

高効率蒸気タービン及び発電機

High-Efficiency Steam Turbines and Turbogenerators

沖田 信雄 高橋 亨 佐藤 理

■ OKITA Nobuo ■ TAKAHASHI Toru ■ SATO Osamu

発電事業を取り巻く環境は、二酸化炭素(CO₂)をはじめとする地球規模の環境問題、限りある化石燃料に対応した使用燃料源の多様化と省エネ、及び電力供給の自由化など、複雑で激しい変化が生じている。

発電設備に求められている電力の安定供給と多様化する社会的ニーズに応えるために、東芝は、高信頼性化、高性能化、コンパクト化などの課題解決に向けて、豊富な実績と幅広い知見の下、技術開発に取り組み、最新鋭の高効率な蒸気タービン及び発電機を製品化している。

The power supply business has been encountering dramatic changes involving complex challenges, including global environmental issues such as the reduction of carbon dioxide emissions, diversification and conservation of available fuels due to limited reserves, and deregulation of the power supply market.

Based on its extensive experience and integrated technological capabilities, Toshiba is developing and manufacturing proven state-of-the-art high-efficiency steam turbines and turbogenerators achieving high reliability, high performance, and compact design that satisfy the needs of society for stable electricity supply and the solution of various challenges.

1 まえがき

世界の火力発電は総発電容量の約60%を占めており、その中でも埋蔵量の比較的多い石炭火力は石油代替化石資源として、電力の安定供給や経済性の面からも着目され、蒸気温度の向上による高効率化や大容量・コンパクト化などにより、ベース電源^(注1)としての役割を担っている。

同時に欧米諸国を中心として、建設期間が短く、熱効率が高くCO₂排出量が少なく、電力変動への追従性に優れた、天然ガス焚(だ)きコンバインドサイクル(ガスタービンと蒸気タービンの組合せ)発電設備への期待も高まっている。

このようなニーズに対応するため、東芝は大容量・高効率化のための最新技術を開発し適用して、国内外の火力発電技術の発展に貢献してきた⁽¹⁾。

ここでは、火力発電用蒸気タービン及び発電機の高効率化と大容量化技術について述べる。

2 単機容量と蒸気条件の変遷

当社は、1927年に初の陸用蒸気タービンとして海外向け23kWのポンプ駆動用タービンを製造し、また、1929年には

(注1) 電力需要は昼夜あるいは季節で大きく変化し、この変化に対応して、火力、原子力、水力などの発電が最適の組合せで運用される。ベース電源は、常に発電量を確保しておく需要部分(ベースロード)を担い、昼夜を問わず一定出力で運転される。現在は一般に、原子力や大容量・高効率の石炭火力、地熱発電などがこれに当たる。

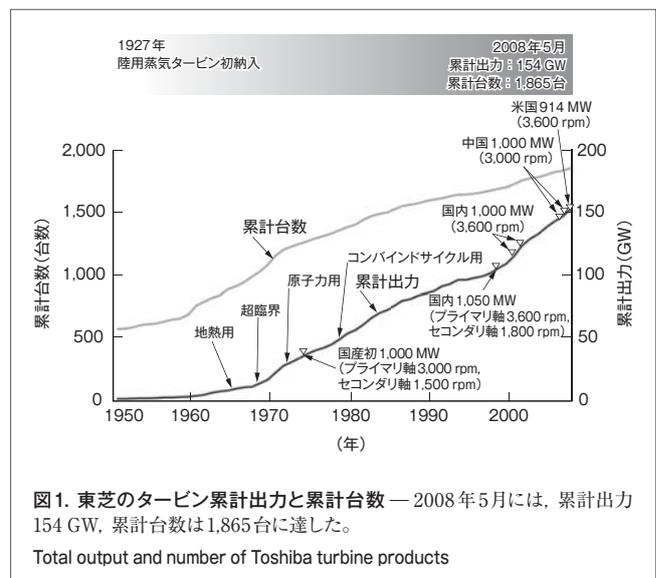


図1. 東芝のタービン累計出力と累計台数 — 2008年5月には、累計出力154 GW、累計台数は1,865台に達した。
Total output and number of Toshiba turbine products

初のタービン発電機として700kVA機を製造した。以来、約80年にわたって、様々な発電システムに対応したタービン及び発電機を数多く製作しており、累計出力は2008年5月に154GW、台数は1,865台に達している(図1)。

