

## 海外向け火力発電事業の動向と コンバインドサイクル発電用蒸気タービンの展開

Trends in Overseas Thermal Power Generation Business and Deployment of Steam Turbine for Combined-Cycle Power Plants

川原 孝之

黒木 慶一

佐々木 隆

■ KAWAHARA Takayuki

■ KUROKI Yoshikazu

■ SASAKI Takashi

東芝は、1990年代後半の米国におけるコンバインドサイクル（以下、CCと略記）発電所建設ブームの波をとらえ、その主要構成機器の一つである蒸気タービン（以下、STと略記）の受注台数を大きく伸ばし、2003年には米国における容量別ST受注シェアは30%以上を達成した。大幅な受注増加につながった理由の一つに、顧客のニーズである“高性能”、“低コスト”、“短納期”を商品コンセプトとするST標準機種を製・販・技一体で開発し、タイムリーに市場に投入できたことが挙げられる。

Toshiba was well positioned to participate in the boom in the United States market that began in the late 1990s. As a result of a collaborative effort by its sales, engineering, and marketing sections, Toshiba was able to offer a number of standardized steam turbine generator (STG) designs for combined-cycle (CC) application. This allowed us to offer more aggressive pricing, performance, and delivery terms to customers. The competitive advantage resulting from the standardized design effort enabled Toshiba to capture a market share of more than 30% (No. 1) in 2003 in the United States.

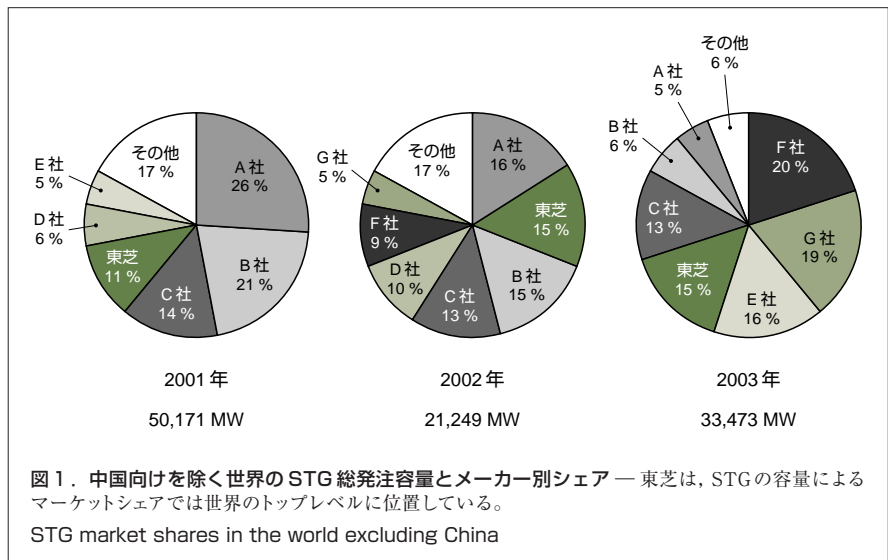
### 多様化する火力発電事業と 東芝の対応

世界的に火力発電事業を取り巻く環境は複雑で激しい変化が生じている。1990年代後半から顕著となった米国での独立発電事業者による天然ガス焚（だき）CC発電プラント建設ブーム、その後のエンロンショックと同時多発テロに端を発する市場の急速な減少、そして、最近では中国での急激な需要増に伴い、発電機器の発注がバブル的に増えており、鋼材の世界規模での高騰をもたらしている。また、京都議定書の各国での批准により、地球規模での環境問題に対する関心が高まり、発電プラントの高効率化、省エネ化への動きも顕著となっている。

