

燃料転換変革期における火力発電システム技術

Thermal Power Generation System Technologies in the Era of Fuel Transition

木村 賢一 KIMURA Kenichi 奥山 知視 OKUYAMA Tomomi 小野 泰規 ONO Yasunori

火力発電は、カーボンニュートラル(CN)の実現が重要視される社会においても、再生可能エネルギー(以下、再エネと略記)の不安定性を補完する調整力によって電力の安定供給を支える役割を担う基幹電源として重要性を高めており、環境負荷が低く信頼性の高い発電設備の提供・維持が求められている。

東芝は、蒸気タービン及びガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)の高効率化・低環境負荷化技術を追求し、これらの技術を適用した発電所の二酸化炭素(CO₂)排出量を削減するとともに、将来の水素・アンモニア燃料への転換に対応可能な技術の開発を進めている。更に、再エネの増大に伴う起動・停止回数の増加や高い負荷変化率での運用が機器寿命に及ぼす影響を、デジタル技術を用いた状態監視・余寿命診断によって把握する技術を確立し、高い運用性と信頼性の向上を実現している。

Thermal power generation fulfills a critical role in maintaining stable electricity supply as a major power source capable of adjusting output power to fluctuations resulting from the widespread adoption of renewable energy sources, even in a society in which achieving carbon neutrality is a top priority. This has created a need for thermal power plants with lower environmental impact and higher reliability.

In response to this trend, Toshiba Corporation is developing the following technologies: (1) technologies for high-efficiency steam turbines and low-environmental-impact gas turbine combined-cycle (GTCC) power plants not only to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions from thermal power plant flue gas but also to respond to future fuel conversion from fossil fuels to hydrogen, ammonia, etc.; and (2) condition monitoring and remaining life assessment technologies using digital tools to reduce the impact on equipment life due to the increasing number of start-stop operations and high load variations associated with the growing use of renewable energy systems.

1. まえがき

火力発電は、CNの実現に向けて、燃料転換という大きな変革期を迎えている。その一方で、再エネの導入拡大に伴い、気候・気象に対して不安定な再エネによる電力系統の変動を補完し電力の安定供給を維持する火力発電の役割は、むしろ重要性を増している。2050年に温室効果ガスの排出量と吸収・固定量の差し引きをゼロにする「2050年ネットゼロ」の達成に向けた電源計画においても、調整力及び慣性力を備える火力発電は不可欠である。再エネや原子力の比率が増加するほど、電力供給の安定性を確保するために火力発電への期待は大きくなる。

東芝は、このような社会的要求に応じて、環境負荷を抑えつつ信頼性の高い発電設備を提供・維持するために、火力発電システム技術の開発に引き続き注力している。

ここでは、燃料転換変革期における火力発電システム技術として、当社固有の蒸気タービンの高効率化技術、GTCC発電プラントの低環境負荷化技術、及び燃料転換や調整運用に対応する技術について述べる。

2. 燃料転換変革期の火力発電システムの環境負荷低減技術

火力発電の高効率化は、蒸気タービン及びガスタービンの入り口温度を高めることで達成される。当社のGTCCでは、ガスタービン燃焼温度約1,650℃級の最新機種を採用し、熱効率を約64%(低位発熱量(LHV)基準)を実現している(図1)。また、蒸気タービンでは再熱蒸気温度(中圧タービン入り口)630℃の適用により実機運用で高効率化に貢献している(図2)。このような高効率化により、化石燃料を使用した場合の環境負荷が低減される。蒸気タービン及びGTCCの環境負荷低減技術については2.1節及び2.2節で詳細に述べる。

火力発電は将来的に水素・アンモニア燃料への転換を目指す。燃料から取り出した熱エネルギーでタービン・発電機を駆動し可能な限り高い効率で電気エネルギーに変換するという基本原理は変わらない。水素・アンモニア燃料ともに燃焼技術の開発が進んでおり⁽¹⁾、アンモニアについては石炭への約20%の混焼、水素については天然ガスへの約

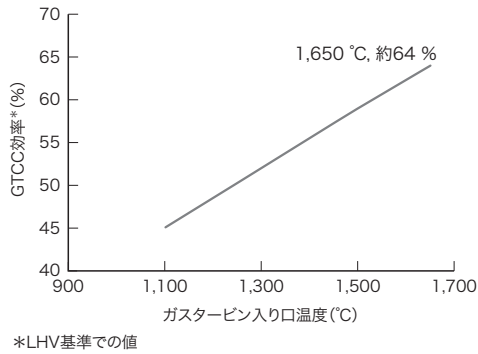


図1. ガスタービン入り口温度とGTCC効率の関係

ガスタービン入り口温度の高温化によりGTCC効率を向上させ、現在ではガスタービン入り口温度1,650℃において約64%の熱効率を達成している。

Improvement of GTCC thermal efficiency with increase in gas turbine inlet temperature

