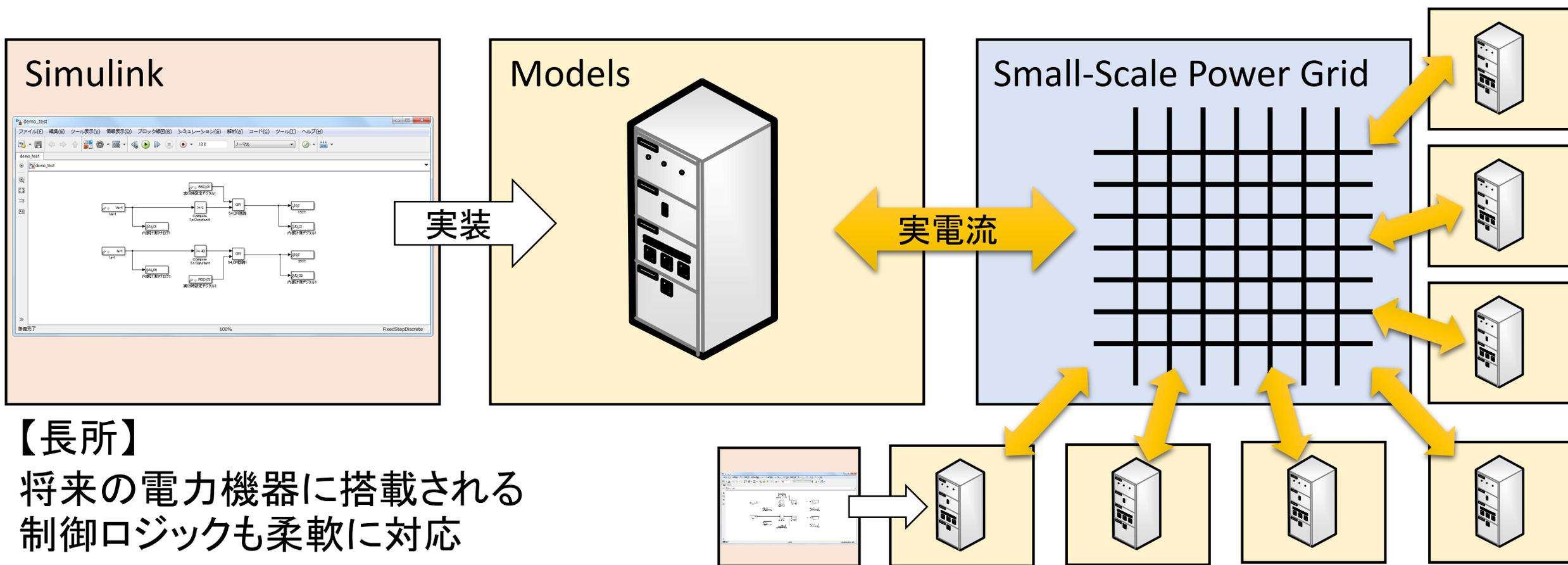


E2: 分散型電源モデルを含めた 電力システム用HILシミュレータとSimulink®適用事例

2019年5月28日(火) 14:30~15:10 グランドニッコー東京台場

富士電機(株) パワエレシステムエネルギー事業本部
エネルギーマネジメント事業部 電力流通総合技術部 保護制御技術課 石上

Simulinkを使用した「リアルタイム電力システムシミュレータ」とその可能性について



イントロ

蓄電池システムモデル
へのSimulink適応

Q&A

1

2

3

4

5

電力システムシミュレータ
全体像

今後の課題等

イントロ

蓄電池システムモデル
へのSimulink適応

Q&A



電力システムシミュレータ
全体像

今後の課題等

富士電機(株) 事業紹介

電力用パワー半導体等部品レベルから
システム製品レベルまで幅広く展開

5事業	発電プラント	パワエレシステム エネルギー			パワエレシステム インダストリー			電子デバイス	食品流通	
	クリーンなエネルギー	エネルギーの安定供給と最適化			オートメーションと省エネ			小型化・省エネ	省力・省人・省エネ化	
	発電・新エネルギー	エネルギーマネジメント	施設・電源	器具	ファクトリーオートメーション	プロセスオートメーション	社会ソリューション	半導体	自販機	店舗流通
	<ul style="list-style-type: none"> ● 火力 ● 地熱 ● 水力 ● 太陽光・風力 ● 燃料電池 	<ul style="list-style-type: none"> ● エネルギーマネジメントシステム (EMS) ● 電力流通 ● 変電 ● スマートメータ 	<ul style="list-style-type: none"> ● データセンター ● 無停電電源装置 (UPS) ● 配電盤 	<ul style="list-style-type: none"> ● 受配電・制御機器 	<ul style="list-style-type: none"> ● インバータ ● モータ ● FAコンポーネント ● 計測機器 ● FAシステム ● 物流システム 	<ul style="list-style-type: none"> ● 駆動制御 ● 計測制御 	<ul style="list-style-type: none"> ● 鉄道車両電機品 ● EVシステム ● 放射線管理システム ● 船舶用排ガス浄化システム 	<ul style="list-style-type: none"> ● パワー半導体 	<ul style="list-style-type: none"> ● 自動販売機 	<ul style="list-style-type: none"> ● 店舗設備機器 ● 金銭機器

システムソリューション

コンポーネントにエンジニアリングサービス・IoT*技術を組み合わせたシステムソリューション

* Internet of Things (モノのインターネット)。さまざまなモノがネットワークを介してつながり、モノ同士が自律的に最適制御されることで、ビジネスや生活などを根底から変える新たな仕組み

コンポーネント

キーデバイスを活用し、設備やプラントの最適化、安定化、自動化、効率化、省エネを実現する計測機器、制御機器、器具などのコンポーネント



キーデバイス

電力を制御するパワー半導体、社会インフラ・産業分野の安全操業を支えるさまざまな応用技術を有するセンサ

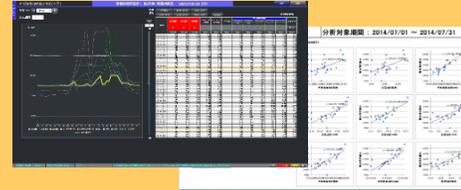
エネルギーマネジメント事業部 紹介

監視制御・自動化



- 系統監視制御システム
- 配電自動化システム
- 発電監視システム
- ダム管理システム
- 保護リレー
- 遠方監視制御システム

需給管理・VPP

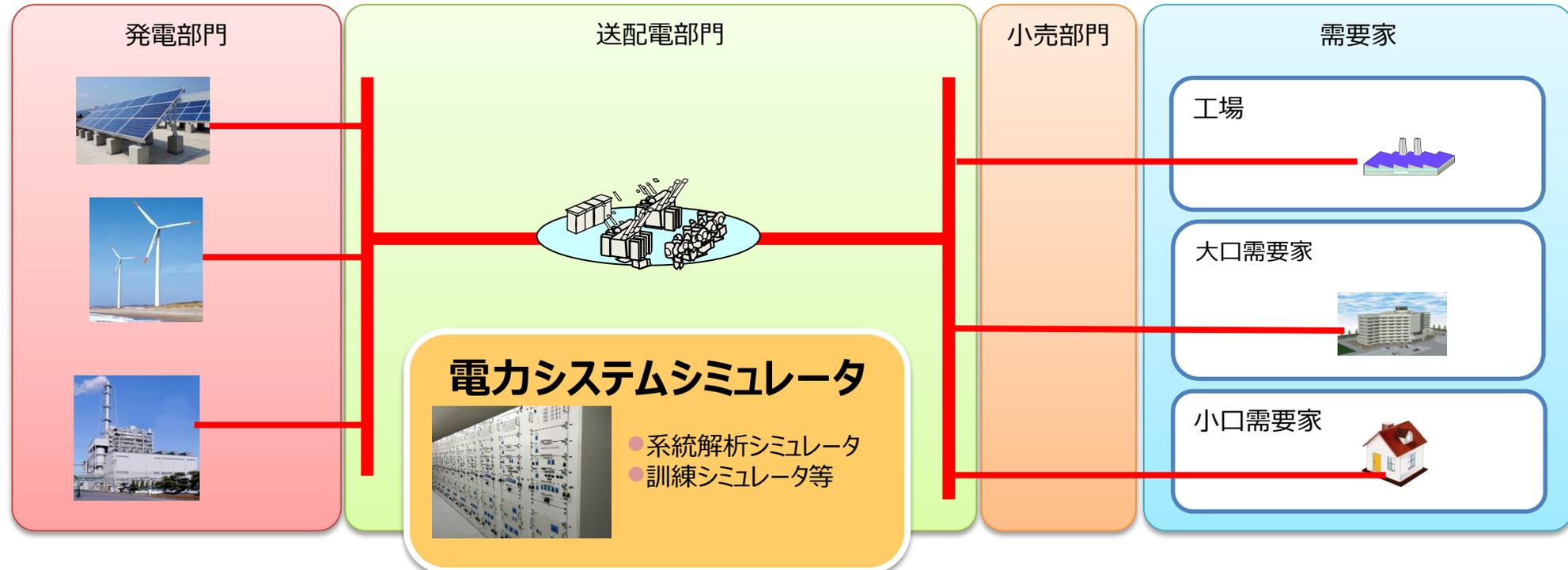


- 需給管理サービス (クラウド)
- 需給管理システム (オンプレミス)
- V P P 蓄電管理

ピークカット・BCP



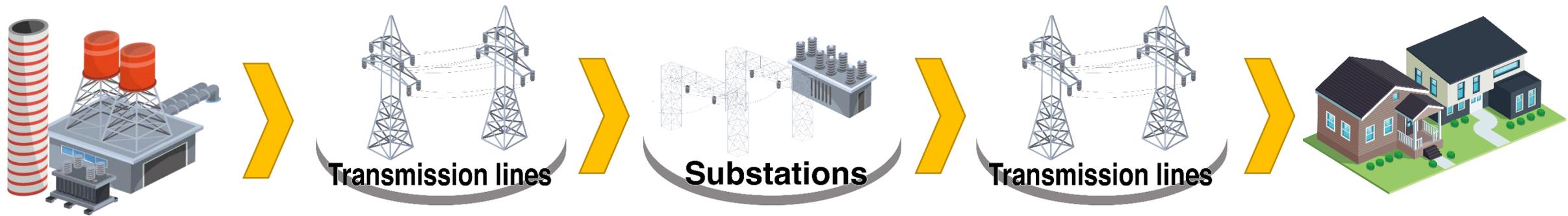
- 蓄電制御システム



電力システムシミュレータの種類

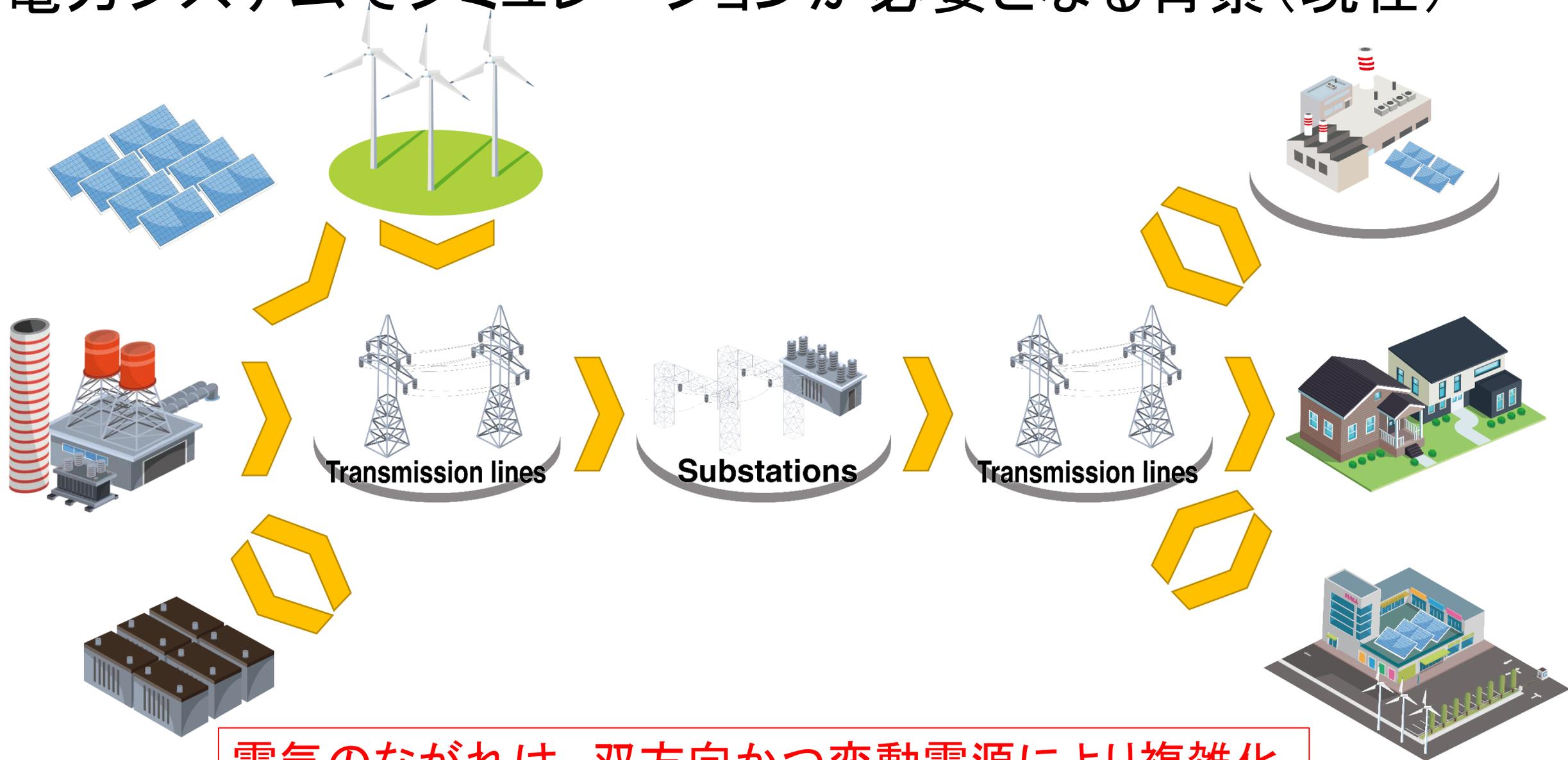
	系統用 シミュレータ	配電用 シミュレータ	発電所用 シミュレータ
解析用 シミュレータ	本日紹介		
訓練用 シミュレータ			
教育用 シミュレータ			

電力システムでシミュレーションが必要となる背景(数十年前)



電気のながれは、発電所から需要家まで一方向のみ

電力システムでシミュレーションが必要となる背景(現在)



電気のながれは、双方向かつ変動電源により複雑化

電力システムでシミュレーションが必要となる背景(現在)

- 時代と共に電力系統は、「生き物」のように変化し、現在は複雑化。
- 正確な診断(計測)と、適切かつ迅速な処方(制御)が必要。
- 主に3つの計測と制御が必要であり、1つでも逸脱すると大停電の恐れあり。

	F	V	S
計測	周波数	電圧	安定度
影響	需給アンバランス (需) 製品品質に悪影響 (給) 発電機保護トリップ	電圧低下 (需) 需要家設備停止 (給) 輸送力制約	発電機脱調 (需) 供給力不足により停電 (給) 発電機次々解列
制御	➤ 発電機周波数調整	➤ 変圧器タップ調整 ➤ 調相設備・電圧調整機器による電圧調整	➤ 発電機安定化制御(PSS) ➤ 安定化装置による緊急時の発電機・負荷遮断

