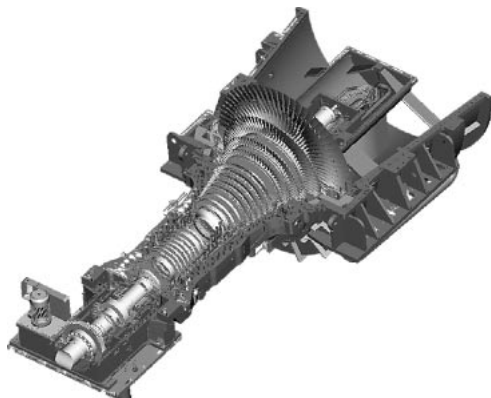


# 一軸コンバインドサイクル用大容量 単車室再熱蒸気タービンの開発

## Development of Large-capacity Single-casing Reheat Steam Turbines for Single-shaft Combined Cycle Plant



中野 隆\*1  
Takashi Nakano

田中 恵三\*2  
Keizo Tanaka

中澤 民暁\*2  
Tamiaki Nakazawa

西本 慎\*2  
Shin Nishimoto

武田 憲有\*2  
Kenyu Takeda

宮脇 俊裕\*3  
Toshihiro Miyawaki

F形あるいはG形の大型ガスタービンを採用した一軸型のコンバインドサイクルプラント用に、大容量単車室再熱型の蒸気タービンフレームを開発した。蒸気タービンの単車化は、車室数低減によるコスト低減や軸系・配置の簡素化のみならず、運用・保守の簡易化等の多くのメリットがある。本報では、現在製作中のG形ガスタービン用高性能急速起動対応蒸気タービンと、SSSクラッチを適用した世界最大級の軸流排気タービンを例に挙げ、特徴並びに最新技術について紹介する。

### 1. はじめに

省資源や環境問題の観点から、高効率で、天然ガスを利用することにより環境負荷が低く、DSS等の運用性に優れたガスタービンコンバインドサイクル発電プラントの設置は1980年代以降急速に拡大した。その間、ガスタービンの燃焼温度高温化・単機出力の増加に伴い、ボトムサイクル用の蒸気タービンにおいても単機容量は増加の一途をたどってきた。このような中で、蒸気タービンのコンパクト化・単車室化は、蒸気タービン自身のコスト低減、タービン建屋寸法の縮小によるプラント建設費削減や工期短縮などのメリットがあるが、特に一軸型コンバインドサイクルにおいては全軸長の短縮、ロータ数減による軸系の信頼性向上、運用性・保守性の向上に大きな効果がある。

当社は、低压最終段長大翼の開発や構造設計技術、材料技術をベースとして火力用蒸気タービンの車室数低減・コンパクト化を推進してきたが、コンバインドサイクル用タービンについても、容量の増加に対応した大容量単車室蒸気タービンを開発してきた。本論文では開発を完了した最新の一軸型コンバインドサイクル用単車室フレームの特徴と、これらに適用された最新技術について紹介する。

### 2. コンバインドサイクル用蒸気タービンのラインナップ

コンバインドサイクルプラントには、ガスタービン(GT)・蒸気タービン(ST)・発電機が一つの軸上で結合される一軸型と、GTとSTが別の軸で構成され

る多軸型があり、個々のプラントの運用条件等に応じて選択される。

GT 2台(あるいは3台)とST 1台とを組み合わせた、いわゆる2 on 1(3 on 1)のプラントでは必然的に多軸型となる。この場合、F形GTとの組み合わせでは蒸気タービンは200MW級かそれ以上の出力となるが、よほど復水器真空が低くない限り、高中圧一体タービンと、ダブルフローの低压タービンの2車室で構成される(図1)。GTは機種が限定されるため、蒸気流量や蒸気条件は概ね同じ領域となることから、高中圧タービンについては標準フレームを60 Hz用、50 Hz用にそれぞれ適用している。標準フレームでは、車室・ロータ素材を始めとする設計・部品が共通化され、蒸気流量や条件の変動に対しては翼列部の調整で対応可能である。これにより、同一フレームを繰り返し適用することによるコスト低減、納期短縮及び信頼性向上を図ると同時に、個々のプラントの条件に対して性能を最適化している。低压タービンについては、同じ蒸気流量であってもプラントごとに異なる復水器真空により排気体積流量が大きく変動するので、最終段翼長ごとに標準化された低压タービンフレームの中から、性能上最適なものが選定される。

