

運転計画・シミュレーション・自動制御を融合する エネルギーマネジメント技術

Energy Management Technology Integrating Operation Planning, Simulation, and Automatic Control

白川 昌和 SHIRAKAWA Masakazu 丸山 将司 MARUYAMA Masashi 浦吉 大輝 URAYOSHI Daiki

変動性再生可能エネルギー(VRE)の導入拡大により、多様な設備の協調から価値が創発される“つながるエネルギーシステム”へ移行する中で、火力発電には創発性を生かして価値を高める設計・運用技術が求められる。

東芝は、運転計画・シミュレーション・自動制御を融合したエネルギーマネジメント技術を構築し、火力発電の調整力を生かして柔軟性と運用効率を向上できるようにした。更に、モデルベースシステムズエンジニアリング(MBSE)による“価値づくり”を指向した設計、高速・高精度な低次元化モデル(ROM)とデジタルツイン、及びクラウドシステムと連携する融合型エネルギーマネジメントシステム(EMS)を支える基盤技術の高度化を継続している。

The expanding deployment of variable renewable energy (VRE) sources and the shift toward interconnected energy systems that cooperatively operate diverse facilities have created a need for thermal power generation technologies with emergent capabilities for designing and operating efficient energy systems.

Toshiba Corporation has developed an energy management technology integrating operation planning, simulation, and automatic control, leading to increased flexibility and operability of interconnected energy systems by taking advantage of thermal power generation capable of compensating for power fluctuations. We are continuing our efforts to further advance the following core technologies: (1) value-oriented design based on model-based systems engineering (MBSE), (2) high-speed, high-accuracy reduced-order models (ROMs) and digital twins, and (3) energy management systems (EMS) in conjunction with cloud systems.

1. まえがき

世界的な脱炭素の要請を受け、エネルギーシステムは大きな転換期を迎えている。我が国でも太陽光・風力など天候に依存するVREの導入拡大に加え、水素・アンモニア利用やカーボンリサイクルといった多様な技術を組み合わせた電源構成が求められている。この環境変化の下で、火力発電設備はVREに加え、蓄電・蓄熱、排熱利用、燃料転換、CCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)など複数の設備と連携して運用され、相互協調によりシステム全体として新たな価値が創発される段階へと移行している。ここでは、このように複数のエネルギー設備が連携して最適に動作する全体構成を、つながるエネルギーシステムと定義する。これは、従来の設備単位の最適化を超え、System of Systems(SoS)として扱うべき新たな設計対象であり、その有機的な結び付けを実現するエネルギーマネジメント技術が重要となる。

つながるエネルギーシステムでは、エネルギーを“つくる・おくる・ためる・かしくつかう”という機能として捉え、エネルギー貯蔵による需給に応じた利用時間の調整や、エネルギー変換・輸送による燃料・熱・電力の供給と利用地点の

調整といった時間軸・空間軸での最適化を行いながら、システム全体を俯瞰(ふかん)した設計と運用が求められる。

東芝は、この課題に対応するため、運転計画・シミュレーション・自動制御を融合するエネルギーマネジメント技術の開発を進めている。ここでは、高度化するシステム設計を支えるMBSE、最適運転計画を高速・高精度に評価するROMとデジタルツイン、及びクラウドシステムと連携してプラント運転を最適化する融合型EMSについて述べる。

2. MBSEによるエネルギーマネジメント技術の高度化

VREの導入拡大に対応して電力システムは大きく姿を変えつつあり、つながるエネルギーシステムの重要性が高まっている。システムの複雑性が増す中では、個々の設備性能の向上だけでは価値を最大化できない。システム全体を俯瞰し、どのように協調・連携させるかが顧客価値を左右する。VREの出力変動を補完し、電力の安定供給を担う火力発電は、つながるエネルギーシステムの中心的役割を果たす。しかし、火力発電設備単体で最適化する従来手法では対応に限界があり、SoS全体の中で火力発電設備の位置付けを再定義する視点が不可欠である。そのため、運転計画・シミュレーション・自動制御を融合して設計・運用するアプ