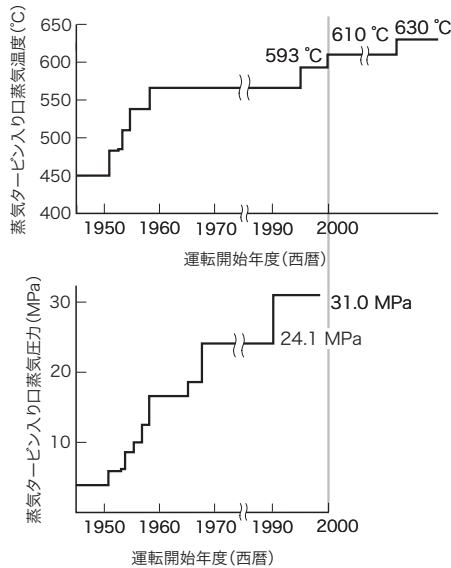


図2. 蒸気タービン入り口における蒸気圧力・温度の変遷

蒸気タービン入り口蒸気条件の高温・高圧化により高効率・高出力・低環境負荷化を進めており、現在ではタービン入り口温度630℃を達成している。

Trends in steam turbine inlet temperature and pressure

50%の混焼が既に実証段階にある。一方で課題は燃料供給網の整備であり、“グリーン由来”の燃料を大規模に安定供給する体制はいまだ確立途上である。

このため、当面は高効率な化石燃料の利用と、燃焼排ガスのCCUS(Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage)によるCO₂排出量の削減が必要となる(この特集のp.10-13参照)。

2.1 蒸気タービンの高効率化技術

オーストラリア ニューサウスウェールズ州にあるマウントパイパー発電所は、運転開始から25年以上が経過しており

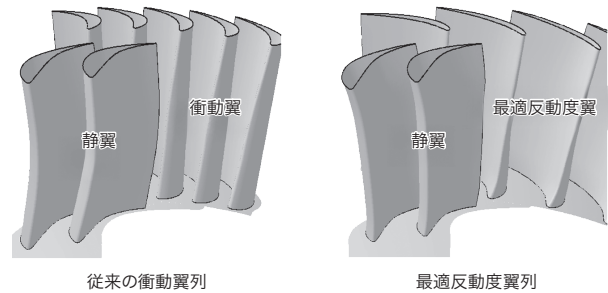


図3. 従来の衝動翼列と最適反動度翼列の比較

最適反動度と3次元設計による翼列で発生する2次流れ損失及びプロフィール損失の低減を図る。

Comparison of structure of conventional impulse blade cascade and optimum reaction cascade

最新の発電所に比べて効率が低く、長年の運転により蒸気タービン及び発電機の劣化が顕著で、環境負荷も高くなっていた。当社は、性能及び信頼性向上を目的とし、同発電所の蒸気タービンに最新技術を適用し、改修を実施した。

蒸気タービンの高効率化には、タービン内部で発生する様々な損失、特にその大部分を占めるタービン翼列損失、蒸気漏洩(ろうえい)損失、及び排気損失をいかに低減するかが重要となる。これらの損失低減のために適用した最新技術とその効果について、以下に述べる。

2.1.1 最適反動度と3次元設計による翼列損失の低減

CFD(数値流体解析)と実機検証を組み合わせた3次元設計手法により、タービン静翼及び動翼の形状を半径方向に変化させ蒸気の流れと流量分布を制御する。これによるアドバンストフローパターン(AFP)で壁面と翼のコーナー部分で発生する2次流れ損失を低減するとともに、従来の衝動タービンよりも反動度を高めた最適反動度翼(図3)によって、プロフィール損失を低減している。

2.1.2 最新シール技術による蒸気漏洩損失の低減

翼先端での蒸気漏洩を防ぐため、複数のセグメントから成るラビリンスシールをノズルにはめ込み、板ばねで支持する。このばね力を適切に設計することでシール部間隙の狭小化に加えて、接触時のローターやシールの損傷・摩耗を抑制できる。また、高圧・中圧タービンの内部ケーシング入り口部と蒸気配管の接続部は、熱膨張差を吸収しつつ蒸気漏洩を防ぐために、シールリング構造を採用している。当社は、シールリングに線膨張係数の異なる2種類の材料を用いることで、運転中は熱膨張により隙間をなくし蒸気の漏洩を抑制し、停止中は収縮して隙間を確保し分解作業性を向上させている。

