

# 車載バッテリーシステムをモデルベースで開発

MathWorks Japan

アプリケーションエンジニアリング部

# はじめに

## 本セッションの対象者

- **バッテリーのプラントモデル開発者、制御ロジックの開発者**  
(例: 高性能・高効率を実現する制御ロジックの開発)
- **MATLAB<sup>®</sup>, Simulink<sup>®</sup>に興味があり、どのようなことができるか知りたい方**

## 本セッションでお伝えしたいこと

- **モデルベースのユーザー適用事例**
- **基本的な開発ワークフロー**

# アジェンダ

- バッテリーシステムの開発効率化のユーザー事例
- バッテリーシステムのモデルベース開発の基本フロー
- 車両モデルを含むバッテリーおよび燃料電池のシステムシミュレーション適用例
- まとめ

# アジェンダ

- バッテリーシステムの開発効率化のユーザー事例
- バッテリーシステムのモデルベース開発の基本フロー
- 車両モデルを含むバッテリーおよび燃料電池のシステムシミュレーション適用例
- まとめ

# リチウムバッテリーセルの高詳細なモデル化

## Tarun Huria, Massimo Ceraolo, University of Pisa

- 熱の特性も含む詳細なリチウムバッテリーの等価回路モデルについて検討しました
  - <https://jp.mathworks.com/content/dam/mathworks/tag-team/Objects/i/71900-ieee-2012-high-fidelity-lithium-battery-model-with-thermal-effect.pdf>

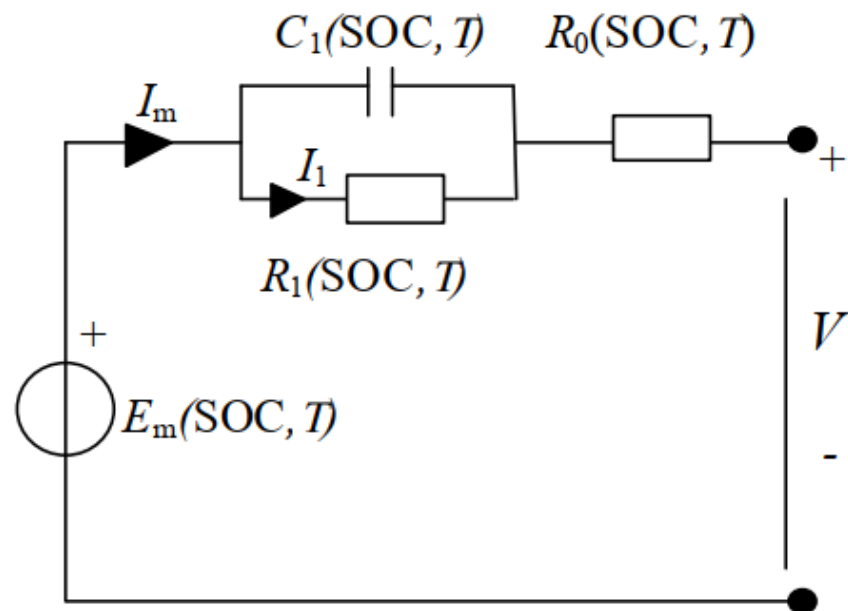


Figure 2: The model used for the paper, with  $n=1$ .

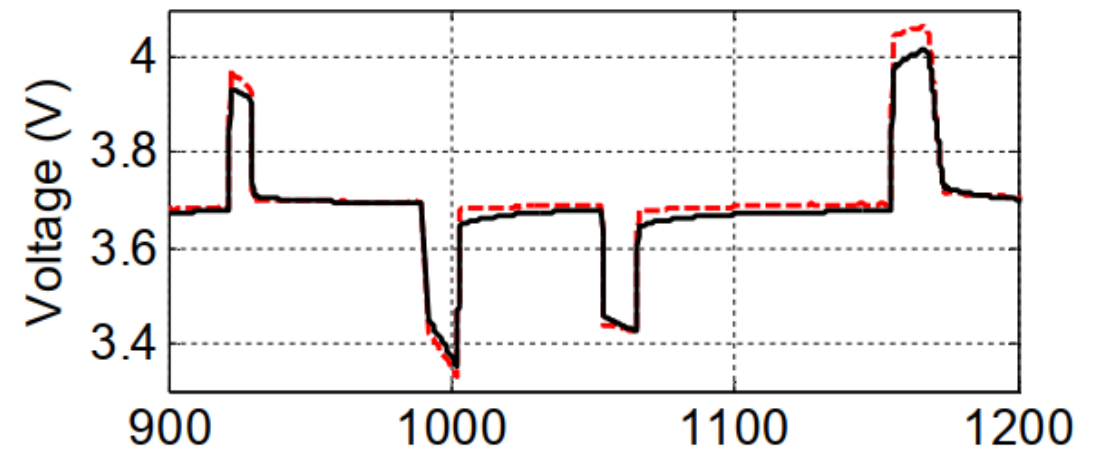


Figure 13. Voltage discrepancy at end of New European Drive Cycle.

# バッテリーセルの等価回路モデルの構造

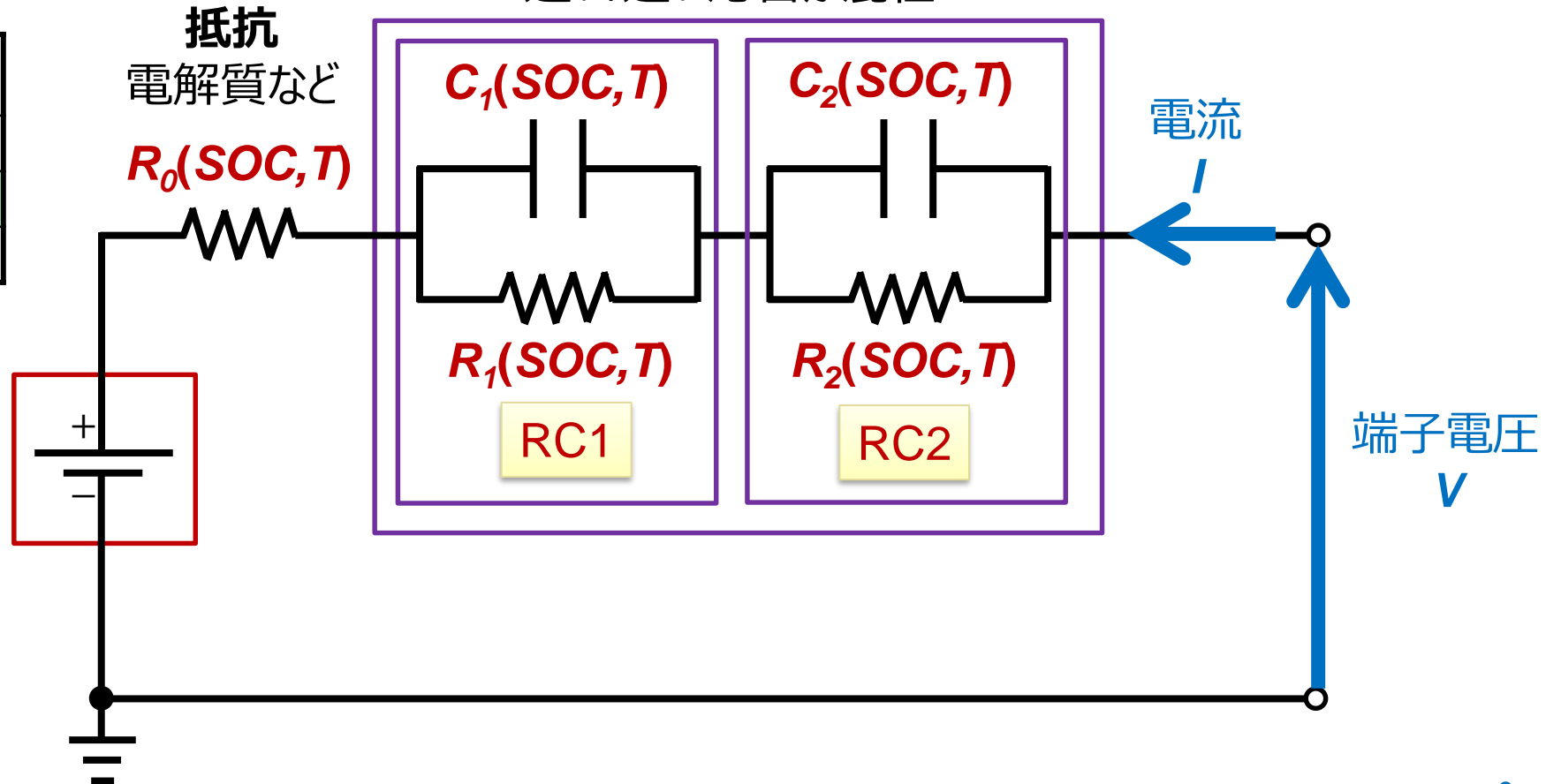
- 各回路パラメータは、温度・SOCに応じて変わる
- バッテリーの材料等で、RC並列回路の数が変わる

インピーダンス  
電荷移動/拡散に伴う  
速い/遅い応答が混在

過渡応答に寄与

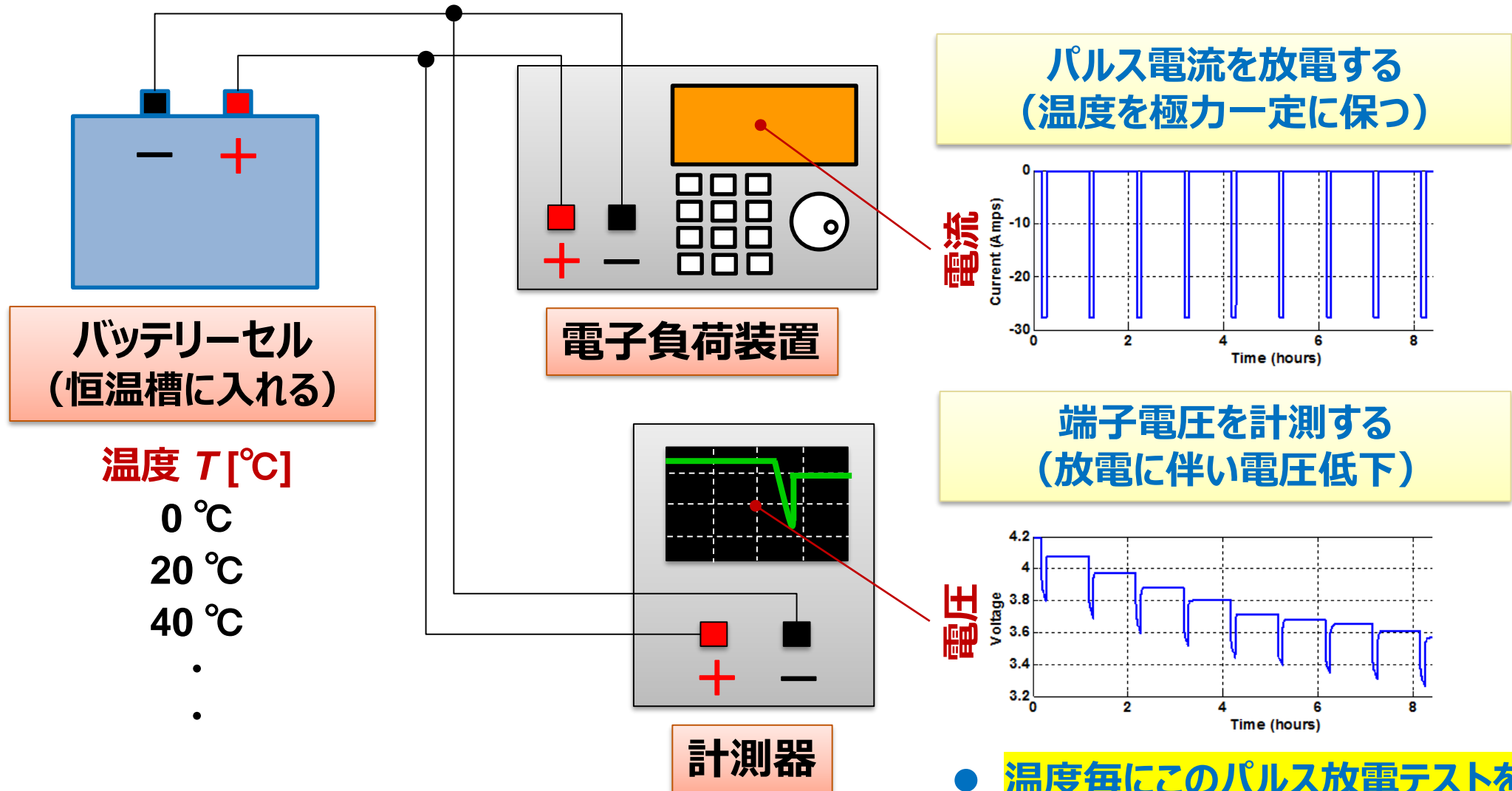
$E_m$	SOC 1	SOC 0.9	SOC 0.8	...	SOC 0
5°C	4.20 V	4.10 V	4.05 V	...	3.50 V
20°C	4.18 V	4.07 V	4.02 V	...	3.49 V
40°C	4.15 V	4.02 V	3.97 V	...	3.43 V