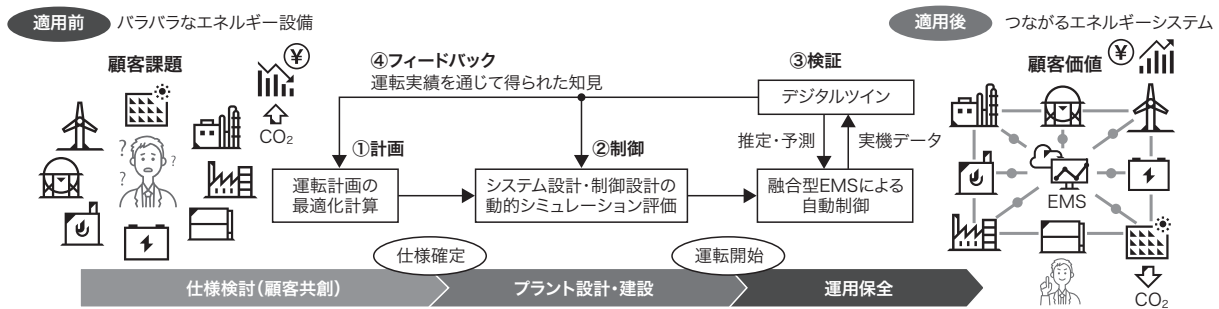


図1. MBSEによる価値づくり設計

複数のエネルギー設備の相互関係から新たな特質が生じることを創発と呼ぶ。この図は、MBSEに基づきこの創発性を引き出し、顧客価値の創出につなげる設計の考え方を示す。

Overview of value-oriented design based on MBSE

ローチが求められる、この設計思想への転換を支える枠組みがMBSEである。

図1は、提案するMBSEを中核としたエネルギーマネジメント技術の全体像を示している。MBSEは、システムとして達成すべき目的(ミッション)から要求を整理し、顧客との共創による仕様検討から、プラント設計・建設、運用保全に至るライフサイクル全体を、一貫したシステムモデル上で体系的に設計・管理する手法である。従来、個別に設計・運用されていたエネルギー設備に対し、この技術では、融合型EMSを中核として設備間の連携を図り、つながるエネルギーシステムとしての創発性を引き出すことで、顧客価値の創出を目指す。具体的には「VREの出力変動をどこまで吸収するか」、「燃料費とCO₂(二酸化炭素)排出量のトレードオフをどう取るか」、「水素・アンモニアへの燃料転換にどう備えるか」、「CCSに伴うエネルギー損失をどう抑制するか」といった顧客価値に直結する課題を明確化する。

これらに対し図1に示すように、運転計画の最適化計算により複数の候補案を導出し(①計画)、動的シミュレーション(Dynamic Simulation)を用いて機器制約や過渡挙動を評価することで、システム設計・制御設計を通じて実行可能な運転案へと具体化する(②制御)。その結果を、融合型EMSの自動制御に反映する。更に、サイバー空間のデジタルツインを活用することで、融合型EMSで作成した運転計画について、実機では試験が難しい条件であっても運転挙動を事前に安全に検証できる(③検証)。これにより、運転計画と実挙動の整合を取りながら最適運転計画を迅速に導出できる。また、仕様検討段階における運転計画の方針を、融合型EMSにより実運用へ確実に反映できるため、計画の実行可能性と運用効率を同時に確保できる。加えて、運用段階における運転実績を通じて得られた知見を設計段階へ反映することで、設計と運用を横断した循環的な改善が可

能となる(④フィードバック)。これらの枠組みにより、将来の需給変動や、燃料転換、CCS導入といった環境変化にも、柔軟かつタイムリーに対応できる。

当社の強みは、MBSEを実践するための基盤技術を自社で整備している点にある。SysML(Systems Modeling Language)に基づく要求分析手法と運転計画の最適化計算を連携させることで、設計初期から要求仕様を検証できる⁽¹⁾。更に、数理計画法による運転最適化技術や、起動停止・負荷応答・事故時挙動を再現する動的シミュレーション技術、及びデジタルツインを構成するROM技術をMBSE上で組み合わせ、つながるエネルギーシステムの計画・制御・検証・フィードバックを一貫して実施できる。加えて、設計段階で整理した運転計画や制御方針は運用段階で融合型EMSへ引き継がれ、実機データに基づいて、燃料消費量、CO₂排出量、及び需給バランスをリアルタイムに最適化する。これにより、設計と運用が途切れなく結び付き、プラントは高効率な運転状態を維持できる。

