

モデルベース開発を活用した 水素蓄エネシステムの設計検証

富士通アドバンステクノロジー株式会社 米澤 遊、○中島 善康
国立大学法人宮崎大学 工学教育研究部 教授 西岡 賢祐
国立大学法人宮崎大学 テニユアトラック推進機構 助教 太田 靖之

■ 富士通アドバンステクノロジー株式会社

本社所在地：川崎市幸区（富士通新川崎テクノロジースクエア内）

代表者：代表取締役社長 伊藤 明

富士通アドバンステクノロジー株式会社は、

- 開発環境（開発プラットフォーム）
- テクノロジー開発（ハードウェア、ソフトウェア）
- 設計～製造受託

の三分野で、お客様のものづくりを支援する企業です。



開発環境

富士通のノウハウをもとに
高信頼、高性能な開発環境を提供

テクノロジー開発

専門エンジニアがお客様の
テクノロジー開発をトータルにサポート

設計～製造受託

富士通の共通テクノロジー開発を
活用した製品設計、製造

HW製品



サーバ



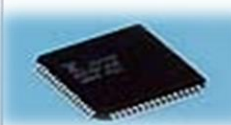
NW



スパコン



ユビキタス



デバイス



金融端末



電気・光・電源技術

LSI設計 EMI/ESD技術
超高速伝送 光技術 電源

ソフトウェア技術

組み込みソフト (CPU、DSP) AI技術
モデルベース設計 セキュリティ (ソフトのハード化)

デバイス評価技術

部品データベース 部品ライブラリ構築
共通部品の機能評価/監査

実装技術

インターコネクション (配線、接続)
冷却 (空、液、システム) 高密度アセンブリ

開発環境

CAD

シミュレーション

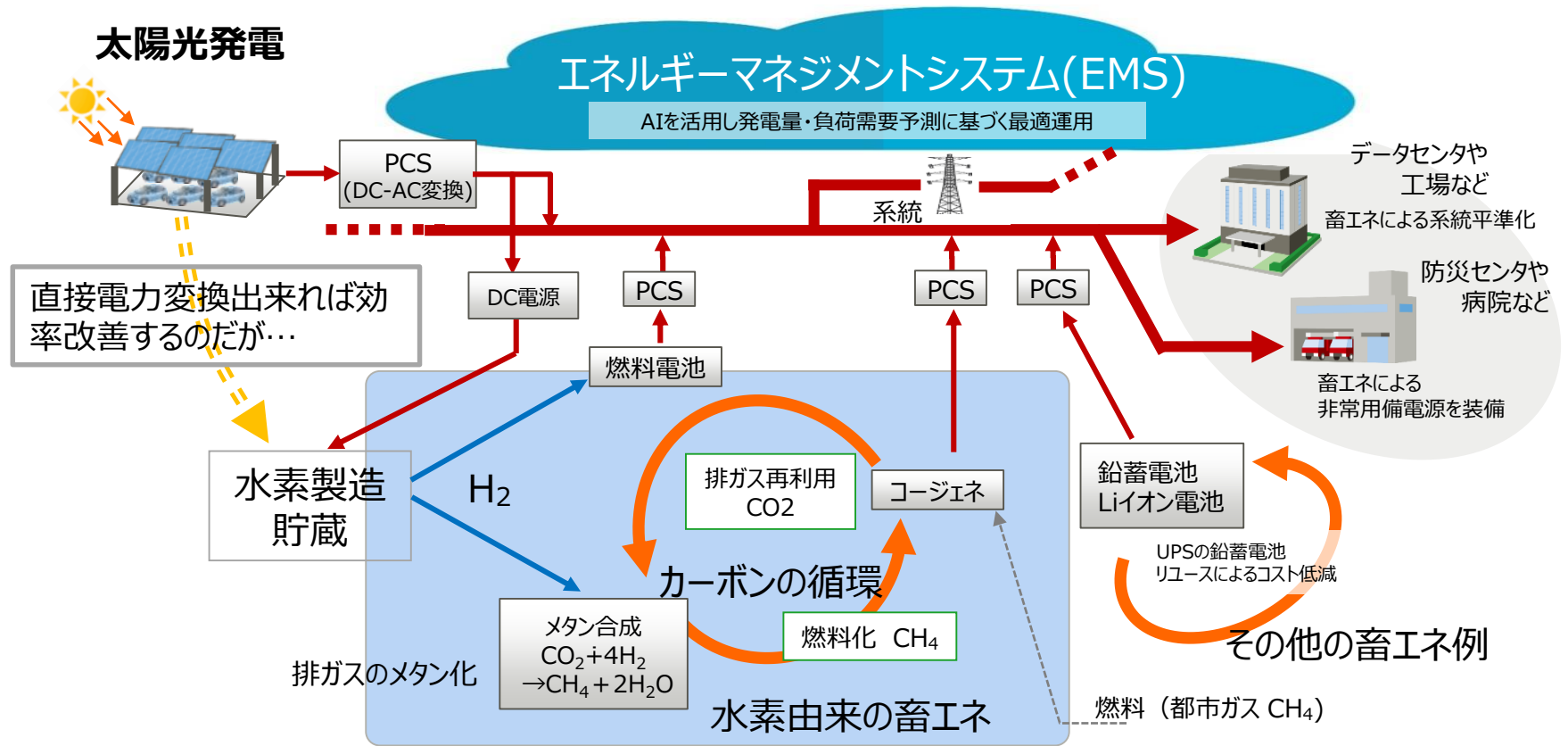
AI技術

クラウド

プロダクトの適正コスト・品質、差異化を実現する共通テクノロジーを深掘り

太陽光エネルギーから水素エネルギー を製造・蓄積するシステムの開発概要

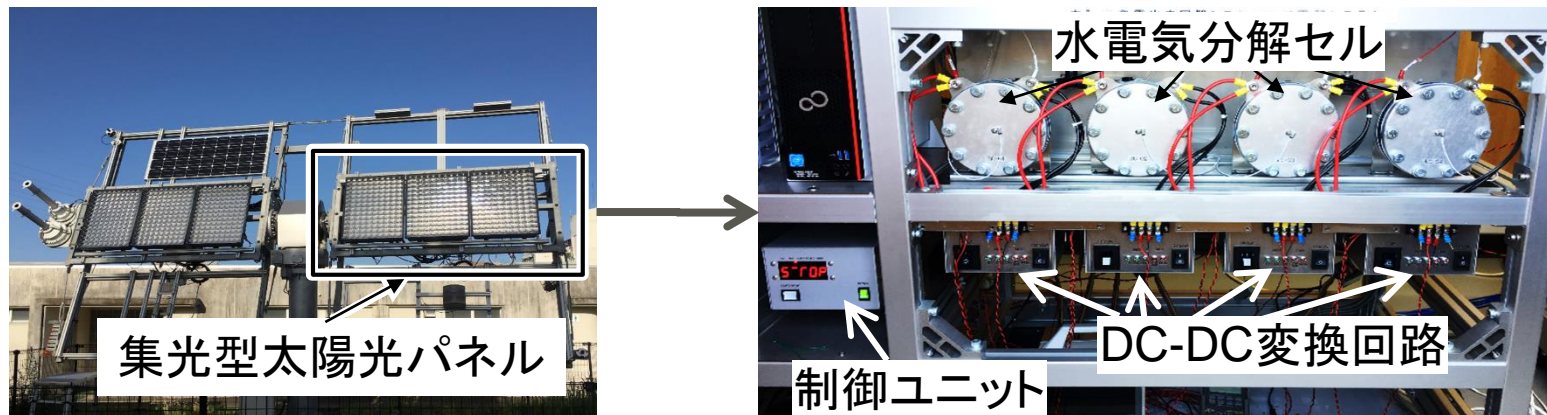
- 環境負荷低減やエネルギーコスト削減のために、高効率かつ安定な再生可能エネルギー活用システムが求められている。



エネルギー供給の安定化、環境負荷低減のための技術として
再生可能エネルギー由来の水素蓄エネに注目

太陽光を水素に変換する蓄エネシステムを開発

- 太陽電池と水電解装置の間に新たに電力変換装置を導入することにより、気象条件により変動する太陽電池の出力をロスなく水電解装置に供給することが可能となった。



- Yasuyuki Ota et al., "Highly efficient 470 W solar-to-hydrogen conversion system based on concentrator photovoltaic modules with dynamic control of operating point", 20 June 2018, APEX

太陽光エネルギーから水素への変換効率 19% を達成
(一日の平均効率として世界最高の効率)

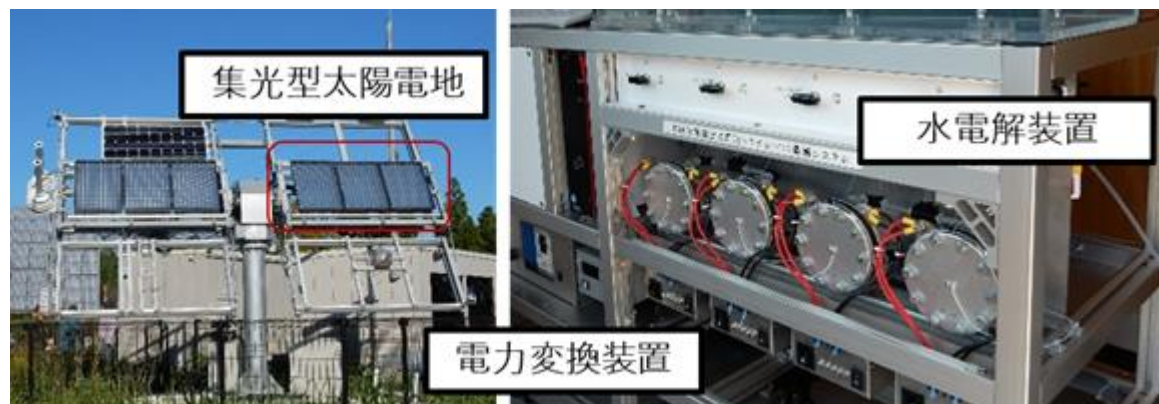
PRESS RELEASE : <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2018/07/19.html>

2018年7月19日
国立大学法人 宮崎大学
株式会社富士通研究所
住友電気工業株式会社

実証試験用システムによる世界最高効率の水素製造に成功 宮崎の太陽光エネルギーから水素エネルギー製造

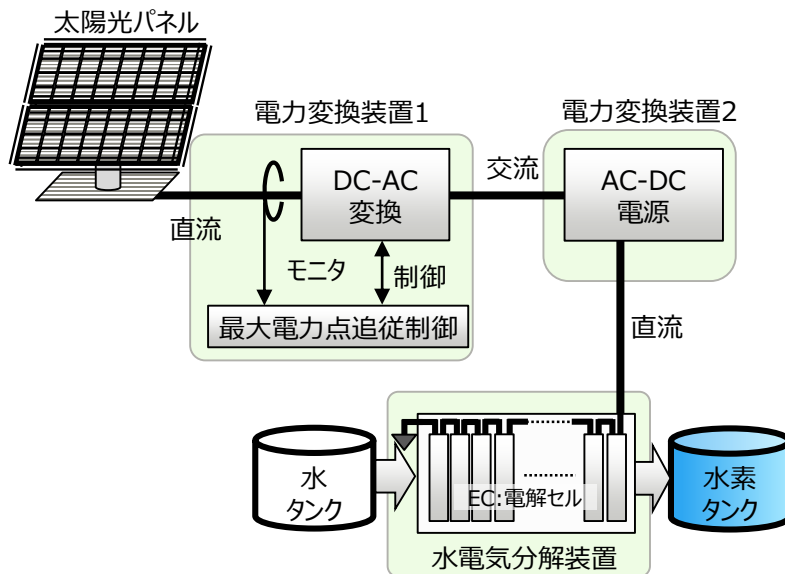
■ 発表のポイント

- 宮崎大学で研究開発を進めている高効率集光型太陽電池（出力470 W）より得られた電力で水を電気分解（水電解）し、太陽光エネルギーの18.8%（1日平均）を水素エネルギーに変換することに成功した。これは、実用構成のシステムにおける屋外試験において世界最高効率となる。
- 太陽電池と水電解装置の間に新たに電力変換装置を導入することにより、気象条件により変動する太陽電池の出力をロスなく水電解装置に供給することが可能となり、世界最高効率を実現した。
- 宮崎県に豊富に降り注ぐ太陽光により得られた水素エネルギーを利活用することで、再生可能エネルギーの地産地消が期待される。

