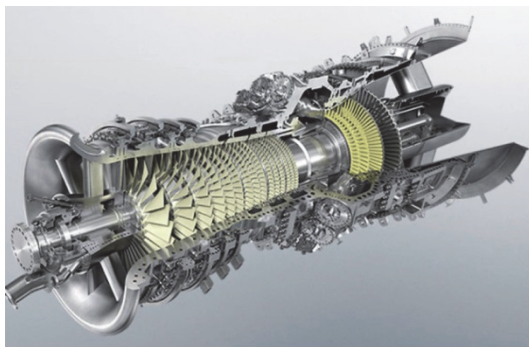


安定燃焼と高負荷変化率を実現する次世代ガスタービン制御

Next-Generation Gas Turbine Control for High Ramp Rate and Stable Combustion

岸 真人*¹

Makoto Kishi

竹中 竜児*²

Ryuji Takenaka

羽賀 僚一*²

Ryoichi Haga

高木 一茂*³

Kazushige Takaki

戸田 修平*⁴

Shuhei Toda

福本 皓士郎*⁴

Koshiro Fukumoto

再生可能エネルギーの増加による出力変動に対応するため、発電用ガスタービンは高負荷変化率への対応がこれまで以上に求められている。高負荷変化率の実現には、過渡状態での安定燃焼実現及び出力やタービン入口温度の制御性向上が不可欠である。また、過渡時においてもタービン入口温度を高く保つことができれば、高効率化、CO₂ 排出量削減も可能となる。これらを実現すべく、物理モデルに基づくタービン入口温度推定手法と将来を先読みして制御するモデル予測制御を組み合わせた次世代ガスタービン制御を開発した。本報では、本技術の概要と当社実証発電設備での検証状況について説明する。

1. はじめに

2015年、第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)にてパリ協定が採択されことを皮切りに、カーボンニュートラルに向けた動きが世界的に加速しており、米国、EU、日本は2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。この流れを受け、日本国内の全発電電力量に占める再生可能エネルギーを含む自然エネルギーの割合は2021年には20%を超え、2014年の12%から大幅に増加した。再生可能エネルギーの増加はCO₂削減に寄与するものの、その発電量は時々刻々の環境状態に依存するため変動が大きいという短所を持つ。この発電量の変動を吸収すべく、火力発電所には高負荷変化率などのフレキシブルな運用が求められており、火力発電所の中で最もCO₂排出量が少ないGTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)は、これまで以上に高い負荷変化率での運転が求められている。

一方、GTCCの主要コンポーネントの1つであるガスタービンの安定的な運転には精緻な制御が要求され、燃料と空気の投入バランスが適切でない場合、燃焼振動の発生や制限温度超過により重大な機器損傷を引き起こすリスクがある。負荷変化率を高くすると、燃料と空気を適切に制御し安定した運転を実現することが難しくなっている。そこで、モデル予測制御をベースとした次世代ガスタービン制御を開発した。

以降、2章にて次世代ガスタービン制御の概要を、3章にてシミュレーション及び実証発電設備での検証状況について示し、4章でまとめを述べる。

*1 デジタルイノベーション本部 CIS部 グループ長 技術士(機械部門)

*2 エナジードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC事業部 高砂プラント技術部 主席技師

*3 デジタルイノベーション本部 CIS部

*4 エナジードメイン エナジートランジション&パワー事業本部 GTCC事業部 ガスタービン技術部

2. 次世代ガスタービン制御

当社の陸用大型ガスタービンの構成を図1に示す。ガスタービンは、圧縮機、燃焼器、タービンの主要コンポーネントから成り、圧縮した空気を燃焼させて 1600°C超、2MPaG 超の高温・高圧の燃焼ガスを発生し、タービンで動力を得るものである。