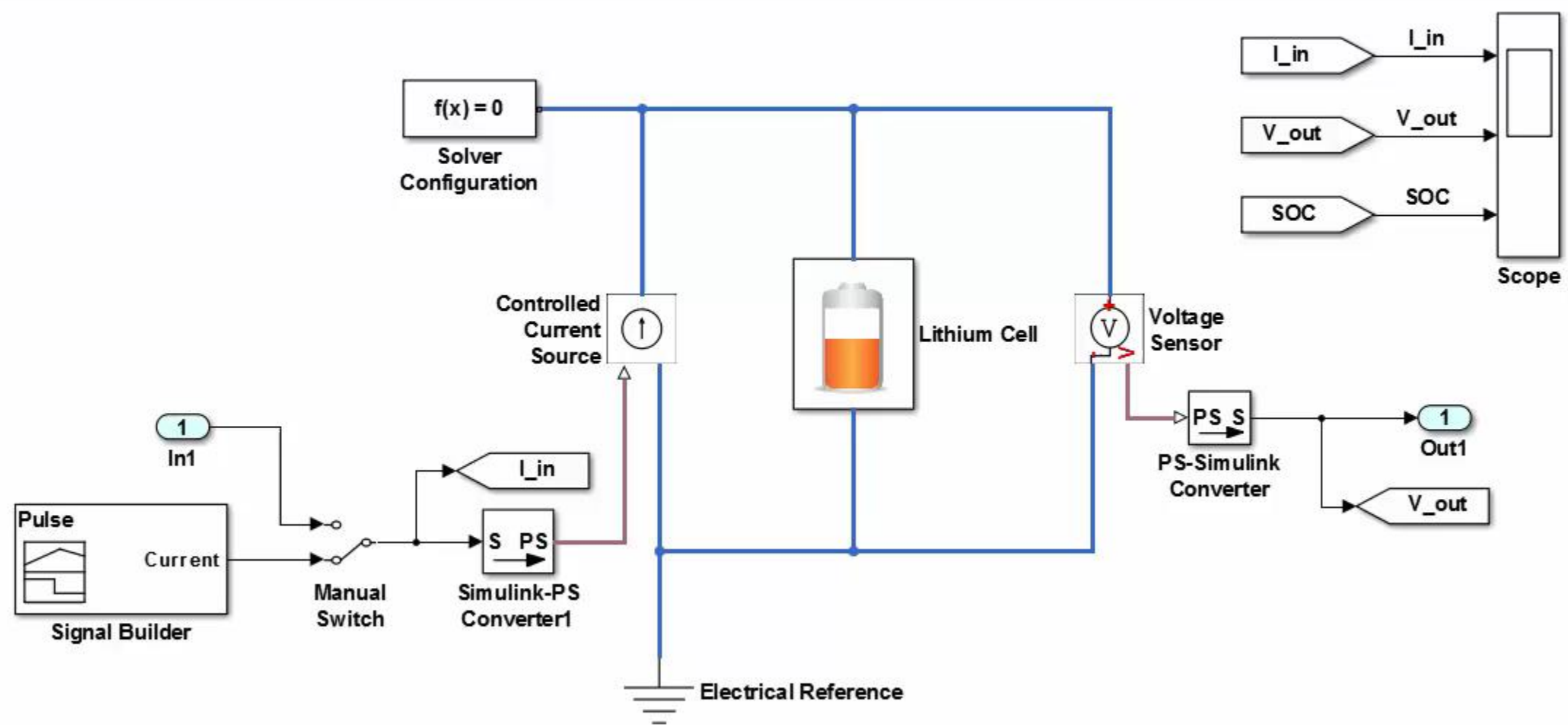
開回路電圧  
OCV  
 $E_m(SOC, T)$



# 等価回路モデルのパラメータ同定に必要な実験

- バッテリーセルを恒温槽で等温に保ち、パルス電流を放電したときの端子電圧を計測



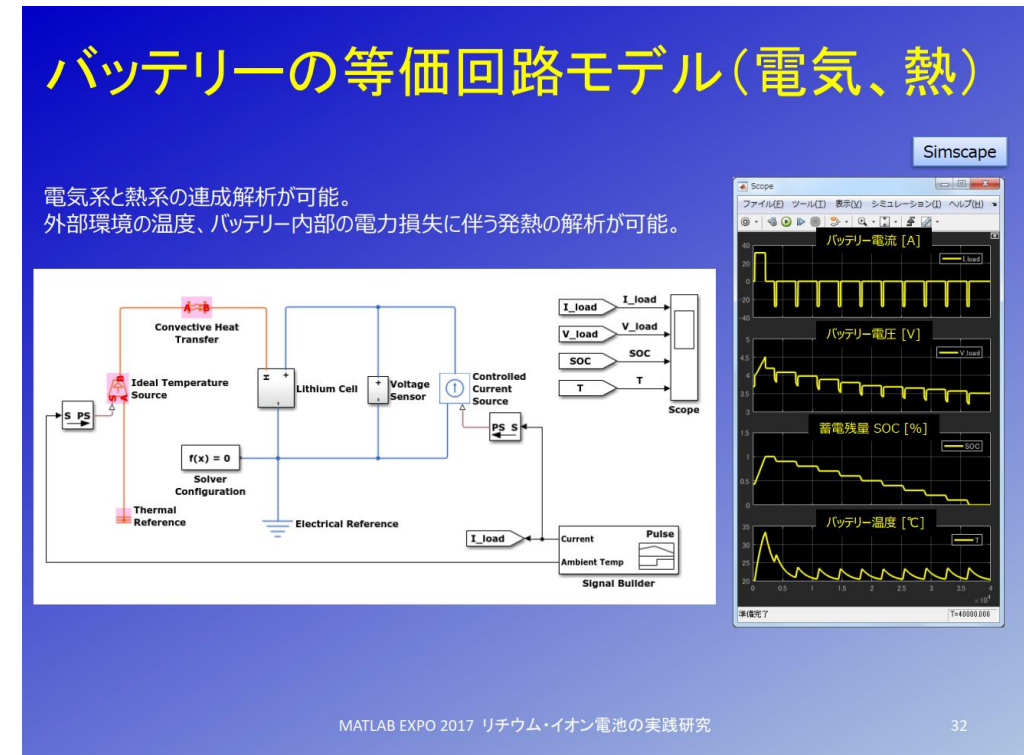
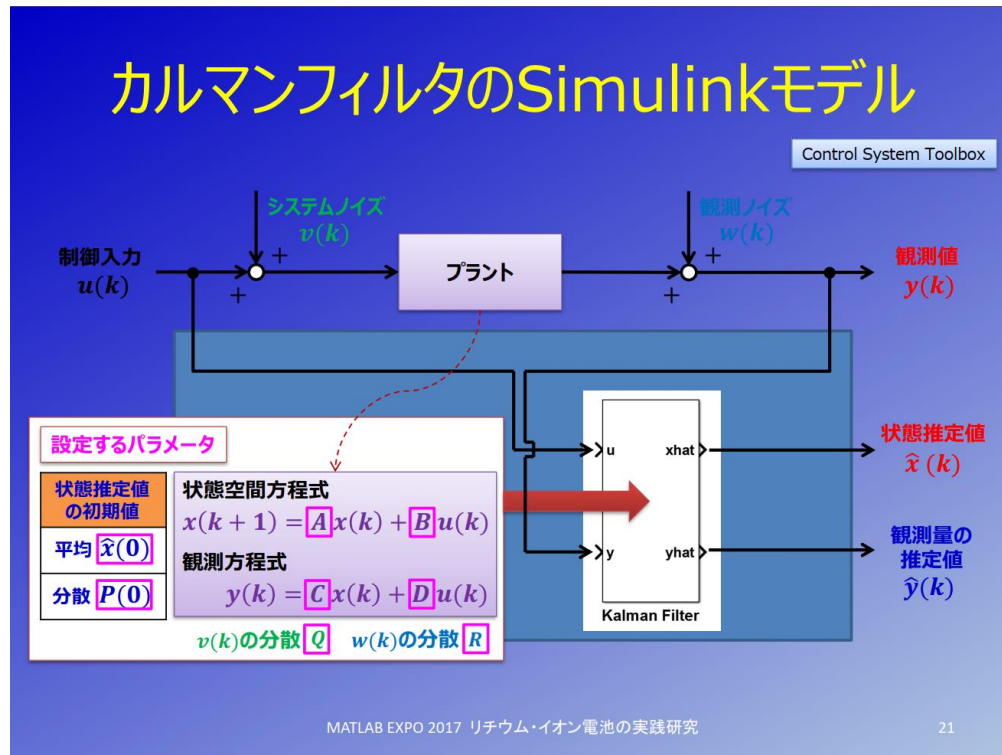




# MATLAB®を用いたリチウム・イオン電池の実践研究

## 立命館大学 福井正博 教授

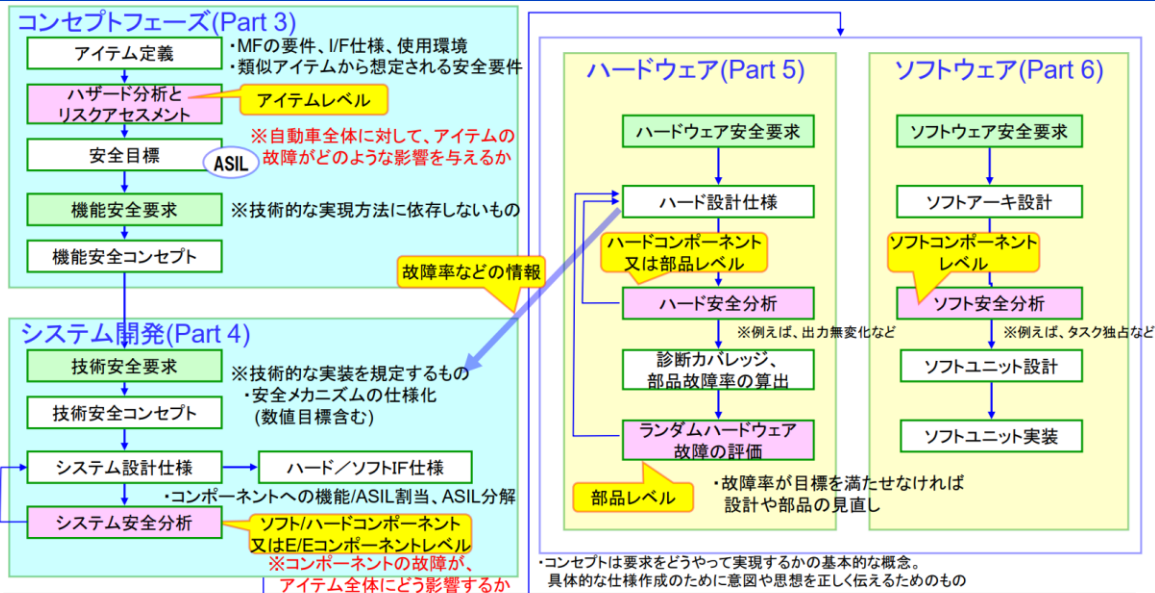
- バッテリーのプラントモデリング、SOC推定、劣化予測をMATLAB, Simulinkを用いて設計・実装しました
  - <https://www.matlabexpo.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/images/events/matlabexpo/jp/2017/e3-ritsumeikan-battery-modeling.pdf>



# バッテリー充放電コントローラの機能安全対応事例 パナソニックアドバンステクノロジー株式会社 堀江様

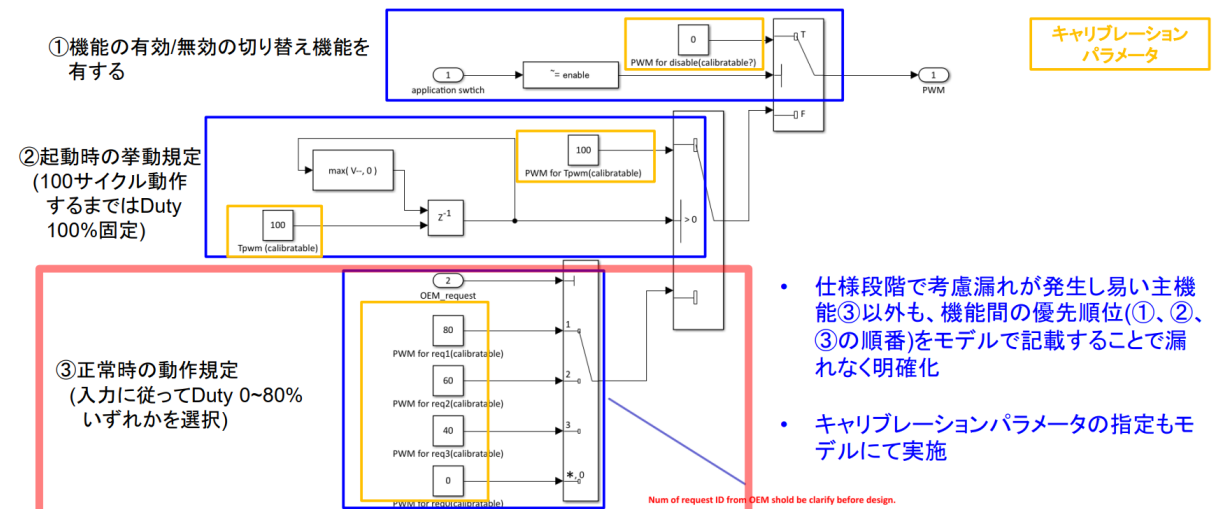
- コントローラの仕様を明確化するための共通言語として、Simulinkモデルを活用し、業務効率が向上しました
  - <https://www.matlabexpo.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/images/events/matlabexpo/jp/2018/e1-panasonic-mbd.pdf>

## 自動車向け機能安全(ISO26262)対応開発における各フェーズの主成果物



## カーメーカー様との共同作業における共通言語としての活用例①

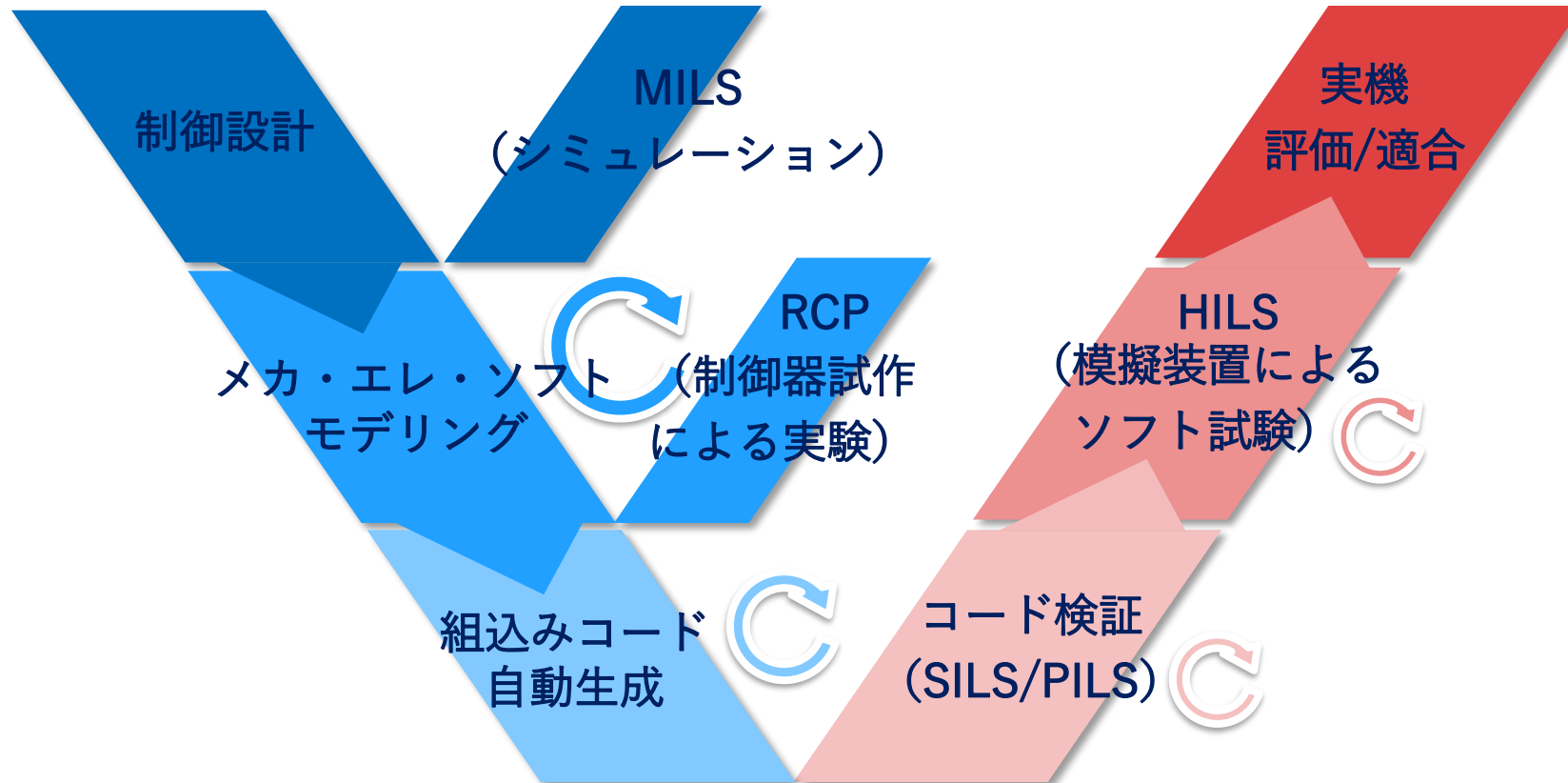
- 電源系冷却用電磁バルブの制御モデル  
基本的な機能要求は指定バルブ開度に従った制御だが、ターゲットの特性上最初一定時間はDuty100%固定が必要