このようななかで、東芝は蒸気タービン・発電機（以下、STGと略記）の世界トップレベルのメーカーとしてユーザー各位に様々な形態でサービスを提供している（図1）。

#### 火力発電所建設のEPC

火力発電所の建設を一括で請け負



うターキー契約形態はEPC (Engineering, Procurement and Construction)と呼ばれる。EPCにおける客先にとってのメリットは、細かいことに煩わされずに、発電所の据付け、試運転・調整までを契約者が面倒をみてくれることにある。当社はアジア、中南米、中近東を中心に世界各地で、CC発電プラント、あるいは従来型ボイラ・タービンによるコンベンショナル発電プラント

をEPCとして受注し、火力発電所の建設を進めている。

#### STGの単機販売

前述のEPCを進めるかたわら、全世界の電力会社、独立発電事業者、エンジニアリング会社などにSTGを単独で販売することにも力を入れている。STG単機販売の主な市場は北米、欧州、中国である。特に米国では、ここで紹介

するCC発電プラント向けSTGの受注台数を大幅に伸ばすことに成功した。また、最近では石炭焚き火力発電所の建設計画も増えており、電力会社や独立発電事業者などへの大容量STGの売込みにも力を入れている。

### ■ 火力発電所のサービス事業

当社のサービス事業は、従来からの既納入品のメンテナンスビジネスから、他社製機器の補修を含む、発電プラント全体のリハビリテーションビジネスに事業を拡大しつつある。最近では、ブルガリアのマリツァイーストII発電所向けに150 MW及び210 MWの発電設備の改造工事を計6ユニット受注している。今後も市場のニーズを敏感にとらえ、顧客満足度を高めたサービス事業を展開していく。

### ■ 国際協業の推進

ユーザーニーズの多様化、並びにコストダウンの要求に応えるためには、国際協業が大きな効果を発揮する。

当社は、GE社との1,500℃級ガスタービンをを用いたH System<sup>TM</sup> (注1) (Hシステム)における協業並びに蒸気タービン翼などの製造協業、また中国メーカーとのタービン、発電機、熱交換器の製造協業などを積極的に進めている。

以上のように、多様化する最近の火力発電事業の動向を踏まえ、ここでは米国でのCC発電プラント建設ブームにおいて競合他社に勝ち抜き、受注台数を拡大し、数多くの実績を生み出してきたCC発電用STG(図2)の特長を紹介するとともに、その後の欧州市場への販路拡大や今後の技術開発を含めたビジネス展開について述べる。

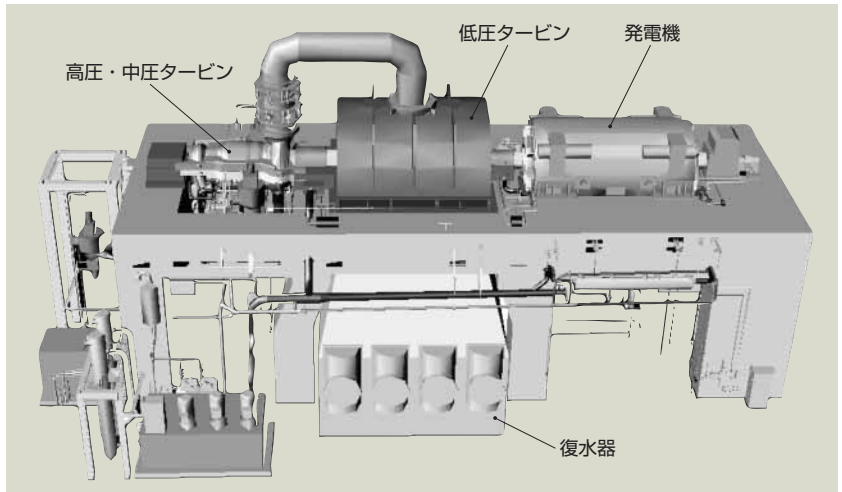


図2. CC発電用STG(多軸型用)の例—典型的な250 MWクラスCC発電用STGの3D-CADイメージを示す。  
STG for CC power plant (multishaft type)

