

蒸気タービン試験設備の完成

Completion of Steam Turbine Development Facility

佐々木 隆 奥野 研一 新関 良樹

■ SASAKI Takashi ■ OKUNO Kenichi ■ NIIZEKI Yoshiki

発電用蒸気タービンでは、高い性能と信頼性を両立させることが求められている。蒸気タービンの開発は、長年の実績に基づくノウハウをベースに各種の解析や要素試験を駆使して進められており、開発された技術はモデル試験などによる検証を経て実用化されるが、重要技術の最終検証は実際のプラント機へ適用して行っている。しかし、実プラント機への新技術適用、評価、及びフィードバックには非常に長い時間を必要とするため、このステップを短縮して開発のいっそうのスピードアップを図り、最新の技術をタイムリーに提供できるようにすることが重要である。

東芝はこのような背景から、実プラント機相当の試験が可能な蒸気タービン試験設備の建設を計画し、このたびその設備が完成して運用を開始した。

There is an ongoing need for both higher performance and higher reliability in the field of steam turbines for power generation. It is therefore essential to further speed up development so that the latest technologies can be applied as soon as possible.

The development of steam turbine technologies has been carried out utilizing a variety of computational analyses and tests. However, final verification of key technologies is performed by application to an actual machine, requiring a long time for the verification and feedback processes. Shortening the duration of this step is thus important in order to accelerate steam turbine development.

In response to this situation, Toshiba has constructed a test facility as well as an actual-size steam turbine, and commenced their operation.

1 まえがき

発電用蒸気タービンは、大容量のエネルギー変換機器として重要な位置を占めており、要求された発電量をより安価なライフサイクルコスト^{(1),(2)}で安定して提供することが求められている。このため、より高い性能（エネルギー変換効率）と信頼性を持つ蒸気タービンを開発する努力が続けられている。

蒸気タービンの開発にあたっては、各種のモデル試験が活用されており、これに加えて高精度・大規模化が著しいCFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）を活用することによって、現象の解明や性能の予測精度を大幅に向上することが可能となり、性能向上に大きく寄与している⁽³⁾。モデル試験は、相似則^(注1)に基づいて計画されているものの、実際の機械との間には様々な相違がある。したがって、最終目標である実プラント機の性能向上を実現するためには、実プラント機における現象や性能を高精度に把握して、モデル試験や解析などの手法に反映することが重要となる。

しかし、商業目的で建設された実際のプラントでは、このために必要な試験を実施することは、試験に要する時間やコスト

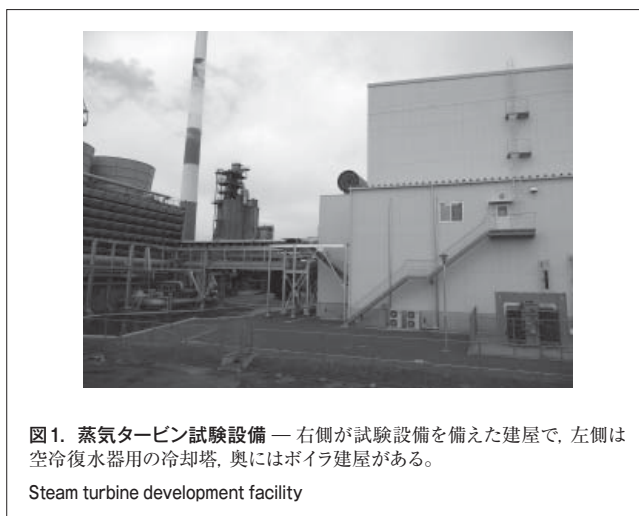


図1. 蒸気タービン試験設備 — 右側が試験設備を備えた建屋で、左側は空冷復水器用の冷却塔、奥にはボイラ建屋がある。
Steam turbine development facility

などの点から制約があり、蒸気タービンの開発を加速するために十分な質と量のあるデータをタイムリーに得ることは難しかった。

また、新技術を実際のプラントに適用する前には十分な信頼性の検証が必要となる。これには要素試験だけでなく、実プラントにおける実績があることが望ましいが、実際には適用プラントの選定や効果の判定に多大の時間を要する場合が多い。