※ 実際の系統では、それぞれの要因が複数関連して停電に至る。

イントロ

蓄電池システムモデル
へのSimulink適応

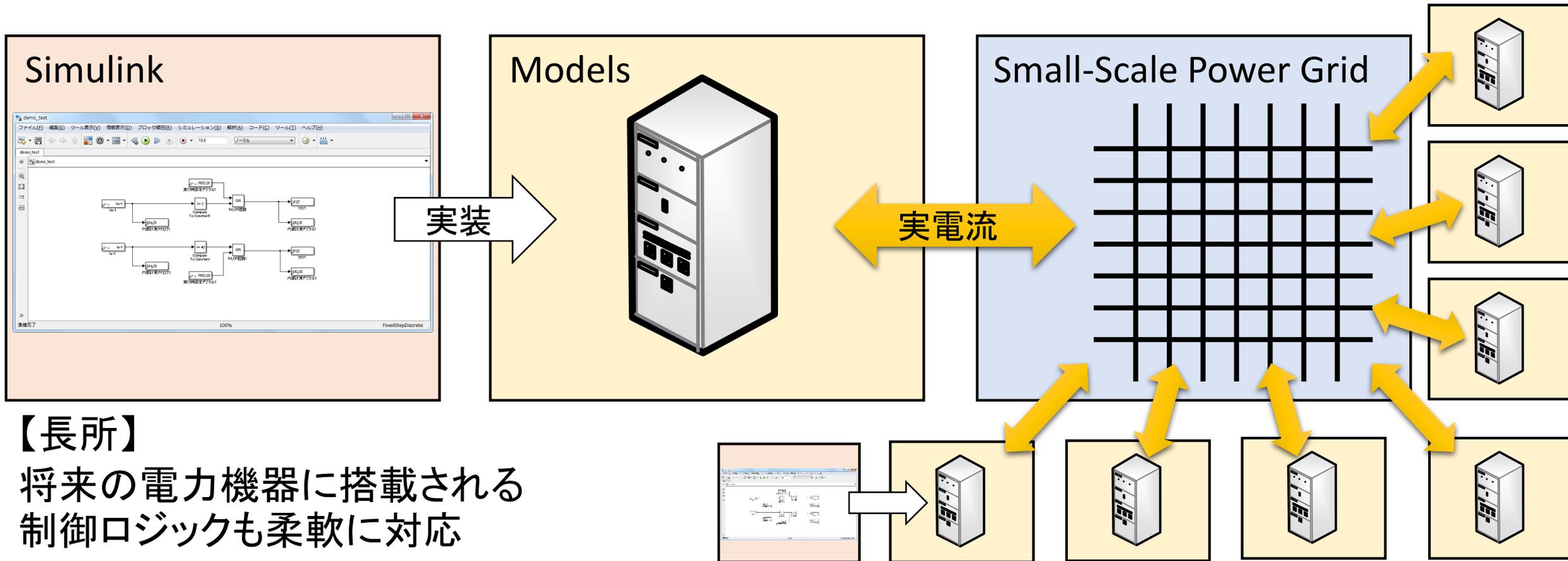
Q&A



電力システムシミュレータ
全体像

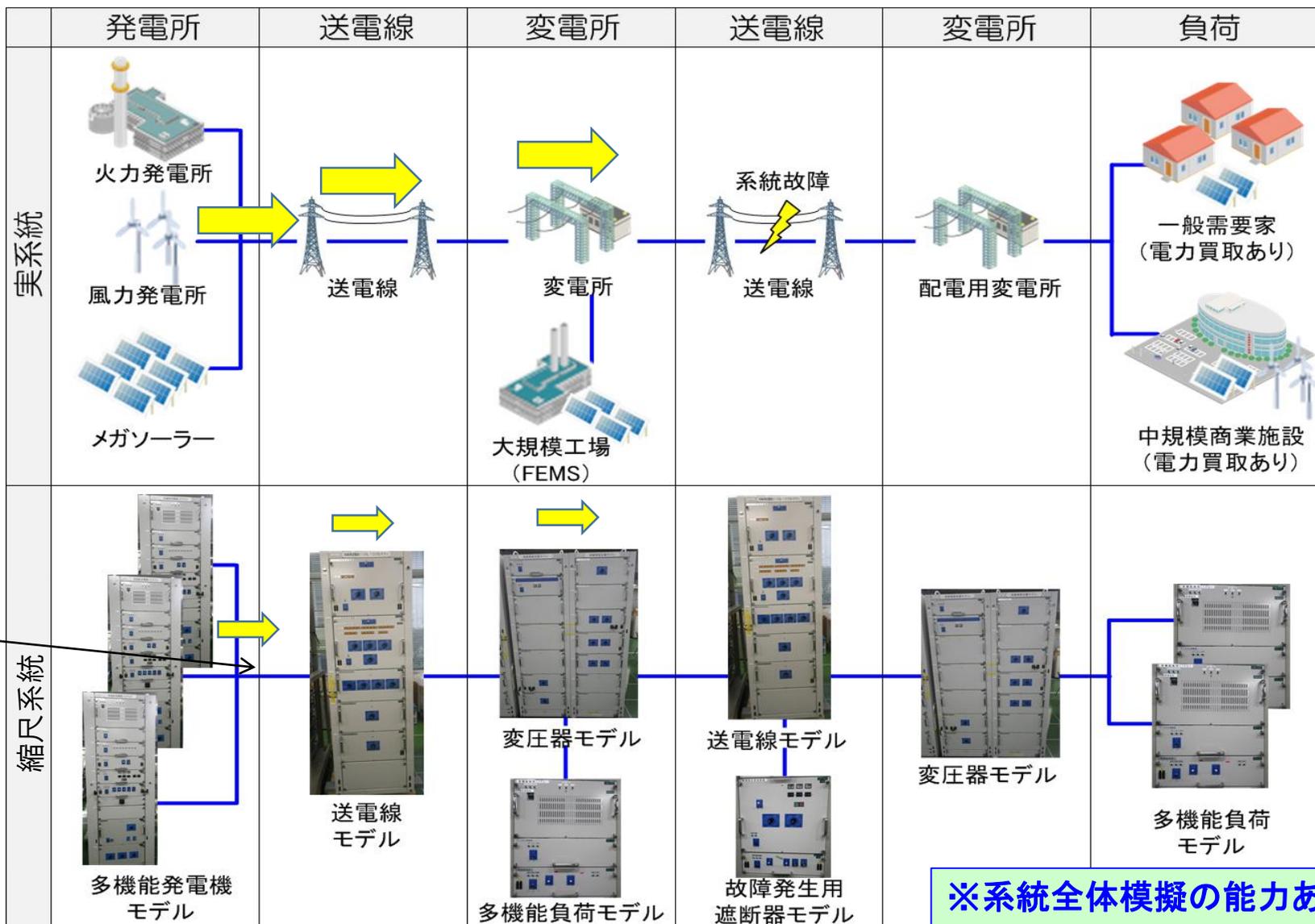
今後の課題等

2. リアルタイム電力システムシミュレータ全体像



電力システムシミュレータの概要

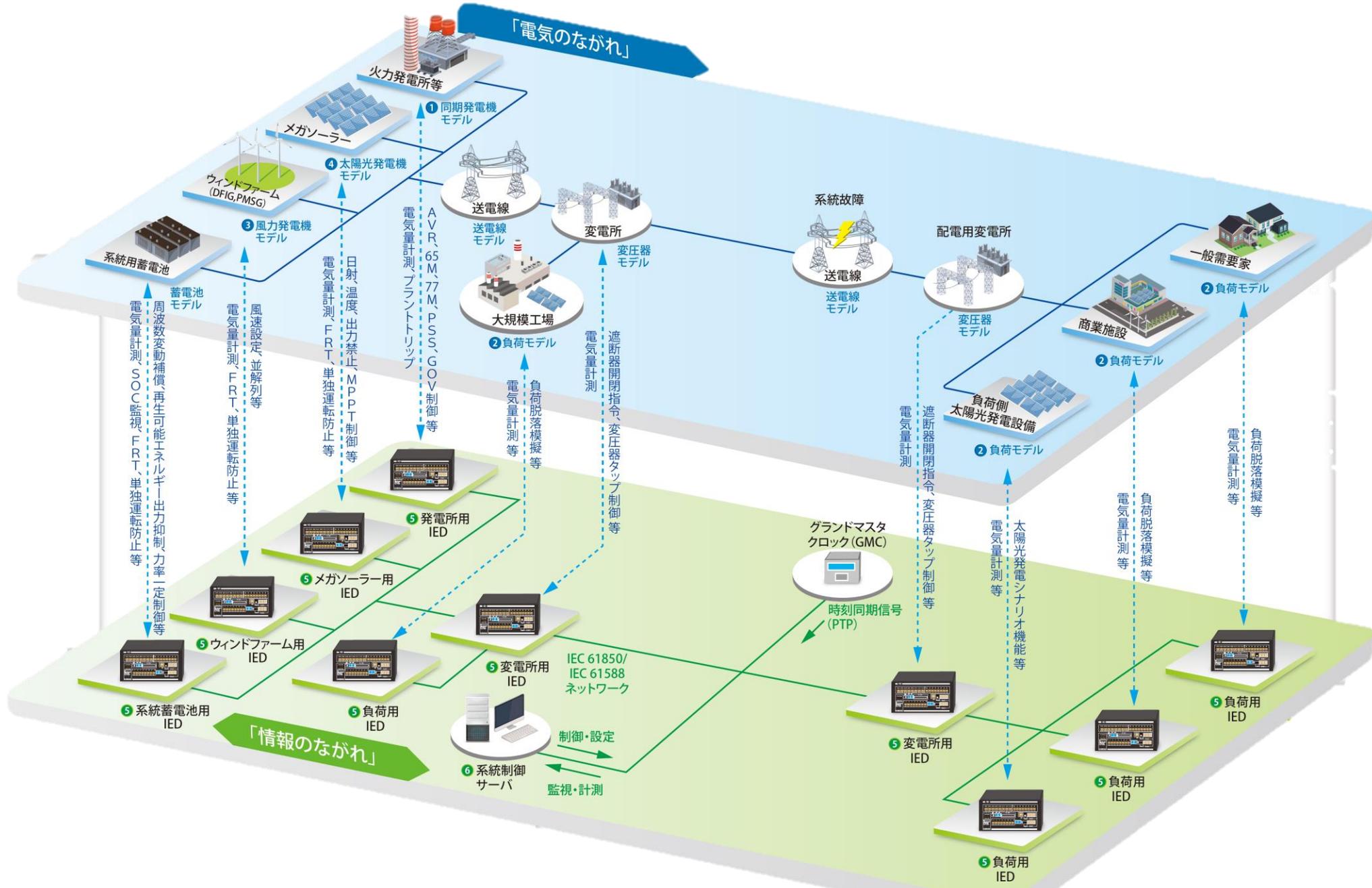
電力システムを等価的に縮尺されたシステムで模擬し、諸々の電気現象を忠実に再現・解析可能



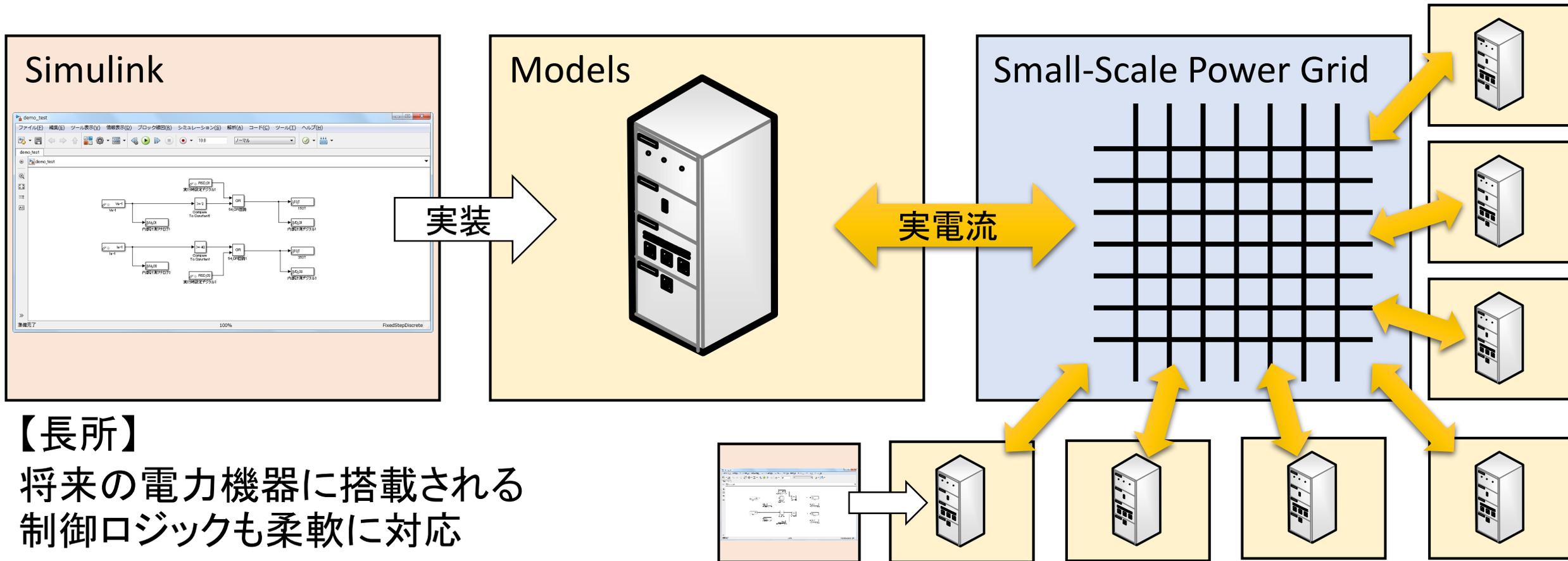
ミニチュア模擬系統の主回路に、定格50V, 62.5mAの電流を流すことで、実際の電気現象として系統事故時等の現象を瞬時値レベルで把握可能