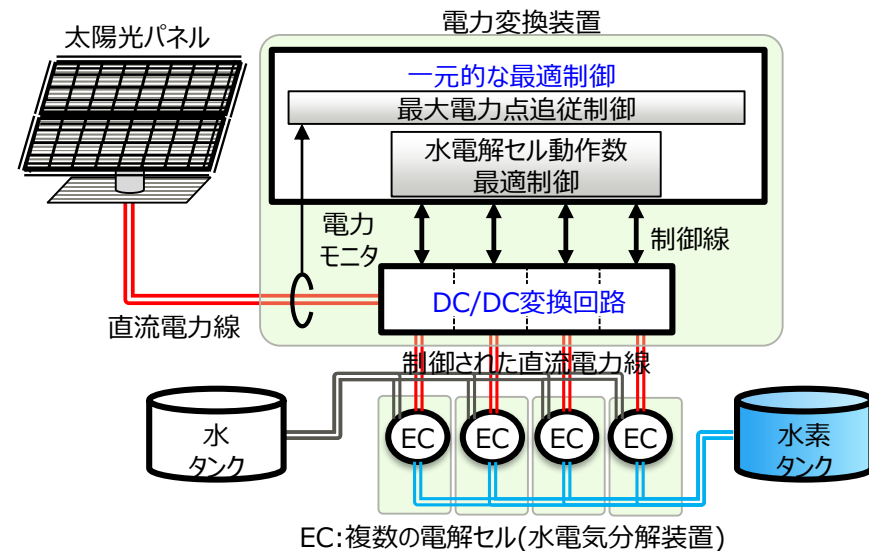


- 太陽光パネルから水電解セルへ直接電力を変換する。
- 太陽光パネルからの最大電力取得制御と、水電解セルの動作数制御を発電量に合わせて一元的に最適制御する。

従来の方式

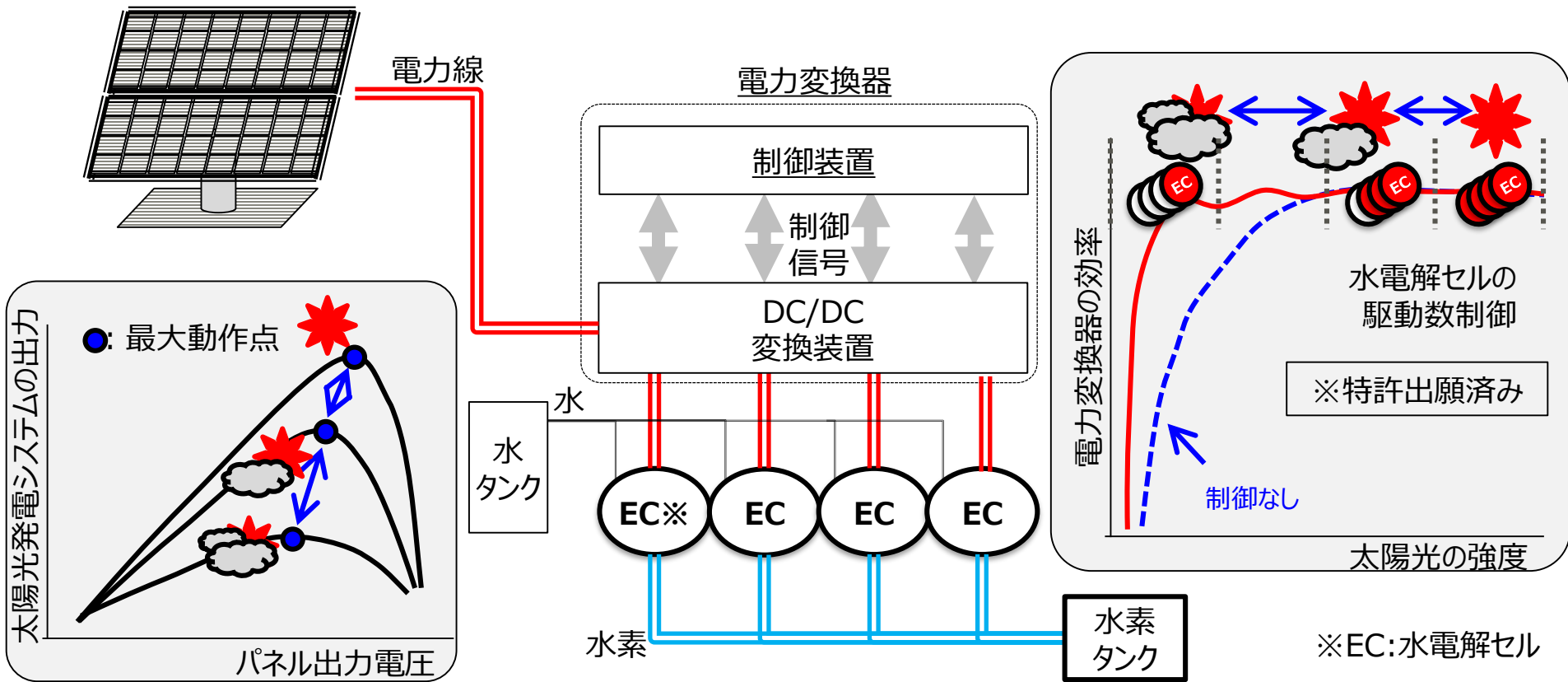


提案のシステム (特許出願済)



高効率化のための独自の制御手法

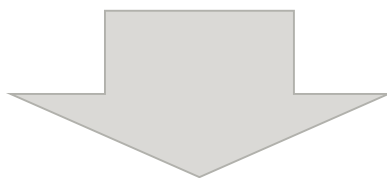
- 太陽光パネルの出力に応じて水電解セルの動作数を変化させ、エネルギー損失を抑制する。



モデルベース開発を活用した 水素蓄エネシステムの設計検証

■ 従来の開発手法における問題

- 太陽光パネル、電力変換器（DC-DC変換器）、水電解セル等々を最適な条件で動作させるための制御設計が困難。
 - システムを構築してみないと最適な制御条件が分からない。
- 制御ソフトウェアのデバッグが困難。
 - 想定通りに動作しない場合に、ハードウェアの問題か、ソフトウェアのバグか、アルゴリズムに問題があるのかが、切り分けが難しい。
 - エネルギーマネジメントシステムにおいてはバグによりシステムが破損したり、重大な事故が発生する可能性があり、デバッグが非常に難しい。