東芝はこのような背景から、実プラントに相当する検証試験を実施できる蒸気タービン試験設備を計画し、建設を進めてき

(注1) 実際の機械と同じ挙動や現象を再現させるためのルールで、例えば、非圧縮性流体では慣性力と粘性力の比であるレイノルズ数という無次元数が一致する流速、サイズの組合せを選定することで、模型（モデル）試験によって実際の現象を再現できる。

た。今回、その設備が完成し運用を開始したので、その概要について述べる(図1)。

2 開発プロセスと蒸気タービン試験設備の位置づけ

典型的な石炭火力発電用の大型超臨界圧蒸気タービンの断面を図2に示す。高圧タービンにはボイラから高温かつ高圧の蒸気が供給される。高圧タービンで蒸気エネルギーは回転エネルギーに変換される。圧力及び温度がともに低下した蒸気は、ボイラに戻って加熱される。次いで蒸気は、中圧タービンから低圧タービンへと供給されて回転エネルギーに変換され、真空に近い条件まで膨張して低圧タービンを出る。

蒸気タービンの開発プロセスを図3に示す。上述のように、蒸気タービンでは入口側と出口側で蒸気状態が大きく異なる。特に入口側は高温高圧であり、翼長が短く二次流れ損失やリーク損失の影響が大きくなる。出口側は、真空に近く体積流量が大きくなるため、大きな遠心力が作用する長い翼が必要であり、また湿り蒸気となって液滴(水滴)が混在する条件となる。このようなことから、蒸気タービンの設計が難しいため、長年の実績に基づいたノウハウとともに、空気タービン試験や低圧モデルタービン試験、各種の風洞試験など様々なモデル試験と、FEM (Finite Element Method: 有限要素法)を用いた構造検討やCFDなどを繰り返して設計の精度を高めていく。

モデル試験は、現象の解明や設計の検証に用いられるだけでなく、CFD解析の精度確認のためにも重要である。モデル試験は相似則にのっとって計画されるため、かなり広い検証範囲で有効な結果が得られ、しかも形状や条件を変えた検討が比較的簡単にかつ低コストで可能である。

これらを駆使して開発した技術を実プラント機に適用するにあたっては、実プラント機あるいは実プラント機相当の試験による性能及び信頼性の最終的な検証や評価が不可欠である。

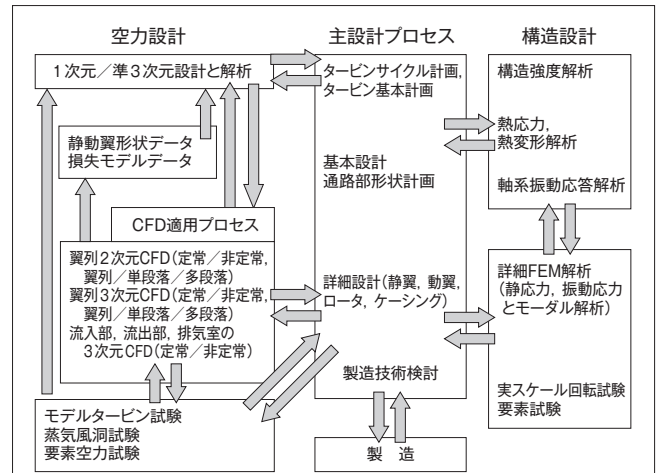


図3. 蒸気タービンの設計プロセス例²⁾ — 一般に、蒸気タービンの設計プロセスでは、CFDなど数値解析も最大限活用されているが、モデル試験や実機検証も重要な位置を占める。

Flow of steam turbine development processes

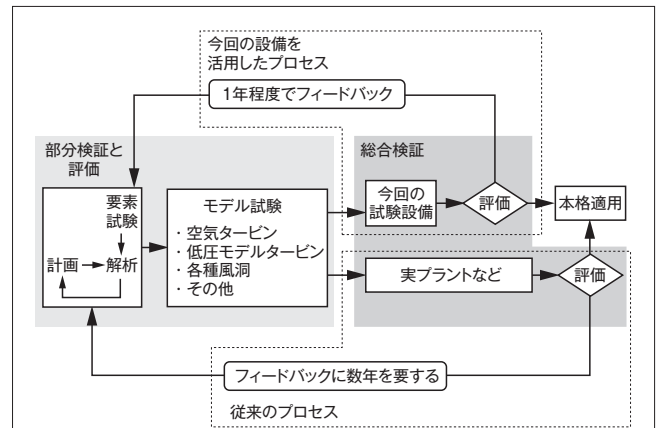


図4. 蒸気タービン試験設備を活用した開発シーケンス — もっとも長い時間を必要としていた実機検証のプロセスを大幅に短縮し、新技術の早期市場投入への貢献が期待される。

