

近年、電気事業法の改正に伴う規制緩和などによって、国内の電力事業を取り巻く環境は急激な変化を遂げている。そのなかにあつて、火力発電設備に求められる発電コストの低減や地球環境問題への対応といった社会的ニーズにこたえるため、当社では、蒸気タービンプラントの高性能・大容量化、及び合理化を実現するための種々の新技術を開発し、実機への適用を進めている。高性能化では、630℃級蒸気タービンの開発や、最新の流体解析技術を駆使した三次元翼設計及び通路部設計、大容量化では最終段動翼の長翼化がその代表的な技術である。また、合理化では、新技術を適用した機器の小型化や、設計手法の改善及びシステムの集約化によるシステムの簡素化などを推進している。

Dramatic changes have taken place recently in the Japanese electric power industry. In particular, reductions in the cost of electricity and protection of the environment are now social needs with respect to thermal power plants.

In order to meet these requirements, Toshiba has developed various new technologies for high-efficiency steam turbine plants, including an advanced 630 C-class steam turbine, a more efficient steam pass design, and an extended last-stage bucket. Some of these technologies have already been applied to actual thermal power stations.

1 まえがき

当社は、1927年に初の陸用蒸気タービンとして海外向け30PS(仏馬力)のポンプ駆動用タービンを製造、以来70有余年にわたって、様々な火力発電システムに対応したタービンを数多く製作しており、その累計出力は2001年1月に1億1,340万kW、台数は1,729台に達した(図1)。この間、当社は他社に先駆けて大容量記録機を手がけ、更に世界最高レベルの蒸気条件を初めて大型商用機に適用するなど、常に火力発電技術の発展に貢献してきた。

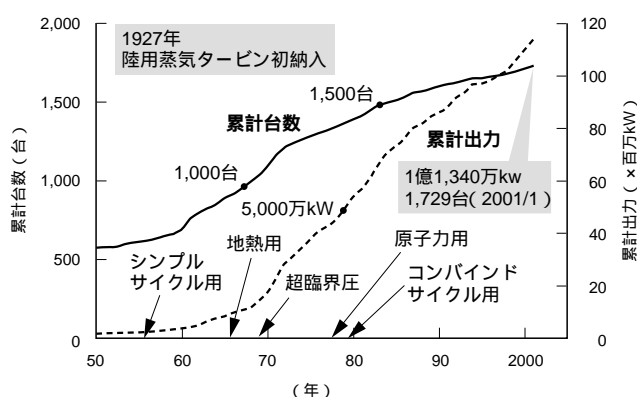


図1. 当社のタービン累計出力と台数 2001年1月には、累計出力1億1,340万kW、台数は1,729台に達した。

Total output and number of Toshiba turbine products

火力発電は、今や“成熟した技術”とも言われているが、電力コストの低減、地球温暖化の原因となる二酸化炭素(CO₂)排出量の抑制といった社会のニーズにこたえるため、当社は蒸気タービンプラントの更なる高性能化に向けて、たゆみない努力を続けている。

ここでは、現在、当社が取り組んでいる蒸気タービンプラントの高性能化技術と大容量化技術、及び合理化技術について述べる。

2 高性能化技術

2.1 蒸気条件の向上⁽¹⁾

わが国の蒸気タービンプラントにおける蒸気条件と効率の変遷を図2に示す。69年に主蒸気圧力24.1MPaの超臨界圧力プラントが出現し、プラント効率が大幅に向上した。89年には31.0MPa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700MWが営業運転を開始した。蒸気条件の高圧化については、これを上回るプラントは現在のところ出現していないが、以後、高温化に主眼をおいた技術が発達し、現在では電源開発(株)橘湾火力発電所1号機1,050MWに、大型商用機としては世界最高の25MPa、600/610℃という蒸気条件が採用されている。

この蒸気タービンは、米国General Electric社との共同製作であるが、高温にさらされる高中圧タービンの1,2段動翼は当社にて製作、また、最終段翼(48インチ)を含む低圧3段