※系統全体模擬の能力あり

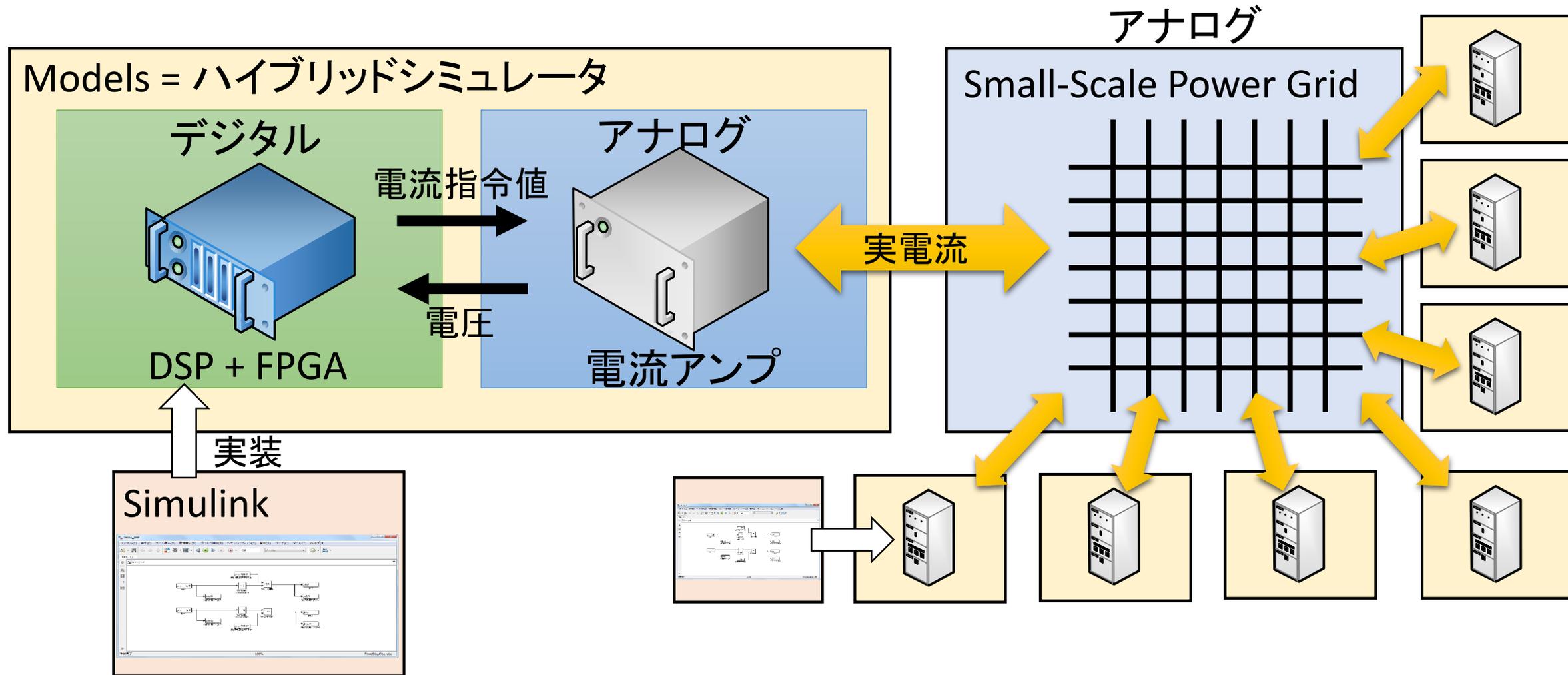
電力システムシミュレータの概要



電力システムシミュレータの概要 ハイブリッドシミュレータ



電力システムシミュレータの概要 ハイブリッドシミュレータ



電力システムシミュレータと他シミュレータ

	時間軸	~ μs	ms	s	min	定常
解析名称		電磁界解析	三相瞬時値解析	過渡安定度解析		潮流計算
Real-time	電力システムシミュレータ	←				
	デジタルシミュレータ		←	RTDS		
Off-line	オフラインシミュレータ	← VSTL →	← EMTP, XTAP →	← MATLAB® Simulink →		
			← Y法, S法 (CPAT) →	← L法, V法 (CPAT) →		
	系統現象	← 雷サージ →	← 高調波 →	← 軸ねじれ →	← 電力動揺 →	← 周波数応動 →
主目的		送電線等への雷撃時に電磁現象として発生する電圧・電流解析	事故発生時の系統一部分における電圧・電流の変化を瞬時値解析	事故発生時の系統全体の電圧・電流変化を実効値解析		送電線を通る電力や変電所の電圧定常値解析

リアルタイムシミュレータは、実機と接続試験・解析が可能。

参考元: 電力中央研究所報告資料等

電力システムシミュレータは、デジタルシミュレータに比べて計算刻みに依存しない実際の連続した電気現象として再現可能

電力システムシミュレータの長所 ～デジタルシミュレータとの比較～

1. 日本の重電機メーカー製シミュレータ

- ・ 定式化されていない機器モデルも重電機メーカーである強みを生かして実機を忠実に再現させた詳細なモデルを製作可能
- ・ 現象解明されていない新たな現象の原因究明・解析が可能
- ・ モデルをご要望に合わせてカスタマイズ可能

2. ミニチュア系統に実際に電圧を印加し、電流を流すシミュレータ

- ・ 安定度、周波数特性、電圧特性が連動しあう不安定現象の解析が可能
- ・ 計算刻みに依存しない実際の連続した電気現象として再現可能
- ・ 大規模系統のシミュレーションが可能(中部電力(株)様基幹全域系統等)
- ・ 広い周波数領域で三相瞬時値解析(ms)のシミュレーションを長時間(～24h)実施可能

中部電力(株)様向け 系統解析シミュレータの歩み

1992年 系統解析(PSA※)センター 運用開始

※PSA:Power System Analysis

運用後22年間で「安定度」「周波数」「電圧」等の
系統解析を約180件実施

1997年 大容量発電機、大容量負荷モデル導入

2006年 ホスト計算機システム更新

2008年 新型発電機モデル導入(風力2台)

2010年 新型発電機モデル導入(太陽光1台)

