

# 蒸気タービンの新技術および製造革新

New Technologies and Manufacturing Processes for Steam Turbines

浜野 博  
H. Hamano

最近特に要求が高まっている火力発電設備の合理化に対応した蒸気タービンの合理化に、当社は種々の新技術および製造方法を適用している。例えば、蒸気タービン発電プラントの大容量化には、蒸気タービンの効率、運転性、保守性を維持・向上させながら、低圧車室数の低減、高圧・中圧タービンの一体化、1,000MW機のタンDEM型化など、蒸気タービンのコンパクト化を図っている。また、蒸気タービンのノズル・動翼、主要蒸気弁などの構成部品にも、製造を考慮した生産設計を推進し、それに合わせた生産設備も更新している。さらに、蒸気タービン制御装置への新しい制御作動油の導入、潤滑装置への新たな方式の油清浄機の採用などがある。

Toshiba has been applying various new technologies and manufacturing processes to realize compact steam turbines and auxiliary equipment. While there is demand for increased power plant capacity, enlargement of the size of the machines has been avoided by decreasing the number of turbine casings and adopting long last-stage blades, designing 1,000 MW turbines of the tandem-compound type, and so on. At the same time, turbine efficiency, operational reliability, and maintainability have been maintained or improved.

Components such as nozzles, buckets, and major steam valves are designed in consideration of manufacturing processes, and manufacturing facilities for these components have been replaced with new facilities at our factory. Moreover, with regard to control equipment and lubrication systems, a new actuation control oil and new oil purifier units have been applied, respectively.

## 1 まえがき

蒸気タービンは、火力発電設備を構成する重要な機器の一つであり、最近要求が高まっている発電設備の合理化に対する影響も大きい。当社は、このような要求にこたえるよう従来から要素技術の開発、設計の確立を推進し、随時プラントに適用して合理化に取り組んできた。

合理化推進に際し、技術的検証を踏まえ、素材製造会社と共同の技術検討、設計的配慮・製造技術の改善や検査工程の適正化など、全般にわたって種々の活動に取り組んでいる。

ここでは、発電プラントの大容量化に対する蒸気タービンのコンパクト化への取組み、蒸気タービン部品の製造方法の革新など信頼性を維持・向上させながら、合理化を図った最近の新技術適用の一端を紹介する。

## 2 蒸気タービンのコンパクト化

蒸気タービン発電プラントの大容量化に対して、発電プラントの効率向上、蒸気タービン車室数の増大を抑えるために、従来から最終段動翼の長翼化を図ってきた。最近、最終段長翼化によって、積極的に低圧車室数の低減を図っている。また、近年の高温蒸気条件化した大容量機にも高圧・中圧タービンの一体化で、車室数低減を図っている。

このように、技術的検証に基づいて蒸気タービンをコンパクト化することで、蒸気タービンの軽量化、部品点数の低減が実現でき、保守・点検の合理化を図ることができる。さらに、タービン建屋、クレーンスパンなどが縮小できるので、建設コスト低減の可能性にも寄与できる。