以下に、現状のガスタービン制御方法と現在開発中の次世代ガスタービン制御方法の概要を説明する。

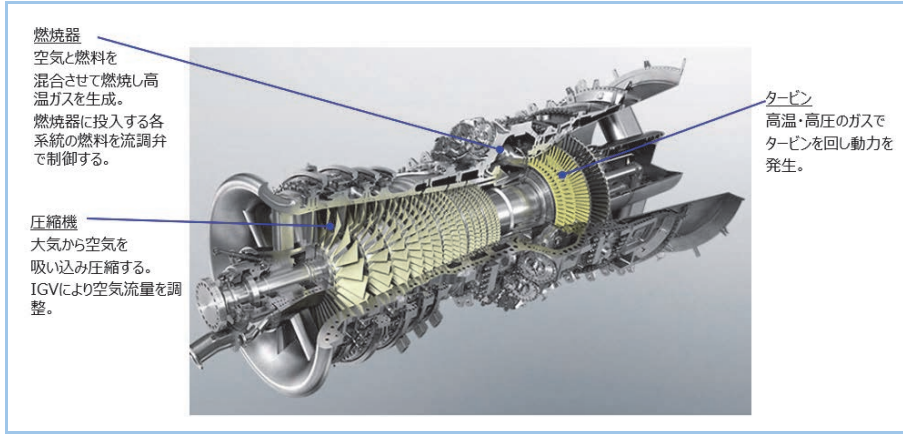


図1 陸用ガスタービンの構成

2.1 現状のガスタービン制御方法の概要と課題

(1) 現状のガスタービン制御方法

発電用ガスタービンは、通常運用時、回転数一定の下、出力をデマンドに追従させるよう運転する。出力の増加は、燃料流量調節弁にて燃料流量を、圧縮機入口の IGV (Inlet Guide Vane) にて吸気空気流量を増加させ、ガスタービンの作動燃焼ガスの流量を増加するとともに、燃焼温度を上昇させることで実現する。

現状のガスタービン制御の概念図を図2に示す。燃料流量は出力が目標値に追従するようフィードバック制御し燃料流量指令を決定する。空気流量はIGVを予め設定した出力に対するテーブル設定に応じて開度を決定して制御する。

また、燃焼器ノズルの燃料配分制御では、上位制御で決定した全燃料流量を複数の燃料系統に配分する。各々の系統への燃料指令は全燃料流量指令にタービン入口温度に応じたテーブル設定で算出する配分比設定をかけることで算出する。ただし、タービン入口温度は非常に高温で計測できないため、出力や IGV 開度といった主要な状態量を用いて性能マップから算出する簡易推定値を用いる。

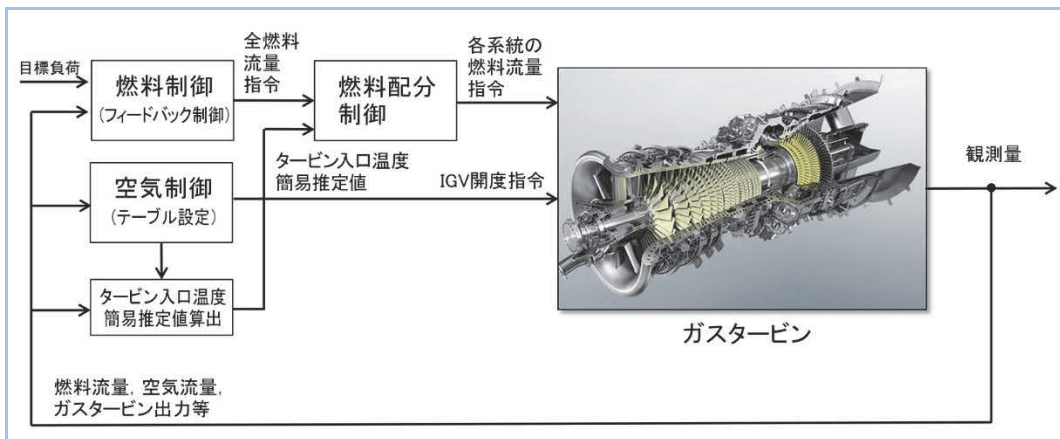


図2 現状のガスタービン制御の概念図

(2) 現状のガスタービン制御の課題

現状のガスタービン制御の課題を以下に示す。

① 安定した燃焼制御と高負荷変化率の両立

ガスタービンの燃焼器は、運転状態に応じて適切な燃料配分を設定することで安定した燃焼を実現する。燃料配分が適切でない場合、燃焼振動を発生するリスクがある。燃料配分は(1)で示した通り主要な状態量と性能マップから簡易的に推定した値を用いて算出するが、高負荷変化率運用の際は、タービン入口温度推定の精度低下によって、タービン入口温度に応じた適切な燃料配分に対してずれが生じる。