## アジェンダ

- バッテリーシステムの開発効率化のユーザー事例
- バッテリーシステムのモデルベース開発の基本フロー
- 車両モデルを含むバッテリーおよび燃料電池のシステムシミュレーション適用例
- まとめ

# MathWorksが提案するモデルベースデザイン

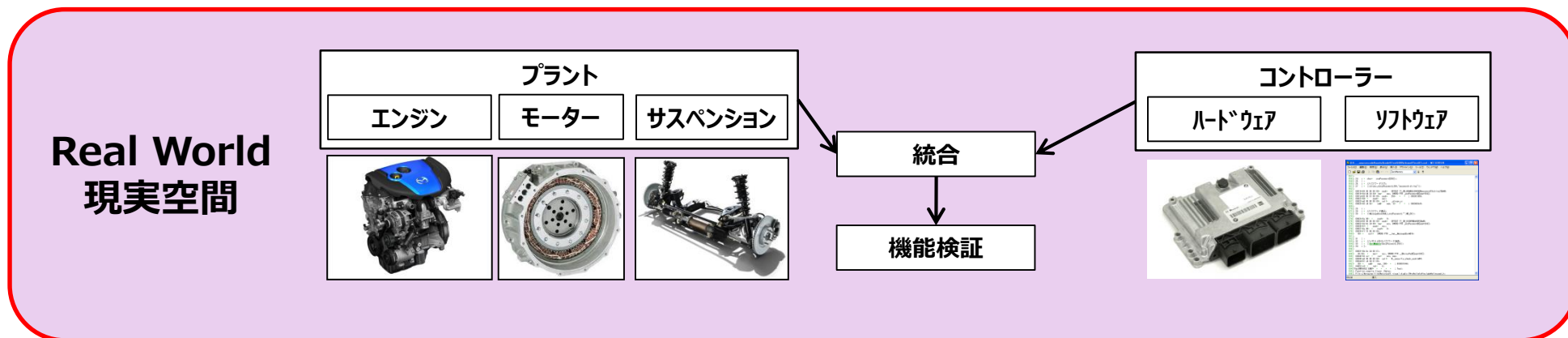


MILS: Model In the Loop Simulation

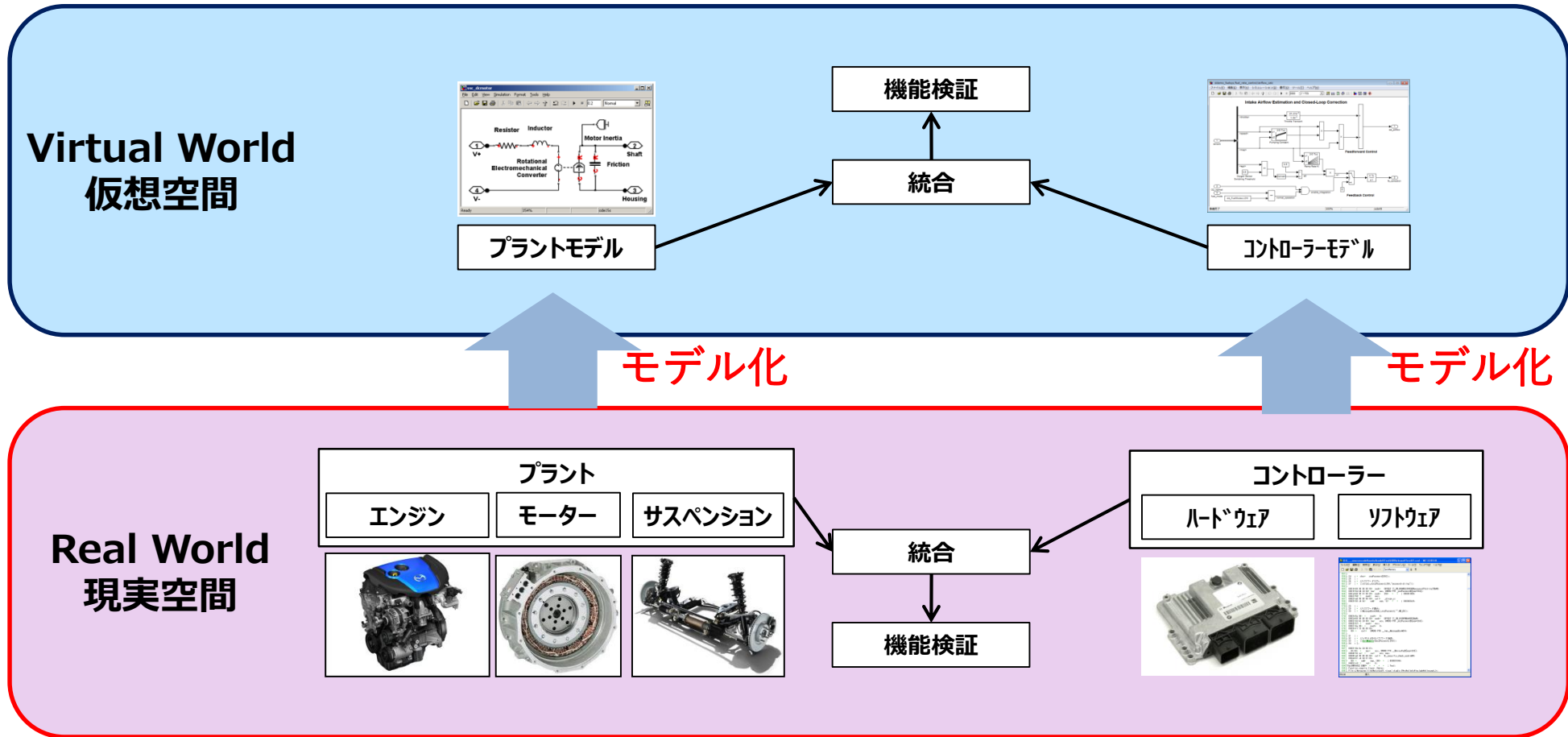
SILS: Software In the Loop Simulation  
PILS: Processor In the Loop Simulation

RCP: Rapid Control Prototyping  
HILS: Hardware In the Loop Simulation

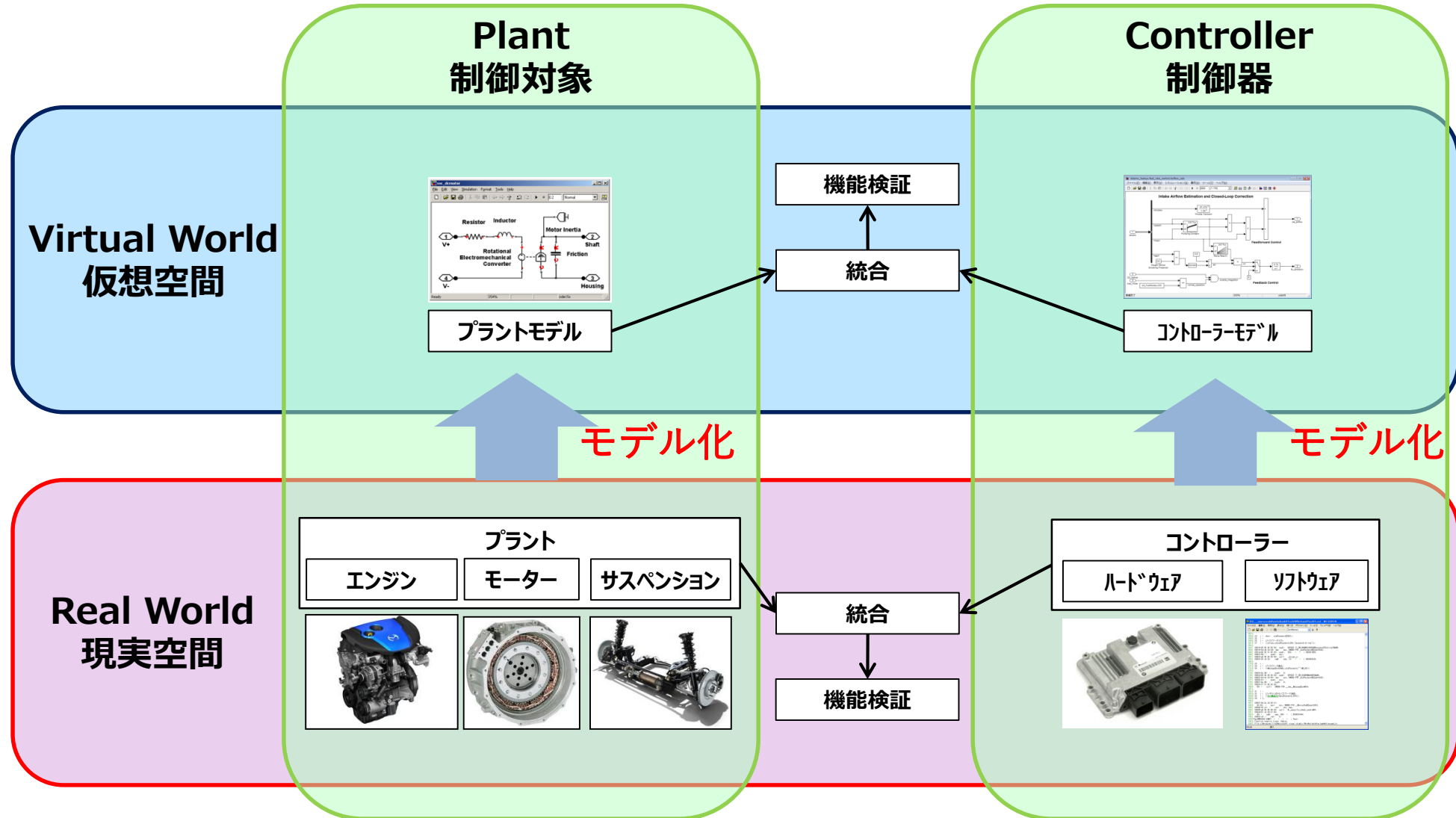
# Model-Based Designとは？



# Model-Based Designとは？



# Model-Based Designとは？



# MathWorksが提案するモデルベースデザイン



MILS: Model In the Loop Simulation

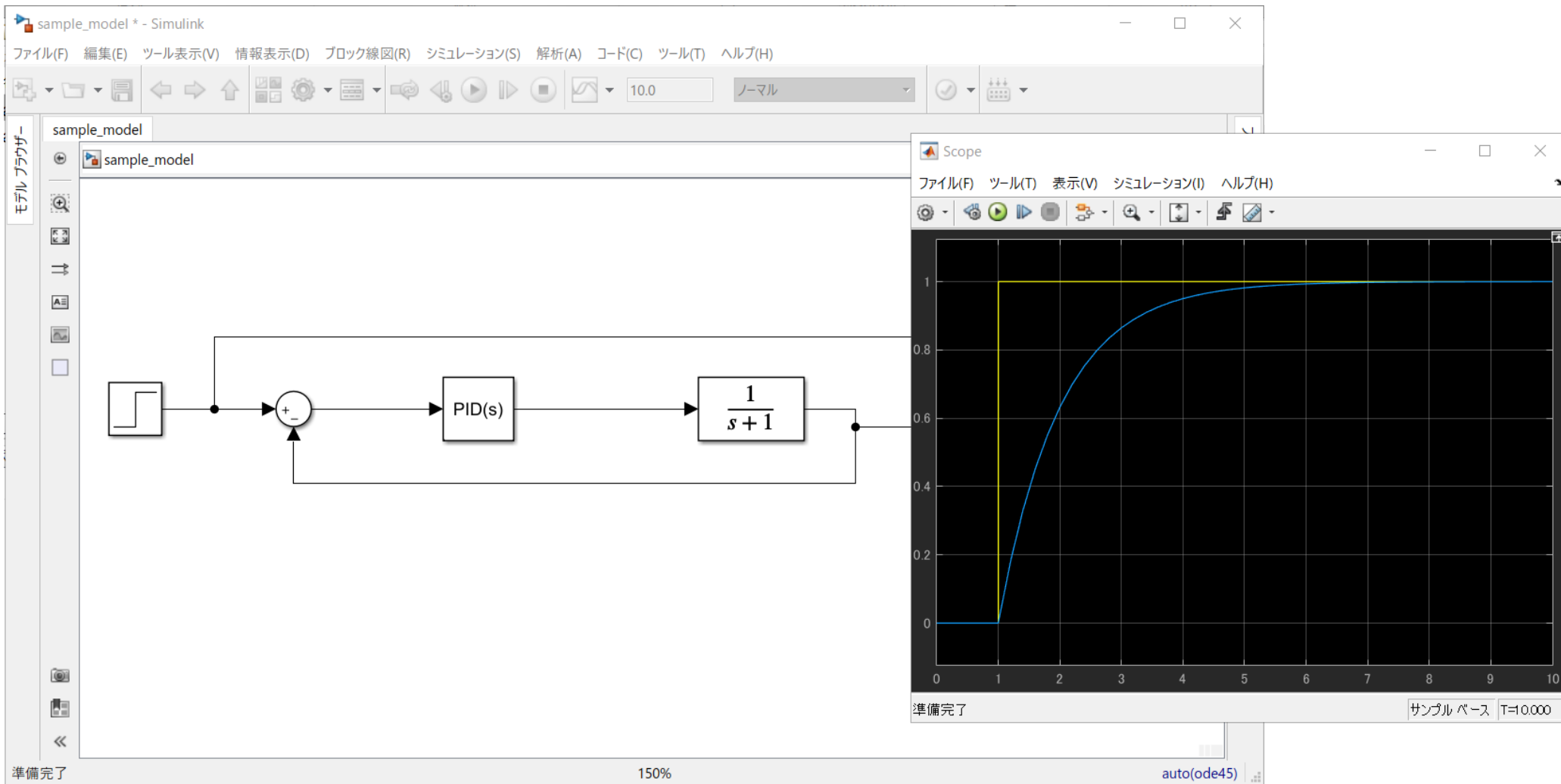
SILS: Software In the Loop Simulation  
 PILS: Processor In the Loop Simulation