3. デジタルツインを実現するROMシミュレーション

デジタルツイン環境における融合型EMSでは、最適運転計画が実機プラントで成立するか否かを事前に評価するため、高速・高精度にプラント挙動を予測するモデルが不可欠である。しかし、エネルギー設備の熱流体現象は非線形性が強く、高分解能の詳細数値解析は計算負荷が大きいため、最適化計算や運用判断への適用には限界がある。そこで当社は、物理ベースのROMを構築する先行研究⁽²⁾の実用化に取り組んでいる。

図2(a)にROM構築ステップを示す。まずデータ前処理では、詳細数値解析から得られた温度・流量などの時系列データ(学習データセット)を、当社の機械系知識を体系化した関数群(理論式・経験式)に入力し、複数の候補関数項

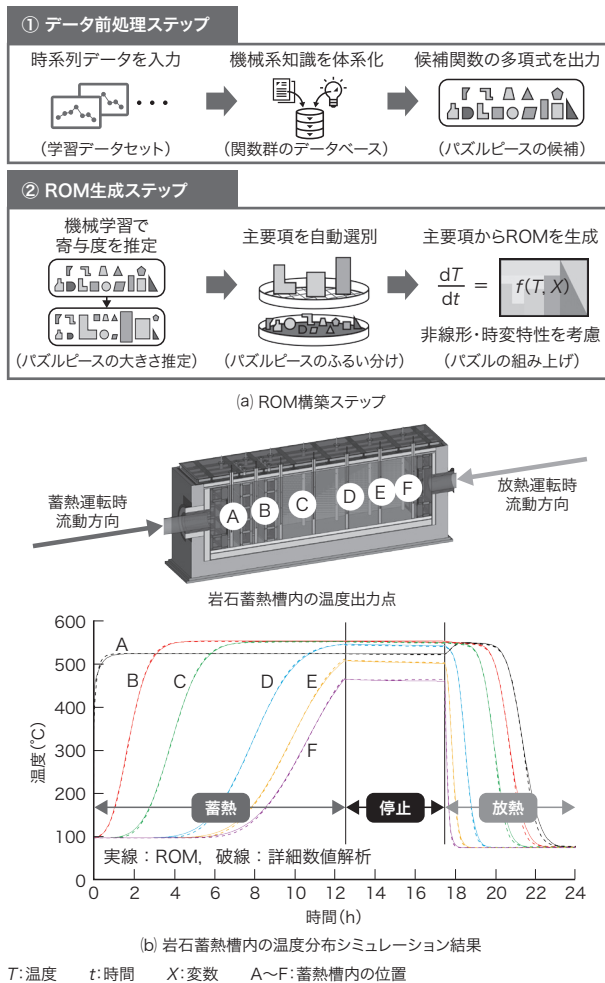


図2. ROM構築ステップと適用事例

複数の候補関数項から成る多項式モデルを生成し、機械学習により寄与度の高い項を選別するROM構築の流れをパズルに見立てて示す。また、岩石蓄熱槽を対象としてROMを構築し、流入空気及び内部発熱を考慮した条件下で、詳細数値解析と同等の精度を維持しつつ高速な温度分布予測を実現した。

ROM building process and application example

から成る多項式を出力する。次にROM生成では、機械学習により各項の寄与度を推定し、主要項だけを自動選別することで、必要な非線形・時変特性を考慮したROMを生成する。

図2(b)に示す岩石蓄熱技術を用いたEMSにおける蓄熱槽の事例では、自動生成されたROMは詳細数値解析と同程度の精度で温度分布を再現しながら、計算速度は数万倍高速である。また、流動条件や蓄熱材寸法の変更など多様な計算条件に対応可能であり、サイバー空間に構築されるデジタルツインの中核技術として、実機プラント挙動の高速・高精度な予測に寄与する。

