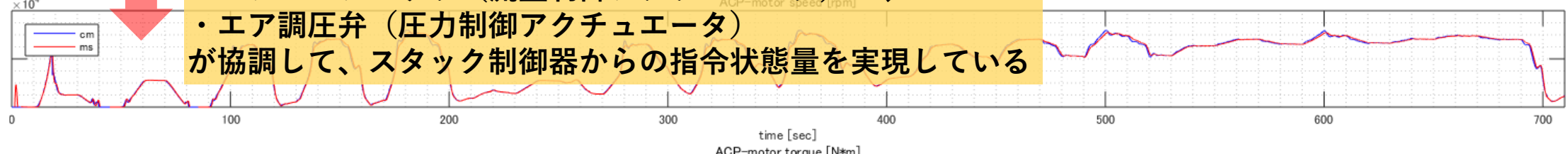


FCスタック
入口圧力
(指令/実行)

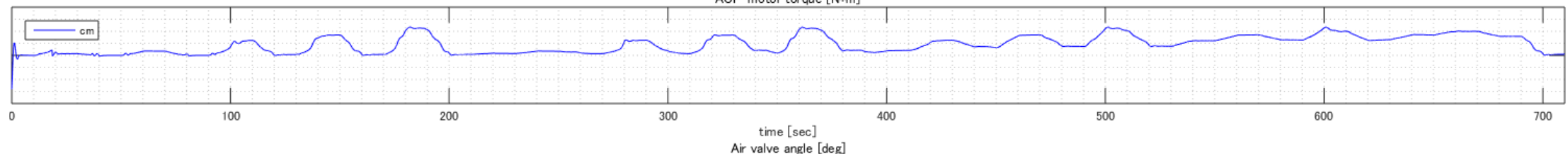


・エアコンプレッサ（流量制御アクチュエータ）と、
・エア調圧弁（圧力制御アクチュエータ）
が協調して、スタック制御器からの指令状態量を実現している

エアコンプレッサ
回転数
(指令・実行)