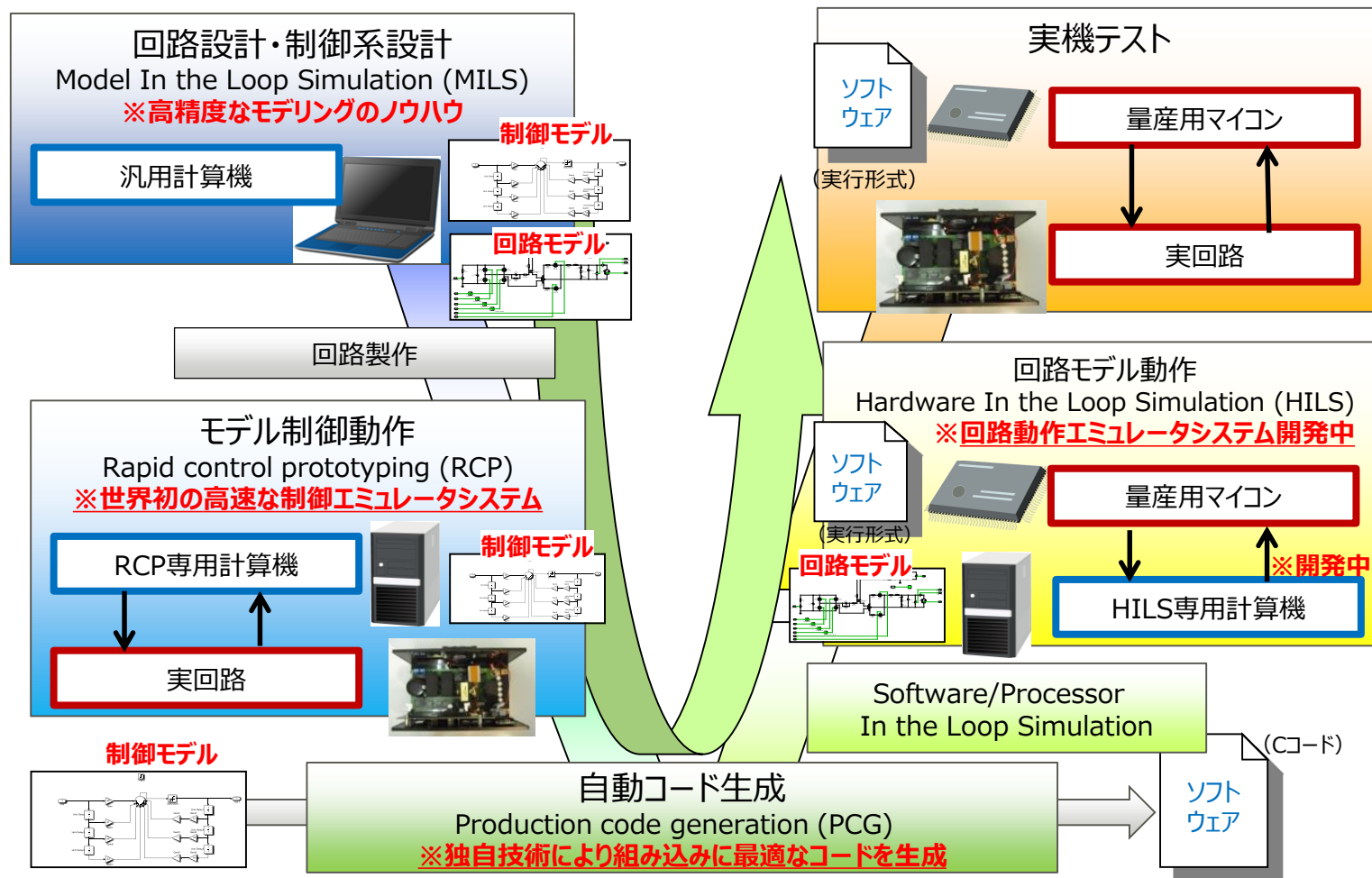


モデルベース開発 (MBD) の適用

- ・ システム全体をモデル化し、モデル上で最適な制御設計を行う。
- ・ 効率的な開発プロセスでバグの混入を防ぐ。

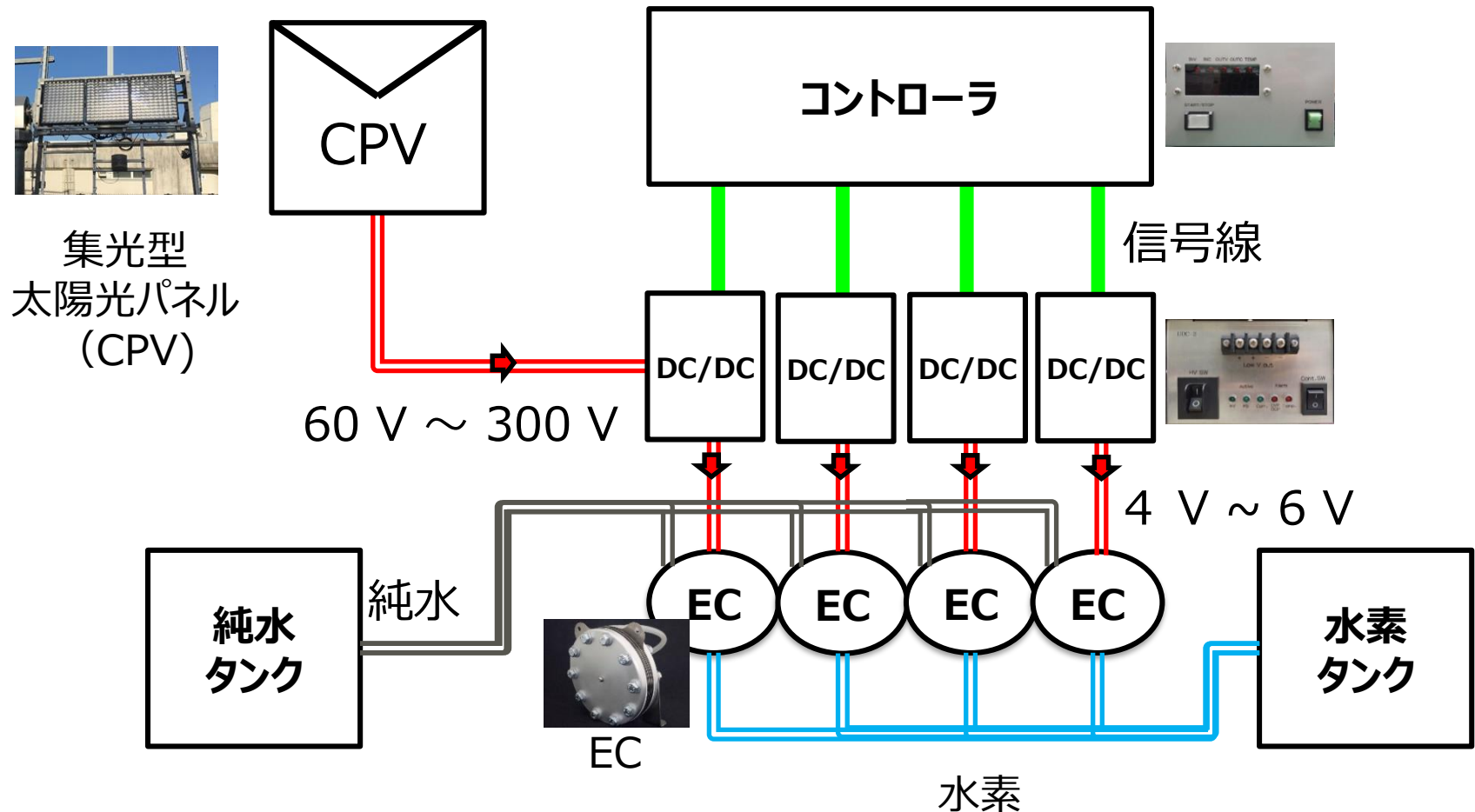
モデルベース開発技術とは

- シミュレーションから実装・検証まで、モデルを活用する開発プロセス
 - 独自の電源モデルベース開発環境 (MATLABEXPO2014, APEC2014)



■ 太陽光-水素変換システム

- 電力変換器 (DC-DC) , 水電解セル (EC) , 集光型太陽光パネル (CPV)

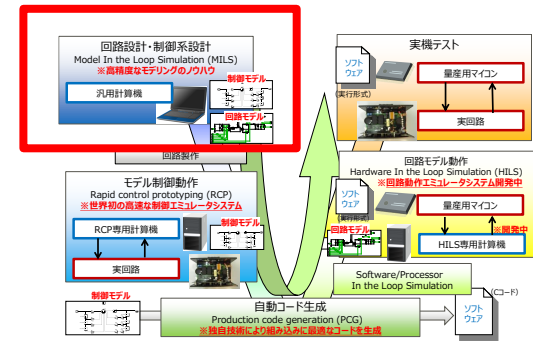
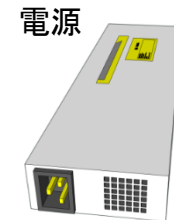
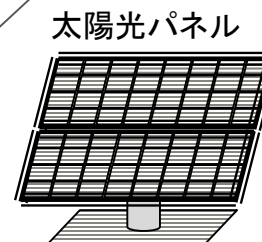
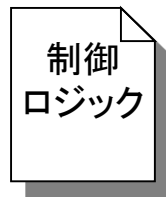
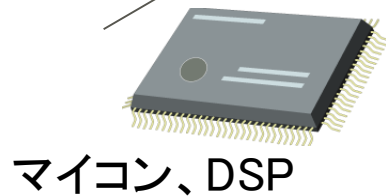
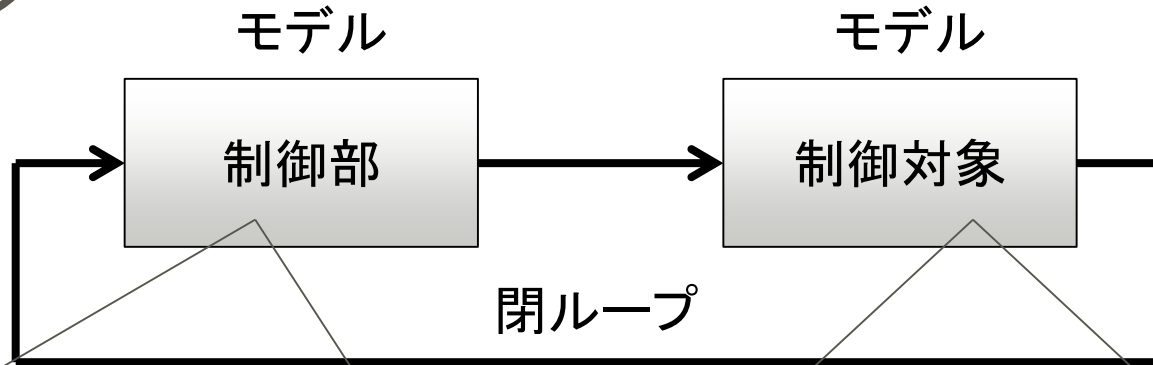


■ 最初の工程：MILS

- 全てをモデル化し、シミュレーション上で検証する。



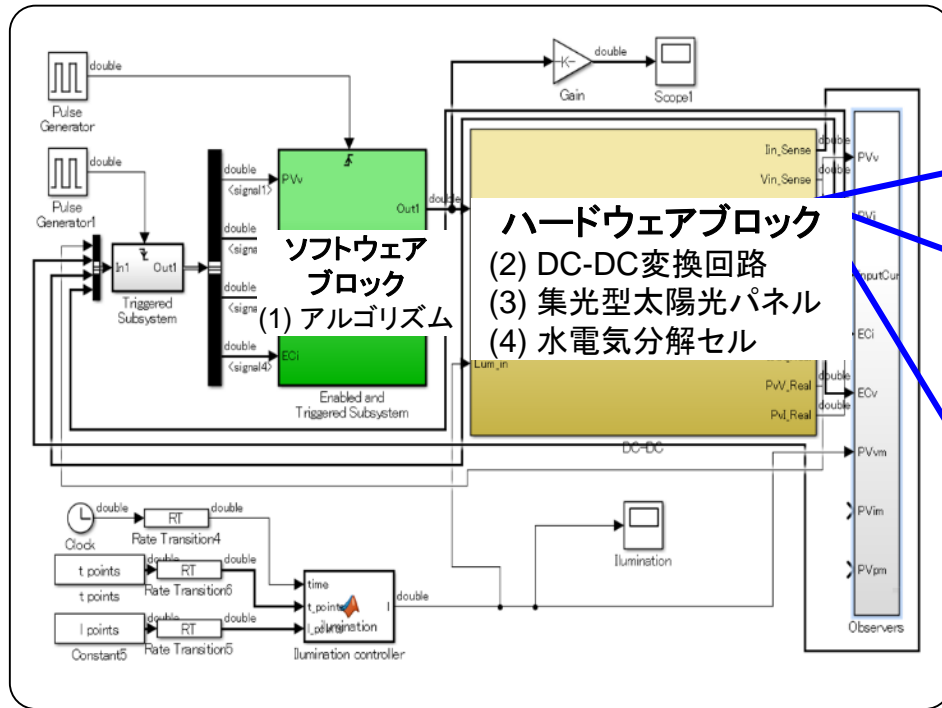
全て計算機上



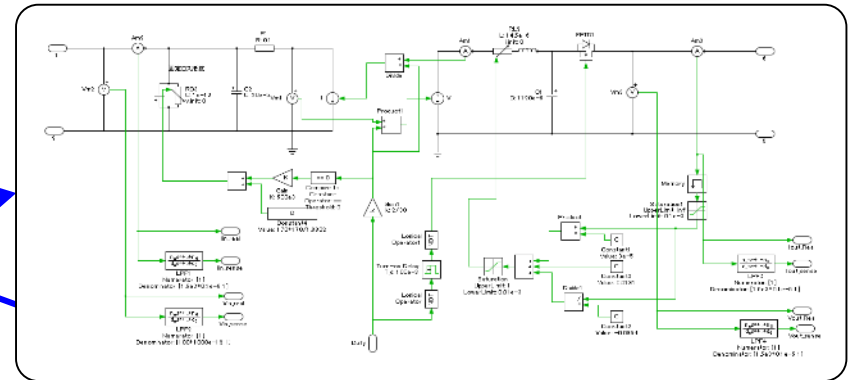
MILSモデル構築 (モデル全体)