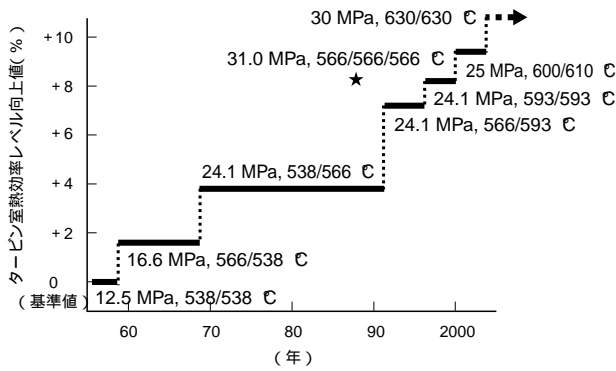


図2. わが国における蒸気条件と効率の変遷 蒸気条件の向上によって、40年前と比べ約10%の高効率化が実現されている。
Trends in main steam condition and thermal efficiency in Japan

落については設計を含めて当社が提供している(図3)。

高温/高圧蒸気タービンを実現するためには、主蒸気及び再熱蒸気にさらされるロータ、羽根などの回転体、及びケーシング、主蒸気弁などの静止部について、高温ラプチャー強度に優れた材料の開発がもっとも必要な課題である。

現在、主流となっている600℃級の蒸気タービンには、80年代に開発された改良12クロム(Cr)鋼ロータや12Cr 鋳鋼ケーシングが適用されている。当社では、更に、これら従来材をベースとした高温材料の開発を進め、フェライト系材料としての限界と目されている主蒸気/再熱蒸気温度630℃級蒸気タービンに適用可能な、新12Crロータ・羽根材及び静止部用材料の開発を完了した。

99年度には、電源開発(株)と共同でこれらの材料を用いた実温・実圧条件下での回転・要素試験を行い、ロータ材や他の高温材料の健全性を確認している⁽²⁾。



図3. 電源開発(株)橘湾火力発電所1号機 大型商用機として世界最高の蒸気条件(25 MPa, 600/610 °C)を採用している(2000年7月営業運転開始)。
Tachibana Bay Power Station No. 1 Unit of Electric Power Development Co., Ltd.

2.2 タービン内部効率の向上

図4はタービン内部損失の内訳を示したものであるが、タービン内部で発生する損失の67%は段落内部で発生し、このうち36%は翼間を蒸気が通過する際に発生する二次流れによる損失、20%は動翼先端(チップ)部からの蒸気漏洩(ろうえい)による損失である。更に、最終段で発生する排気損失は内部損失全体の17%に相当するが、タービン内部損失に占める割合が比較的大きいこれらの損失を低減させることが、効率向上の重要なポイントとなっている。

2.2.1 アドバンスドフローパターン

まず、二次流れ損失の低減策であるが、当社では粘性を考慮した三次元翼設計を適用したアドバンスドフローパターン(AFP)と呼ばれる動静翼形状を開発し、既にも実機にも適用している⁽³⁾(図5)。AFP段落では、流線を内外壁面に向かってシフトさせることで二次流れ渦の発生を防止するとともに、翼長方向の流量分布をコントロールして損失の少ない領域により多くの蒸気を流して、有効なエネルギー変換を行っており、その効果は翼長によって異なるが、おおむね1.5~2%の段落効率向上が達成される。