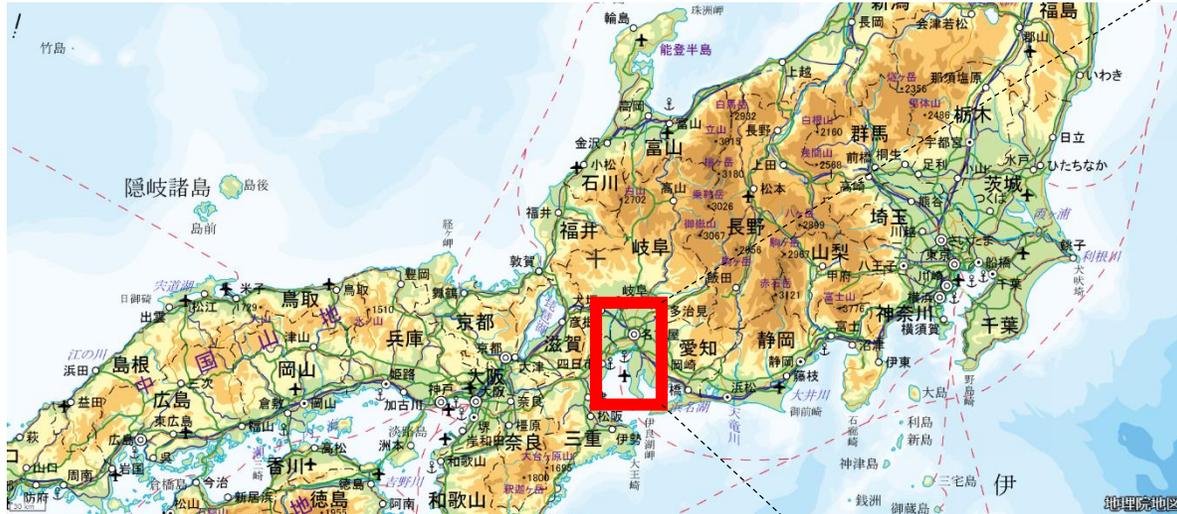
設備経年劣化
新たな解析ニーズ



リプレース
1期:2013~2015年
2期:2017~2019年
2019年6月 運用予定

将来系統の解析のために、先の技術を取り込んだシミュレータ開発

中部電力(株)様向け 系統解析シミュレータ



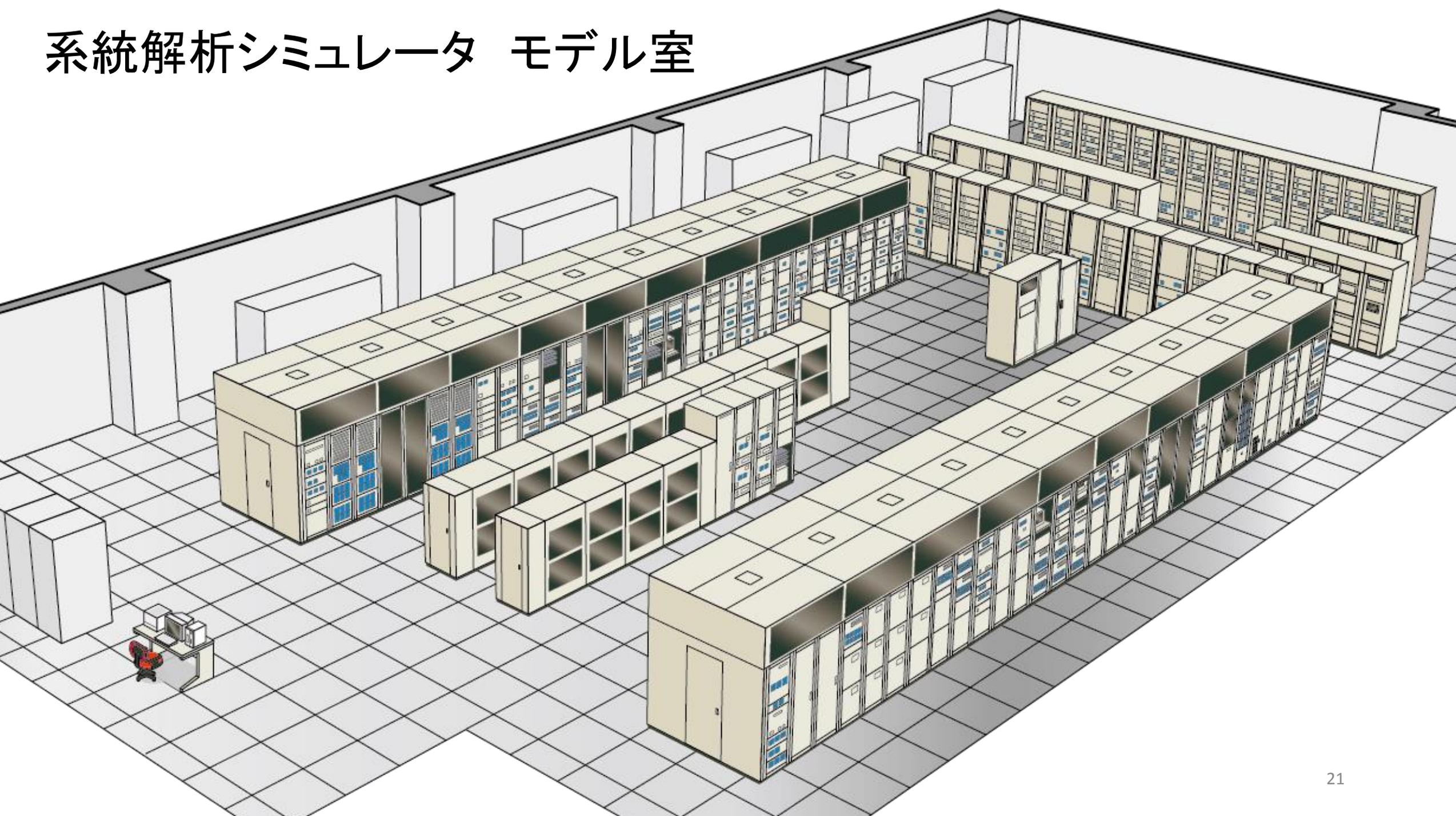
名古屋駅



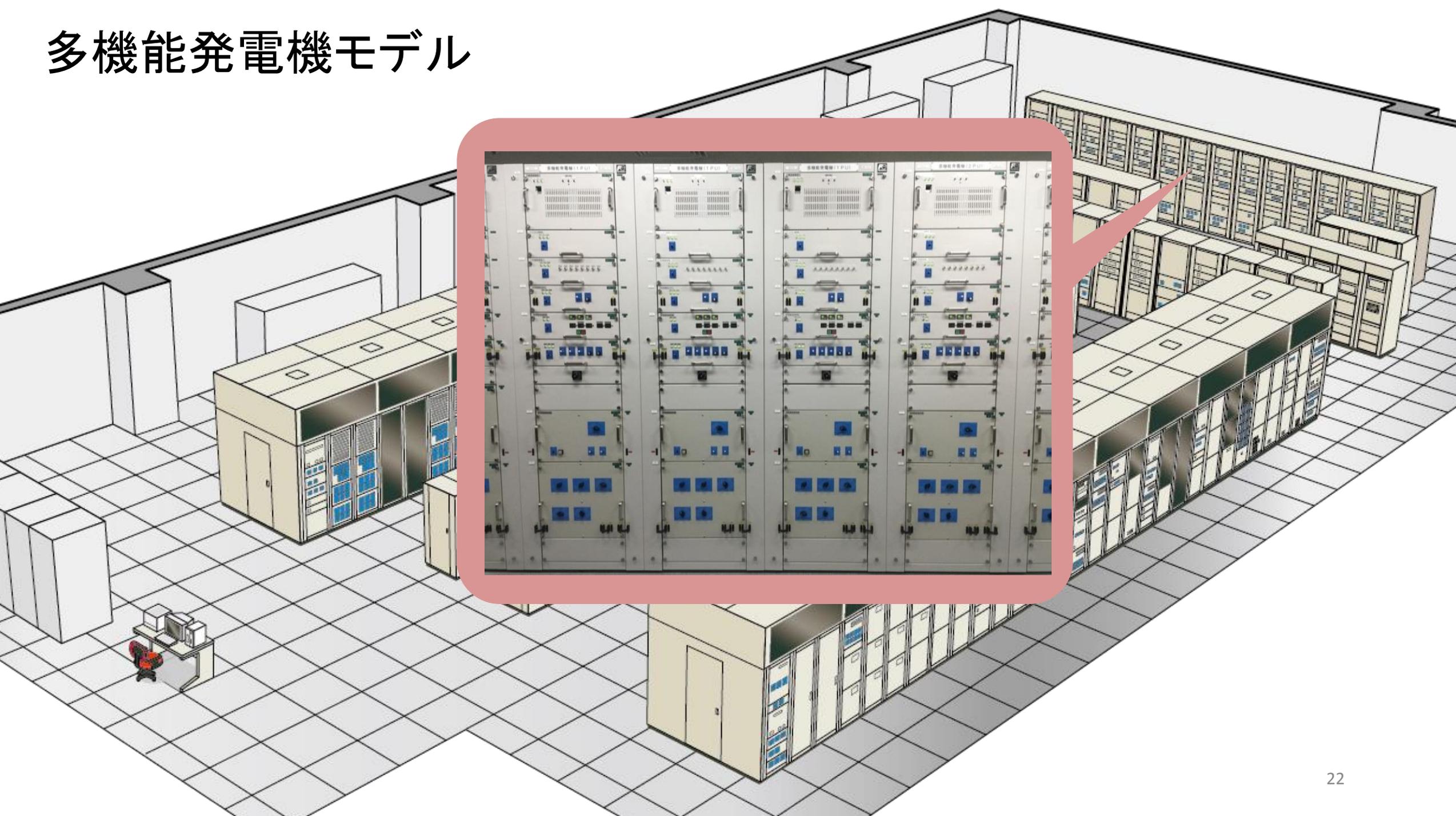
あおなみ線 16分

稲永駅

系統解析シミュレータ モデル室



多機能発電機モデル



多機能発電機モデル 外観



同期発電



太陽光発電



風力発電



蓄電池



STATCOM



多機能発電機モデル 外観

同期発電



同期発電



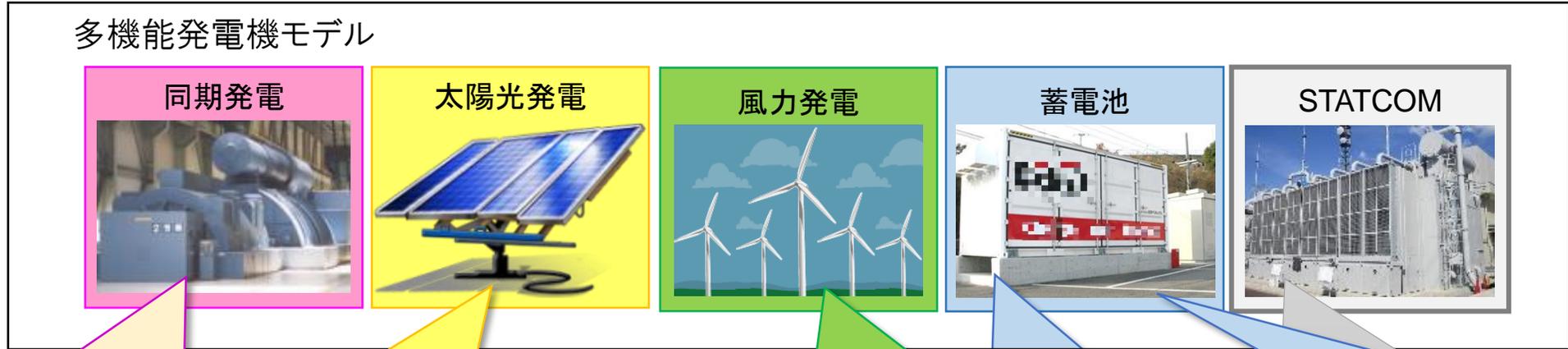
同期発電



限られたモデル台数で多様な電源模擬が可能

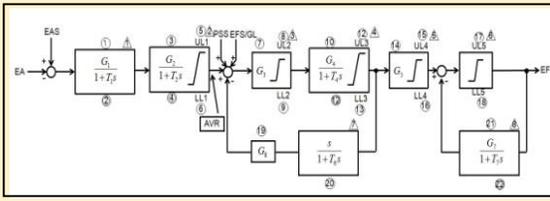
多機能発電機モデル

✓ Simulinkを使用して、同期発電機／蓄電池／STATCOMモデルの制御ロジック等を柔軟に変更可能



Simulink使用

AVR, PSS, GOV等の制御ブロックを任意に構築可能

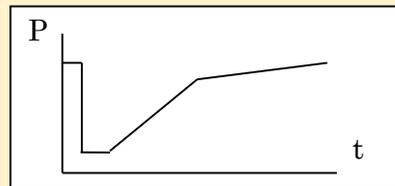


任意の制御方式を容易に実現！

単独運転検出機能

- ・受動的方式
- ・能動的方式
- ・新型能動的方式

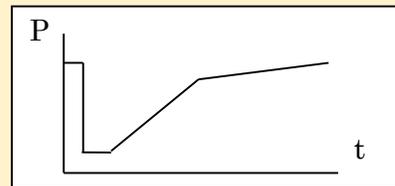
FRT模擬機能



単独運転検出機能

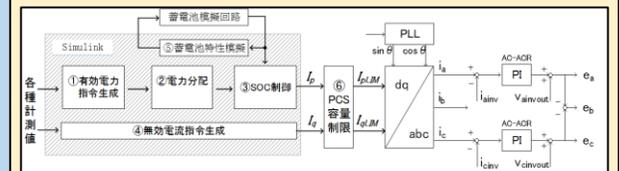
- ・受動的方式

FRT模擬機能



Simulink使用

有効電力制御、無効電力制御SOC制御等の制御ブロックを任意に構築可能



任意の制御方式を容易に実現！

モデル遠隔監視

『運転支援システムネットワーク』

『モデルネットワーク』
IEC 61850 / IEC 61588適用範囲

メータ監視/ボタン表示

リアルタイム波形表示

クライアント2

クライアント3

クライアント4

スマグリサーバ

監視制御盤

データサーバ

SW

IEC 61850の
監視データ集約

NAS

FEP

GMC

SW

SW

SW

SW

SW

SW

SW

モデルA

モデルB

モデルC

モデルD

モデルE

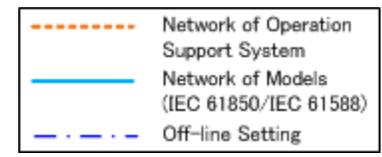
モデルF

モデルG

モデルH

リアルタイム監視データ
(50ms 周期)

GMC: PTP対応Grand Master Clock
NAS: Network Attached Storage
FEP: Front End Processor
SW: Network Switch



IED191台との協調運転

- CL1,2,3,4 : Client PCs
- DAT : Data Server
- SG : Smart Grid Control Server
- FEP : Front End Processor
- PNL : Operating & Monitoring Panels
- GMC : Grand Master Clock
- NAS : Network Attached Storage
- SW : Ethernet Switches
- SM : Simulator Models

IEDは多くの処理を同時に実行するため
タイミングによってCPUに負担となる

双方向通信

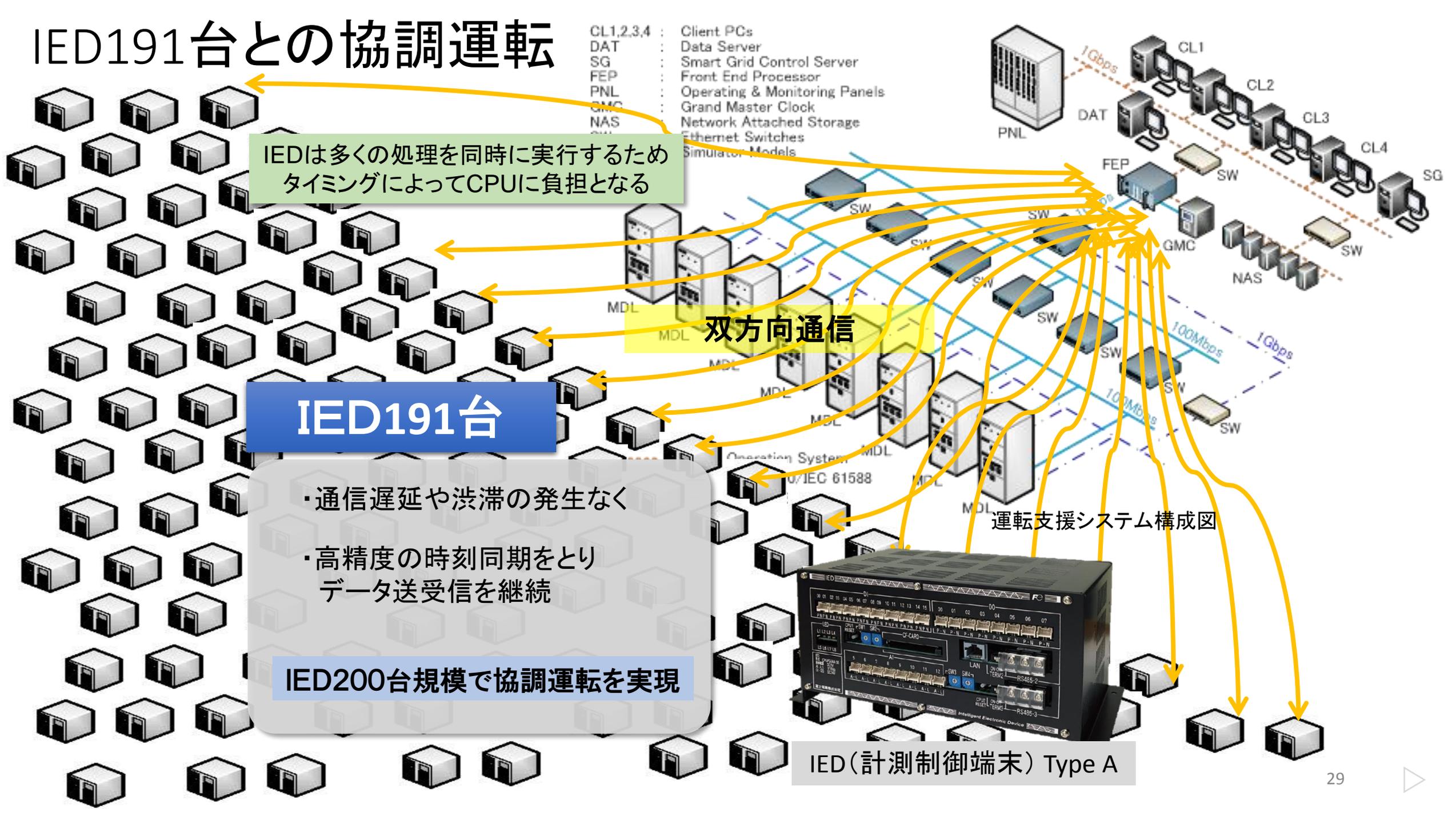
IED191台

- ・通信遅延や渋滞の発生なく
- ・高精度の時刻同期をとり
データ送受信を継続

IED200台規模で協調運転を実現

運転支援システム構成図

IED(計測制御端末) Type A

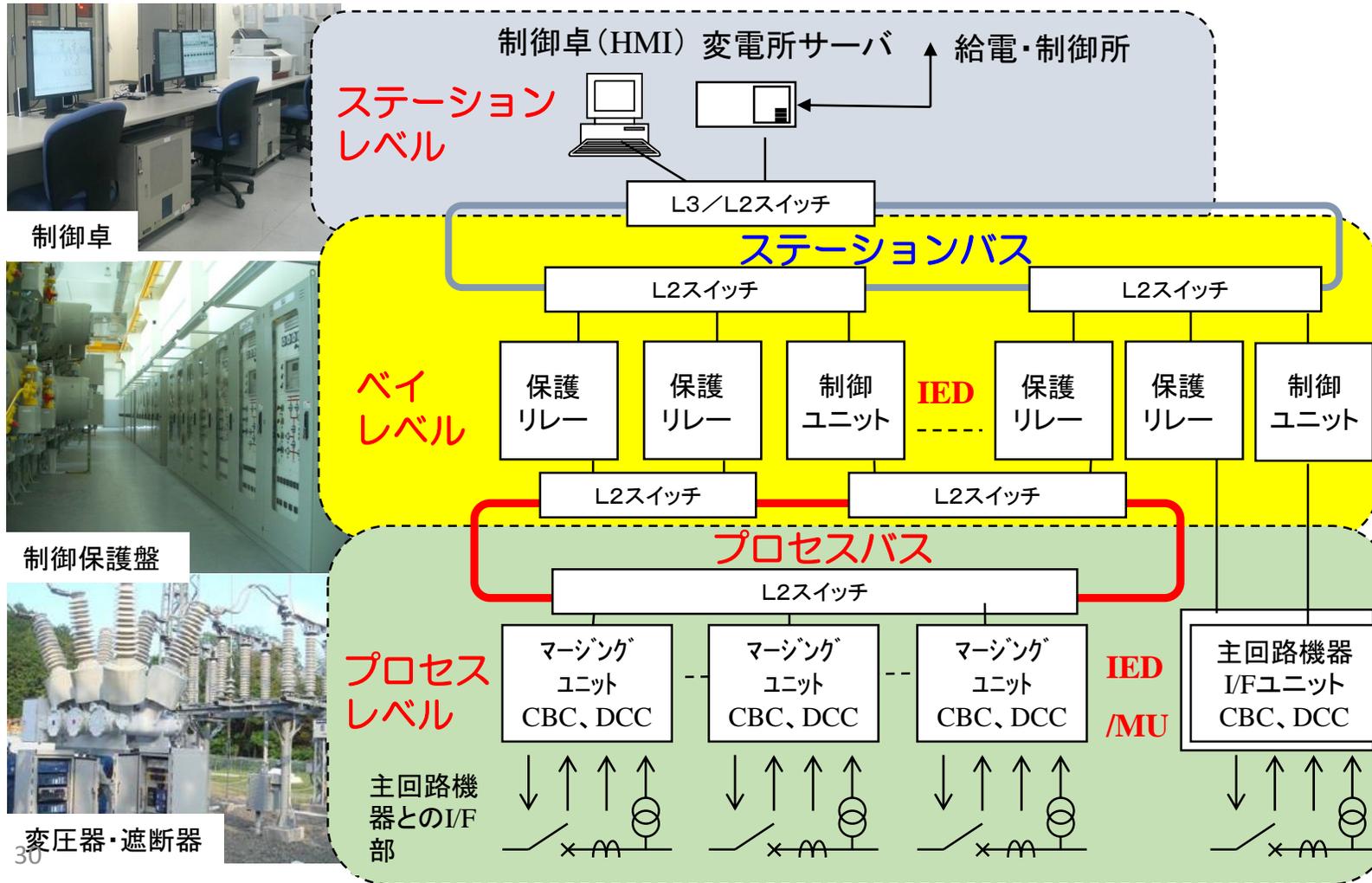


実際の電力用保護装置 (IED) を電力システムシミュレータに組み込み可能

- 複数モデルの瞬時値計測情報 (v, i, CB開閉) を IEC 61850 の通信サービス SV, GOOSE により多入力に取り込み、多出力で他モデルへ制御信号を送信可能。