以下に蒸気タービンコンパクト化の実例を紹介する。

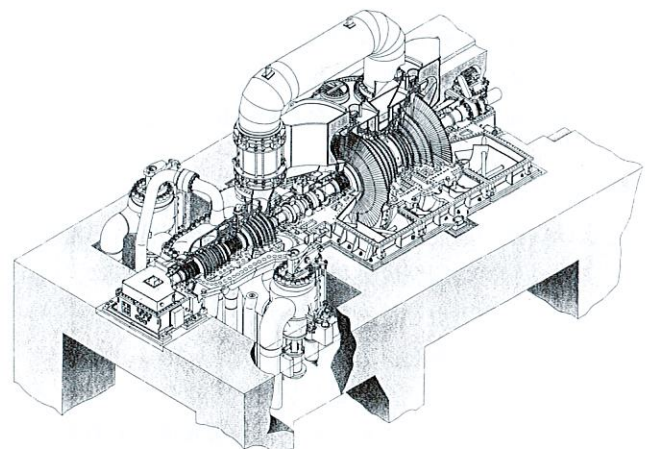


図1. 500 MW級2車室再熱蒸気タービン 500 MW級再熱蒸気タービンに42インチ最終段長翼などを適用して、2車室蒸気タービンを実現できる。

500 MW-class reheat steam turbine with two casings and 42-inch long last-stage blades

## 2.1 大容量 2車室蒸気タービン

従来の 300～600 MW 級の蒸気タービンは、1 車室の高中圧部と 2 車室の低圧部で組み合わせられた 3 車室構成が一般的であったが、設計排気圧力が高い最新 500 MW 機では、42 インチ最終段動翼を採用し、従来機と同等の効率を維持しつつ低圧タービンを 1 車室とした 2 車室構成の蒸気タービンを実現した (図 1)。

これと同様に、国内 50 Hz 用 600 MW 級機にも、最終段長翼化によって効率向上も図って蒸気タービンの 2 車室化を実現できる。この場合、最終段に 60 Hz 用 700 MW 機に多数使用実績のある 40 インチチタン動翼と回転数で相似の 50 Hz 用 48 インチチタン動翼を採用する。これによって、蒸気タービンホイール数が約 40 % 低減し、蒸気タービン全長を 8 m 短縮できる。

その他、300 MW 級蒸気タービン高中圧部段落に、最近開発した図 2 に示すような高負荷域で損失の小さい高性能高負荷翼を適用し、性能を向上させながら段落数を低減してロータ全長の短縮を図っている。

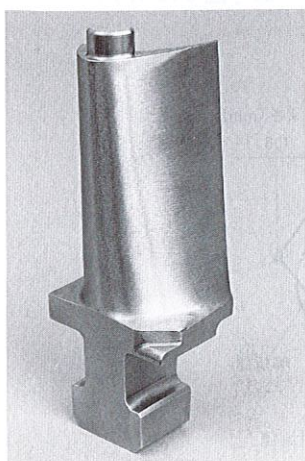


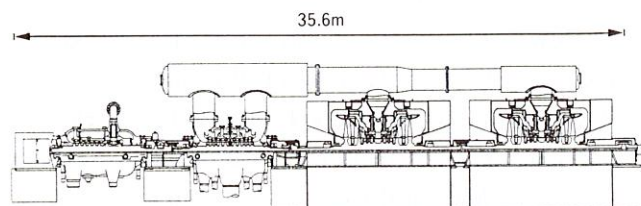
図 2. 高性能高負荷翼 高中圧タービンの段落に 1 段落当たりの負荷を大きくできる翼を適用することで、段落数を減らし、タービン全長を短縮できる。

High-load bucket with high efficiency

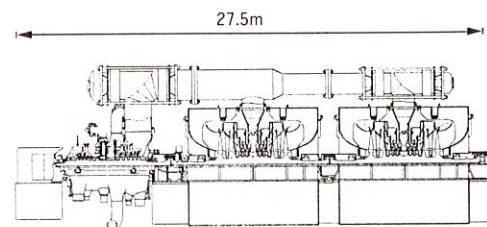
## 2.2 700 MW 蒸気タービンの 3 車室化

従来の 700 MW 機は、2 車室の低圧タービンと高圧タービンおよび中圧タービンがそれぞれ 1 車室の 4 車室で構成されていた。しかし、最近では従来 2 流構造であった高圧初段および中圧タービンを単流化し、高圧・中圧タービンを 1 車室に納めた高中圧一体型蒸気タービンによって、3 車室化を実現した。この実現にあたっては、高圧初段の回転試験の実施をはじめ、動翼の長翼化に対する構造強度の確認を行い、従来と同様の信頼性を確保している。