RCP: Rapid Control Prototyping  
 HILS: Hardware In the Loop Simulation

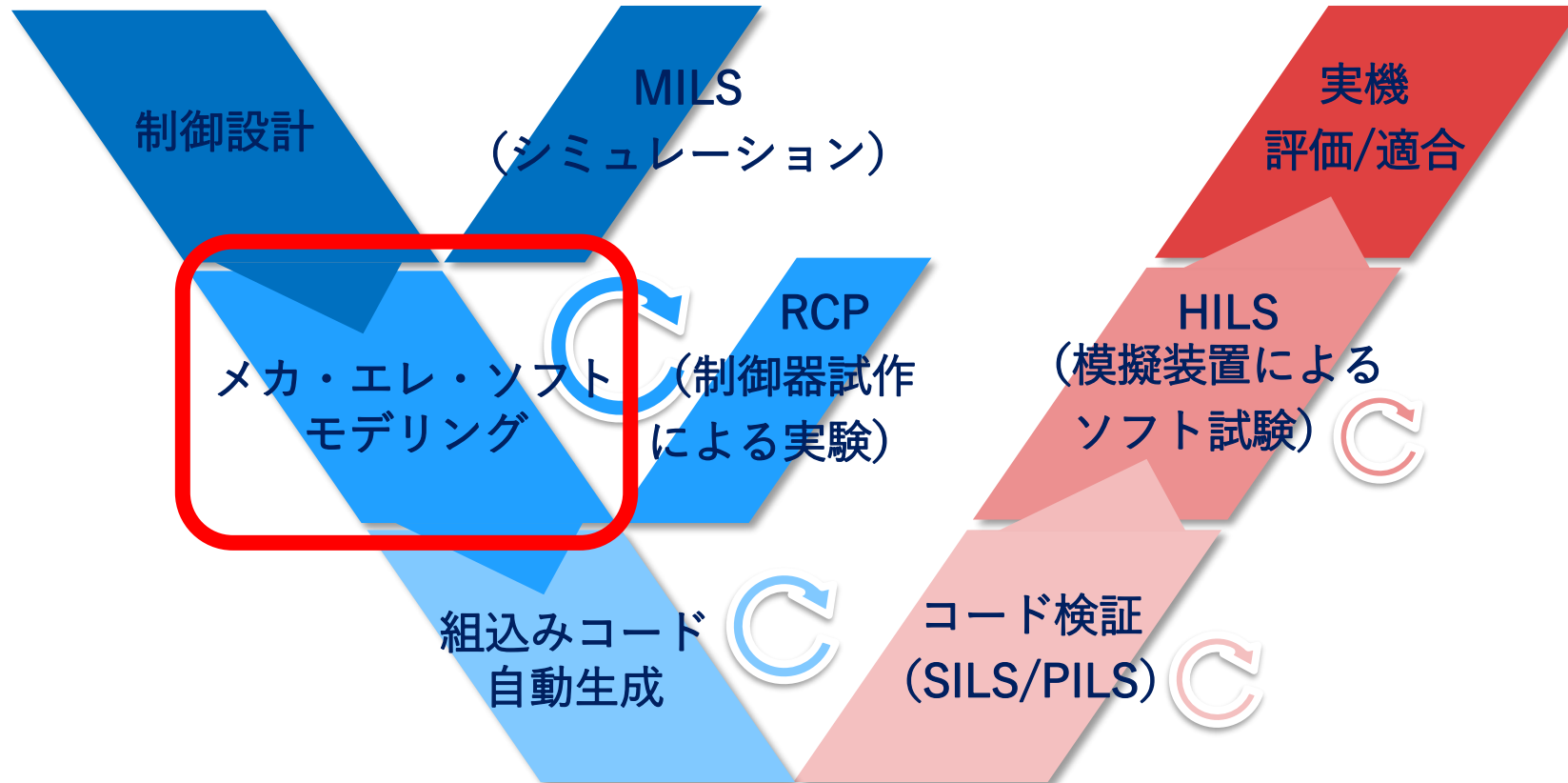


# Simulinkによる詳細仕様設計(モデリング)

- あらゆる機能を自由に、素早く構築可能



# MathWorksが提案するモデルベースデザイン

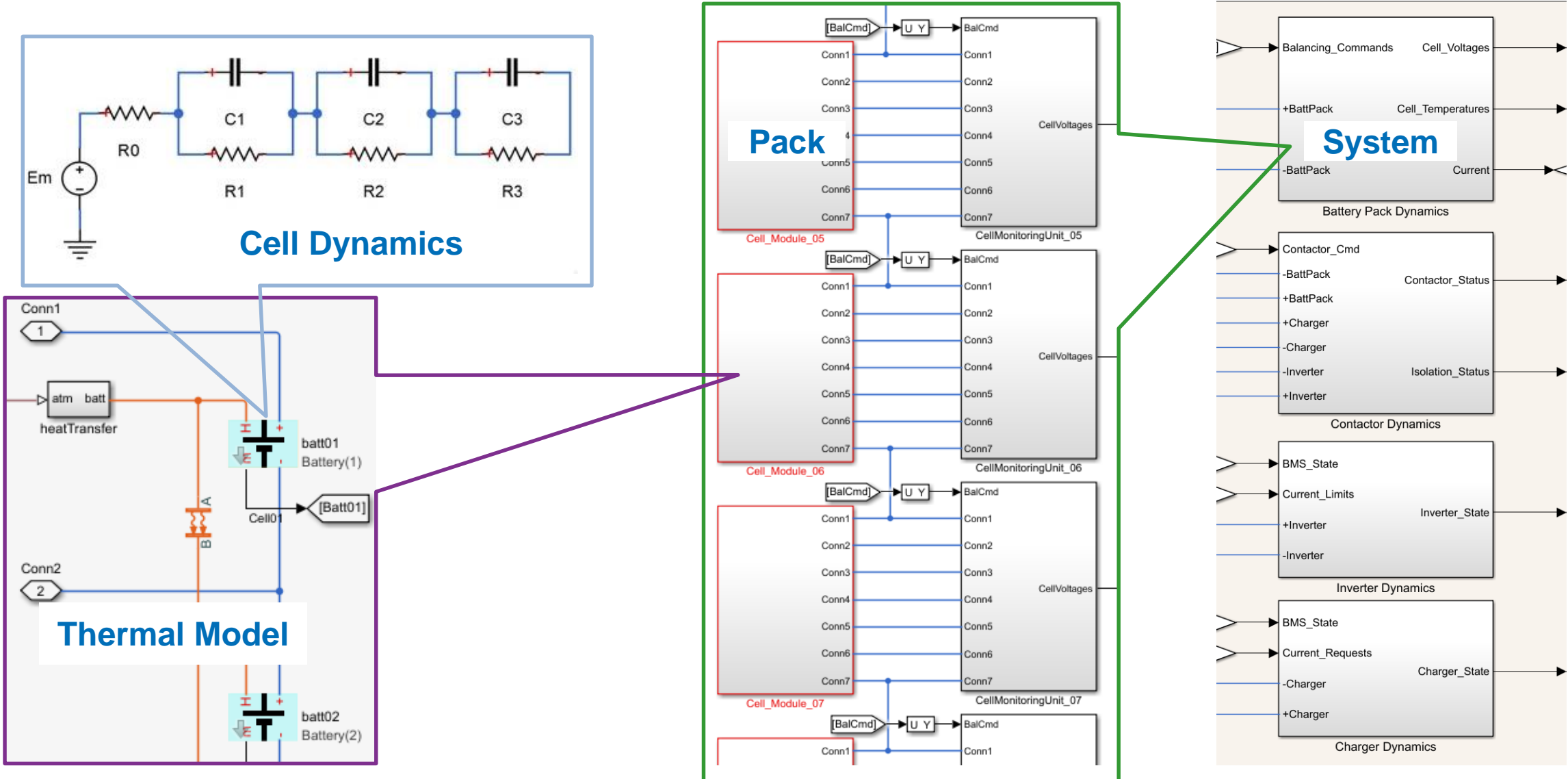


MILS: Model In the Loop Simulation

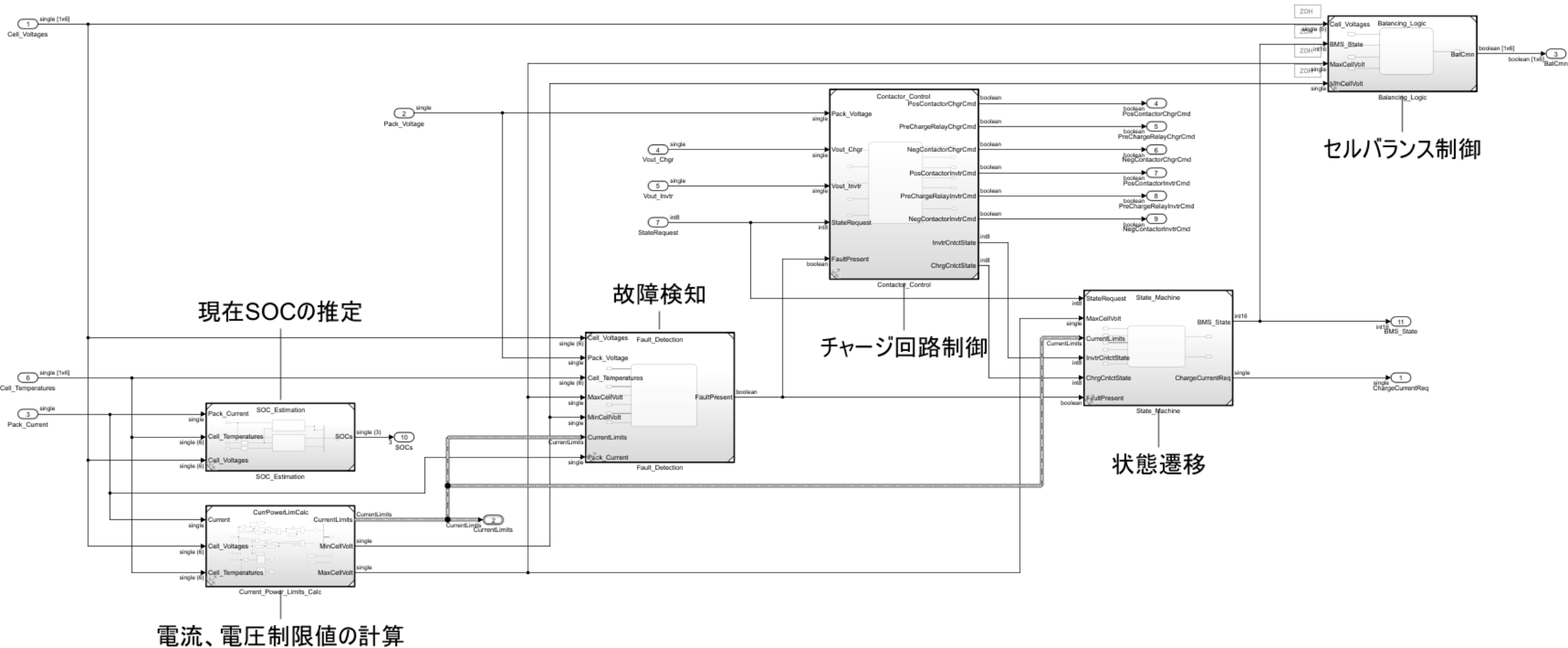
SILS: Software In the Loop Simulation  
 PILS: Processor In the Loop Simulation

RCP: Rapid Control Prototyping  
 HILS: Hardware In the Loop Simulation

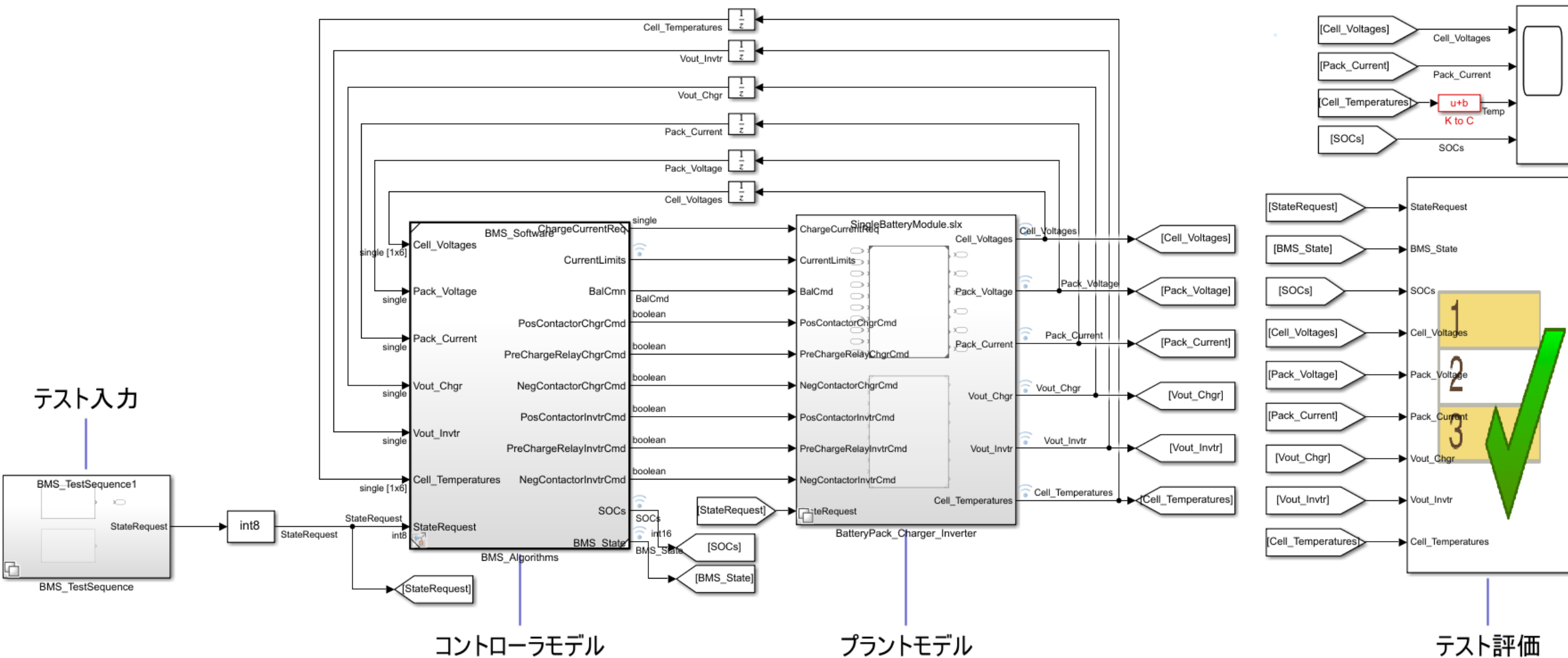
# プラントモデルを作成する 非線形特性も容易に再現、モジュール化をして階層構造化



