

高効率火力発電を支える最新技術

Advanced Technologies Supporting Highly Efficient Thermal Power Plants

村上 透

■ MURAKAMI Toru

火力発電所は、地球環境に優しく、温室効果ガスの排出が少ないことが求められている。その実現のためには、高効率な発電システムであることや、二酸化炭素 (CO₂) 回収・貯留 (CCS : Carbon Dioxide Capture and Storage) システムによるCO₂排出削減が必要である。また、太陽光発電、太陽熱発電、風力発電など出力が変動しやすい再生可能エネルギー発電の増加に伴い、不安定になりがちな系統の安定性に貢献する負荷追従性も従来以上に求められている。

東芝は、このような多様な市場のニーズを満たすことを重点施策として、高効率発電システム、負荷追従性の高い発電制御、リハビリテーション手法、遠隔監視による火力発電所安定運用、CCSの実現など、様々な機器やサービスを提供し続けていく。

In the field of thermal power generation, practical realization of carbon dioxide (CO₂) capture and storage (CCS) systems as well as highly efficient thermal power plants are required to reduce greenhouse gas emissions. In addition, thermal power plants optimized to balance load fluctuations in the electricity grid caused by natural power generation facilities, such as wind and solar power installations, are also required.

In response to a broad range of market needs, Toshiba has been providing a wide variety of equipment and services through the following technological advancements: (1) technologies for highly efficient thermal power systems, (2) control technologies for flexible load changeability, (3) technologies for rehabilitation and monitoring systems, and (4) CCS technologies.

多様化する火力発電へのニーズ

■ 国内の動向

国内の火力発電では地球環境、規制緩和、電力安定供給などの相反する課題がクローズアップされている。地球環境については、高効率化、再生可能エネルギーの採用、CCSなどにより温室効果ガスの排出削減が求められている。また、規制緩和のなかで、既設設備を有効活用するため、定期点検間隔を延長するなどしながら安定した電力供給を維持する必要がある。

■ 海外の動向

海外においては、地域ごとに様々な変化が起きている。北米では、オバマ大統領の環境重視のエネルギー政策と経済危機があいまって、旺盛(おうせい)な石炭火力発電設備の増設が減り、コンバインドサイクル発電プラントの建設が主力になってきた。

欧州では、石炭火力発電設備の増設については、将来的にCCSを備えられ

る計画が要求されるようになっている。

中国やインド市場では、経済危機以降もそれぞれ年間10 GW、8 GW以上の設備増強が必要とされ、多くの石炭火力発電設備が増強されている。東南アジアでは、地域の燃料事情に応じてコンバインドサイクル発電プラントと石炭火力発電プラントの建設が進められている。

いずれの地域でも地球環境や経済性を考慮し、高効率な火力発電プラントが求められている(囲み記事参照)。

■ 市場ニーズ

高効率化などのニーズ以外に注目されるのが、今後、太陽光発電、太陽熱発電、風力発電など再生可能エネルギー発電の発電容量増加により、系統の不安定性が増加することが懸念されることである。したがって、電力供給の安定化のため、火力発電などにこれまで以上の負荷追従性が要求される。