エアコンプレッサ
モータートルク

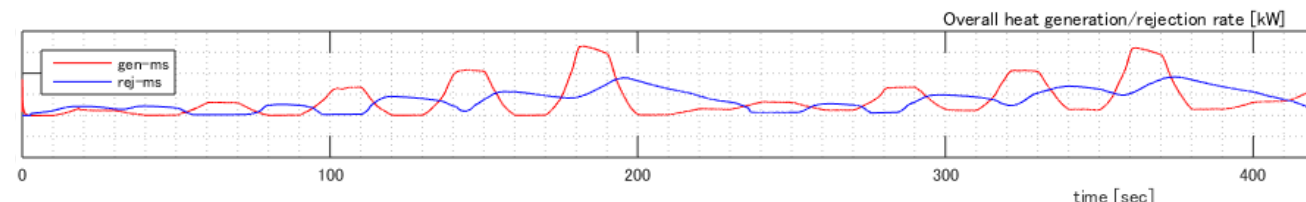


バルブ開度

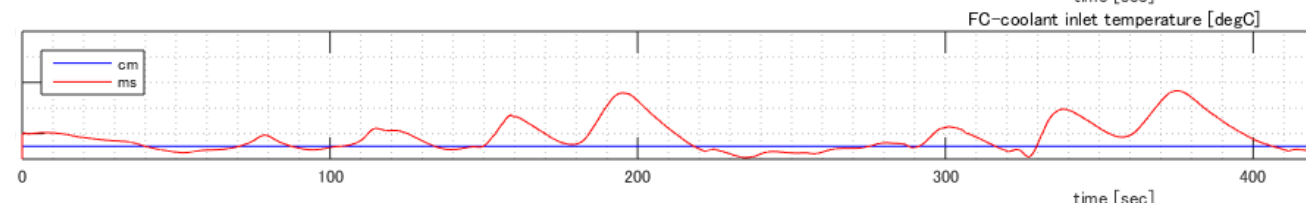


5. シミュレーション結果：冷却システム制御設計

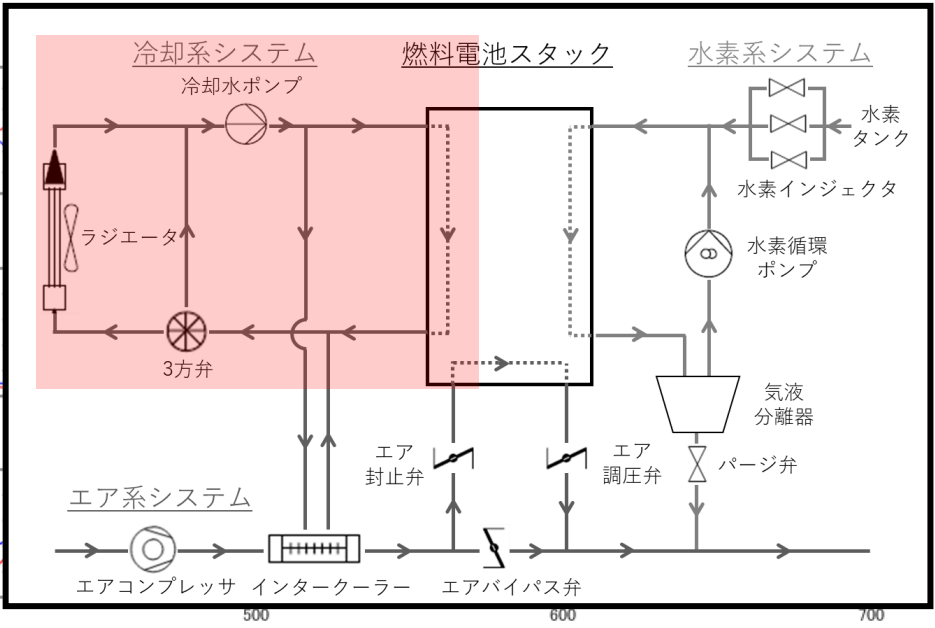
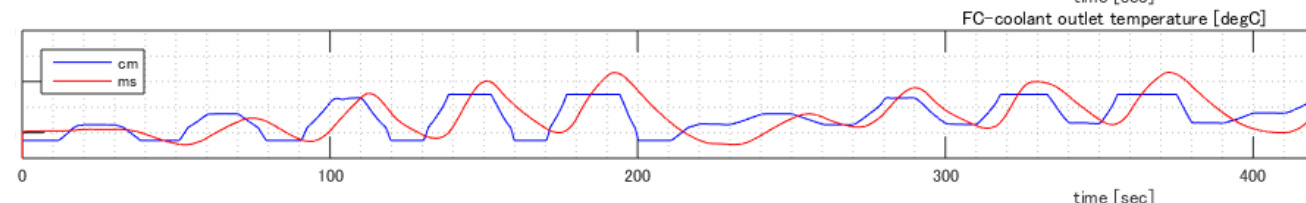
FCシステム
発熱/放熱量



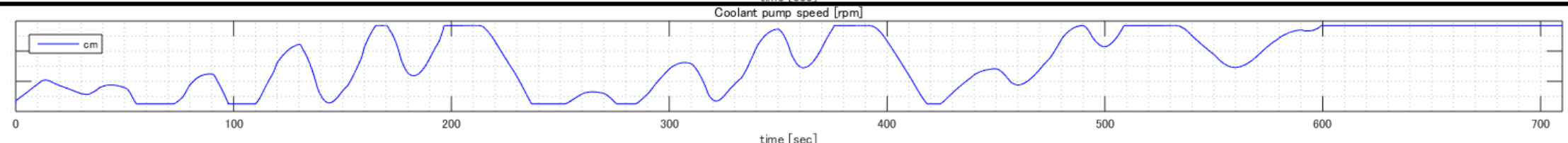
FCスタック
入口水温
(指令/実行)



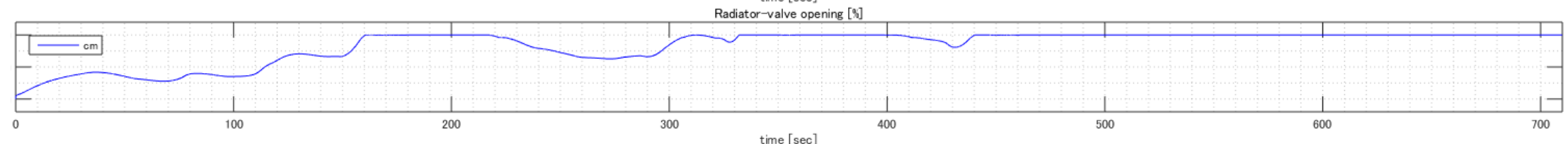
FCスタック
出口水温
(指令/実行)



