

エネルギーシステムおよびエネルギー機器・プラントの性能評価技術の構築

—解析ツールの構築・適用とデジタルツインへの展望—

高橋 徹, 渡邊 泰

電力中央研究所では、各種エネルギーシステムのエネルギーフローや効率、CO₂ 排出量の評価を支援する「需要家サイドエネルギー消費解析汎用プログラム」、また、エネルギー機器・プラントの過渡変化の現象を模擬する動特性解析が可能な「動特性解析汎用プログラム」を開発し、実システムへの適用を行ってきた。さらに動特性解析の新たな展開として、現実の機器・プラントと同様の動きをリアルタイムに再現するデジタルツインへ適用し、データ科学との融合により運転やメンテナンスにおける意思決定をサポートする先進的な状態診断・運用支援システムなどへの活用にも取り組んでいる。本報告では、これらの概要について紹介する。

キーワード：エネルギー消費解析、最適化問題、動特性解析、デジタルツイン

1. はじめに

国全体の省エネルギー、CO₂ 排出削減を推進するためには、火力発電プラントの高効率化・燃料転換、原子力および再生可能エネルギーの利用といった電力の供給側のみならず、工場やビル、一般家庭などのエネルギーを使用する需要家側においても、省エネ性や環境性を正しく評価し、これらの向上を行う必要がある。

部門別にエネルギー消費の動向を見ると、2020 年度においては 1973 年度に比べ、産業部門が 0.8 倍と低下しているものの全体の半分以上を占めており、一方、業務他部門、家庭部門はそれぞれ 1.9 倍、運輸部門が 1.5 倍に増加しており、快適さや利便性を求めるライフスタイルの普及などを背景にエネルギー消費は増加が目立つ [1]。

一方、近年、需要家側のエネルギー機器として、高効率の燃料電池やガスエンジン、エアコン、大気熱エネルギーを利用して高効率で給湯可能な CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯機などといった機器が開発・導入されてきている。

このような新たな機器によるエネルギーシステムの選択肢は今後さらに多様化することが予想される。その省エネ性・省 CO₂ 性を評価するためには、個々の

機器の性能（熱効率）だけの比較ではなく、一次エネルギーから最終的に電気や熱などとして利用されるまでのエネルギーシステム全体としてのエネルギー効率の評価が必要と考えられる。

また、個々のエネルギー機器・プラントの性能について、熱効率といったいわゆる静特性のみならず、利便性を評価・向上するうえで出力追従性や起動速度といった動特性も重要である。

電力中央研究所においては、各種エネルギーシステムのエネルギー効率を評価する「需要家サイドエネルギー消費解析汎用プログラム」、また、エネルギー機器・プラントの動特性解析（ダイナミックシミュレーション）が可能な「動特性解析汎用ツール」を開発し、実システムへの適用を行ってきた。また、動特性解析の新たな展開として、現実のプラントと同様の動きをリアルタイムに再現するデジタルツインへ適用し、データ科学との融合により運転やメンテナンスにおける意思決定をサポートする先進的な状態診断・運用支援システムなどへの活用にも取り組んでいる。本報告では、これらの概要について紹介する。

2. 需要家サイドエネルギー消費解析

2.1 エネルギー消費解析の概要

エネルギー消費の指標として、「一次エネルギー消費」、「最終エネルギー消費」が広く使われている。

「一次エネルギー消費」は、一般的には系統電力および都市ガスなど化石燃料の一次エネルギー換算量を示すものである。省エネルギーという観点から評価するためにはこの一次エネルギー消費が重要であり、す

たかはし とおる, わたなべ ゆたか
一般財団法人電力中央研究所 エネルギートランスフォーマー
シオン研究本部プラントシステム研究部門 (兼) グリッドイ
ノベーション研究本部 ENIC 研究部門
〒 240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1
toru-tak@criepi.denken.or.jp
yutaka@criepi.denken.or.jp

