



2022年 5月 25日 MATLAB EXPO 2022 JAPAN

# 物理モデルベース燃料電池システムシミュレーターの開発

長谷川 茂樹 <sup>a,b</sup> 井漕 好博 <sup>b</sup> 河瀬 元明 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> 京都大学大学院 化学工学専攻 反応工学分野

<sup>b</sup> トヨタ自動車 トヨタZEVファクトリー FC事業領域 商用ZEV製品開発部

燃料電池システムを題材に、

- ・ 開発現場で要求されるシステムシミュレーターとは？
- ・ 対象システム内の物理現象を、演算精度・速度を両立しながらモデル化するには？
- ・ 物理モデル式を効率的にMATLAB®/ Simulink®に実装するには？
- ・ 展開性に優れたハードウェアモデル、制御器の設計・実装手法とは？

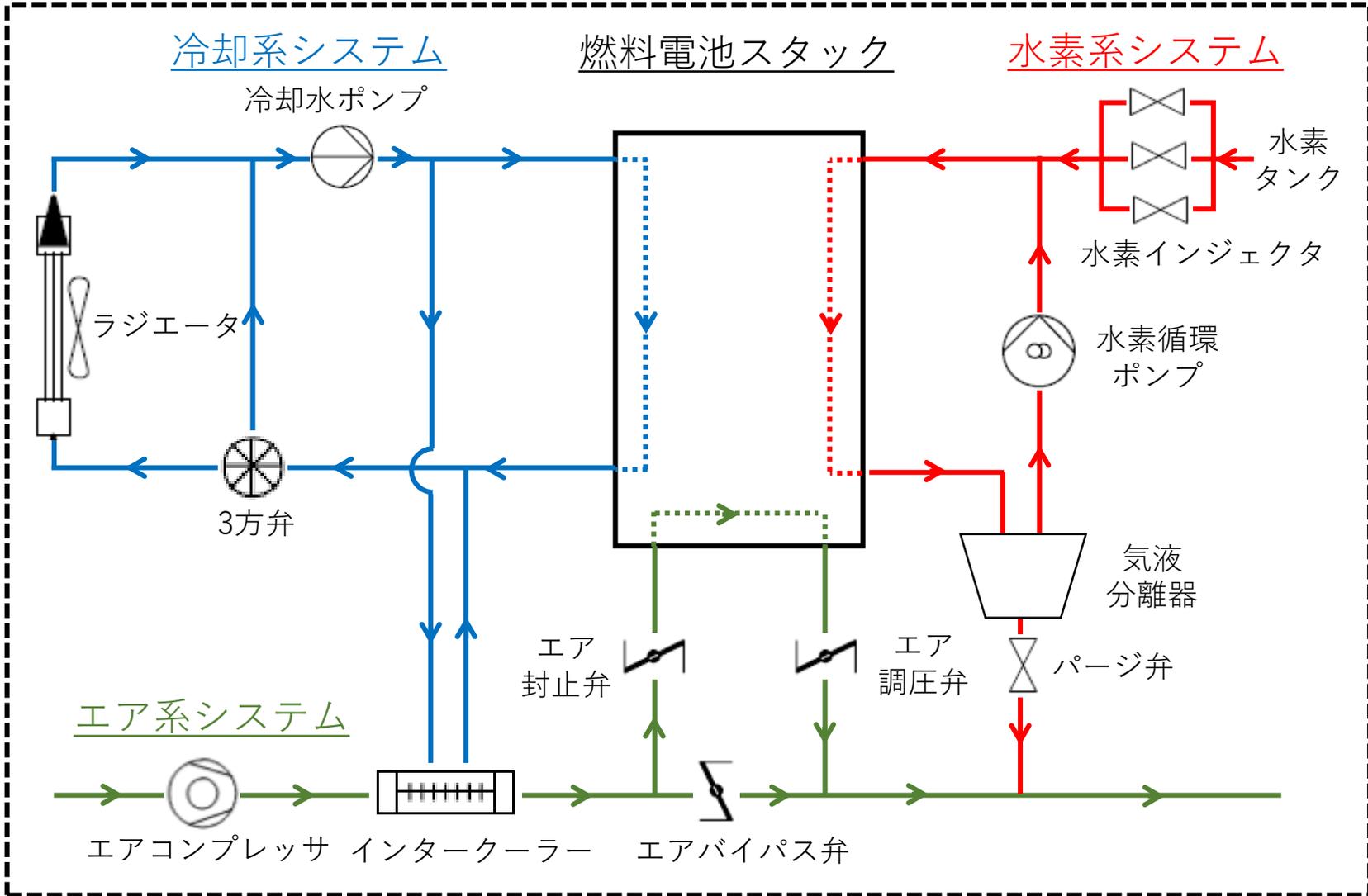
# アジェンダ

- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# アジェンダ

- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# (1) 背景：燃料電池 (FC) システム

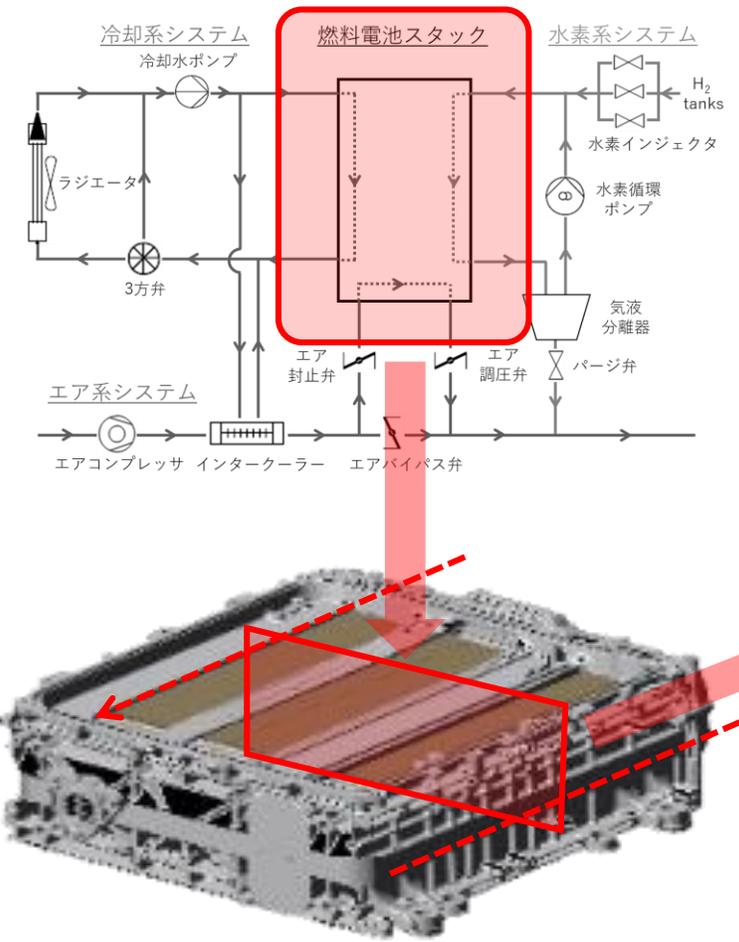


エンジンシステム	FCシステム
主機 エンジン	FCスタック
吸気系	エア系
補機 燃料噴射系	水素系
冷却系	冷却系

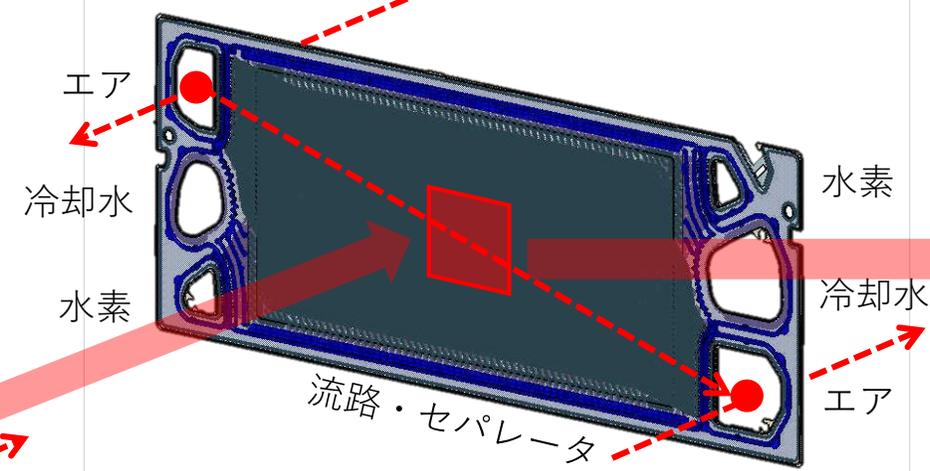
主機 (FCスタック) + 3補器システム(エア・水素・冷却)、エンジンシステムと類似構成

# (1) 背景：燃料電池 (FC) システム

FCスタック

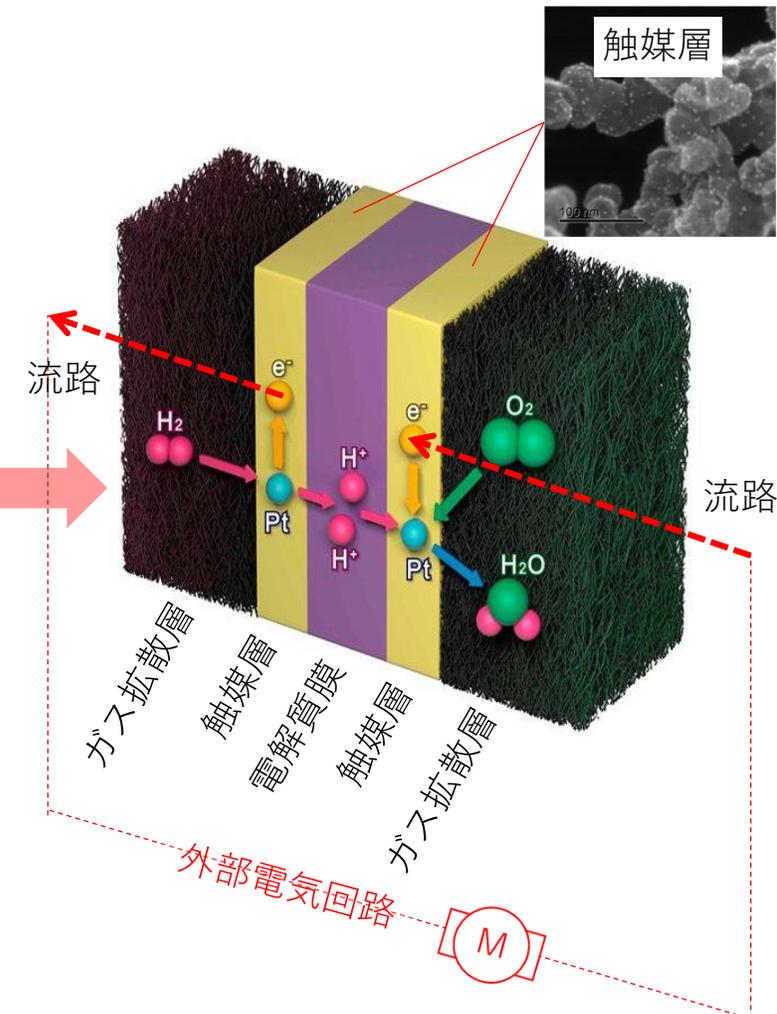


単セル



発電素子

(MEA = Membrane Electrode Assembly)

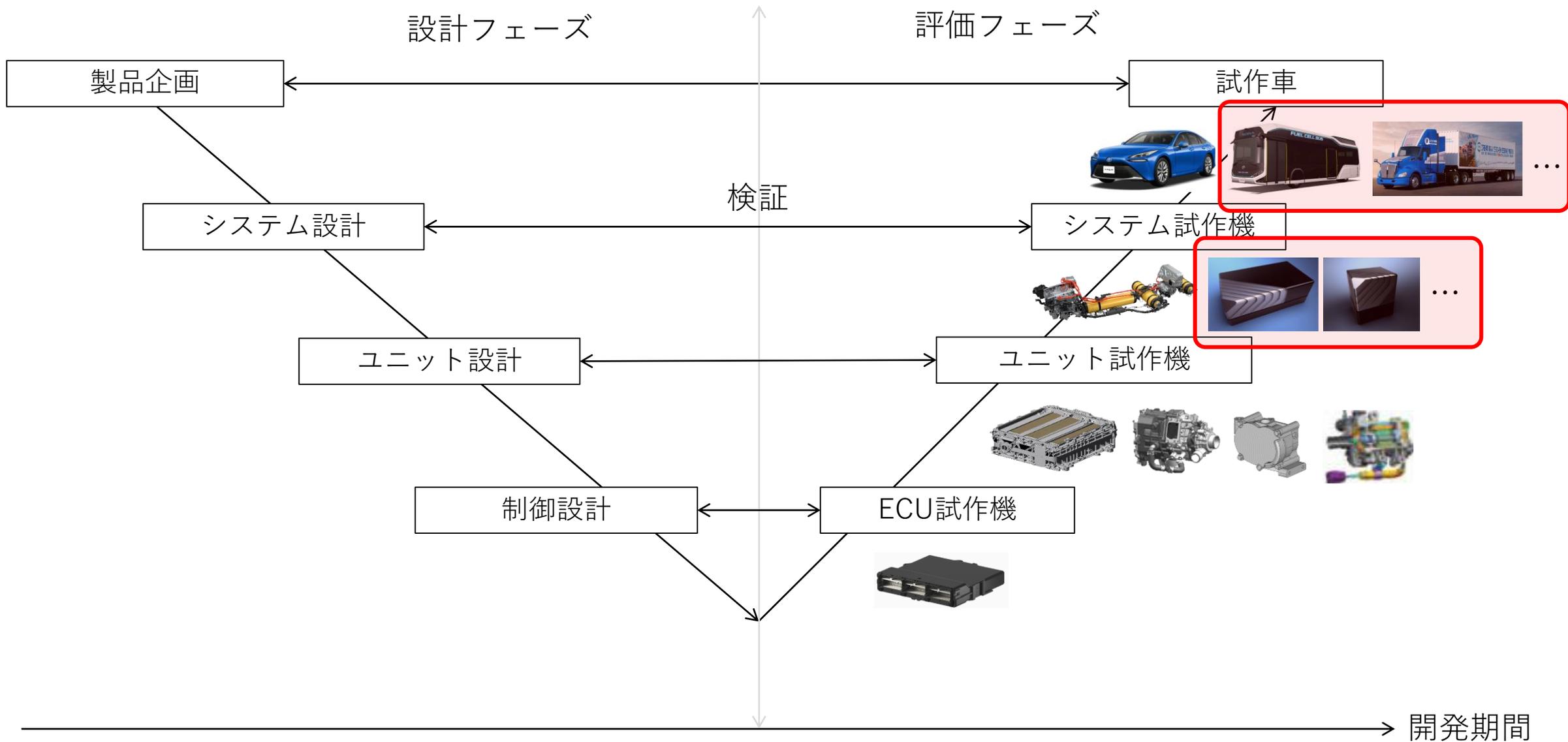


電解質膜を挟んだ触媒層に、セパレータ上の流路を通じてO<sub>2</sub>・H<sub>2</sub>を供給し起電力発生  
必要な電力が得られるだけセルを直列接続し(→FCスタック)、外部回路へ電力供給

# アジェンダ

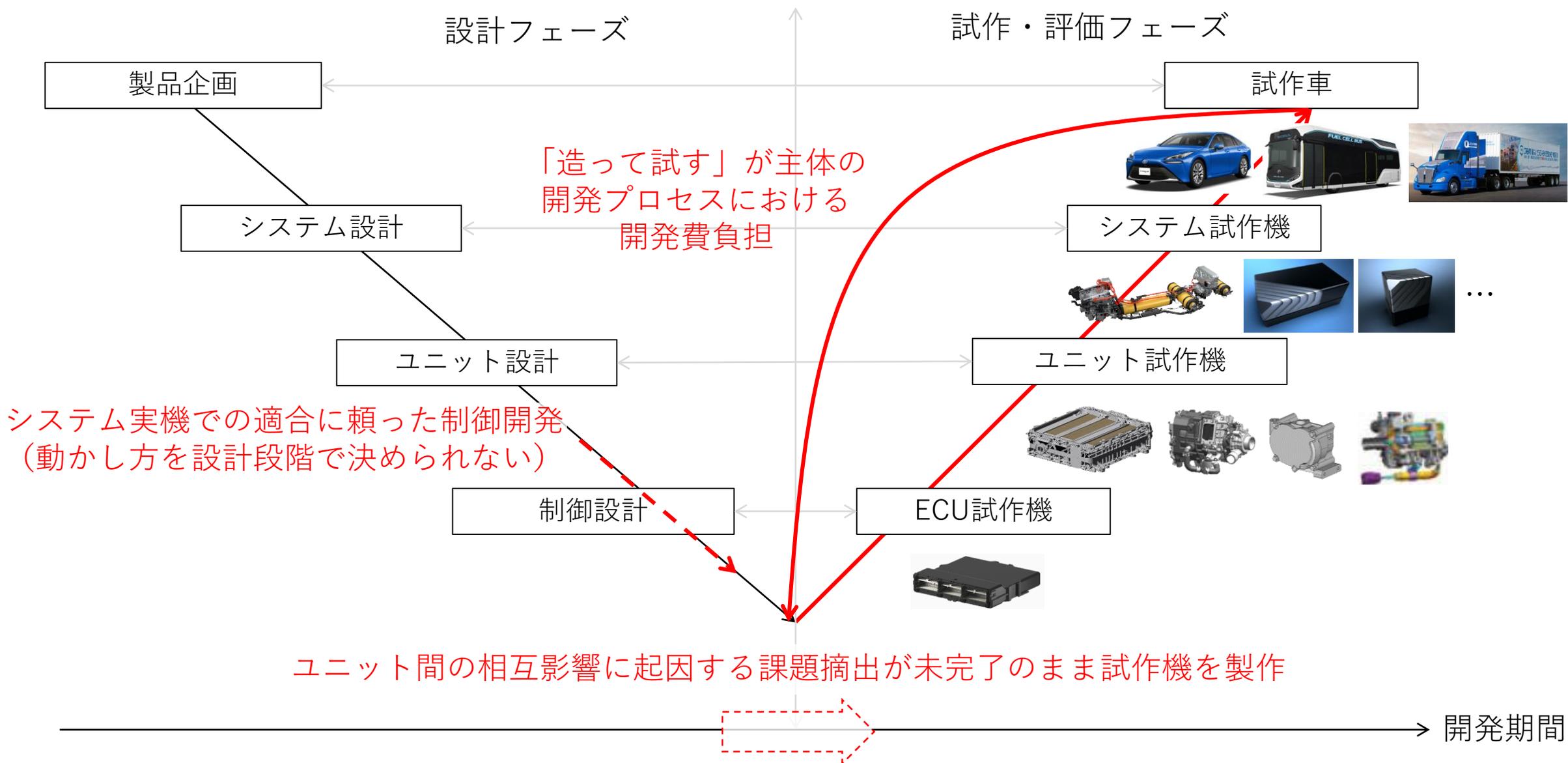
- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# (2) 目的：FCシステム開発プロセスの課題