- 制御系 : MATLAB/Simulink®
- 回路ブロック : Simulink®アドオンの回路シミュレータ

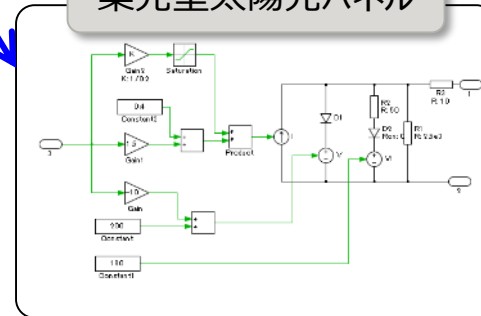
最上位モデル



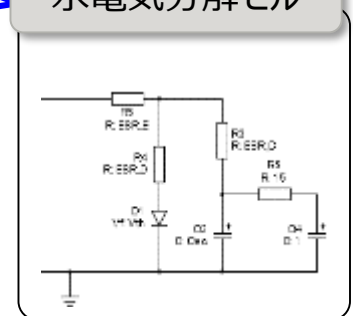
DC-DC変換回路



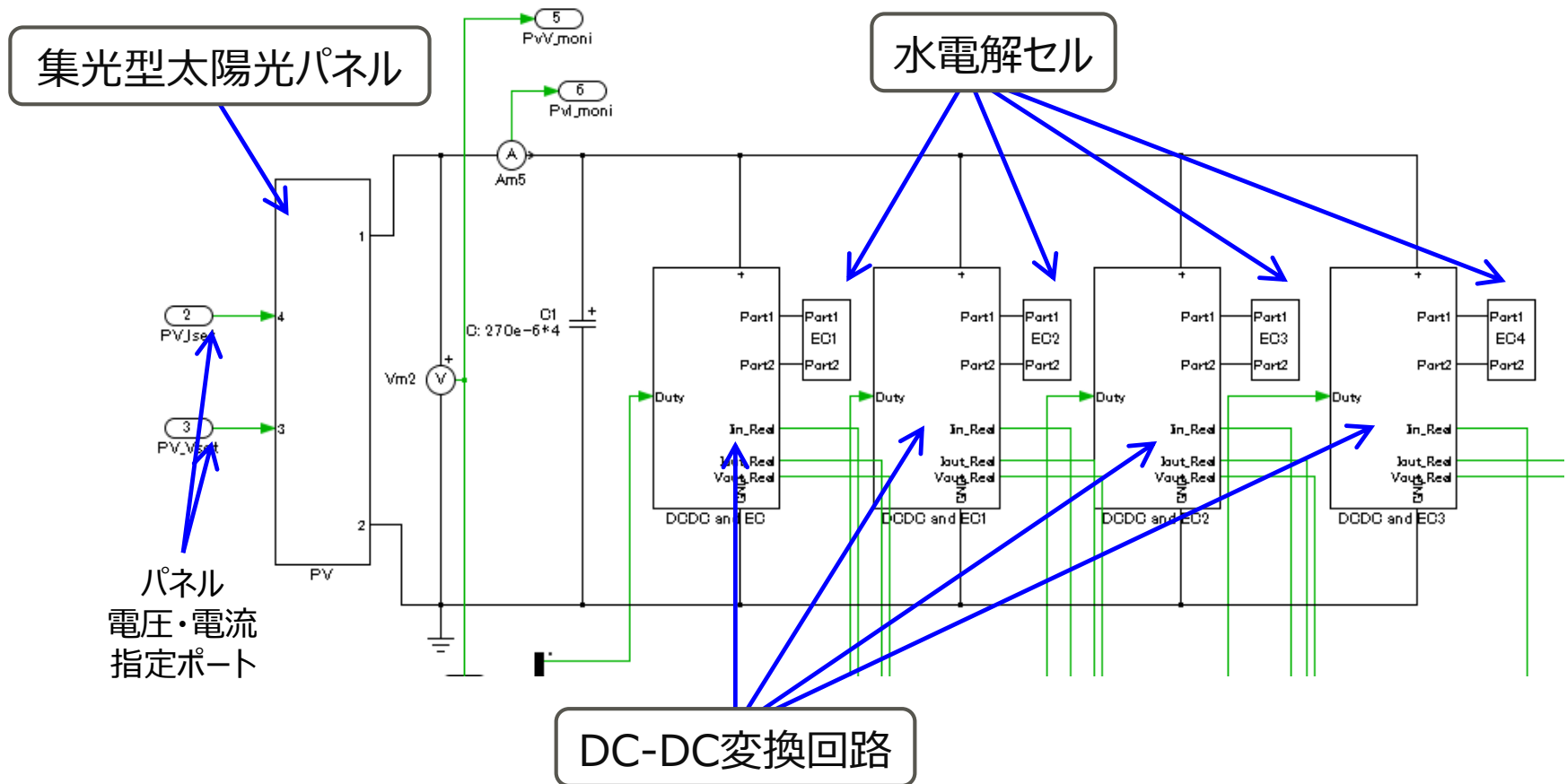
集光型太陽光パネル



水電気分解セル

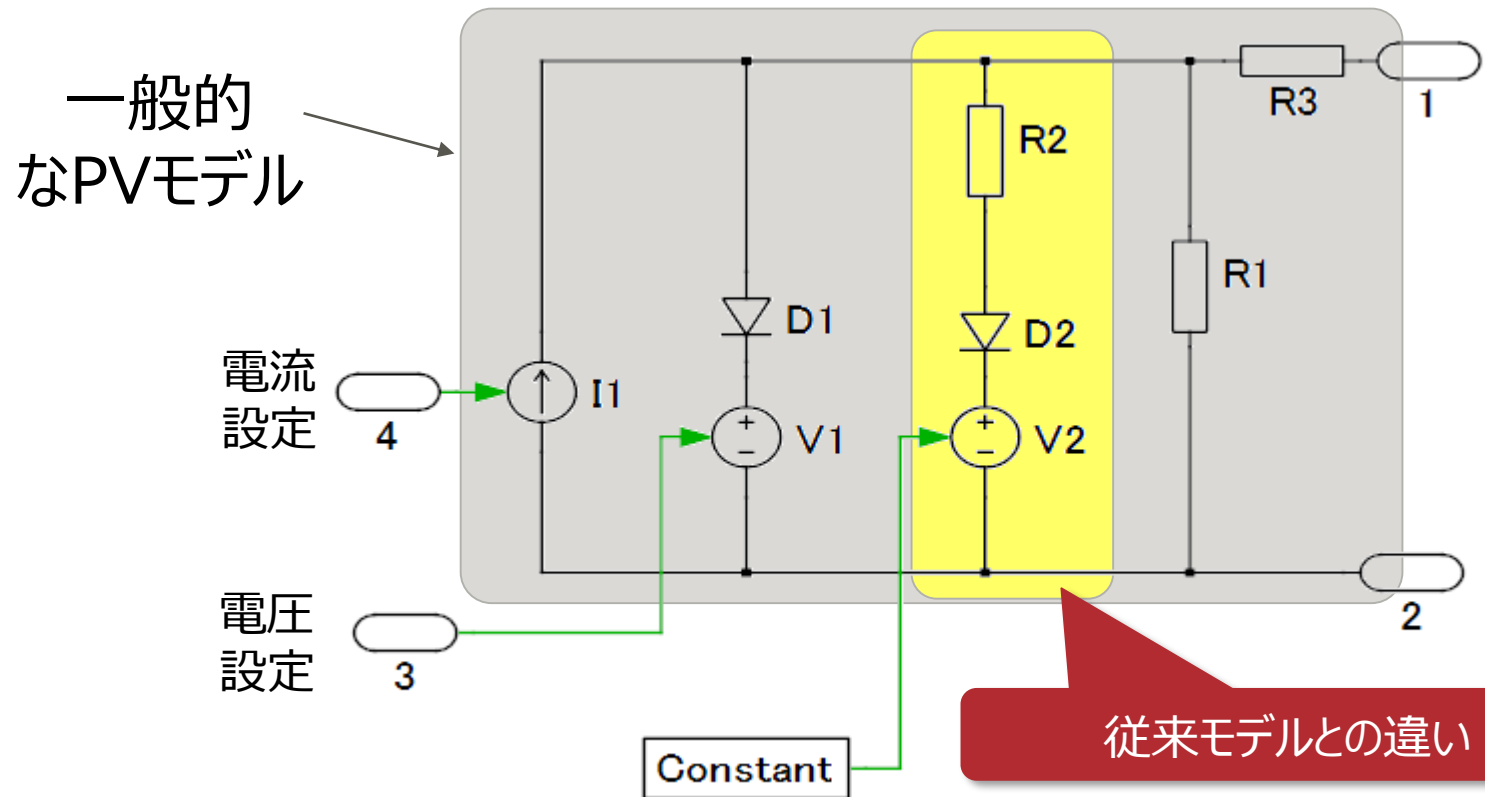


- DC-DC変換回路
- 集光型太陽光パネル CPV(Concentration photovoltaic)
- 水電解セル (Electrolyzers)

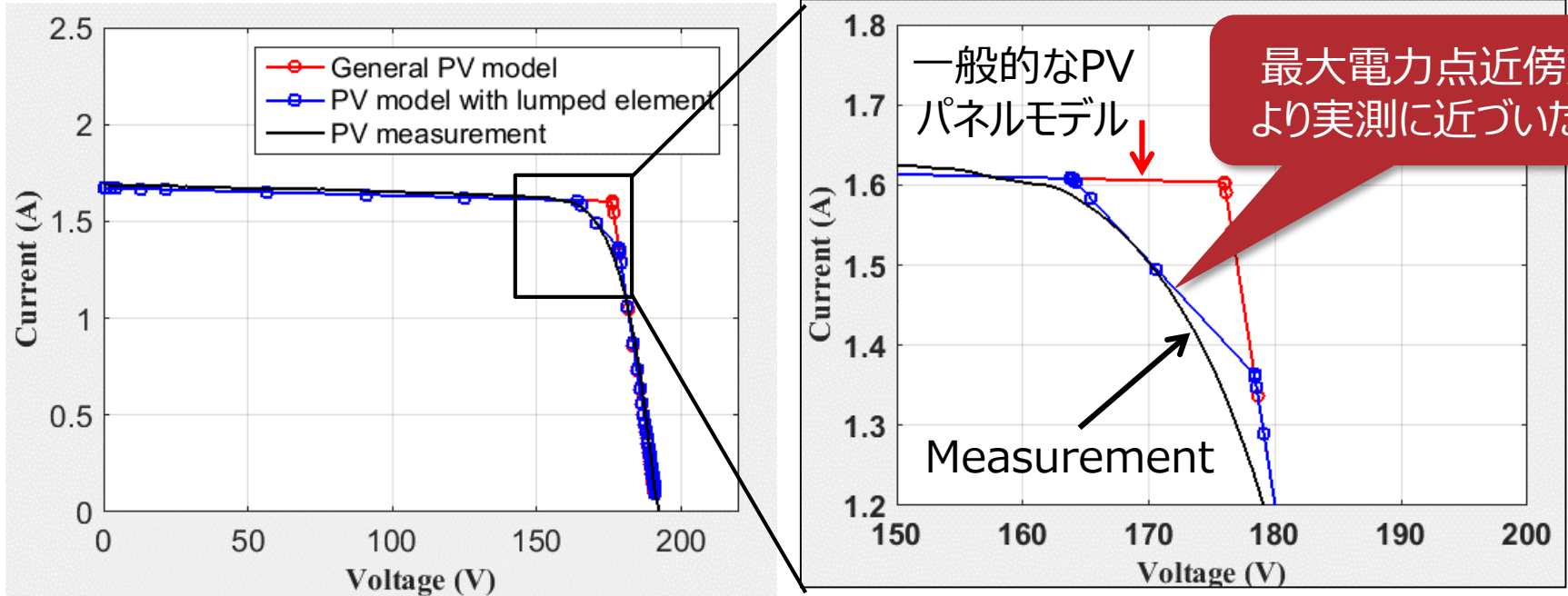


■ 等価回路を用いたモデル

- 本システムではMPPT動作とコンバータ切り替え動作の両立がポイントであったため、MPPT付近の特性を実パネルにできるだけ近づける必要がある。
- 最大電力点近傍の特性を実V-I特性に基づいて近似する。