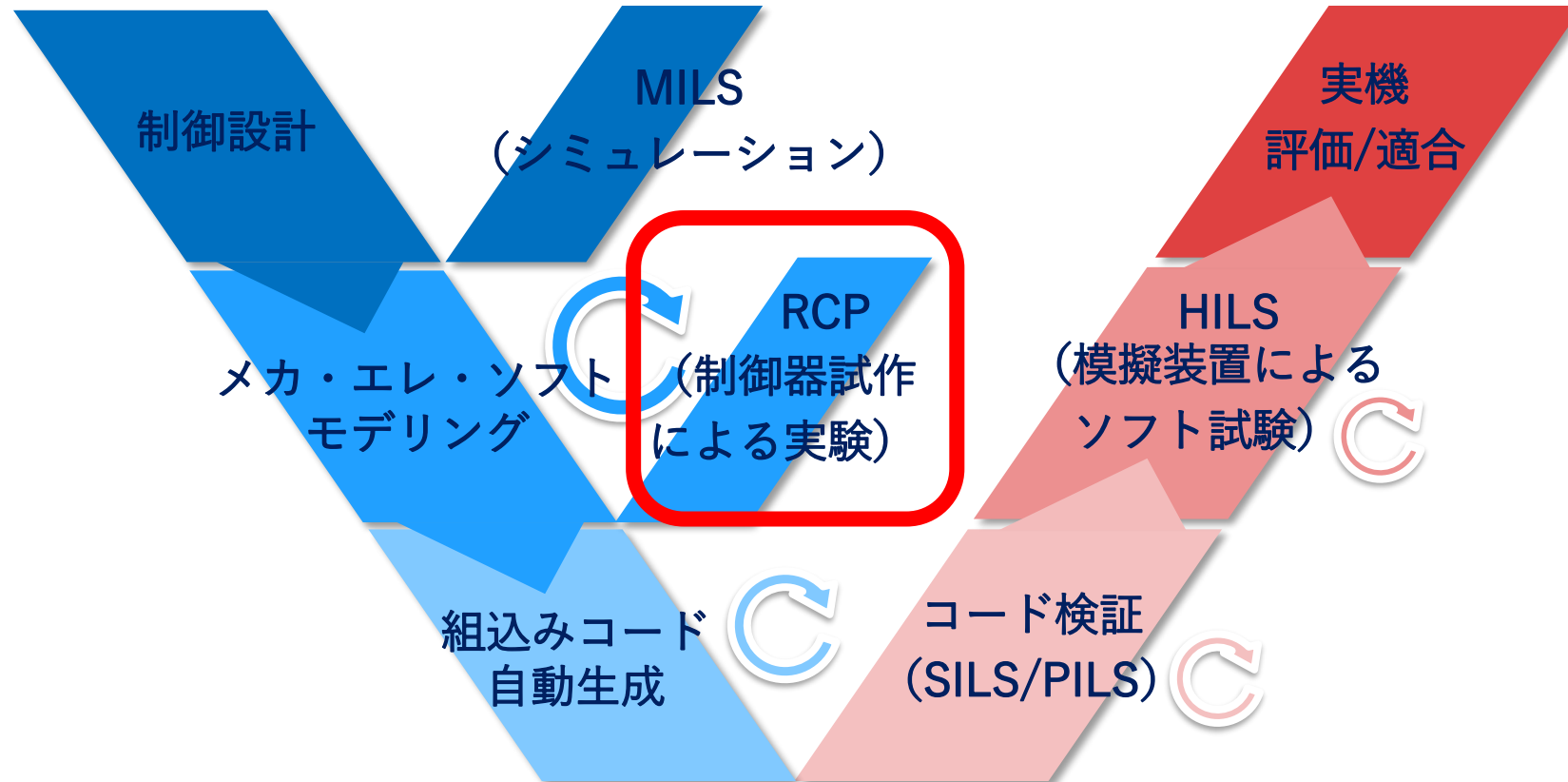
# 制御機能を構築する



# システムレベルのシミュレーション



# MathWorksが提案するモデルベースデザイン



MILS: Model In the Loop Simulation

SILS: Software In the Loop Simulation  
 PILS: Processor In the Loop Simulation

RCP: Rapid Control Prototyping  
 HILS: Hardware In the Loop Simulation

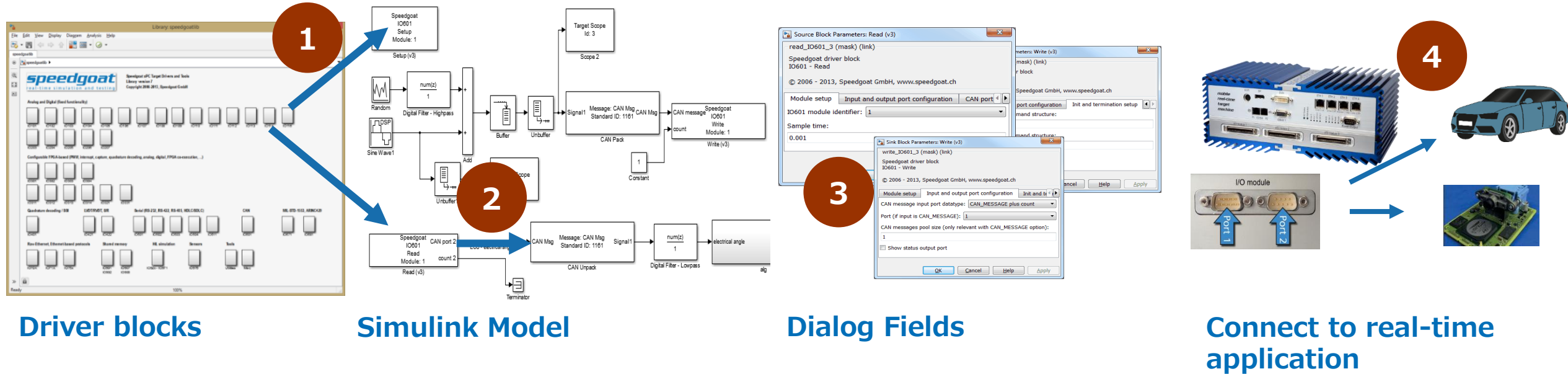
# RCP・HILSテスト環境 Simulink Real-Time / Speedgoat

- 専用ハードウェア Speedgoat を活用したRCP/HILSテスト環境
- データモニタ・ログ機能をはじめとしたSimulinkの最新機能を素早く利用可能
- SimulinkモデルからHDL実装のパスを提供
- 演算高速化のための各種機能を提供 (マルチコア/FPGAによる分散処理)

専用HW Speedgoat で  
モデルをリアルタイム実行



# Simulink Real-Timeのモデルのビルド・実行の手順



- 1 ハードウェアに搭載されたIOボードに対応する設定用ブロック・ドライバブロックをモデルに配置します
- 2 アルゴリズムとドライバブロックを信号線で接続します

- 3 設定用ブロック・ドライバブロックからダイアログを開いてI/Oに関する各種設定を行います
- 4 ビルドボタンを押してコード生成およびビルドを行います  
ビルド後、アプリケーションは自動的にダウンロードされ、すぐに実行可能な環境が整います



# MathWorksが提案するモデルベースデザイン



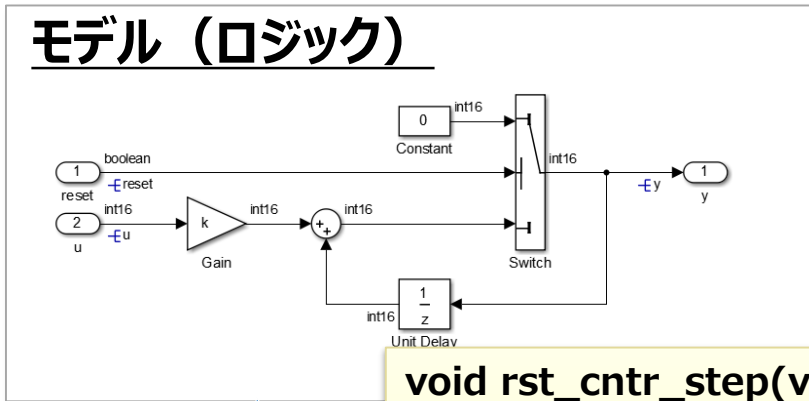
MILS: Model In the Loop Simulation

SILS: Software In the Loop Simulation  
 PILS: Processor In the Loop Simulation

RCP: Rapid Control Prototyping  
 HILS: Hardware In the Loop Simulation

# PCG: Product Code Generation

- 量産向けマイコン/DSPへのコード生成・コードの等価性チェック

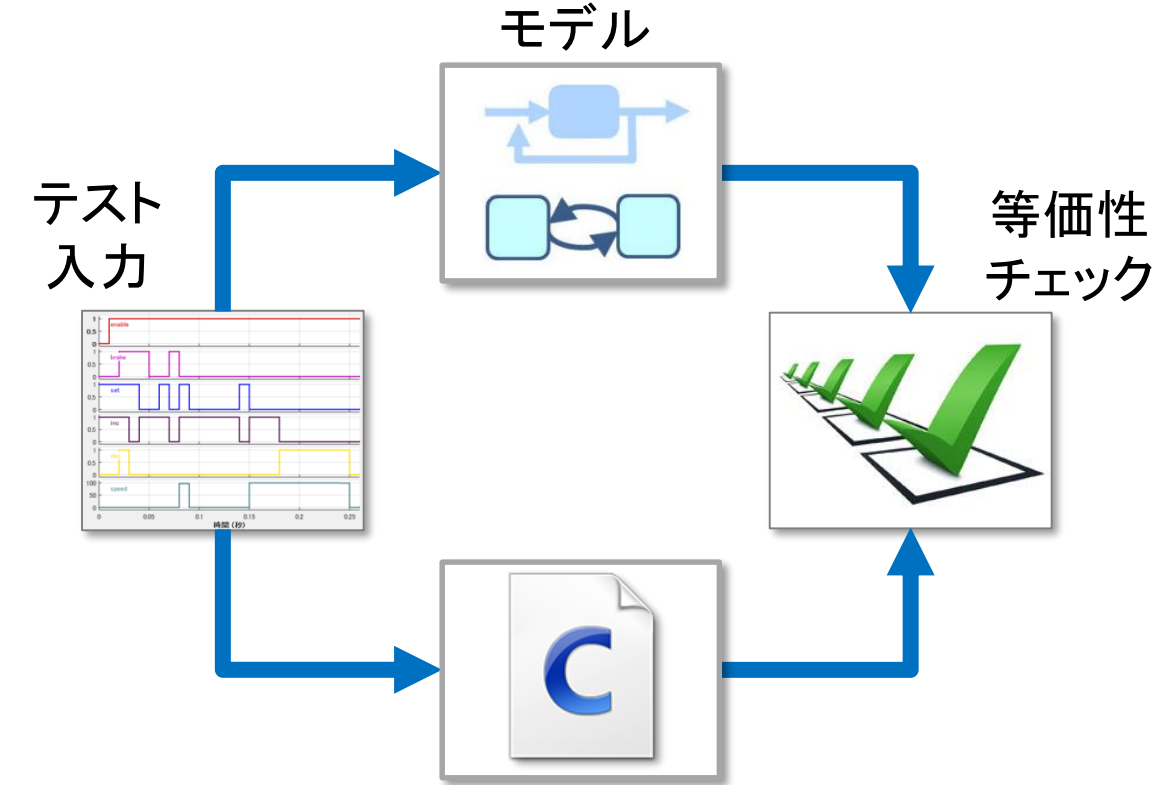


コード  
自動生成

```
void rst_cntr_step(void)
{
    if (reset) {
        y = 0;
    } else {
        y += (int16_T)(k * u);
    }
}
```



**PCG**  
マイコン向け量産コード生成



**SIL&PIL**  
等価性検証

# MathWorksが提案するモデルベースデザイン



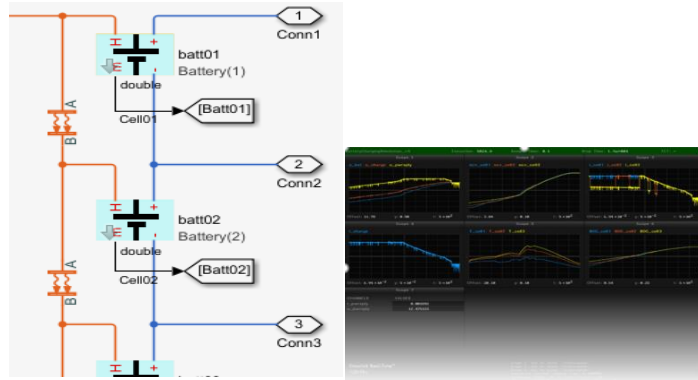
MILS: Model In the Loop Simulation

SILS: Software In the Loop Simulation  
 PILS: Processor In the Loop Simulation

RCP: Rapid Control Prototyping  
 HILS: Hardware In the Loop Simulation

# HIL用モデルを構築し、検証する

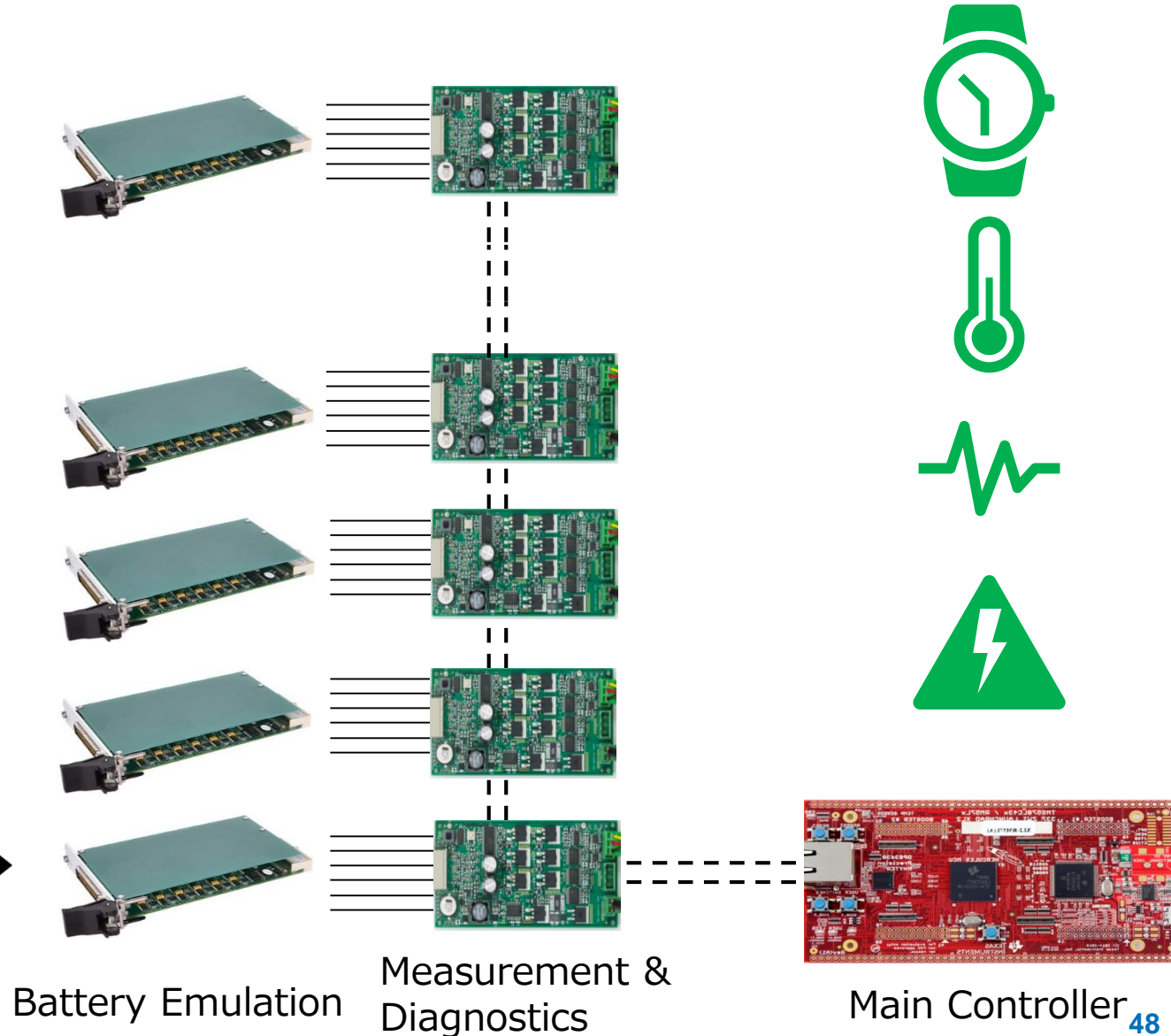
- ✓ 任意の試験条件の素早い再現
- ✓ 実機では危険な試験を安全に実施
- ✓ 24時間自動テスト可能