IEC 61850 : 変電所システムの代表的構成例

系統解析シミュレータ システム構成



運転支援システム
ネットワーク

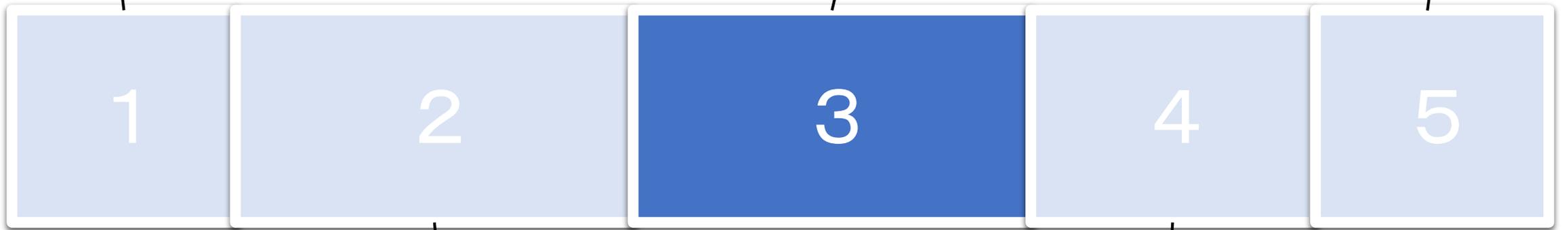
モデル用ネットワーク
ステーションバス

モデル用ネットワーク
プロセスバス

イントロ

蓄電池システムモデル
へのSimulink適応

Q&A

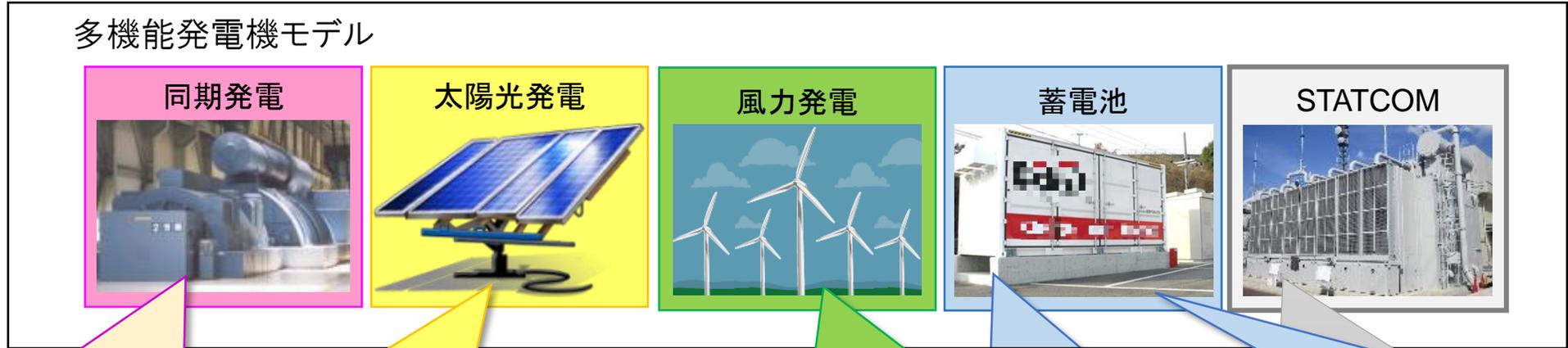


電力システムシミュレータ
全体像

今後の課題等

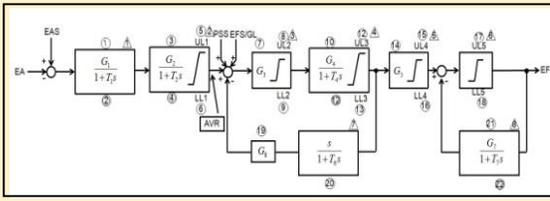
蓄電池システムモデル

✓ Simulinkを使用して、同期発電機／蓄電池／STATCOMモデルの制御ロジック等を柔軟に変更可能



Simulink使用

AVR, PSS, GOV等の制御ブロックを任意に構築可能

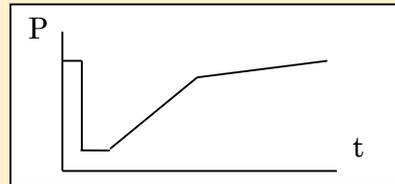


任意の制御方式を容易に実現！

単独運転検出機能

- ・受動的方式
- ・能動的方式
- ・新型能動的方式

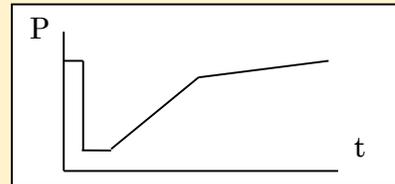
FRT模擬機能



単独運転検出機能

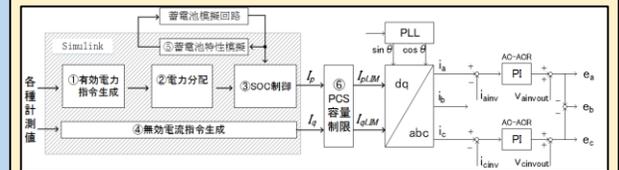
- ・受動的方式

FRT模擬機能



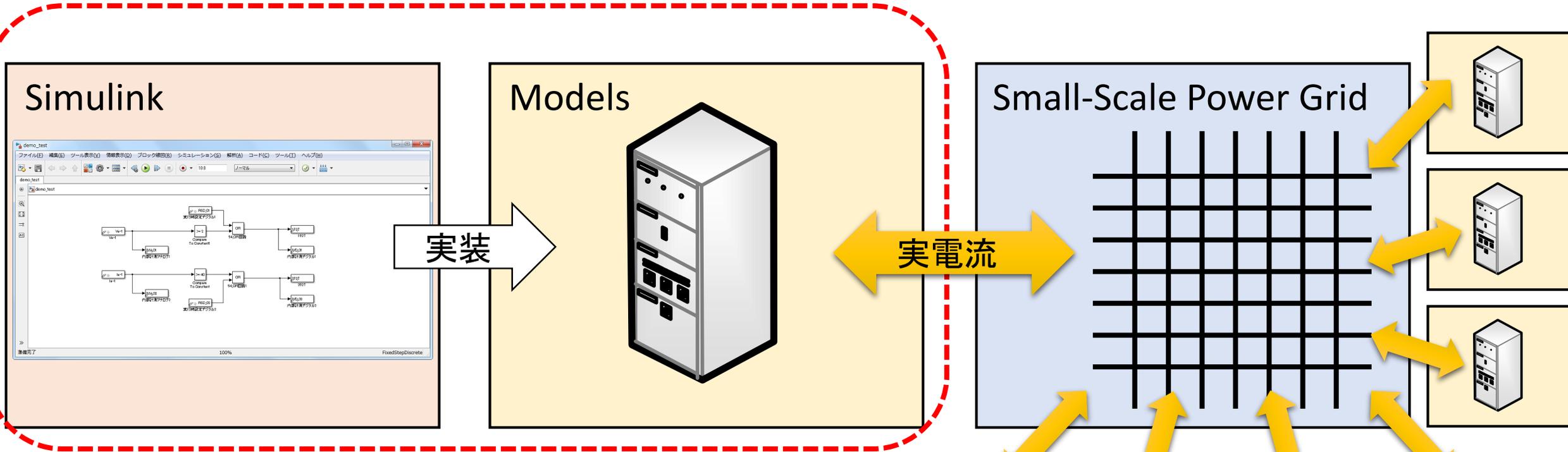
Simulink使用

有効電力制御、無効電力制御、SOC制御等の制御ブロックを任意に構築可能



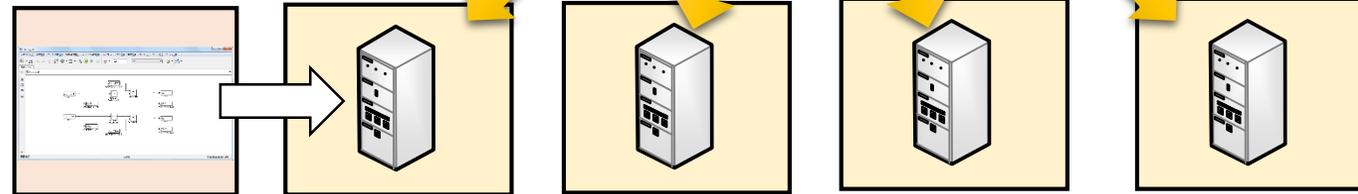
任意の制御方式を容易に実現！

3. 蓄電池システムモデルへのSimulink適応

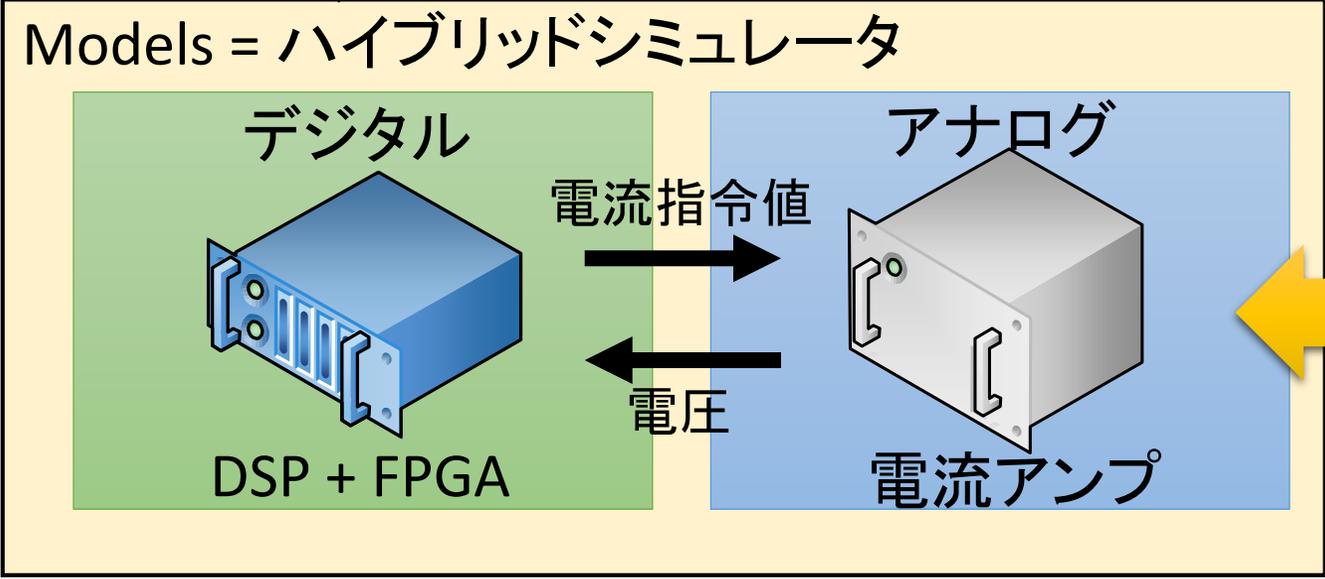
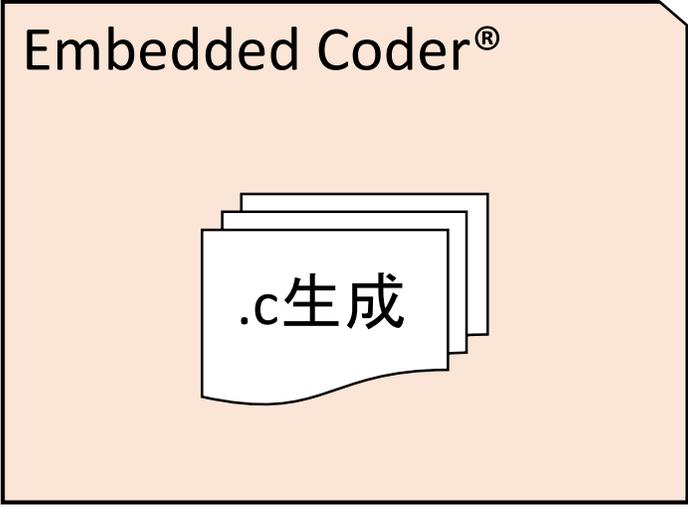
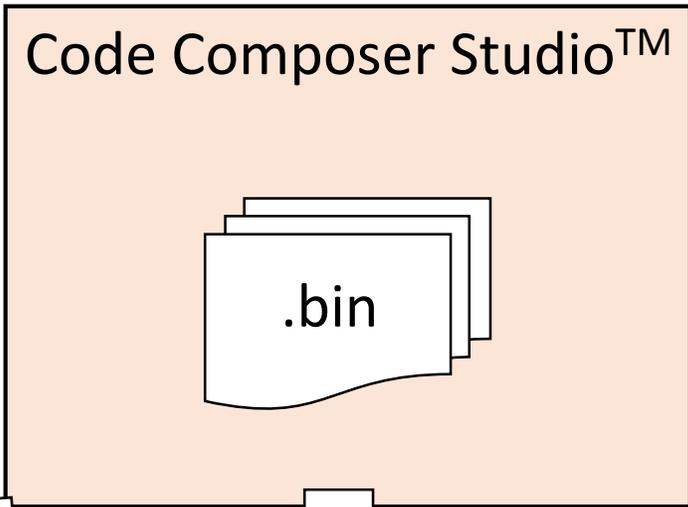
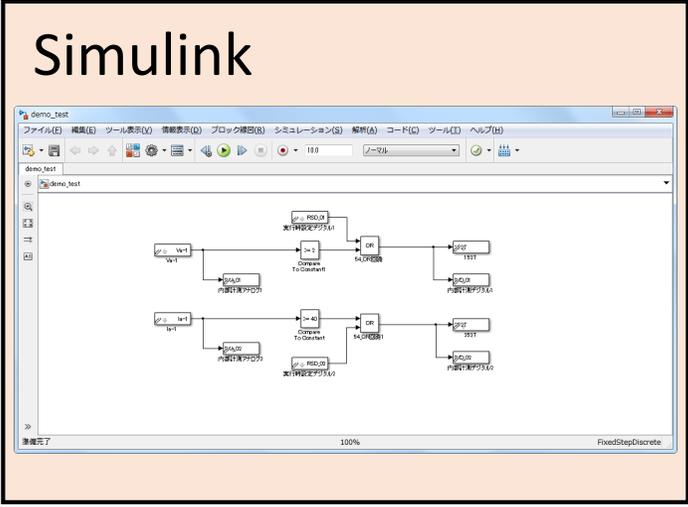


【長所】

将来の電力機器に搭載される
制御ロジックも柔軟に対応



Simulinkを使用した任意制御ロジックの実装方法



蓄電池システムモデルのユニット構成

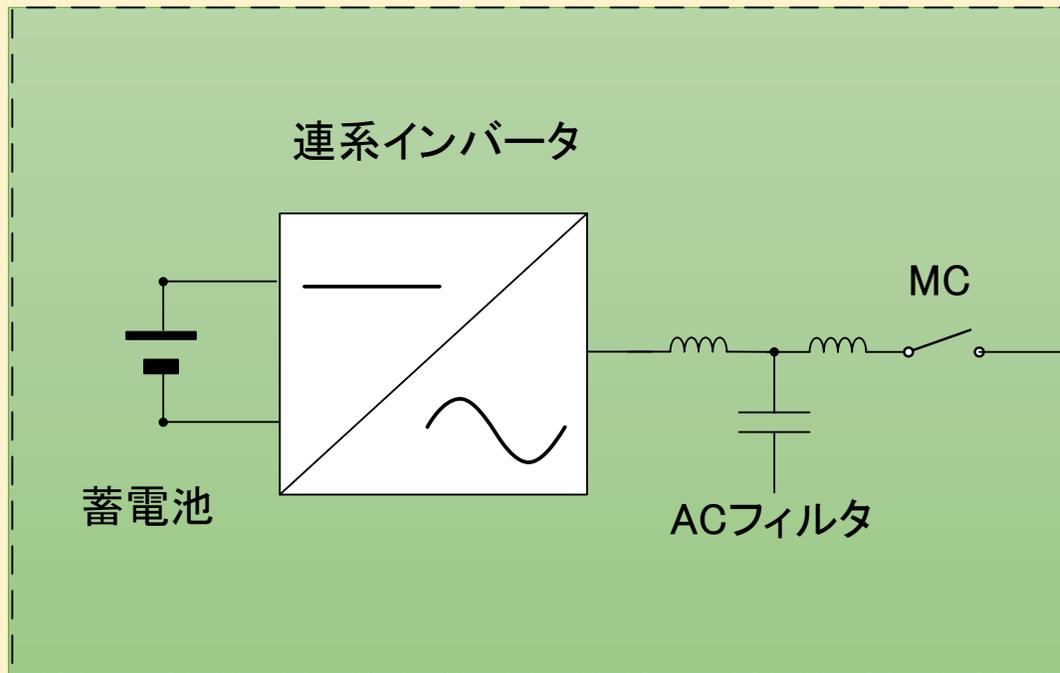
蓄電池システムモデル

デジタル演算装置

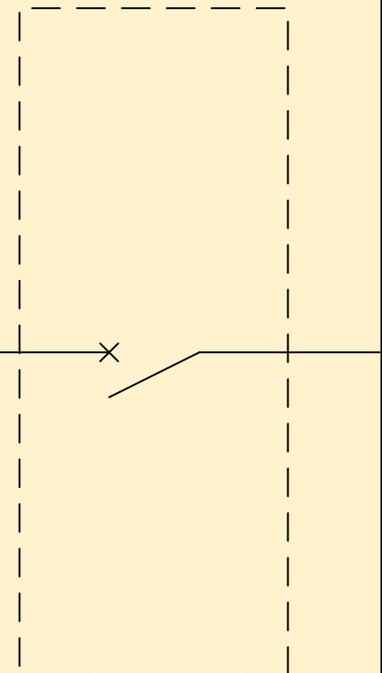
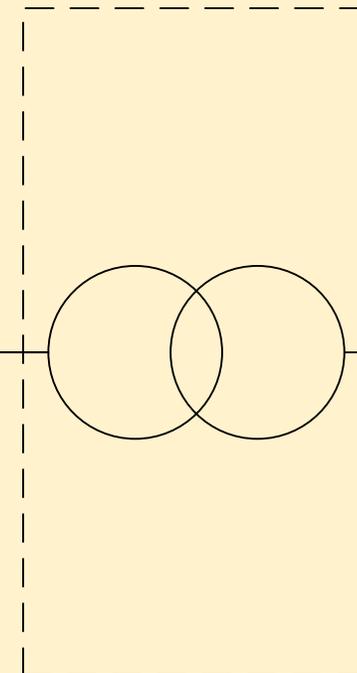
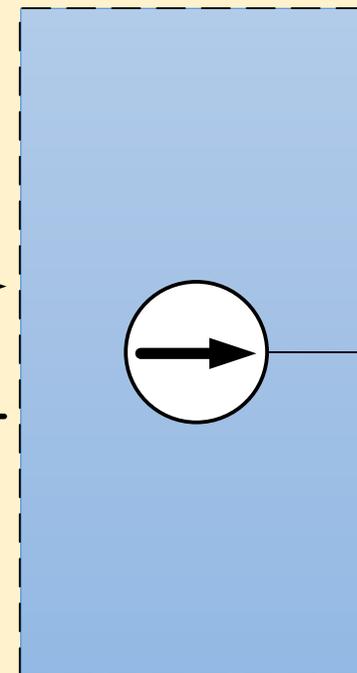
電流増幅器