### ビジネスコンセプトの概要

#### ■ CC発電プラントの概要

CC発電プラントは、ガスタービン(以下、GTと略記)、排熱回収ボイラ(以下、HRSGと略記)、ST、発電機の主要機器から構成される。GTで発電機を回転させるとともに、その排熱エネルギーを使ってHRSGで蒸気を発生させ、STでも発電のための動力を発生させるため、非常に効率の高い発電プラントを実現することができる(図3)。

CC発電プラントにはGT、ST、発電機が同一軸上に構成される一軸型と、GTとSTが別の軸上で構成される多軸型とがある(図4)。

一軸型CCは、一般に複数軸により発電プラントが構成される。このことにより各軸が独立に運用できるため、軸単位で停止し、ほかの軸を定格負荷運転することでプラント全体の部分負荷効率を高く保つことができる。

多軸型CCは一般には、複数のガスタービン・発電機(以下、GTGと略記)

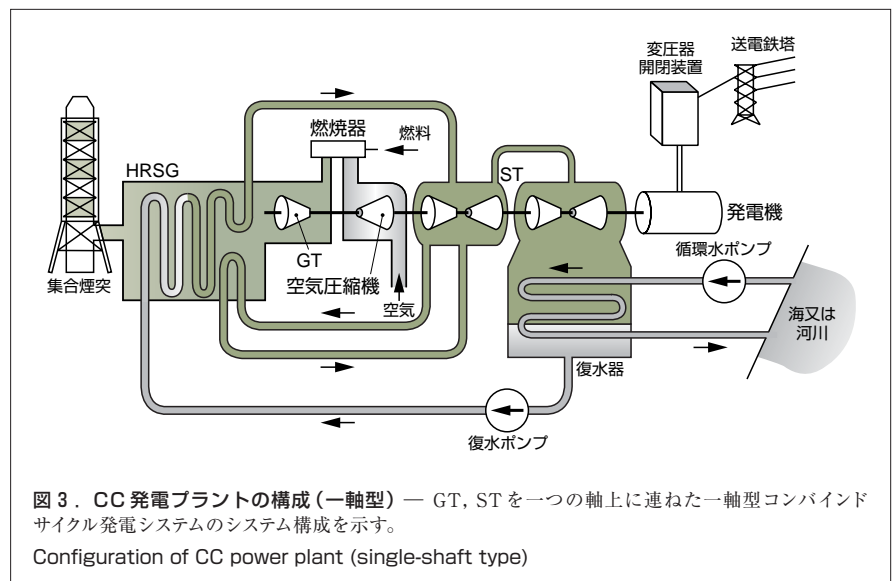
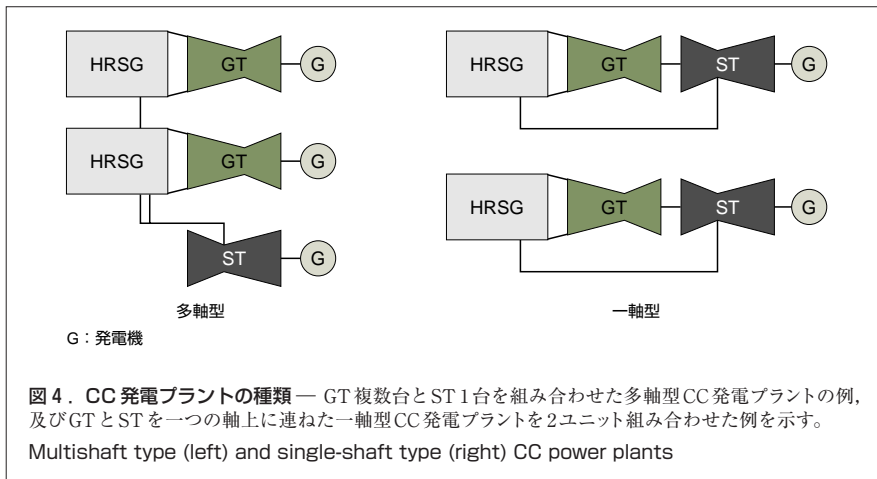