すべてのエネルギー消費はこれにさかのぼって評価することが必要である。一方、「最終エネルギー消費」は、エネルギー機器で消費するエネルギー量であり、つまり電力量やガス量を示すものである。しかしながら、需要家が最終的に必要とするエネルギーは、この電力量やガス量ではなく、たとえば、部屋の温度を好みの温度に保てるエネルギーや、部屋を所定の明るさにするエネルギー、シャワーを浴びたり風呂に入ったりのためのお湯を沸かすのに必要なエネルギーなど、「便益」を得るためのエネルギーである。これらの量を「最終エネルギー負荷」と呼び、この「最終エネルギー負荷」がエネルギー機器の性能やシステム構成に無関係な「真の需要」ということができる [2]。最終エネルギー負荷としては、照明や動力など一般電力、冷房、暖房、給湯、厨房など各負荷が挙げられる。

したがって、需要家サイドでの省エネを実現するためには、まずこれらの最終エネルギー負荷を低減することが挙げられる。また、もう一つの方法としては、その最終エネルギー負荷を賄うために必要な一次エネルギー消費を削減すること、つまりエネルギーシステムの変換効率の向上が考えられる。同量の最終エネルギー負荷であっても、それを賄うためのシステム構成や機器性能、運用方法などによって一次エネルギー消費は異なる。したがって、システム構成や機器性能、運用方法などを変更した場合に、一次エネルギー消費の削減効果を定量的に解析することが必要である。

エネルギー消費解析は、機器効率や運転時間などが設定された条件のもとに機器の運転シミュレーションを行い、最終エネルギー負荷を満たすための一次エネルギー消費を算出する方法と定義する。この場合、設定された最終エネルギー負荷の時間変化に従って、機器の必要出力、燃料または電力消費量などを需要側から供給側へとエネルギーの流れとは逆方向に算出して行き、システム運用の時間的変化を求める。

上記のエネルギー消費解析の基本的なアルゴリズムを以下に、また、基本的な計算フローを図 1 に示す。

最終エネルギー負荷を $E_{end-demand}$ 、エネルギー変換機器の効率を η_{mech} 、その最終エネルギー消費を $E_{end-use}$ とすると、最終エネルギー負荷と最終エネルギー消費は次のような関係で表される。

$$E_{end-use} = E_{end-demand} / \eta_{mech} \quad (1)$$

また、一次エネルギー消費を $E_{pri-energy}$ 、一次エネルギー源単位（または燃料発熱量）を $\eta_{unit-energy}$ とすると、一次エネルギー消費と最終エネルギー消費 $E_{end-use}$

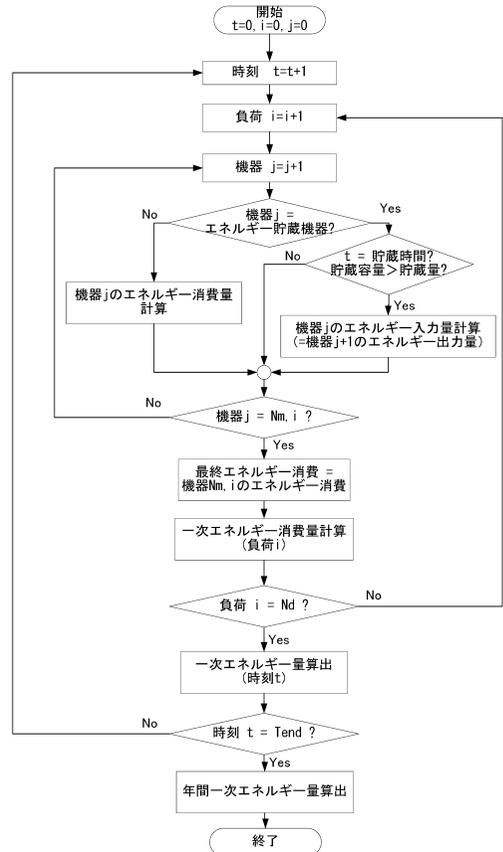


図 1 エネルギー消費解析の計算フロー [3]

の関係は次式で表される。

$$E_{pri-energy} = E_{end-use} / \eta_{unit-energy} \quad (2)$$

したがって、需要家サイドからのエネルギー需給解析において、最終エネルギー負荷 $E_{end-demand}$ 、エネルギー変換機器の効率 η_{mech} 、一次エネルギー源単位（または燃料発熱量） $\eta_{unit-energy}$ を条件として、時刻 t ごとに各負荷 i 、各機器 j について (1)、(2) を繰り返す、それらを足し合わせることで、日間、月間、年間の一次エネルギー消費を算出し、エネルギー需給システムの省エネルギー性を評価することができる。