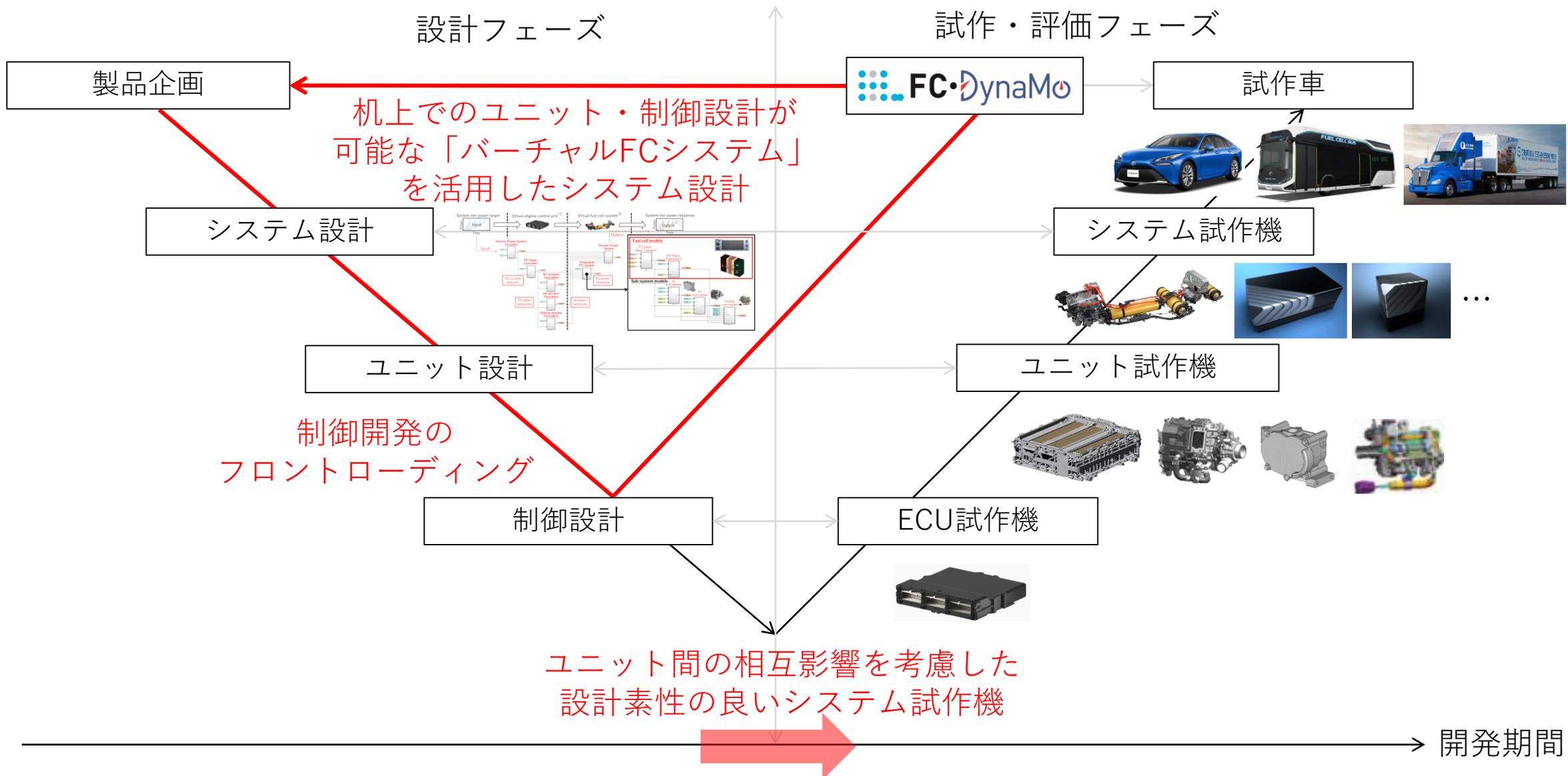
チャレンジ：水素利活用拡大へ向けた、商用車を含む多用途システムの並行開発

## (2) 目的：FCシステム開発プロセスの課題



課題：複雑な構成を有する燃料電池システムにおける開発費・期間の負担大

# (2) 目的：FCシステム開発プロセスの課題

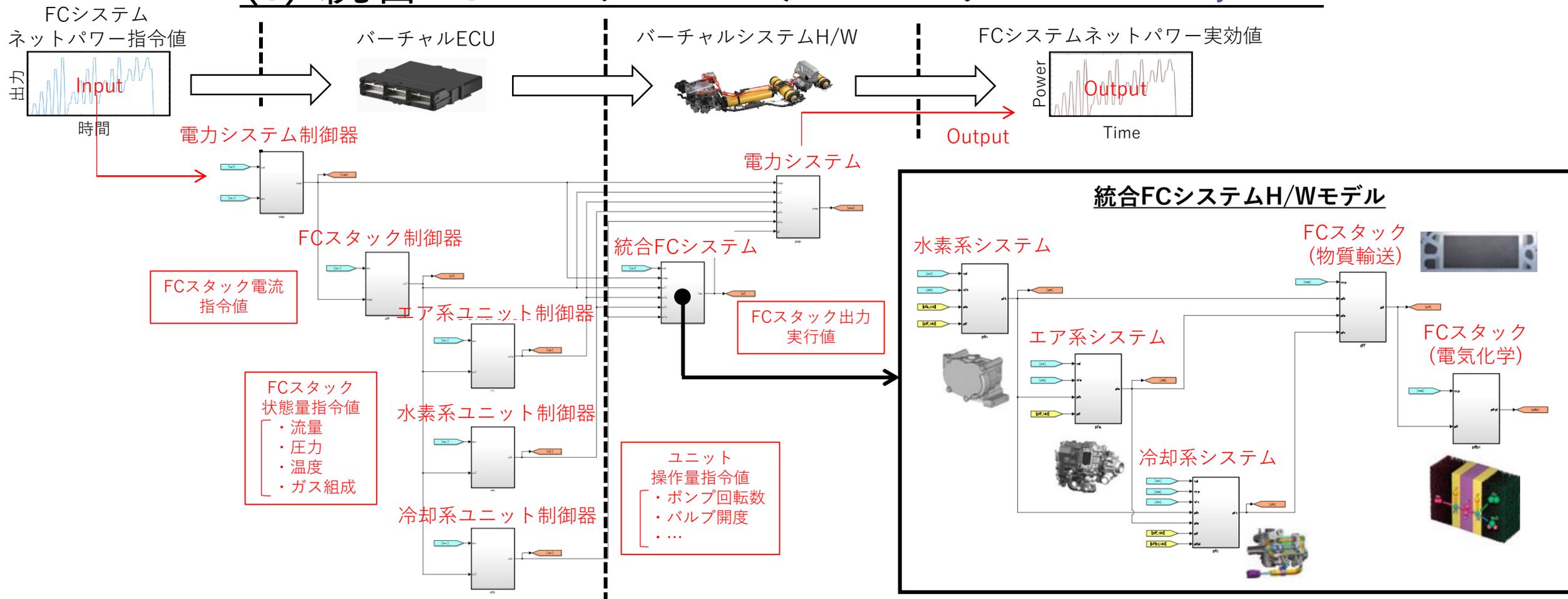


ソリューション：「バーチャルFCシステム」による開発負担・期間の低減

# アジェンダ

- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# (3) 統合FCシステムシミュレーター



## 特徴 (→ 開発現場で活用されるための要件)

- ① 網羅性 : 全システムの物理モデル+制御器を1パッケージで実装、システム・目的毎のソフトウェアの使い分けが不要
- ② マルチスケール : 車両 (mスケール) ~ 触媒粒子 (nmスケール) の物理モデルを包含
- ③ 非定常 : システム全体の動特性をシミュレーション可能
- ④ 演算速度 : 汎用PCでリアルタイムの50倍の演算速度、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可能
- ⑤ 精度 : 市販FCEV (第2世代MIRAI) 開発で取得されたデータを活用した検証実績、ユーザーは活用に専念できる
- ⑥ ユーザビリティ : MATLAB / Simulink のみで動作 (追加のツールボックスは不要)、複数ソフト・言語の習得が不要

# アジェンダ

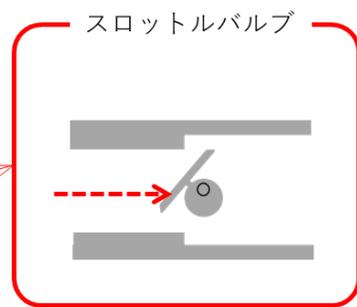
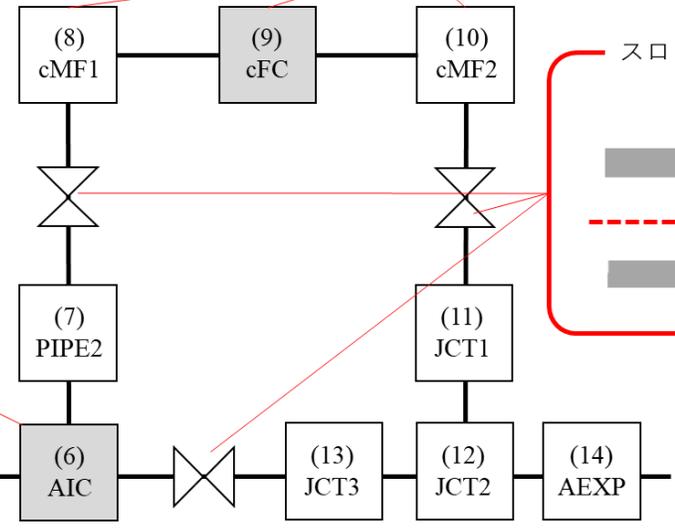
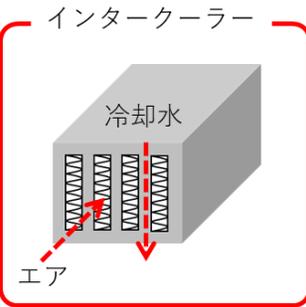
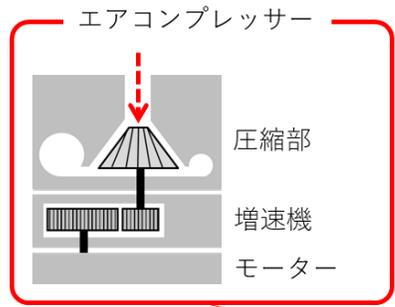
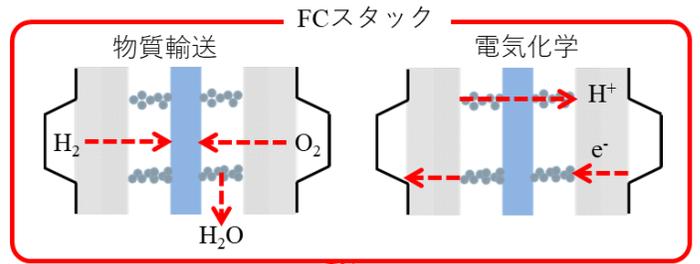
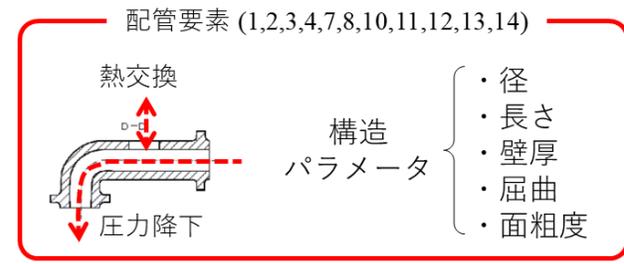
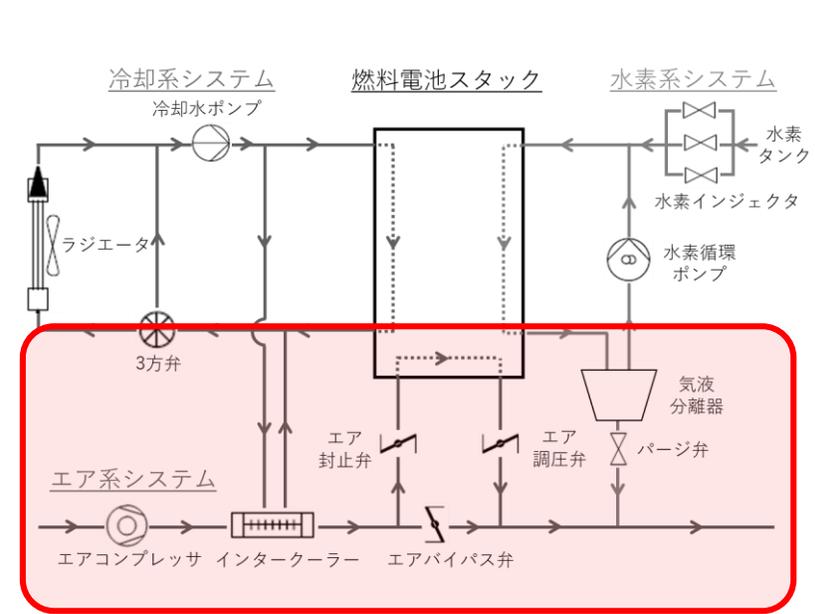
- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) **プラントモデル開発**
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# (4-1) プラントモデル：FCシステムの物理モデリング指針

## システムフロー図

## 機能ブロック図 (エア系システム)

### 1D物理モデル



状態量：流量、圧力、温度、ガス組成

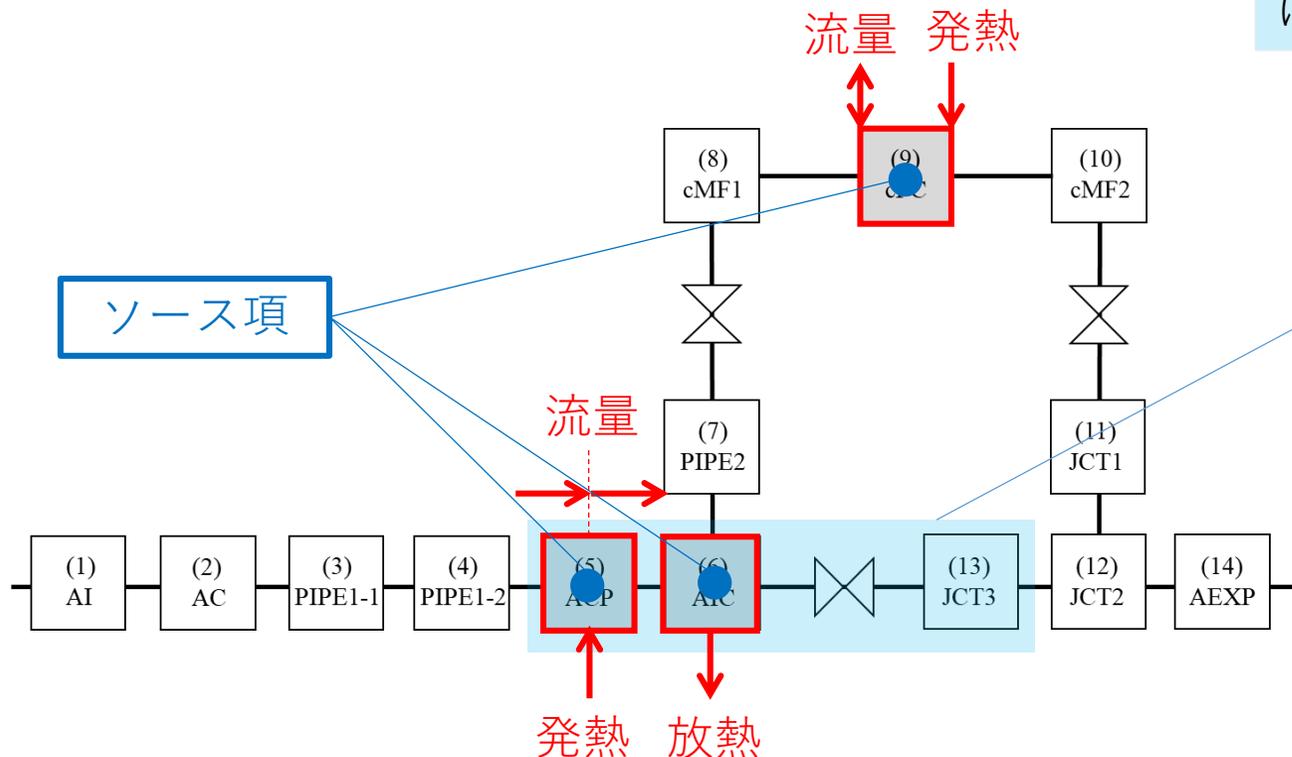
- ・各システムを機能ブロック図で表現、ブロックの分割単位は図面単位 (部品単位)
- ・各機能ブロックには、①部品の1D物理モデル、②状態量 (流量・圧力・温度・ガス組成) をカプセル化

# (4-1) プラントモデル：FCシステムの物理モデリング指針

## 機能ブロック図 (エア系システム)

## 微分方程式 (圧力収支)

隣接する(物質・熱の授受がある)機能ブロック間には、非ゼロの係数が定義される

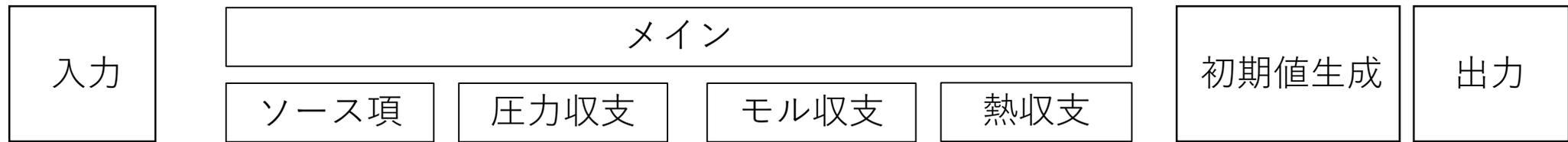


(1) AI	$\alpha^{(1)(1)}$	$\alpha^{(1)(2)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(1)}$	$b^{(1)}$
(2) AC	$\alpha^{(2)(1)}$	$\alpha^{(2)(2)}$	$\alpha^{(2)(3)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(2)}$	$b^{(2)}$
(3) PIPE1_1	0	$\alpha^{(3)(2)}$	$\alpha^{(3)(3)}$	$\alpha^{(3)(4)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(3)}$	$b^{(3)}$
(4) PIPE1_2	0	0	$\alpha^{(4)(3)}$	$\alpha^{(4)(4)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(4)}$	$b^{(4)}$
(5) ACP	0	0	0	0	$\alpha^{(5)(5)}$	$\alpha^{(5)(6)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(5)}$	$b^{(5)}$
(6) AIC	0	0	0	0	$\alpha^{(6)(5)}$	$\alpha^{(6)(6)}$	$\alpha^{(6)(7)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(6)(12)}$	$p_{tot}^{(6)}$	$b^{(6)}$
(7) PIPE2	0	0	0	0	0	$\alpha^{(7)(6)}$	$\alpha^{(7)(7)}$	$\alpha^{(7)(8)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(7)}$	$b^{(7)}$
(8) cMF1	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(8)(7)}$	$\alpha^{(8)(8)}$	$\alpha^{(8)(9)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(8)}$	$b^{(8)}$
(9) cFC	0	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(9)(8)}$	$\alpha^{(9)(9)}$	$\alpha^{(9)(10)}$	0	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(9)}$	$b^{(9)}$
(10) cMF2	0	0	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(10)(9)}$	$\alpha^{(10)(10)}$	$\alpha^{(10)(11)}$	0	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(10)}$	$b^{(10)}$
(11) JCT1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(11)(10)}$	$\alpha^{(11)(11)}$	$\alpha^{(11)(12)}$	0	0	0	0	0	$p_{tot}^{(11)}$	$b^{(11)}$
(12) JCT2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(12)(11)}$	$\alpha^{(12)(12)}$	$\alpha^{(12)(13)}$	$\alpha^{(12)(14)}$	0	0	0	$p_{tot}^{(12)}$	$b^{(12)}$
(13) JCT3	0	0	0	0	0	$\alpha^{(13)(6)}$	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(13)(12)}$	$\alpha^{(13)(13)}$	0	0	0	$p_{tot}^{(13)}$	$b^{(13)}$
(14) AEXP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\alpha^{(14)(12)}$	0	$\alpha^{(14)(14)}$	$p_{tot}^{(14)}$	$b^{(14)}$	

- 「流量・熱の出入り(ソース項)の影響が、1時間ステップの間にどう伝播したか」を表現する圧力・モル・熱収支の微分方程式
- 線形化、離散化、収束演算のための数値演算ソルバー

