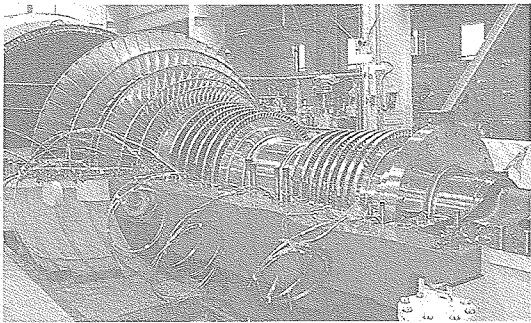


高性能新形蒸気タービンの開発

Development of New Generation High Efficiency Steam Turbine



渡 辺 英 一 郎      田 中 良 典      中 野    隆  
大 山 宏 治      田 中 恵 三      宮 脇 俊 裕  
堤    雅 徳      篠 原 種 宏

当社は、火力発電設備の効率向上のための弛まない努力を続けている。最近、蒸気タービン性能を大巾に向上させる技術として、次世代高性能翼（反動翼、衝動翼及び低圧最終翼群）、次世代高性能シールを開発した。さらに、これらの新技術に加え、他の高性能化技術や運用性向上技術を採用した高性能新形蒸気タービンを開発し、当社の実証発電設備にて性能・信頼性の検証を行った。本報は、高性能新形蒸気タービンに採用された新技術・新構造の特徴及び実績における検証結果について紹介する。

1. は じ め に

エネルギー資源の節約とCO<sub>2</sub>排出抑制に代表される環境問題の高まりから、火力発電設備の効率向上のための弛まない努力が続けられてきた。その一つが蒸気条件の高温・高圧化による熱サイクルの改善であり、当社では蒸気温度600℃級の高効率大容量商用機の実用化<sup>①</sup>や、630℃級高温材の開発<sup>②</sup>を実施してきた。一方、翼性能向上やリーク損失低減といった蒸気タービン自身の効率向上についても積極的に取り組んできており、特に翼性能については、最新の数値流体解析技術を駆使し高効率化を図った完全三次元流れ設計翼を開発し<sup>③</sup>、実機へ適用してきた。また、大容量化に対する合理化では、最終段動翼の長翼化に取り組み<sup>④</sup>、世界に先駆け3 600 rpm－40 インチスチール翼／3 000 rpm－48 インチスチール翼を開発し、実用化している。

この度、当社では、最新の三次元多段粘性流動解析技術及び非常常流れ場解析技術<sup>⑤</sup>を駆使し、更に高効率化を図った次世代高性能反動翼、衝動翼及び低圧最終翼群を開発した。また、グラント部や翼先端からの蒸気リークの大巾な低減に

よりタービンの効率向上を可能にする次世代高性能シール（リーフシール）を開発した。さらに、これらの新技術に加え、他の最新の高性能化技術や運用性向上技術を採用した高性能新形蒸気タービンを開発し、当社高砂製作所内のコンバインドサイクル実証発電設備（T地点）向けタービンを新規製作して既設機と換装し、性能・信頼性の検証を行った。

2. 高性能新形蒸気タービンの概要

次世代高性能翼や次世代高性能シールは、中小型機からコンバインドサイクル用蒸気タービン、通常火力用大型機に至るあらゆるタービンへ適用可能である。初号機として、T地点実証発電設備用に、これら新技術をすべて適用して開発・製作した高性能新形蒸気タービンを図1に示す。

本タービンは定格出力105 MWの単車室再熱式である。高圧前方翼列は衝動段、高圧後方と中圧の翼列は反動段であり、衝動段、反動段のいずれにも新開発の次世代高性能翼を採用し高性能化を図っている。低圧翼列は3 600 rpm－36 インチ最終翼群であり、最新の流動解析技術に基づいた翼型設計、フローパス設計により開発されている。また、リーフシール