2.2 汎用プログラムの開発

2.2.1 プログラムの概要

前節で述べたエネルギー消費解析のアルゴリズムを元に、汎用プログラム「需要家サイドエネルギー消費解析汎用プログラム」を開発した。パソコン上で容易にシステム構成を作図し、負荷データから年間一次エネルギー消費量を算出するなどの機能を有する汎用プログラムである。その実行画面と主な機能を図 2 に、特長を表 1 に示す。本プログラムは多くの機器モデルを

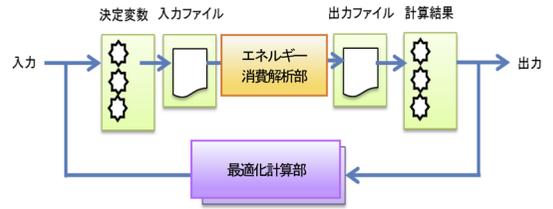
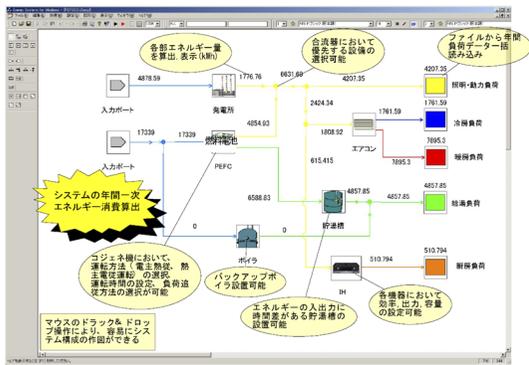
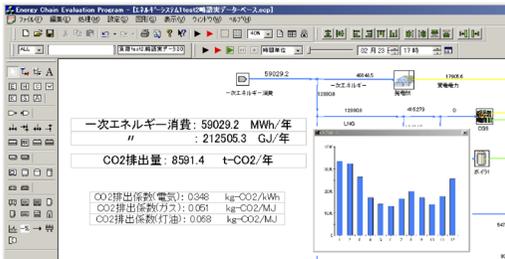


図3 プログラムの構成（最適化計算との融合）

(1)プログラムの実行画面と主な機能[3]



(2)プログラムの結果表示機能（表とグラフ表示）

図2 プログラムの実行画面

表1 プログラムの特長 [3]

特長	概要
幅広いシステムに対応	多くの機器モデルを有しており、貯湯槽や蓄熱槽、コジェネ機などの機器を含むシステムなど幅広いシステムに対応
高い柔軟性	システム構成の作成や機器の運用方法などの条件の設定・変更が柔軟。負荷特性や機器特性を自由に入力・変更可能
広い適応範囲	一般家庭、業務用ビル、工場について、システム構成や機器性能の違いによる比較、機器容量の選定、機器運用変更の影響評価などが可能

有し、貯湯槽や蓄熱槽などのエネルギーの入出力に時間差がある機器や、コジェネレーションのように2種類のエネルギーを出力する機器を含むシステムについても解析可能とした。グラフィカル・ユーザ・インターフェイス (GUI) を有し、システム構成の作図や機器の運用方法などの条件変更が柔軟にでき、また、負荷特性や機器特性の入力または変更が可能である。幅広いシステム・条件に対して省エネや省CO₂、さらにはエネルギーのランニングコストの検討・評価を支援するものである。

2.2.2 最適化手法との融合

コストやエネルギー消費量などが最小となる機器の容量、運転時間の探索などを行う際、これらの数値を入力し、計算を何度も繰り返す必要があるが、これを簡略化ならびに精緻化するため、最適化プログラムとの融合も図っている。

さまざまな構成のエネルギーシステムを対象とし、目的や変数も多様なため、問題に依存しない（汎用性が高い）最適化アルゴリズムとして、メタヒューリスティクスのアルゴリズムを採用した。また、図3に示すように、最適化計算部とエネルギー消費解析部とを独立させることで、一方の計算部を修正・改良した際に他方に影響しないよう、また、異なる最適化アルゴリズムを適用できるようなものとした。