■ 高効率火力発電設備の必要性

地球上の全CO₂排出量の約41%が

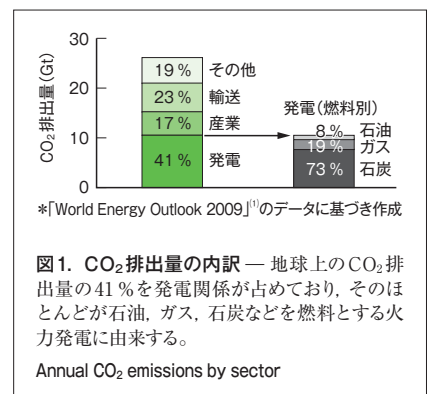


図1. CO₂排出量の内訳 — 地球上のCO₂排出量の41%を発電関係が占めており、そのほとんどが石油、ガス、石炭などを燃料とする火力発電に由来する。

Annual CO₂ emissions by sector

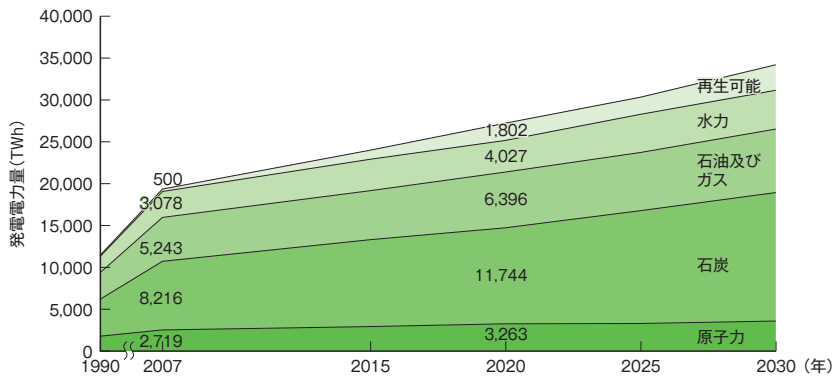
火力発電プラントから排出されている(図1)。現在の社会生活を維持、発展させるためには、今後も火力発電に多くの部分を依存せざるをえない期間が続くと考えられており、火力発電におけるCO₂排出量の削減は地球温暖化防止と電力安定供給の両立に不可欠である。

更に燃料別の発電電力量(図2)を見ると、石炭火力発電が42%と最も多い。図1のCO₂排出量で見た場合、石炭は炭素量がほかの燃料よりも多く、発電部門から排出されるCO₂の73%が石炭火力発電から排出されている。こ

石炭火力発電設備の動向

石炭は化石燃料の中で燃焼時のCO₂排出量が多いが、世界的に石炭利用は拡大の方向にあり、世界総発電電力量における石炭の伸び率は、1990年から2007年では年平均3.7%、2007年から2030年では2.7%と予想されている。世界総発電電力量に占める石炭火力発電の割合は2007年の42%から2030年の44%と、総発電電力量が拡大するなかで依然として電力供給の中核であると見られている。

電力需要は開発途上国で大きく伸長し、



*「World Energy Outlook 2009」¹⁾のデータに基づき作成

図3. 全世界発電電力量推移

2007年から2030年の地域別発電設備容量の伸び率は表のようになる。総発電設備容量は1.73倍に増加する見込みであり、中でも中国は2.7倍、インドは3.8倍に伸長する見込みである。

一方、わが国の石炭火力発電効率(平均)が40%超なのに対し、開発途上国では現状30%台前半であり、発電効率を高めることにより大きなCO₂排出削減効果が見込まれる。こういったなかで、当社の持つ世界最高水準の発電効率を達成する技術を、

中国、米国、インドの3大石炭火力発電市場に適用することで、わが国におけるCO₂排出総量に匹敵する排出抑制効果が得られるとの試算もある。

当社は、世界トップクラスの発電設備供給者として、地球環境と調和した発電システムの確立に向けて、CCSの開発を進めるとともに、発電効率を更に高めるため様々な角度で技術開発を進めている。

表. 地域別発電設備容量 (単位: GW)

地域	西暦	2007年	2030年	伸び(倍)
日本		263	310	1.18
アジア		231	564	2.44
インド		150	571	3.81
中国		706	1,936	2.74
北米		1,223	1,502	1.23
南米		223	391	1.75
中東		186	389	2.09
韓国及びオーストラリア		139	201	1.45
欧州		847	1,162	1.37
東欧		190	238	1.25
ロシア		223	285	1.28
アフリカ		128	273	2.13
合計		4,509	7,822	1.73