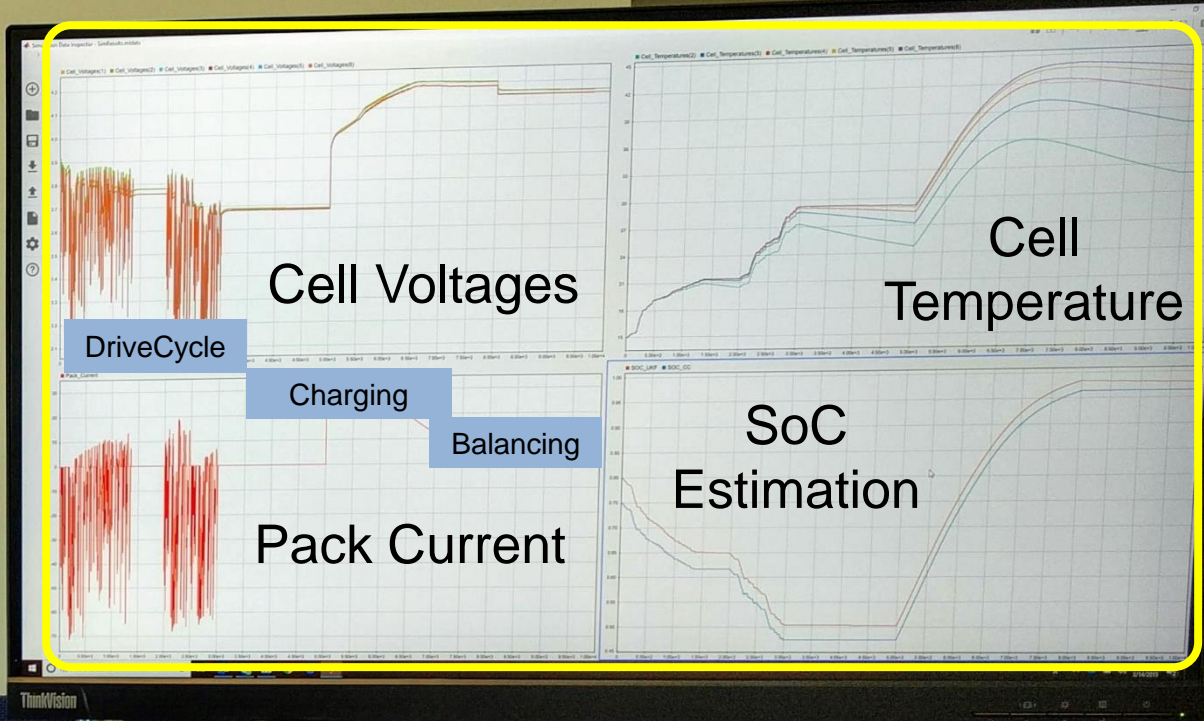
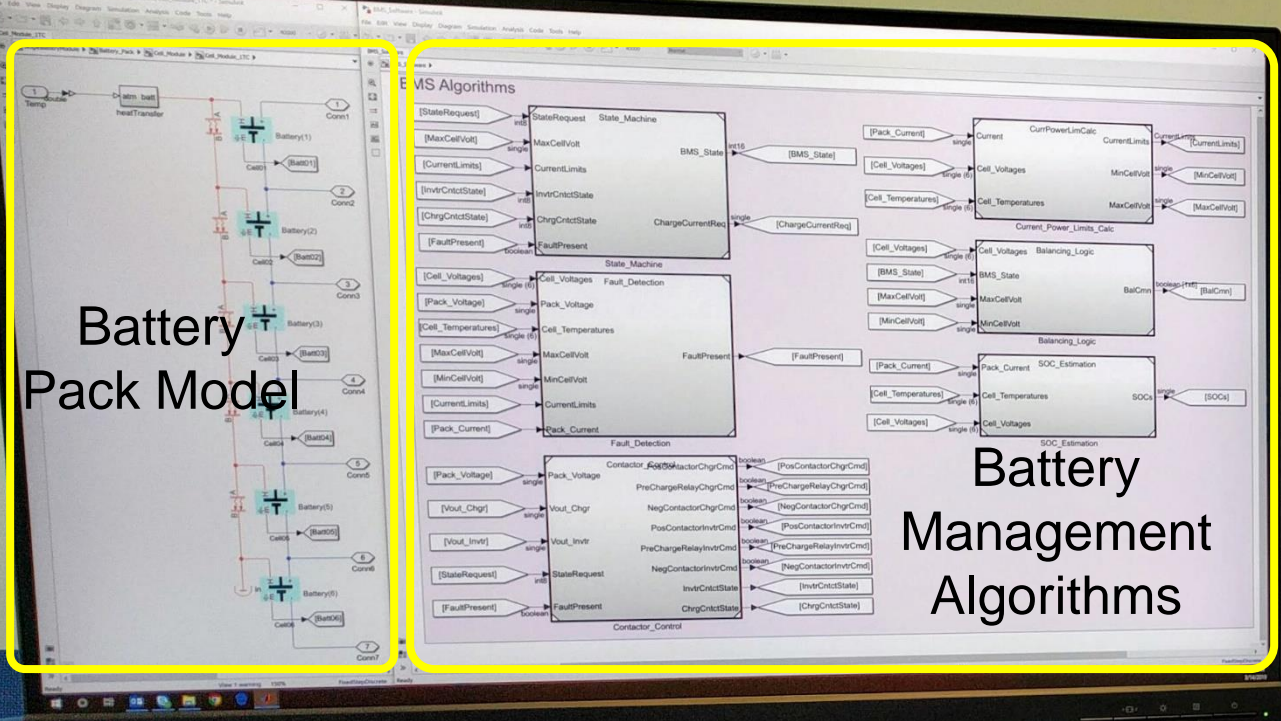


自動コード生成

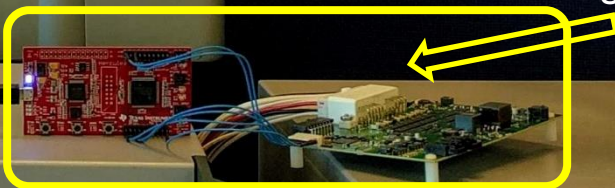


1001011100101  
Wiring and Signal Conditioning





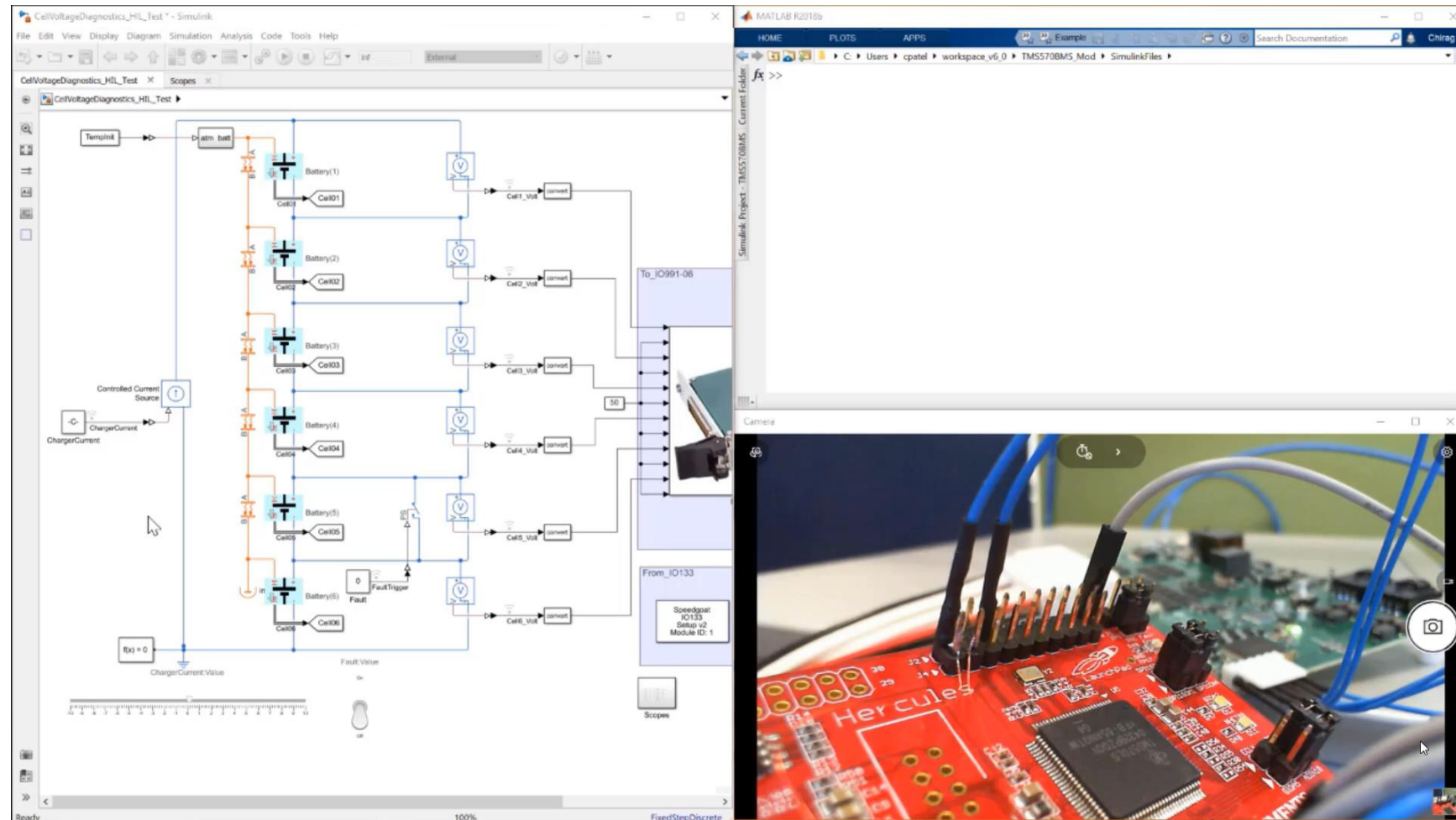
**Simulink Host Computer**



**Speedgoat Target Computer with Battery Emulation Card – IO991-06**

The hardware consists of a Speedgoat real-time target machine with a battery emulation card (IO991-06) installed in its front panel. The card is connected to the DUT via blue cables.

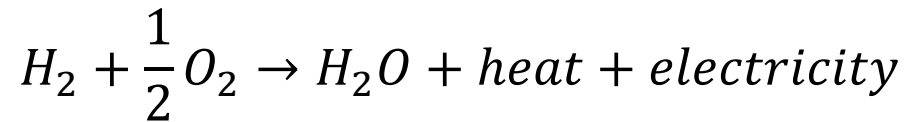
# BMS-HILシミュレータ実行の様子



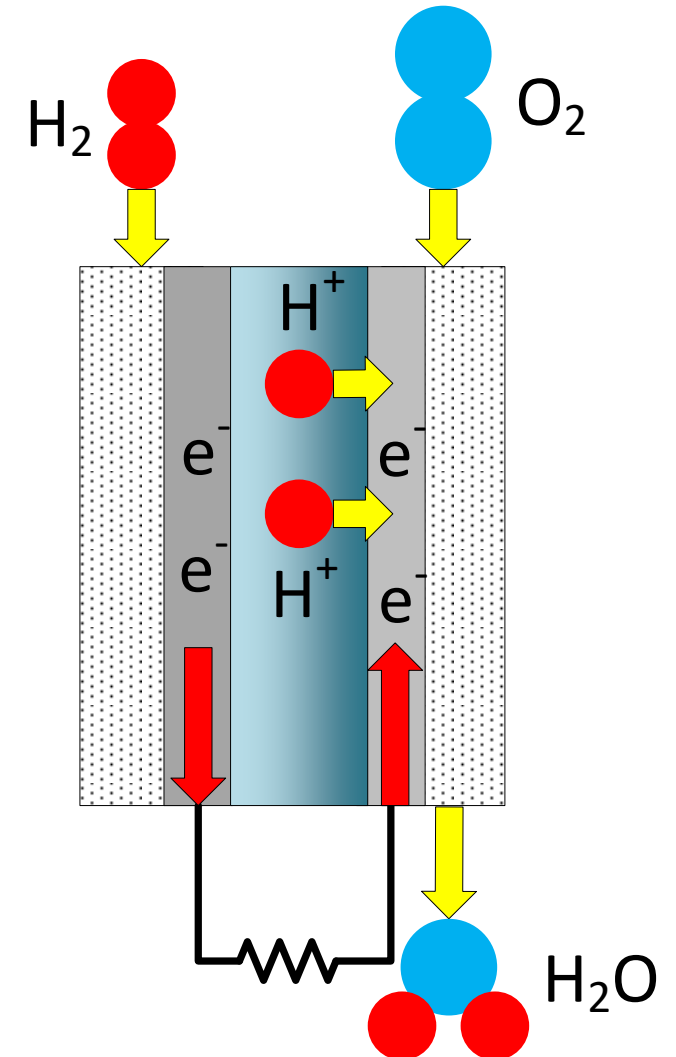
# アジェンダ

- バッテリーシステムの開発効率化のユーザー事例
- バッテリーシステムのモデルベース開発の基本フロー
- 車両モデルを含むバッテリーおよび燃料電池のシステムシミュレーション適用例
- まとめ