2.3 適用事例

分散型電源への関心の高まりから、太陽光発電、燃料電池、蓄電池、CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯機などの開発・導入が進んでいる。解析適用事例として、これらの機器を含む、表2に示す各種エネルギーシステムについて、省エネ性（一次エネルギー消費量）・環境性（CO₂ 排出量）の解析を行った。なお、表中システムの①、②、③は使用する機器は同じでも、システム構成や蓄電池の稼働時間など運用方法を変更した場合のシステムである。

各システムのエネルギー消費量とCO₂ 排出量の算出結果の一例を図4に示す。同じ負荷（ここでは時間

表2 各システムの機器構成

システム	主な機器
三電池システム①	太陽光発電、蓄電池、燃料電池、給湯器、貯湯槽
三電池システム②	〃
三電池システム③	〃
全電化システム	太陽光発電、ヒートポンプ給湯機、貯湯槽
蓄電池全電化システム①	太陽光発電、ヒートポンプ給湯機、貯湯槽、蓄電池
蓄電池全電化システム②	〃

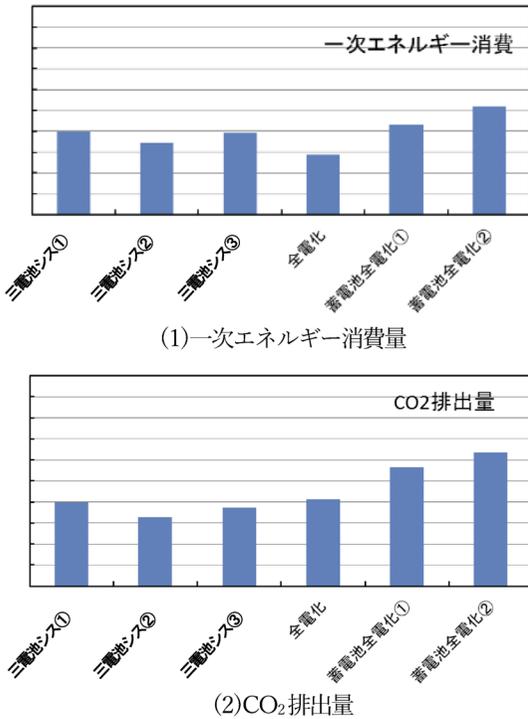


図4 システムの比較の一例

変化を含む年間の照明、動力および給湯の負荷)を賄うために、異なるシステム構成や運用方法の違いによる一次エネルギー消費量とCO₂排出量の比較評価ができた。また、ここでは示していないが、系統電力やガスの使用量も算出しているため、これらの結果からランニングコストの算出、比較も可能である。

3. エネルギー機器・プラント動特性解析

3.1 動特性解析の概要

動特性解析は、計算機上でプラントや機器などの過渡変化の現象を模擬することである。エネルギー機器・プラントにおいてシミュレーションの対象となる機器は、原動機、発電機、熱交換器、配管、ポンプ、弁、計測器、制御装置など多種にわたり、またこれらの特性を表す数学モデルは、流体の保存則により導かれる微分方程式や制御論理式など、多種多様である。

動特性解析の用途としては、従来のエンジニアリング・運転支援やプラントシミュレータとしてだけでなく、近年は現実のプラントと同様の動きをリアルタイムに再現するデジタルツインへ適用し、データ科学との融合により運転やメンテナンスにおける意思決定をサポートする先進的な状態診断・運用支援システムなどへの活用へも期待されている。

3.2 Modelica 言語と汎用ツールの開発

エネルギー機器・プラントを対象とした動特性解析は、物質収支やエネルギー収支などの各種保存則に基づき容器や配管内の作動流体の圧力とエンタルピの時間変化で表される微分方程式による数学モデルを積分計算する(詳細は文献[4]などを参照されたい)。そのため、さまざまなシステムに対して迅速に解を得るためには専用の解析ツールが必要となる。