単機容量では世界最大級の、コンパクトなタンデムコンパウンド型(高、中、低圧タービンを一つの軸に配置するタイプ)3,600rpm用1,000MW蒸気タービン及び発電機の国内での実績が高く評価され、海外向け3,000rpm用1,000MWタンデム機の営業運転、3,600rpm用800~900MW級シリーズ

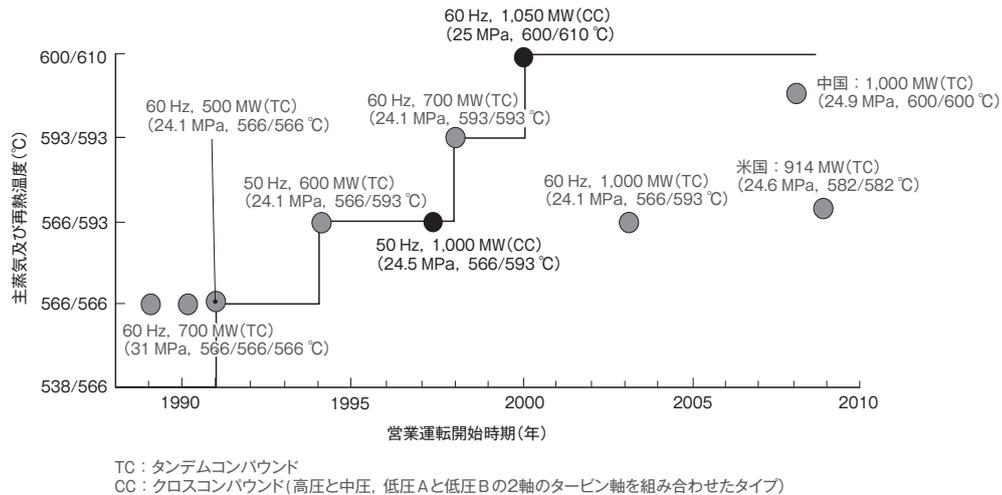


図2. 蒸気条件向上の変遷 — 蒸気条件の高温化により, 大幅な高効率化が実現されている。

Trend of steam conditions

機の出荷を行った。

また, 熱サイクル効率向上のために蒸気条件を高温化し, 大型商用機として世界最高の蒸気圧力25 MPa, 主蒸気及び再熱蒸気温度600/610 °Cの条件がまず国内で採用された。その後, 海外にも数々の600 °C級プラントを納めている(図2)。

蒸気条件高温化のためには, 高温クリープ特性に優れた材料の開発と適用が必要であり, 600 °C級の高温部位には信頼性, 運用性, 及び経済性の面で有利なフェライト系を主体とした各種改良型高クロム (Cr) 系材料が使用されている。

3 蒸気タービンの高効率化技術

蒸気タービンの高効率化は, 省エネや環境への負荷低減の要求によっても加速され, 確実に進んできた⁽²⁾。

蒸気タービンの効率向上とは, 種々の内部損失を低減することであるとも言える。以下に示すようなアイテムに対して, 当社は新しい技術を開発し実機に適用している。

- (1) 翼列の損失低減
- (2) 翼列以外の損失低減
 - (a) 漏れ損失の低減
 - (b) 各ケーシング^(注2)の吸・排気圧力損失の低減
 - (c) 排気損失の低減
 - (d) 軸受損失の低減

翼列の損失低減については, 二次流れ損失(渦流れ損失)の発生を低減させることが重要で, タービンの翼の前・後縁を蒸気流出方向に湾曲し傾斜させることで損失の低減を図り, 更に, 蒸気流量分布を最適にコントロールするように, 通路部