■ V-I特性

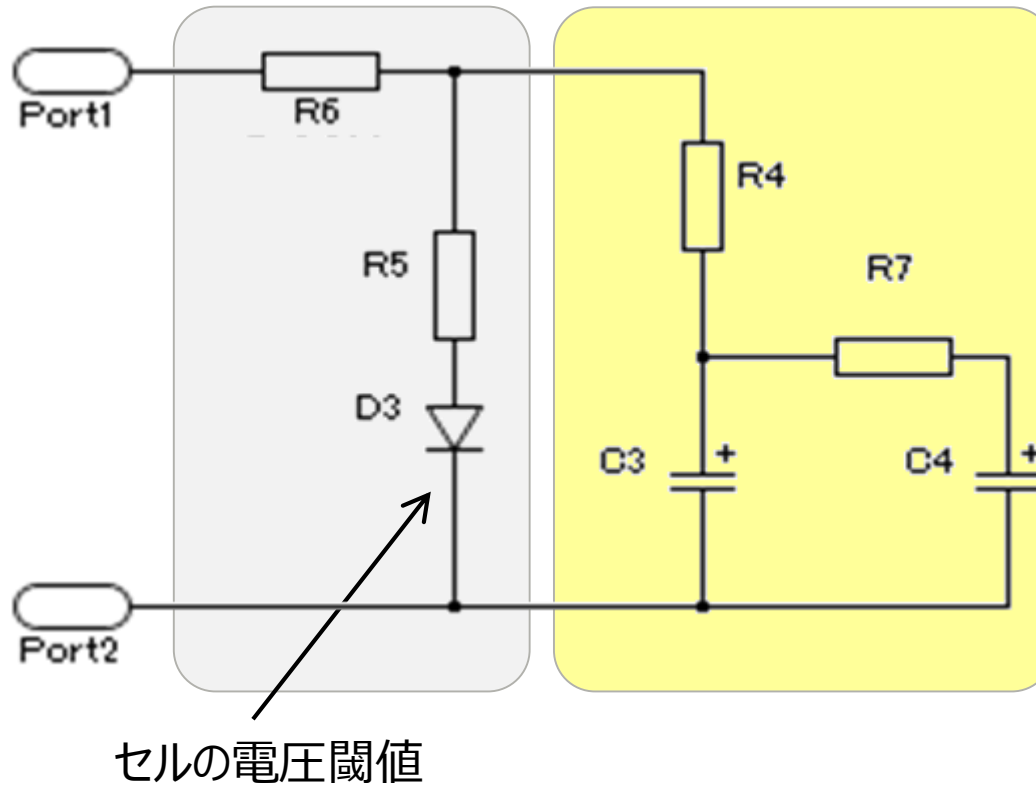


最大電力点近傍の特性を実物に合わせる事でMPPT制御の検証が可能となる。

- 今回のシステムのようにMPPTとコンバータ切り替えの両立など過渡応答を評価する必要がある。

静的なV-I特性を再現するモデル

過渡応答を再現するモデル

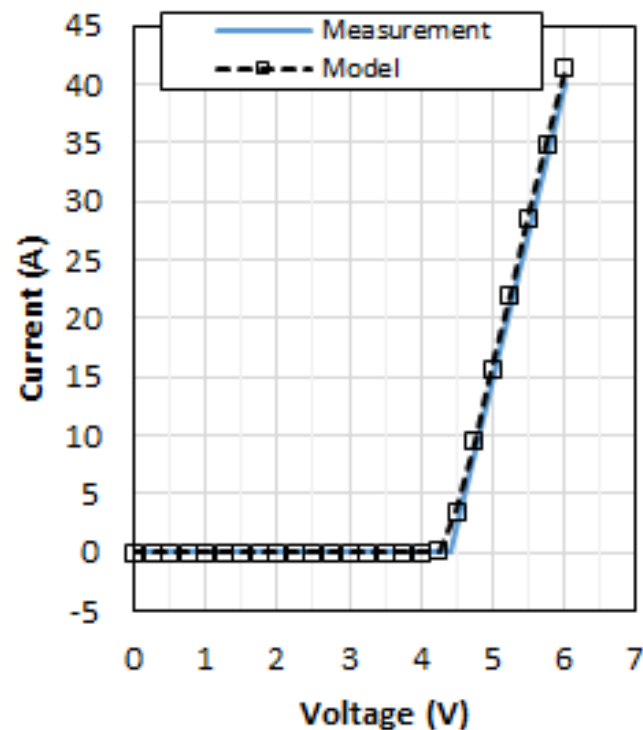


水電解セルの静特性と過渡応答特性の両方をモデル化する事がポイント。

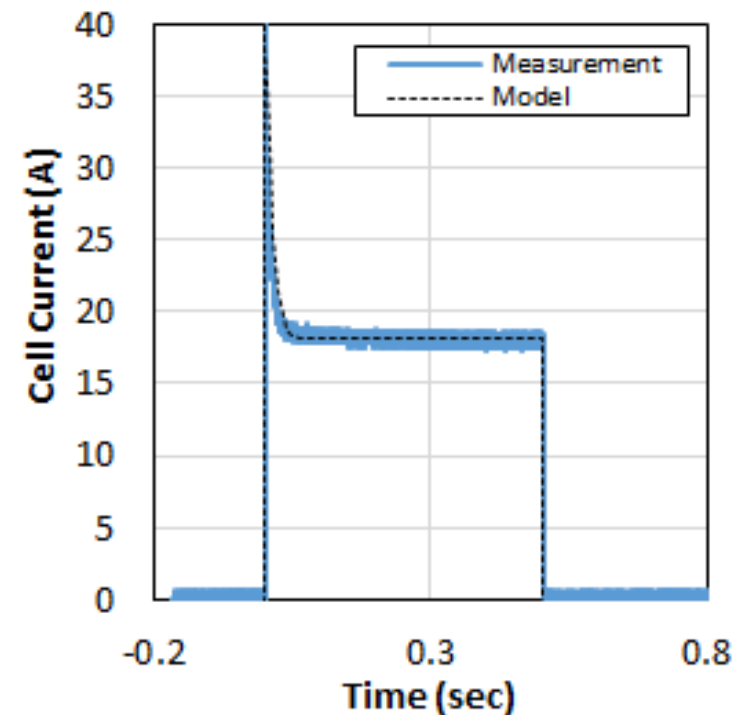
■ 静特性と過渡応答のモデル化

- 実測値を用いてフィッティングを実施。

静特性



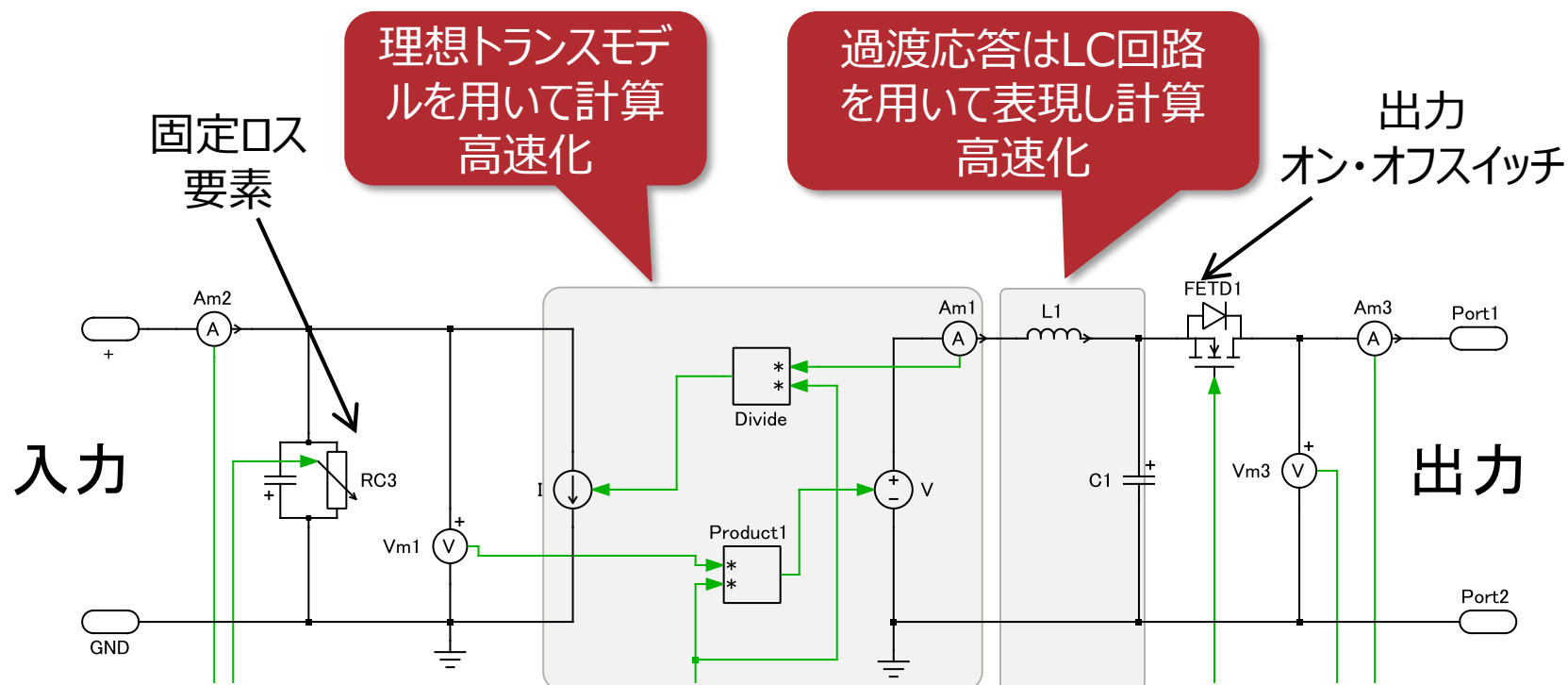
過渡応答特性



静特性、過渡応答特性共に実測値と一致するモデルを構築。

■ フェイズシフトフルブリッジ方式の回路をモデル化

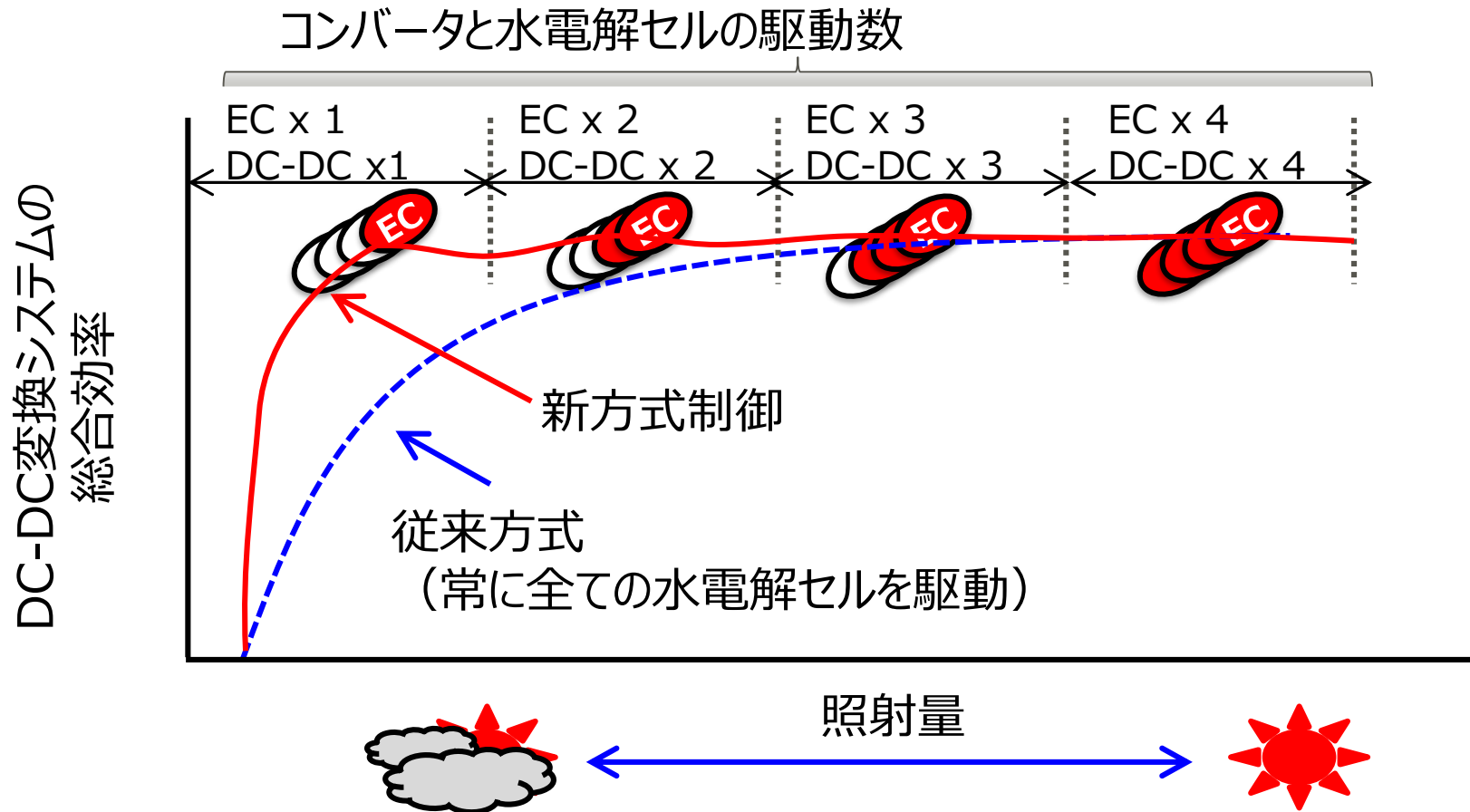
- 等価回路で単純化する事により演算量を減らしてシミュレーションを高速化。
- SPICEの詳細モデルから求めた損失の特性を等価回路で表現して単純化。

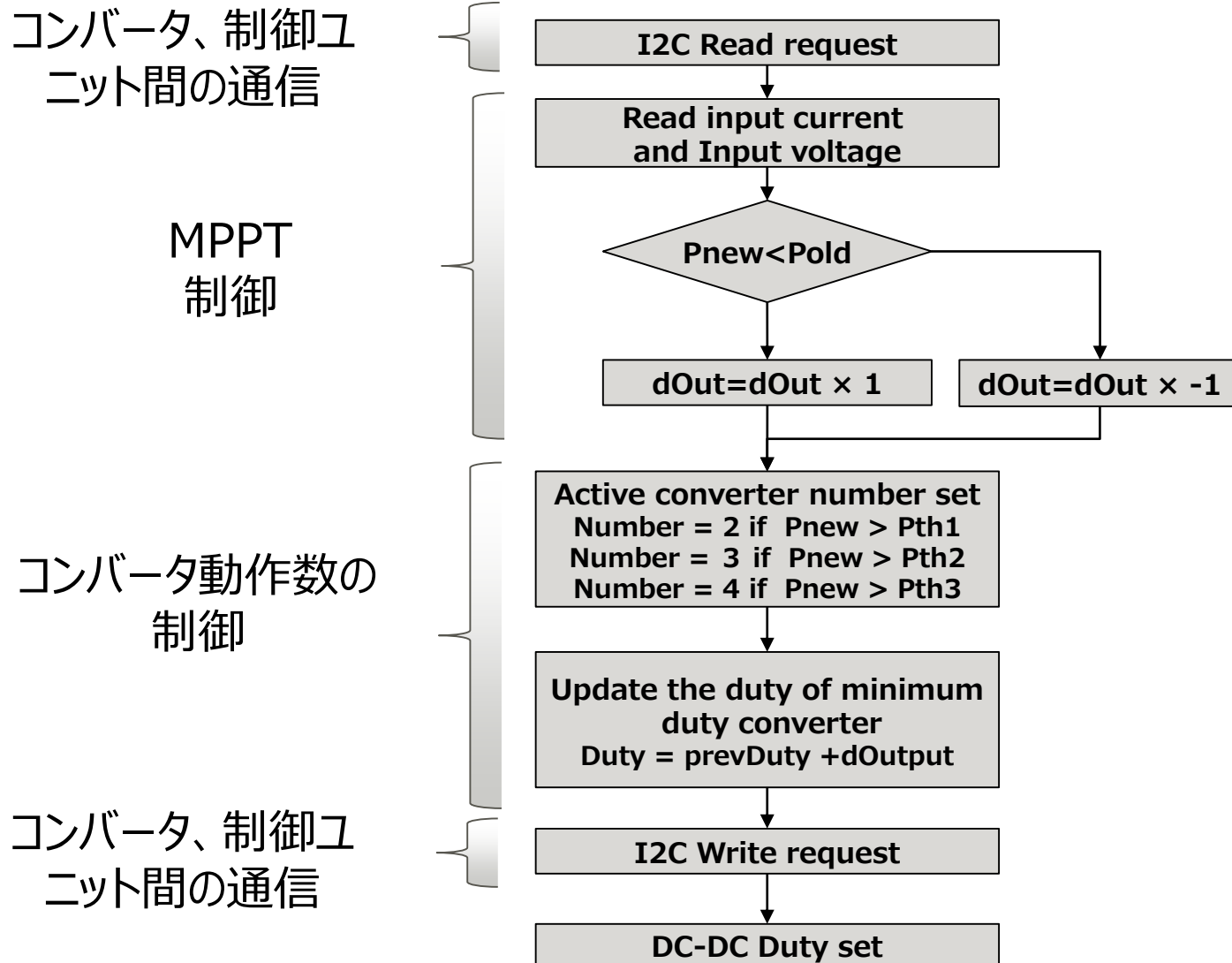


DC-DC変換回路のモデルは必要な特性を維持しつつ高速化に成功。

■ 実装したい制御

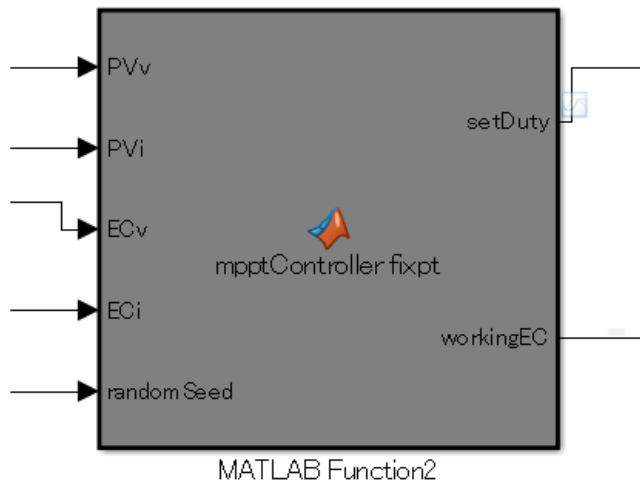
- 太陽光の発電状況に合わせて水電解セルの駆動数を切り替えるアルゴリズム





■ フローチャートに基づいてS-functionをコーディングする。

S-Functionブロック

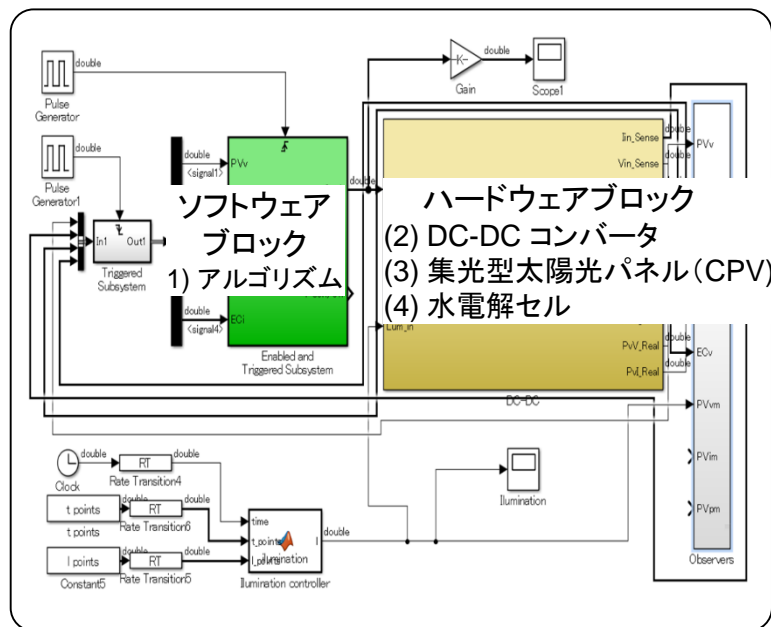


```
217 *
218
219 - if isActive
220     % アクティブ時処理
221     %
222     % メイン動作
223     %
224
225     Pnew = fi(fi(PVv, 0, 18, 0, fm) * sum(fi(PVi, 0, 12, 0, fm)), 1, 25, 0,
226
227     % このループでΔx (dOutput) の符号が変化するかどうか記憶する
228     % 符号が変化すれば 0, 変化しなければ 1 を代入する
229     %
230     if Pnew < Pold % Pvp_epsは正で定義