そこで当研究所では、Modelica 言語をベースとして各種エネルギー機器・プラントに必要な要素機器モデル、制御系モデル、プラント内の作動流体であるガス、水・蒸気、各種冷媒の温度(エンタルピ)や圧力などの計算を行うための熱物性値計算関数群を実装して、図5に示すようなGUIを有する汎用性の高い動特性解析シミュレーション実行環境を構築した[4]。Modelicaを採用した理由としては、機器モデル間の入出力変数は変数の等価関係から決めており接続の表現が物理的な接続に近いこと、微分方程式や連立方程式を解く数式処理機能を備えていること、コードの記述が方程式ベースでありユーザ固有の機器モデルを開発しやすいことなどがあげられ、複雑かつ大規模システムのモデル構築とシミュレーションに適していると考えられる。また、機器モデルなどをGUI上で組み合わせることも可能で柔軟にシステム全体モデルの作成や条件設定ができ、系統図に近い形でシステム構成を表現できるため、対象システムの変更などがあつた場合も接続線の変更だけで解析可能である。Modelica 言語により構築されたエネルギー機器・プラントモデルは、いわゆる1Dモデルとして位置づけられる[5]。1Dは特に1次元の意味ではなく、物事の本質を的確に捉え、機能を見通しのよい形式でシンプルに表現することを意味している。1Dモデルは、一般的にはComputational Fluid Dynamics (CFD) や Finite Element Method (FEM) などの3Dモデルと比較して計算負荷が小さく、機械・電気・熱・流体などの複合領域の現象を表現・連成しやすいため、システム全体の機能や性能検討に適したモデリング手法と考えられている。

Modelica 言語で開発されたモデルによりシミュレーションを実行するためには、Modelica 言語に準拠したシミュレーションソフトウェアが必要となる。著者らは商用ソフトウェアであるDymola[6]をベースとして動特性解析汎用ツールを構築したが、現在までに商用ソフトウェアからオープンソースソフトウェアまでさまざまなソフトウェアが開発されており、基本的にはModelica 言語に準拠して作成されたモデルであれ

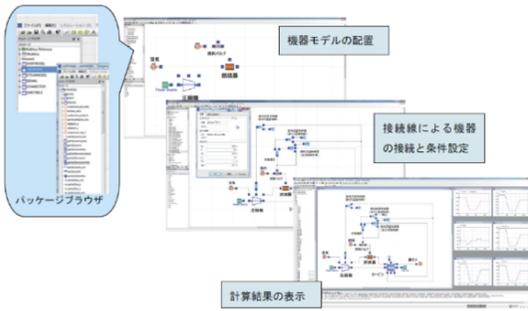


図5 動特性解析汎用ツールの概要 [4]

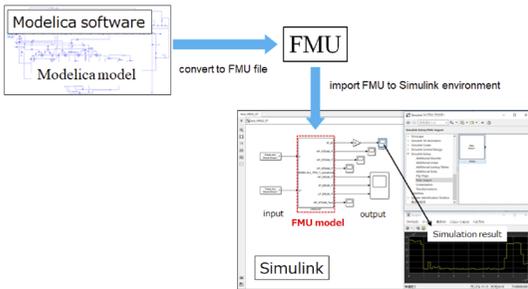


図6 FMUによるシミュレーション実行フロー (Simulink)

ばどのソフトウェアでもモデル作成と計算実行が可能である。そのほかにも、Function Mock-up Interface (FMI) [7] の機能を活用することで、Modelica 準拠のソフトウェア以外でも、Modelica によるプラントモデルを使ったシミュレーションが実行できる。例として、Simulink 環境での利用フローを図6に示す。Modelica 準拠のソフトウェアを使ってモデルを Function Mock-up Unit (FMU) として出力し、Simulink などの別のソフトウェア環境でFMUを読み込むことでシミュレーションを実行することが可能となる。このように、構築したプラントモデルをさまざまなユーザが容易に再利用できる仕組みも提供されている。

3.3 適用事例

3.3.1 CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯システムへの適用
動特性解析汎用ツールを用い、CO₂ 冷媒を作動流体とするヒートポンプ給湯システムに対して、各種運転操作に対するツールの適用性および妥当性検証を実施した [8]。