ホワイトボックスモデルで実装

# (4-1) プラントモデル：物理モデルのMATLAB / Simulinkへの実装

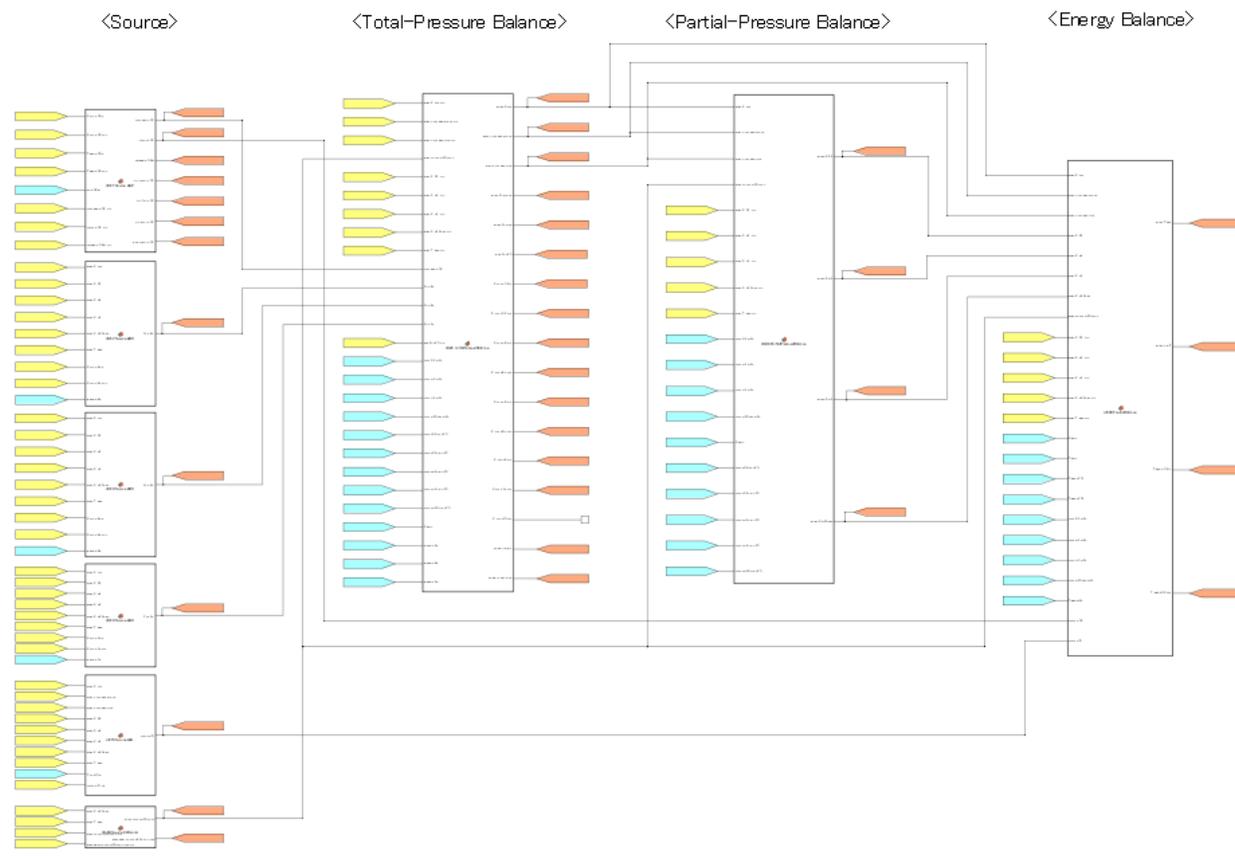


pfa : Air system plant model

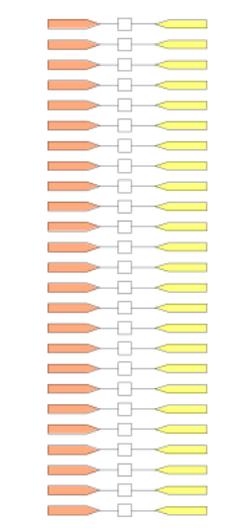
<Input & boundary condition>



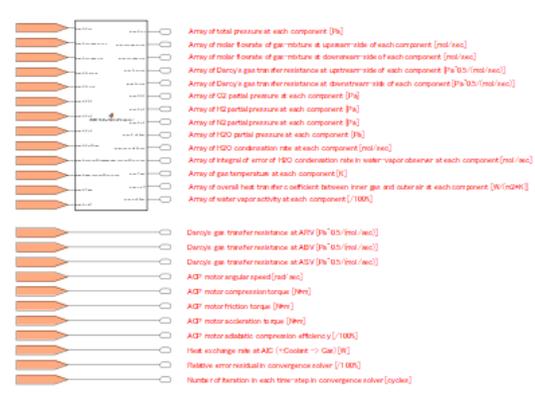
Main

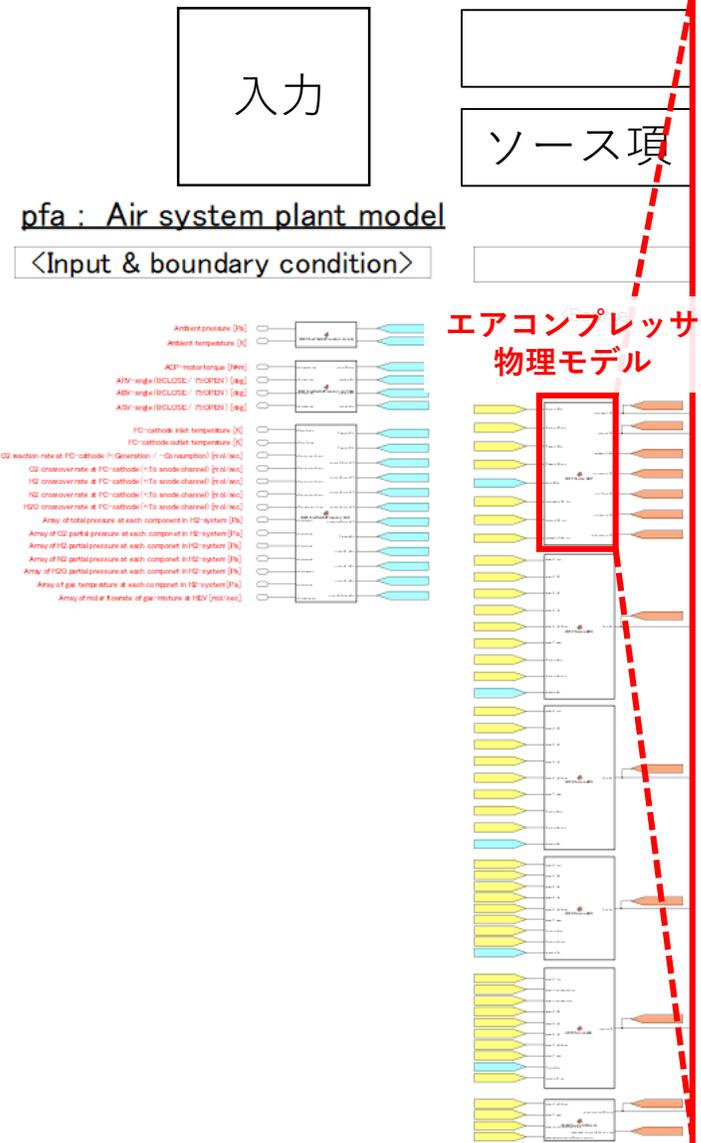


Feed-back



Output





```

211 %-----
212 %
213 %
214 %-----
215
216 %----- State Variables -----
217
218 % Standard angular speed of ACP-impeller [rad/sec]
219 omega_std = omega / sqrt(T_in/T_std_air);
220
221 % Lower-limit guard
222 omega_std = max(omega_std, 0.1/(2*pi/60));
223
224 % Pressure ratio [/100%]
225 PR = P_out / P_in;
226
227 % Lower-limit guard
228 PR = max(PR, PR_ACP_I1);
229
230 % Intermediate variables in Jensen-Kristensen equation
231 Uc = D_ImpellerACP * omega_std / 2;
232 M = Uc / sqrt(gamma_gas * R_air * T_std_air);
233 psi = (Cp_std_air * T_std_air) * (PR^((gamma_gas-1)/gamma_gas) - 1) / (1/2 * Uc^2);
234
235 k1 = k11_ACP + k12_ACP * M;
236 k2 = k21_ACP + k22_ACP * M;
237 k3 = k31_ACP + k32_ACP * M;
238
239 a1 = (a11_ACP + a12_ACP * M) / (a13_ACP - M);
240 a2 = (a21_ACP + a22_ACP * M) / (a23_ACP - M);
241 a3 = (a31_ACP + a32_ACP * M) / (a33_ACP - M);
242
243 if k2 + psi >= 0
244     phi = 0;
245 else
246     phi = (k3 * psi - k1) / (k2 + psi);
247 end
248
249 phi = max(phi, 0); % Lower-limit guard
250 phi = min(phi, 1); % Upper-limit guard
251
252 %----- Air flowrate-----
253
254 % Standardized mass flowrate [kg/sec]
255 mdot_std = phi * rho_std_air * (pi/4) * D_ImpellerACP^2 * Uc;
256
257 % Actual mass flowrate [kg/sec]
258 mdot = mdot_std * (P_in / P_std_air) / sqrt(T_in / T_std_air);
    
```

コード

ドキュメントに忠実な物理モデル記述

(1) 圧縮機モデル

ドキュメント

: JensenKristensen)

流量 [kg/sec]

角速度 [rad/sec]

エアコンプレッサ流量

$$\omega_{ACPmot} = N_{ACPmot,old} \times \left(\frac{Z\pi}{60}\right)$$

規格化流量 [-]

$$\phi = \frac{(k_{31}^{ACP} + k_{32}^{ACP} M)\psi - (k_{11}^{ACP} + k_{12}^{ACP} M)}{(k_{21}^{ACP} + k_{22}^{ACP} M)}$$

モーター角速度[rad/sec] → インペラ角速度[rad/sec]

$$\omega_{ACPimp} = \omega_{ACPmot} \times GR_{ACP}$$

修正エア質量流量 [kg/sec]

$$\dot{m}_{corr}^{ACP} = \rho_{std} \left(\frac{\pi D_{ACPimp}^2}{4}\right) U_c^{ACPimp} \phi$$

インペラ修正角速度[rad/sec]

$$\omega_{corr}^{ACPimp} = \omega_{ACPimp} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{T_{ACPfin}}{T_{std}}}}$$

エア質量流量 [kg/sec]

$$\dot{m}^{ACP} = \dot{m}_{corr}^{ACP} \times \sqrt{\frac{P_{tot}^{ACPfin}}{P_{std}} \frac{T_{std}}{T_{ACPfin}}}$$

エアコンプレッサ圧力比 [/100%]

$$PR_{ACP} = \frac{P_{tot}^{ACPout}}{P_{tot}^{ACPfin}}$$

中間パラメータ

インペラ端チップ速度 [m/sec]

$$U_c^{ACPimp} = \frac{\pi}{60} D_{ACPimp} N_{corr}^{ACPimp} = \frac{D_{ACPimp}}{2} \omega_{corr}^{ACPimp}$$

エアモル流量 [mol/sec]

$$\dot{n}^{ACP} = \frac{\dot{m}^{ACP}}{M_{w,air}}$$

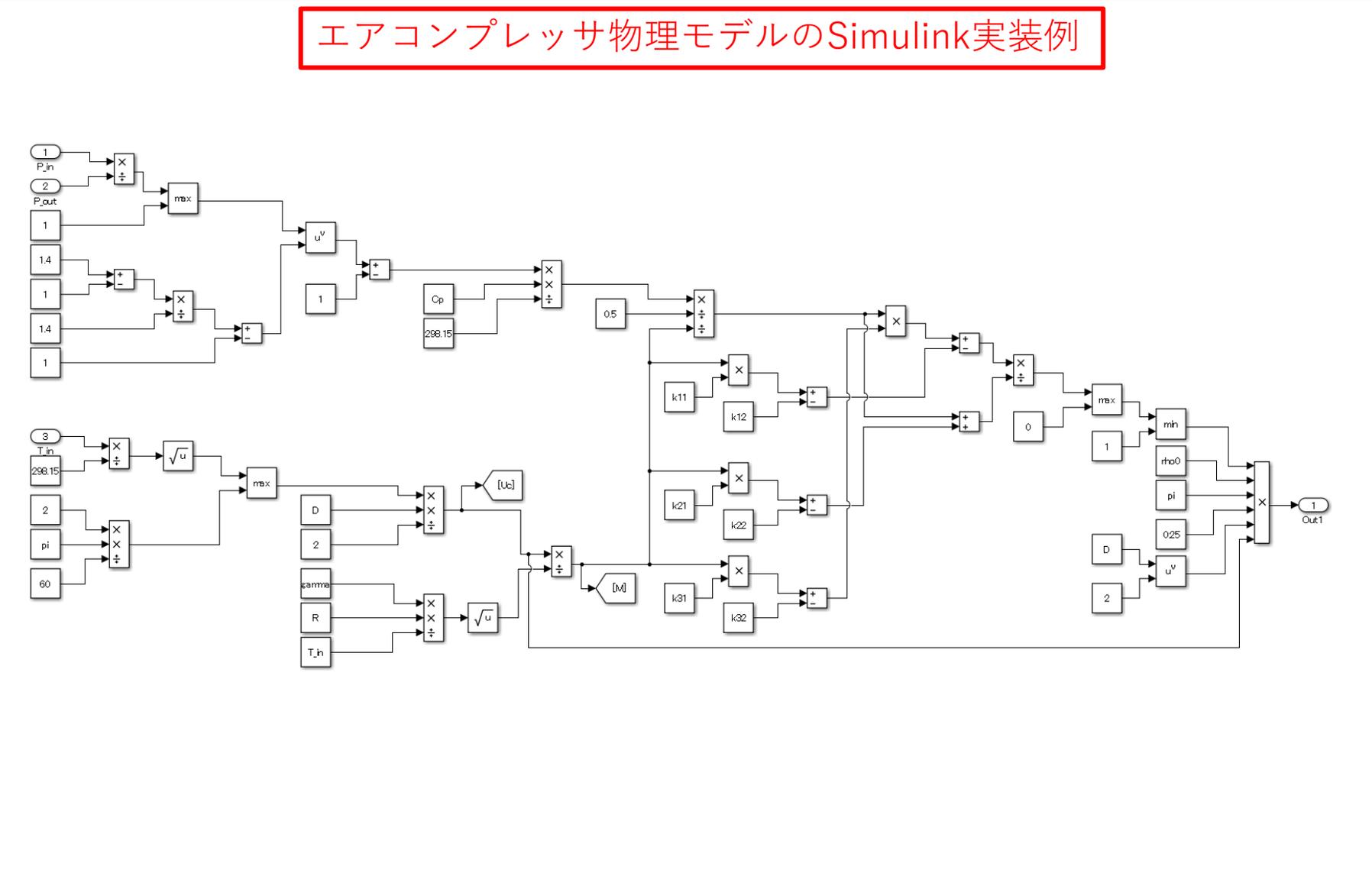
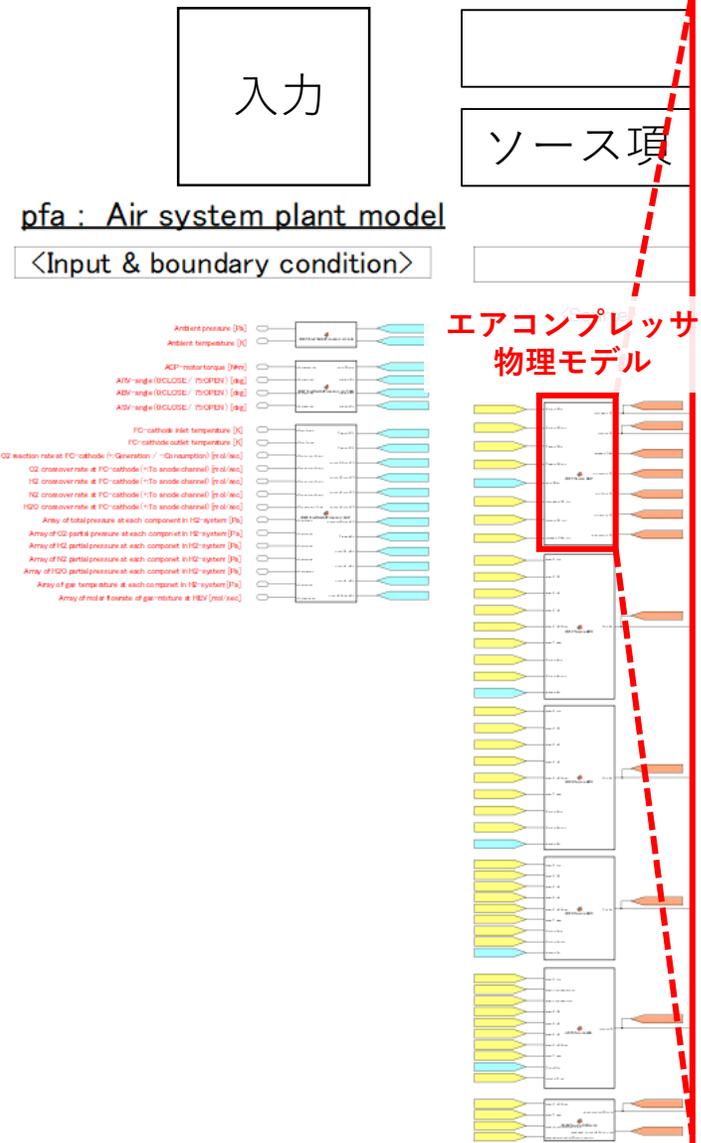
マッハ数 [-]

$$M = \frac{U_c^{ACPimp}}{\sqrt{\gamma R_{air} T_{std}}} \cdot R_{air} = \frac{R}{M_{w,air}} = \frac{R}{x_{O_2} M_{w,O_2} + x_{N_2} M_{w,N_2}}$$

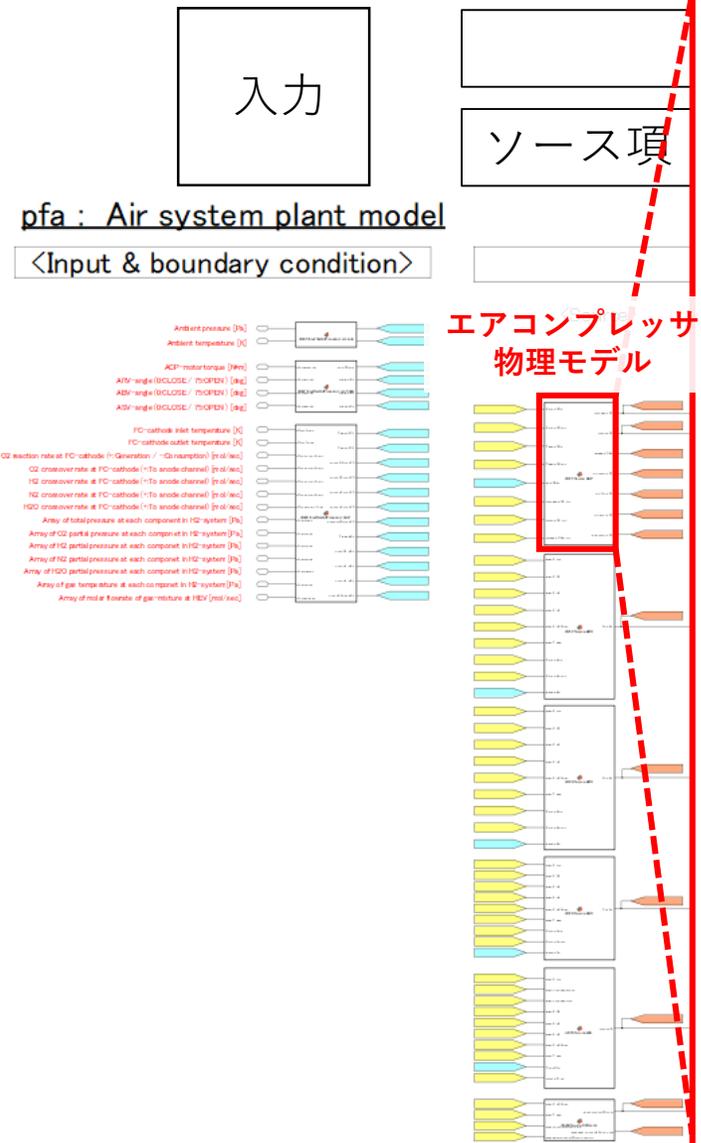
ヘッドパラメータ [-]

$$\psi = \frac{Cp_{std} T_{std} \left( PR_{ACP}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}{\frac{1}{2} U_c^{ACPimp}^2}$$