(注2) タービンローターや翼列などを収納する車室。

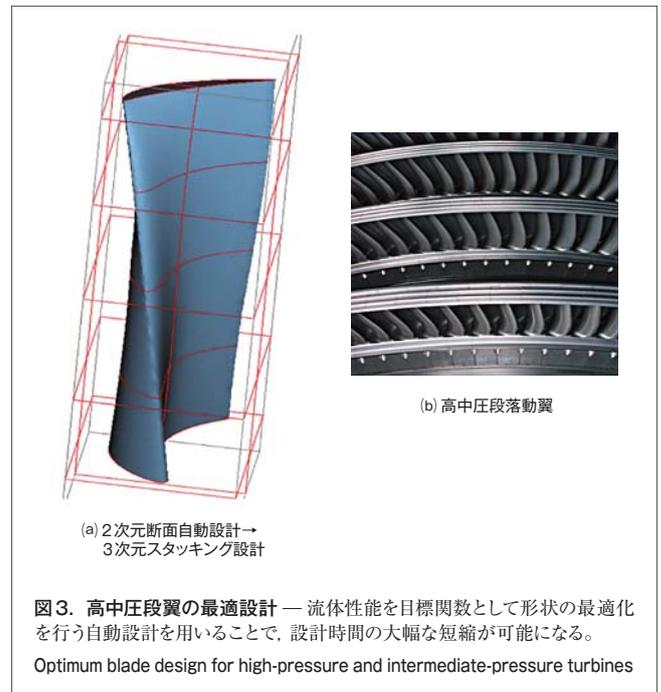
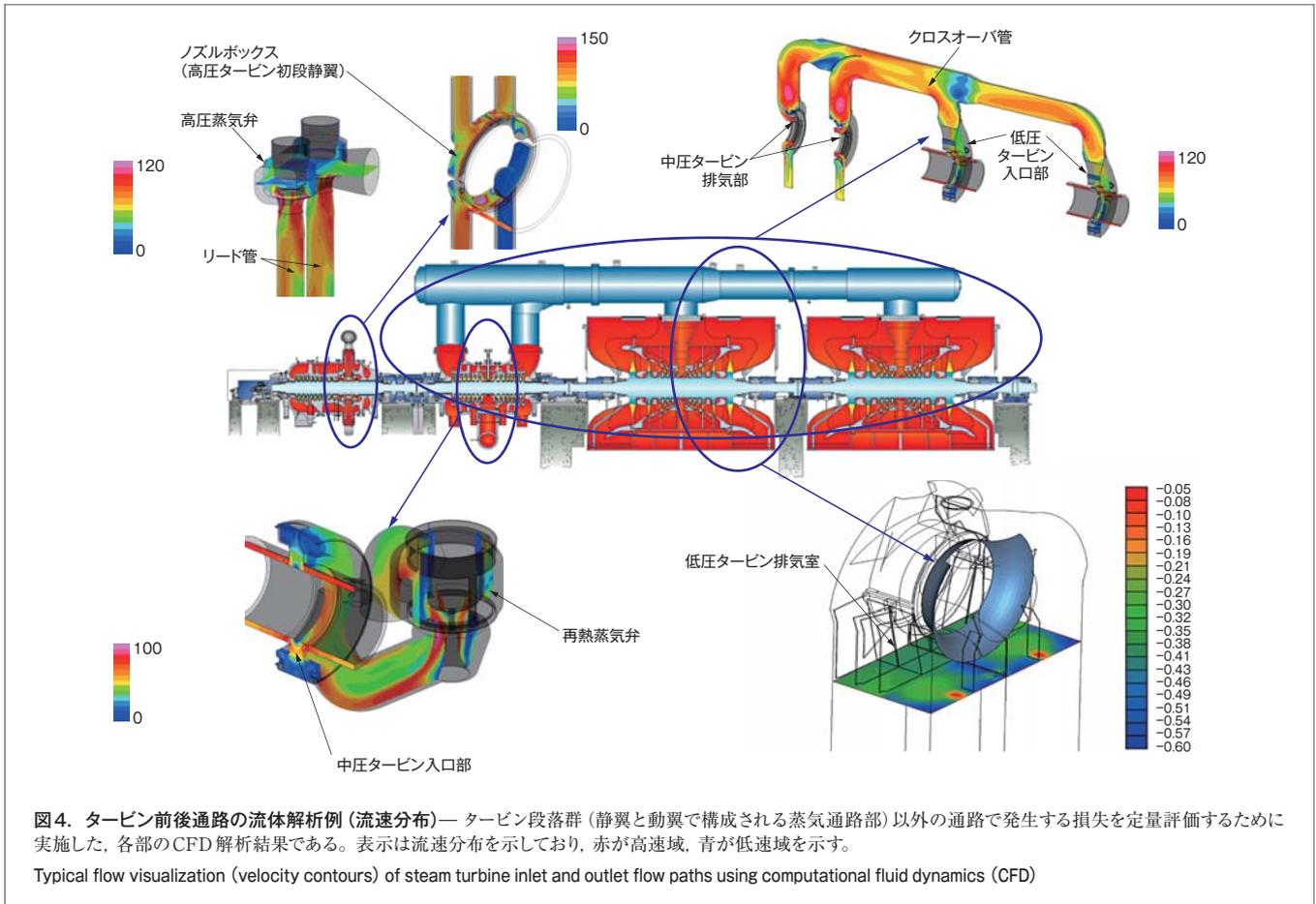