図3. CC発電プラントの構成(一軸型)—GT、STを一つの軸上に連ねた一軸型コンバインドサイクル発電システムのシステム構成を示す。  
Configuration of CC power plant (single-shaft type)

(注1) H Systemは、米国GE社の商標。



と1台のSTGで構成される。

この場合、STの容量を大きくすることができるため、プラントの定格運転時の効率は高くなる。また、GTGだけを早期に設置して電気を供給し、後工事でHRSGとSTGを設置してCC発電プラントとして運用することも可能である。

また、多軸型CCの場合、GTG、HRSG、STGをそれぞれ別々のメーカーから選定することもできるため、より低コストで、より性能の高い機器を組み合わせるにより、性能面、価格面で非常に競争力のあるCC発電プラントを実現することができる。実際に欧米、特に米国では、顧客がGTG、HRSG、STGを別々のメーカーに発注する例も多い。

### ■ CC発電用STの特長

海外でのCC発電用STに対する顧客のニーズは“短納期”，“低コスト”，“高性能”に集約される。

CC発電プラントの建設においては、工事開始から営業運転開始まで、24～27か月の短納期を要求されることが一般的である。したがって、主要構成機器であるGTG、HRSG、STGの納期も最短であることが望まれる。

一般にSTGは、顧客が指定する条件に基づいて設計と製造を進める、いわゆるオーダーメイド製品である。しかしながら、建設工期の短いCC発電用STGには通常の2/3程度の納期を求め

られ、これまでのオーダーメイド方式では、顧客の要求納期を満足することは不可能であった。

一方で、CC発電プラントではGTの機種(メーカー)と台数構成が決まると、HRSGで発生する蒸気流量もほぼ一定となるため、STの構造がほぼ決定される。当社は、CC発電プラントにおけるGTの機種や台数、蒸気条件、流量の分析を行い、案件ごとに変更する部品と固定する部品を分類し、STの標準化を進めた。その結果、納期面でクリティカルパスとなっていた、大物素材である高中圧外部ケーシングやロータの早期発注が可能となり、STG全体の納期短縮を図ることが可能となった。

なお、標準機種の開発により、エン

지니어リング・設計時間の短縮、製造プロセスの最適化がなされ、同時にSTGの低コスト化も実現することができた。

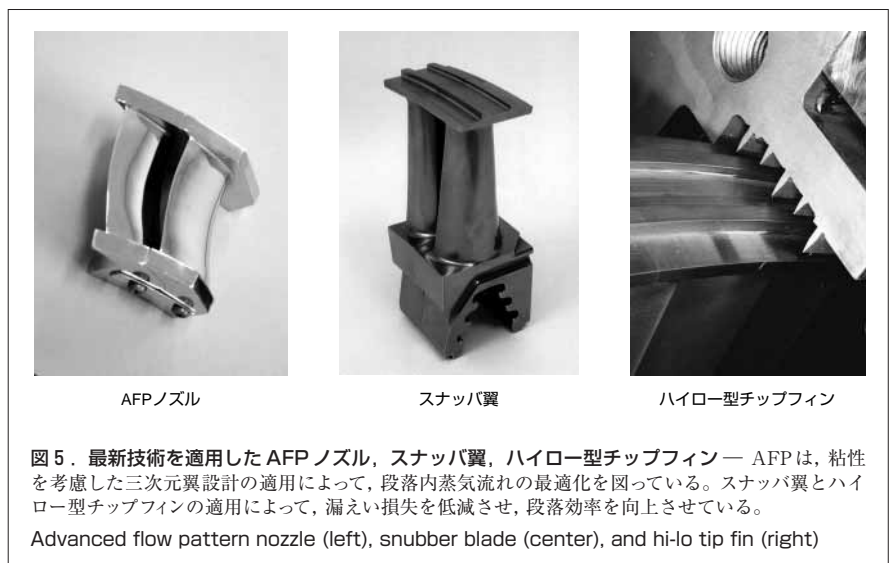
また、STの高性能化に対しては次のような改善を行っている(図5)。

- (1) 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・静翼形状の採用による内部効率の向上
- (2) 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の採用と、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て段落効率を向上
- (3) 低圧タービンへの改良型曲面排気室構造の採用による効率向上