2.1.3 最終段翼の長翼化による排気損失の低減

蒸気タービンの最終段翼は出力のおよそ10%を発生させ、

タービンの性能及び信頼性を大きく左右する重要な構成要素である。蒸気の膨張に伴い体積流量が急増するため、最終段翼の長翼化による流路面積の確保が不可欠となる。当社は、地熱タービン向けに開発し運用実績のある世界最長クラスの40.2インチ(102 cm)最終段翼の形状を踏襲し、一部の材質を変更して火力発電所向けの運用に適合させている。これにより、従来の33.5インチ(85 cm)最終段翼に比べて排気損失を大幅に低減し、高効率と高信頼の両立を実現している。

2.1.4 蒸気タービンの損失低減による環境負荷低減効果

以上の技術を適用してマウントパイパー発電所の改修工事を行った結果、燃料である石炭の消費量を増やすことなく30 MWの出力向上を達成した。700 MWの蒸気タービンが730 MWとなり、年間約33万トンのCO₂排出量の削減に貢献する(利用率^(注1)80%の石炭火力の場合)。

当社は、オーストラリアにおいて、2024年までにこの発電所を含む複数の火力発電所で蒸気タービン発電機の大型改修工事を完了しており、今後も火力発電所向け蒸気タービンの高効率化による環境負荷低減や延命化の需要に応じていく。

2.2 GTCC発電プラントの低環境負荷化技術

GTCC発電におけるCN実現に向けた主な取り組みとしては、2章冒頭で述べた高効率化によるCO₂排出量の低減に加えて、排ガスからのCO₂分離回収及び水素混焼化によるCO₂排出量の低減が進められており、これら3点の当社の最新技術について述べる。

2.2.1 高効率化によるCO₂排出量の低減

当社の最新型GTCCパワートレイン(図4)は、GEベルノバ

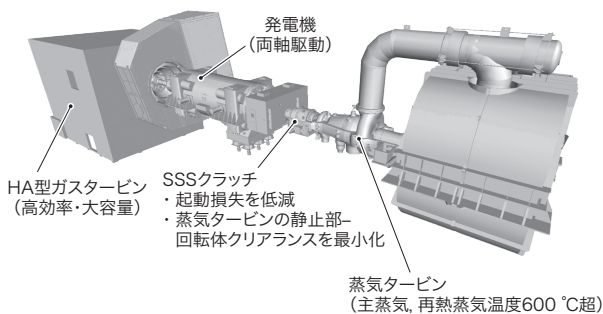


図4. 最新型GTCCパワートレイン(60 Hz仕様)

HA型ガスタービン(1,650°C級)、発電機、SSSクラッチ、及び蒸気タービンの1軸型パワートレインとすることで、大容量化・高効率化を図るとともに、起動性を向上させている。

Advanced GTCC powertrain for 60 Hz power generation

(注1) 定格運転で24時間365日発電した場合の発電容量に対する実発電量の割合

社(GEV社)製の最新モデルであるHA型ガスタービン⁽²⁾と当社製蒸気タービンを組み合わせた構成となっている。

高効率化・大容量化を追求したHA型ガスタービンは、従来型よりもタービン入り口温度が高く、それに伴い排ガス温度も上昇している。この高温排ガスの熱エネルギーを排熱回収ボイラー(HRSG)で最大限回収して高温蒸気を発生させることで、当社の最新GTCC発電用蒸気タービンの入り口蒸気温度は600°C超の高温を実現している。また、ガスタービンと発電機の回転軸は直結し、蒸気タービン回転軸はSSS(Synchro Self Shifting)クラッチを介して発電機回転軸へ接続している。これにより、発電所起動時にはガスタービンを早期に並列して起動損失を低減すると同時に、蒸気タービンについては静止部と回転体のクリアランスを最小化し、蒸気漏洩損失を低減している。

更に、2.1節に示した蒸気タービンの高効率化技術も併せて適用することにより、50 Hz仕様では熱効率約64%(LHV基準)–出力約850 MW、60 Hz仕様では熱効率約64%–出力約650 MWという世界トップクラス^(注2)の高効率・大容量を実現し、従来機よりも発電電力量当たりのCO₂排出量を低減し、環境性能に優れたパワートレインを提供している。

2.2.2 排ガスからのCO₂分離回収

GTCC発電は、同じ出力の石炭火力発電に比べてCO₂排出量が小さい発電方式である。ガスタービン排ガスに含まれるCO₂濃度は4%程度であり、石炭焚き(だき)ボイラー排ガスのCO₂濃度12%程度と比較して濃度が小さい。CO₂分離回収においてはCO₂濃度が低いほど回収が困難となり設備動力(電力)と熱エネルギーが必要となる。すなわち、ガスタービン排ガスからのCO₂分離回収には回収量に対して多くの設備動力と熱エネルギーが必要となり、発電所全体としての熱効率が大きく低下してしまう。

