

# 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

Thermal Steam Turbine and Turbogenerator Technologies for Reliable Power Supply

伊藤 裕道 沖田 信雄 宮池 潔

■ ITO Hiromichi ■ OKITA Nobuo ■ MIYAIKE Kiyoshi

近年、発電事業を取り巻く環境には、地球規模の環境問題、使用燃料源の多様化、電力供給の自由化など複雑で急速な激しい変化が生じている。東芝は、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べく、高信頼性、高性能、コンパクト、サービスなどの課題解決に向けて、豊富な実績と幅広い知見のもと技術開発に取り組む、最新鋭の蒸気タービン及び発電機を製品化している。

The power supply business has recently been encountering rapid and dramatic changes involving complicated challenges, such as global environmental concerns, diversification of available fuels, 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 steam turbines and turbogenerators offering high reliability, high efficiency, compact design, and appropriate services, which satisfy the needs of society for stable electricity supply and the solution to various challenges.

## 1 まえがき

東芝は、1927年に初の陸用蒸気タービンとして海外向け23 kWのポンプ駆動用タービンを製造し、また、1929年には初のタービン発電機として700 kVA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2005年1月に1億3,910万kW、台数は1,807台に達している(図1)。

現在、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ている。また、熱効率の向上や立地点の最大限の活用など、ベースロードとしての大容量・高効率火力発電設備が見直されつつある。

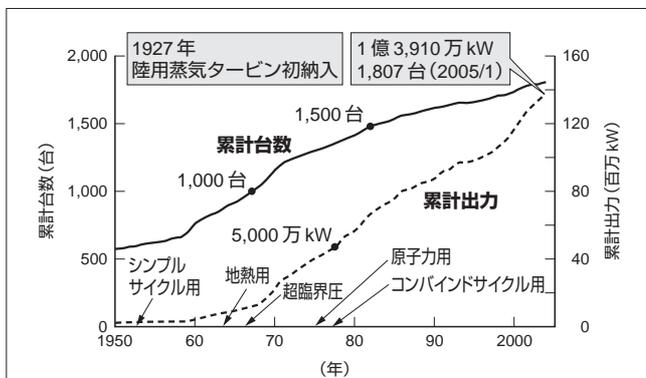


図1. 当社のタービン累計出力と台数 — 2005年1月には、累計出力1億3,910万kW、台数は1,807台に達した。

Total output and number of Toshiba turbine products

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、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発電設備へのニーズが高まっている。

このようなニーズに対応するため、当社は他社に先駆けて最新技術を適用するなど、常に火力発電技術の発展に貢献してきた。

ここでは、火力発電用蒸気タービン及び発電機の最新技術について述べる。

## 2 火力発電プラントの単機容量の変遷

わが国では、従来から発電設備に携わるユーザー、メーカー共に大容量・高性能ユニットの開発と実現に注力している。

火力タンデムコンパウンド型では1970年代に700 MW機が製作され、最近まで国内最大容量機であった。その後、更なる大容量・高効率化へのニーズが高まり、3,600 rpm用としては世界最大のタンデムコンパウンド型1,000 MW蒸気タービン及び発電機(中部電力(株)碧南火力発電所4, 5号機)が実現した。1,000 MW機の外観を図2に、わが国における単機容量の変遷を図3に示す。

次世代コンバインドサイクル発電プラント用H System™は、燃焼温度が世界最高水準の1,500℃級ガスタービンと蒸気タービン及び発電機を一軸配置にて構成し、熱効率は53%以上を達成、50 Hzで約500 MW、60 Hzで約400 MWという世界最高の効率・容量を誇る最新鋭のコンバインド発電システムである。当社は、1998年に米国General Electric



図2. 1,000 MW 蒸気タービン及び発電機の外観 — 世界最大級で、第1号機を2001年11月に営業運転を開始した。  
View of 1,000 MW steam turbine and generator

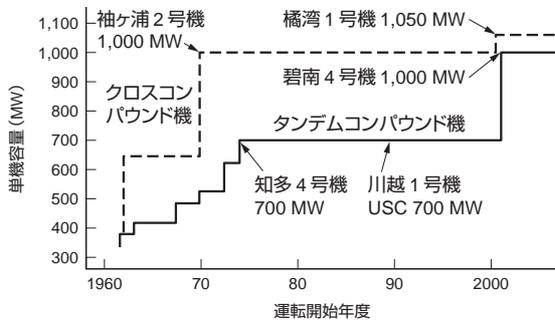


図3. 火力発電プラント大容量化の変遷 — 東芝は、常に他社に先駆け、大容量ユニットの記録機を手がけている。  
Trend of unit capacity in thermal power generation