### ■ ST標準機種ラインアップ

ST標準機種の開発に際しては、1,300℃級GT2台とST1台とを組み合わせた、多軸型CC発電プラント用を代表機種として、250MW級STの開発から着手した。

まず高中圧タービンについては、代表機種での蒸気条件と蒸気流量の変動幅を考慮して、それを包含するような構造とした。羽根とノズルについては案件



ごとの条件に応じて最適設計を行う。低圧タービンについては、最終段翼のシリーズごとにラインアップをそろえ、地域ごとの大気温度によりタービン排気圧力が変わってくるため、それに

低圧シリーズを選択することで、前述の高中圧部との組合せにより、最適なSTを構成できる(図6, 囲み記事参照)。なお、米国では2000年以降、旺盛な電力需要の増加に伴い、発電プラント

1ユニット当たりの容量が次第に増大していった。多軸型CC発電プラントにおける、GTG台数も3台、4台と増え、これに伴いST容量も増大していった。更には、HRSGに追い焚き機能を設け、ピーク時の最大出力を大幅に増大させたプラントも出現した。

当社は、これらの大容量CC発電プラント用のSTについても逐次、高中圧タービンの標準化を進め、出力の増加に対して、そのラインアップを充実させてきた(図7)。最大モデルとしては、米国フロリダ州のCC発電プラント向けに500 MW級STGを3台受注しており、現在、据付け途中にある。

また、CC用発電プラントの別のバリエーションとして、隣接する工場にプロセス蒸気を供給するコージェネレーションCCプラントがある。従来、産業用発電プラントと呼ばれていた種類であるが、CC発電プラントでも、HRSGで発生した蒸気をそのままプロセス側へ供給したり、あるいはSTの中間段落から蒸気を供給するプラントを構成可能である。当社は、コージェネレーションCC用STについても前述の標準化コンセプトを発展させ、抽気タービン用の標準機を構築し、米国のカルパイン社向けにこの種のSTGを計6台納入するなど、数多くの実績を重ねている。

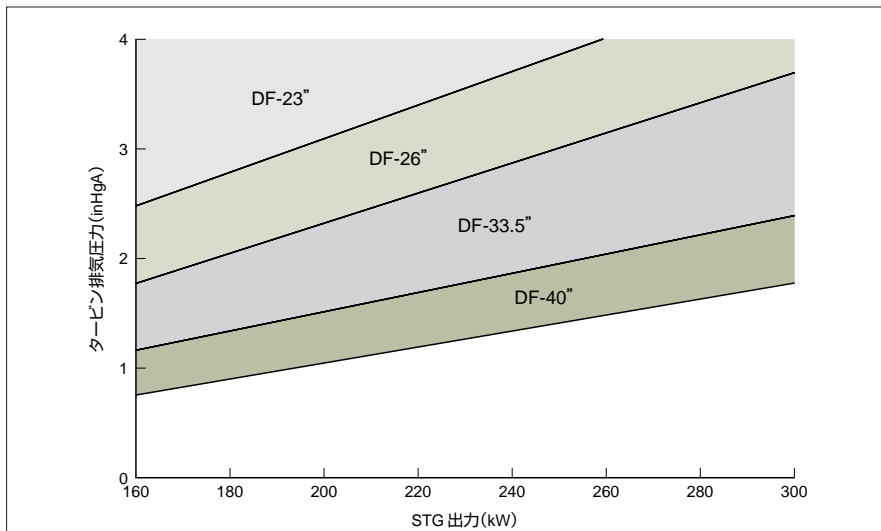


図6. STG出力とタービン排気圧力による最終段翼の選定 — STGの出力が大きくなるほど、タービン排気蒸気流量が増加する。また、大気温度が下がれば冷却水温度が低くなり、同一排気蒸気流量下での体積流量は増大する。このため、より長い最終段翼を必要とする。地域ごとの大気温度条件とSTG容量によって最適な低圧タービンの型式が選定される。