一方、GTとSTを1対1で組み合わせた1 on 1のプラントでは、GT・ST・発電機を一行に結合した一軸型とすることが多い。蒸気タービンは160 MW級かそれ以下の出力となるが、蒸気流量及び復水器真空により2車室と単車室の両ケースがある。60 Hz地域向けでは、40インチスチール翼等の長大翼の開発に

\*1 原動機事業本部タービン技術部タービン技術開発課主席

\*2 原動機事業本部タービン技術部タービン技術開発課

\*3 技術本部高砂研究所ターボ機械研究室

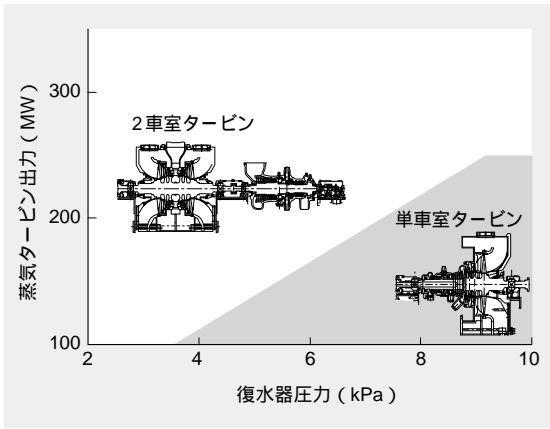


図1 蒸気タービン容量と車室型式 単車室タービンが適用可能な出力、復水器圧力の領域を示す。

	一体型ロータ形状	溶接型ロータ形状	溶接型ロータの特長
中低圧ロータ	 2¼CrMoV鋼	 溶接継手 高温部：12Cr鋼 or 9Cr鋼 低温部：3.5NiCrMoV鋼， 2¼CrMoV鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温用12Cr鋼あるいは9Cr鋼と、高じん性3.5NiCrMoV鋼の採用により、高温・大容量・短納期化に対応。</li> <li>・大型ボア構造で急速起動に対応</li> </ul>
高中圧ロータ	 肉盛溶接 肉盛溶接 12Cr鋼 or 9Cr鋼	 高温部：12Cr鋼 or 9Cr鋼 低温部：2¼CrMoV鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温強度に優れた12Cr鋼あるいは9Cr鋼を必要箇所のみ採用することにより、高温・大容量・短納期化に対応。</li> </ul>
大型低圧ロータ	 3.5NiCrMoV鋼	 3.5NiCrMoV鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小型素材採用により、短納期化に対応。</li> </ul>

図2 溶接ロータの材料構成と特長

より、F形GTに対して現在では単車室タービンを標準的に適用している。しかし、最近主流となりつつあるG形GTでは蒸気流量が増えるため、今回更に大容量のG形GT用単車室タービンを開発した。また、50Hz地域向けでは、GTの容量が60Hz地域向けの3～5割増しであり発生蒸気量が多いため、低真空の場合を除き、F形GTに対しても2車室タービンを適用してきたが、今回、48インチ長大翼を適用したF形GT用の大容量単車室タービンを開発した。

### 3. G形GT用 高性能急速起動対応単車室再熱蒸気タービン

60 Hz用GTであるM501Gを採用した一軸コンバインドサイクル用に、大容量単車室再熱蒸気タービンを開発した。GTのG形採用に伴い蒸気量が大幅に増加するため、最終翼に40インチ翼を用いた単車室タービンでは排気損失が増加し、性能面で不利となる。いっぽう、29.5インチ級最終翼を用いたダブルフロー低圧タービンによる2車室設計では、排気損失は最適化できるものの、前述の通り性能面以外でのデメリットが大きい。そこで本機では、排気面積のより大きい45インチチタン翼を採用することにより、高性能かつコンパクトな単車室設計を実現した。45インチ翼は、開発時に実翼を用いた実負荷試験を実施して性能と信頼性を検証し<sup>(1)</sup>、2003年より商用機にて運転を継続中である。