(GE)社と製造協業契約を締結し、商用機の製造に着手している。

### 3 蒸気タービン

#### 3.1 蒸気条件の向上

わが国における事業用火力発電の蒸気条件の変遷を図4に示す。わが国では89年に31 MPagの超々臨界圧力(USC)プラントである中部電力(株)川越火力発電所1,2号機(700 MW)が営業運転を開始した。それ以降、高温化に主眼を置いた技術が確立し、電源開発(株)橘湾火力発電所1号機(1,050 MW)では、大型商用機として世界最高の25 MPag, 600/610℃の蒸気条件が採用された。蒸気の高高温化のためには、より高温特性の優れた材料の適用が必須である。600℃級では信頼性、運用性、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)系材料が開発され、回転部と静止部の高温部位を中心に広範囲に使用されている。

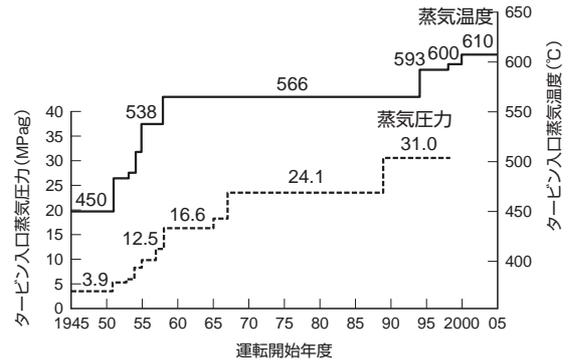


図4. 蒸気条件向上の変遷 — 蒸気条件の高温・高圧化により、大幅な高効率化が実現されている。  
Trend of steam condition

将来的には更なる熱効率向上を目指し、35 MPag, 700℃級プラントの実現に向けて、超高温部の冷却構造やオーステナイト系あるいはニッケル基系合金などの超高温材料の要素技術開発、及び総合的超高温技術の開発を進めている。

#### 3.2 タービン内部効率の向上

蒸気タービンの内部効率(熱効率)は、省エネルギーや環境への負荷低減の要求によって加速され確実に向上してきた。当社における蒸気タービンの効率向上技術の進展を図5に示す。

蒸気タービンの内部効率向上は、内部損失低減とも言い換えられる。そのなかでも翼列の損失低減は内部効率向上に大きく寄与する。蒸気通路部の内壁と外壁面の境界層で二次流れ損失(渦流れ損失)が発生し、その影響度は大きい。そこで、タービンの翼の前・後縁を蒸気流出方向に湾曲・傾斜させ、二次流れ損失の低減を図り、更に、蒸気流量分布を最適にコントロールするように、通路部形状を半径方向に変化させるCFD(Computational Fluid Dynamics)を適用し

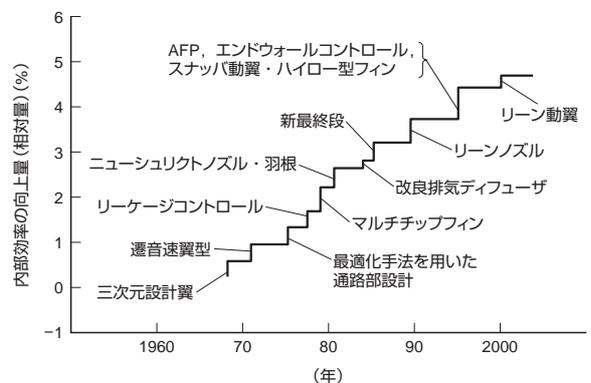


図5. 蒸気タービン内部効率向上の変遷 — 東芝は新しい技術を開発・適用し、確実に内部効率の向上を実現している。  
Trend of internal energy improvement

た三次元設計によるアドバンスドフローパターン(AFP)技術が幅広く採用されている。また、動翼先端部を隣り合う翼どうしで接触・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えいを減少させることによる段落効率の向上を図っている(図6)。

更に、蒸気通路部においては、翼列間の干渉や湿り域での凝縮現象などを考慮した非定常流れの解析・評価に基づき、高効率翼列の最適設計法の確立を進めている。

### 3.3 最終段の長翼化による効率向上

低圧タービンの最下流にあ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、低損失型低圧タービン排気室の適用は、タービン効率向上の有力な手段である。最新の最終段翼は、世界最大級の環状面積を持つ3,600 rpm用スチール製40インチ翼と3,000 rpm用