231         dOutput(:) = -dOutput;
232     else
233         dOutput(:) = dOutput;
234     end;
235
236     % ↑ここまでで、Δxの符号と大きさが決定する
237
238     % 太陽電池から十分なパワーを得られているなら次を起動する
239     if (activeNumber == 3) && (Pnew > Pvp_up_4ECs)
240         activeNumber(:) = int8(4);
241         for i = 1:4
242             if priority(i,1) == 4
243                 numtmp = i;
244             end
245         end
246         currentDuty(numtmp) = 350;
247         wakeup_ec(numtmp) = 1;
248     elseif (activeNumber == 2) && (Pnew > Pvp_up_3ECs)
249         activeNumber(:) = int8(3);
250         for i = 1:4
251             if priority(i,1) == 3
252                 numtmp = i;
253             end
254         end
255         currentDuty(numtmp) = 350;
256         wakeup_ec(numtmp) = 1;
257     elseif (activeNumber == 1) && (Pnew > Pvp_up_2ECs)
258         activeNumber(:) = int8(2);
```

コマンドウィンドウ

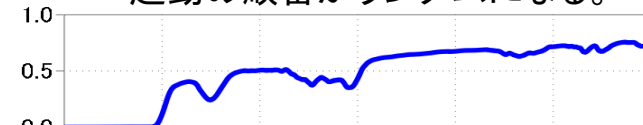
■ コンバータ切り替え動作の確認

ビデオによるシミュレーションデモ

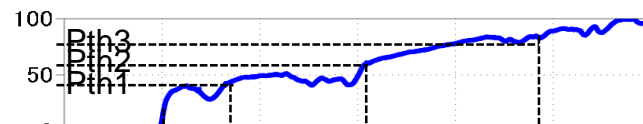


水電解セルの劣化を抑えるため
起動の順番がランダムになる。

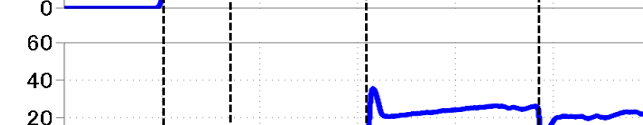
日射量
X100 (%)



太陽光パネル
出力電力 (W)



コンバータ1
入力電力 (W)