さらに、本機には以下に述べる高性能化、信頼性・運用性向上技術を採用している。

#### 3.1 急速起動対応溶接ロータ

蒸気タービンプラントに対する高温化、大容量化、短納期化のニーズにこたえるため、当社では溶接ロータの要素技術開発、実機適用を推進してきた<sup>(2)</sup>。図2に、各種溶接ロータにおける材料の構成と特長を示

す。蒸気タービンの大容量化に伴いロータ寸法が大型化し、特に高温タービン用ロータや大型低圧ロータを一体で製作する場合に素材製造寸法限界が問題となるが、溶接ロータでは小型鍛造品を溶接することによりロータの大型化、短納期化が可能となる。また、高温タービン用ロータでは、高価な高温材料の適用範囲を高温域に限定できる上、従来実施されているジャーナル部の低合金鋼による溶接肉盛が不要となる。さらに、使用温度域に最適な材料を組み合わせることができると、例えば単車室再熱タービンに用いられる高低圧一体型ロータの場合、高温強度の必要な高温域には12%Cr鋼あるいは9%Cr鋼を、靱性が必要な低温域には3.5NiCrMoV鋼を採用することによって、ロータ全体の信頼性が向上する。

溶接ロータの実機への適用状況を図3に示す。当社では、高砂製作所内のコンバインドサイクル実証発電プラント（T地点）において、1997年より2¼CrMoV鋼の共金系溶接ロータ、1999年より2¼CrMoV鋼 - 12%Cr鋼 - 3.5NiCrMoV鋼 - 3.5NiCrMoV鋼、及び2¼CrMoV鋼 - 9%Cr鋼 - 3.5NiCrMoV鋼 - 3.5NiCrMoV鋼の異鋼種溶接ロータの実証運転を行っている。図4に、急速起動から定常運転に至るまでの軸振動の状況を示すが、良好な運転状態が得られている。また、定期検査時に実施した溶接部の超音波探傷検査、組織検査、内面目視点検においても問題のないことを確認した。さらに、2003年には2¼CrMoV鋼 - 3.5NiCrMoV鋼の異鋼種溶接ロータを採用した商用機（130 MW）が運転開始しており、安定した運転状態を確認している。

今回開発したコンバインドサイクル用単車室フレームにおいても、中央部に高温材料を適用した異鋼種溶接ロータを採用した。さらに、溶接構造の利点を生かして、T地点と同様に高温部を中空とした大径ボア構

	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05
T 地 点	共金系溶接ロータ	モデルロータによる検証			STEP 1/実証運転	STEP 1	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV				
	異鋼種溶接ロータ	STEP 2	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV 12Cr	3.5NiCrMoV	STEP 2/実機ロータ製作	STEP 3	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV 9Cr	3.5NiCrMoV	STEP 2/実証運転 点検	STEP 3/実機ロータ製作 点検	STEP 3/実証運転 点検	
商 用 機	単車室再熱タービン 異鋼種溶接ロータ		2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV	3.5NiCrMoV		実機ロータ製作			併入運開			
	高中圧タービン 異鋼種溶接ロータ			2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV	12Cr	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV	実機ロータ製作		2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV	12Cr	実機ロータ製作	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> CrMoV

図3 溶接ロータの実機適用状況

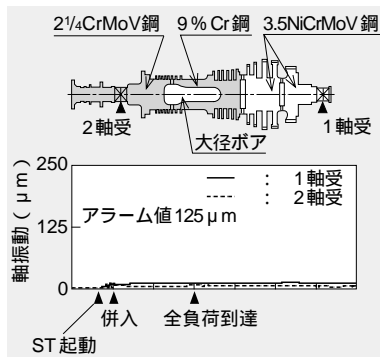


図4 T地点大径ボア異鋼種溶接ロータの運転状況 急速起動運転に対しても軸振動値は十分小さい。



図5 蒸気入口部スクロール構造 蒸気通路のCFD解析結果を示す。

造を採用しており、これにより、起動時にロータに発生する熱応力を低減でき、急速起動が行えることからプラントの運用性が大きく向上する。

3.2 高性能・高信頼性低圧排気室

本機は下方排気車室を採用し、軸受は基礎に直置きとして軸系の信頼性を確保するとともに、低圧側車室グランド部ケースを車室より独立させ、ベローズを介して低圧車室と結合することにより、真空荷重等による車室変形に対しても信頼性のある構造としている。排気室は、圧力回復向上・圧力損失低減を図った非対称フローガイドを採用している。