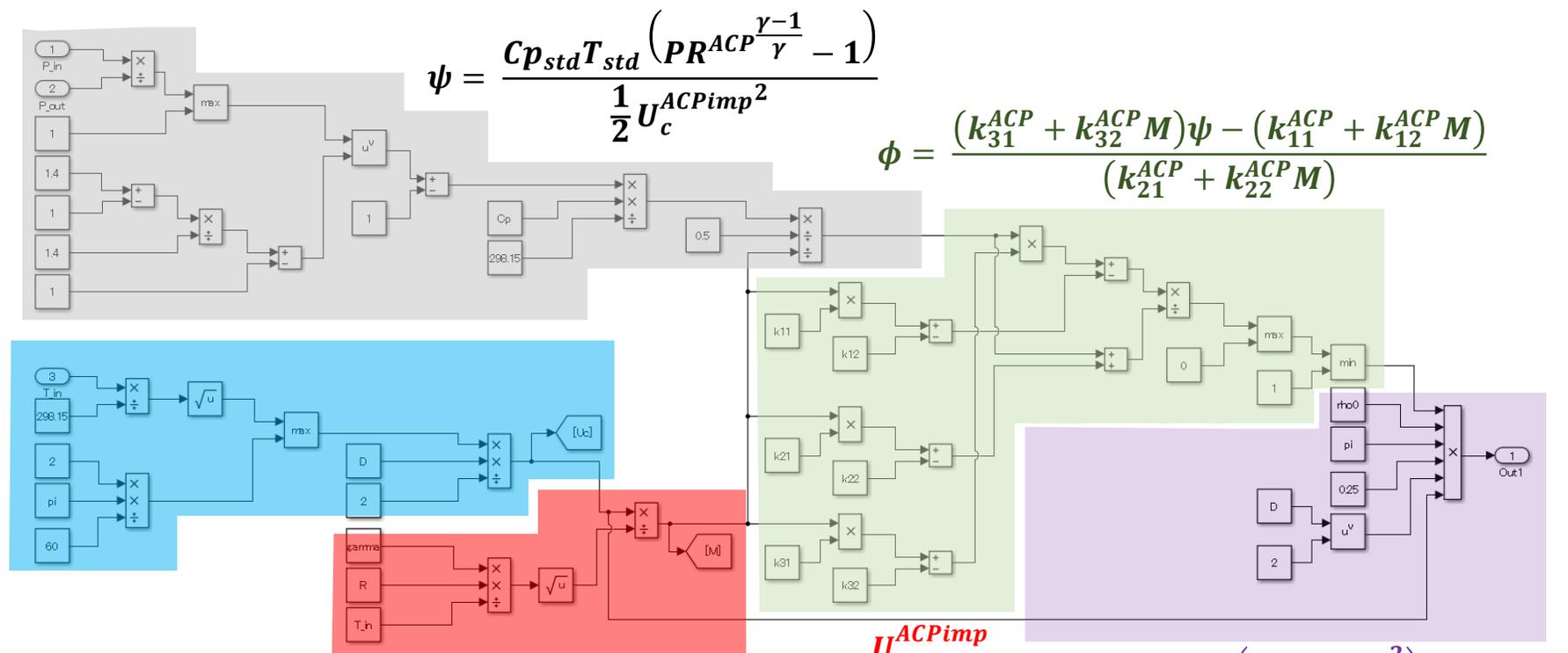
個々の物理モデル記述：MATLAB-function、物理モデル間の連結：Simulinkで実装 → 「ハイブリッドコーディング」  
物理モデルをドキュメント（仕様書・論文等）通りに記述でき、プログラム実装期間短縮・コード検査の負担低減



個々の物理モデル記述：MATLAB-function、物理モデル間の連結：Simulinkで実装 → 「ハイブリッドコーディング」  
 物理モデルをドキュメント（仕様書・論文等）通りに記述でき、開発期間短縮・モデルレビューの精度が改善



## エアコンプレッサ物理モデルのSimulink実装例



$$\psi = \frac{Cp_{std} T_{std} \left( PR^{ACP} \frac{\gamma-1}{\gamma} - 1 \right)}{\frac{1}{2} U_c^{ACPimp^2}}$$

$$\phi = \frac{(k_{31}^{ACP} + k_{32}^{ACP} M)\psi - (k_{11}^{ACP} + k_{12}^{ACP} M)}{(k_{21}^{ACP} + k_{22}^{ACP} M)}$$

$$M = \frac{U_c^{ACPimp}}{\sqrt{\gamma R_{air} T_{std}}}$$

$$U_c^{ACPimp} = \frac{\pi}{60} D^{ACPimp} N_{corr}^{ACPimp} = \frac{D^{ACPimp}}{2} \omega_{corr}^{ACPimp}$$

$$\omega_{corr}^{ACPimp} = \omega^{ACPimp} \times \frac{1}{\sqrt{T_{ACPin} / T_{std}}}$$

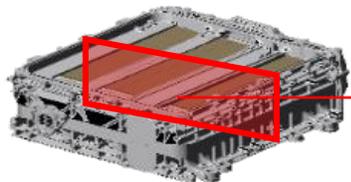
$$\dot{m}_{corr}^{ACP} = \rho_{std} \left( \frac{\pi D^{ACPimp^2}}{4} \right) U_c^{ACPimp} \phi$$

個々の物理モデル記述：MATLAB-function、物理モデル間の連結：Simulinkで実装 → 「ハイブリッドコーディング」  
 物理モデルをドキュメント（仕様書・論文等）通りに記述でき、開発期間短縮・モデルレビューの精度が改善



# (4-1) プラントモデル：パラメータ適合 (FCスタック)

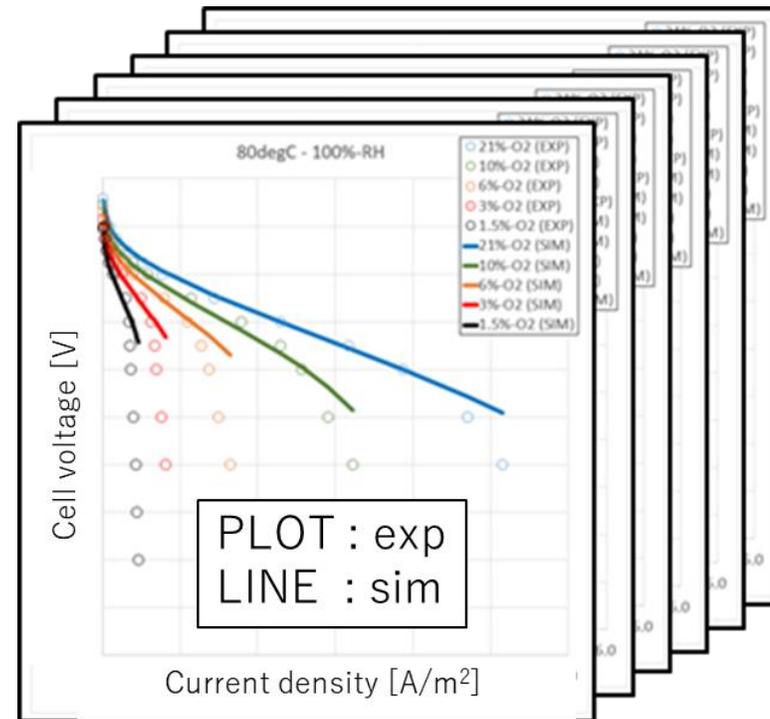
FCスタック



単セル

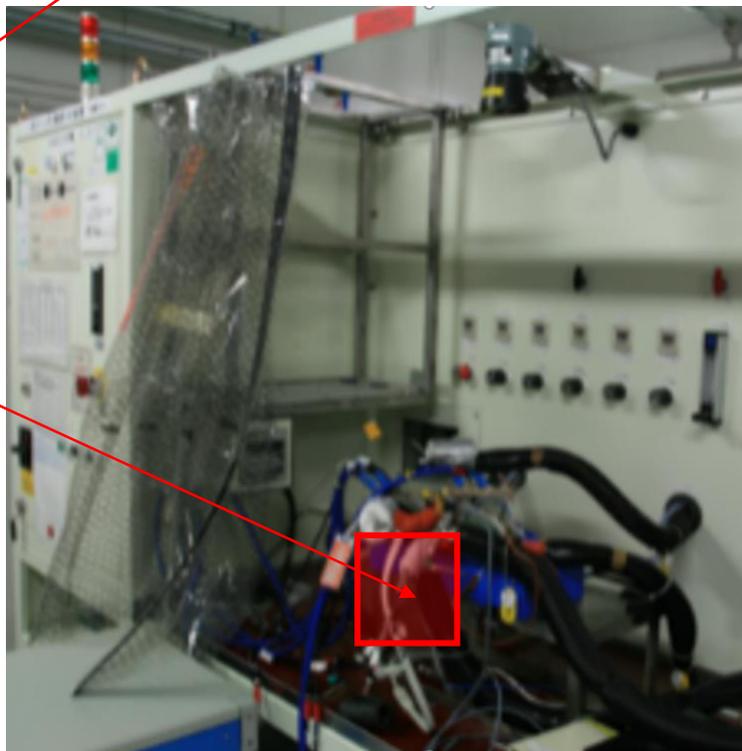
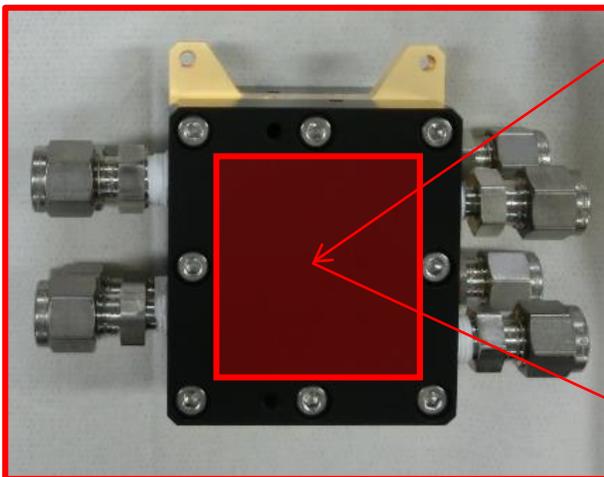


小セル実験データ



小セル (1cm<sup>2</sup>)

小セルベンチ



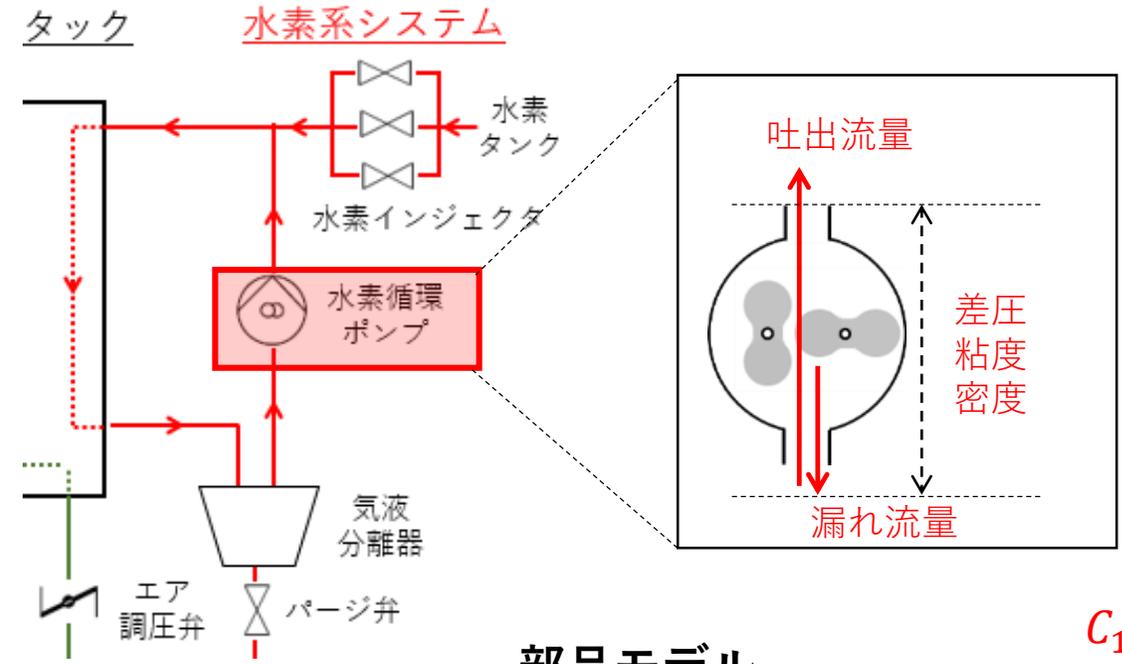
小セル境界条件

- 5 湿度 (100, 80, 60, 40, 20%)
- 5 O<sub>2</sub> 濃度 (21, 10, 6, 3, 1%)
- 3 冷却水温度 (80 + 40, 60 °C)

小セルで体系的に取得された実験データを基に、FCスタックのパラメータを同定パラメータ決定のために、フルスケールの試作品での試験データを必要としない

# (4-1) プラントモデル：パラメータ適合（システム部品）

## システム部品

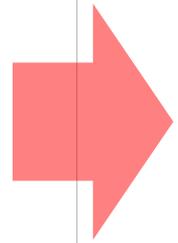


## 部品モデル

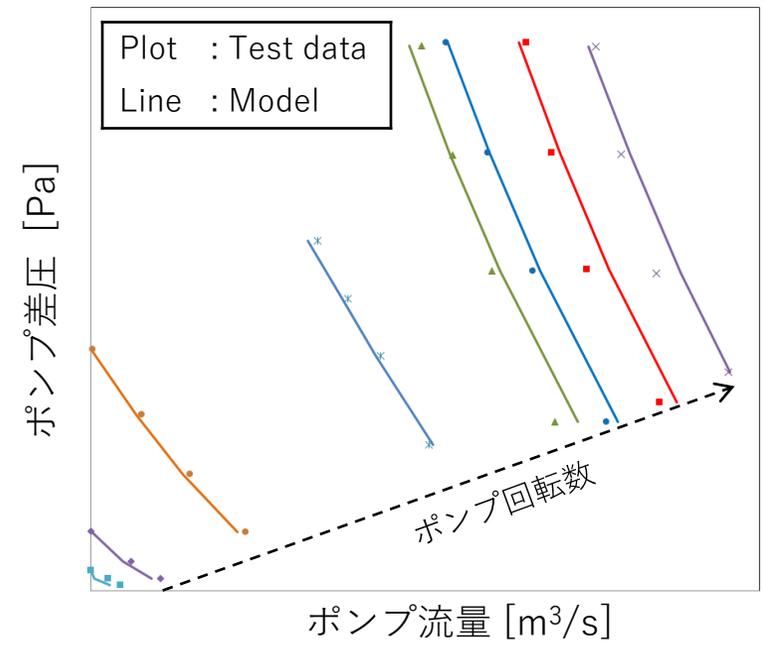
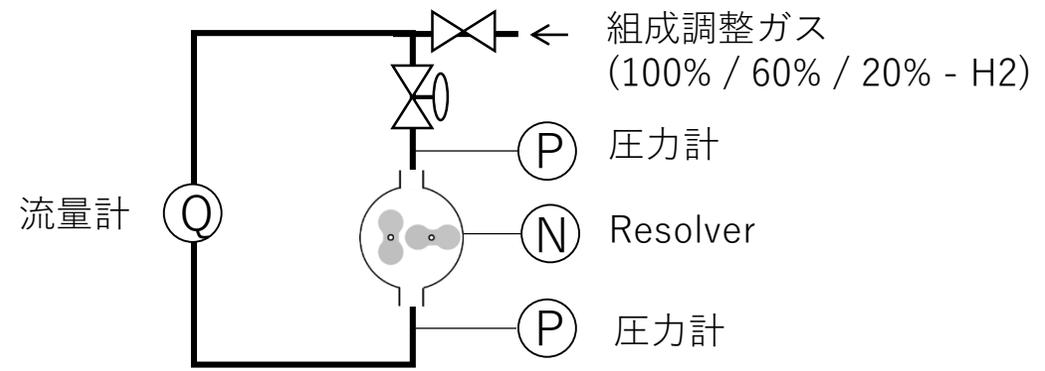
$$\text{総流量 } \dot{v} = C_1 N - C_2 \frac{\Delta P C_3}{\mu C_4 \rho C_5}$$

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）



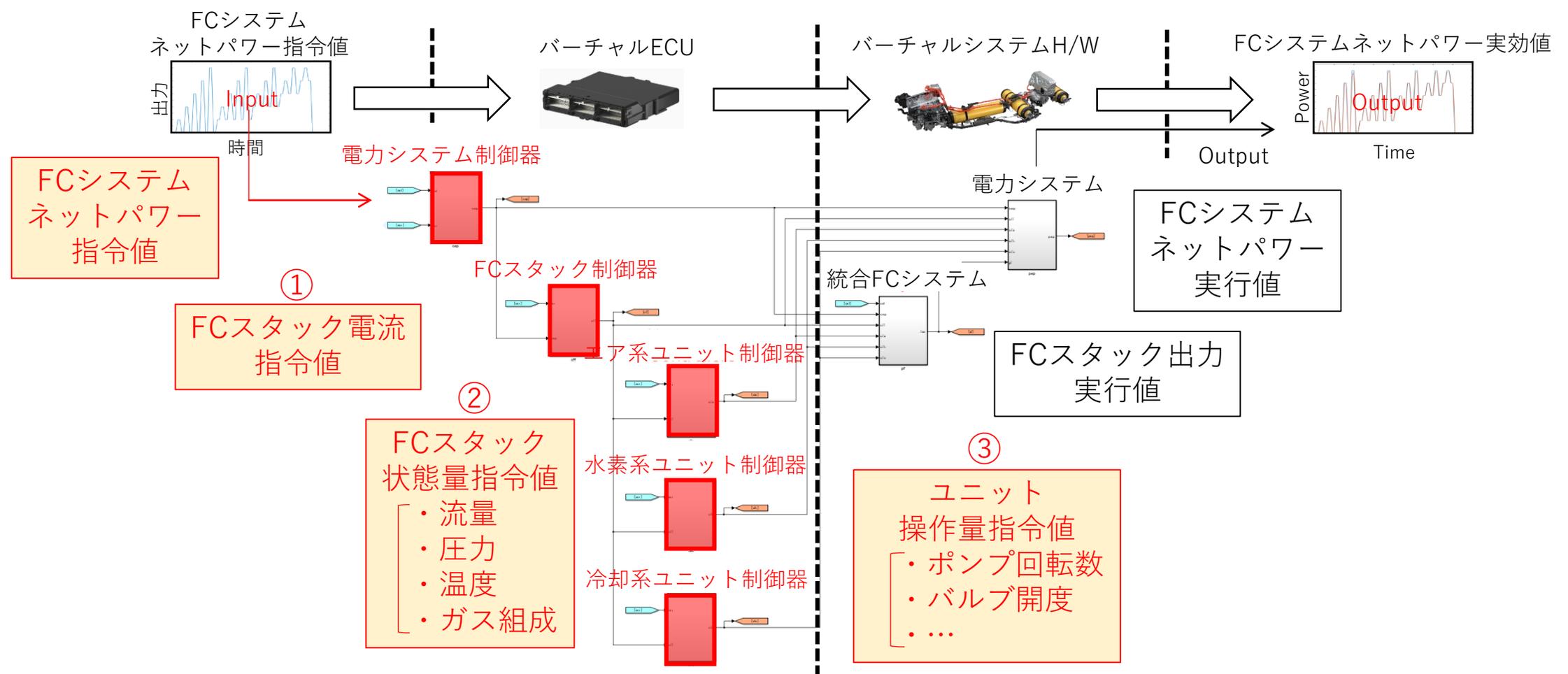
部品単体で体系的に取得された実験データを基に、部品モデルのパラメータを同定  
 パラメータ決定のために、車両・システムでの試験データを必要としない

# アジェンダ

- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# (4-2) コントローラモデル：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コントローラモデルを実装