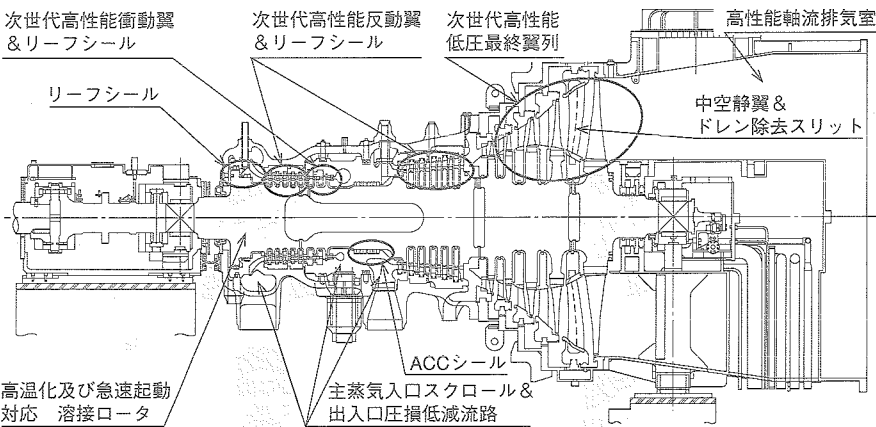


図1 高性能新形蒸気タービン（T地点向け単車室再熱タービン）  
新技術の新形蒸気タービンへの適用箇所を示す。

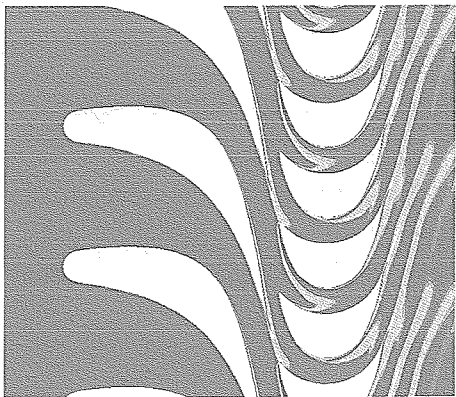


図2 非常常流動解析例  
静翼      動翼

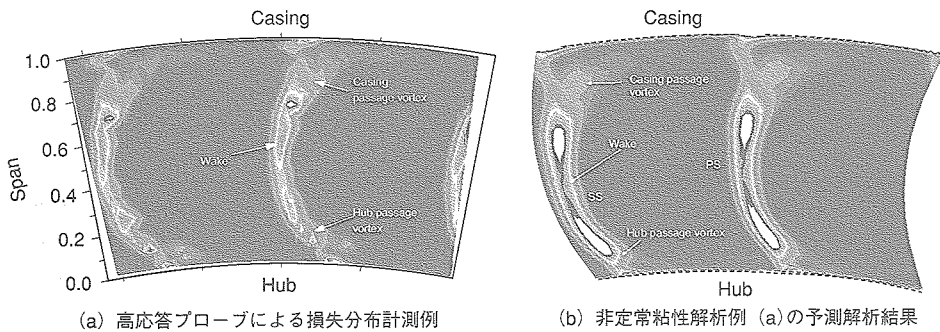


図3 流動解析予測精度向上技術例

を高圧排気とグラウンド間のシール部へ適用してリーク蒸気を低減するとともに、高中圧翼列の動翼外周へも適用し翼列性能の向上を図っている。

これらのキーテクノロジーに加え、高性能新形蒸気タービンには、高性能化あるいは運用性向上につながる各種技術も採用している。例として、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、高圧排気部、中圧入口部についても数値流体解析に基づき圧力損失の少ない形状としている。また、高圧～中圧間のシール部には、ACC (Active Clearance Control) 技術を適用し、可動式のシールセグメントによりタービン停止時・起動停止動作中はクリアランスを大きく保ち、通常の負荷運転時にはクリアランスを狭めることによりシール性能を向上させている。さらに、起動時熱応力低減のためにロータを中空構造とした溶接ロータ (異鋼種溶接) ⑥を採用し、急速起動等の運用性を向上させている。