スチール製48インチ翼が2001年に開発され、実機へ適用されている(図7)。

## 4 発電機

### 4.1 大容量化と高性能化

1,000 MW機の技術課題と適用技術を図8に示す。技術課題を大別すると、大型化にかかわる技術と出力係数増加(エネルギー密度増加)にかかわる技術に分類される。大型化に関しては、回転子軸やエンドリングなどに適用する高強度材料の開発、大口径軸受や大口径シールリングの開発及び軸振動特性の最適化が必要である。一方、出力係数増加に関しては、固定子コイル、回転子コイルや固定子鉄心端部の温度上昇抑制、電磁力増加に対する固定子コイル端部の支持強化、電流増加に対する口出ブッシングの強度向上と温度上昇抑制などが必要である。また、水素ガス圧力の増加に対しては、発生応力を抑制するため、コンパクトフレームや球形ターミナルボックスを採用している。

発電機の高効率化とコンパクト化は一般的に相反する技術課題であるが、当社は種々の低損失化技術と軽量・小型化技術を組み合わせることで、単位容量当りの質量を増加させることなく、定格運転で99.00%以上の効率を実現している。700 MW機と1,000 MW機の諸元を表1に示す。出力係数を大きく設計することで、1,000 MW機は初期の700 MW機に対し単位容量当りの質量を75%まで低減した。

### 4.2 冷却技術と高熱伝導絶縁技術

発電機は電気的と機械的損失を発生し、その大部分は熱となるため冷却技術が重要な技術課題である。発電機には、使用する冷媒に基づき、大別して三つの冷却方式が採用されている。すなわち空気冷却、水素冷却、水冷却である。一般的に小容量機には空気冷却が、大容量機には水冷却が採用されるが、よりシンプルなシステムである空気冷却や水素冷却の大容量機への適用拡大が、運用性と保守性の利点によりユーザーから強く求められている。

当社はこの課題を解決するために、最適通風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。固定子コイルの絶縁材料は熱伝導性が悪いため、固定子コイルの発熱を外部に逃がしにくく、固定子コイルの温度上昇を大きくする要因となっていた。高熱伝導絶縁技術は、この絶縁部の熱伝導率を従来の2倍とすることにより、空気や水素によって間接冷却される固定子コイルの温度上昇を10~20 K低減できた。更に、この技術は発電機の小型化にも応用できる。高熱伝導絶縁技術による各冷却方式に対する単機容量の拡大を図9に示す。この高熱伝導絶縁技術を用いた発電機は、前述のH System™にも採用されており、今後の主力製品になっていくものと考えている。



(a) AFP ノズル (b) スナッパ翼 (c) ハイロー型チップフィン

図6. 最新技術を活用したAFPノズル、スナッパ翼、ハイロー型チップフィン—AFPは、段落内蒸気流れの最適化を図り、スナッパ翼及びハイロー型チップフィンにより蒸気漏えいを低減させている。

Advanced flow pattern nozzle (left), snubber blade (center), and hi-lo tip fin (right)