4. クラウドシステムと連携する融合型EMS

運転計画・シミュレーション・自動制御を一体化した融

合型EMSの構成を、図3に示す。融合型EMSは、クラウドシステム(サイバー空間)側で最適化した運転計画値を、実機プラント(フィジカル空間)側のIoT(Internet of Things)装置(クラウドシステムと実機プラントを接続する通信装置)を介して配信し、監視制御システムがその計画値に基づいてプラントを自動制御する仕組みである。また、クラウドシステムと連携することで、運転計画を策定するユーザーと実機プラントの運転員が別会社・別組織に所属していても、融合型EMSを通じて連携できる。これにより、つながるエネルギーシステムに関わる複数の利害関係者が離れた場所で協働することも可能となる。

クラウドシステム側では、ユーザーが設定・更新した計算条件に基づき、融合型EMSがデジタルサービス TOSHIBA SPINEX for Energyの最適運転計画ツール及びROM・デジタルツインと連携する。この連携により、発電所や工場のエネルギー設備における需給に応じた最適化計算を行い、運転計画の策定を支援し、ユーザーの運用判断・計画業務を高度化することができる。また、実機プラントの運転データを収集し、専用のWebユーザーインターフェースにより、計画値と実績値の比較、設備稼働状態、将来予測値などをダッシュボード上で一元表示・設定する。

実機プラント側では、IoT装置と監視制御システムが最適運転計画を実行に移す。IoT装置は、クラウドシステムと実機プラントをつなぐデータ通信の中核として、下り伝送(運転計画値の配信)と上り伝送(運転データの収集)を担う。上り伝送で収集した運転データは、運転状態の監視に加え、サイバー空間のROM・デジタルツインを構成するシミュレーションモデルにデータ同化し、実機との乖離(かいり)を継続的に補正するために活用する。これらの伝送では、クラウドシステム側と実機プラント側で送受信データを照合し、インターネット回線の通信障害やデータ改ざんなどを検知した上で、必要に応じて再送制御を行うことで、クラウド連携の信頼性を高めている。また、IoT装置がクラウドシステム側へ定期的にお問い合わせのポーリング方式を採用することで、ユーザーが確認・反映した運転計画は融合型EMS上で最新化され、IoT装置が自動取得する。その結果、運転員の作業負担を低減できる。

監視制御システムは、IoT装置から受信した運転計画値をHMI(Human Machine Interface)端末に取り込み、計画された時刻に電力や蒸気流量などの計画負荷が得られるよう、必要な運転開始時刻を遡って自動計算する。運転員はHMIの通知に基づいて端末操作を行い、コントローラーは実装された制御ロジックに従って蒸気加減弁や燃料供給弁などのアクチュエーターへ操作信号を出力する。また、監