### 3. 新技術の特徴

#### 3. 1 次世代高性能衝動翼

T地点高性能新形蒸気タービンの高圧翼列上流段に採用した衝動段動翼には、非定常損失を低減する新型プロファイルを適用した。非定常流動解析技術を駆使し、従来用いられてきた動翼の非定常損失発生メカニズムが明らかとなった (図2参照)。新型プロファイルは、動静翼干渉によるこの非定常損失の発生に着目し、プロファイルの最適化設計により非定常的な損失低減を図り、空気タービン試験によって飛躍的な性能向上が確認された。

また、高圧翼列上流の衝動段には、ノズル部をプロファイル部分と支柱部分に分離した構造 (高性能仕切板構造) を採用した。これは、仕切板強度を、静翼上流に設置された支柱によってサポートし、静翼の翼幅を小さくすることでアスペクト比を増加させ、さらに静翼に三次元設計を適用することで静翼性能の向上を図るものである。支柱形状及び静翼プロファイルは、三次元流動解析により最適化されている。

#### 3. 2 次世代高性能反動翼

当社では従来から、粘性を考慮した多段三次元流動解析と、空気タービンによる検証を行うことで常に、予測効率、内部流動の予測精度向上に弛まぬ努力をしてきた。最近では、従来の定常解析手法に加え、図3に示すような損失発生メカニズムを更に高精度に予測可能な非定常流動解析手法を確立

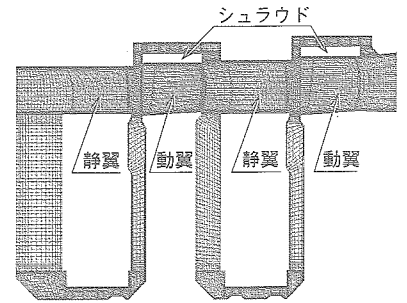


図4 翼列全流路非定常多段粘性流動解析メッシュ例 (高圧下流段)

し、これらを用いて次世代高性能反動翼を開発した。

従来翼のフローパターンに対し、反動度、プロファイルの三次元スタッキング分布の更なる最適化を図っている。これにより、2次流れ渦の抑制と、かつ、内外壁面にその領域を寄せることで、動翼2次流れ損失を低減させている。また非定常損失に関しては、次世代高性能衝動翼と同様、動静翼干渉による非定常損失発生を低減させた新プロファイルを、プロファイル損失が支配的な翼高さ中央付近に適用している。さらに、非定常解析により、内外壁近傍において動静翼間からの流れの洩れ出し・流れ込みにより発生する渦が2次流れ渦と干渉し、2次流れ損失を増大させることが定量的に明らかとなり、静翼内周側とロータディスク間及び、動翼シュラウド廻りの流路を含めたフローパス形状の最適化も図っている。図4にこれら全流路を含む翼流れ場の解析モデルを示す。

このように、次世代高性能反動翼は、最新の解析技術と詳細な内部流動検証により開発され、T地点新形蒸気タービン高圧翼列下流段と、中圧翼列全段に適用している。

#### 3. 3 次世代高性能低圧最終翼群

低圧最終翼群の性能はタービン全体に与える影響が大きく、流動解析技術の発展に合わせて種々の改良・改善に努めている。次世代高性能低圧最終翼群として今回開発した3600 rpm - 36インチ翼群 (図5) は、最新の非定常多段粘性流動解析技術により、従来から実施している段落負荷の最適化、翼高さ方向の負荷分布、高マッハ数領域流れに対する翼プロファイルの最適化に加え、タービン内の流れの実体、すなわち、非定常流れを考慮することで、多段流れ場における静翼後流の動翼列内での挙動、動翼後流の静翼列内での挙動、後流と2次流れとの干渉、衝撃波と境界層あるいは2次流れとの干渉等が、時刻歴で評価可能となることから、時間平均で最大の効率を得るように、更に一歩進んだ性能向上策を折り込んでいる。

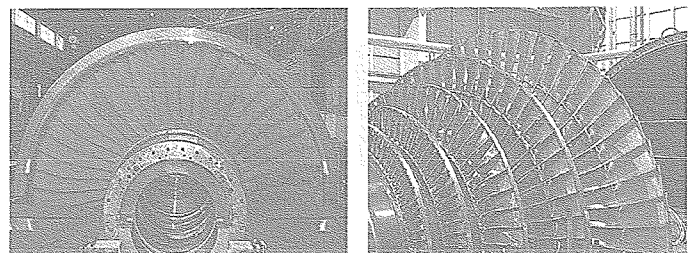


図5 次世代低圧最終翼群 (3600 rpm - 36インチ)