Sequence of steam turbine development

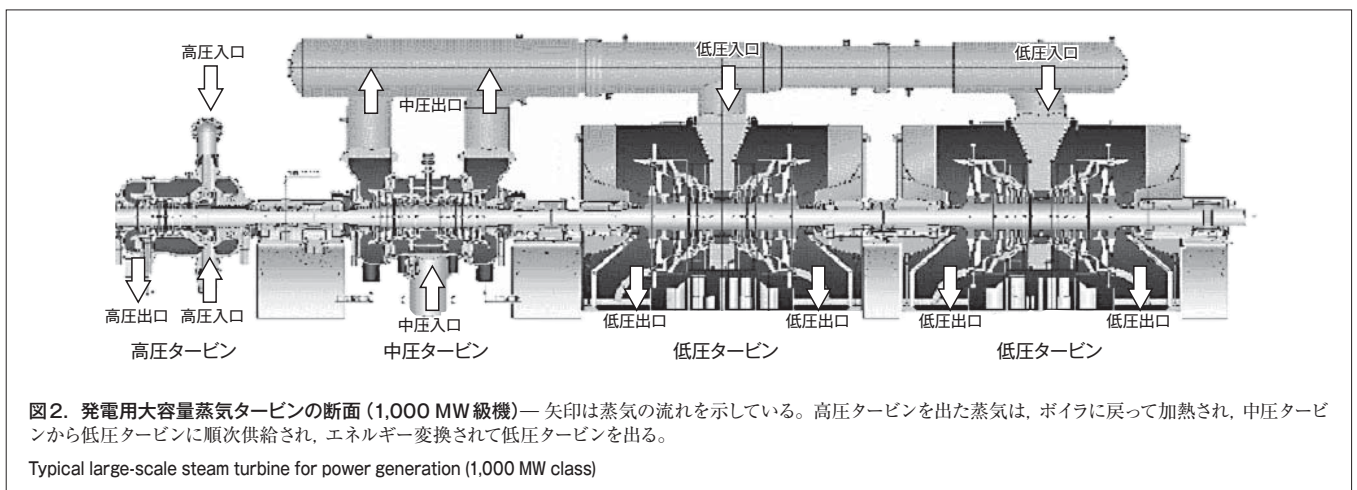


図2. 発電用大容量蒸気タービンの断面(1,000 MW級機) — 矢印は蒸気の流れを示している。高圧タービンを出た蒸気は、ボイラに戻って加熱され、中圧タービンから低圧タービンに順次供給され、エネルギー変換されて低圧タービンを出る。

Typical large-scale steam turbine for power generation (1,000 MW class)

しかし、適切な実プラントを選定し、計画及び準備から、プラントを完成し、更に性能試験などによる結果を得て設計に反映するまでには、数年に及ぶこともあるような非常に長い期間を要する。したがって、このルーチンを見直して全開発期間を圧縮することが、新技術を早期に市場投入するために有効である。

