

高効率コンバインドサイクル発電システムの最新技術

State-of-the-Art Technologies for High-Efficiency Combined-Cycle Power Generation Systems

服部 祐太 俵盛 勝博

■ HATTORI Yuta ■ HYOMORI Katsuhiko

コンバインドサイクル発電は、もっともクリーンで熱効率に優れた経済性の高い火力発電として注目されている。

東芝は、2013年1月に米国General Electric Company (GE社)と、コンバインドサイクル発電システム分野での戦略的提携関係の構築に関する覚書を締結し、GE社製ガスタービンと当社製蒸気タービン発電機とを組み合わせた、高効率コンバインドサイクル発電システムのグローバル市場への展開を推進している。両社の協力関係の下で、現在最初のプロジェクトとして、7F-7シリーズガスタービン(以下、7F7と略記)を採用した世界最高^(注1)の熱効率62%(低位発熱量基準)を達成する中部電力(株)西名古屋火力発電所7号系列発電設備の開発を進めている。

Combined-cycle power generation is attracting attention as the cleanest form of thermal power generation with high thermal efficiency and cost-effectiveness.

Toshiba signed a memorandum of understanding with General Electric Company (GE) to form a global strategic alliance, under which the two companies will jointly develop combined-cycle power generation systems, in January 2013. We have embarked on this collaborative relationship to expand the global share of combined-cycle power generation by focusing on a high-efficiency combined-cycle power generation system integrating both GE's most advanced gas turbine technologies and Toshiba's latest high-efficiency steam turbine generators. As our first implementation of technical collaboration, we are developing power generating facilities for the Nishi-Nagoya Thermal Power Station Group No. 7 of Chubu Electric Power Co., Inc., which will achieve the world's top-level gross efficiency of 62% (lower heat value basis) utilizing GE's latest 7F-7 series gas turbine.

1 まえがき

わが国では、2011年3月11日に発生した東日本大震災とその後の電力需給の状況から、電力の安定供給に向けた供給力の確保が以前にも増して重要になっている。また国外では、経済成長の著しい新興国市場などを中心に、火力発電への需要が高まっている。このようななかで、従来型の火力発電に比べて二酸化炭素(CO₂)排出量が少なく、熱効率に優れたコンバインドサイクル発電の需要が拡大している。

東芝は、2013年1月に、コンバインドサイクル発電システム分野での戦略的提携関係の構築に関する覚書をGE社と締結した。当社は、GE社とともに、高効率コンバインドサイクル発電システムをベース電源としてだけでなくピーク対応電源として開発を加速するとともに、再生可能エネルギーの出力変動分を平準化するための技術開発も進めている。現在最初のプロジェクトとして、最新鋭ガスタービンのGE社製7F7を採用した世界最高の熱効率62%(低位発熱量基準)の2,316 MW多軸型コンバインドサイクル発電システムとなる、中部電力(株)西名古屋火力発電所7号系列発電設備の開発を進めている。

ここでは、高効率コンバインドサイクル発電システムの最新

技術の特長と、2018年に営業運転開始予定の西名古屋火力発電所7号系列発電設備の概要とその特長について述べる。

2 高効率コンバインドサイクル発電システムの最新技術

2.1 空気冷却式ガスタービン7F7及び9F7⁽¹⁾

GE社が現在開発中の7F7(60 Hz機)及びその相似設計9F-7シリーズ(50 Hz機、以下、9F7と略記)は、現行の最新F型機に採用された7F-5型圧縮機を基に設計し、その他全てのコンポーネントは納入機で実証された既存技術を踏襲し進化させたものであり、高い信頼性を実現した製品と言える(図1)。

最新の高効率F型ガスタービンの性能向上には、圧力比約20:1である先進の3次元空力設計翼を採用した14段高効率圧縮機が大きく寄与している。更に保守性を向上させるため、航空機エンジン同様に全14段とも現地交換可能な動翼翼根構造を採用している。