また、流動解析技術の向上により、翼に加わる励振力の予測制度も格段に向上し、耐振動強度レベルも大巾に向上することが可能となったため、フローパス、翼プロファイルのスタッキングの自由度が増え、性能向上のための抜本的見直しを実施している。これにより、最終翼長のみならず上流動翼の基本直径、翼高さ共増大させ、壁形状も合わせて最終翼群全体の流れ場を更に最適化し、静翼スタッキングも、従来のBow形状に加え、軸方向に傾斜させたSkew形状も採用した。

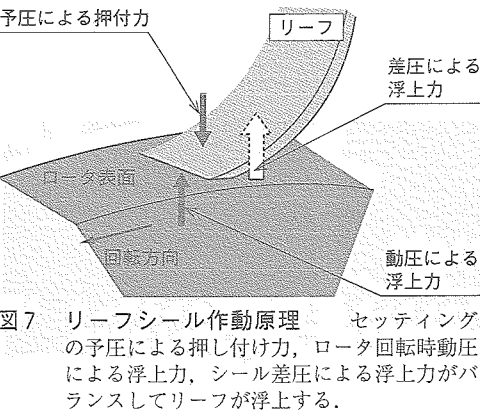
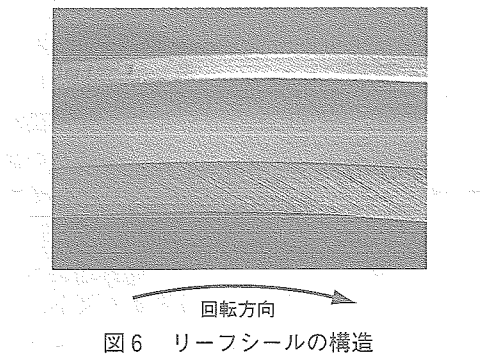
一方、最終翼群に特有のドレンによる損失（湿り損失）に対しても、前述の流動解析技術によりドレン飛跡予測をより正確に行えることから、ドレン抜きのためのスリット位置の改善により、損失の低減を図っている。

3. 4 シール技術

高性能新形蒸気タービンにおいては、翼列性能向上技術と合わせて、シール技術、クリアランス制御技術の開発適用による性能向上にも取り組んだ。本技術は性能向上ばかりでなく、シール性能を向上させることで、従来のラビリンスシールに対してシールに必要なタービン各部の軸方向スパンを減少でき、軸系設計や翼列設計に余裕を持たせることが可能となる。これらの技術的特徴について以下に説明する。

3. 4. 1 リーフシール

本シールの構造を図6に、作動原理を図7に示す。リーフシールは従来のラビリンスシールに代表される非接触式のシールや、近年用途が拡大しつつあるブラシシールのような接触式のシールと異なる新しい設計コンセプトのシールである。本シールは薄板を周方向に傾斜させて多数配置した構造であり、ロータが回転すると薄板先端とロータの間に作用する動圧効果により浮上力が発生し、ロータ回転中は非接触状



態となる。このため、ブラシシール等の接触式シールと異なりタービン運転中のシールやロータの摩耗が防げ耐久性が向上するとともに、シール自身が板形状で差圧方向の剛性が大きいので、ブラシシールより高差圧域までシールできるという特徴を持つ。

本シールの工場試験による性能確認試験結果と浮上特性検証試験（シールとロータ間の導通確認試験）結果を図8に示す。流量は従来のラビリンスシールと比較して約1/3に低減できることを確認した。また、シールの浮上は、シールがロータに対して偏心した場合でも良好であることが導通試験で確認できた。本リーフシールはT地点実証設備既設機で実機検証を開始し、1年間運転後の点検において健全であることを確認した。今回、高性能新形蒸気タービンには、更に改良を加えたものを適用している。