## 燃料電池とは

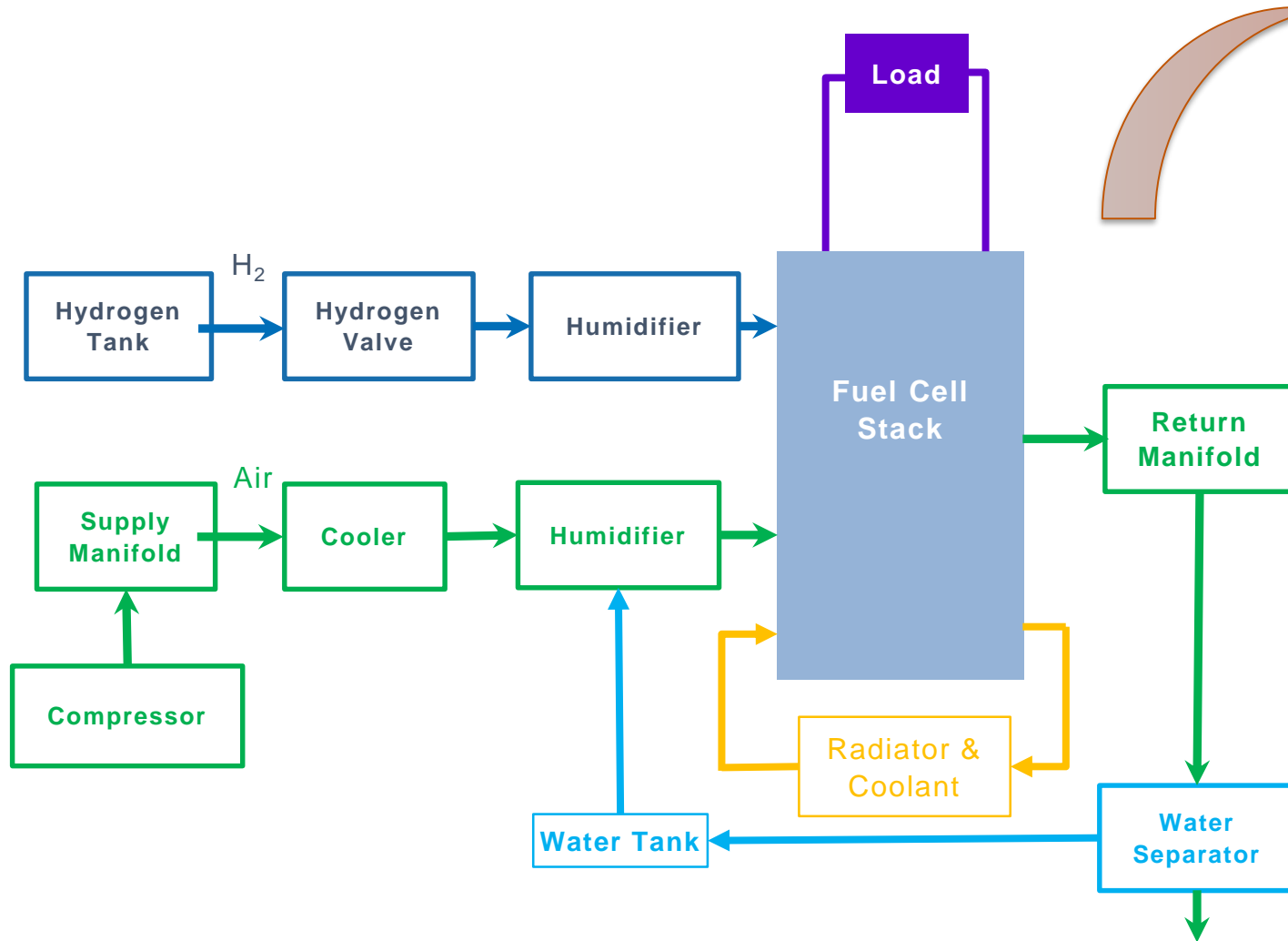


- アノード → H<sub>2</sub>を酸化
- カソード → O<sub>2</sub>を還元
- 導電層 → 電子を運ぶ
- 高分子電解質(PEM) → H<sup>+</sup>を運ぶ
- 冷却液の層 → 温度を制御
  
- 電気的特性
  - V<sub>max</sub> ~ 1.25 [V]
  - i ~ 1-2 [A/cm<sup>2</sup>]
  - 高電圧を得たい場合は、セルを直列に繋ぐ

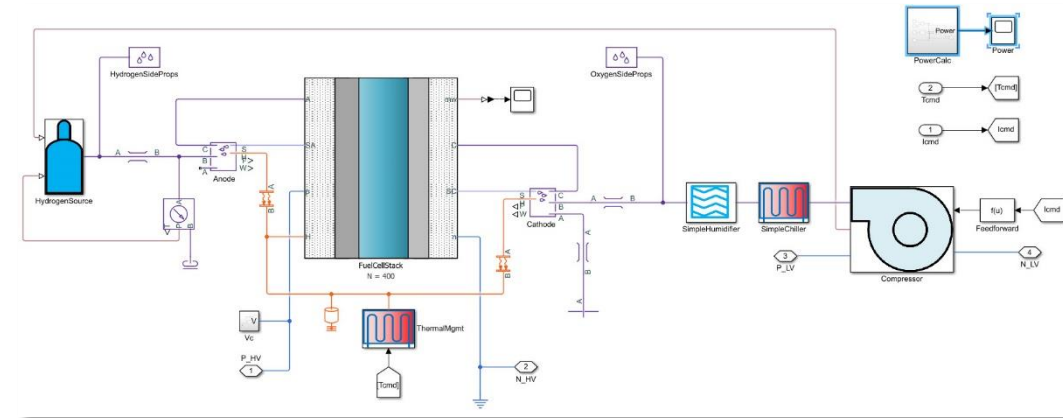
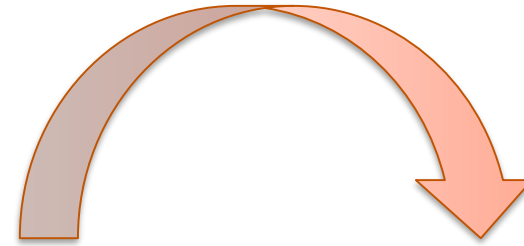




# 燃料電池システムのモデル化



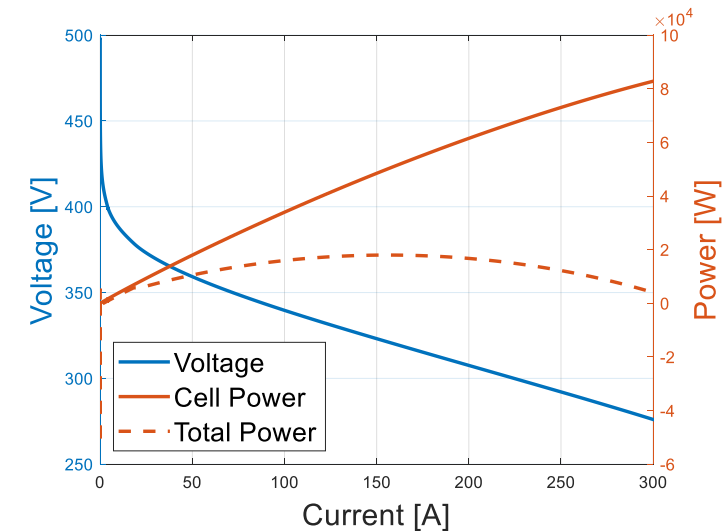
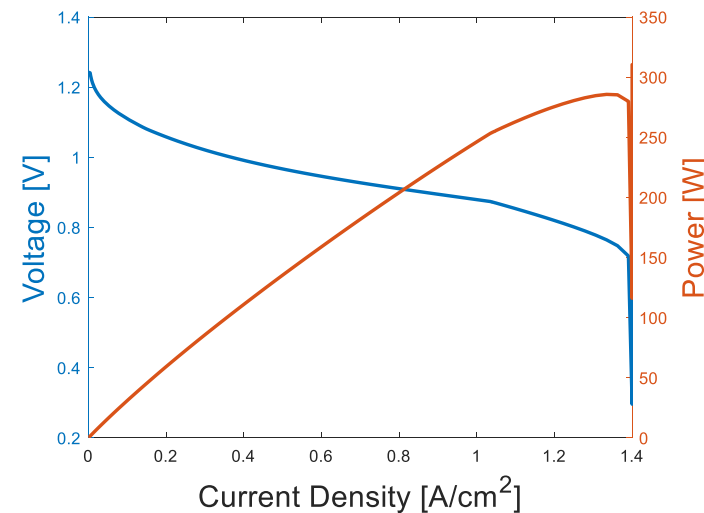
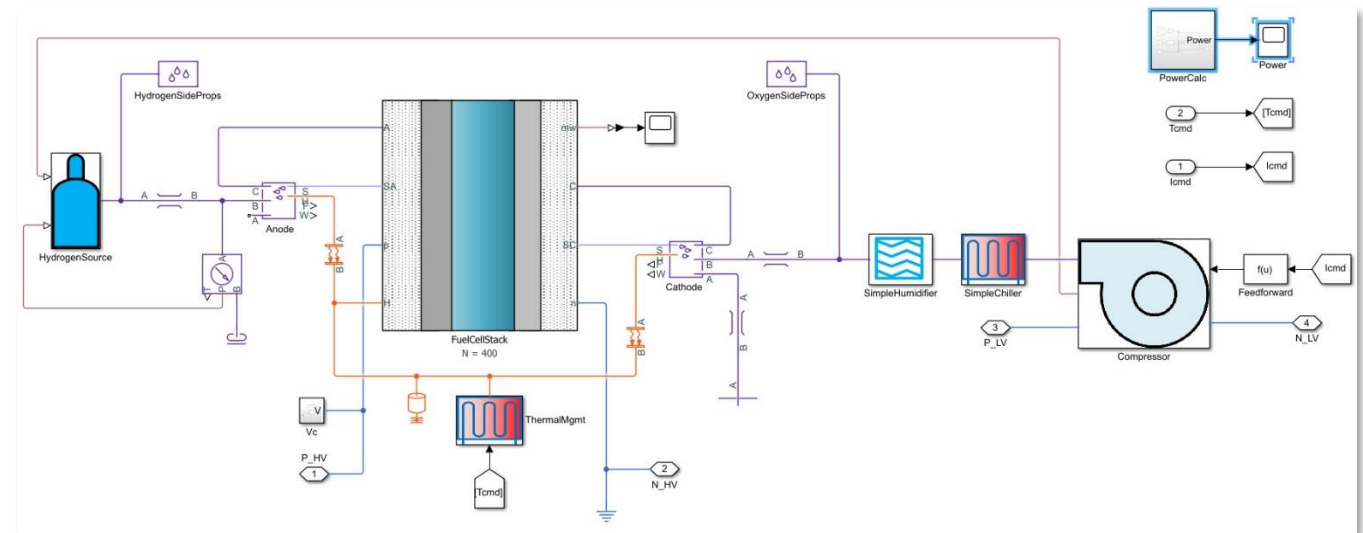
燃料電池システム



# 燃料電池システムのシミュレーション

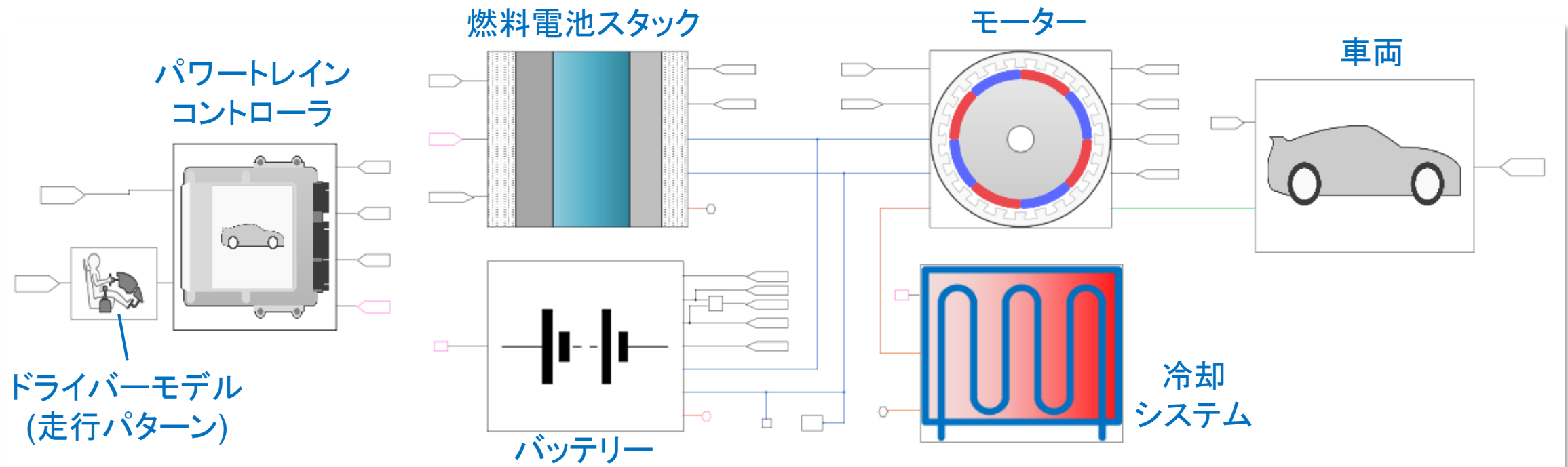
## ■ モデルの活用例

- 電流電圧(I-V)特性の導出
- I-Vと電力の特性の導出
- パラメータ推定
- 燃料電池制御設計
- 熱制御設計
- 他のモデルと複合したシミュレーション
- HILSに実装してリアルタイム実行