今回蒸気タービン試験設備を得たことで、新技術を対象とした実機相当の蒸気試験を1年程度の期間で実施することが可能になる。

この試験設備を活用した開発プロセスを図4に示す。

3 蒸気タービン試験設備の概要

3.1 基本構成

運用開始した試験設備の主な仕様を表1に、構成を図5に示す。

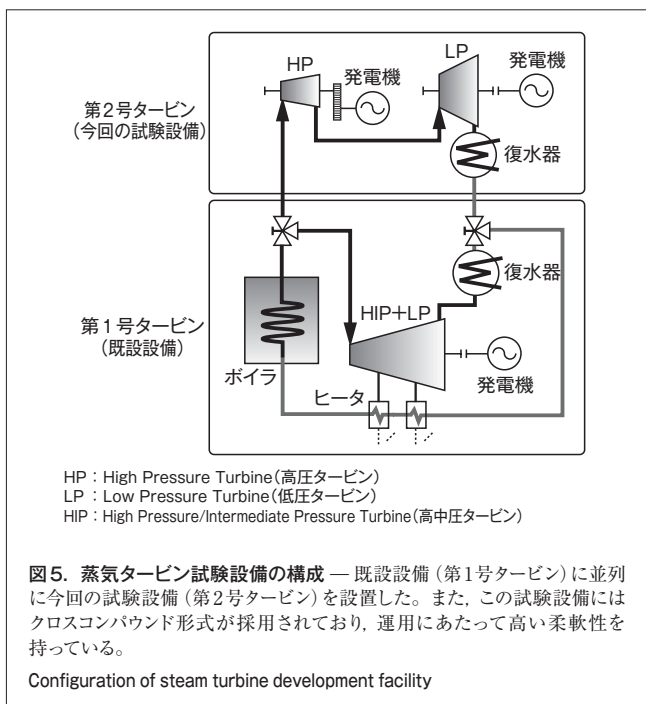
この試験設備（第2号タービン）は、既設の第1号タービン発電設備とボイラその他を共有する形で併設している。したがっ

表1. 蒸気タービン試験設備の主な仕様

Main specifications of steam turbine development facility

項目	仕様
出力	35 MW
タービン全段落数	22段
タービン形式	CCSF
制御方式	EHC

CCCF: Cross Compound Single Flow (クロスコンパウンド(並列形)単流)
EHC: Electro Hydraulic Controller (電気油圧式制御装置)

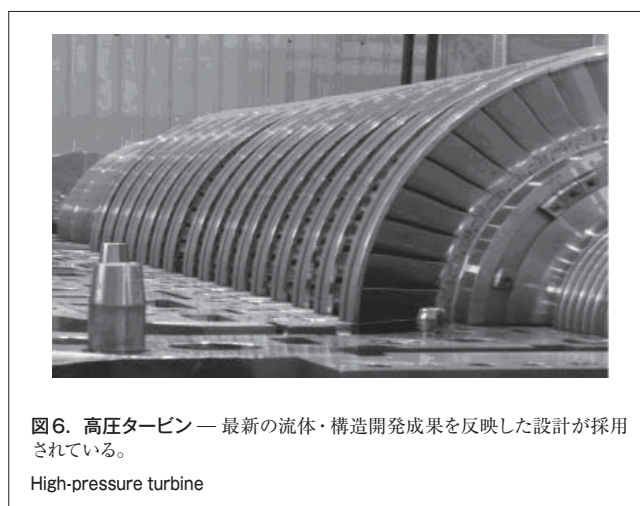


て、第1号タービンとこの試験設備を使い分けることで、発電所として必要な運用効率を維持しながら各種の試験を実施することが可能になっている。

この試験設備では、高圧タービンと低圧タービンを各々独立軸として発電機を持つクロスコンパウンド形式を採用している。また、発電機回転数にかかわらず最適な回転数となるように、高圧軸は減速ギアを配している。クロスコンパウンド形式を採用したことにより、高圧軸と低圧軸各々の運転条件設定の自由度をかなり大きくすることができるとともに、各軸の性能評価精度を高めることが可能になった。また、高圧と低圧の独自性が高いシステムとすることで、それぞれを独立にリプレースすることも比較的容易である。

3.2 蒸気タービン

高圧タービンを図6に示す。前述のように高圧タービンは独立した軸であり、最新の開発成果を反映した段落設計が採用されている。高圧タービンでは、翼列流体特性評価のほか、新構造の信頼性評価やロータダイナミクスに関する評価も併せて実施している。



低圧タービンロータを図7に示す。低圧タービンは、新たに開発された60 Hz用最終段シリーズを採用した設計となっている。この最終段シリーズでは、L0(最終段)に最新の流体・構造設計を反映するとともに、L1(最終段の一つ前の段落)の長翼化を図り、低圧段落全体として理想的な流路断面形状となるように設計している。低圧段落のCFDによる3次元解析結果を速度分布で図8に示す。低圧段落が入口から出口まで滑らかに広がる形状になっているため、良好な分布が得られていることがわかる。