また、ガスタービンの負荷変化時は、予め設定した作動ライン(出力とタービン入口温度の設定)となるよう燃料と空気を投入するが、負荷変化率が高くなると、目標の作動ラインに対して実際の作動ラインがずれ、安定的な運転が実現できないリスクが高まる(図3)。

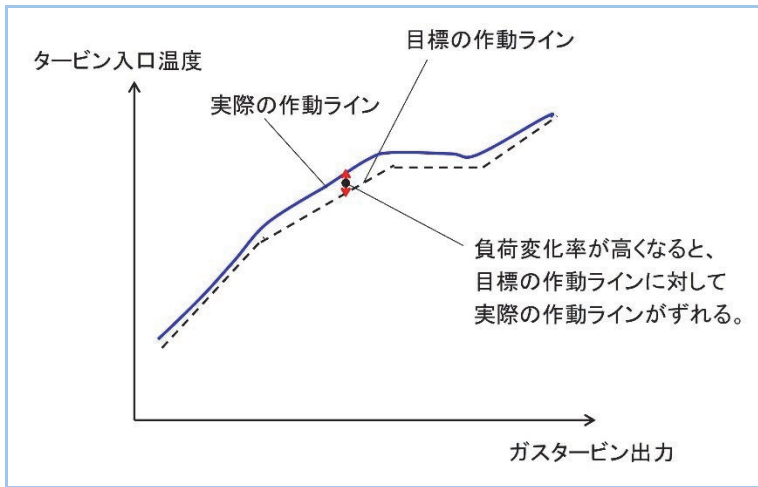


図3 目標のタービン入口温度作動ラインに対するずれ

② 定格出力近辺での出力追従性の向上

定格負荷付近での出力上昇時は、機器保護の観点から、タービン入口温度が上限を超えないよう出力上昇レートを抑制するため、出力の追従性が悪化する(図4)。

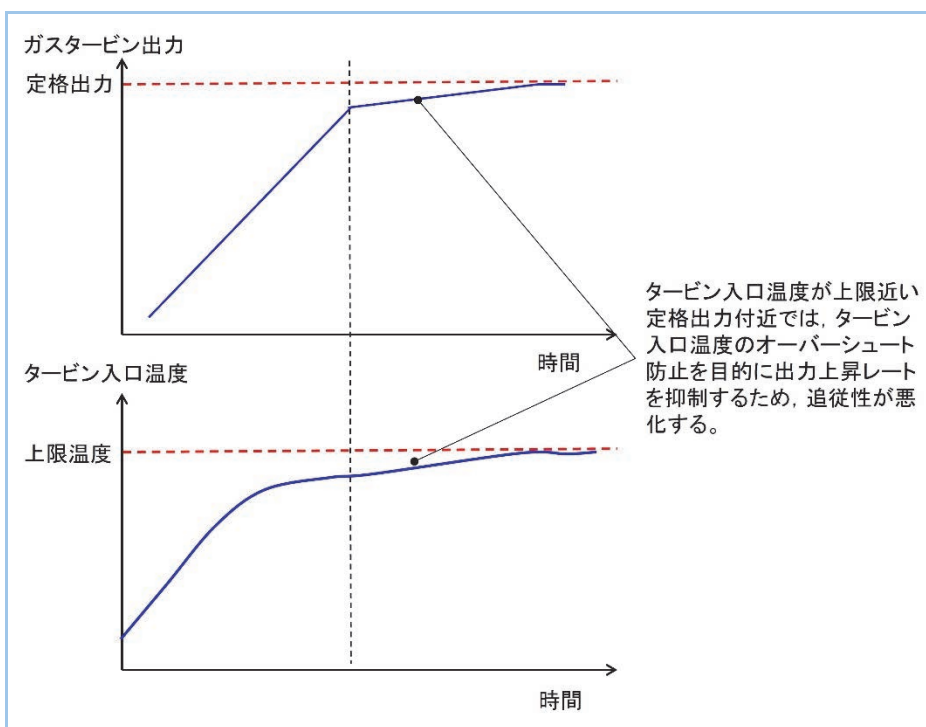


図4 定格出力近辺での出力追従性の悪化

③ 部分負荷での高効率運転の実現, 及び, CO₂ 排出量低減

高効率な運転を実現し CO₂ 排出量を低減するための手法の1つとして, 部分負荷でもタービン入口温度を高く保つ運用が考えられる。従来の制御方法では, タービン入口温度超過の懸念から, 上限温度から余裕をもって部分負荷運転をする必要があった(図5)。