*「World Energy Outlook 2009」¹⁾のデータに基づき作成

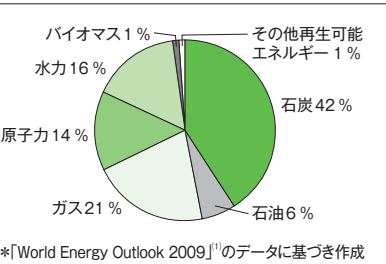


図2. 燃料別の発電電力量 — 発電電力量では、CO₂排出につながる石炭、ガス、石油などの化石燃料を用いた火力発電の割合が多くを占め、その中でも石炭火力発電が多い。

のようなことから、火力発電の中でも特に、石炭火力発電における環境負荷低減が重要となる。

CO₂排出削減に向けての効率向上

CO₂排出削減の課題解決に向けて、

大別して二つのアプローチがある。一つはプラント効率の向上によって単位発電電力量当たりのCO₂排出量を削減することで、もう一つは燃焼排ガスからCO₂を回収し、地中などに隔離するCCSを実現することである。ここでは、プラント効率向上のための技術について以下に述べる。

■石炭火力へのA-USCの適用

火力発電プラントの効率向上施策として、蒸気サイクルの蒸気条件を現在の超々臨界圧(USC: Ultra Super Critical)に対して更に高温・高圧化し、効率を向上させる先進超々臨界圧(A-USC: Advanced USC)がある。

東芝は、高位発熱量基準(HHV)の送電端効率で46%以上が得られることを目標に、A-USCの蒸気条件を主蒸気35 MPa、700℃、二段再熱720℃とし、

開発を進めている(図3)。この目標効率値は、現在最新鋭のUSC火力に比べ約10%の効率向上と、同等量のCO₂排出削減が期待できる。

蒸気条件の高温・高圧化のためには、高温強度に優れた耐熱合金材料の開発が求められる。現在のUSCまでは一部を除き、フェライト系の鉄鋼材料の素材を使用しており、鉄鋼材料の高クロム(Cr)化などの材料改良によって高温強度向上を達成してきた。A-USCでは、配管、バルブ、タービンロータ、タービン翼、タービンケーシングなどに従来とは異なるニッケル(Ni)基などの超合金材料の適用が必要となる。しかし、素材コストを考慮すると、超合金材料の使用部位を少なくすることが経済性を成立させるための必須条件となる。このため材料開発だけでなく、冷却構造の開発や、超合金と既存のフェライト系鉄鋼材

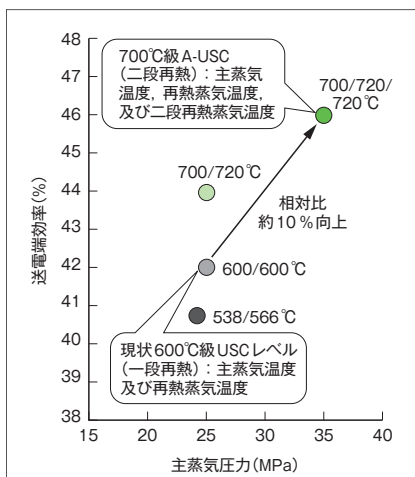


図3. A-USCの効率向上目標—現状の600℃級USCは約42%であるが、A-USCでは二段再熱型(主蒸気35MPa, 700℃, 再熱蒸気720℃, 二段再熱蒸気720℃級)で約10%相対効率を上げた46%超を目指す。
Target efficiency of advanced ultra-supercritical (A-USC) steam turbine

料の溶接なども考慮したタービン構造などを併行して開発する必要がある。

● A-USC 材料開発

当社は、700℃以上の蒸気条件に対応するタービンロータ及びケーシング材向けに、特性上比較的バランスの良いNi基合金である“Inconel 617”をベースに、成分組成を改良して鍛造性や溶接性が良好で高温強度を向上させた合金TOSIXを開発した。

このロータ材は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成18年度及び19年度委託事業「エネルギー使用合理化技術戦略開発/700℃級超々臨界圧発電用蒸気タービン新材料の研究開発」の一環として製作した。700℃におけるTOSIXのクリープ^(注1)破断応力は、現状USCシステムの温度におけるフェライト系材のクリープ破断応力と同等以上で、TOSIXは700℃の条件で十分な高温強度を備えていると評価できる。