3. 4. 2 ACC

本シールの構造を図9に示す。ACCシールはラビリンスシールセグメントを半径方向に移動可能な構造としたものであり、起動停止動作中及びタービン停止中にはばね力でセグメントを浮上させてロータとラビリンスシール間のクリアランスを大きく保ち、タービンの負荷上昇時にはシール差圧を利用してシールセグメントを中心方向に所定位置まで移動させ、定負荷運転中にはクリアランスを小さく保つものである。

本ACCは既にT地点実証設備における実機検証試験を実施しており、ACCシールセグメントの動きをギャップセンサにより計測し、タービンの起動発停によりクリアランスが拡大縮小を繰り返し、クリアランス制御が確実に行われていることを確認した。また、1年間運転後の点検結果では、隣接する従来設計のセグメントにはシールフィン摩耗跡が見られたのに対し、ACCシールセグメントには接触跡がみられず良好な結果であった。これらの結果を反映して、700 MW機を筆頭に計9ユニットに採用し実機運転を開始している。

T地点新形蒸気タービンでは本ACCシールをHPダミーリ

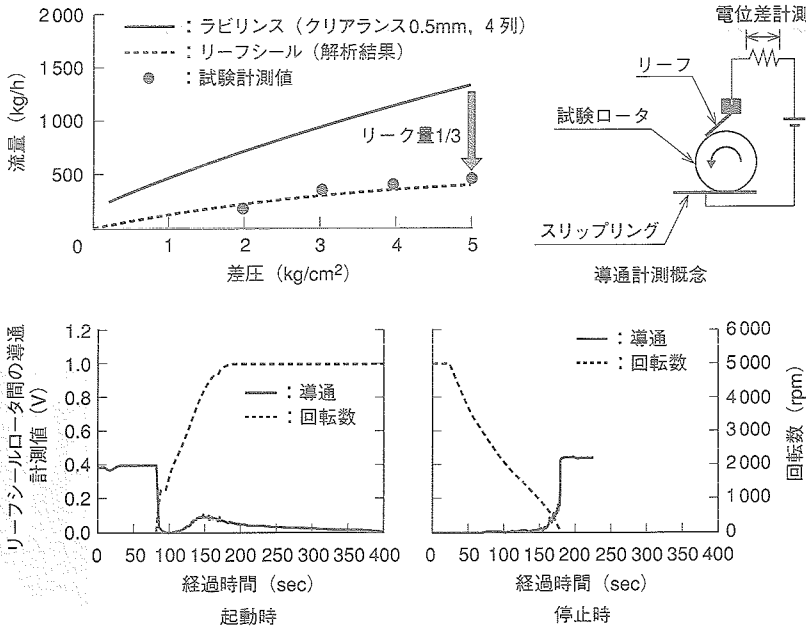


図8 リーフシール性能・浮上特性検証試験結果

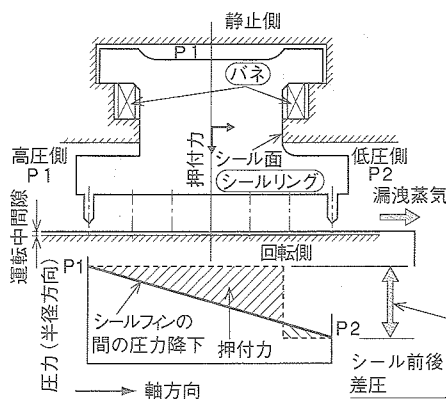


図9 ACCの構造 シールセグメントの内周・外周の圧力差による力とばねの力との差により、半径方向へセグメントが移動する。

ングに4段設置し、各セグメントの圧力分布とバネ力をコントロールすることで、起動及び停止時の車室変形によるシールフィン摩耗を回避し、定負荷運転中にはクリアランスを小さく保ってリーク損失を低減し性能向上を図っている。