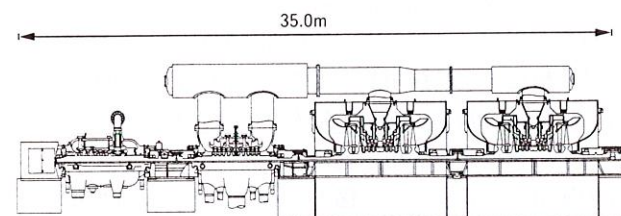
よりいっそう高温化した蒸気条件 24.1 MPa, 593/593°C



(a) 従来 700MW 機



(b) 最新 700MW 機



(c) 1,000MW タンデム機

図 3. 大容量蒸気タービン全長の比較 700 MW 蒸気タービンに最新技術を適用することで、3 車室蒸気タービンを実現するとともに、1,000 MW 蒸気タービンをタンデムコンパウンド化することで、従来の 700 MW 機と同等の全長になる。

Comparison of lengths of large steam turbines

の現在設計・製造中の蒸気タービンは、図 3 に示すようにさらにコンパクト化を図っている。この実現のために、次の最新技術を適用している。

- (1) ロータ軸受部オーバーレイ溶接構造 従来は、高クロム (Cr) 鋼ロータ材の軸受部には低 Cr 鋼スリーブを焼きばめしていたため、カップリング部も焼きばめ構造であったが、軸受部表面をオーバーレイ溶接構造とし、カップリングをロータ一体構造とした。
- (2) 曲面形状低圧排気室 低圧排気室をディフューザ効果を考慮した曲面形状とし、効率を維持しながら低圧タービン長さの短縮を図った。
- (3) 新高温翼材 もっとも高温の蒸気にさらされ、強度的に厳しい高圧初段および中圧初段の動翼に、改良 12 Cr 鋼よりさらに高温強度に優れた新 12 Cr 鋼を採用した。

## 2.3 1,000 MW 蒸気タービンのタンデム型化

従来の 1,000 MW 級蒸気タービンは、最終段長翼化のために、低圧タービンを半速タービンとし、高・中圧部と低

圧部の2軸で構成されていた。しかし、2極機用40インチチタン動翼の開発<sup>(1)</sup>によって、高・中圧と低圧を一軸で構成するタンデムコンパウンド型の実現が可能となった。この形式は、図3に示すように従来700MW機とほぼ同等の全長となる。また、50Hz用1,000MW機には、上述の48インチチタン動翼を適用することで、従来機と同等の効率でタンデム型化を実現できる。

### 3 製造革新

蒸気タービンの製造にも、構成部品への新技術の適用、製造方法の改善および製造技術の進歩に伴う検査工程の適正化に取り組んでいる。これらの技術に関して、今後の当社の標準的採用技術を以下に述べる。

#### 3.1 最終段動翼エロージョン対策

従来の最終段動翼先端部のエロージョン対策は、ステライト材などの耐エロージョン性の高い材料を溶接などではり付ける構造を主に採用していた。しかし、信頼性の向上を目的に最終段動翼の溶接構造をなくすために、エロージョン対策に新技術の適用を進めている。

この適用にあたっては、図4に示すように、翼長などによって、動翼材そのものに比較的耐エロージョン性の高い材料を採用するかあるいは最終段動翼に蒸気が流入する以前に蒸気中に含まれる湿り分を積極的に除去する技術を適用したセルフシールド化および火炎による表面硬化処理を施したフレームハード化の3種類に分類している。比較的