Selection of last-stage blade according to turbine output vs. turbine exhaust pressure

## 蒸気タービンの型式

蒸気タービンの型式はTCDF-48"などと表記する。

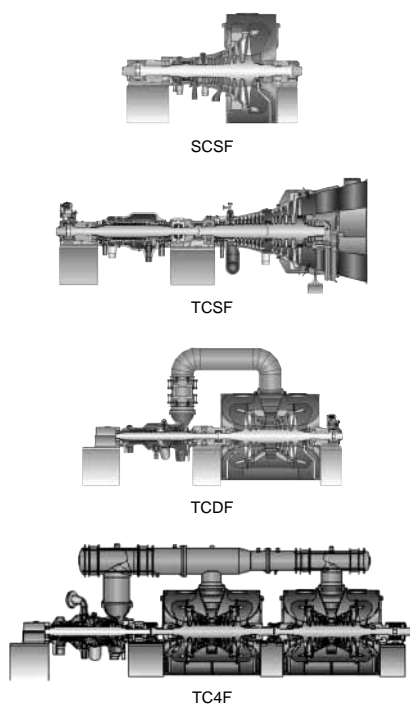
TCは、Tandem Compound(タンデムコンパウンド)の略であり、例えばタービンの高圧部分と低圧部分などが二つ以上、直列に並べられた型式を示す。

これに対し、SCはSingle Casingを意味し、一つのケーシングで構成されるタービンを示す。

また、SF(Single Flow), DF(Double Flow), 4F(Four Flow)は低圧タービンの排気流量を示し、それぞれ単流, 2流, 4流を示す。

最後の数字は最終段翼長をインチ単位で示したものである。

したがって、TCDF-48"はタンデムコンパウンドダブルフロー排気, 48インチ最終段翼のタービンを意味する。



## CC発電用STの実績

### 米国における実績

米国では電力自由化の波を受け、1990年代後半からガス焼きCC発電プラントの建設が急増した。当社は、米国におけるブームが始まる前から米国販売拠点を強化し、顧客に近い最前線での営業活動や技術情報収集活動を進めてきた。最前線からの市場動向と技術動向がタイムリーに販売・技術・製造部門にフィードバックされたことが、CC発電用STの標準機種開発に大きく貢献した。また、標準機第1号として、1999年に、米国のミッドアメリカンエナ

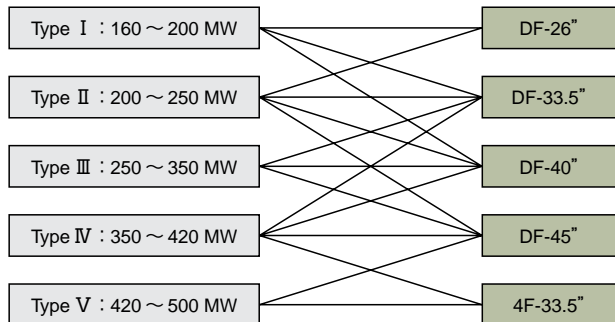
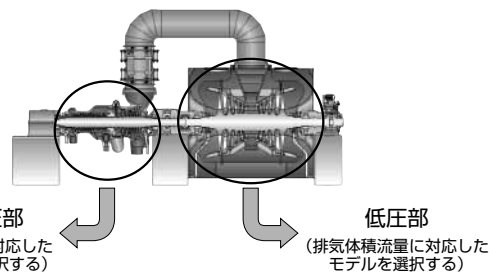


図7. 蒸気タービン標準機のラインアップ(高中圧部と低圧部の組合せ) — タービン高中圧部はSTG容量ごとにモデルを持っている。タービン低圧部は最終段翼長及び排気流量ごとにモデルを持っている。これらを組み合わせることにより、幅広く異なる条件に対してタービンの標準機種を提案することができる。