本事例では、当所保有の超臨界 CO₂ 伝熱流動ループを対象とした。図7に装置の構成図を示す。本装置は CO₂ を作動媒体として単段圧縮サイクルを構成し、圧縮機、膨張弁、ガスクーラ熱交換器群、蒸発熱交換器群をもつ構成となっている。いずれの熱交換器も水冷式であり、熱源・熱負荷装置から温度および流量を

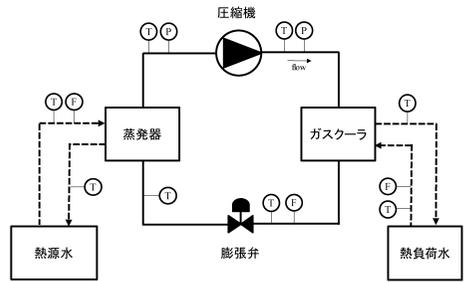
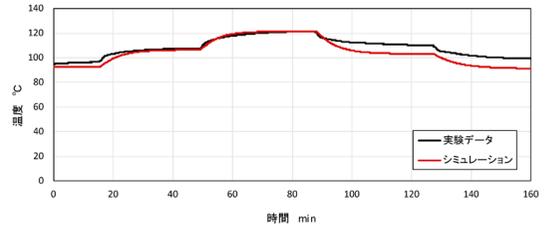
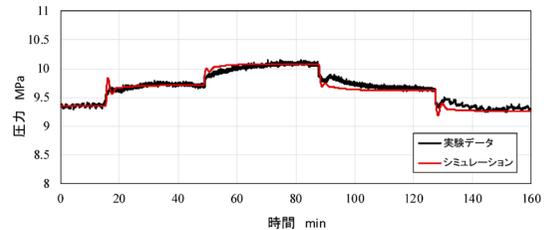


図7 超臨界 CO₂ 伝熱流動ループ装置の概要 [8]



(1)圧縮機出口温度



(2)圧縮機出口圧力

図8 解析モデルの妥当性検証結果 [8]

制御した熱源水・熱負荷水を供給している。本ツールを用いて、上記装置を対象とした動特性解析モデルを構築し妥当性検証を実施した。解析モデルの妥当性検証にあたっては、圧縮機のインバータ周波数を変化させた際の実験データを用いた。

図8に運転データとシミュレーション結果の比較結果の一例を示す。図より、部分負荷時には誤差がややみられるものの、運転データをよく再現できていることがわかり、本解析ツールの妥当性を確認できた。

上記モデルに貯湯タンクユニットを組み合わせた仮想的なヒートポンプ給湯システムモデルを構築し、本解析ツールのシステム性能評価に対する適用可能性について検討した。図9に解析モデルの概要を示す。貯湯タンクモデルでは、出湯の際にはタンク底部から水を抜き出しヒートポンプ給湯機へ供給し、加熱された湯がタンク頂部へと戻される。また、給湯の際には、タンク頂部から湯を抜き出し、水と混合して所定の給湯温度の湯を供給するとともに、タンク底部から給水し

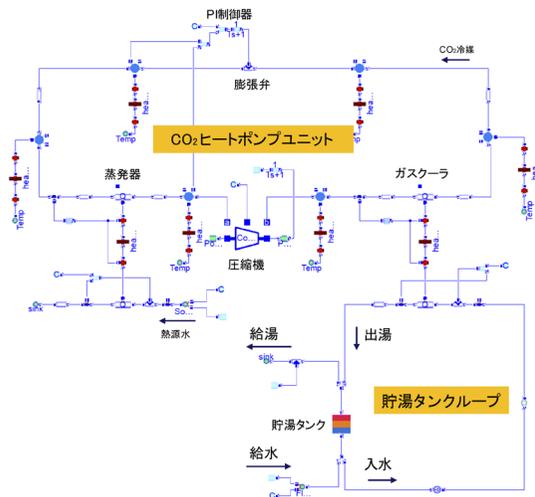
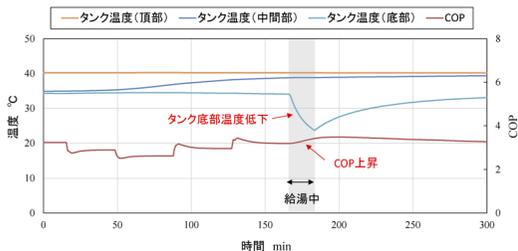