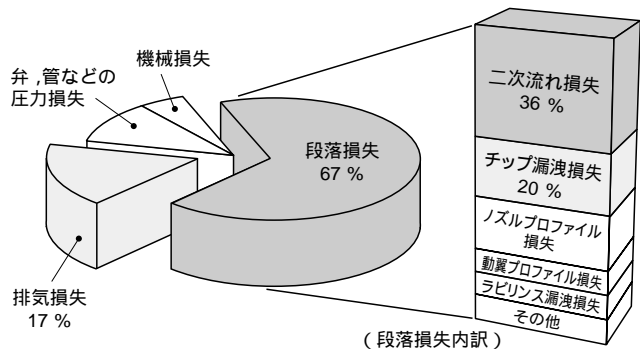


図4. タービン内部損失の内訳 内部損失の中で大きな割合を占める二次流れ損失、チップ漏洩損失及び排気損失の低減が効率向上のポイントである。

Classification of latent losses in steam turbine

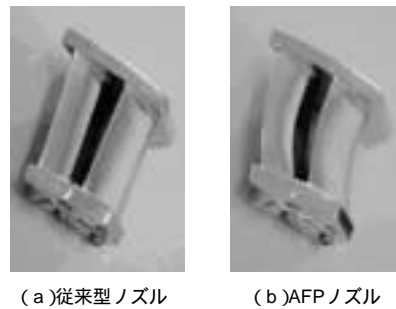
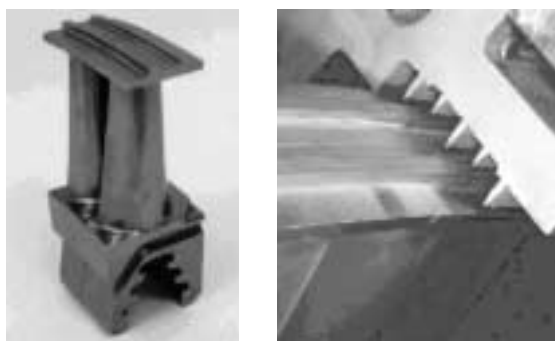


図5. 従来型ノズルとAFPノズル AFPは、粘性を考慮した三次元翼設計の適用によって、段落内蒸気流れの最適化を図っている。
Conventional nozzle and advanced flow pattern (AFP) nozzle

更に、今後の翼設計にかかわる性能向上技術としては、CFD(Computational Fluid Dynamics)を駆使し、各段落ごとに三次元翼形状の最適化(翼長、使用条件に応じたカスタマイズ)及び段落反動度の最適化を実施していく方向である⁽⁴⁾。

2.2.2 スナッパ翼 次に、動翼先端部における蒸気漏洩損失については、翼先端部を隣り合う翼どうしで接触・連結させることによって全周一群構造とした、スナッパ翼と呼ばれる翼形状を開発し、実機への適用を推進している。スナッパ翼を採用することで、翼先端部のシール形状をより複雑な構造(Hi・Lo型チップフィン)とすることが可能となり、蒸気漏洩による損失を低減させる(図6)。このスナッパ翼とHi・Lo型チップフィンを適用することで、段落効率は約1%向上する。



スナッパ翼

Hi・Lo型チップフィン

図6 .スナッパ翼及びHi・Lo型チップフィン 新型スナッパ翼の適用によって、より複雑なシール形状とすることが可能となる。
Snubber buckets and Hi・Lo type tip fin

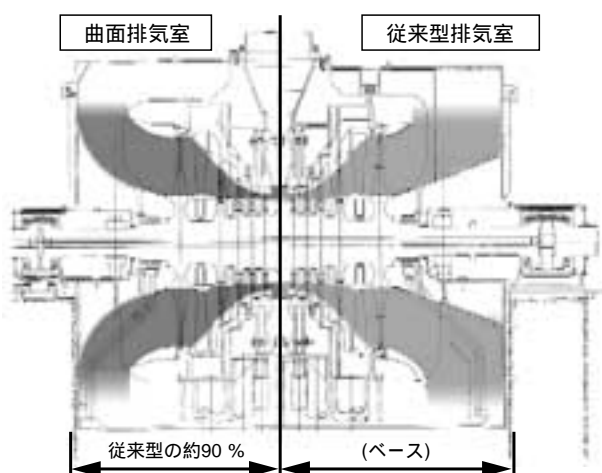


図7 .高性能曲面排気室 曲面排気室の適用によって排気損失を低減させ、かつ、低圧タービンの全長を約10%短縮することができる(700 MW機)。
Conceptual drawing of advanced exhaust hood