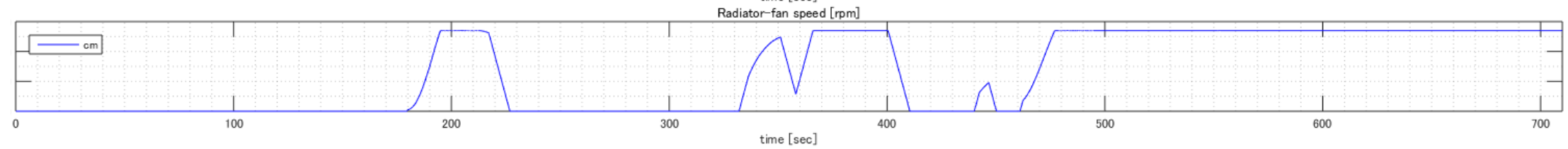
冷却水
ポンプ回転数



3方弁開度

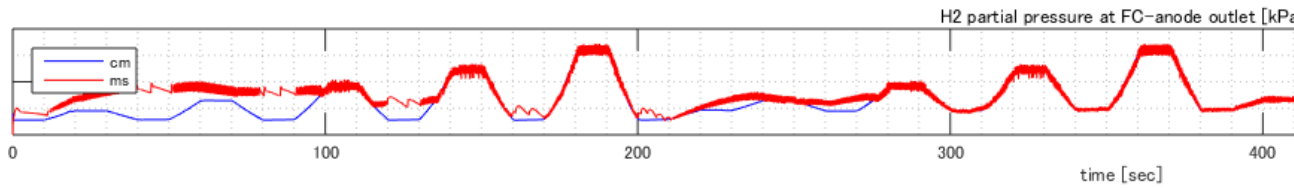


ラジエータ
ファン回転数

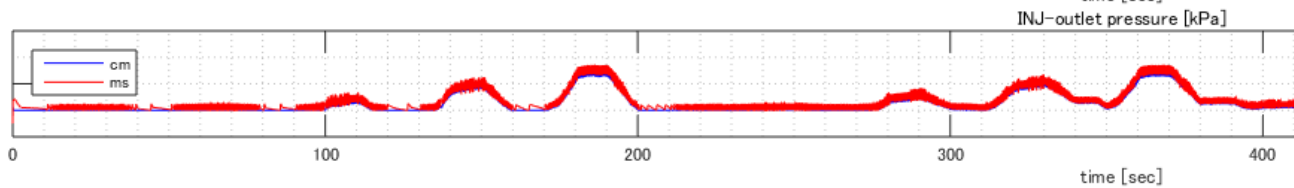


5. シミュレーション結果：水素システム制御設計

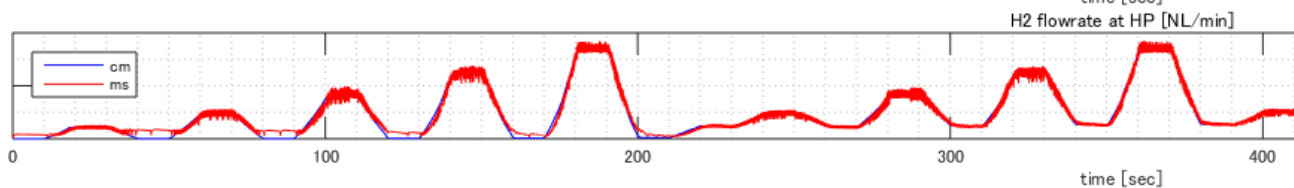
FCスタック
出口水素分圧
(指令/実行)



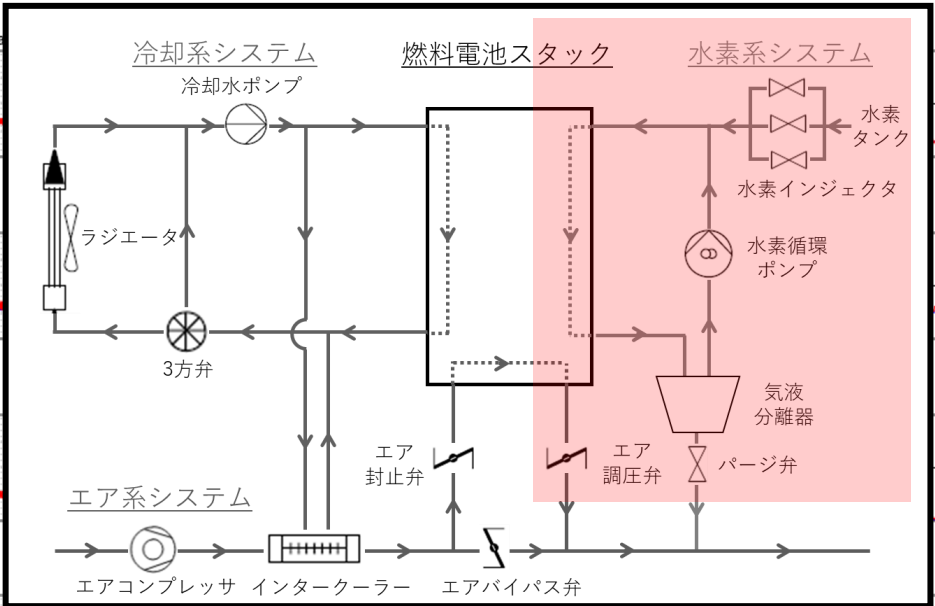
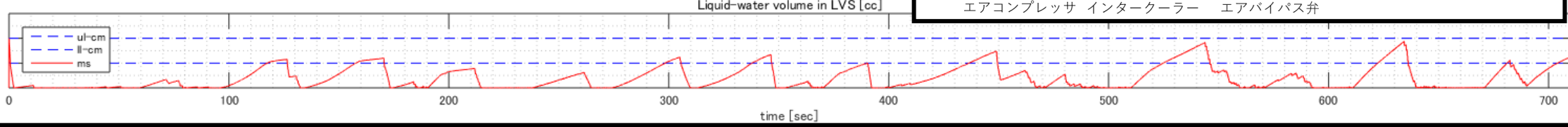
インジェクタ
出口圧力
(指令/実行)