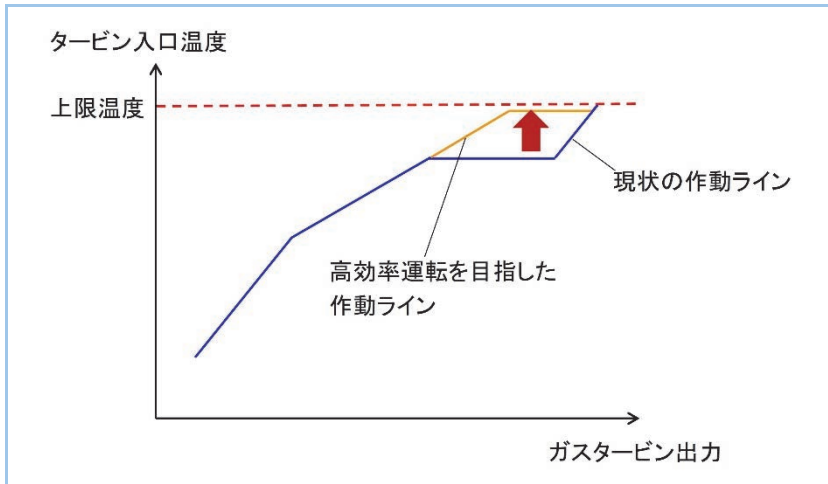


図5 タービン入口温度作動の現状ラインの高効率運転ライン

2.2 次世代ガスタービン制御

2.1 節で示した課題を解決するため, 高負荷変化時でも高い追従性を実現しつつ, 安定的に運転することを目論み, 次世代のガスタービン制御を開発中である。次世代ガスタービン制御の概念図を図6に示す。従来制御(2.1 節)では, タービン入口温度をリアルタイムに精度よく評価することが困難であったことから, タービン入口温度を直接制御していなかったが, 次世代ガスタービン制御では, 出力に加えてタービン入口温度も同時にフィードバック制御することでタービン入口温度の制御精度向上を図る。本手法の技術的な特徴は, (1)物理モデルに基づくタービン入口温度推定による正確なタービン入口温度の算出, (2)将来の挙動を予測して制御するモデル予測制御による追従性の向上である。以下, 詳細を説明する。