2.2.3 高性能曲面排気室 タービン最終段で発生する排気損失を低減させるには、より長い最終段翼を適用して排気流速を低減させる方法がもっとも効果的と言える。当社では、更に排気フードの形状を最適化することで圧力損失を低減させ、かつ、低圧タービン全体をコンパクト化することが可能な高性能曲面排気室を開発し、実機に適用している(図7)。

3 大容量化技術

蒸気タービンの大容量化を実現するためには、大流量を流せる蒸気通路部が必要となる。特に、低圧最終段動翼の長翼化は大容量化を実現させるとともに、蒸気タービン全体のコンパクト化にも寄与する重要な技術と言える。

例えば、3,600 rpm機では、33.5インチ翼の開発によって700 MW タンデム機が実現した。更に、比重が鉄の約0.6倍と軽量で、比強度は同等であるチタンを適用した40インチチタン翼が実用化されたことで、中部電力(株)碧南火力発電所4、5号機のような1,000 MW タンデム機的设计/製造が可能となった(図8)。

このほか、従来の33.5インチ×4流排気500 MW タンデム機に45インチチタン翼を搭載すれば、低圧タービンを2流排気×1ケーシングとすることが可能となり、大幅なコンパクト化を図ることができる。

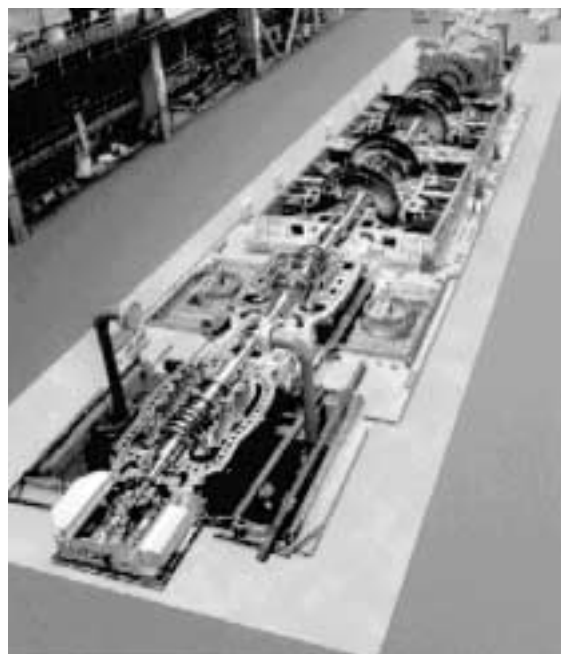


図8 .中部電力(株)碧南火力発電所4号機の据付状況 世界初の3,600 rpm - 1,000 MW タンデムコンパウンド型蒸気タービンである。
View of installation of Hekinan Thermal Power Station No. 4 Unit of Chubu Electric Power Co., Inc.

一方,3,000 rpm機の例を挙げると,従来,600 MW機は2軸構成の33.5インチ×4流排気タービンが主流であったが,94年には42インチ翼を搭載したタンデム機が実用化された。更に,48インチ翼を採用すれば3,600 rpm 500 MW機の場合と同様に,低圧タービンを1ケーシングに置き替えることが可能である。

このように,蒸気タービンのコンパクト化が実現されると,タービン建屋の縮小化などによる設備コストそのものが低減できるという効果に加えて,部品点数の削減によるメンテナンス性の向上も可能となる。

4 合理化技術

当社は,発電コストを低減させるうえで,プラント設備の合理化もまた有効な手段であると考えており,新技術の開発,設計手法の改善,システムの簡素化のほか,規制緩和や調達先の拡大などによる設備合理化を推進している。