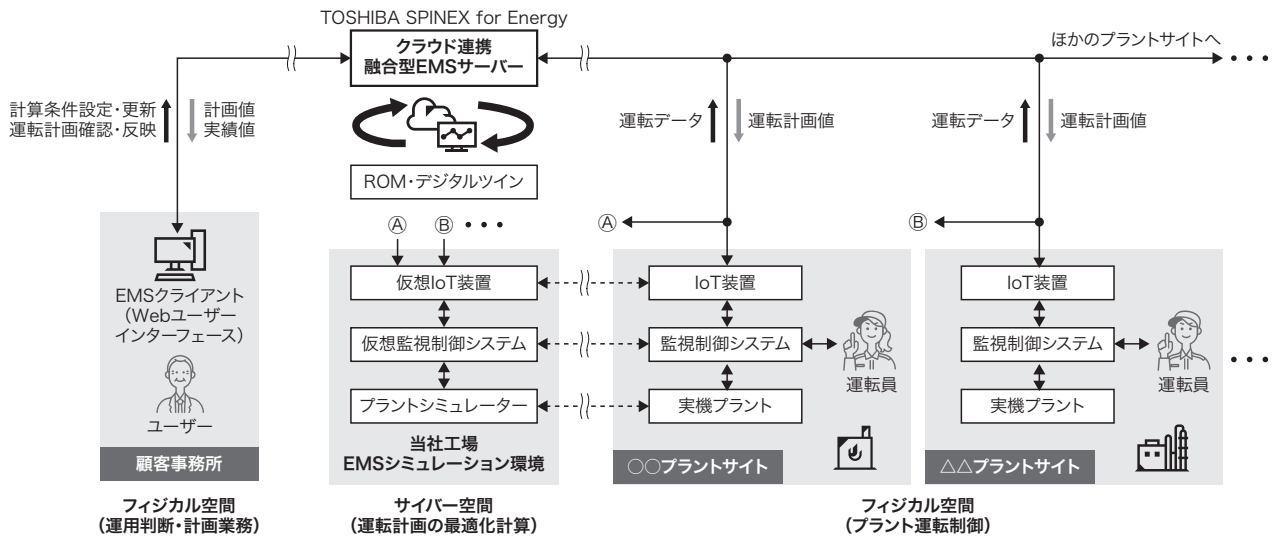


図3. 運転計画・シミュレーション・自動制御を一体化した融合型EMS

クラウド連携により複数設備・拠点を統合し、つながるエネルギーシステムの相互協調運転を可能とする。

Example of EMS integrating operation planning, simulation, and automatic control in conjunction with TOSHIBA SPINEX for Energy

視制御システムはプラント運転の自動化機能を備えており、簡便な端末操作により計画値に沿った運転制御を実現できる。将来的には、本店・本社から複数発電所や複数工場にわたるエネルギー設備を統合的に遠隔操作可能な仕組みに発展させ、省人化や働き方改革といった顧客要望に対応していく。

更に、融合型EMSではIoT装置と監視制御システムをソフトウェア上に仮想的に再構築し、実機と同等の振る舞いを再現する仮想化技術を実装している。これをプラントシミュレーターと接続することで、実機データ取得前から動作検証を行えるEMSシミュレーション環境を構築した。この環境により、実運用に近いデータを事前に収集し、シミュレーションモデルのパラメーター調整や最適運転計画の計算精度向上に役立てる。

5. あとがき

火力発電がVREを含む複数の設備と連携しながら調整力を発揮し、顧客価値を高めるための設計・運用技術確立してきた。MBSEによる価値づくり設計、ROMとデジタルツインを用いた高速・高精度なシミュレーション、及びクラウドシステムと連携する融合型EMSによる自動制御により、つながるエネルギーシステムの実現に向けて、火力発電の柔軟性と運用効率の向上を図ることができる。

開発した融合型EMSは、国内最大級の熱容量を持つ岩石蓄熱エネルギーマネジメント設備の実証運転への適用を進めており、2026年6月の運転開始を目指して、当社工場にて

EMSシミュレーション環境を用いた検証試験を行っている。

今後は、実証運転を通じて実機適用性を更に向上させ、顧客と共創しながらカーボンニュートラル社会に向けた次世代火力発電の価値創出を加速していく。

文献

- (1) Shirakawa, M. Application of model-based systems engineering in requirements analysis and optimal operation planning for hybrid renewable-hydrogen energy systems. Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers. 2026, **39**, 6, in press.
- (2) 鈴木智之, ほか. 機器の異常予兆検知と原因特定が可能な物理式を自動生成する機械学習技術. 東芝レビュー. 2023, **78**, 5, p.37-40. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2023/05/f04.pdf>>, (参照 2026-01-30).



白川 昌和 SHIRAKAWA Masakazu, Ph.D.
サーマル&ハイドロパワー事業部
博士(工学)
日本機械学会・システム制御情報学会会員
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



丸山 将司 MARUYAMA Masashi
グリッド・ソリューション事業部
府中エネルギーシステム工場 発電システム制御部
Power Generation Systems Control Dept.



浦吉 大輝 URAYOSHI Daiki
グリッド・ソリューション事業部
府中エネルギーシステム工場 インフラサービス開発・設計部
Fuchu Infrastructure Services Development & Design Dept.