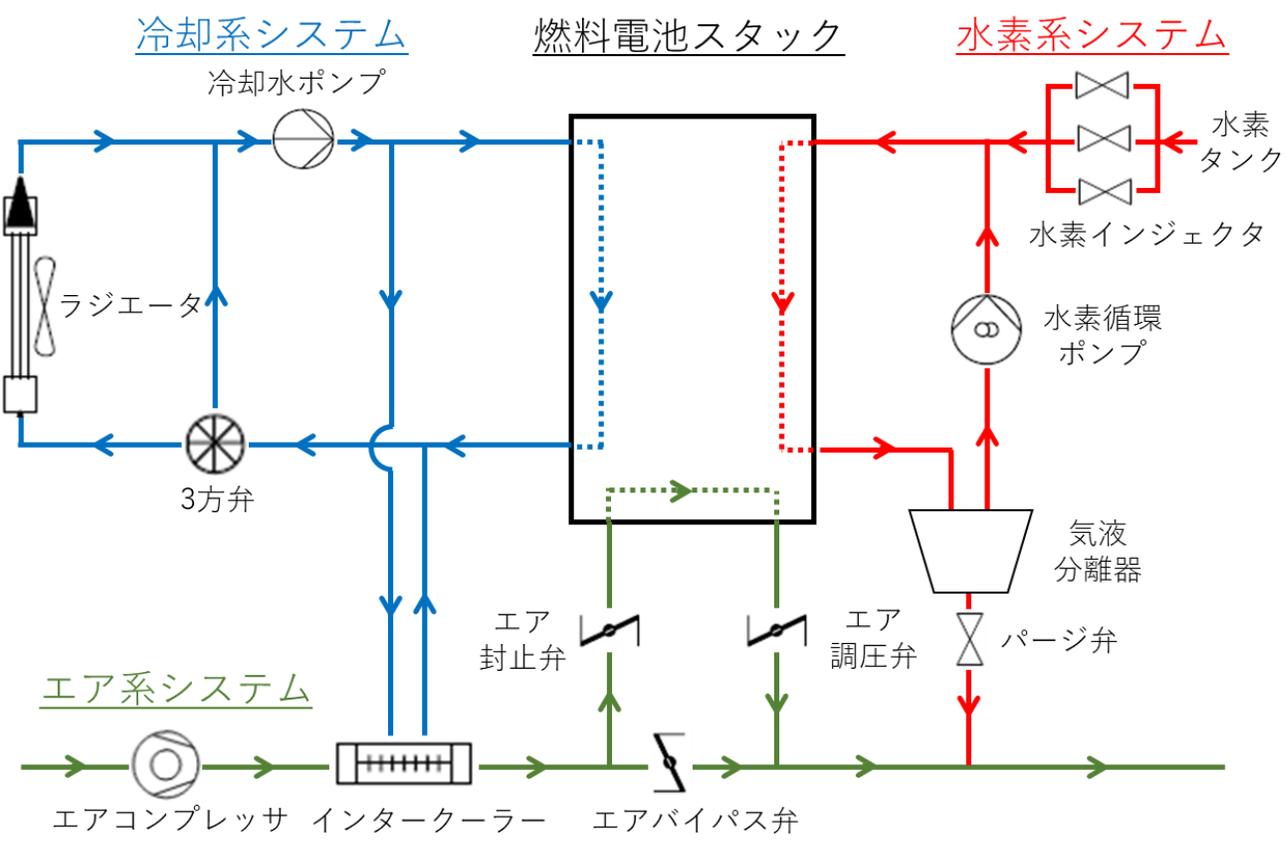


- ① 指令パワーを実現させるための電力制御器
- ② FCスタックを高効率で動作させるための状態量制御器
- ③ 狙いの状態量を実現するためのユニット操作量制御器

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

# (4-2) コントローラモデル：各ユニットの役割の定義

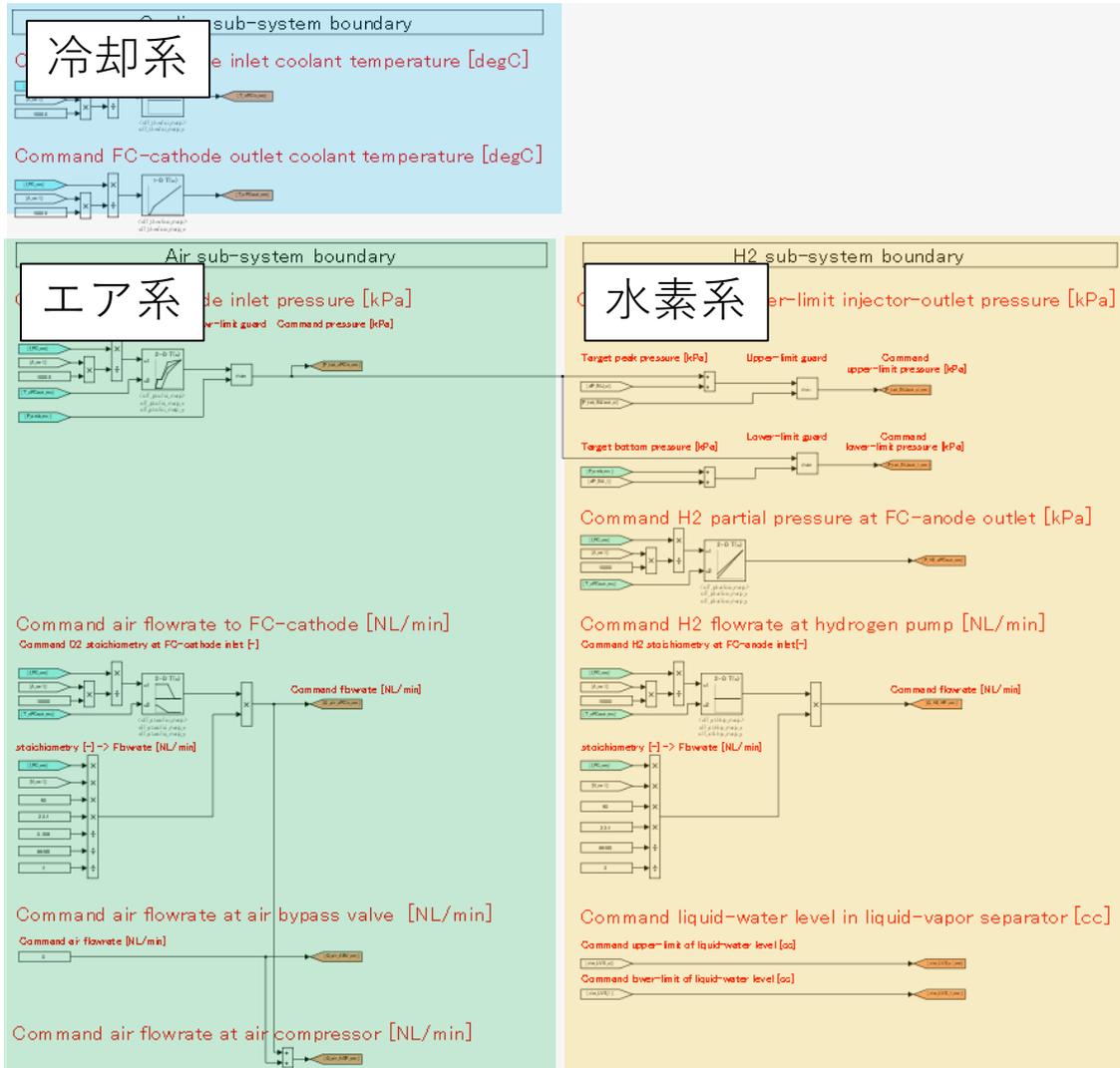
FCスタックを高効率で発電可能にするための好適な境界条件に維持することを目的に、各システムユニットの役割（制御対象とする状態量）を定義



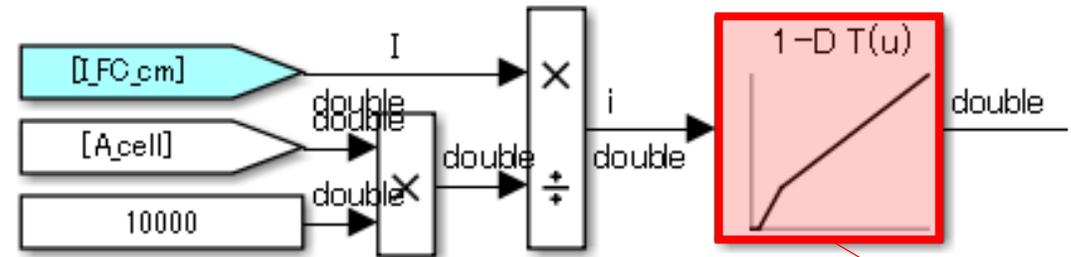
	ユニット	制御対象
エア系	エアコンプレッサ	総エア流量
	エア調圧弁	FCスタックエア圧力
	エアバイパス弁	バイパスエア流量
	エア封止弁	システム停止時の封止
水素系	インジェクタ	FCスタック出口水素分圧
	パージ弁	FCスタック出口水素分圧
	水素循環ポンプ	循環水素流量
	気液分離器	排気中のミスト分離+貯水
冷却系	冷却水ポンプ	FCスタック出口温度
	3方弁	FCスタック入口温度
	ラジエータ(+ファン)	放熱

# (4-2) コントローラモデル：FCスタック制御器

現在のFCの動作点(電流・電圧)で、高い発電効率が可能な境界条件(流量・圧力・温度・ガス組成)を指令

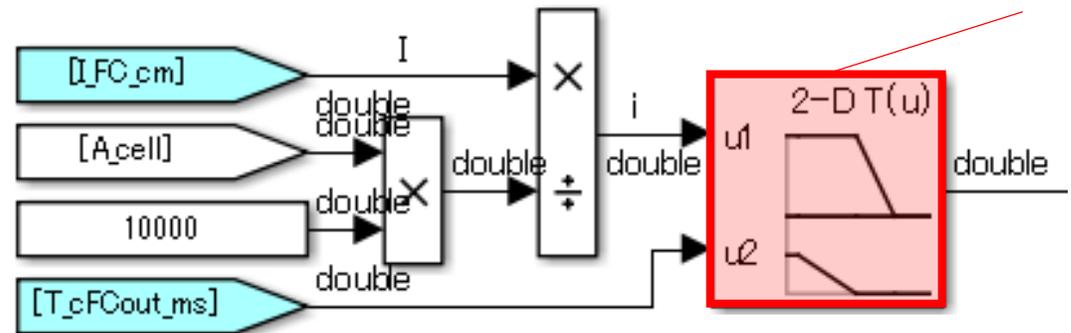


(例：冷却系) FC出口冷却水温度 指令値演算



入力：FC指令電流

(例：エア系) エア流量 指令値演算



入力：FC指令電流 + FC水温

机上で適合した  
動作点マップ

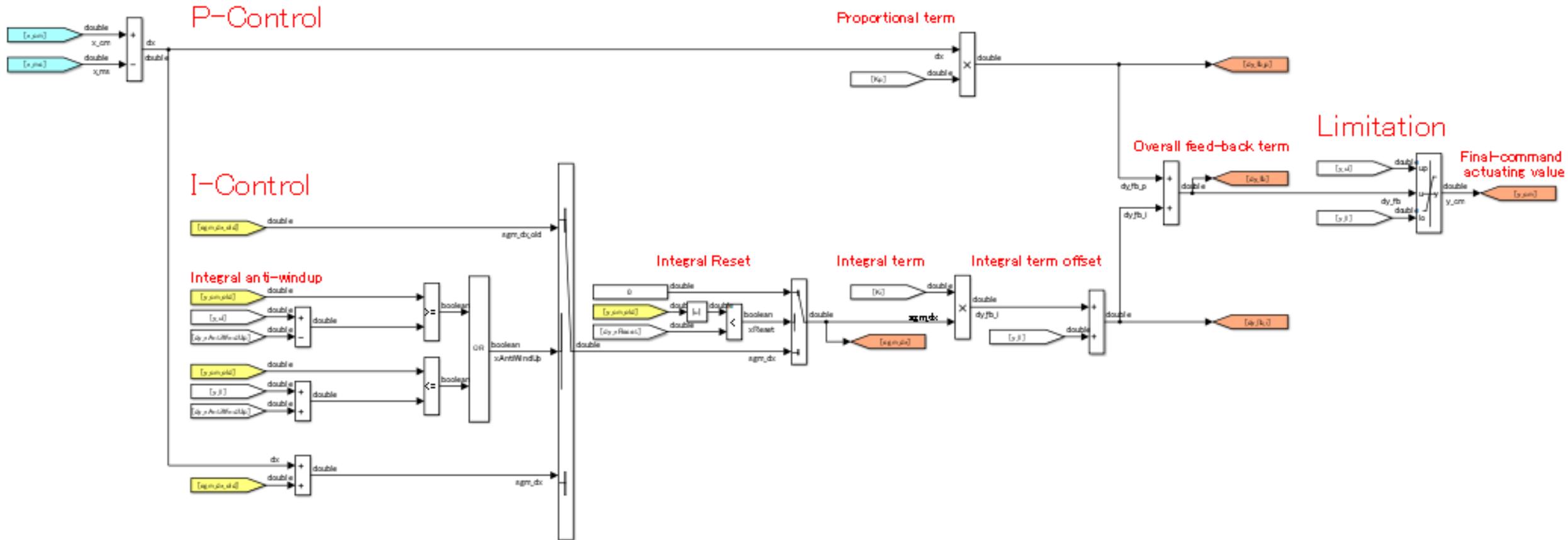
- ・ 好適なFCスタックの動作点を机上で適合した結果を動作点マップとして実装
- ・ FCスタック動作点を、ユニット制御(回転数・バルブ開度)と独立して「レゴブロック的に」適合可能

# (4-2) コントローラモデル：ユニット制御器

(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

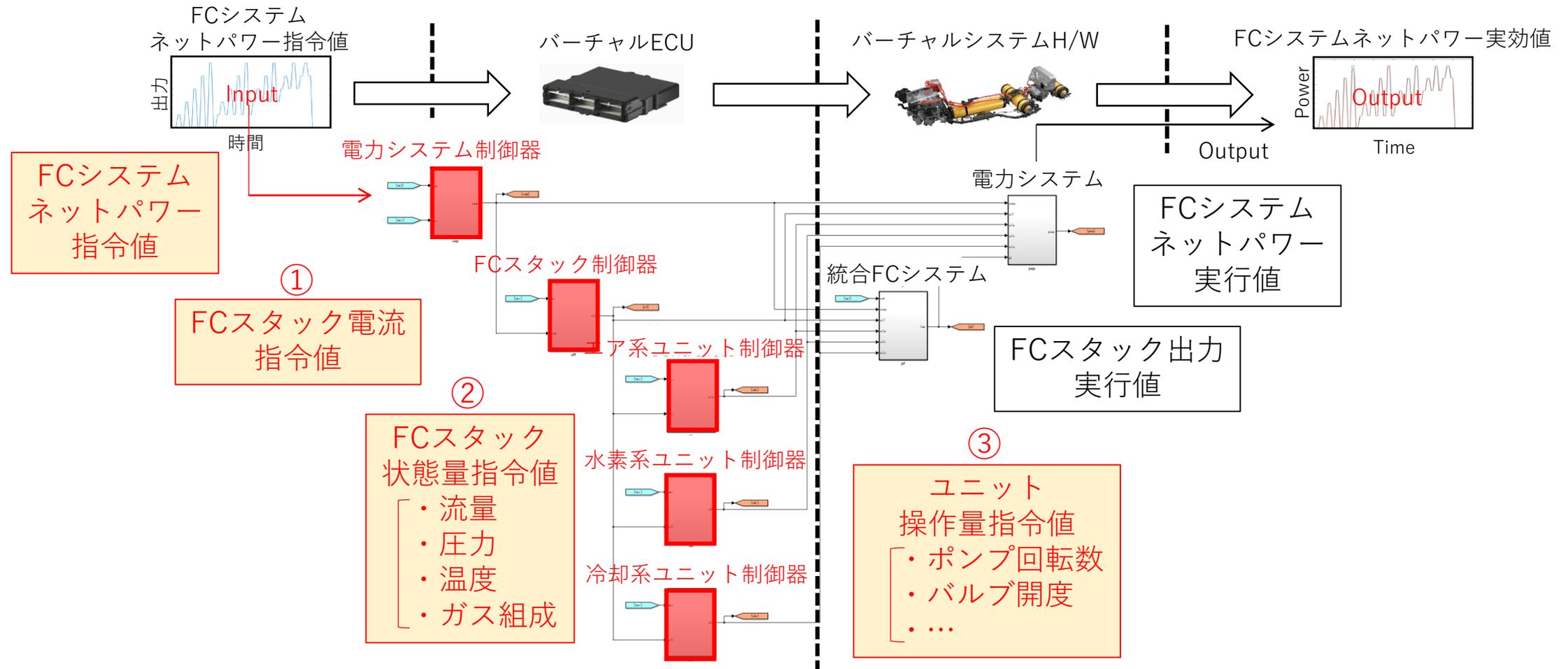
出力：回転数



- 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等の先進制御と容易に置換可能 (→ホワイトボックス)