燃焼器は既存のDLN2.6+をほぼそのままとし、7F7には燃焼器ライナ部にAFS(Axial Fuel Staged)燃料回路を採用することで、通常運用負荷帯における窒素酸化物(NO_x)排出量を低減し、また低NO_x運転が可能な最低負荷を約30%まで低減することに成功している。

(注1) 2013年11月現在、当社調べ。

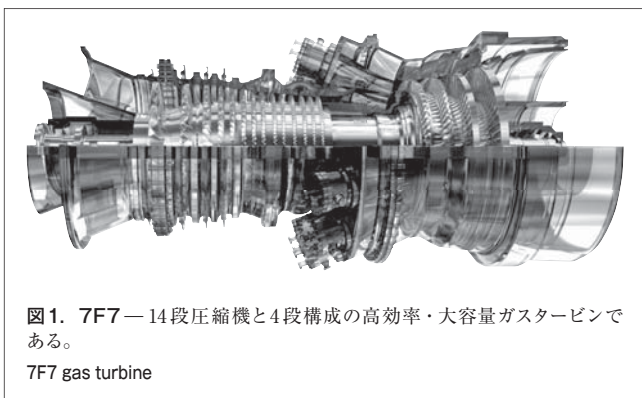


図1. 7F7—14段圧縮機と4段構成の高効率・大容量ガスタービンである。

7F7 gas turbine

タービンは4段構成とし、大容量化による各段落の負荷分担当を最適化し、最新鋭のシール技術により効率向上を図った。タービンケーシングは、7H型及び9H型機と同様に二重構造を採用し、熱勾配の最適化を図った設計としている。

タービン1段動翼には、これまでのF型機と同様に単結晶合金を採用している。その他の動翼、静翼については、従来機と同様に一方向凝固材や多結晶材を採用している。その他の特長としては、可変入口案内羽根に加え1～3段静翼を更に可変とした合計4段の可変静翼の採用や、圧縮機出口から燃焼器への流路における圧力損失軽減及び静圧回復のためのハイブリッドラジアルディフューザの採用がある。

2.2 燃料多様化への対応⁽¹⁾

7F7及び9F7は1,600℃級ガスタービンであるが、従来機と同様に液体燃料にも対応している。また、軽質燃料化への対応も可能でガス燃料においてMWI (Modified Wobbe Index)^(注2)が7F7で±15%、9F7で±10%となっている。

2.3 蒸気サイクル計画

蒸気サイクルは主蒸気圧力15 MPa級、主蒸気温度580℃超級とし、ガスタービンからの排熱を最大限に活用し、高効率化を可能にする構成としている。更に、排熱回収ボイラ (HRSG) への給水加熱に低圧タービンからの抽気蒸気を熱源とした給水加熱器の採用や、ガスタービン燃料加熱システムの最適化などによる高効率化を図っている。

2.4 蒸気タービン

蒸気タービンには、東芝グループの(株)シグマパワー有明が三川発電所で2008年から運用している実機検証蒸気試験設備で確立された最新の性能向上施策を駆使した、高性能で信頼性の高い製品を採用している(図2)。蒸気通路部には最適反動度翼を採用し段落効率の向上を図るとともに、高圧部にはドラム構造ロータによる軸系安定性の改善と多段落化の両立を実現させている。最終段翼には世界最大級の最終段翼シリーズを採用することで、排気流速減による排気損失