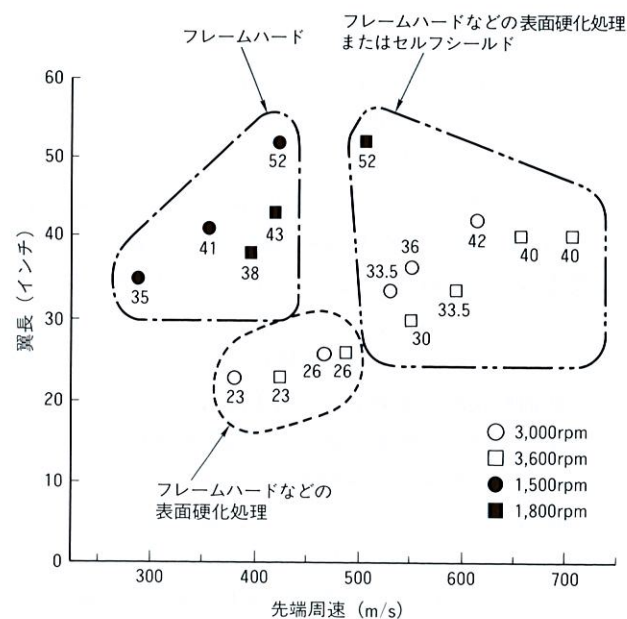


図4. 最終段動翼エロージョン対策 最終段翼長によって、エロージョン対策として標準適用する技術を3種類に分類している。

Technique for protecting last-stage blades against water droplet erosion

周速の低い41インチ動翼などの半速用最終段動翼は、すでにフレームハードを標準仕様としている。

40インチチタン動翼の本格的採用に際して、耐エロージョン性材料として従来のステライト材に代えて、比較的硬度の高い合金チタン材を母材に溶接するとともに、最終段落ノズル翼面にスリットを設けたスリットノズルを採用して、積極的に蒸気中に含まれる湿分を除去するなどの種々のエロージョン対策を実施<sup>(1)</sup>してきた。

最近、この40インチチタン動翼の信頼性をさらに向上させるために、製造上煩雑な耐エロージョン材の溶接工程を省略し、蒸気中湿分をさらに除去する目的で、上述のスリットノズルの壁面にもスリットを設けて、セルフシールド化する技術を確立し、これを40インチチタン動翼の標準仕様としている。この技術確立のために、ノズル翼面でのドレンの成長・流れの挙動を解明するとともに、モデル試験で壁面スリットによるドレン除去効果を確認したうえで、このドレンによるエロージョンへの影響をモデルタービンによる回転試験と実機の運転実績結果とを関連づけて解析し、従来機並みの耐エロージョン性をもつことを確認した。その解析結果の一部を図5に示す。

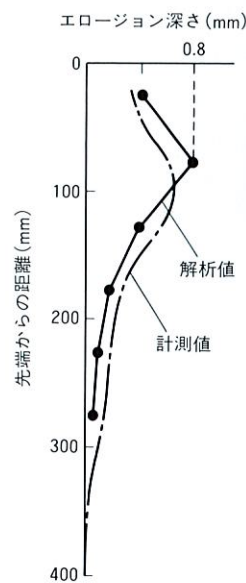


図5. 40インチチタン動翼の湿りによる浸食量解析結果 蒸気中のドレン低減エロージョン対策を強化することによって、溶接構造のないチタン最終段動翼を実現した。

Typical estimation of droplet erosion distribution for 40-inch titanium blade

#### 3.2 ノズル新製造方法

蒸気タービン部品製造方法への新技術の適用として、ノズルの新製造方法の概要を紹介する。従来のノズル製造は、上下半を別々に製造していたが、最近採用している製造方法は、ノズル全体を組み立てたうえで、ワイヤカッターを使用してノズル上下半を分割する方法を適用し、製造工程の短縮化を図っている。また、比較的直径の大きい最終段落ノズルなどには、従来の当て板にノズルを1枚ごとに溶接

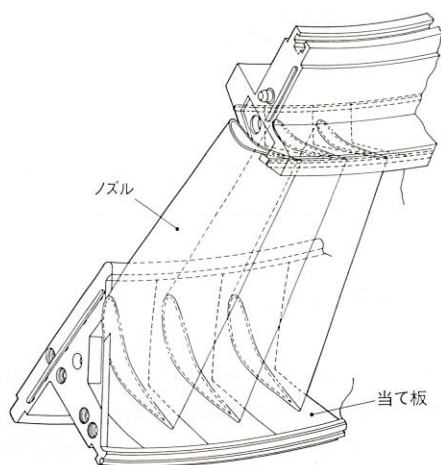


図6. 新製造法によるノズル ノズルと当て板を一体で鋳造し、それらを溶接接合することで、製造工程の短縮を図る。

Nozzle diaphragm designed in consideration of manufacturing process

し、この当て板をさらに内・外輪に溶接する方法のほかに、ノズルと当て板を一体で精密鋳造し、それらを図6に示すように溶接接合して組み立てる方法を採用し、これによって複雑なノズル翼列の製作精度を向上させている。