# (4-2) コントローラモデル：まとめ

今後、企業・アカデミアで独自の制御器を開発していくためのベースとなるコントローラモデルを実装



- ① 指令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

# アジェンダ

- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

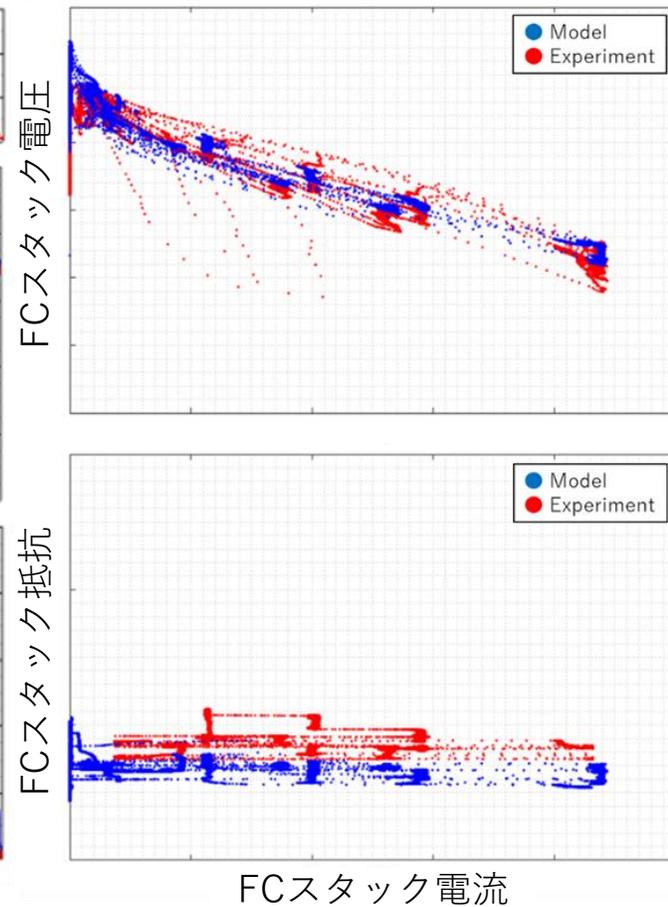
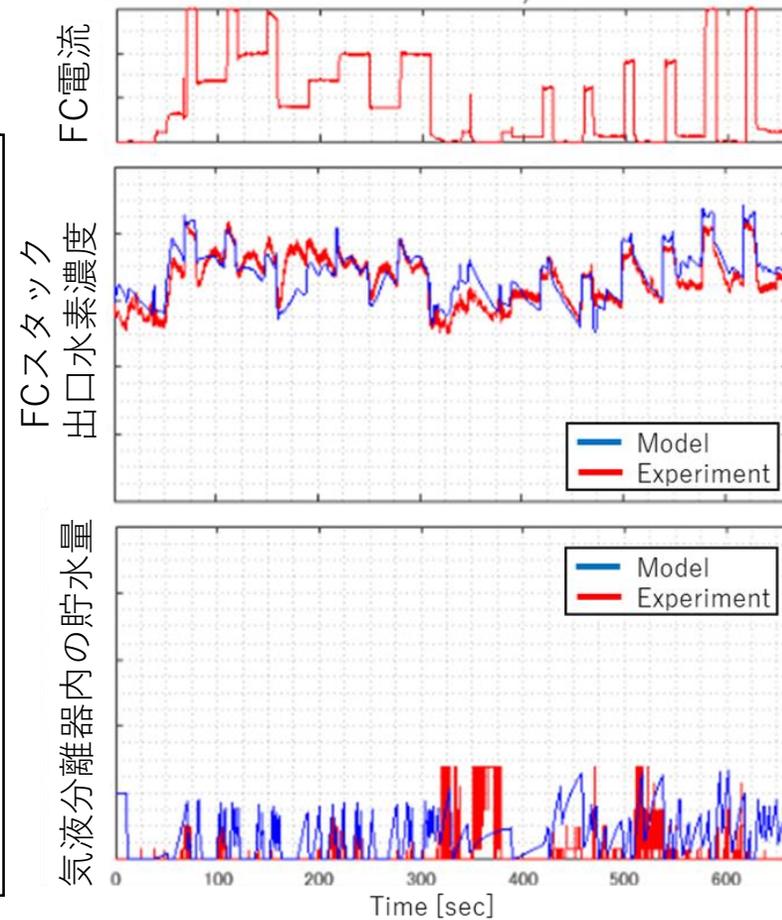
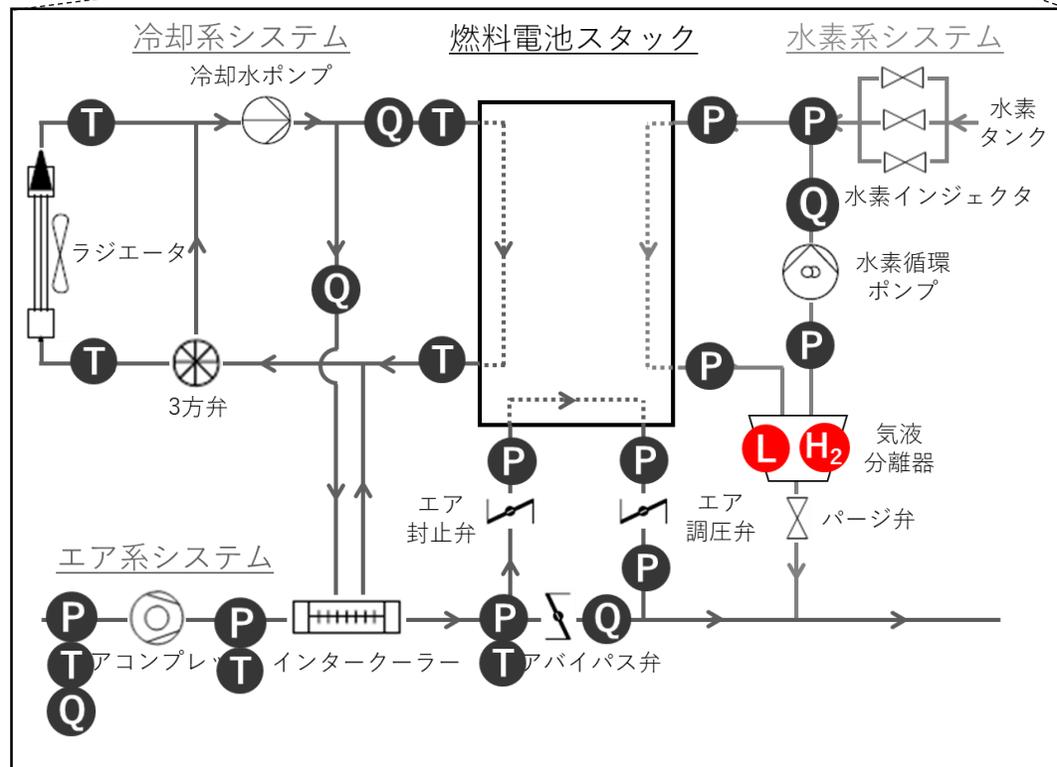
# (5) 精度検証

試作車 + 検証データ取得用センサ



システム動特性 (水素系)

FCスタック性能



市販システム開発段階で取得されたシステム動特性のデータを活用して精度検証  
 ユーザーはモデル検証の手間を省き、自社システム開発のためのモデル活用に専念できる

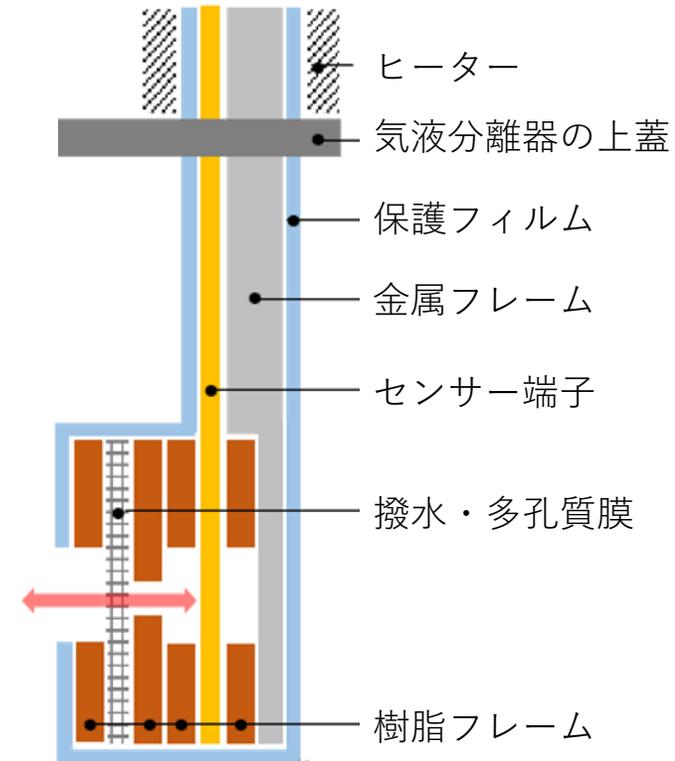
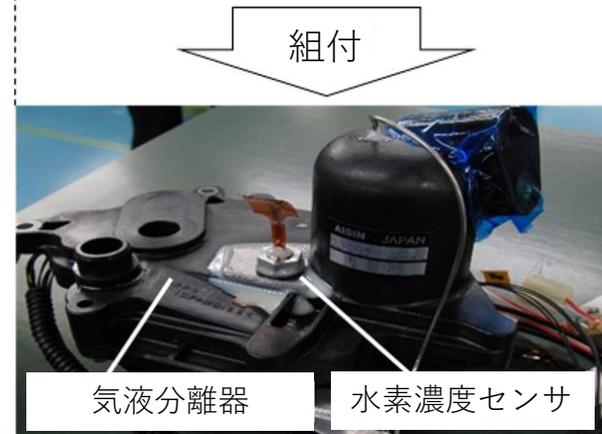
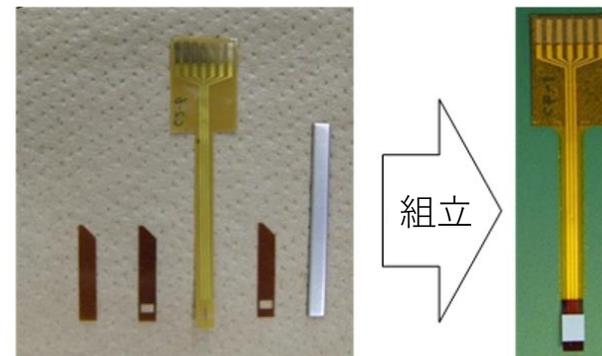
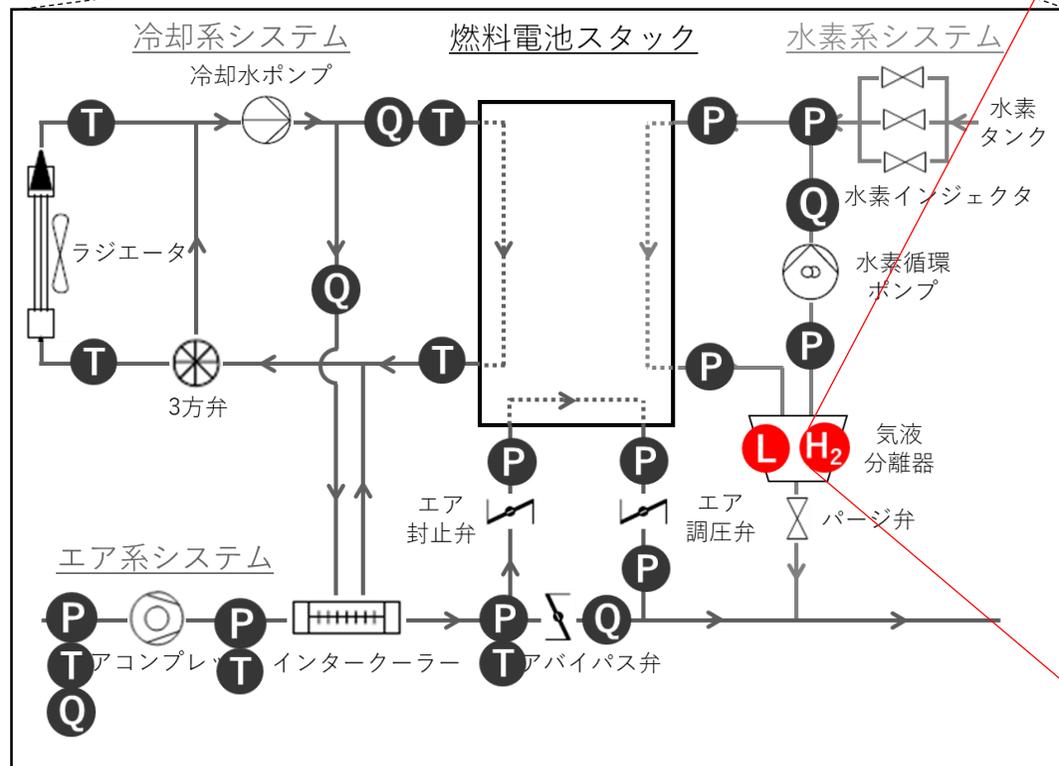
# (5) 精度検証

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

試作車 + 検証データ取得用センサ



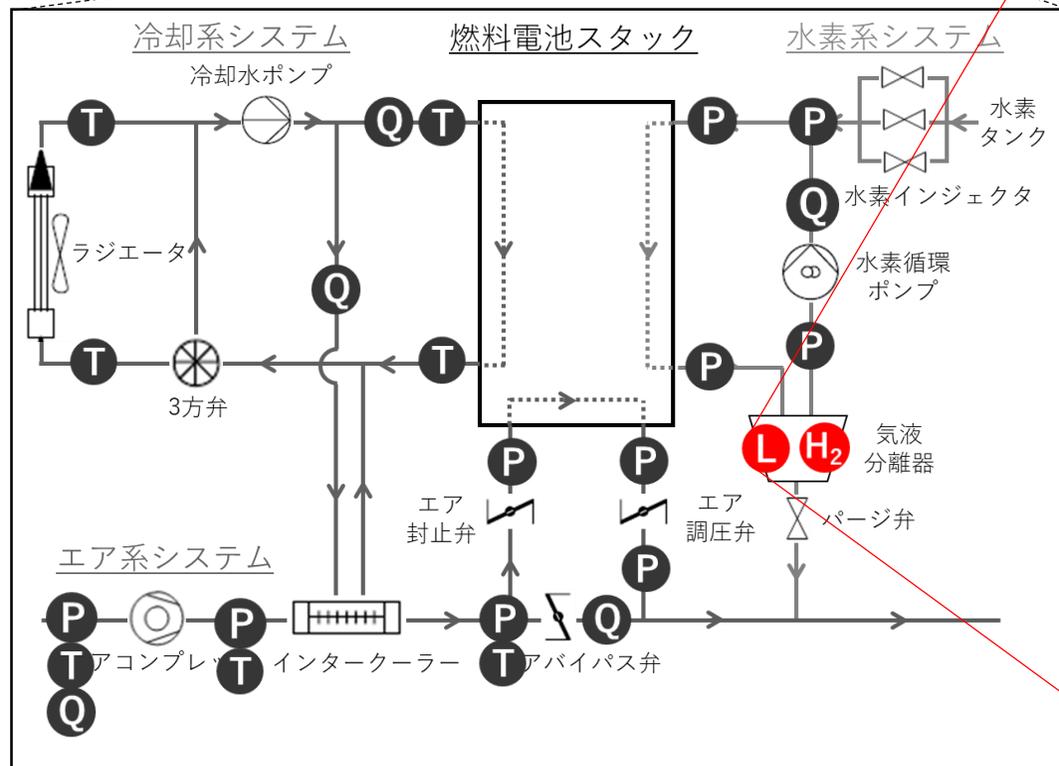
水素濃度センサー



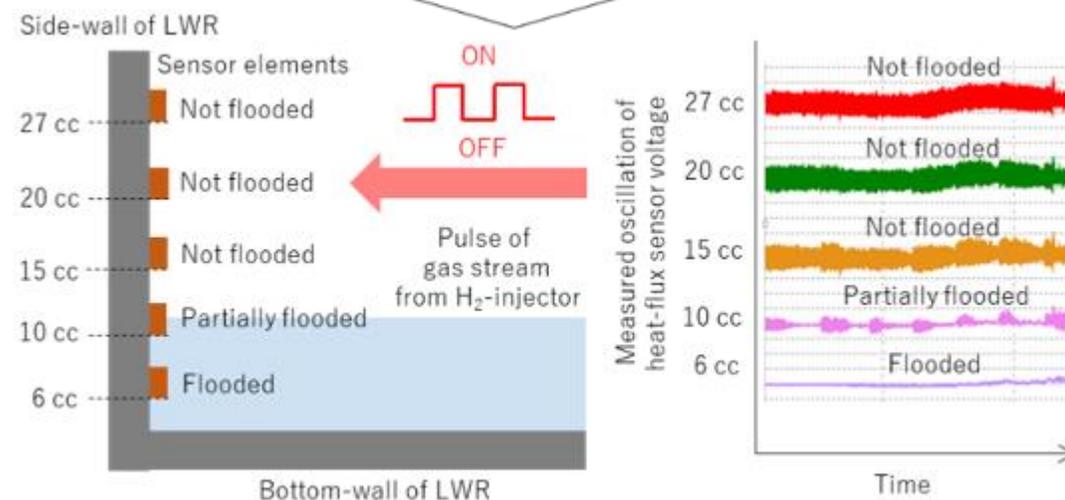
# (5) 精度検証

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

試作車 + 検証データ取得用センサ



水位センサー

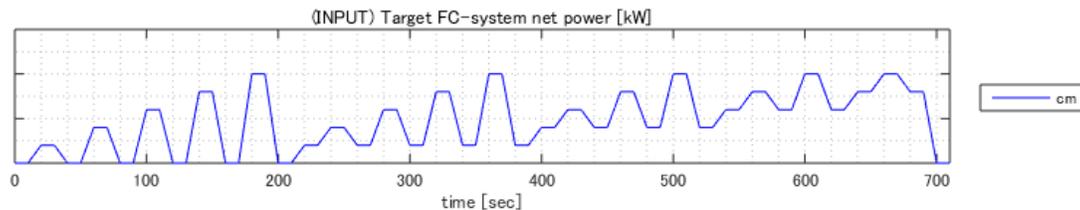


# アジェンダ

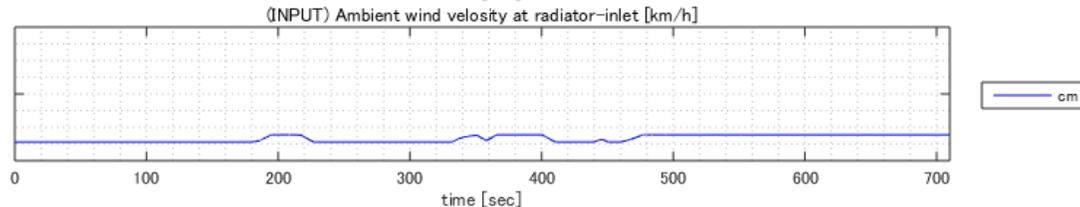
- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# (6) 解析事例：システム全体の動特性