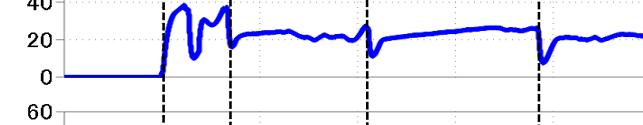
コンバータ2
入力電力 (W)



コンバータ3
入力電力 (W)



コンバータ4
入力電力 (W)

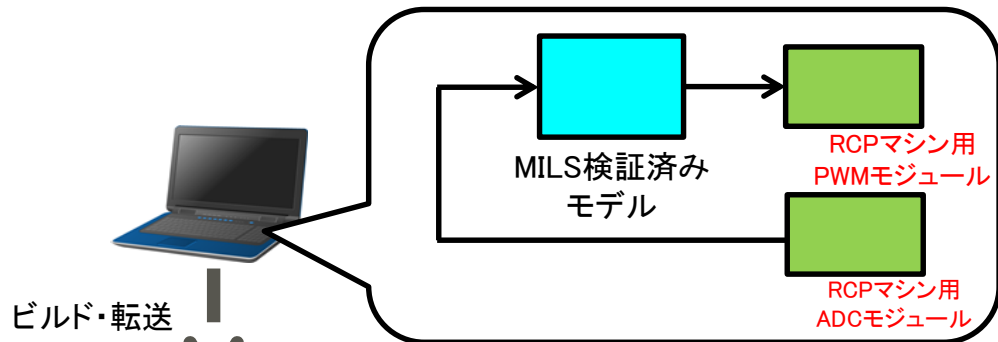
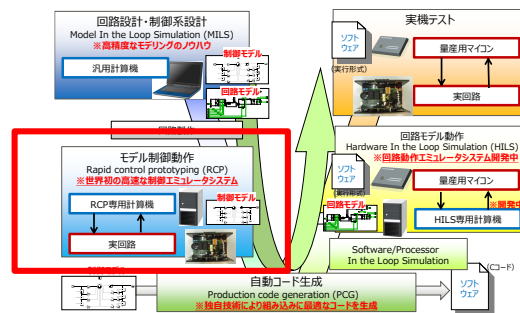


t0 t1 t2 t3
Time (sec)

想定通りに日射量に応じてコンバータが切り替わる事を確認。

■ MILSの次の工程⇒RCP

- モデルの回路部を実回路に置き換え、制御部はモデルをそのままリアルタイムエミュレータで実行する。



コントローラモデル (Simulink)

ビルド・転送

RCPマシン
AD-PROCYON
(A&D社)

写真提供:A&D社

高速・高分解能I/Oボード
富士通



パルス幅制御信号 (PWM)

電圧

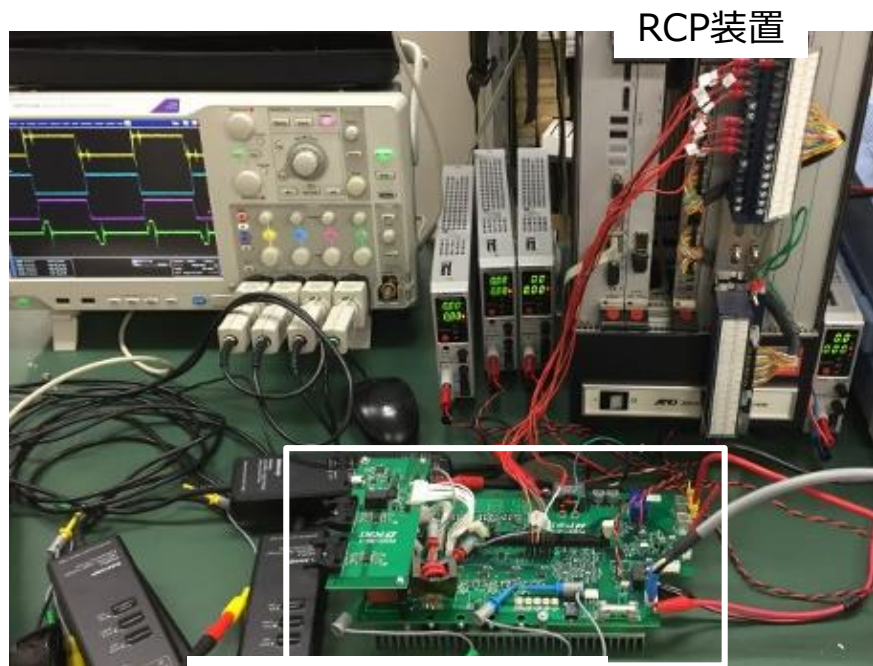


実電源回路

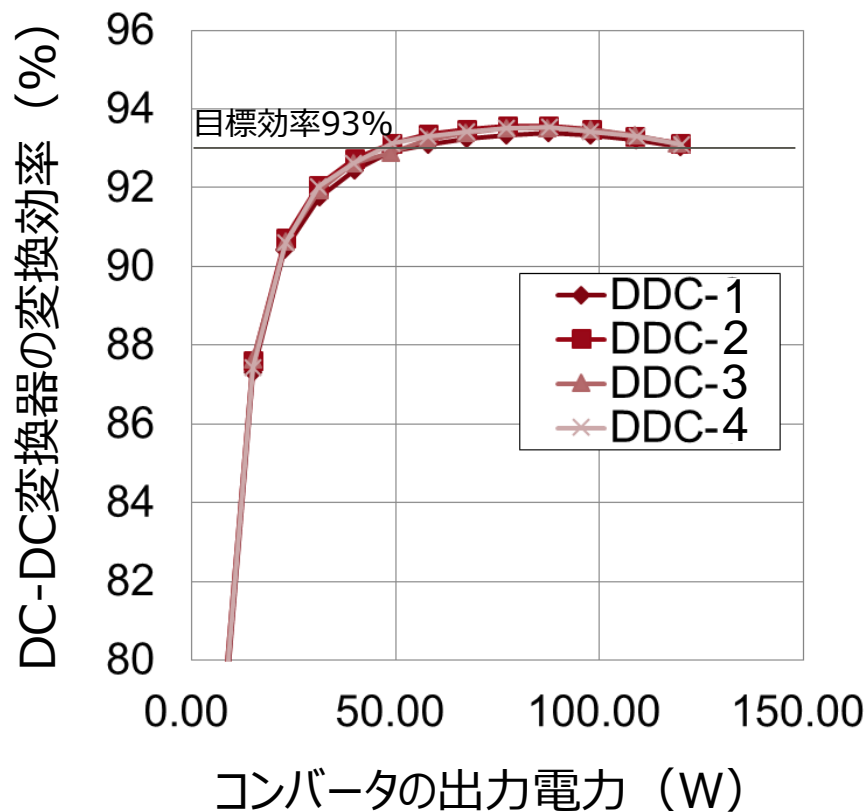
RCPを用いる事で、回路とソフトのデバッグを切り分ける事が可能となり、デバッグ工数を削減する事ができる。

■ DC-DC変換部のRCP検証

- DC-DC変換器の回路が正常に動作しているかどうかを確認する。
- 目標効率：93%



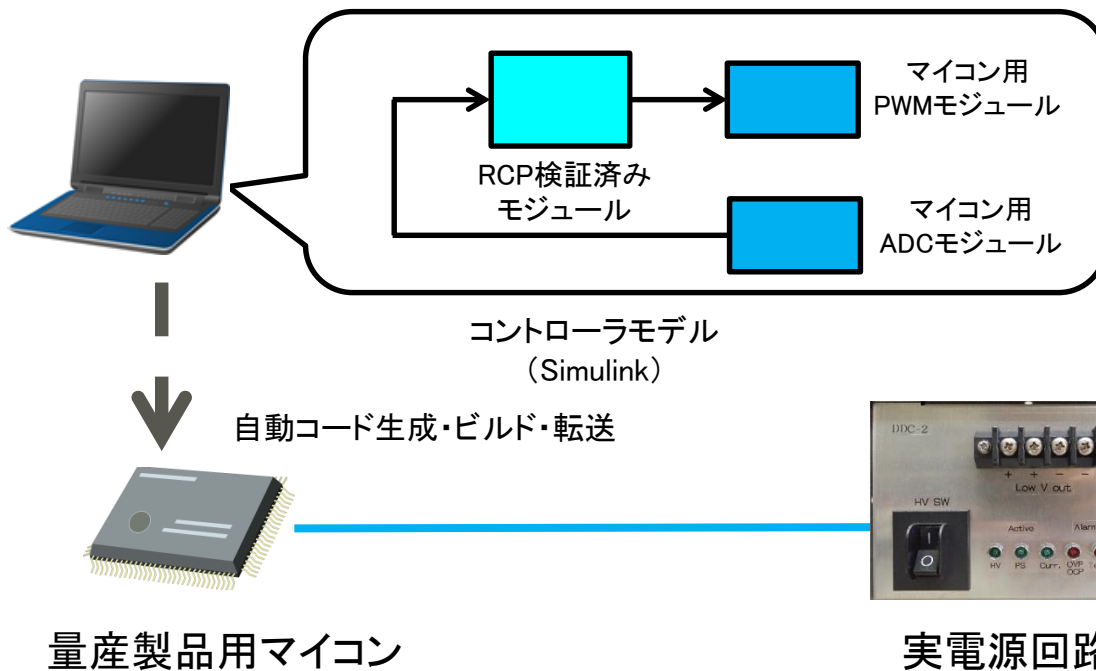
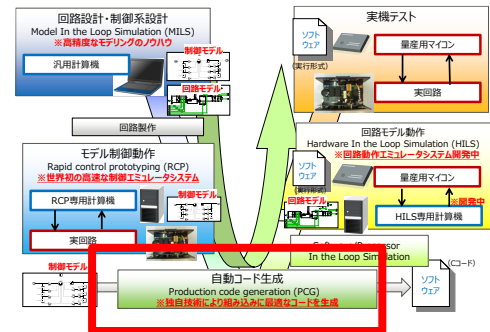
DC-DC変換ユニット回路