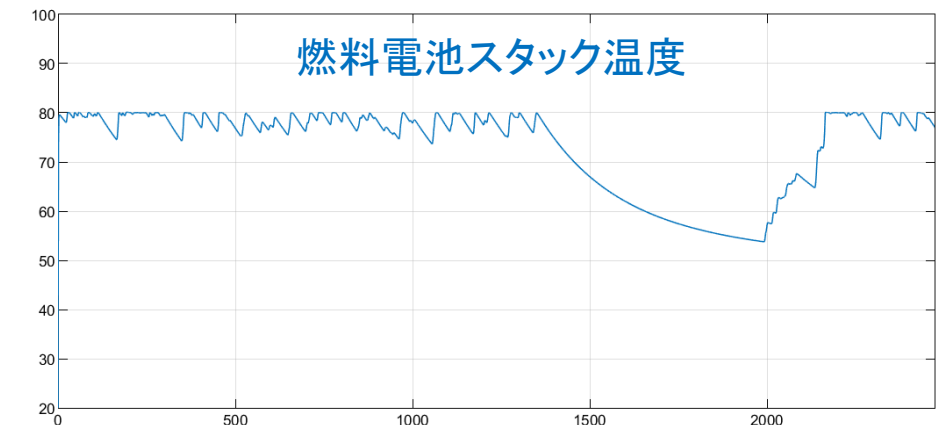
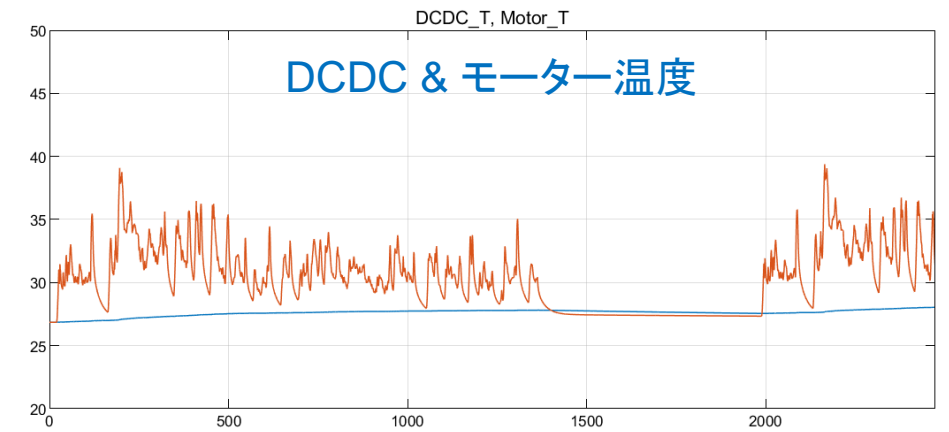
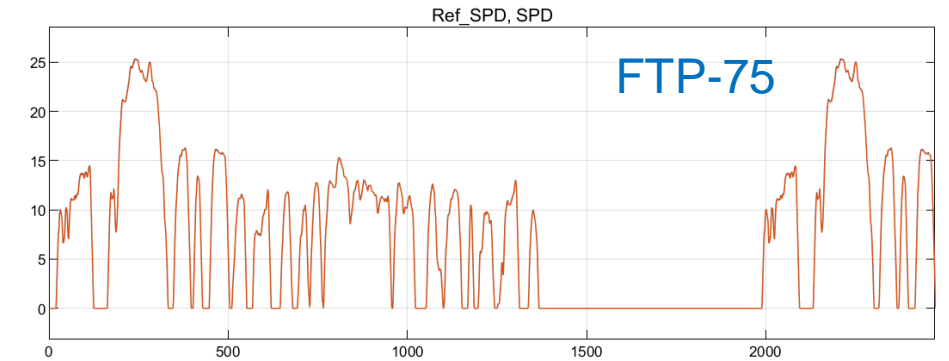
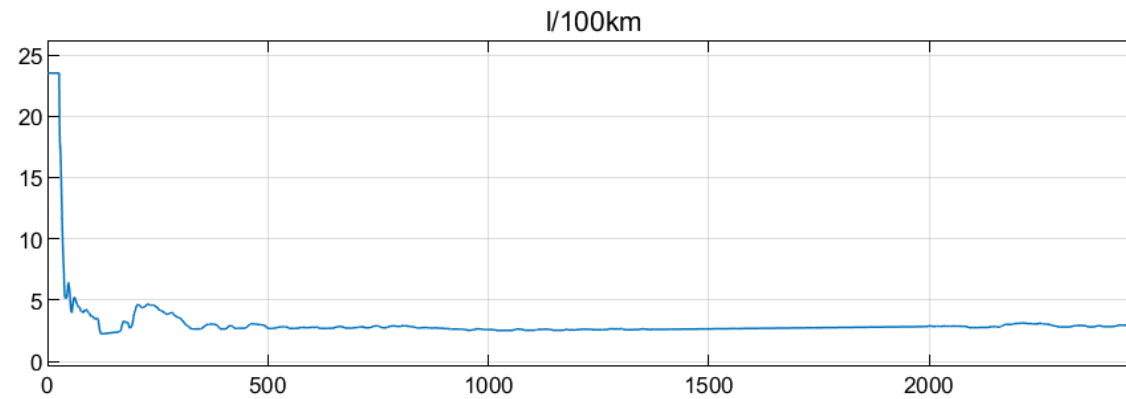
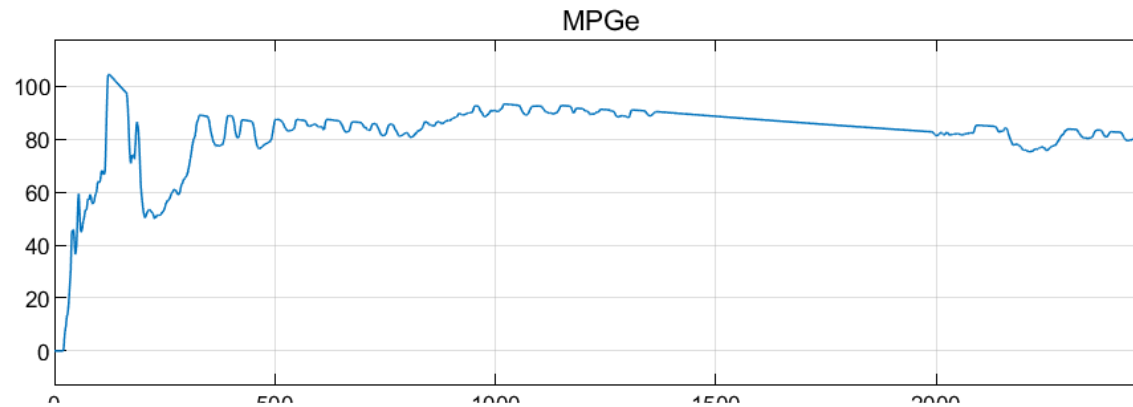
# 燃料電池車モデルについて

- Simscapeベースの仮想の車両
  - 燃費 / 熱管理 / コントローラ設計 / システム統合



# 走行シミュレーション

- 燃費調査
- 熱解析



## アジェンダ

- バッテリーシステムの開発効率化のユーザー事例
  - バッテリーシステムのモデルベース開発の基本フロー
  - 車両モデルを含むバッテリーおよび燃料電池のシステムシミュレーション適用例
- まとめ

## まとめ

- MATLAB, Simulinkを活用して研究開発を効率化した事例
  - 3D-CAEのモデルを1D-CAEの等価回路に変換
  - 先進アルゴリズムの構築
  - ソフトウェアの仕様の明確化、開発効率化
- バッテリーシステムの開発ワークフロー
  - 制御設計、プラントモデリング、RCP、コード生成、検証、HIL
- 応用例: 燃料電池のモデリング

# バッテリーに関するWebinar

<https://jp.mathworks.com/videos/advanced-algorithm-for-bms-1590668607201.html>

The screenshot shows a MATLAB Live Editor window with the following code and data:

```

94 t.Cycle = cell2mat(t.Cycle);
95 t.Type = categorical(t.Type);
96 t.AmbientTemo = cell2mat(t.AmbientTemo);
tt = 616x7 timetable
    newTime      Cycle      Type      AmbientTemp      Capacity      R0      R1
    _____  _____  _____  _____  _____  _____  _____
    1 2008/04/02 1...  1  charge      24          NaN      NaN      NaN
    2 2008/04/02 1...  2  discharge    24          2.0353   NaN      NaN
    3 2008/04/02 1...  3  charge      24          NaN      NaN      NaN
    4 2008/04/02 1...  4  discharge    24          2.0251   NaN      NaN
    5 2008/04/02 2...  5  charge      24          NaN      NaN      NaN
    6 2008/04/03 0...  6  discharge    24          2.0133   NaN      NaN
    7 2008/04/03 0...  7  charge      24          NaN      NaN      NaN
    8 2008/04/03 0...  8  discharge    24          2.0133   NaN      NaN
    9 2008/04/03 0...  9  charge      24          NaN      NaN      NaN
   10 2008/04/03 0... 10  discharge    24          2.0005   NaN      NaN
  
```

```

110 idxZ_0 = tt.Type == 'impedance';
111 % build ordinal vector to find cycle # of each Z experiment
112 idx1 = (1:length(tt.TestData)).*idxZ_0;
113 % keep the non-zeros
114 idx2 = nonzeros(idx1)
  
```

The code below the table explains how to extract impedance test data:

インピーダンスのテストを抽出する  
"impedance"の後に"discharge"につながる試験番号を取り出す。

説明 [コードとリソース](#)

## BMS（バッテリーマネジメントシステム）の先進アルゴリズム開発

Toshinobu Shintai, MathWorks

### 概要

- 機械学習によるバッテリー劣化モデリング

線形回帰、決定木、ニューラルネットワークのような統計・機械学習手法を用いて、データからバッテリー容量の劣化を予測するモデリングの方法をご紹介します。

- 非線形カルマンフィルターによるSOC推定

<https://jp.mathworks.com/videos/bms-overview-1588015982392.html>

The screenshot shows a MATLAB Live Editor window displaying BMS control logic implementation and verification. The main table shows the status of various control functions:

Index	Summary	Implemented	Verified
BMS制御機能仕様書	BMS制御機能仕様書.docxへの参照	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
インポート	バッテリーセル保護機能	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.1	セル電圧保護	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1.2	セル温度保護	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

On the right, there is a text box with the following content:

には最小セル電圧は...[V]以下のとき、故障と判定される。  
バック電圧とセル間電圧の合計との差の絶対値が0.252[V]以上であるとき、故障と判定する。

Keywords:

リビジョン情報:

ドキュメントに表示  ロックを解除

リンク

- 実装元:
  - MonitorCellVoltage
  - NoCellVoltageFault
  - SensorFault
  - (FaultPresent = false;)
  - OverVoltageFault
  - [MaxCellVolt >= OverCellVoltageLimit]
  - [Delta >= single(SnsrFitThld)]
  - [MinCellVolt <= UnderCellVoltageLimit]
  - UnderVoltageFault
- 検証元:
  - セル電圧保護

コメント

説明 [コードとリソース](#)

## BMS（バッテリーマネジメントシステム）のモデルベースデザイン

Toshinobu Shintai, MathWorks

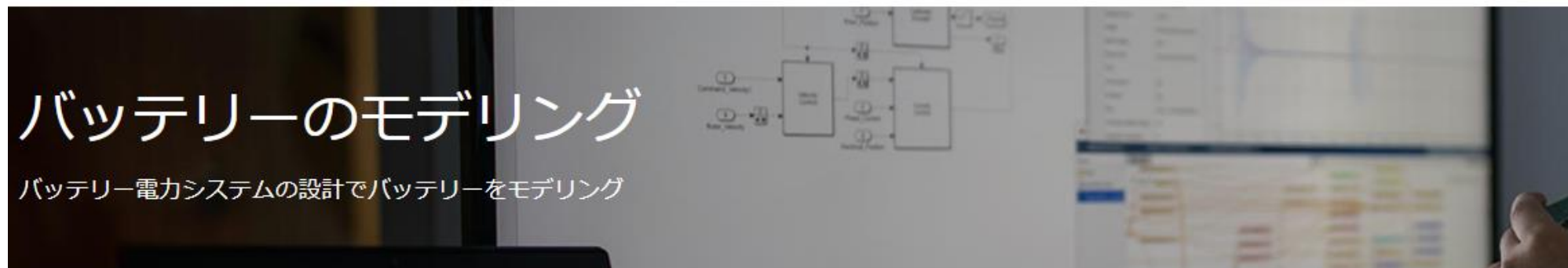
### 概要

BMS（バッテリーマネジメントシステム）には、バッテリーの安全性・性能・寿命を確保するために、過充電・過放電の保護ロジック、SOC/SOHの推定ロジック、セルバランス制御ロジックなど、非常に多岐に渡るロジックがあります。

そのBMSのロジックの妥当性・信頼性の確認をするためには、異常状態を含む様々な条件を想定したシステムレベルのテスト検証をする必要がありますが、実バッテリーの振舞いを模擬したモデルを活用することで、そのようなテスト検証の作業を安全にかつ効率的に行うことができます。

# バッテリーモデリングの情報まとめ

<https://jp.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/battery-models.html>

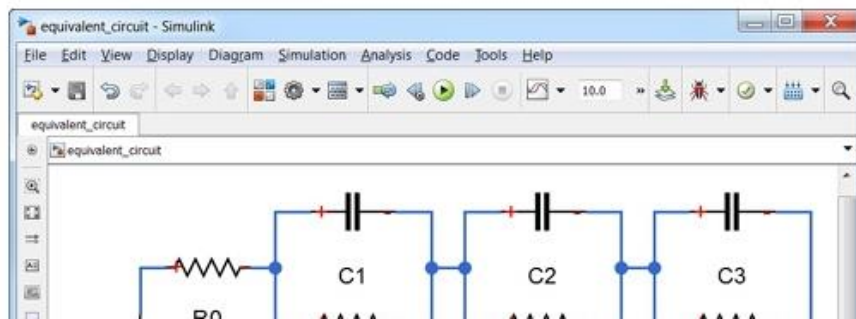


バッテリーのモデルは、バッテリー電力システム的设计において必要不可欠なツールになっています。バッテリーの特性評価、充電状態 (SOC) と劣化状態 (SOH) の推定、アルゴリズム開発、システムレベルの最適化、およびバッテリー管理システム设计のリアルタイム シミュレーションなどにそれらが使用されています。

等価回路に基づくバッテリーのモデルは比較的単純なため、システムレベルの開発と制御の適用に適しています。等価回路を使用してバッテリーの熱電気挙動をモデリングし、最適化によりモデルと実験的計測をつなぐ相関手法で、非線形要素をパラメータ化することができます。



Simulink と Simscape を使用して  
バッテリーをモデル化

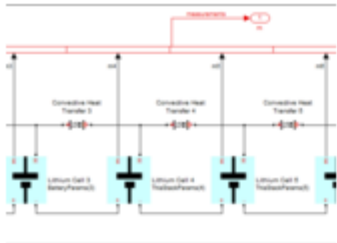


パナソニック アドバンスドテクノロ



# File Exchangeにバッテリーに関するサンプルモデルがあります

## バッテリー等価回路のモデリング、パラメータ推定



### Battery Modeling

version 1.26 (2.08 MB) by Javier Gazzarri **STAFF**

Lithium ion battery characterization, state estimation, cell balancing, and thermal management

Overview

Functions

Models

Examples

This file contains lithium-ion battery models for parameter estimation and simulation.

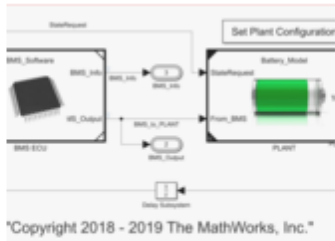
1. Unzip the project.
2. Double-click BatteryModeling.prj to set up the MATLAB path. The html index contains links to open each example.

Demos:

1. 3S-1P battery pack CCCV charge with passive balancing. Charge / discharge cycling with passive balancing, including thermal effects.
2. EV battery cooling. Liquid cooling of an automotive battery pack.
3. Cell characterization. Parameter estimation of single cell using pulsed discharge experiments.
4. SOC Estimation using UKF.
5. SOH (internal resistance) online estimation using EKF. Internal resistance grows over time and the nonlinear Kalman Filter estimates its evolution.
6. Battery App. This app can be used to find battery parameters from datasheet information.

# File Exchangeにバッテリーに関するサンプルモデルがあります

## バッテリーマネジメントシステムの設計



## Design and Test Lithium Ion Battery Management Algorithms

version 1.0.2 (8.89 MB) by Chirag **STAFF**

This example project can be used as a reference design to get started with designing Battery Management System with MATLAB and Simulink.

Overview

Functions

Models

This example project can be used as a reference design to get started with designing Lithium Ion Battery Management System (BMS) with MATLAB and Simulink.

Project includes Simulink models for BMS Algorithms such as:

1. State of Charge estimation using Extended Kalman Filter, Unscented Kalman Filter
2. Passive Battery Cell Balancing
3. State Machine for Pre-charging and Contactor Management
4. Fault Management - Over/Under Voltage, Over Current, Over Temperature etc.
5. Charge and Discharge Current Limit Calculations

To design and test these algorithms, project also includes files for

1. Li-ion Battery Cell Parameter Estimation
2. Battery Pack with 6 cells in series and 96 cells in series

<https://jp.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72865-design-and-test-lithium-ion-battery-management-algorithms>

# ご清聴ありがとうございました



Accelerating the pace of engineering and science

© 2020 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [www.mathworks.com/trademarks](http://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.