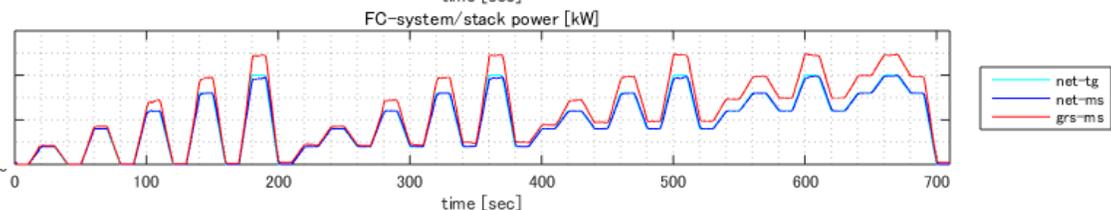
(入力)  
FCシステム  
ネットパワー  
指令値



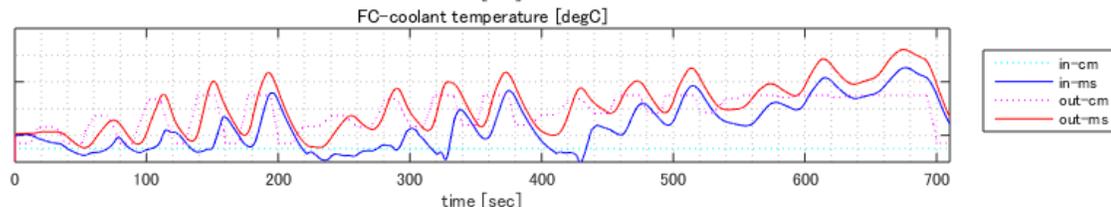
(入力)  
ラジエータ  
前風速



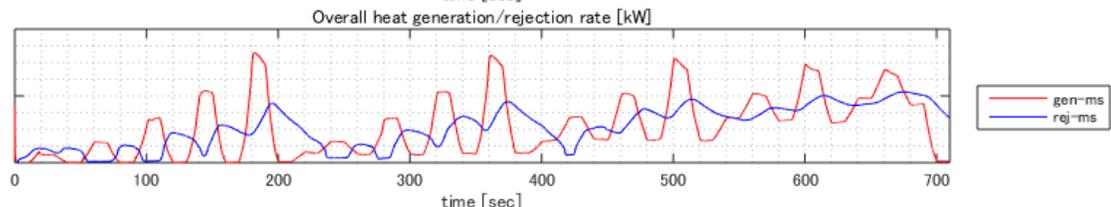
FCシステム・  
スタックパワー



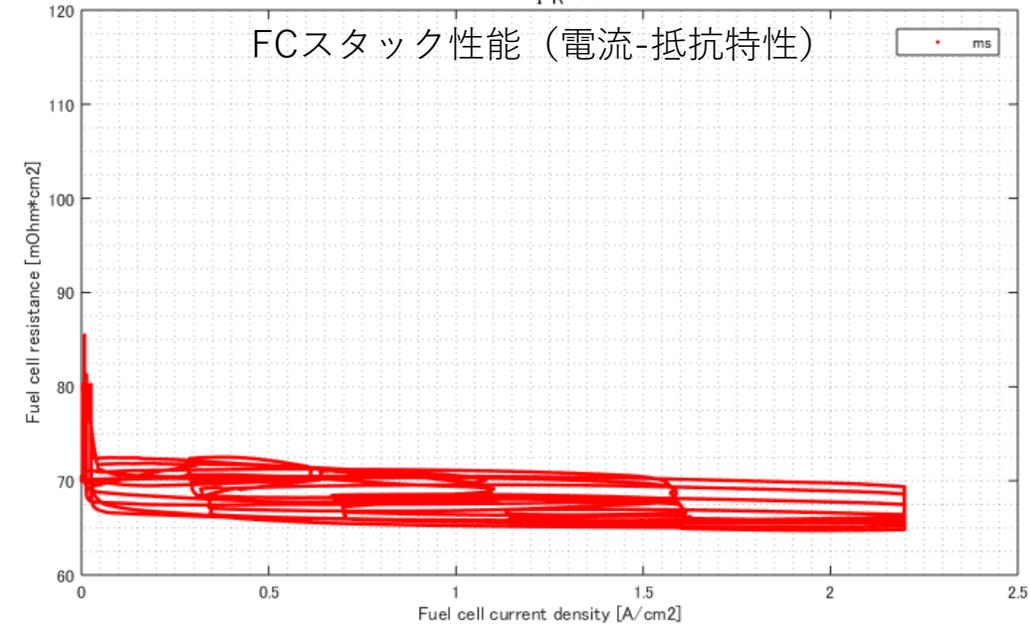
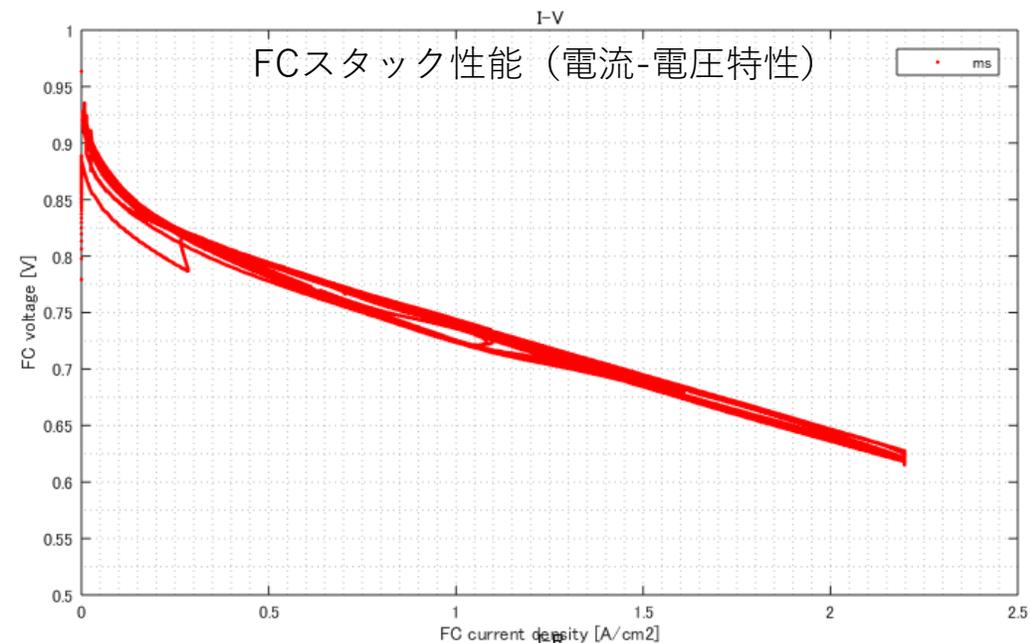
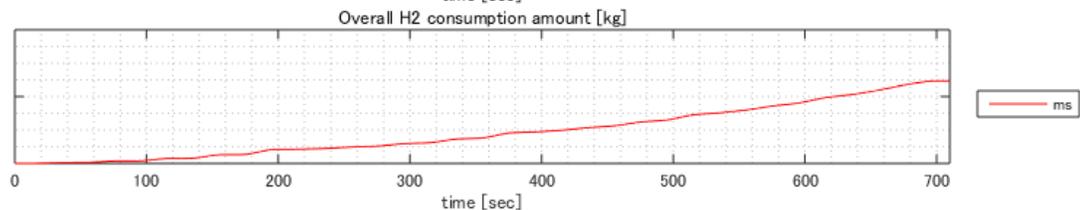
FCスタック  
入口/出口温度



FCシステム  
発熱/放熱量

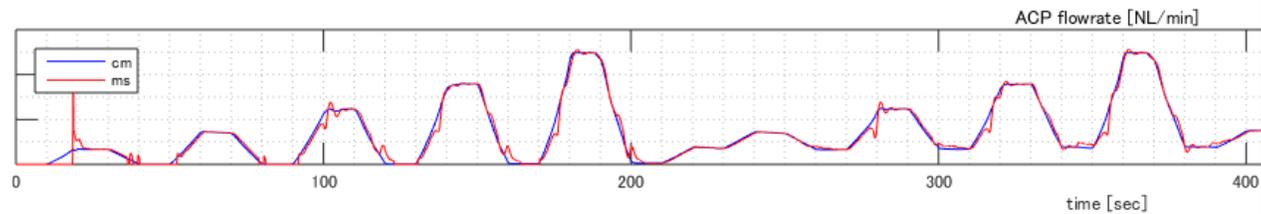


水素消費量  
(燃費)

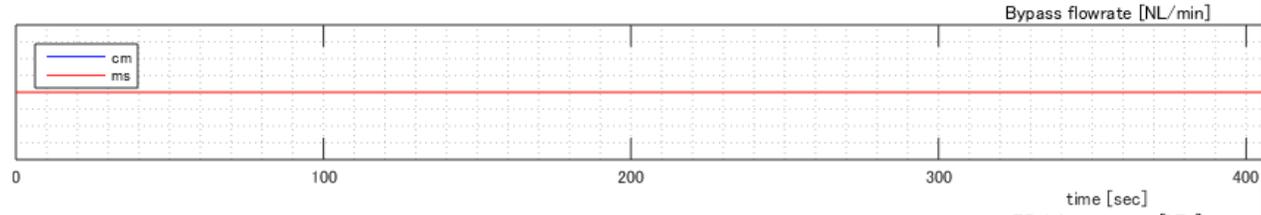


# (6) 解析事例：エア系システムの動特性

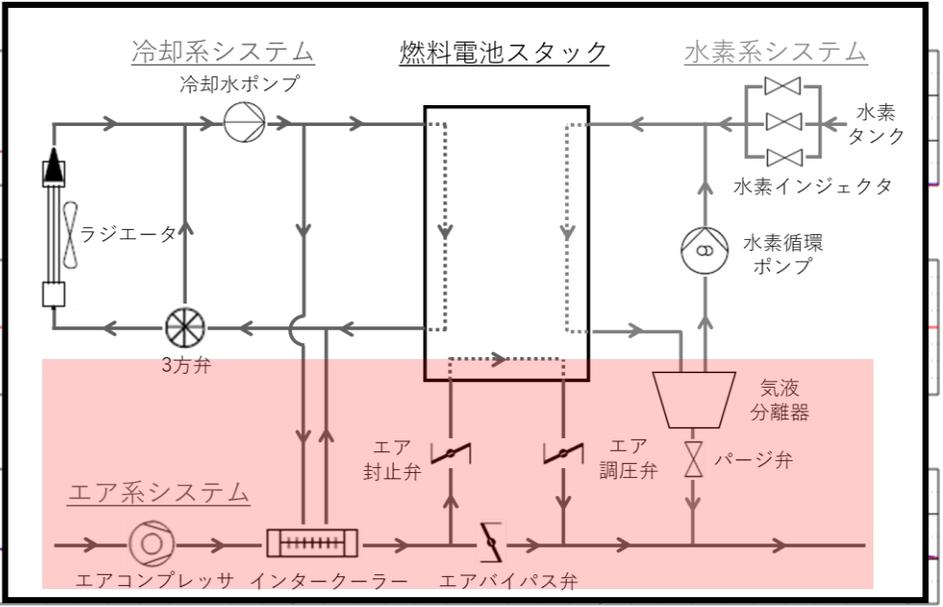
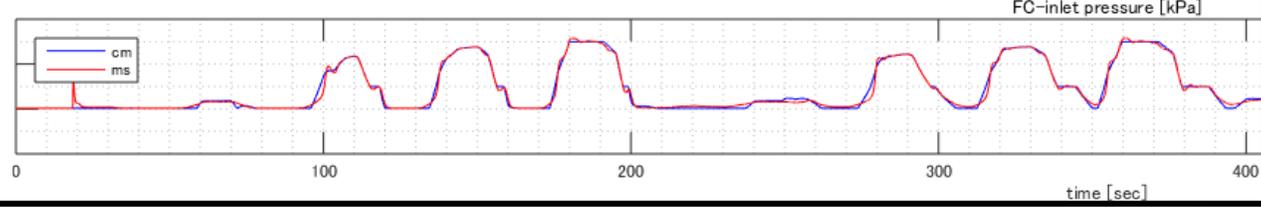
FCスタック  
エア流量  
(指令/実行)



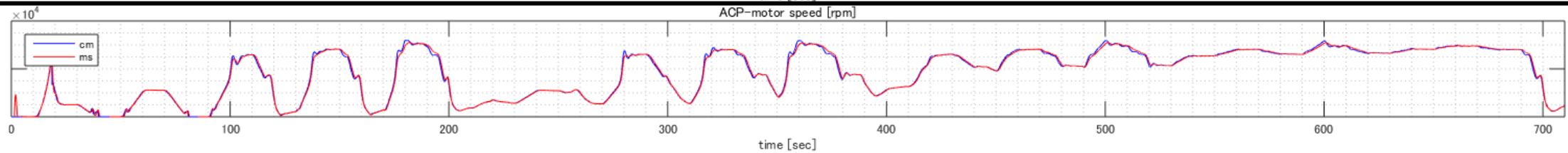
バイパス  
エア流量  
(指令/実行)



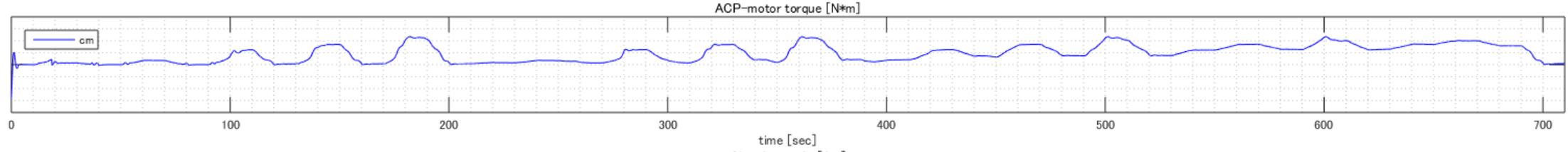
FCスタック  
入口圧力  
(指令/実行)



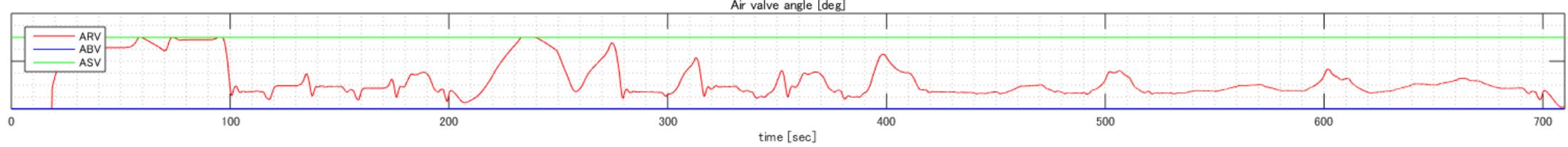
エアコンプレッサ  
回転数  
(指令・実行)



エアコンプレッサ  
モータートルク

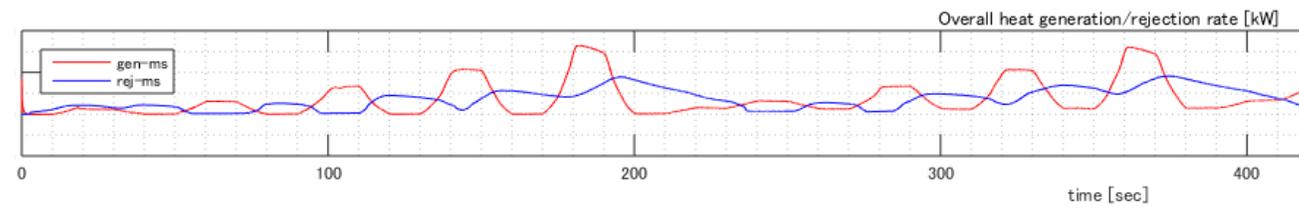


バルブ開度

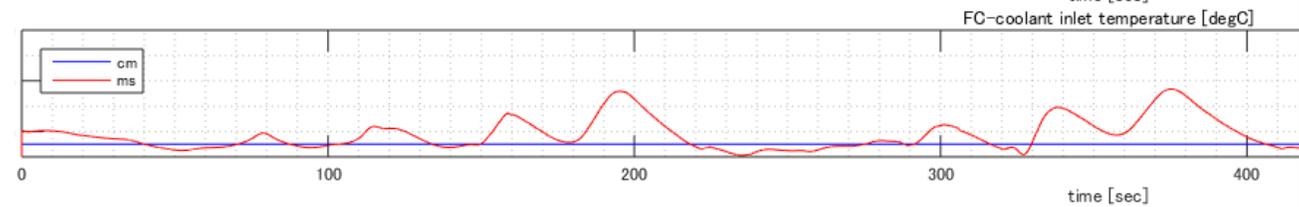


# (6) 解析事例：冷却系システムの動特性

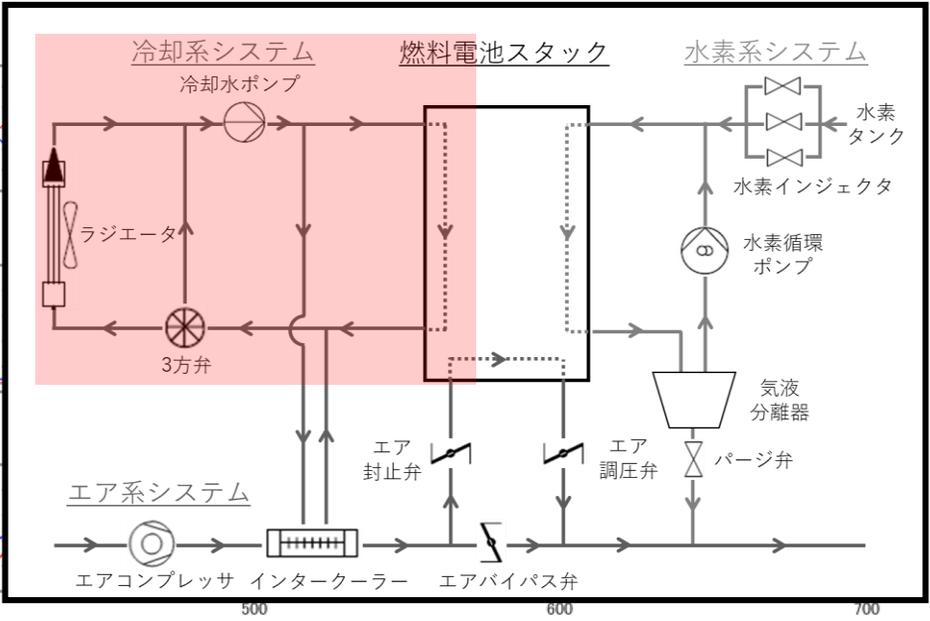
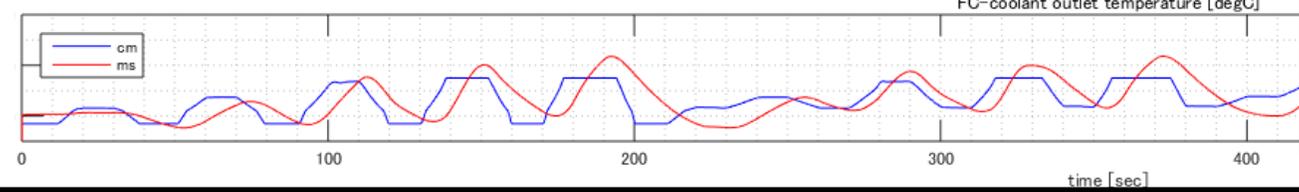
FCシステム  
発熱/放熱量



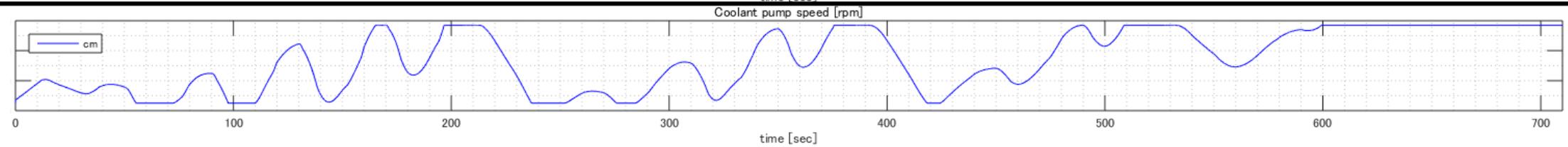
FCスタック  
入口水温  
(指令/実行)



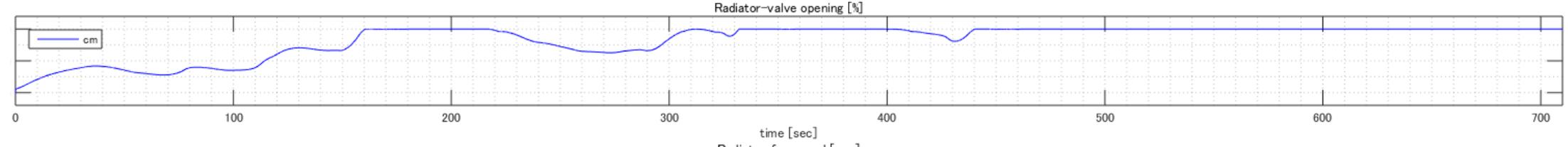
FCスタック  
出口水温  
(指令/実行)



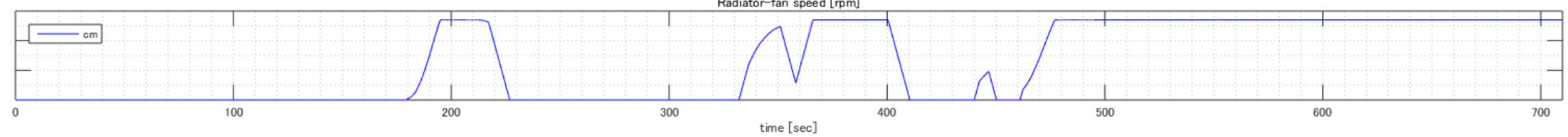
冷却水  
ポンプ回転数



3方弁開度

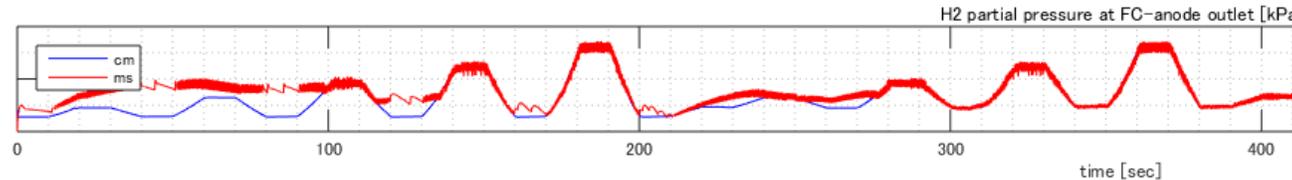


ラジエータ  
ファン回転数

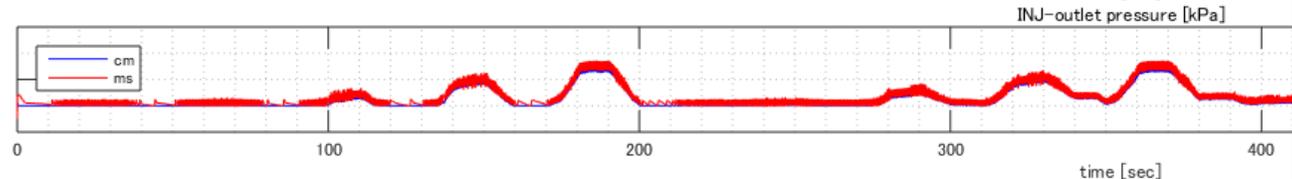


# (6) 解析事例：水素系システムの動特性

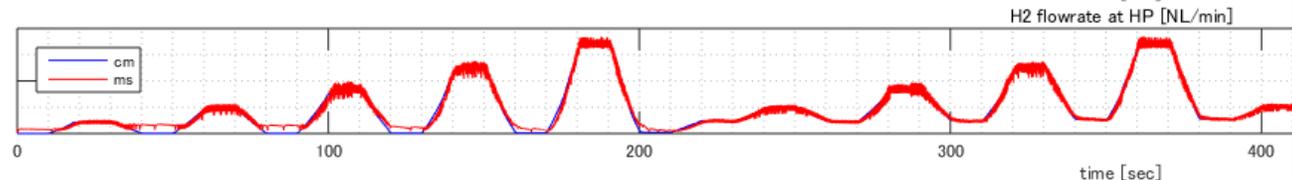
FCスタック  
出口水素分圧  
(指令/実行)