発電機用変圧器

発電機用遮断器

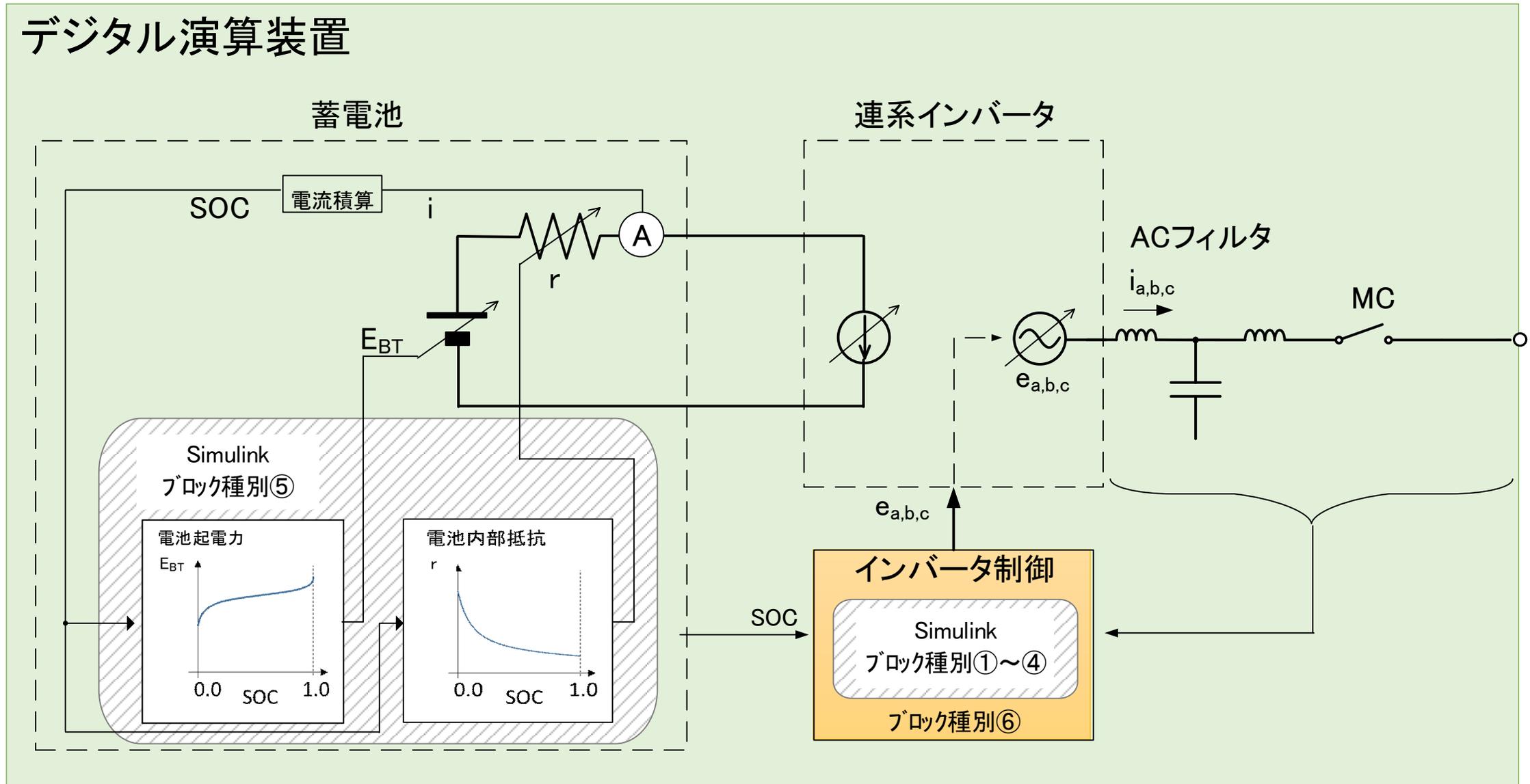


i^*
 v



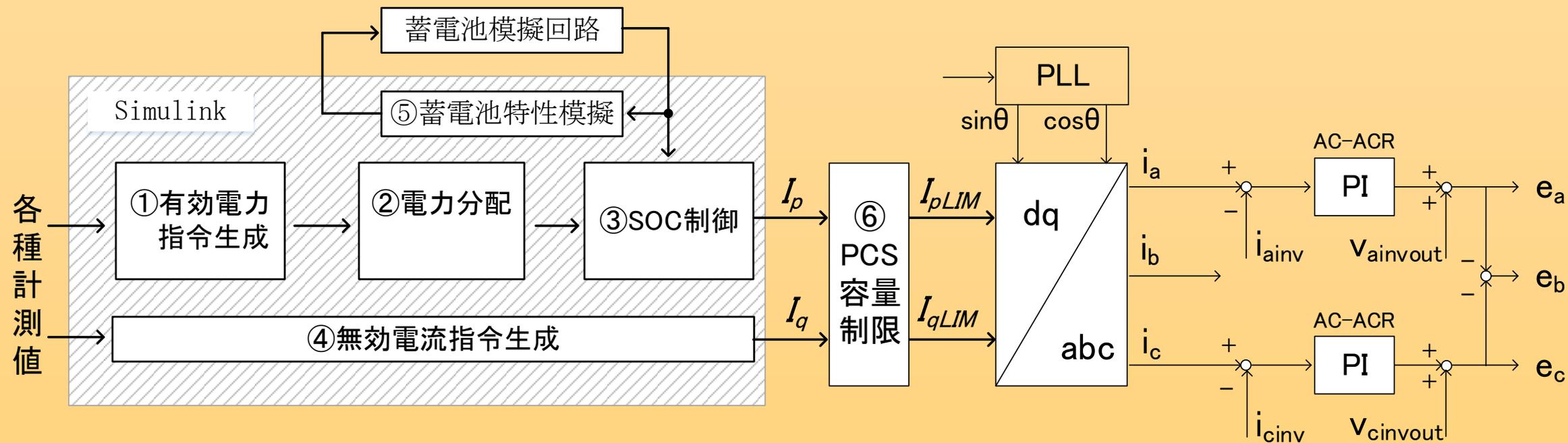
デジタル演算装置内の模擬演算構成とSimulink範囲

デジタル演算装置



基本制御ブロック図

インバータ制御



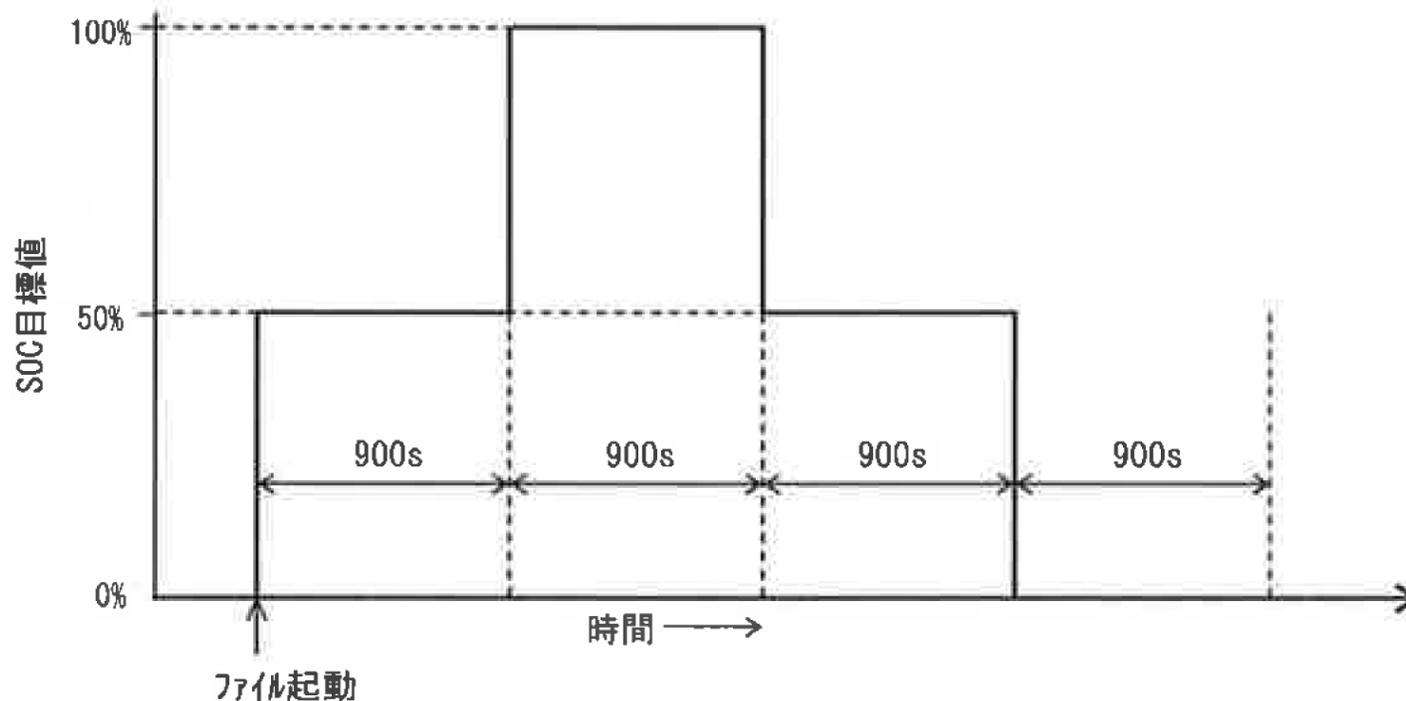
任意制御系のSimulinkブロック種別

ブロック種別	ブロック図名称
① 有効電力指令生成	周波数変動補償
	線路過負荷防止
	再生可能エネルギー出力変動抑制
	再生可能エネルギー出力変動抑制 (可変時定数)
	任意有効電力値出力
② 電力分配	単一種蓄電池システム用ブランク処理
	ハイブリッド マスター機用電力分配指令送信
	ハイブリッド スレーブ機用電力分配指令受信
③ SOC制御	SOC追従／SOC範囲制御
④ 無効電流指令生成	力率一定制御
	任意無効電力値出力
⑤ 蓄電池特性模擬	標準電池特性

SOC制御 Simulinkと実測値の比較検証

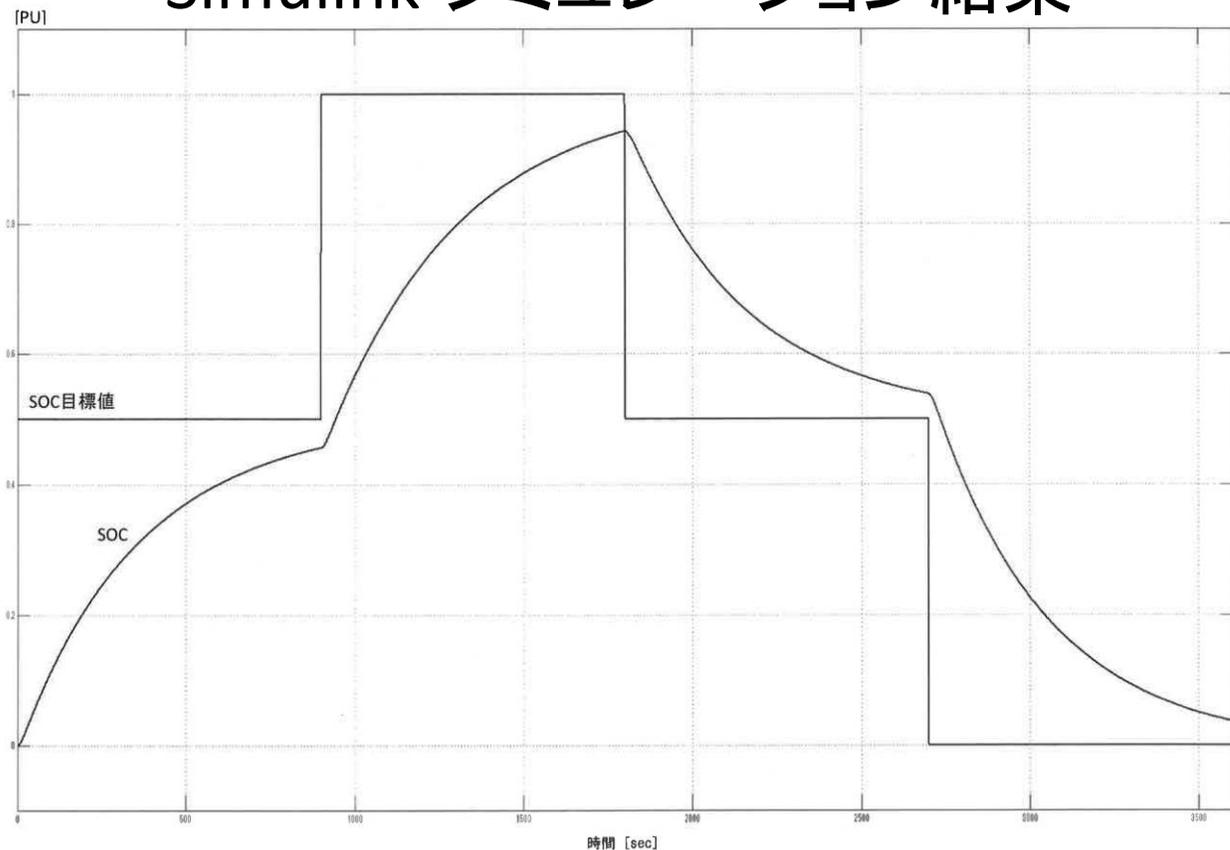
- Simulinkで作成したSOC制御が、電力システムシミュレータに実装され、意図した制御を実行することをSimulinkのオフラインシミュレーションと、電力システムシミュレータを使用したシミュレーション結果を比較
- 運転条件
 - 有効電力指令生成： 任意有効電力値出力
 - 無効電力指令生成： 任意無効電力値出力