Lineup of standardized steam turbines (combinations of high/intermediate-pressure and low-pressure parts)

ジー社のコルドバ発電所向けに200 MW級 STGを受注した。

それ以降、カルパイン社、フロリダパワー&ライト社をはじめ、米国内外の電力会社や独立発電事業者から数多くの受注を果たし、現在までに合計30台以上の標準STGを納入し、良好な運転実績を維持している。

### ■ 欧州向け CC 用 ST の特長と実績

欧州地区は電源周波数が50 Hzであるため、STGなどの回転体は3,000 rpm仕様となる。このため北米を中心とする60 Hz向け機器とは容量と機種が異なってくる。

しかしながら、GTの機種によりプラント容量とシステム構成をシリーズ化できるコンセプトは米国向けと同じである。当社は、50 Hz地区CC発電プラント用STについても標準機種の開発を進め、2002年に、イタリアの電力会社であるエジソン社からCC用STG3台を受注した。タービンの機種はそれぞれ、140 MW級 TCSF-36”、290 MW級

TCDF-36”及び290 MW級 TCDF-48”であり、現在据付け途中にある。

140 MW級 STGはGTG1台と組み合わせて構成される多軸型CC用であり、シングルフローの軸流排気型である。復水器をSTGの横位置に配置することができるため、タービン基礎台高さと建屋高さを低くすることができ、

プラント建設コストの低減を実現している(図8)。

290 MW級 TCDF-48”は、GTG2台と組み合わせて構成される多軸型CC用STGであり、低圧最終段に新開発の48”翼を採用している。この48”翼は当社とGE社が共同で開発を行ったものである(図9)。

## CC 発電用 ST の今後の展望

### ■ 高性能化技術

当社では、これまで衝動タービンの技術を基本とした高性能機種を市場に投入してきた。しかしながら、高性能化への限りない市場の要求に応えるべく、更なる高性能技術の開発に継続的に取り組んでいる。

性能向上に関しては、大別して次の三つの視点がある。

- (1) タービンタイプ(ケーシング数、最終段翼、最適反動翼)の選定
- (2) ノズルと羽根の高性能化
- (3) ノズルと羽根以外の高性能化

まず、タービンタイプについては、反動、又は衝動といった従来のタイプにとらわれることなく、タービンの用途やサイズに応じて個々に最適の反動度分布とする“最適反動度設計”を志向しており、近々その初号機を市場に投入す

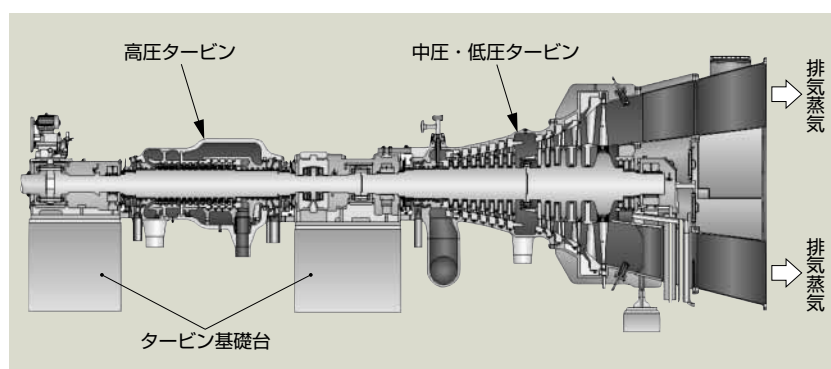


図8. 140 MW級 TCSF 軸流排気タービン — 従来のタービンでは排気蒸気は下方に排気されるため、復水器はタービン下部に配置する必要があり、タービン設置面も高くなる(図2)。軸流排気型タービンでは排気蒸気が軸方向へ導かれるため、復水器をタービン横に配置でき、タービン設置面と建屋全体の高さを低くすることができる。