● A-USC タービン構造

タービン構造では、高性能な構造であ

ることは必須であるが、Ni基超合金の使用範囲を少なくすることなどを総合的に検討している。700℃級の高温蒸気が直接接触するロータにはTOSIXを使用するが、蒸気入口付近の中央の高温部に使用を限定し、温度の比較的低い両端には従来のフェライト鋼を溶接で接合し、一体化している。また、高度な冷却構造をロータやケーシングに適用している。

● コンバインドサイクル発電プラント

当社は、石炭火力の効率向上だけでなく、CO₂排出量が比較的小さい液化天然ガス(LNG)焚(だ)きコンバインドサイクル発電においても効率向上に努めており、General Electric社とともに燃焼温度1,500℃級の最新鋭H型ガスタービンを採用したH SystemTM(注2)を東京電力(株)の富津火力発電所4号系列に適用した。このガスタービンは、従来は空気冷却であった動静翼の一部を蒸気で冷却し、燃焼温度を上げるとともに冷却効率を向上させ、エネルギーの有効活用により効率向上を図っている。

■ 蒸気タービン及び発電機の効率向上

当社は、先進的なA-USCの開発だけでなく、USCやコンバインドサイクル発電に適用する蒸気タービンや発電機についても継続的に効率改善を進めている。

● 蒸気タービンの高効率化

蒸気タービンでは、最新の3次元設計翼の適用や軸振動の安定化技術の適用などで、タービン段落数を最適化し高効率化を図っている。蒸気通路部の高効率化については、反動や衝動といった従来の型式にとらわれることなく、両者の長所を取り入れ、タービンの用途やサイズに応じて最適の反動度分布とする最適反動度設計を行っている。

最新の数値流体解析(CFD)技術を駆使して開発したアドバンスドフローパターン(AFP)翼(図4)の採用などによ



図4. 従来型翼とAFP翼—従来型翼(左)の単純な翼形に対し、AFP翼(右)では最適な流れを実現する複雑な形状をしている。
Conventional nozzle and advanced flow pattern (AFP) nozzle

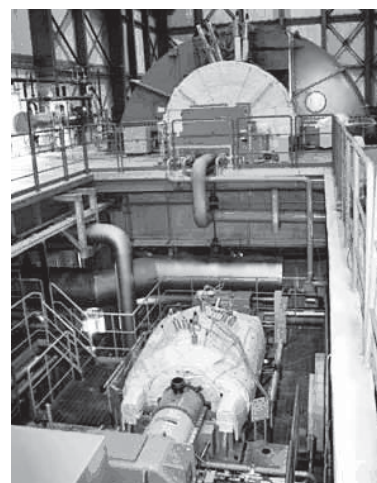


図5. 三川発電所のタービン試験設備—三川発電所に実機サイズの翼や最新の技術などを適用した試験用タービンを設置し、性能の計測や信頼性の検証を行っている。
Turbine development facility at Sigma Power Ariake Co., Ltd.'s Mikawa Power Plant

り、継続的に高性能化を進めている。

このほか、圧力損失を極限まで低減させた排気室や制御弁の採用、軸受の潤滑方式の変更による損失低減、新型シールによるリークの低減などにより高効率化を図っている。これらの性能向上技術は、東芝グループの(株)シグマパワー有明の三川発電所内に設けた蒸気タービン試験設備(図5)において、実機と同等条件下で検証することで、性能・運用面で信頼性の高い蒸気タービンを供給できる体制をとっている。