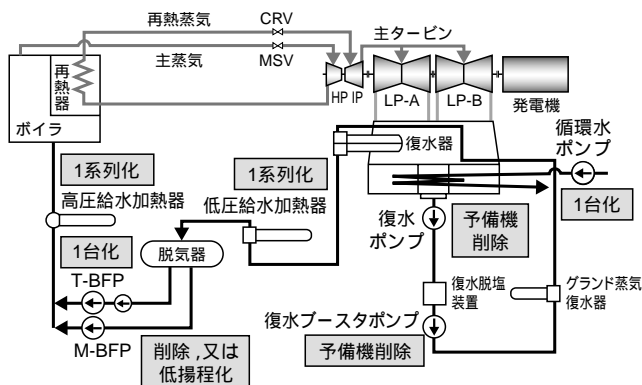
4.1 新型高性能管配列復水器

当社では,従来の釣鐘形と呼ばれる復水器の管束を2分割し,熱交換効率を向上させた新型管配列復水器を開発した。この新型管配列を採用することで,従来設計と比較して約15%の冷却面積削減が可能となり,従来と同等以上の性能を維持しつつ,機器のコンパクト化を実現している。

4.2 三次元CADシステムを用いたプラント設計

プラントの全体配置/配管計画を行う際,従来は二次元図面上での検討や,あるいは多くの時間と費用を掛けて縮小プラスチックモデルを用いた検討を実施してきたが,昨今の計算機技術の向上によって,三次元CADを用いたプラントモデルの構築が可能となった。

建屋の柱や梁(はり),階段などの構造物や,機器外形,配



CRV : 組合せ再熱弁
MSV : 主蒸気止め弁
T-BFP : タービン駆動給水ポンプ
M-BFP : 電動機駆動給水ポンプ
HP : 高圧
IP : 中圧
LP : 低圧

図9. システムの合理化 予備機削除, 系統の集約化などによるプラントシステムの合理化を図っている。
Rationalization of steam turbine system

管/ケーブルトレイなどのデータをCADシステムに取り込み,ユーザーを交えた事前検討を十分に行うことで,作業性を考慮し,かつ最適な機器配置や配管/ケーブルルートの立案が可能である。

4.3 システムの合理化

復水/給水ポンプや給水加熱器などのプラント補機で,これまでの実績から高い信頼性が確認されている場合は,予備設備を削減することが可能である。更に,プラントの運用方法を考慮することで,従来50%容量×2台設置とされていたポンプ類を100%×1台設置としたり,給水加熱器を1系列化するなどの合理的な設計を図ることができる(図9)。

プラントシステムの合理化によって,機器台数の削減や建屋縮小に伴う初期建設コストを低減させるばかりでなく,プラントの運用・保守性を向上させることも可能である。

5 あとがき

ここでは,発電コストの低減や環境問題への対応といった火力発電事業に課せられたテーマに対して,現在当社が取り組んでいる蒸気タービンプラントの高性能化技術と大容量化技術,及び合理化技術について述べた。

当社は,今後もユーザー各位のニーズにこたえるため,ここで紹介した技術を基盤にした技術研究開発を継続して推進し,時代に適合した,より高効率で環境に優しい発電プラントを実現し提供していく所存である。

文献

- (1) 大地昭生. 次世代型超々臨界圧タービンシステムの実用化研究(第1報,タービンシステムの最適化と経済性評価). 日本機械学会論文集. 66, 650, 2000-10, p.228 - 235.
- (2) 新井康夫, ほか. 超々臨界圧発電プラント(Phase-2)の開発. 火力原子力発電, 52, 1, 2001, p.32 - 45.
- (3) Tanuma T., et al. The Development of Three-Dimensional Aerodynamic Design Blades for Turbines. JSME Int. J. Series B, 41, 4, 1998, p.1042 - 1049.
- (4) 田沼唯士, ほか. 蒸気タービン設計におけるCFDの適用. ターボ機械学会誌, 28, 11, 2000, p.43 - 48.



大森 達郎 OMORI Tatsuro
電力システム社 火力事業部 火力プラント技術部長。
火力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。日本機械学会, 日本ガスタービン学会会員。
Thermal Power Systems & Services Div.



清國 寿久 KIYOKUNI Toshihisa
電力システム社 火力事業部 火力プラント技術部。
火力発電プラントの機械系エンジニアリング業務に従事。
Thermal Power Systems & Services Div.