図7. 48インチ用低圧ロータ—イタリアエジソン社のトルビスコサプロジェクト向け主タービン低圧ロータにおいては、最終段に48インチ翼を適用している。

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

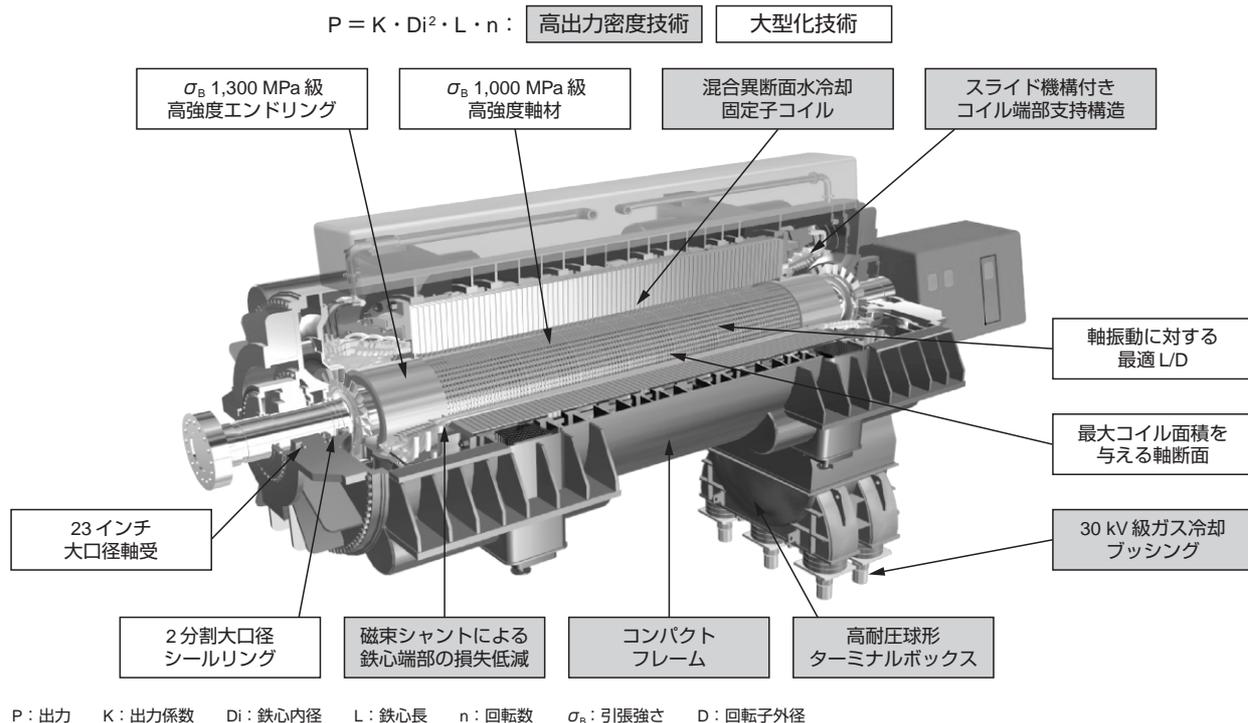


図 8. 1,000 MW 発電機の技術課題と適用技術 — 1,000 MW 機実現のために、高出力密度化と大型化に対し多くの新技術を開発、適用している。

Major design issues and applied technologies for 1,000 MW turbogenerator

表 1. 発電機諸元の比較

Comparison of turbogenerator weights, dimensions, and efficiencies

項目	1,000 MW 機	700 MW 初号機	700 MW 最新機
総質量 (PU)	1.05	1.0	0.66
容量/質量 (PU)	0.75	1.0	0.86
全長 (m)	17	20	16
定格点保証効率 (%)	99.00	98.83	99.00
製作 (年)	2000	1972	1990

PU : Per Unit

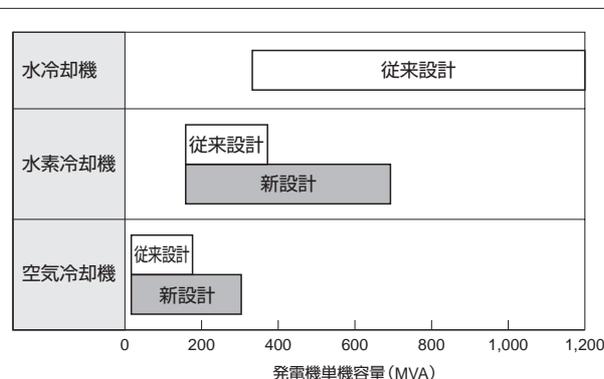


図 9. 高熱伝導絶縁技術適用による発電機単機容量の拡大 — 高熱伝導絶縁技術の適用により、各冷却方式に対する単機容量の拡大を実現した。

Applicable capacity ranges of turbogenerator cooling systems

## 5 運用性と信頼性の向上技術

最近の火力用発電設備には柔軟な運用が要求されてきており、多頻度起動・停止運転や負荷調整運転が行われるようになってきている。また、系統故障時の機器保護と電力安定供給の観点から、高速再閉路も多くの系統で採用されるようになってきた。更に、コンバインドサイクルプラントについては急速起動が要求されている。このように運用形態の多様化が増してきており、より過酷な条件下で運転されるようになってきている。

頻繁な起動・停止や過渡変動に対しては、タービンバイパスシステムを適用することにより運用性の向上を図っている。蒸気タービンについては、熱応力緩和構造を採用し、更に、高温部へのコーティング技術や湿り部への発展型耐エロージョン技術などを、また、発電機については、主絶縁と固定子コイル端支持部のサーマルサイクル劣化抑制技術や、ロータコイル接続部の長寿命化技術などを開発し、実機適用している。