この問題を解決するため、当社は2025年11月にGEV社と「GTCC発電統合型CO₂分離回収ソリューション提供に向けた協業に関する基本合意書(MoU)」を締結した。GEV社のガスタービン排ガス再循環(EGR)システムをGTCC発電プラントに組み込むことにより、排ガス中のCO₂濃度を高めてCO₂分離回収に必要な消費電力、熱エネルギーを低減する。また、当社の高性能CO₂吸収液を使用し、GTCC発電プラント及びCO₂分離回収プラントを一体化して熱エネルギーを有効利用することで、更なるCO₂分離回収効率の向上を目指す。

2.2.3 水素混焼化によるCO₂排出量の低減

GTCC発電プラントの水素混焼化においては、燃焼器から発生するサーマル窒素酸化物(NO_x)の抑制と耐逆火性が

(注2) 2026年2月現在、当社調べ。

求められ、当社の最新型パワートレインでは、体積比50%までの水素混焼運転がラボ試験で実証されているGEV社のDLN2.6e型燃焼器を採用している。高水素混焼率に対応した燃焼器を建設時から採用することで、将来、水素混焼化に伴うガスタービンの大規模な改造は不要となる。しかし、水素燃料を適用するためには、材料の水素ぜい化対策、及び反応性の高い水素を取り扱う上での安全性の確保が必要となる。また、天然ガス専焼と比較し、排ガス中のNOx濃度及び水分増加といったプロセス値の変化への対応も必要となる。当社では、これらの課題に対して技術開発を行い、各発電所で求められる水素混焼率に対応し、HRSG、燃料供給設備、脱硝設備、防災設備などの改造仕様を最適化するエンジニアリングソリューションを提供している。

3. 火力発電システムの調整運用に対応した高信頼性化技術

調整運用において、火力発電は、再エネの出力状況に応じて高負荷変化率での運用及び高頻度の起動停止を行うことになる。これらは、高温熱流体を扱う機械品の健全性(寿命)に対して非常に大きな影響を与える。特に、起動・停止を伴う場合は、発電設備を構成する機器が短時間に数百°C変化するため、機器内の各部に熱応力が生じて金属の疲労が蓄積される。

例えば、ベース運用といわれる発電出力一定の運用を行う発電所の場合は、3年間程度のインターバルで行われる法定定期検査の間は基本的に連続運転となり、発電設備はおおむね安定した熱流体条件となる。それに対して調整運用においては、例えばGTCCの場合は、太陽光発電などの再エネが立ち上がる日中帯は発電設備を止めておいて、朝及び夕方だけ運転を行い、電力需要の少ない夜間も運転を止めるといった1日に2回の起動停止を行うケースもある。ベース運用との比較として、太陽光発電が最大出力となる7月～9月の平日日中にGTCCを停止する運用を定期点検インターバルの3年間行ったとすると、ベース運用設備の起動停止が1回であるのに対して、調整運用は6回起動停止/週×14週/年×3年×晴天率8割=201回となり、機器寿命への負担が著しく大きくなる。

このようにCNの実現が重要視される時代となり火力発電設備の運用方法が大きく変わる中で、発電設備のメンテナンス方法も変えていく必要がある。機器の寿命消費速度を単なる累積運転日数基準とするのではなく、発電設備の調整運用頻度ごとに評価し適切な保守保全を行わなくてはならない。すなわち、時間基準保全(TBM: Time Based Maintenance)から状態基準保全(CBM: Condi-

tion based Maintenance)への移行が求められる。発電設備は、高温・高圧・高速で連続運転されているものであるため、設備の状態をリアルタイムに把握することは従来困難であった。しかし、今日では、デジタル技術を活用することで、計測をスマートかつ高精度に行い、その計測データからデジタルツインモデルを構築することで、状態把握だけでなく、将来寿命(余寿命)診断する技術を確立している(この特集のp.14-18参照)。

4. あとがき

火力発電は、CNの実現に向けた燃料転換の過渡期を迎えているが、当社は火力発電システム技術の更なる開発により低環境負荷・高効率・高信頼性の発電システムを提供していく。

文献

- (1) 火力原子力発電技術協会. カーボンニュートラル実現に向けた火力発電の取り組み. 火力原子力発電. 2024, 75, 10, p.610-699.
- (2) GE Vernova. "H-class gas turbines". <<https://www.governova.com/gas-power/products/gas-turbines/h-class-gas-turbines>>, (accessed 2026-02-03).



木村 賢一 KIMURA Kenichi
サーマル&ハイドロパワー事業部
日本機械学会会員
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



奥山 知視 OKUYAMA Tomomi
サーマル&ハイドロパワー事業部
国内サーマルエナジーシステム技術部
日本機械学会会員
Domestic Thermal Systems Engineering Dept.



小野 泰規 ONO Yasunori
サーマル&ハイドロパワー事業部
海外パワーシステム技術部
Global Power Systems Engineering Dept.