この試験設備では、各種の計測器(プローブ)をタービン内に挿入し移動させることによって、蒸気の流れや内部の状態の詳細な分布を把握するトラバース計測をはじめ、様々な計測が計画されている。主な計測項目と評価項目を表2に示す。



図7. 低圧タービンローター — 新開発の60 Hz用最終段シリーズを採用して設計している。

Low-pressure turbine rotor

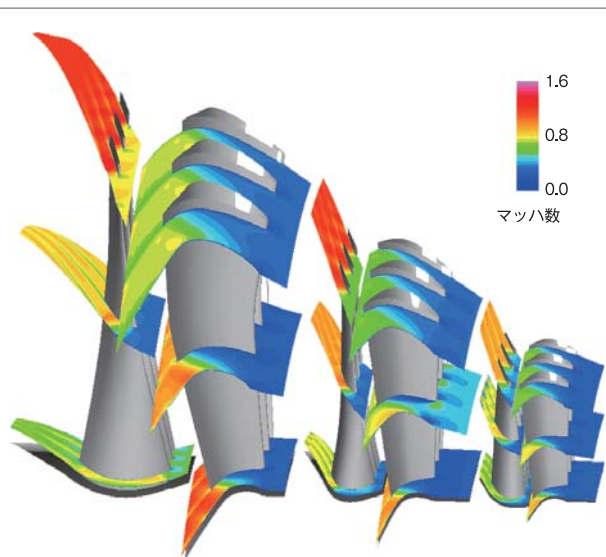


図8. 低圧段落の3次元解析結果(マッハ数分布) — 最新の設計を採用することにより、低圧タービン全体として良好な蒸気の流れが得られている。

Result of computational fluid dynamics (CFD) analysis of low-pressure turbine (Mach number distribution)

表2. 計測項目の概要

Summary of measurement items

主な計測項目	評価項目
圧力及び温度(壁面及び固定プローブ)	流量係数、シール特性など
トラバース計測(圧力及び温度、定常及び非定常)	フローパターン、効率など
液滴計測、液滴・液膜挙動可視化	湿りの影響評価
ケーシングメタル温度及び変位、軸伸び	非定常伸び差など
翼応力と振動特性	翼構造特性
軸振動、周波数応答	軸振動特性
スラストカ、ベアリング温度、及び給排油温度など	スラストカ、軸受特性

また、その一例として、ノズルダイヤフラムに設置された固定プローブと湿り計測用プローブを図9に示す。



(a) 固定プローブ



(b) 湿り計測用プローブ

図9. 低圧タービンの計測 — この設備では様々な計測が計画されている。ここではその一例として、ノズルダイヤフラムに設置された固定プローブと湿り計測用のプローブを示す。

Measurement equipment for low-pressure turbine

4 あとがき

実機に相当する検証試験が可能な蒸気タービン試験設備が完成し、運用を開始した。この試験設備はクロスコンパウンド形式を採用したことによって、試験設備として高い運用柔軟性を持っている。今後、この設備を有効活用して開発のスピードアップを図り、高い性能と信頼性を併せ持つ蒸気タービンの早期市場投入を進める。

この試験設備は石炭焚(だ)きの蒸気タービン発電プラントとして一通りの設備を備えており、蒸気タービン主機以外についても種々の試験や評価が計画されている。

文献

- 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.
- 田沼唯士, ほか. 特集「デザインと設計の新展開」蒸気タービン設計の戦略的展開. 日本機械学会誌. 108, 1034, 2005, p.27-28.
- 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.



佐々木 隆 SASAKI Takashi

電力システム社 京浜事業所 原動機部長。
蒸気タービン・ガスタービンの開発・設計・製造に従事。日本機械学会, ASME会員, 日本ガスタービン学会評議員。
Keihin Product Operations



奥野 研一 OKUNO Kenichi

電力システム社 京浜事業所 原動機部主幹。
蒸気タービンの開発・設計に従事。
Keihin Product Operations



新関 良樹 NIIZEKI Yoshiki, D. Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部グループ長, 工博。ターボ機械の開発に従事。日本機械学会, 可視化情報学会, ターボ機械協会会員。技術士(機械部門)。
Power and Industrial Systems Research and Development Center