#### 4. 実機検証試験

当社T地点実証発電設備用に、新技術を適用して開発・製作し、既設機と換装した高性能新形蒸気タービンは、平成15年5月に運転を開始した。検証試験は、高性能化技術の適用によるタービン全体性能の向上を確認するだけでなく、各新技術要素の性能を確認するためにタービン車室内各部に圧力・温度センサを設置した。さらに中圧翼列、低圧翼列と排気室では、ピトートラバースによる内部流動の計測を実施した。また、シール性能の確認は、シール前後の差圧計測と回転部・静止部間のギャップ計測により行った（図10参照）。

試験結果は、タービン全体性能向上が予想どおりであることが確認された。また、高圧・中圧・低圧最終翼群に適用した次世代高性能翼やリーフシール、ACCシール、出入口損失低減といった各新要素技術の性能についても、計画どおりの性能に達していることを確認した。

5. 3. 2. 3. 4. 5.

最新の高性能化技術を結集した高性能新形蒸気タービンを開発し、実機にて当初の予想どおりの性能向上を確認するとともに、信頼性を検証した。本タービンで採用した新技術は中小型機から大容量機まで、あらゆるタービンの効率向上に寄与するものであり、新設機及び既設機へ順次適用の予定である。

当社では、今後とも発電設備の更なる高効率化を目指して、新技術の開発及び、それらを適用した高性能蒸気タービンの開発を続けていく所存である。

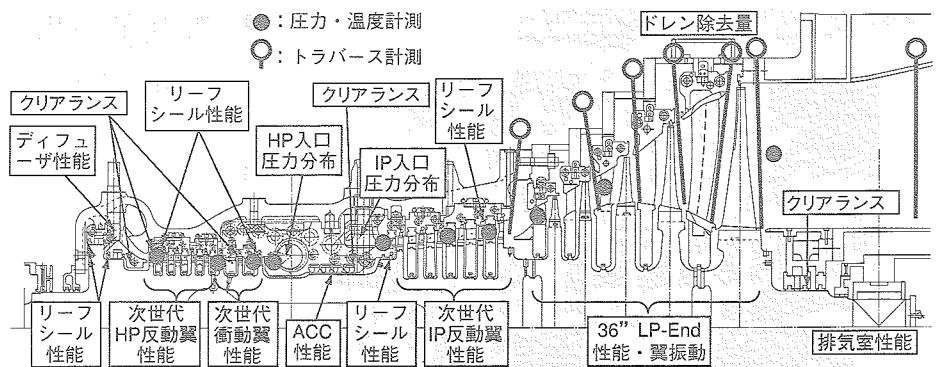


図10 T地点新形蒸気タービン特殊計測

## 参考文献

- (1) 田中良典ほか, 世界最高効率1000 MW級蒸気タービンの特徴と運転実績, 三菱重工技報 Vol.39 No.3 (2002) p.132
- (2) Yoshikuni KADOYA et al., Alloy Design and Production of an Advanced 12Cr Steel Rotor Applicable to Elevated Steam Temperatures, Fifth International Conference on CLEAN STEEL (1997)
- (3) 杉谷敏夫ほか, 高性能新型蒸気タービン翼の開発及び運転実績, 三菱重工技報 Vol.31 No.1 (1994) p.6
- (4) 大山宏治ほか, 高効率・高性能タービン長大翼の開発, 日本機械学会第8回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (2002.6) p.141
- (5) V.S.P.Chaluvadi et al., Blade Row Interaction in a High Pressure Steam Turbine, Transaction of the ASME, Journal of Turbomachinery Vol.125 No.1 (2003) p.14
- (6) 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



渡辺英一郎  
原動機事業本部  
タービン技術部長



田中良典  
原動機事業本部  
タービン技術部  
タービン技術開発課  
長



中野隆  
原動機事業本部  
タービン技術部  
タービン技術開発課



大山宏治  
高砂製作所  
タービン技術部  
翼開発グループ長



田中恵三  
高砂製作所  
タービン技術部  
タービン開発設計グループ



宮脇俊裕  
技術本部  
高砂研究所  
ターボ機械研究推進  
室主席



堤雅德  
技術本部  
長崎研究所  
ターボ機械研究室主  
席



篠原種宏  
技術本部  
高砂研究所  
機器・自動化装置研  
究室主席