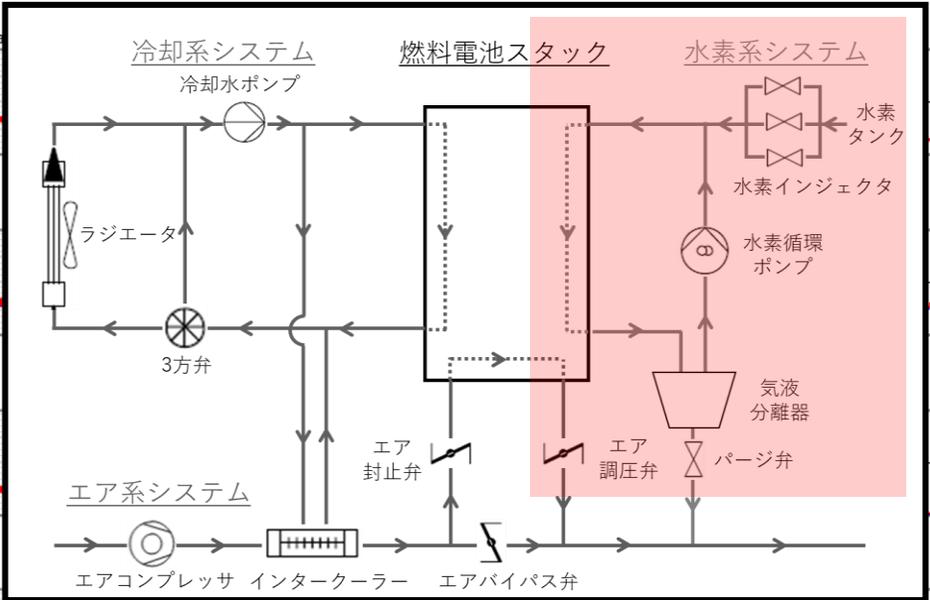
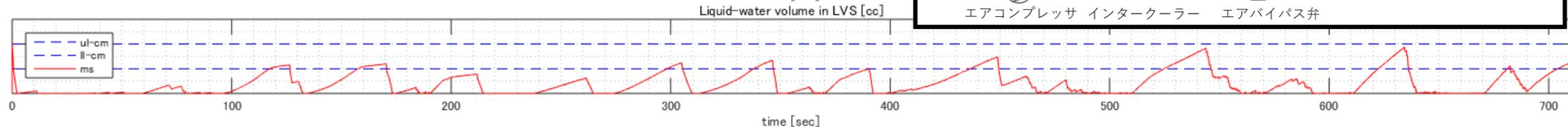
インジェクタ  
出口圧力  
(指令/実行)



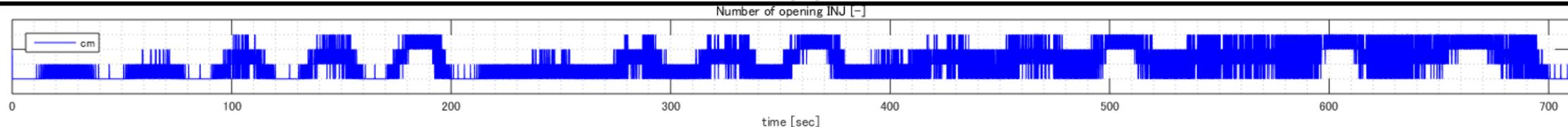
水素循環  
ポンプ流量  
(指令/実行)



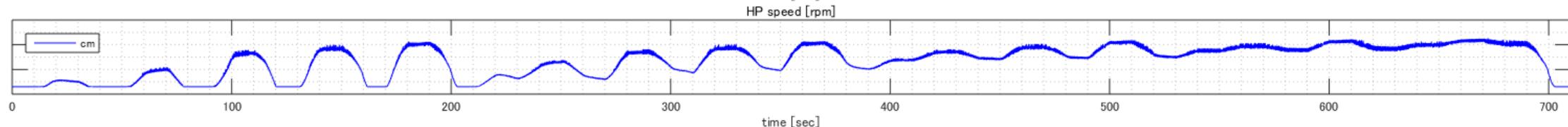
気液分離器  
水位



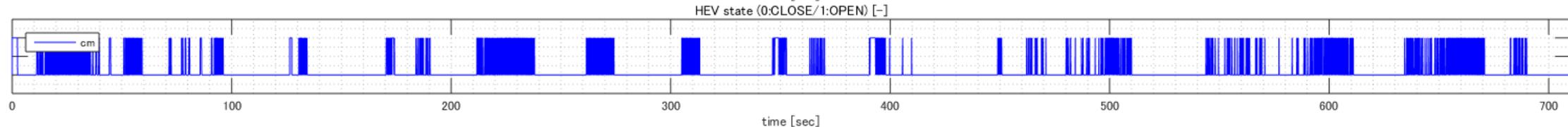
インジェクタ  
噴射本数



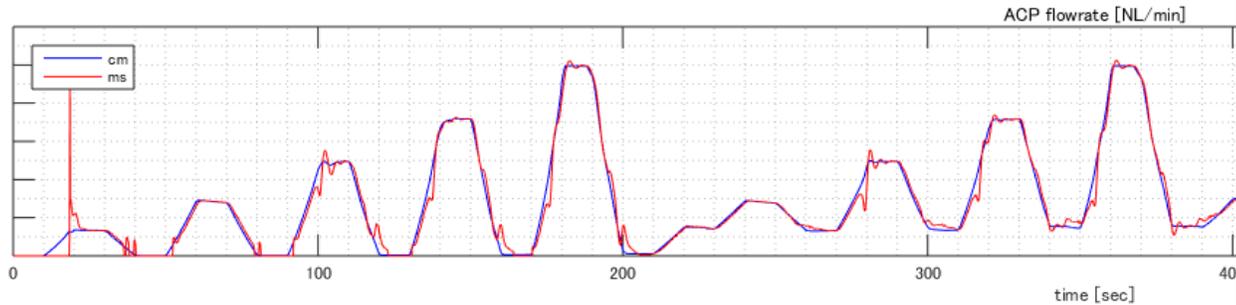
水素循環  
ポンプ回転数



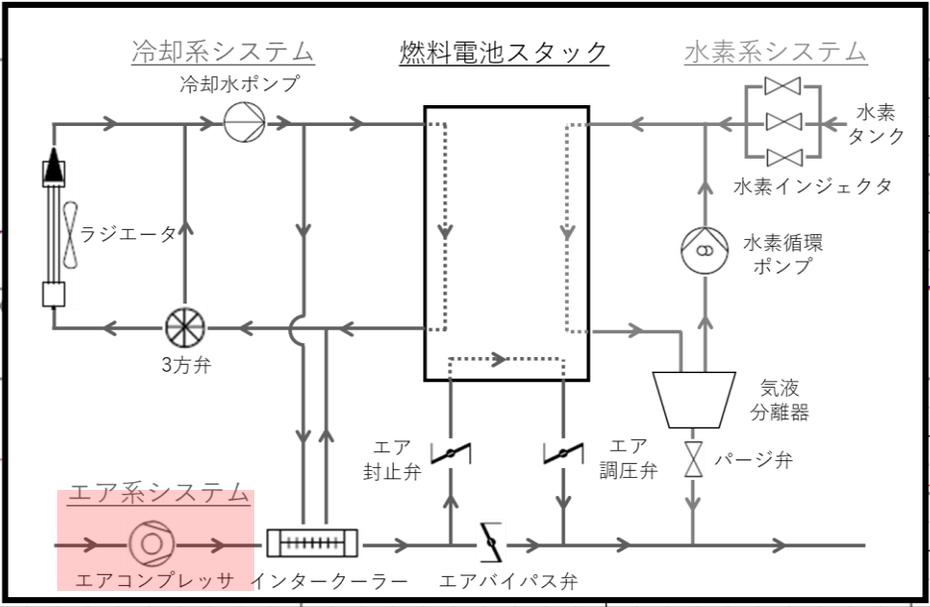
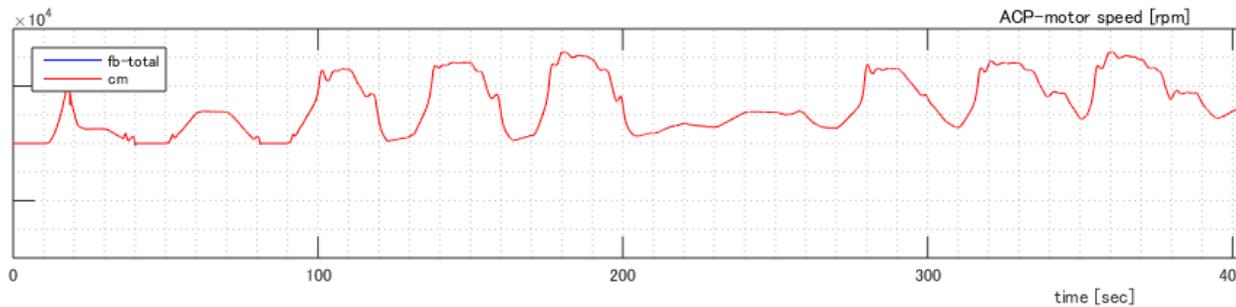
パーズ弁  
開閉



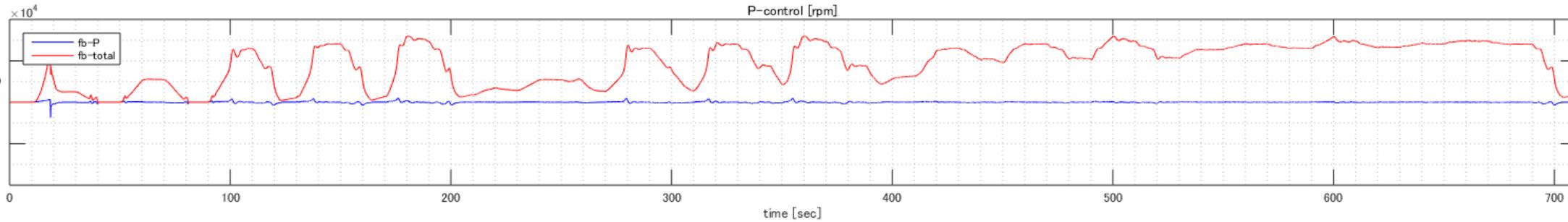
流量  
(指令/実行)



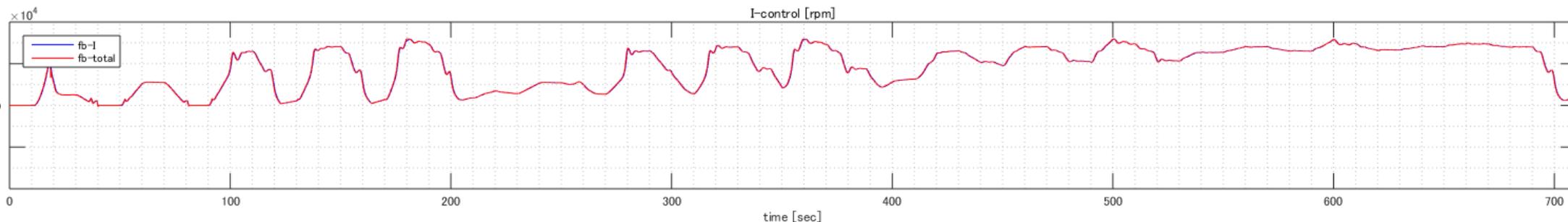
エア流量  
(指令/実行)



最終指令値に対する  
フィードバック  
P制御の効果



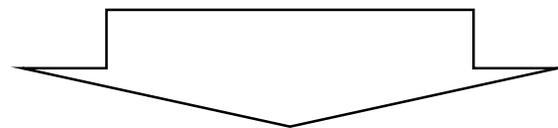
最終指令値に対する  
I制御の効果



# (6) 解析事例：演算速度

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

実時間に対して  
約50倍の加速倍率

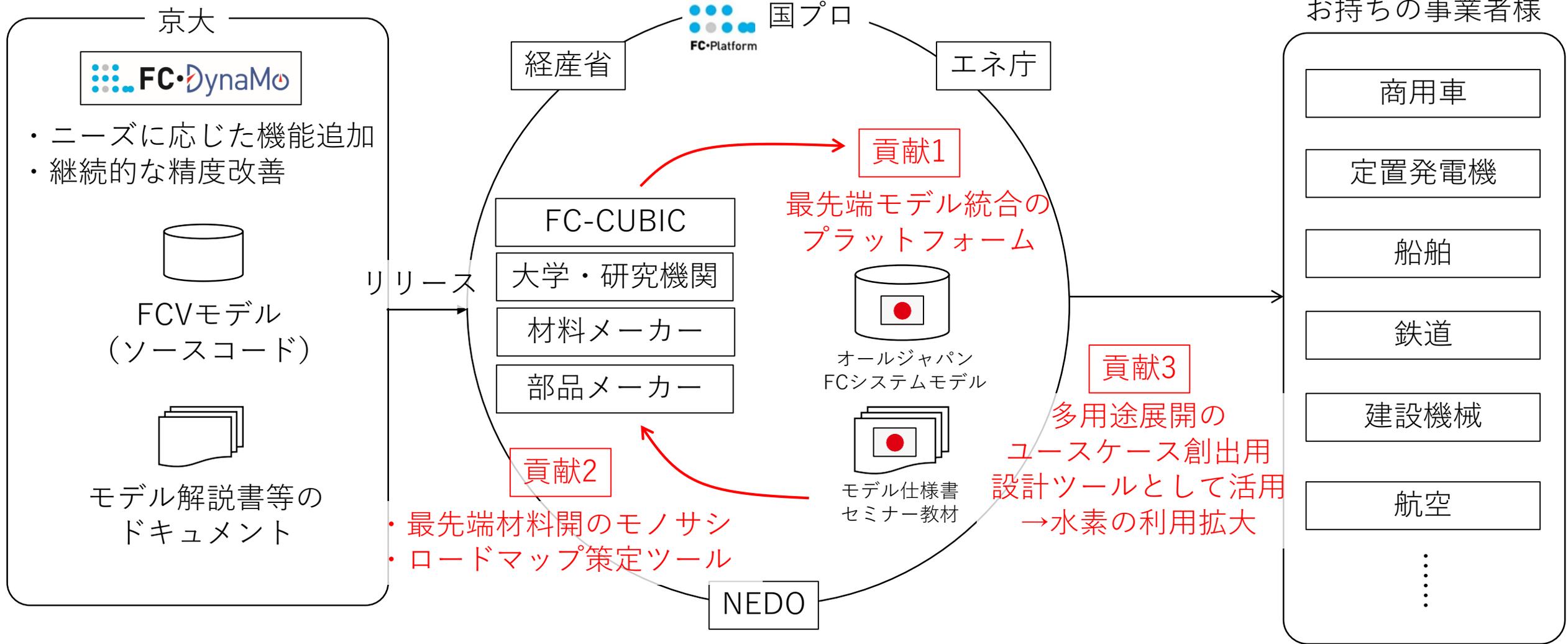
ニーズの大きい年単位の長時間耐久シミュレーションへの適用性を確認

# アジェンダ

- (1) [背景] 燃料電池(FC)システム
- (2) [目的] FCシステム開発プロセスにおける課題
- (3) 統合FCシステムシミュレーター  FC-DynaMo
- (4-1) プラントモデル開発
  - ・ FCシステム内の物理モデル化指針
  - ・ 物理モデルのMATLAB<sup>®</sup> / Simulink<sup>®</sup>への効果的な実装手法
- (4-2) コントローラーモデル開発
  - ・ FCシステム制御器の機能
  - ・ コントローラーモデル-プラントモデル結合
- (5) 精度検証
- (6) 解析事例
- (7) 今後の展望

# (7) 今後の展望：オールジャパンFC-MBD

水素利用に興味をお持ちの事業者様



複雑な作動原理を有する、FC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 「FC-DynaMo」を、今後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

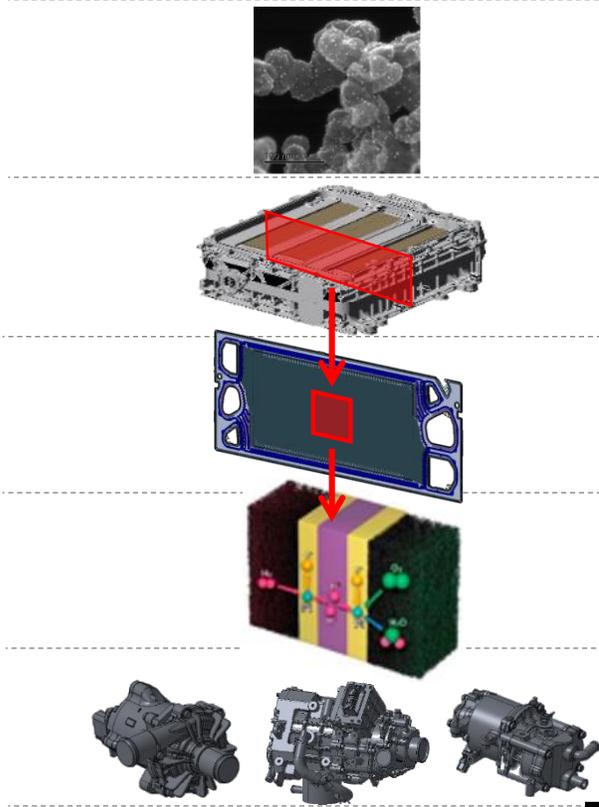
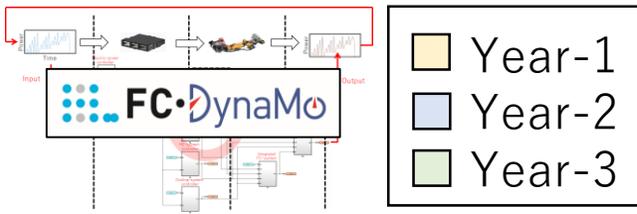
# (7) 今後の展望：モデル機能拡張

## シミュレータ構成ブレイクダウン

ハードウェア



制御器



GUI									
FCスタック (劣化)				FCスタック制御器 (劣化回避)					
Pt	CB	追加 PEM 化学劣化	PEM 機械劣化	Pt	CB	PEM 化学劣化	PEM 機械劣化		
追加FCスタックH/W (1+1+1D - セル積層)				FCスタック制御器					
物質輸送		電気化学							
FCスタックH/W (1+1D - セル面内)									
物質輸送		電気化学							
FCスタックH/W (1D-セル断面)				動力		燃費		冷却	
物質輸送		電気化学							
FCシステムH/W				FCシステム制御器					
エア	水素	冷却	電力	エア	水素	冷却	電力		

プログラム言語 

3年計画のロードマップを立案：継続的な検証を通じた精度の磨き込みと併せて、FCスタック内の分布・年オーダーでの作動後のFC材料（触媒等）の劣化が予測可能なモデルを追加する

## まとめ

- ・ 開発費・期間の負担が、FC普及の大きな障害要因となっており、そのソリューションとして、バーチャルFCシステムシミュレーター「FC-DynaMo」を開発した。
- ・ FC-DynaMoは、
  - ・ 高精度・高速演算を両立できる物理モデリング手法でシステム全体の動特性を記載
  - ・ 広範な用途、部品諸元、制御仕様を容易に実装できる「レゴブロック的」なプログラム構造
  - ・ 市販FCシステムで取得されたデータを活用した検証実績を特徴とする。
- ・ 今後、FC-DynaMoのFC・水素の利用拡大へ向けて活用しつつ、3年計画で産学でニーズの大きい機能のためのモデルを開発・追加していく。

## 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。多大なご支援に感謝申し上げます。