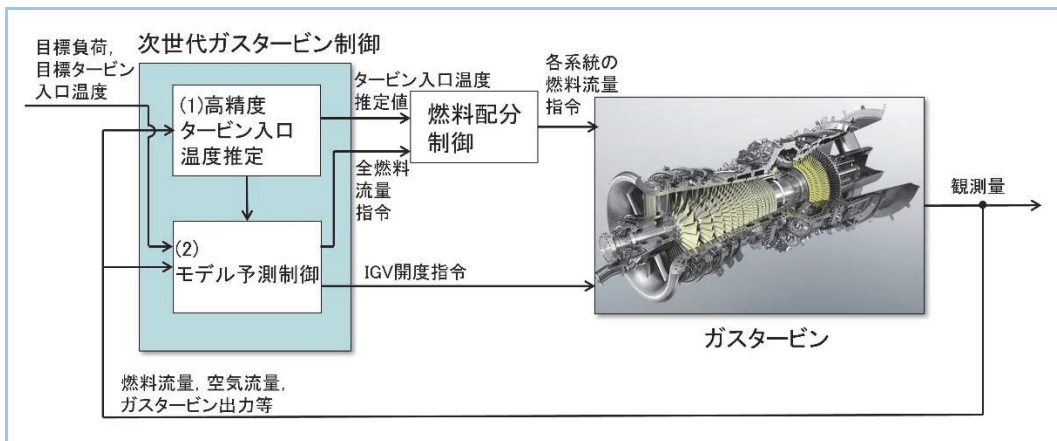


図6 次世代ガスタービン制御の概念図

(1) 物理モデルに基づくタービン入口温度推定

燃焼制御の指標として重要な状態量であるタービン入口温度を正確に算出する手法を開発した。本手法の特徴は, 2つの物理モデルを組み合わせることで静的な精度と過渡挙動の精度を両立したことにある。概要を図7に示す。

1つめの物理モデルは, 排ガス温度やガスタービン出力といったガスタービン全体のセンサ値を用いて熱収支を計算し正確なタービン入口温度を算出するモデルである。ただし, センサの計測遅れが大きいいため整定時にしか精度を担保できない欠点がある。2つめの物理モデル

は、燃焼器廻りの熱収支を計算して遅れなくタービン入口温度を算出するモデルである。ただし、燃料流量算出に関するモデル式に誤差を含むため絶対値としての精度は不十分である。1つめの物理モデルで整定時のデータに基づき燃料流量の真値を算出し、2つめの物理モデルの燃料流量計算値の誤差を補正することで、整定時/過渡時どちらの運用においても高精度でタービン入口温度を把握することが可能となる。

本手法で算出した高精度、かつ、過渡的なずれが生じないタービン入口温度推定値を、燃料配分制御や(2)で後述するモデル予測制御の入力値として用いることで、安定燃焼や高負荷変化率運転を実現することができる。

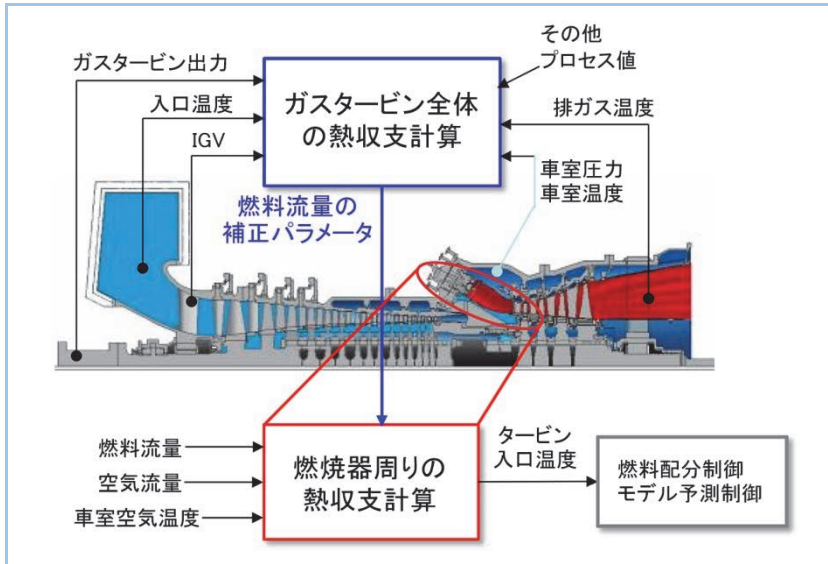


図7 物理モデルに基づくタービン入口温度推定

(2) モデル予測制御によるガスタービン出力とタービン入口温度の先読み制御

モデル予測制御は、対象の挙動を表現した“予測モデル”に基づいて将来の挙動を予測しながら制約条件を考慮し、最適化計算を毎ステップ繰り返して制御入力を算出する手法である。車の運転に例えると、目の前のカーブの形状や前を走る車の運転状況から将来の挙動を予測して、車線中央をトレースし、ガードレールや前の車に衝突しないよう早めにアクセルやハンドルを操作する一連の動作をイメージすると理解しやすい(図8)。