SOC目標値-時間グラフ (シナリオ設定)

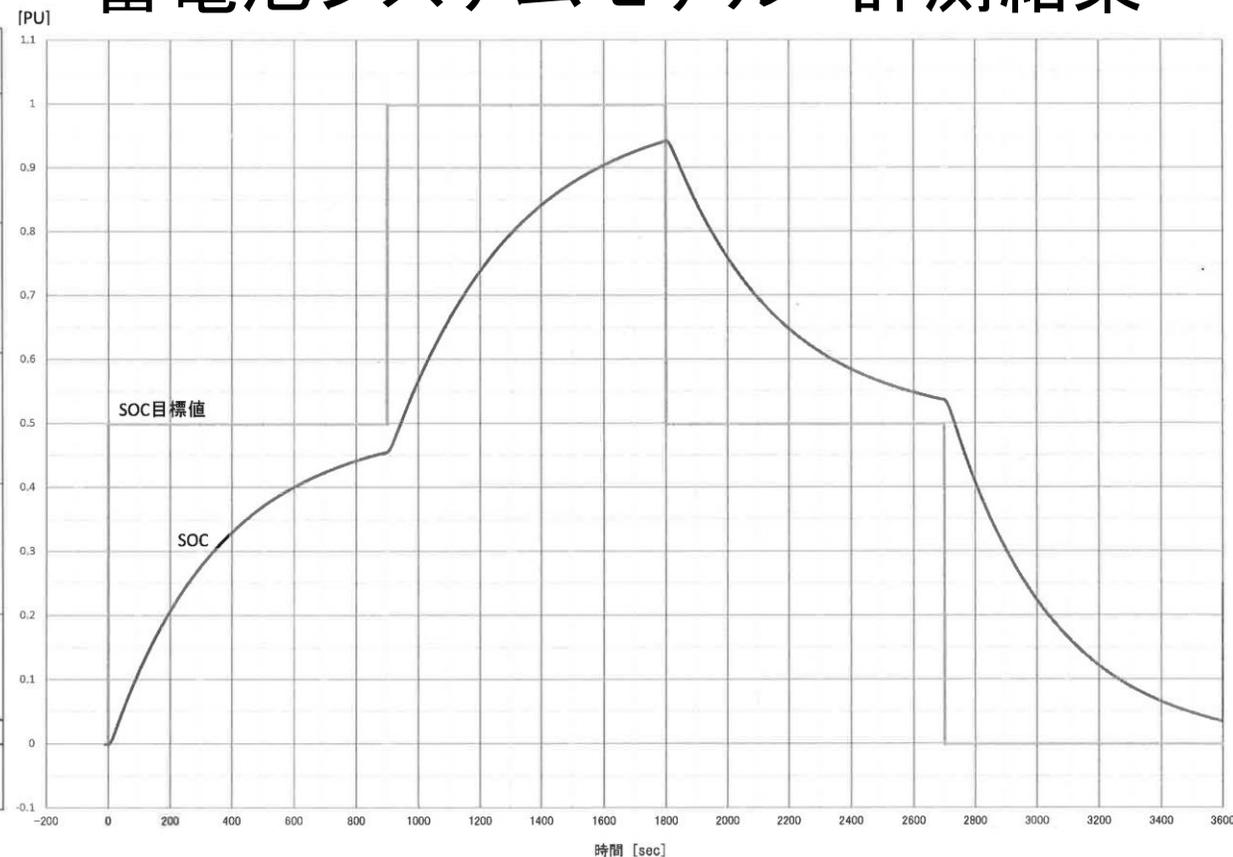


SOC制御 Simulinkと実測値の比較検証結果

Simulink シミュレーション結果



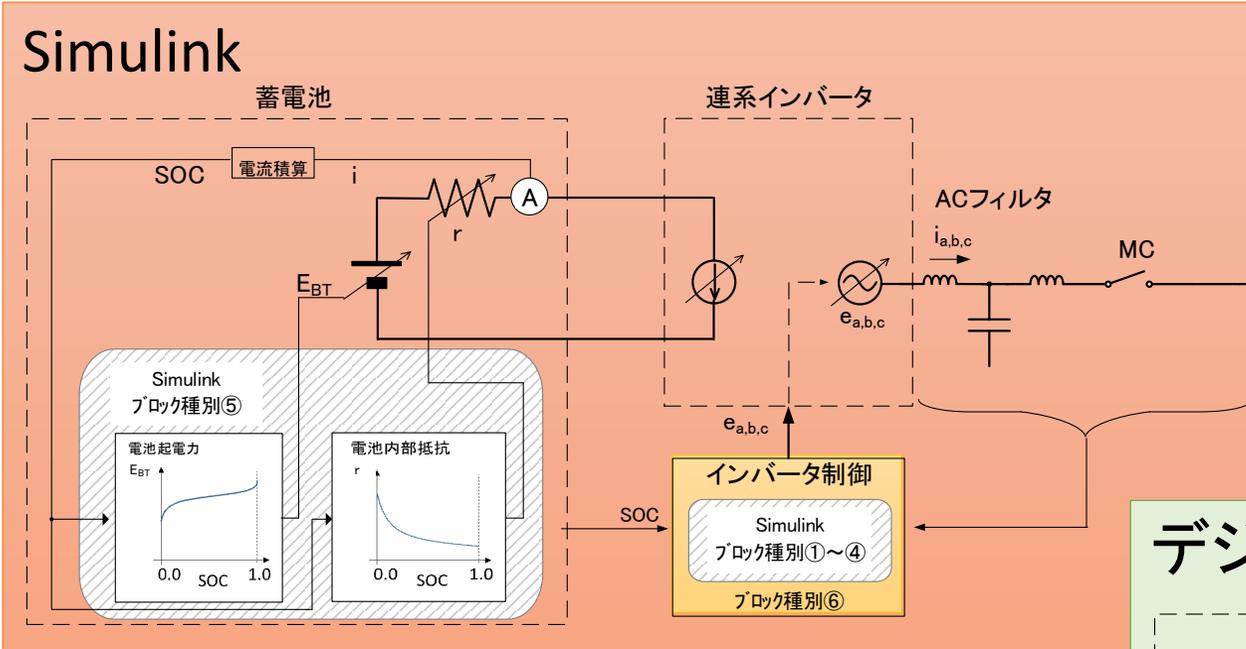
蓄電池システムモデル 計測結果



Simulinkを使用した制御ロジックが正しく動作していることを確認した

【開発過程】デジタル演算装置内の模擬演算開発にSimulink使用

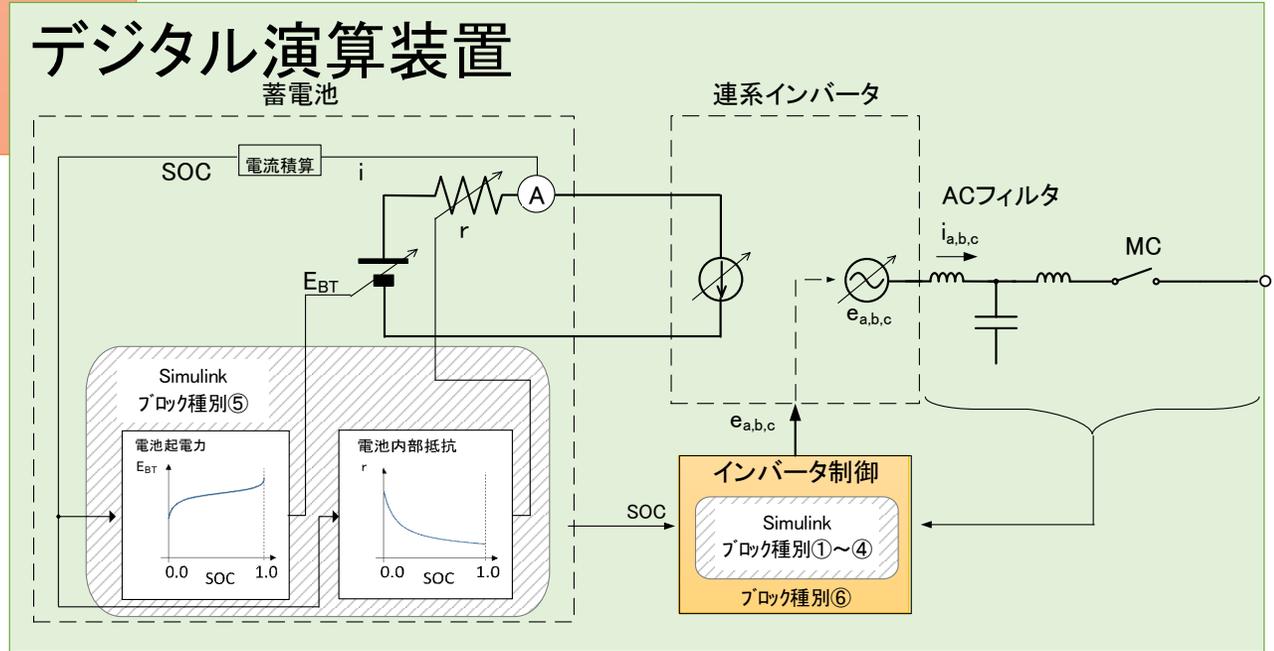
Simulinkを使用し開発ミス早期発見
結果、開発工程短縮に成功。



1. デジタル演算装置実装前にSimulinkを使用して動作検証・デバッグ



2. Simulinkにて検証後の演算回路等をデジタル演算装置に実装し、実際の動作検証



【纏め】 Simulinkを使用した任意制御可能としたモデル等

① 機器モデル自身の制御ロジックとして実装

① 多機能発電機モデル



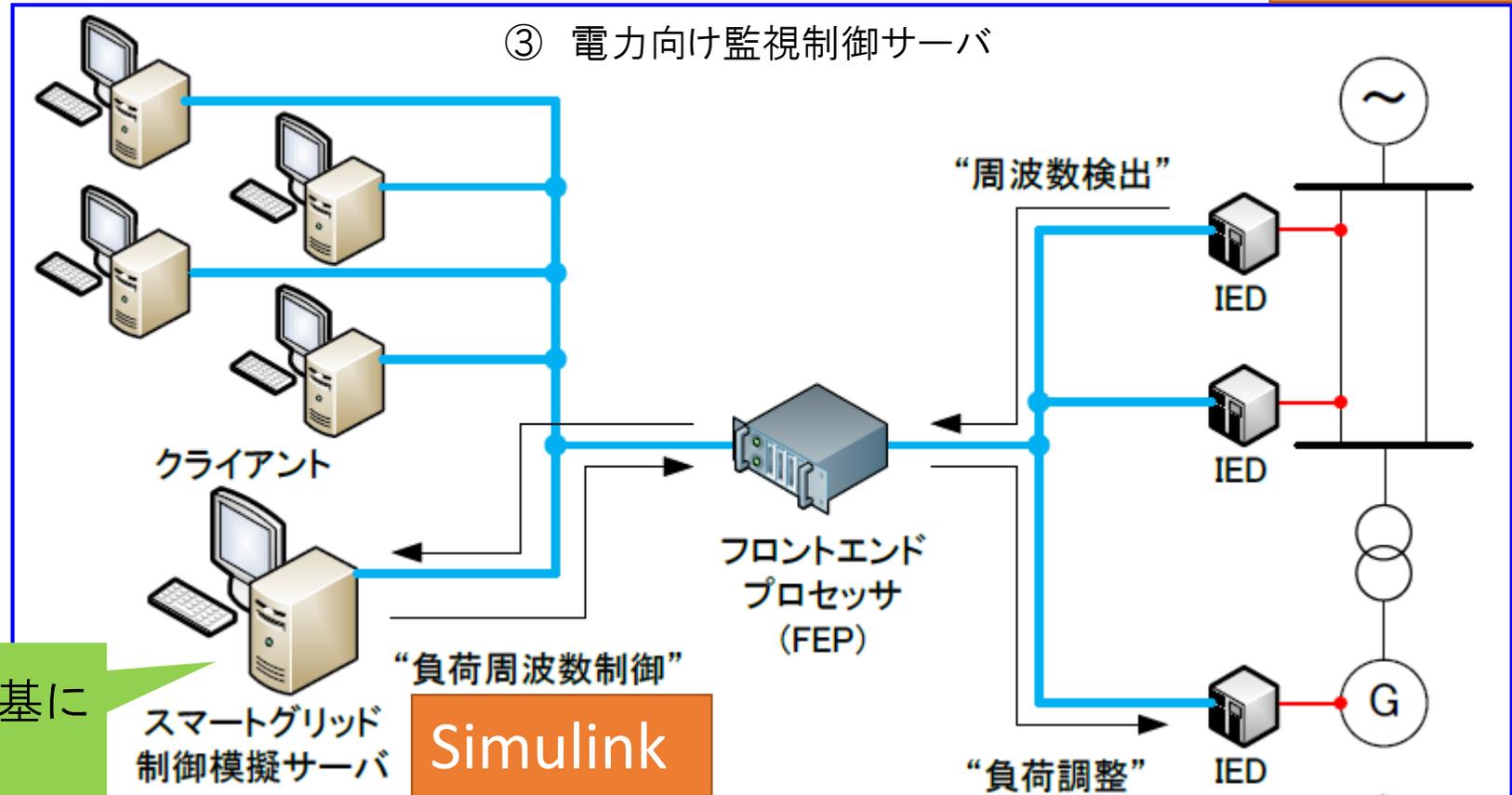
Simulink



② 電力計測端末機器 (IED) の制御ロジックとして実装

③ 電力向け監視制御サーバ (スマートグリッド制御模擬サーバ) の制御として使用

③ 電力向け監視制御サーバ



縮尺系統の各モデルの計測情報を基に制御演算し、対象モデルを制御する

【纏め】 Simulinkを使用した任意制御可能としたモデル等

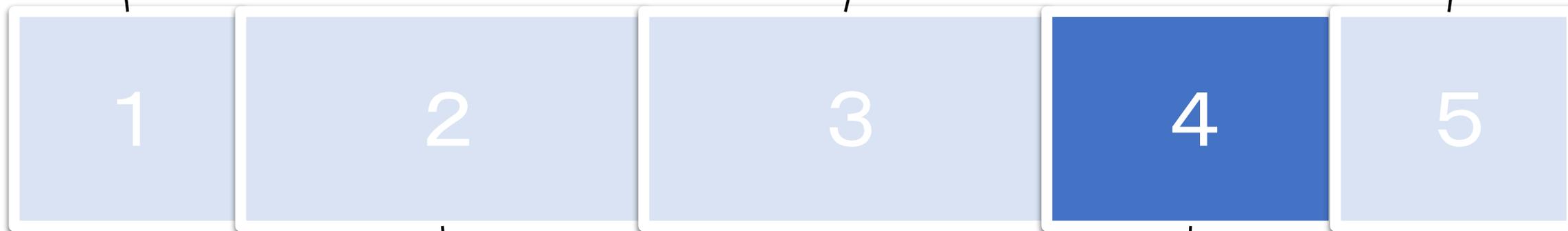
	多機能発電機 モデル	任意制御 リレーモデル	スマグリ制御 模擬サーバ	蓄電制御 システム
用途	シミュレータ	シミュレータ	シミュレータ	実プラント
実装機能	監視、制御	保護、監視	計測、監視、制御、 CSV保存	計測、監視、制御、 CSV保存
ターゲット	組込(DSP)	組込(DSP)	Winsows PC	Winsows PC
Simulink とのI/F	I/O, FPGA(外部メ モリIF), RS-485	IEC 61850 (SV, GOOSE)	IEC 61850 (MMS)	TCP/IP (PLC専用)