図3. 高中圧段翼の最適設計 — 流体性能を目標関数として形状の最適化を行う自動設計を用いることで, 設計時間の大幅な短縮が可能になる。

Optimum blade design for high-pressure and intermediate-pressure turbines

形状を半径方向に変化させるCFD (Computational Fluid Dynamics) を適用した, 3次元設計によるアドバンスフローパターン (AFP) 技術を幅広く採用している⁽³⁾。更に, 設計自動化システムを用いて, パラメータを変化させてあらかじめ設計しておいた翼型から選択する方法と, 設計条件に完全に一致する形状をそのつど自動設計する方法を併用することによって, 流体性能を向上させるための時間が大幅に短縮できる(図3)。

漏れ損失の低減については, 動翼先端部を隣り合う翼どうしで接触及び連結させた全周一群構造のスナッパ翼を採用



し、翼先端部のシール形状の改善 (ハイロー型チップフィン) により、動翼先端部での蒸気漏れを減少させることによる段落効率の向上を図っている。更に、シール部の間隙 (かんげき) を従来値より縮小しても、回転体と静止部の接触振動を極力発生させないシール技術を開発し、漏れ損失の低減を達成している。

翼列以外の部分においても、CFDを用いたエネルギー損失の低減を進めている。翼列以外の蒸気通路部各部には流速分布があるので、境界条件の設定方法の違いによる解析誤差を少なくするために、可能なかぎりつなぎ目のない大規模解析を実施している (図4)。

各ケーシングの吸・排気圧力損失の低減については、開発期間の短縮化を目指し、蓄積してきた試験データにより精度を高めた流体解析及び構造解析を駆使して、高圧部と中圧部の排気ディフューザ (拡大流路) 形状をはじめ、ケーシングと配管の接続部の形状などについて流体解析により最適化した (図5)。

低圧タービンの最下流にあたる最終段翼を通過した蒸気の運動エネルギーは、すべて残留速度損失となる。したがって、出口蒸気通路部の環状面積の大きな高性能最終段翼と、低圧損型低圧タービン排気室の適用は、タービン効率向上の有効な手段である。最新の最終段翼は、世界最大級の環状面

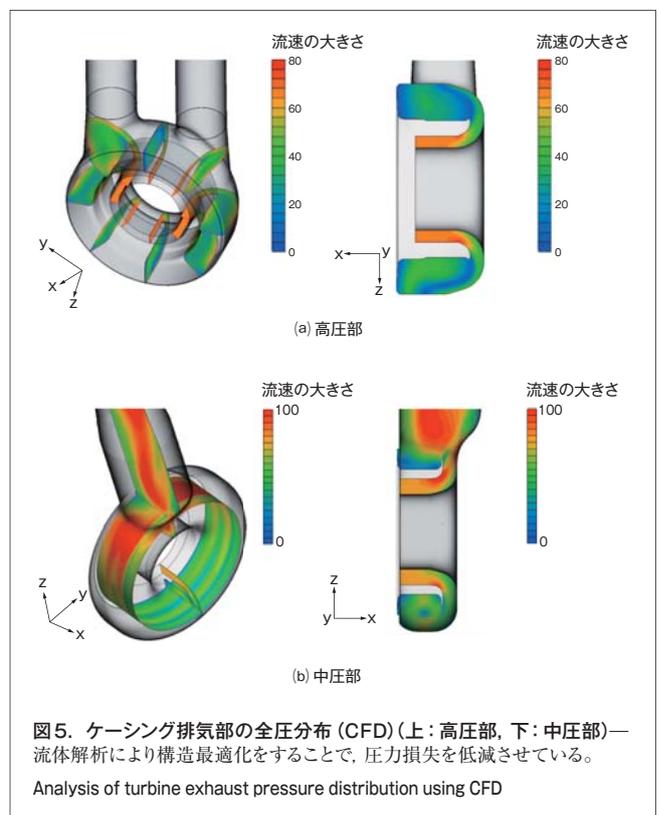




図6. 48 in翼適用低圧ローター — イタリア向け及び中国向けプロジェクトの低圧ローターには、最終段翼に48 in翼を適用している。北米向けプロジェクトには40 in翼を適用している。

Low-pressure rotor for 48-inch last-stage blade

積を持つ3,600 rpm用スチール製40インチ (in) 翼と3,000 rpm用スチール製48 in翼が開発され、実機へ適用されている。各々の翼は、1,000 MW級石炭火力のタンデムコンパウンド機をはじめ、広範囲の出力帯の石炭火力及びコンバインドサイクル向け機種に採用されている (図6)。