ガスタービン向けのモデル予測制御適用の詳細について説明する。ガスタービン出力とタービン入口温度について数秒先までの将来分まで含めた目標軌道を設定する。この目標軌道に追従するようにガスタービンの挙動を表現する“予測モデル”を用いて将来挙動を予測し、目標軌道への追従性と安定性のトレードオフを考慮した評価関数を最適化することにより燃料流量指令とIGV 開度指令を毎ステップ算出する(図9)。本手法により、ガスタービン出力とタービン入口温度を精度よく目標値に追従させることが可能となる。

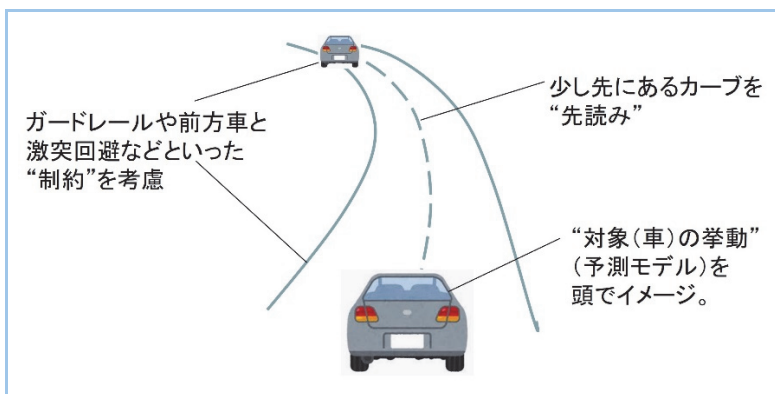


図8 車の運転とモデル予測制御のアナロジー

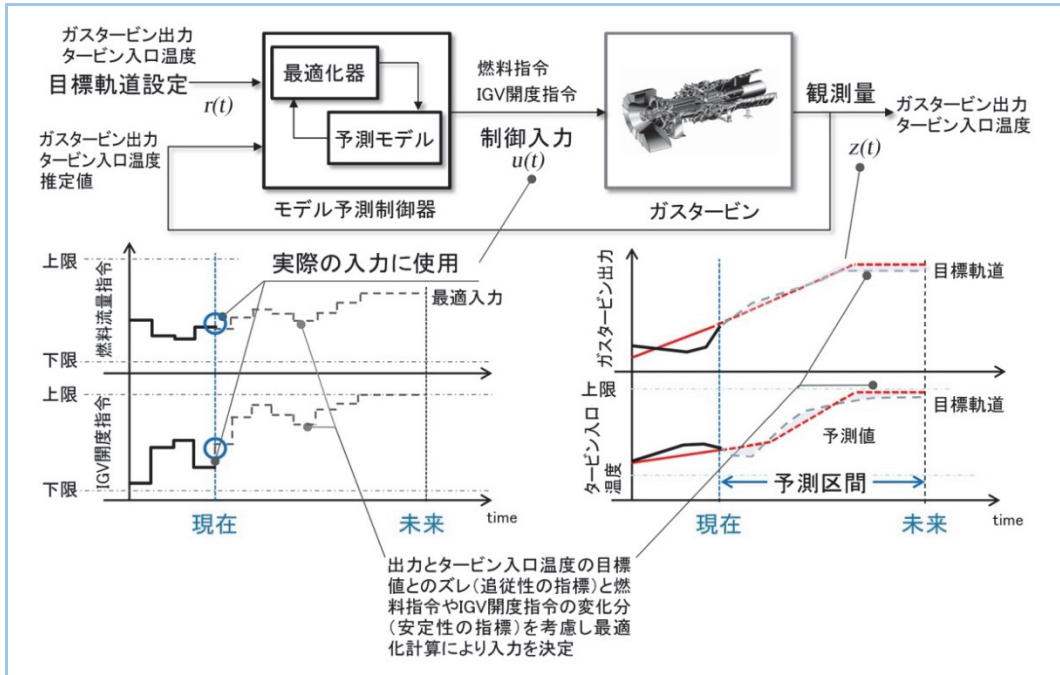


図9 ガスタービン向けのモデル予測制御

3. シミュレーション検証及び実証発電設備での検証

2章で構築した次世代ガスタービン制御の動作検証として、動特性解析を用いたシミュレーション検証、及び、当社高砂製作所内の実証発電設備にて実機検証を行った。