RCPにより所望の効率が得られている事を確認。

■ RCPの次の工程⇒PCG

- 検証済みのモデルに基づいて自動コード生成で組み込みファームを生成しハンドコーディングによるバグを抑圧する。



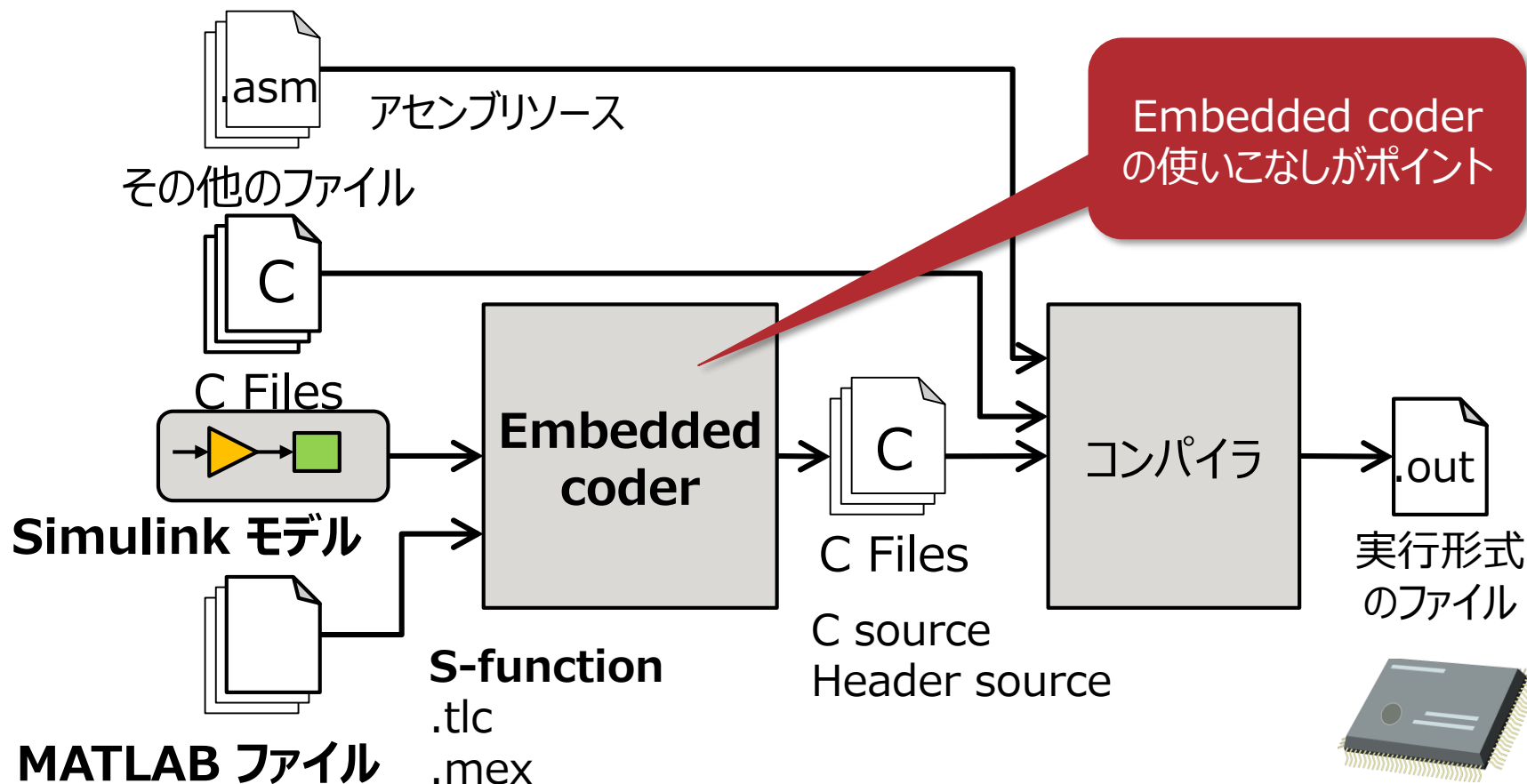
実電源回路



制御装置

本開発のようなエネルギーマネジメントシステムにおいてはバグが存在すると重大な故障や事故につながる。自動コード生成によるバグ排除が必須。

- MATLAB/Simulink®のEmbedded coder を用いて組み込みマイコン用のコードを生成する。



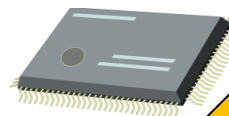
■ MILSモデルのロジックをコード生成用のモデルに変更

■ ロジックの実行優先度に応じてMILSモデルのロジックを割り振る。

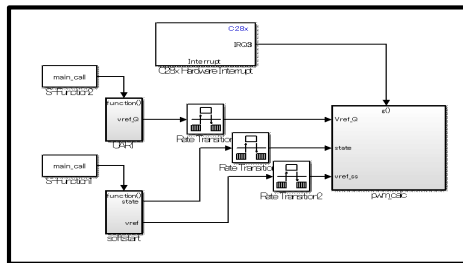
MILS
のモデル



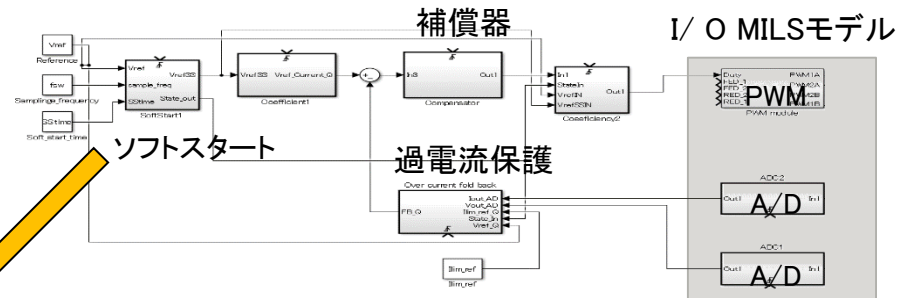
コード生成
モデル



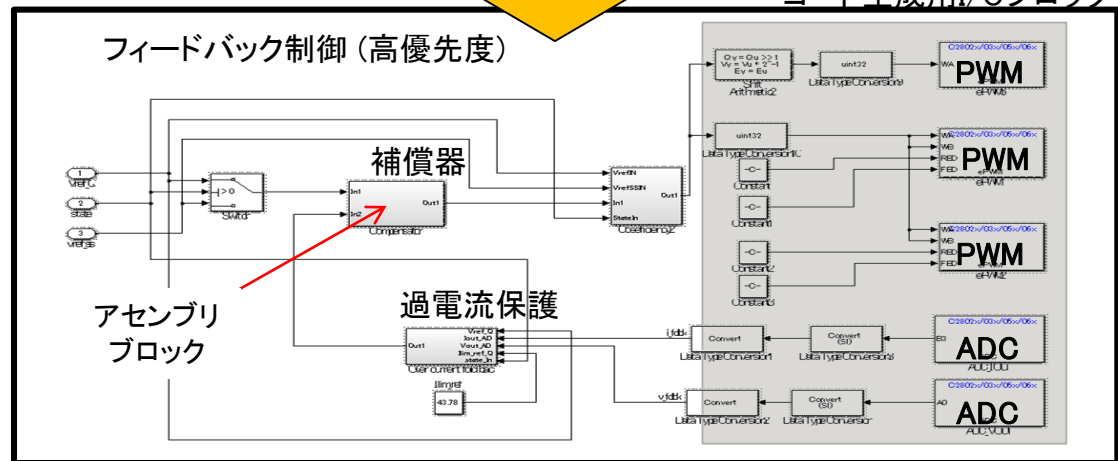
バックグラウンド処理 (低優先度)



- ・ソフトスタート
- ・通信, 等

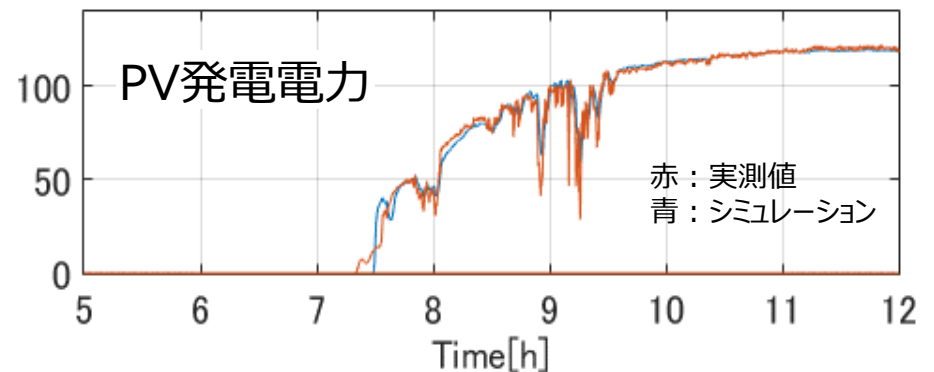
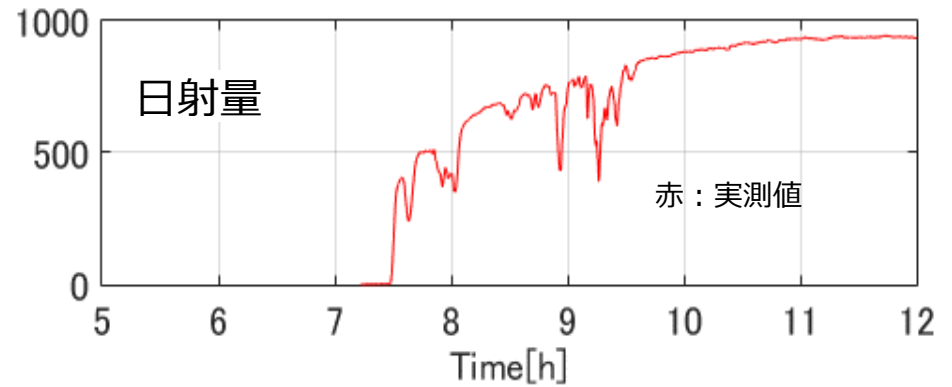
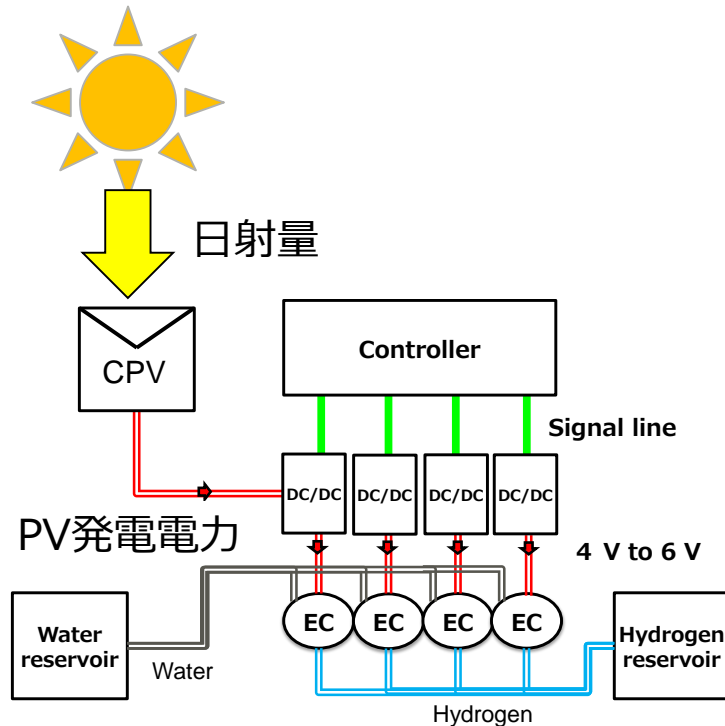


コード生成用I/Oブロック



割り込み管理用フレームワークのライブラリ化が重要なポイント。

■ 日射量とPV発電量の関係



MPPT機能により太陽光に比例してPV出力が得られることを確認。


まとめ

■ MATLAB/Simulink®によるモデルベース開発を活用した水素蓄エネシステムの設計検証のポイント

- MPPT特性の検証を行うためにはPVパネルの最大電力近傍の特性を実物に合わせる。
- システムの過渡応答特性を検証するために水電解セルの静特性と過渡応答特性の両方を実物に合わせる。
- シミュレーションを高速化するためにDC-DC変換回路のモデルは特性を保ちつつ単純化する
- デバッグ工数を削減するために回路とソフトのデバッグを切り分けるRCPを活用する。
- バグのないソフトを実装するためにはコード生成を活用、かつ割り込み管理フレームワークのライブラリ化を行う。

■ 今後の取り組み

- より大規模なシステムへの展開と必要な技術の開発
 - 大規模システムにおいて想定される温度や特性のばらつきに対応するための最適制御技術や、AI技術を活用する。(Optimization Toolboxなどの活用)
- 予測制御の適用
 - 太陽光の変動、負荷変動のモデル化を行う。(Model Predictive Control Toolboxの活用)



FUJITSU

shaping tomorrow with you