4 発電機の大容量化技術

4.1 大容量化と高性能化

発電機を大容量化するためには、まず体格を大きくすることが考えられるが、体格には構造上や経済上の制約があるため、エネルギー密度を増加することも重要となってくる。したがって、発電機大容量化の技術課題は、大型化を成り立たせるための技術と、エネルギー密度を増加させるための技術に、大別される。

大型化の技術には、ロータ (回転子) やエンドリングの高強度材料開発、大口徑の軸受やシールリング開発、軸振動特性の最適化、などが挙げられる。一方、エネルギー密度増加技術として、ロータやステータ (固定子) のコイル及び鉄心の温度上昇を抑制するための冷却構造の最適化、電磁力増加に伴うステータコイル端部の支持強化、水素ガス圧力の増加に伴う発生応力を抑制するためのコンパクトフレームの採用、などが挙げられる。発電機の大容量化技術を図7に示す。

当社はこれらの技術に、種々の低損失化技術や高信頼性技術を組み合わせ、次章で述べる1,000 MW発電機をはじめ数多くの大容量発電機を製造しており、良好に運転されている。

4.2 冷却技術と高熱伝導絶縁技術

発電機の冷却技術は、エネルギー密度にかかわる重要な技術課題である。発電機の冷却方式は、使用される冷媒に従

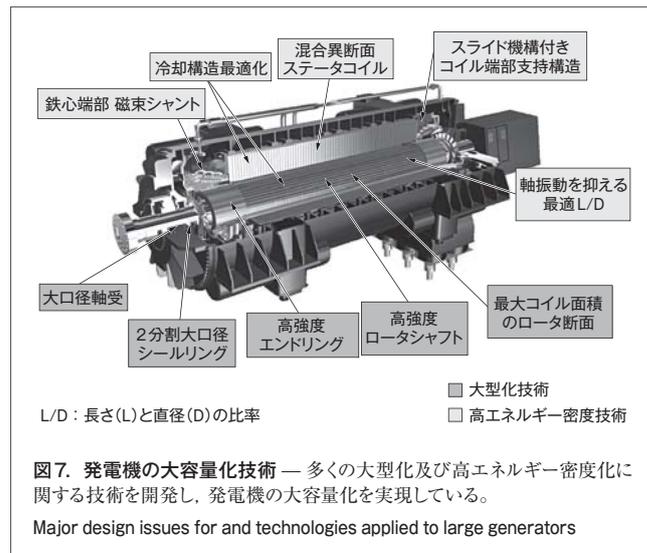


図7. 発電機の大容量化技術 — 多くの大型化及び高エネルギー密度化に関する技術を開発し、発電機の大容量化を実現している。

Major design issues for and technologies applied to large generators

い、空気冷却、水素冷却、及び水冷却の各方式が採用されている。一般的に、大容量機には水冷却が適用されるが、保守性、運転性、経済性の観点から、シンプルなシステムである水素冷却の適用容量拡大を求められることも多い。

当社は、この課題を解決するために、最適冷却技術を開発するとともに、高熱伝導絶縁を世界で初めて開発し実用化した。ステータコイルの絶縁材料は、熱伝導性が低いためコイルで発生した熱を外部に逃がしにくく、ステータコイルの温度上昇を大きくする要因となっていた。高熱伝導技術は、この絶縁部の熱伝導率を大幅に向上させたものである⁽⁴⁾。これらの技術により、当社の水素間接冷却発電機の適用容量は、従来400 MVA級であったものが800 MVA級にまで拡大できている。

5 最新プラント

当社は近年、800 MW以上の海外向け大容量及び高効率プラントを以下のように多数受注している。

- (1) 中国 1,000 MW, 24.9 MPa, 主蒸気600℃, 再熱蒸気600℃ (2008年1月営業運転開始)
- (2) インド 830 MW, 24.1 MPa, 主蒸気565℃, 再熱蒸気593℃ (製作中)
- (3) 米国 914 MW, 24.6 MPa, 主蒸気582℃, 再熱蒸気582℃ (2008年2月出荷)
- (4) 米国 905 MW, 25.5 MPa, 主蒸気566℃, 再熱蒸気577℃ (製作中)
- (5) 米国 855 MW, 25.4 MPa, 主蒸気566℃, 再熱蒸気567℃ (製作中)
- (6) 米国 958 MW, 26.0 MPa, 主蒸気582℃, 再熱蒸気582℃ (製作中)