様々な用途、実装機能、ターゲット、I/FでSimulink使用実績あり

イントロ

蓄電池システムモデル
へのSimulink適応

Q&A



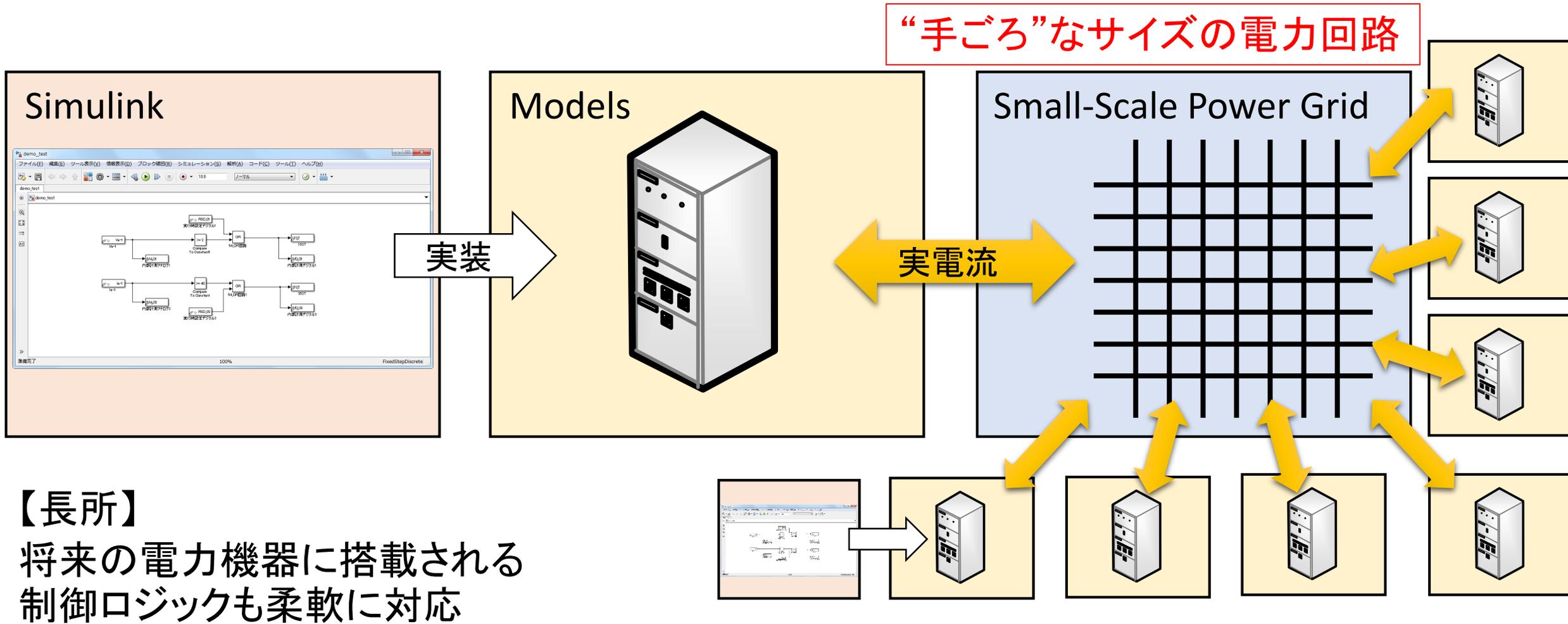
電力システムシミュレータ
全体像

今後の課題等

4. 今後の課題等

1. 他分野への展開

2. Simulink改良提案: 国際標準規格IEC対応



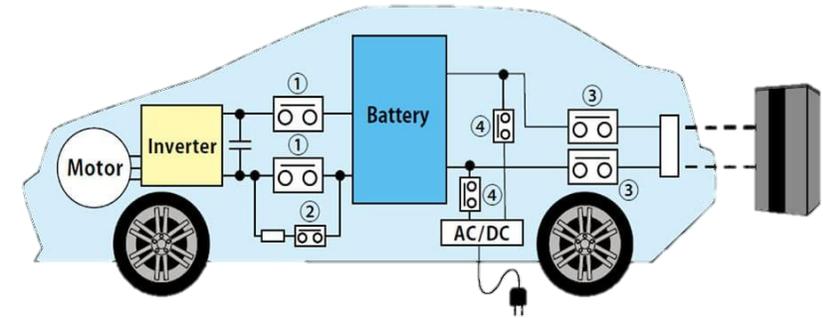
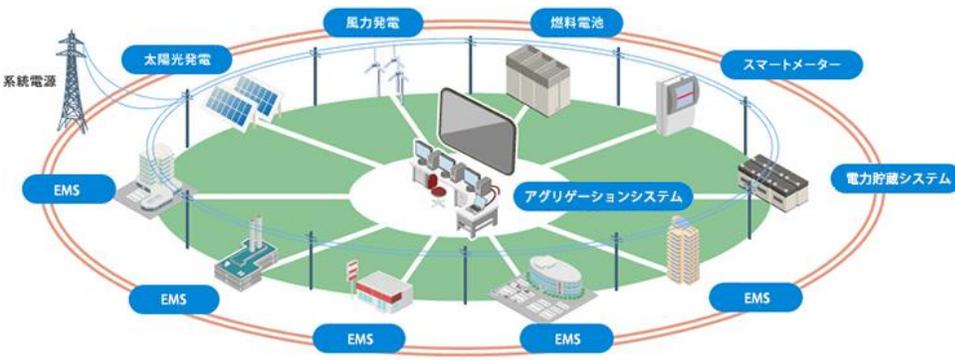
1. 他分野への展開

他分野に対してもSimulinkで開発した制御ブロック等の検証を電気現象としてリアルタイムに検証可能

Small-Scale

Big-Scale

Scale



Virtual Power Plant(VPP)

- 地域における最適な電力需給バランス
- 分散電源、電力貯蔵設備、デマンドレスポンスの最適設計
- 故障時の安定度解析や他エリアとの連系解析

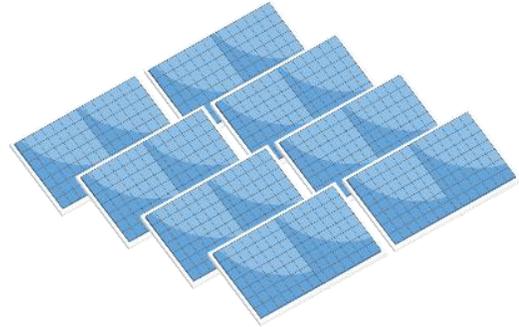
V2X

- V2Gによる配電系統への影響解析
- 配電故障時のV2Gへの影響と対策検証

EV, PHEV, FC

- 高電圧電池・大容量化に伴う事故電流(短絡電流)解析
- 過電流耐量と要素開発
- 充放電にともなう双方化検証

2. Simulink改良提案：国際標準規格IEC対応

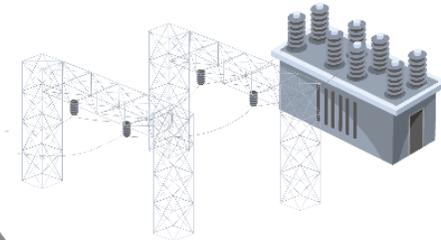


IEC 61850-90-7,15
分散電源・スマートグリッド

IEC 61850 :
電力自動化用通信ネットワークとシステム
各領域にも適用拡張。



IEC 61400-25
風力発電

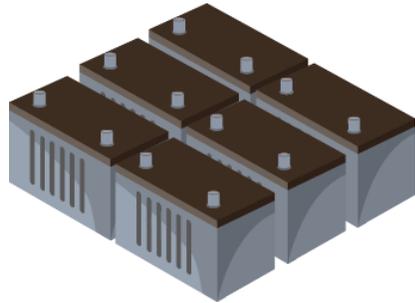


Substations

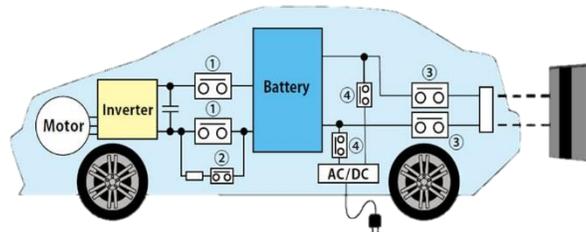
【スタート】 IEC 61850-7
変電所内のオールデジタル化



IEC 61850-7-410
水力発電・火力発電



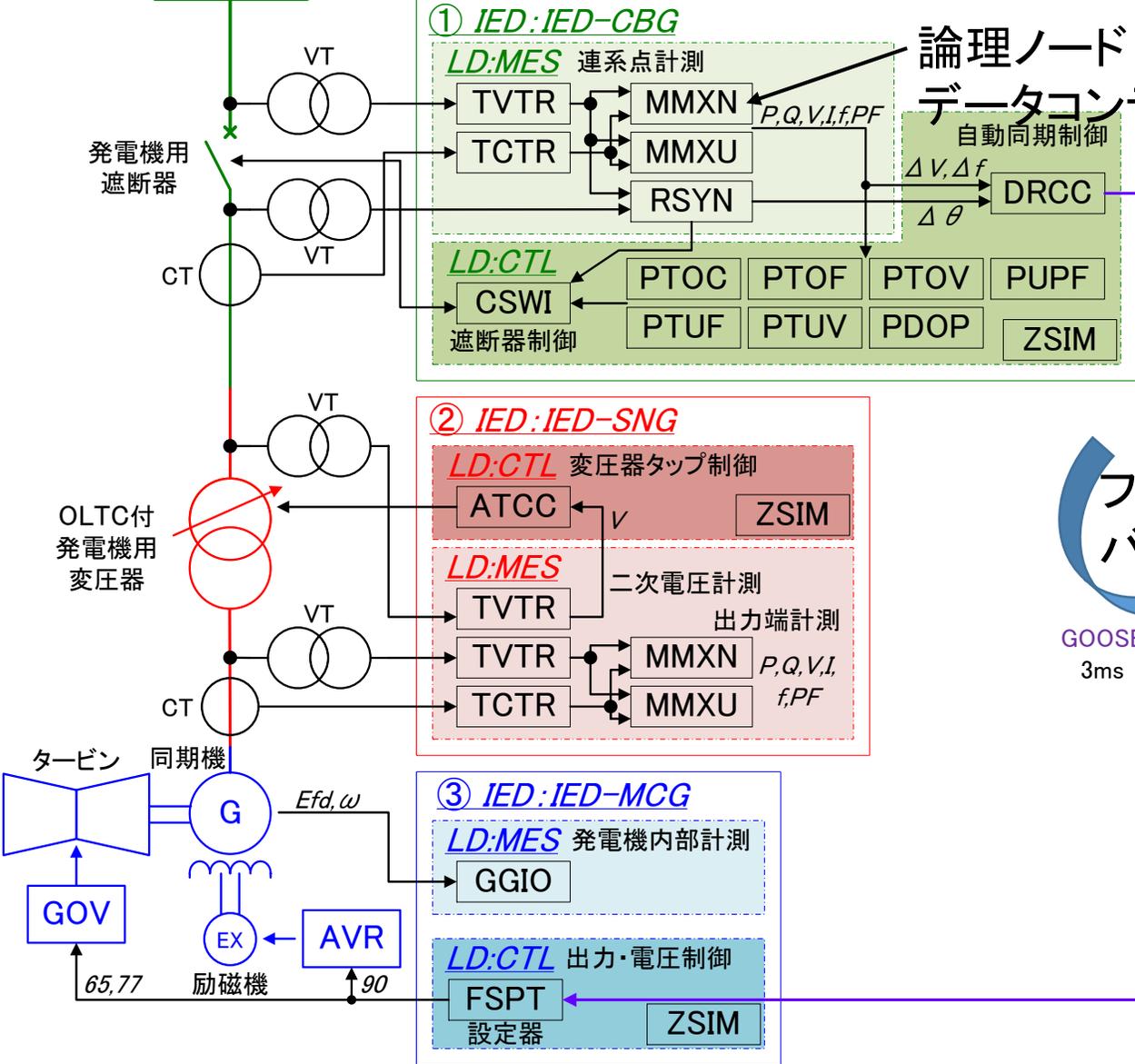
IEC 61850-90-9
蓄電池



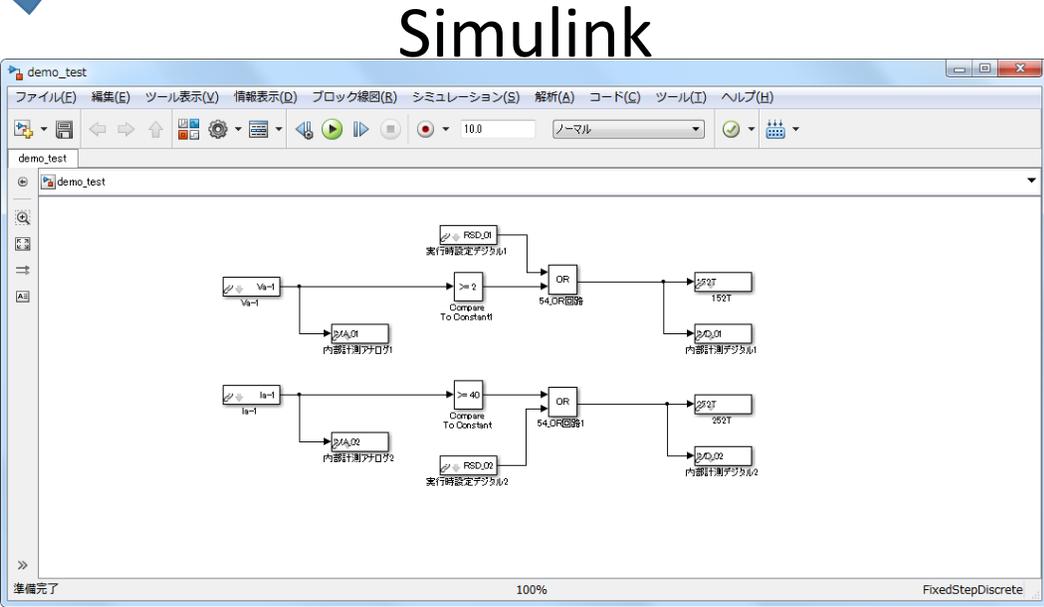
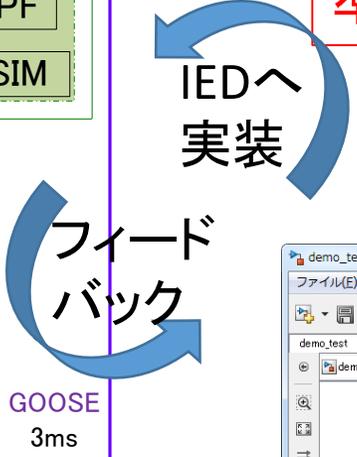
IEC 61850-90-8
EV

2. Simulink改良提案: 国際標準規格IEC対応

設備を標準化した共通情報モデル



ともにオブジェクト指向モデルであり親和性が高い。
 論理ノードをSimulinkのブロックライブラリにオプションとして準備することで更なる標準化を図れる。



イントロ

蓄電池システムモデル
へのSimulink適応

Q&A



電力システムシミュレータ
全体像

今後の課題等



FE 富士電機
Innovating Energy Technology