3.3 高性能化技術

主蒸気入口部のノズル室はスクロール構造として周方向流れ均一化及び圧力損失低減を図り(図5)、高中圧翼列には動静翼干渉による非定常損失の低減を図った高性能翼を採用している。また、ダミーリングへはACC(Active Clearance Control)シールを採用し、リーク損失を低減している。これは、起動停止動作中及びタービン停止中にはばね力でシールセグメン

トを浮上させてロータとラビリンズシール間のクリアランスを大きく保ち、負荷運転中にはシール差圧を利用してセグメントをロータ中心方向に所定位置まで移動させて、クリアランスを小さく保つものである。さらに、直接潤滑軸受の採用により機械損失低減を図っている。

4. SSSクラッチを適用した世界最大級 軸流排気単車室再熱蒸気タービン

50 Hz用GTであるM701Fを採用した一軸コンバインドサイクル用に開発した単車室再熱蒸気タービンを図6に示す。M701Fに対しては従来、低真空の場合を除き 蒸気タービンには2車室形式を採用していた。本機では、3000rpm機用スチール翼として世界最長の48インチ翼を最終翼に採用することにより単車室化が可能となり、世界最大級の単車室再熱蒸気タービンが実現した。48インチ翼は2004年より商用機にて運転を継続中であり、信頼性を確認している。

さらに、本機には以下に述べる高性能化、運用性向上技術を採用している。

4.1 SSSクラッチの採用

本機は発電機の両端にGTと蒸気タービンをそれぞれ接続した軸系であり、発電機と蒸気タービン間のカップリングにSSS(Synchro-Self-Shifting)クラッチを採用することにより、以下の運用上のメリットがある。

- GTシンプルサイクルとコンバインドサイクルの運転切り替えが可能であり、運用の多様性が図れる。
- プラント起動時、GT起動から蒸気タービン起動条件確立までの間、蒸気タービンが高速で空転することがないため、加熱防止用冷却蒸気が不要となることによる設備費低減、及び運用性向上が図れる。