当社が納入したオーストラリア・エラリング4号機では、連続運転673日を達成し、連続運転の世界最長記録としてギネスブックに登録され、その優れた運用性と信頼性が証明された(図10)。

また、運転要員への技術支援や省力化、経年プラントの長

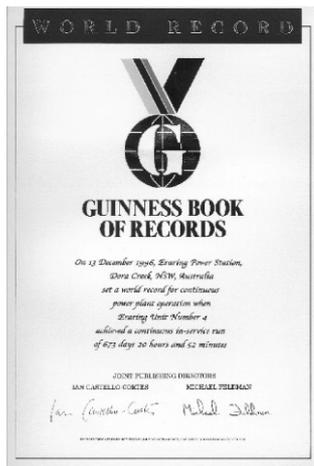


図 10. 連続運転の世界最長記録 — オーストラリア・エラリング4号機において、連続運転の世界最長記録としてギネスブックに登録され、運用性及信頼性が証明された。

World record for continuous power plant operation

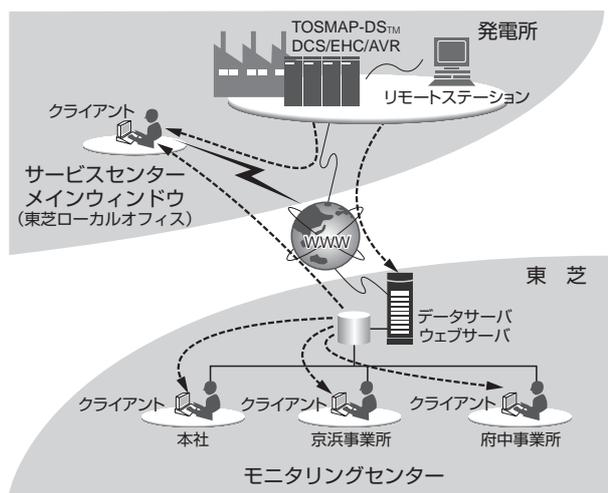
## 6 あとがき

電力の安定供給を担う火力発電用蒸気タービン及び発電機の技術の変遷と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、高運用性、高効率化、大容量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、魅力のある蒸気タービン及び発電機を提供していく。

## 文 献

- (1) 大地昭生, エネルギーと環境調和を目指す火力発電技術. 東芝レビュー. 56, 6, 2001, p.2-7.
- (2) 飯田義亮, ほか, 1,500℃級コンバインドサイクルシステム. 東芝レビュー. 56, 6, 2001, p.8-12.
- (3) 大森達郎, ほか, 高温・高性能蒸気タービン. 東芝レビュー. 56, 6, 2001, p.17-20.
- (4) 林 真司, ほか, 海外火力発電所のリモート監視・診断サービス. 東芝レビュー. 59, 12, 2004, p.49-51.
- (5) 伊藤裕道, ほか, 世界最大タンデム1,000 MW タービン発電機の完成. 東芝レビュー. 56, 6, 2001, p.21-24.
- (6) 関戸 忍, ほか, タービン発電機固定子コイル高熱伝導絶縁の開発. 火力原子力発電. 54, 5, 2003, p.496-502.



DCS : Distributed Control System EHC : Electric Hydraulic Control  
AVR : Automatic Voltage Regulator

図 11. リモート監視・診断システムの概要 — 発電所のリモートステーションと当社及び現地法人がネットワーク接続され、リモート監視・診断サービスを提供する。

System outline of remote monitoring and diagnostic service

寿命化や補修費の抑制など日常監視と異常時の顧客業務をサポートするため、IT(情報技術)を用いてリモート監視・診断サービスを展開している(図11)。これらのサービスは、タービン振動値、プロセス状態値及び制御装置状態をリモート監視しており、定期診断レポートによる通常運転状態の確認と改善提案、及び異常発生時の迅速な対応を可能としている。



伊藤 裕道 ITO Hiromichi, D.Eng.

電力・社会システム社 火力・水力事業部技監, 工博。  
発電機システム計画・開発・設計業務に従事。CIGRE, 電気学会, 日本機械学会会員。  
Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



沖田 信雄 OKITA Nobuo

電力・社会システム社 火力・水力事業部 火力タービンプラント計画技術部主幹。タービンサイクル計画・開発業務に従事。日本機械学会会員。  
Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



宮池 潔 MIYAIKE Kiyoshi

電力・社会システム社 京浜事業所 発電機部長。  
タービン発電機の開発・設計業務に従事。CIGRE, 日本機械学会会員。  
Keihin Product Operations