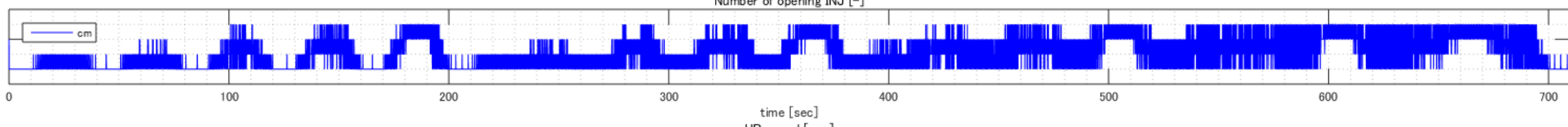
水素循環
ポンプ流量
(指令/実行)



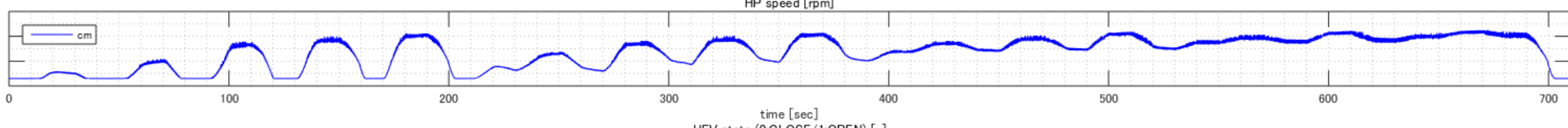
気液分離器
水位



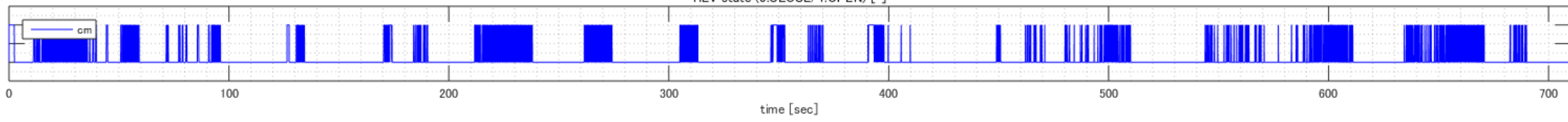
インジェクタ
噴射本数



水素循環
ポンプ回転数



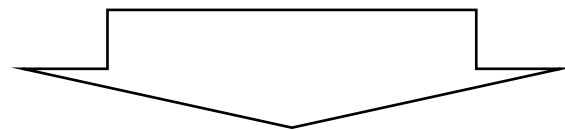
パージ弁
開閉



5. シミュレーション結果：計算速度

計算機スペック

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



シミュレーション時間


実時間	Total time	700 sec
演算時間	Number of data	42724 time-steps (0.016384 sec/step)
		13.2 sec