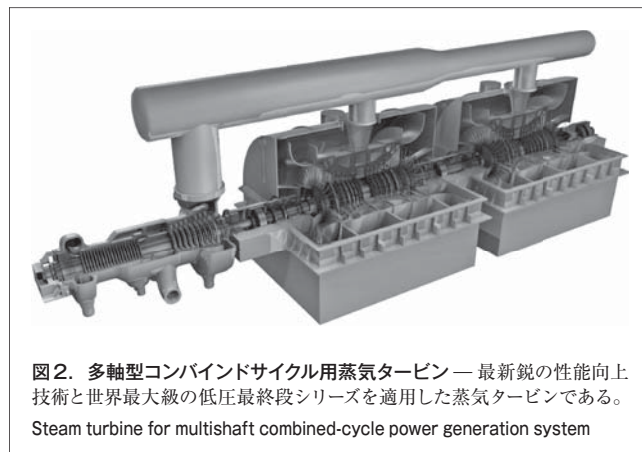


図2. 多軸型コンバインドサイクル用蒸気タービン—最新鋭の性能向上技術と世界最大級の低圧最終段シリーズを適用した蒸気タービンである。

Steam turbine for multishaft combined-cycle power generation system

の低減を図っている。

そのほか、シール技術の向上や、低損失型の直接潤滑方式パッド軸受の採用など、各種損失低減技術を投入して蒸気タービンの効率向上を実現している。

2.5 システム構成

要求される出力規模や、立地条件、運用条件などに合わせ、当社は顧客ニーズに合わせた総合経済性の高いシステム構成を提案している。システム構成としては、以下に述べる一軸型と多軸型に大別できる。

- (1) 一軸型 軸ごとの起動と停止、及び運転台数の選択が可能であり、一般にフレキシブルで運用性が高く、複数軸設置される場合、プラント低負荷から全負荷まで高効率な運転を可能とするパワートレイン構成である。軸流排気型蒸気タービンの採用により、タービン建屋の低床化が可能である。またSSS (Synchro Self Shifting) クラッチの採用により、ガスタービン起動から蒸気タービン起動条件確立までの間、蒸気タービンが強制的に空転されることがないため、最終段翼近傍を冷却する補助蒸気が不要になる。
- (2) 多軸型 蒸気タービンへの流入蒸気量が接続するガスタービン台数に応じて多くなることから、蒸気条件の高温・高圧化を図ることができ、蒸気サイクル効率の向上だけでなく、蒸気タービンのスケールメリットにより各損失を低減することができる。ベースロード運用に適しており、より性能を重視した構成である。一軸型に比べ蒸気タービンは大型化するが、ロータ熱応力予測精度の向上や有限要素法 (FEM) 解析技術の進歩により、プラント全負荷到達までの起動特性は一軸型と同等レベルになっている。

2.6 運用性能向上と蒸気タービン最適起動

2.6.1 スマート起動 火力発電所から排出されるNO_x濃度に対する要求はコンバインドサイクル発電における高効率化、すなわちガスタービン燃焼温度の高温化と二律背反の関

(注2) 燃焼状態を示す指標で、設計値からの変動が大きいと燃焼が不安定になるなどの現象が生じる。

係にある。スマート起動とは、ガスタービン燃焼器が低NO_xモードとなる負荷（スマート負荷）まで上昇させた後に、蒸気タービンへの通気条件を成立させるもので、これを実現させるため、高圧蒸気系統と低温再熱蒸気系統を接続するカスケードバイパス系統とHRSG過熱低減器の容量最適化を図った。また、HRSGは厚肉部熱応力軽減策を取り入れることでスマート起動に対応した設計としている。スマート起動を採用することで、ガスタービン起動時の環境負荷を低減し、かつより高速なプラント起動が実現できる。

2.6.2 蒸気タービン最適起動⁽²⁾ 従来の蒸気タービン起動制御は、蒸気タービン起動時点の高圧タービン第一段蒸気温度とロータ表面メタル温度との差（ミスマッチ温度）に応じて、いくつかのパターン化された起動スケジュールを選択していた。この起動手法（ミスマッチチャート起動）では、タービン起動過程に発生する熱応力及び伸び差に対して十分に余裕を持ったスケジュールが選択されるようになっていたことから、特にコールド起動においては通気から定格負荷到達まで4時間程度を要する場合もあった。蒸気タービン最適起動は熱応力を予測することで、リアルタイムに起動スケジュールを修正し、制御の時定数を早め、起動時間の大幅短縮を図ることができる（図3）。