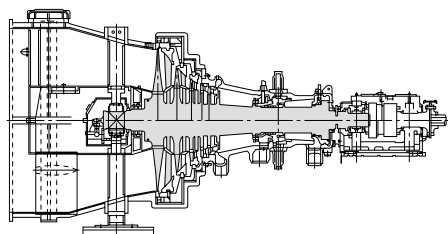


図6 大容量軸流排気単車室再熱タービン 最終翼にはスチール製3000rpm-48インチ翼を採用している。

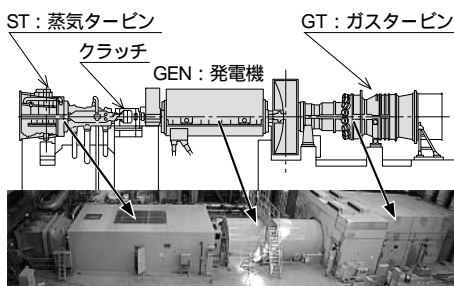


図7 SSSクラッチを適用したタービンの軸系 蒸気タービンと発電機の間にはクラッチを配置している。

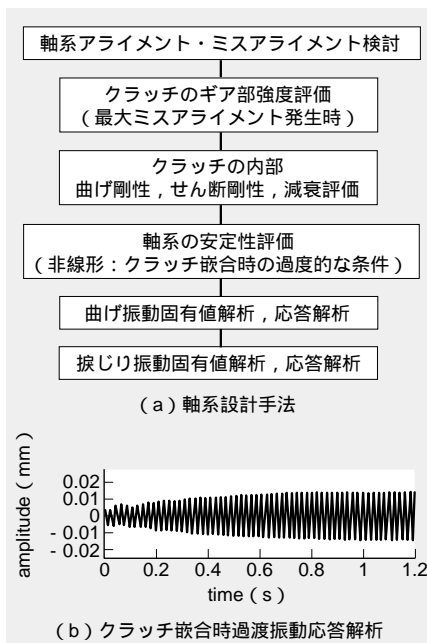


図8 SSSクラッチを含む軸系の設計手法

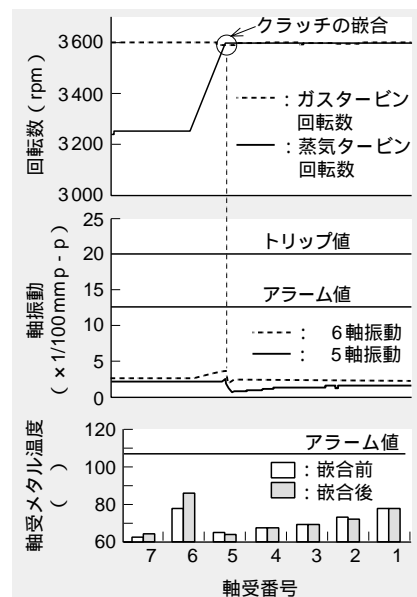


図9 SSSクラッチを適用したタービンの運転状況 クラッチ嵌合前後の軸振動値と軸受メタル温度の変化を示す。

SSSクラッチは、図7に示すM501F GT、発電機と結合した一軸コンバインドプラントの蒸気タービンにて既に採用実績があり、2003年より運転を継続中である。採用に当たっては、実機軸受を用いた装置によりクラッチへの給油の検証試験を実施し、また、図8に示すクラッチ嵌合時の軸系の曲げ・捩り振動解析や過渡応答解析等の十分な事前検討を行った上で実機に適用した。さらに、現地においてはクラッチまわりの軸の振動・偏心・傾きや軸受温度等の詳細計測を実施しているが、図9に示すように、クラッチ嵌合前後とも軸振動は安定しており、良好な運転状態が確認された。これらの運転実績をもとに、今回更に大容量のタービンへのSSSクラッチの適用が可能となった。

#### 4.2 高性能軸流排気室

上述の軸系配置により、蒸気タービンは軸流排気化が可能となった。そのため、下方排気に比べ圧力回復の大きい高性能軸流排気室の採用により、排気損失が大幅に低減される。さらに、復水器を蒸気タービンの下部に設置する下方排気に比べて、復水器を同一フロアに設置できる軸流排気ではタービン室の低床化が可能となり、建屋高さも抑えることができる。

#### 4.3 高性能化技術

主蒸気入口部のスクロール構造、ダミーリングへのACCシールの採用等により、高性能化を図っている。

### 5.まとめ

一軸コンバインドサイクルの大容量化に対応し、機器のコンパクト化によるコスト低減、運用のフレキシ

ビリティ向上、高性能化のニーズにこたえる大容量単車室再熱蒸気タービンの開発を完了した。これを可能とした要素技術は主に、低圧最終段長大翼、溶接ロータ、SSSクラッチを含む軸系、及び大容量化に伴う軸受間スパン増大に対する軸系の設計技術であり、これらは、既に実機レベルで十分に検証された信頼性の高い技術である。

当社は、今後も需要の見込まれるコンバインドサイクル用蒸気タービンについて、引き続き新技術の適用による更なる高効率化、建設費低減につながるフレームの開発に取り組む所存である。

#### 参考文献

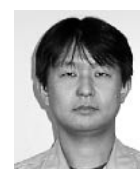
- (1) 渡辺ほか、高効率・高信頼性タービン長大翼の開発、三菱重工技報 Vol.38 No.2 (2001) p.92
- (2) 重ほか、大容量・高性能蒸気タービン溶接ロータの開発、三菱重工技報 Vol.37 No.3 (2000) p.130



中野隆



田中恵三



中澤民暁



西本慎



武田憲有



宮脇俊裕