図9 ヒートポンプ給湯システムモデルの概要 [8]



注1) シミュレーション期間中はヒートポンプからの出湯は継続されている
 注2) ヒートポンプモデルには超臨界CO₂伝熱流動ループのモデルを用いており、出湯温度は試験条件である40℃としている

図10 シミュレーション結果例 [8]

補給される。

図10にシミュレーション結果を示す。結果より、貯湯タンクにおいては、ヒートポンプ給湯機から継続的に湯が給湯されていることにより、タンク内の水温が時間の経過とともに上昇していることがわかる。一方、160分過ぎからの給湯操作により貯湯タンクの底部から約20℃の給水が流入するため、給湯中は貯湯タンク下部の水温は低下していることがわかる。また、図10のように、出湯操作後にヒートポンプ給湯機の入水の状態量の変化の影響でヒートポンプシステムの成績係数(COP)も変化している様子が捉えられている。

以上より、本ツールによりヒートポンプ給湯システムモデルを構築し、システム全体としての運転シミュレーションが可能であることが確認できた。これにより、今回のケースのようにさまざまな機器を組み合わせたシステム全体に対する運用シミュレーションにも活用できる可能性があることを示せた。本ツールでは

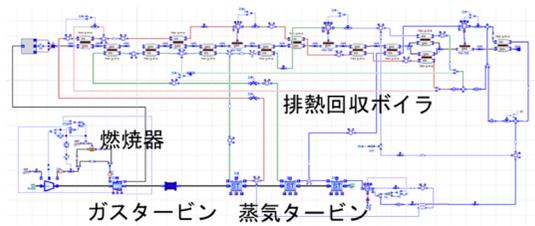
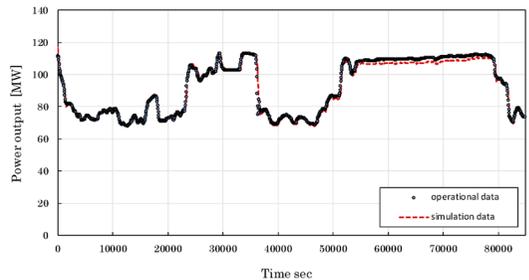
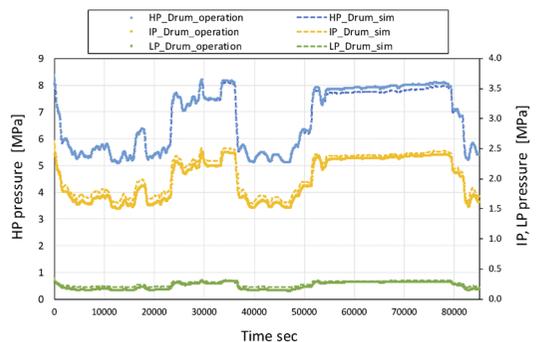


図11 既設GTCCの動特性解析モデルの例



(1)ST 発電出力



(2)蒸気圧力

図12 解析モデルの妥当性検証結果 [9]

需要家サイド機器として家庭用・業務用ヒートポンプシステム、冷凍ショーケース、エアコンなどを対象としたシステムモデル構築も可能である。

3.3.2 ガスタービンコンバインドサイクルへの適用
 動特性解析汎用ツールは、火力発電プラントといった大型でかつ複雑なシステムを対象とした妥当性検証および運用性向上検討にも適用している。ここでは、既設のガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)プラントへの適用事例 [9] を紹介する。

本事例では、3重圧式の排熱回収ボイラ(HRSG)および蒸気タービン(ST)を有するGTCCを対象とし、プラント系統図や機器仕様、運転データを基にモデルを構築した。動特性モデルの概要を図11に示す。妥当性検証にあたり、結果の一例として、図12に示すように、ST発電出力や蒸気に関する各部温度・圧力な