● タービン発電機の高効率化

火力発電所向けのタービン発電機は、中容量機(～400MVA級)には固定子

(注1) クリープ

材料に高い温度で力を加えたとき、時間の経過とともに変形する現象。

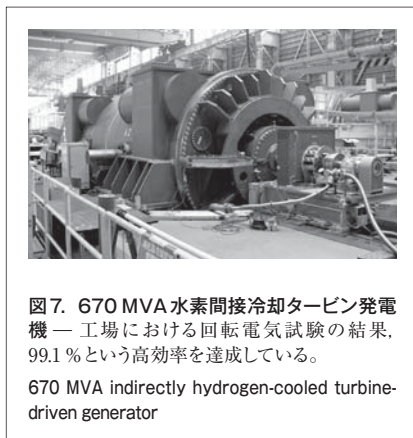
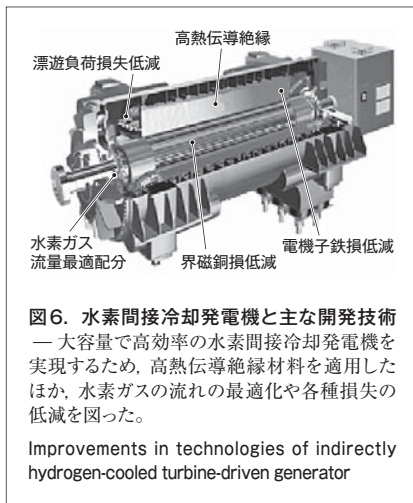
(注2) H Systemは、米国General Electric社の商標。

コイルを水素で冷却する水素間接冷却方式が、大容量機には固定子コイルを水で冷却する水直接冷却方式がそれぞれ適用されてきた。

水素間接冷却方式は、水直接冷却方式より構造が簡単で、運転性、保守性、更に効率面でも有利である。従来、水直接冷却方式であった大容量機にも適用できるように、当社は、様々な冷却効率の向上や損失低減策などの最新技術を開発した。

水素間接冷却方式では固定子コイルを絶縁の外側から間接的に冷却するため、熱伝導率の高いコイル絶縁材料を開発した。また、冷却媒体である水素ガスの発電機内における流れの最適設計により冷却効率を向上させ、更に各部位の電気損失を低減することで、発電機効率を向上させている(図6)。

この結果、水素間接冷却方式において



世界最大級の670 MVAタービン発電機(図7)で、99.1%(JEC-2130-2000ベース値)の高効率を達成し、プラント高効率化に貢献している。

負荷追従性の向上

気象状況などによって出力が変動しやすい再生可能エネルギー発電量の増加に伴い、系統の安定度低下が予想される。これについては、電力貯蔵やスマートグリッド(注3)によって解決するという方法もあるが、火力発電設備並みの応答性を持つ出力調整能力の実現には時間が掛かる状況である。そのため火力発電プラントでのいっそうの負荷追従性向上が期待されている。

当社は、ボイラと蒸気タービンを総合的に制御する制御アルゴリズムにより、先行予測制御を適用することで、負荷変動時に燃料投入の過度な変化を抑制して余分な燃料投入を防ぐと同時に、過剰な熱応力を低減して高い負荷追従性を実現している(図8)。

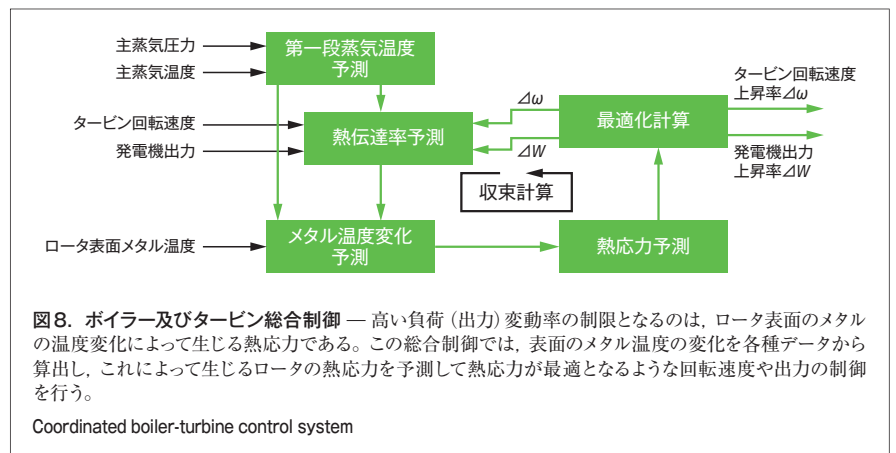
更に、運転履歴データの管理機能を強化することにより、複数の発電ユニットの運転におけるトータル損失の低減や、CO₂排出量などの環境ファクターを加味した経済性評価に基づく運転計画の策定の支援もできるようにした。