### 3.3 検査工程

近年の素材製造技術の進歩・構造設計の考慮によって、検査工程を適正化して、十分従来と同等の品質を維持している。例えば、ロータは大型素材製造技術の進歩に伴い、高品質が維持できるようになり、中小容量蒸気タービンでは、従来あった中心孔を加工する必要がなくなっている。

また、ボイラ給水ポンプ駆動用蒸気タービン（以下、BFP-Tと略記）では、各段落でバランス調整できる構造とし、さらに、段落内でアンバランスが最小となるよう全周の配列を決めるなどの設計・製造上の配慮で、高速バランス調整試験を省略し、低速バランス試験で十分調整することができる。また、据付け後にバランス調整が必要な場合も、BFP-T単独試験中に調整し、工程への支障もなく、期待される振動レベルを達成できる。このように、高速バランス試験を実施しなくても実機で良好な振動レベルが得られている。なお、100 MW級機以上でも比較的質量の軽い高圧ロータは、低速バランスで十分調整可能である。

## 4 制御装置、ほか

主要蒸気弁・制御装置、潤滑油設備などの機器にも、積極的に合理化に取り組んでいる。例えば、主蒸気止め弁な

どの主要蒸気弁の弁体を中心に内部構造部品も含め、主に素材製造会社との共同作業によって、製造工程を考慮した弁形状の構造設計とするとともに、保守性向上を目的に、これらの部品のカセット化を進め、ユーザに提案している。

また、600 MWを超える容量機の主蒸気止め弁は従来4弁構成であったが、弁振動などを流体解析および実験で検証・評価し、弁口径を大きくして、亜臨界圧蒸気条件も含めた700 MW級機の2弁化を進め、標準としている。

制御装置関係でも、高圧油制御装置の従来作動油は、非常に高価なリン酸エステル系を使用していたが、鉄鋼製造設備関係で広く使用され、海外発電プラントで使用実績のある脂肪酸エステル系の採用を海外プラントで予定しており、国内プラントでの採用も推進する計画である。この脂肪酸エステル系作動油は、“エコマーク”付きで環境に優しく、毒性も少なく、作業安全性も向上する。

潤滑油装置関係での最近の採用技術例に、運転中に潤滑油に含まれてくる不純粒子を除去する油清浄機の形式選定がある。従来大容量機は、沈殿ろ過式を採用していたが、容量によって、従来方式と同等あるいは従来以上の除去性能を期待できるフィルタ式を推奨している。

このフィルタ式は、①定期点検時の交換作業の取扱いがしやすく、作業時間が短い、②油ポンプが停止中でも運転可能で、定期点検中のオイルフラッシング期間を短縮できる、③機能追加によって、エマルジョン化した水分の除去もできるなどの利点がある。

## 5 あとがき

合理化技術に関して、蒸気タービン本体を中心に設計、製造、検査など全般にわたる当社の活動概要・成果の代表例を紹介した。今後とも、ユーザの要望や指摘事項にこたえられるよう、要求機能を満たし、品質の維持・向上に努めながら、技術に裏付けられた合理化を推進し、提案していく所存である。

## 文献

- 荒木了一，他：蒸気タービン低圧最終段用チタン合金製40インチ長翼の開発，火力原子力発電，39，6，pp.593-605（1988）



浜野 博 Hiroshi Hamano

火力事業部火力プラント技術部課長。  
蒸気タービン発電設備の基本計画に従事。日本機械学会会員。  
Thermal Power Plant Div.