この技術は、2011年11月に公益財団法人電気科学技術奨励会から文部科学大臣奨励賞及び電気科学技術奨励賞を受賞した。

2.7 フィールドバスの導入

電動弁回路は、従来、現場の各電動弁から配開装置（SWGR）を経由して分散型監視制御システム（DCS）とハードケーブルで接続していた。

今回、CPUを搭載し機器データの通信や校正なども行うことができるインテリジェント型電動弁アクチュエータを採用することにより、DCSのTOSMAP_{TM}-LXと複数の電動弁をフィー

ルドバスのPROFIBUS伝送で直接接続する構成としている。1伝送ループに最大20台程度まで接続が可能であり、フィールドのケーブル量を大幅に削減できる。当社は、電動弁回路のPROFIBUS伝送化を標準的に適用している。

2.8 無人化運転

従来は運転員を中央操作室に常時配置してプラント運転操作や異常発生時の対応などを行ってきたが、運転員に依存しない無人化運転を可能とするシステムを提供する。具体的には、スケジュール計算を設定した後は全自動でプラント起動から目標負荷まで到達する。また異常発生時には、従来運転員が操作を行っていたものを自動インターロックで実現する。このように人員の省力化を図りながらも発電設備の運用性は損なわないシステムを提供できる。

2.9 脱ヒドラジンへの取組み

給水処理に使用されるヒドラジンは、変異原性が認められた化学物質として健康への影響が指摘され、近年規制が強化されている。また、ヒドラジンが配管内の流れ加速型腐食（FAC）を促進する可能性が指摘されている。そこで欧米諸国では、ヒドラジンを使用しない給水処理方式のAVT（O）（All Volatile Treatment（Oxidizing））が導入されており、近年では当社のコンバインドサイクル発電設備の標準として採用を提案している。更に、独自の検証試験を通じてHRSG満水保管でもヒドラジンを使用せず、アンモニア注入による管理を提案している。

ヒドラジンを使用しないことで、より健康に配慮した発電設備となることに加え、アンモニアにより適切なpH（水素イオン濃度）に維持することで、機器の信頼性を従来と同等以上に確保することができる。また、化学物質排出移動量届出（PRTR）制度や厚生労働省指針に規定される劇物管理も不要になる。

2.10 大型モジュール化と試運転最適化による工期短縮

HRSGは大型2分割モジュール式として工場を組み立て、配管及び弁や計装品なども組み込んだ状態で出荷する。また、配管ラックについても大型モジュール化の適用範囲を拡大するなどして現地据付け工事期間を短縮し、更には現地試運転手法の最適化により、当社従来比でHRSG立柱開始から2.5か月の短縮を達成する。

3 西名古屋火力発電所7号系列発電設備の概要

中部電力（株）西名古屋火力発電所は、石油を燃料とする合計1,190 MWの汽力発電設備として1970年代に建設され、それ以降長期間にわたって名古屋市と周辺地域の電力安定供給に大きな役割を果たしてきた。当社は、旧施設の撤去後に新たに建設される液化天然ガス（LNG）を燃料とした最新鋭の1,600℃級コンバインドサイクル発電設備一式を中部電力（株）から2012年6月に受注した。このプラントは最新鋭の多軸型