リハビリテーション手法及び保全技術による安定運用

当社は、最新技術を新設プラントに適用するのに加えて、老朽化して性能が低下した状態で運転されている火力発電プラントに対して、環境規制を満たすように低コストかつ短期の停止期間で発電出力と発電効率を向上させるリハビリテーション手法の確立も行っている。既に、他社製プラントのリハビリテーションプロジェクトを東欧において複数実施し完了させた実績と経験を基に、リハビリテーション市場での多様なニーズにフレキシブルな対応が可能である。

また、プラントの運転期間(ライフサイクル)にわたって高い稼働率を維持し、安全に運用する保全技術として、情報通信技術(ICT)を用いたプラント包括保守サービスも提供している。商用運転中のプラントに対して、遠隔監視する情報インフラを適用し、当社の優れた保守・診断サービスソリューションを24時間提供する体制を整えている。これにより、機器やシステムのトラブルに対して、予兆を察知し未然に防止するとともに、発生時には迅速な対応ができる。

これらリハビリテーション手法及び保全技術を広く全世界に提供していくことで、火力発電プラントの安定運用がで



(注3) スマートグリッド
太陽光や風力発電など複数の分散電源と家庭や工場などの電力負荷を電力及び通信のネットワークで結び、電源と負荷の双方を制御するエネルギー供給システム。

き、安定した電力供給に貢献している。

CCSと環境調和型火力発電

ここではCO₂排出削減について、高効率化とともにもう一つのアプローチであるCCS技術について述べる。

燃焼排ガスからCO₂を分離回収し、地中や海中に貯留するのがCCSである。火力発電プラントにCCSを併設することにより、火力発電所から排出されるCO₂を大幅に削減することができ、い

うなれば環境調和型火力発電プラントを実現することができる。

CO₂の分離回収方法には大別して図9に示す三つの方法があるが、当社はこれらの中で、燃焼後回収方式に焦点を当てて開発している。燃焼後回収方式は、ボイラなどの燃焼後の排ガスからCO₂を分離するため、新設プラントだけでなく既設プラントにも適用が容易であり、CCSの広範囲な適用が期待できる。当社は、アミン系の化学吸収液を用いたプロセスを開発し、実際の石炭火

力発電所のボイラ排ガスから10 t/日規模のCO₂を分離するパイロットプラントを建設して試験を行っている。

CCSが普及するのは2015～2020年以降と考えられるが、欧州では今後建設する火力発電プラントには、CCS技術が確立された際にはその時点でCCSを取り込めるように、スペースの確保や機器改造ができるように事前に配慮しておくCCSレディの考え方が実際の案件で採用される例も見られる。

当社は、石炭火力発電プラントにA-USCとCCSを適用することにより、CCSによる効率低下を緩和することで環境と経済性のバランスがとれたプラントを実現でき、環境調和型火力発電の一つの有力な実現手段になると考えている(図10)。

低炭素社会の実現に向けて

火力発電システムが依然として発電量の多くを担い、発展途上国でも多数の石炭火力発電所などが建設されていくなか、CO₂排出量の多い火力発電分野でのCO₂排出削減は極めて大きな課題である。

当社は、世界有数の発電設備供給者として、いっそうのプラント効率の向上と環境調和型火力発電の実現に向けて様々な技術課題に取り組み、低炭素社会の実現に向けた活動を今後も推進していく。

文献

- (1) International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2009. Paris, IEA, 2009, 696p.



村上 透
MURAKAMI Toru

電力システム社 火力・水力事業部技監。
発電システム全般の技術に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.