3.1 シミュレーションによる検証

当社は、プラントの圧力、温度、流量などの挙動を時系列的に計算する動特性解析技術を保有している。汎用解析ツール (MATLAB/Simulink) にてガスタービン部と従来ガスタービン制御部、及び、次世代ガスタービン制御部の動特性解析モデルを構築し、負荷変化をはじめとした各種運用を模擬したシミュレーションを行い、動作検証及び制御性能を確認した (図 10)。

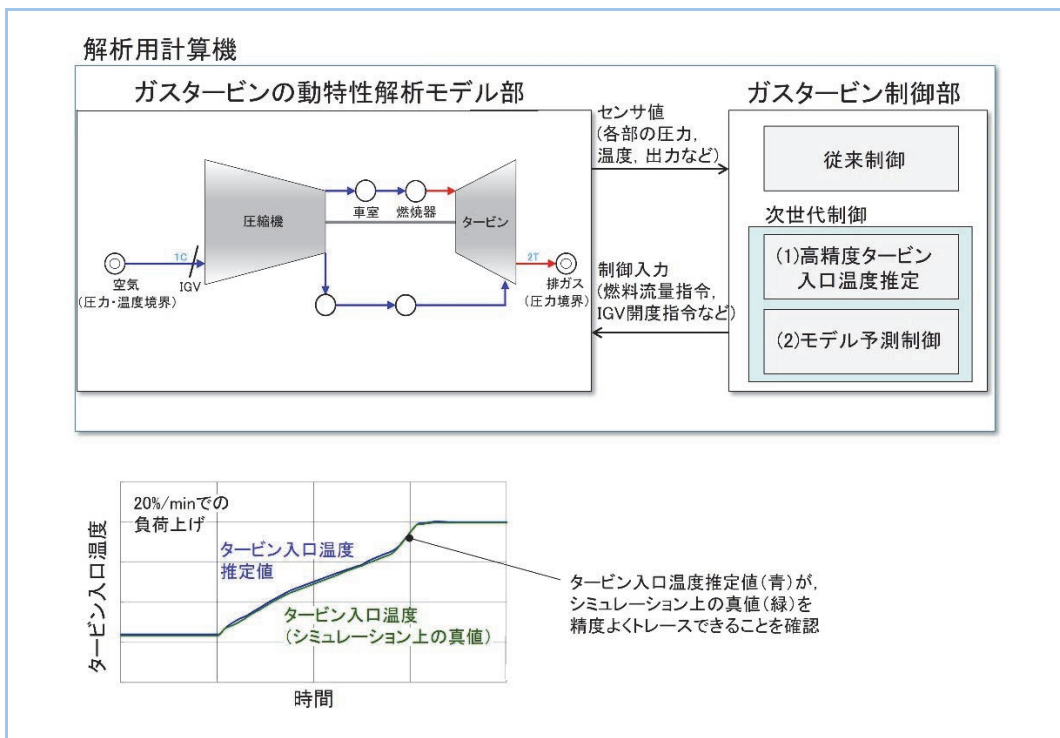


図 10 シミュレーションによる解析(タービン入口温度推定値の精度確認)

上記の机上解析に加え、次ステップの検証として、HILS(Hardware in the Loop Simulation)検証も実施した。これは、実機向けの制御装置を用いてリアルタイムシミュレーションを行うものであり、実機制御装置に仕様通りに制御アルゴリズムを実装でき狙い通りの動作を実現することを検証した。