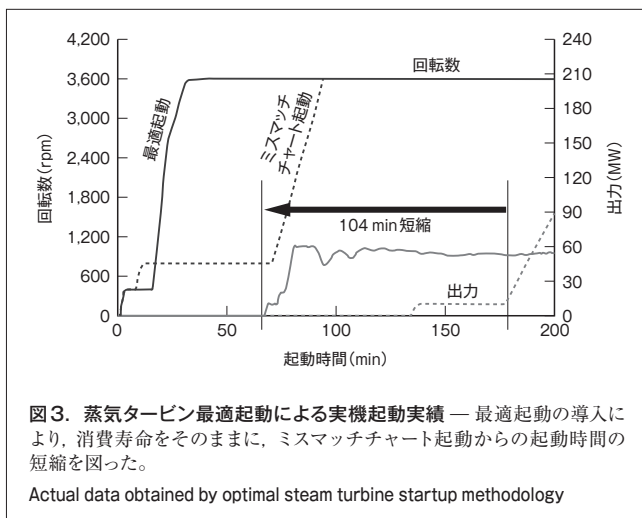


図3. 蒸気タービン最適起動による実機起動実績 — 最適起動の導入により、消費寿命をそのままに、ミスマッチチャート起動からの起動時間の短縮を図った。

Actual data obtained by optimal steam turbine startup methodology

コンバインドサイクル発電設備であり、定格出力1,158 MW×2ブロックの発電所となり、2018年3月に営業運転を開始する予定である。

3.1 プラント仕様

このプラントは、ベースロード運転時の高効率化を図るため、ガスタービン及びHRSG各3台と蒸気タービン1台から成る3on1の多軸型を採用した、高効率、高出力、及び低NO_x排出を特長とする最新鋭の環境調和型コンバインドサイクル発電プラントである(図4)。高信頼性を確保しつつ高性能化を図り、世界最高効率となる62%を達成する計画である。

多軸型コンバインドサイクル発電に特有のガスタービン台数切替えは、中央給電指令所からの要求に速やかに対応できるように、運転軸の負荷下げを行うことなく対応することで、運用性の向上を図っている。

3.2 配置計画

このプラントの配置は、景観とシステムの最適化を考慮し、3on1の多軸型を1ブロックとする発電設備であり、この2ブロック分をミラー配置とすることで構成されている。ミラー配置とすることで、6台のガスタービンが横一列に並ぶこととなり、定期点検時の作業性向上を実現させている。

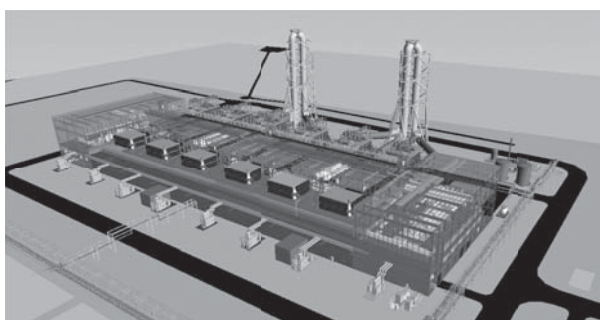


図4. 西名古屋火力発電所7号系列 — 景観への配慮とシステムの最適化を目指した環境調和型発電所である。

Nishi-Nagoya Thermal Power Station Group No. 7

4 あとがき

最新のコンバインドサイクル発電設備の導入により、更なるCO₂排出量の低減と、より持続的な発電設備を実現することが可能になる。

当社は、GE社との戦略的提携関係によって強化された技術開発のスピードをよりいっそう加速し、信頼性の高い安定電力確保と、地球環境に優しいクリーンなエネルギーシステムを提供することで、社会や地域に貢献できると確信している。

文 献

- (1) 木原 謙 他. “最新F型ガスタービンの開発状況”. GTSJガスタービンセミナー(第41回)ガスタービンの最新技術とCO₂削減を目指した技術動向・展望. 横浜, 2013-01, 日本ガスタービン学会. 2013.
- (2) 松本 茂 他. 火力発電プラントの熱応力予測によるタービン最適起動技術. 東芝レビュー. 65, 4, 2010, p.64-67.



服部 祐太 HATTORI Yuta

電力システム社 火力・水力事業部 火力プラント技術部主務。火力発電所機械システムのエンジニアリング業務に従事。日本ガスタービン学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



俵盛 勝博 HYOMORI Katsuhiko

電力システム社 火力・水力事業部 火力プロジェクト部主務。コンバインドサイクル発電プラントの見積り業務に従事。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.