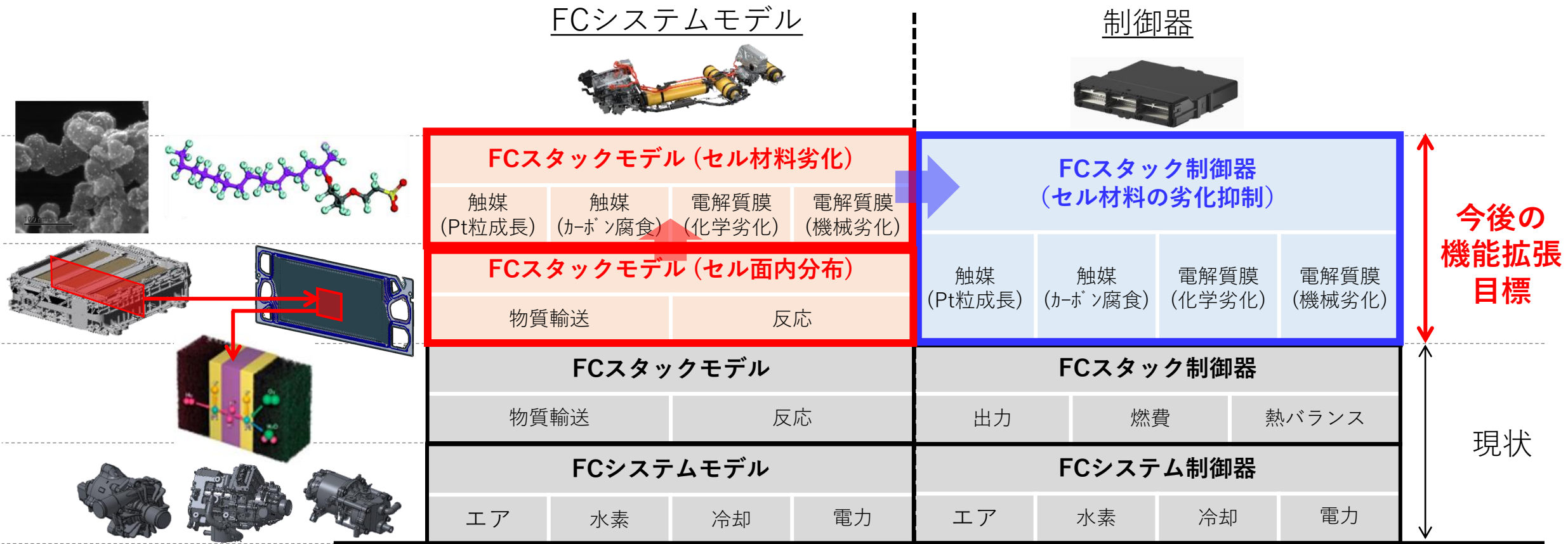
実時間に対して
約50倍の加速倍率



特に商用用途でニーズの大きい年単位の長時間耐久シミュレーションへの適用性を確認

アジェンダ

1. 背景
 - ・ 燃料電池(FC)システム概要
 - ・ 開発プロセスにおける課題
2. 統合FCシステムシミュレータ  FC-DynaMo
3. モデル化手法
 - ・ FCモデル
 - ・ FCシステムモデル (エア・水素・冷却システム)
 - ・ モデル内パラメータ同定手法
 - ・ MATLAB/Simulinkへの実装手法
 - ・ モデル精度検証
4. FCシステム制御器
5. シミュレーション結果
6. 今後の課題
 - ・ モデル機能拡張
 - ・ 多用途展開へ向けたシミュレータ一流通



< 現状 >


- ・ 70以上の国内の事業者 (自動車・電機・船舶・建機・航空等) および研究機関へソフトウェアリリース
- ・ ユーザーからのフィードバックを受けた機能アップデート (2022年4月の初回リリース以降で5回)

< 今後 >

- ユーザーからの要望の大きい新機能の追加
 - ・ セル内の詳細な輸送・反応の分布解析機能 → 発電分布を考慮した材料・部品・制御 (使い方) の設計
 - ・ 年オーダーでの作動後のFC材料の劣化解析機能 → 劣化抑制のためのシステム制御 (使い方)

結 言

FCシステム全体の動特性を物理モデルベースで演算可能なシステムシミュレーター

- 高価な試作機による「造って試す」開発プロセスに伴うコスト・開発期間の低減 
- FCシステムの多用途展開による水素利用促進
- 学際的な専門家間の「共通言語」の創生による、高度な連携体制の構築

進捗状況


- 将来の年単位の耐久性評価に活用可能な計算速度（実時間の1/50）
- 市場FCEV製品（第2世代MIRAI）のシステム動特性データに対する検証実績
- 国内70以上の事業者・研究機関へのリリース、ユーザーニーズを受けた定期的な機能アップデート

今後の実施項目

- ユーザーからのニーズの大きいセル面内の分布解析・セル材料の劣化解析の機能拡張
- セル材料の劣化抑制のための制御手法の開発

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。多大なご支援に厚く御礼申し上げます。