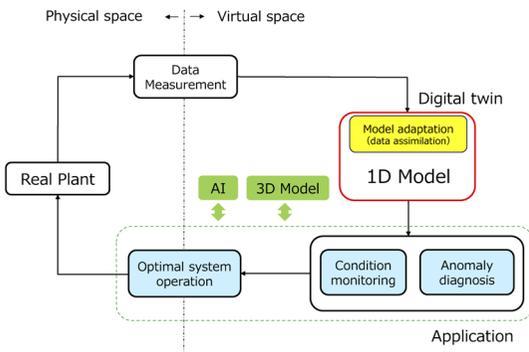


図 13 1D モデルによるデジタルツインシステム

どの状態量の変化もよく一致することを確認できた。

本解析ケースのシミュレーション実行時間についても評価した。解析にはラップトップ PC (CPU: Intel® Core™ i5-8250U, 1.60GHz, メモリ: 8GB) を使用し, Dymola の数値ソルバには Dassl を使用した。結果として, 上記解析ケースでは 1 日分のシミュレーションをおよそ 200 秒で実行できた。また, Dymola により Modelica モデルを FMU として出力し, MATLAB/Simulink 環境の FMU ブロックにインポートして解析を実行した場合の計算時間についても評価したところ, 1 秒間隔の固定ステップの解析でも実時間より速い計算速度となることが確認できた。

3.4 デジタルツインへの活用へ向けた展望

近年, プラントシステムの運転・保守管理にビックデータ解析やデジタルツインなどの最新のシミュレーション技術を適用し, 設備管理業務を高度化する取り組み事例も増えている。デジタルツインとは, 現実世界の物理システムを仮想空間上で模倣する技術であり, プラントユーザがシステムの状態をより良く理解し, 迅速に意思決定を行うのに役立つと考えられる。

デジタルツインを実現するための仮想空間モデルの構築にはさまざまなアプローチに基づくものがあり, どのようなモデルを使うかは用途や設備状況に応じて変わってくる。システムレベルのデジタルツインを構築する際には, 1D モデルがベースになると考えられ, システムおよび個別機器の機能や性能のリアルタイム

監視・分析, 実機データとシミュレーション結果の差異の分析による異常兆候の早期検知・診断, 機器の故障や性能低下の予測による保守の効率化, メンテナンス時期や電気料金変動などを考慮した運用最適化などに活用できる可能性がある。また, AI・機械学習手法の適用によりデータ分析機能を強化でき, 3D モデルの連携により 1D モデルだけでは把握できない個別機器の細部に関する情報も活用できるようになる (図 13)。

1D モデルをデジタルツインへ活用するにあたり, 主な技術的要件としては, (1) 計測・制御システムへのシミュレーション環境の統合, (2) リアルタイムシミュレーション (オンライン化) への対応, (3) 実機運転データによるモデルの自動適合などが挙げられる。動特性解析汎用ツールにより構築した解析モデルを用いることでこれらの要件を満たせる可能性があり, システムの実現性について今後さらなる技術的検証を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, 「令和 3 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2022)」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/html/2-1-1.html> (2022 年 8 月 22 日閲覧)
- [2] 橋本克巳, 高橋徹, 吉葉史彦, 齋川路之, 浜松照秀, “家庭の次世代エネルギーシステムに関する省エネ性, 環境性評価,” 電力中央研究所研究報告, W00021, 2001.
- [3] 高橋徹, 幸田栄一, 橋本克巳, 中尾吉伸, “需要家サイドエネルギー需給解析汎用プログラムの開発,” 電力中央研究所研究報告, M10009, 2011.
- [4] 高橋徹, 中本政志, 渡邊泰, “火力発電システム動特性解析ツールの構築,” 電力中央研究所報告, M15005, 2016.
- [5] 日本機械学会, 『設計のための 1DCAE 概念と実現技術』, 日本機械学会, 2020.
- [6] Dassault Systems, Dymola, <https://www.3ds.com/ja/products-services/catia/products/dymola/> (2022 年 8 月 29 日閲覧)
- [7] FMI, Functional Mock-up Interface, <https://fmi-standard.org/> (2022 年 8 月 29 日閲覧)
- [8] 渡邊泰, 高橋徹, “ヒートポンプシステムを対象とした動特性解析ツールの開発,” 電力中央研究所報告, C19008, 2020.
- [9] Y. Watanabe and A. Traverso, “Dynamic simulation of steam bottoming system in a combined cycle power plant with Modelica,” In *Proceedings of International Gas Turbine Congress*, IGTC-2019-164, 2019.