ここでは、代表的な二つのプラントについて述べる。

5.1 中国向け1,000 MW機

中国向け最大容量機であり、当社製の3,000 rpm用タンデムコンパウンド機としても最大である。2008年1月に営業運転を開始した(図8)。

蒸気条件は高性能化を目指し、主蒸気及び再熱蒸気とも600℃に高温化している。最終段には最新の高性能な48 in スチール翼が採用されている(表1)。

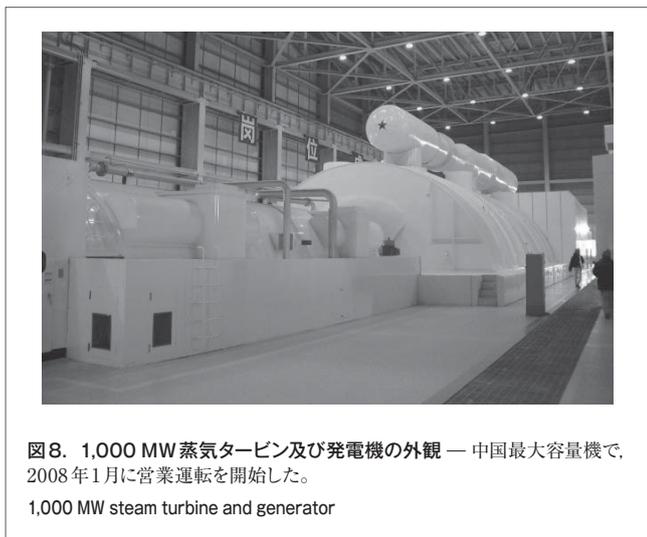


図8. 1,000 MW 蒸気タービン及び発電機の外観 — 中国最大容量機で、2008年1月に営業運転を開始した。
1,000 MW steam turbine and generator

表1. 蒸気タービン及び発電機諸元

Specifications of steam turbines and generators

項目	中国1,000 MW機	米国914 MW機
出力 (MW)	1,000	914
回転数 (rpm)	3,000	3,600
運用方式	複合変圧	完全変圧
蒸気条件 (MPa, °C)	24.9, 600/600	24.6, 582/582
タービン形式	TC4F-48 in	TC4F-40 in
発電機定格 (MVA (PF))	1,120 (0.9)	1,110 (0.9)
冷却方式	水冷却	水冷却
定格電圧 (kV)	27	24.5

PF : Power Factor (力率)

5.2 米国向け914 MW機

米国向け最大級のタンデムコンパウンド機である。2008年2月に工場出荷した(図9)。ベースロード運用で高効率な、全周挿入での加減弁全開運転を行っている。

主蒸気及び再熱蒸気の温度はともに582℃で、最終段に高性能の40 in スチール翼が採用されており、また、最新の性能向上技術が盛り込まれている(表1)。



図9. 工場試験中の914 MW-1,110 MVA発電機 — 出荷前の工場試験において、良好な性能、特性が確認された。

1,110 MVA generator during shop test

6 あとがき

火力発電用蒸気タービン及び発電機の高効率化と大容量化の最新技術について述べた。

当社の蒸気タービン及び発電機は、高信頼性と大容量・高効率化技術などで常に業界をリードしてきた。今後も、豊富な実績に基づいた新たな技術開発に取り組み、高効率で魅力ある蒸気タービン及び発電機を提供していく。

文 献

- (1) 伊藤裕道, ほか. 電力の安定供給を担う火力発電用蒸気タービンと発電機. 東芝レビュー. 60, 7, 2005, p.58-62.
- (2) 佐々木隆, ほか. 蒸気タービンの戦略的開発設計. 東芝レビュー. 60, 1, 2005, p.52-55.
- (3) 田沼唯士, ほか. CFDを活用した高性能蒸気タービンの開発設計. 東芝レビュー. 62, 9, 2007, p.25-29.
- (4) 佐藤 理, ほか. 世界最大容量水素間接冷却タービン発電機. 東芝レビュー. 59, 2, 2004, p.62-65.



沖田 信雄 OKITA Nobuo

電力システム社 火力・水力事業部 火力タービン・発電機技術部主幹。タービンサイクル計画及び開発業務に従事。日本機械学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



高橋 亨 TAKAHASHI Toru

電力システム社 火力・水力事業部 火力タービン・発電機技術部参事。タービンサイクル計画業務に従事。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



佐藤 理 SATO Osamu

電力システム社 火力・水力事業部 火力タービン・発電機技術部グループ長。火力発電所の電気系システムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.