140 MW-class tandem-compound single-flow (TCSF) axial exhaust flow steam turbine

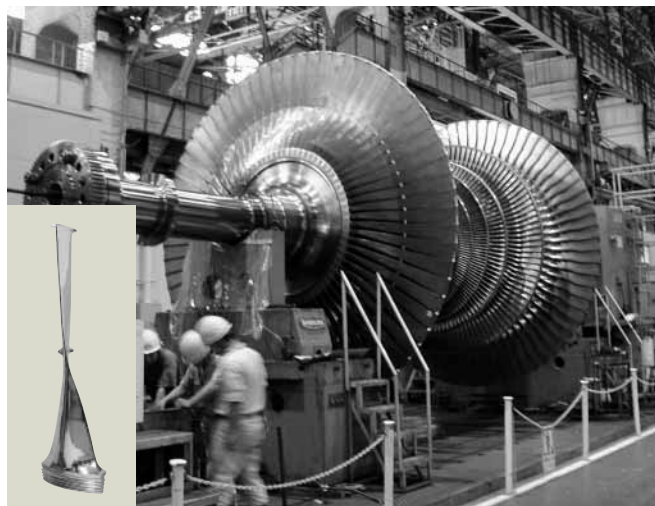


図9. 48” 最終段翼及び低圧ローター GE社と共同開発した世界最大級のスチール製48” 最終段翼(左), 及びこの48”翼を組み込んだ低圧ローター(右)を示す。  
48-inch last-stage blade and low-pressure rotor

率CCに見合う高い性能を備えるとともに、システム上GTとの統合が図られており、適切な冷却蒸気を供給するために、特に高圧部における精度の高い性能レベルが要求される。

### ニーズに応えるCC発電用STを目指して

ここでは、CC発電用STの特長について、北米や欧州向けの実績を交えて紹介した。当社は、今後も顧客の多様なニーズにタイムリーに応えるため、ここで紹介した施策を基盤にした技術開発や営業活動を継続して推進し、より高効率で信頼性の高いCC発電用STを世界に送り出していく。

る予定である。

また、羽根とノズルに関しては、最新のCFD (Computer Fluid Dynamics) 技術を駆使して開発した三次元設計翼の採用などにより、継続的に高性能化を進めている。

更に、タービン通路部以外についても、圧力損失を極限まで低減させた排気室と制御弁の開発や、軸振動の観点からの高信頼性技術の開発などで、高性能と高信頼性の同時達成を図っている。

### ■ 運用性とフレキシビリティ

最近では、高性能、低コスト、短納期に加えて、起動時間の短縮を含む“運用性”の要求もクローズアップされ始めている。天然ガス高騰の影響もあり、顧客にとっては、系統側の出力変化要求に迅速に応え、いかに早く売電できるかが重要となってきている。

当社は、高性能と低コストを維持したうえで、より急速起動可能なSTの開発にも注力している。

### ■ H System 向け蒸気タービン

当社は、米国GE社と、1,500℃級H型GTを中核としたHシステムと呼ばれる1,500℃級CC用パワートレイン機器(GT, ST, 発電機)に関する製造協業契約を締結しており、同システム用のST及び発電機は当社が設計と製造を担当している。

H型CCの特長は、高いCC効率を達成するために、従来よりGT燃焼温度を高くし、それに対応してGTの高温タービン部を、冷却特性の優れた蒸気で冷却することである。その冷却蒸気は高圧ST出口から供給され、GTを冷却した後にHRSGの再熱器で再び加温され、中圧STに回収される。このためHシステム用の蒸気タービンは、高効



川原 孝之  
KAWAHARA Takayuki

電力・社会システム社 火力・水力事業部 火力建設技術部グループ長。火力プラントの基本計画業務に従事。

Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



黒木 慶一  
KUROKI Yoshikazu

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。火力プラントの基本計画業務に従事。

Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



佐々木 隆  
SASAKI Takashi

電力・社会システム社 京浜事業所 原動機部グループ長。蒸気タービンの設計業務に従事。

ASME, 日本機械学会, 日本ガスタービン学会会員。  
Keihin Product Operations