3.2 実機による検証

シミュレーション検証に引き続き、当社高砂製作所内の実証発電設備を用いて、次世代ガスタービン制御の実機実証試験を行った。

結果、従来(5~10%/min)と比較して高い負荷変化率(20%/min)での負荷変化運転において、タービン入口温度推定値の目標値との偏差が大幅に縮小するとともに、定格温度到達時の温度上限を過渡的に超過することなく、速やかに上限温度に到達することを確認した。また、ガスタービン出力についても、タービン入口温度上限で制限される限界出力まで速やかに上昇し、所望の動作となることを確認した(図 11)。

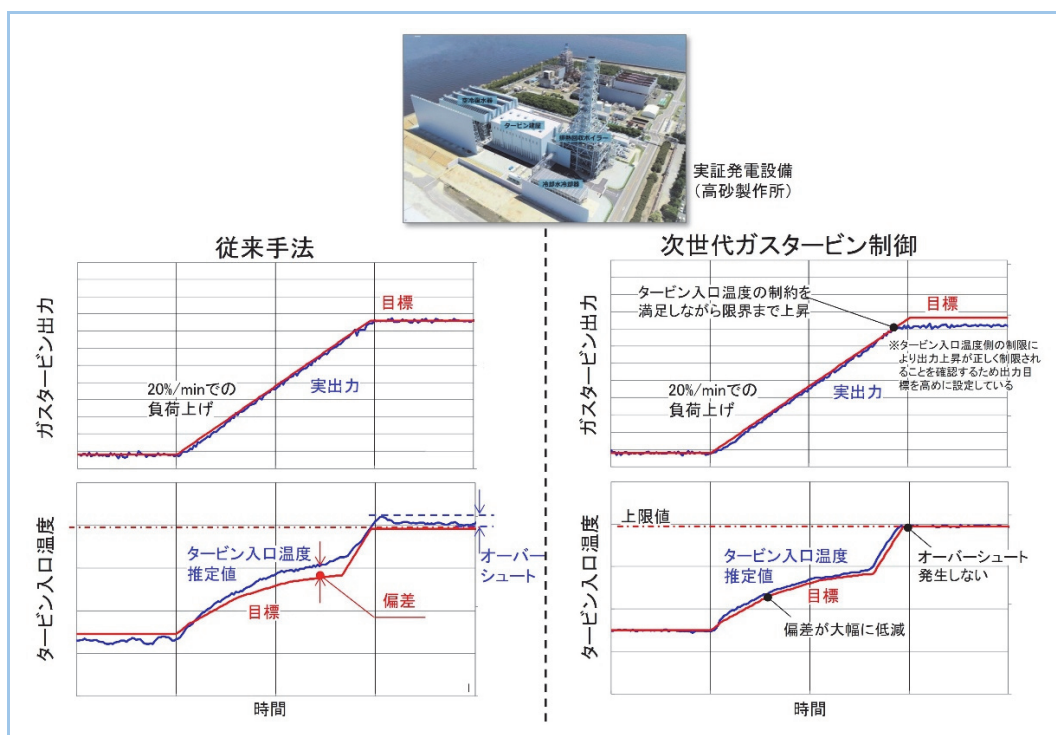


図 11 実証発電設備での試験結果

4. まとめ

本報では、今後一層需要が高まる発電用ガスタービンの高負荷変化率運転への対応に向けた取組みとして、次世代ガスタービン制御について紹介した。

次世代ガスタービン制御は物理モデルに基づくタービン入口温度推定手法と将来を先読みして制御するモデル予測制御を組み合わせ、安定した燃焼制御と高負荷変化率の両立を目指すものである。本報では、本手法を当社高砂製作所内にある実証発電設備にて実機検証した結果を示した。

今後は、対応可能な運転条件の増加など機能増大を図っていくとともに、実証発電設備での給電運転を通して長期検証を行い、商用化に向けた取組みを推進していく。

参考文献

- (1) Jan M. Maciejowski et al., モデル予測制御 制約の下での最適制御
- (2) 森本ほか, 1650℃級 JAC 形ガスタービンの中核とする第二T地点実証発電設備での検証結果, 三菱重工技報 Vol.58 No.1 (2021)