

富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン

酒井 吉弘(さかい よしひろ)

中村 憲司(なかむら けんじ)

和泉 栄(いずみ さかえ)

① まえがき

蒸気タービンが「成熟機械」と言われるようになって久しいが、近年、蒸気タービンの技術開発のスピードはむしろ加速している感があり、技術的なブレークスルーが行われつつある。無論、蒸気タービンの開発は、一朝一夕にしてなるものではなく、長期にわたる地道な努力の積み重ねが今日、成果となって実を結んでいるものであることは言うまでもない。

富士電機とドイツ・シーメンス社(富士・シーメンス)は緊密な協力関係のもとに、大容量蒸気タービンの技術開発を絶え間なく着実にやってきた。その成果の一端を紹介する。

② 技術開発の重点

富士・シーメンスの大容量蒸気タービンの技術開発は、大容量タンデムコンパウンド機(単軸くし形タービン)の開発、蒸気条件の高温・高圧化、およびタービン内部効率の向上を重点課題として推進されてきた。以下に富士・シーメンスの大容量蒸気タービンの技術開発動向について概要を述べる。

(1) 大容量タンデムコンパウンド機の開発

富士・シーメンスの蒸気タービンは一貫してタンデムコンパウンド機として大容量化を進めてきたことが特徴の一つである。タンデムコンパウンド機はクロスコンパウンド機(二軸並列形タービン)に比べて質量が軽く、設置スペースが少なく済むので、建屋を含む設備費を大幅に低減できるメリットがある。性能の面でも、最終段翼の長大化により、クロスコンパウンド機と同等である。

図1はシーメンス社の3,000 r/min用最大容量機の変遷を、わが国の記録機と比較して示したものである。1970年代にはすでに800 MW タンデムコンパウンド機が実用化され、またPWR(加圧水型原子炉)用としては3,000 r/min 1,100 MW タンデムコンパウンド機が1987年に運転を開始した。火力発電用としては現在、ドイツ・ニーダー

アウセム発電所Kユニット1,000 MW タンデムコンパウンド機が製作中である(2002年運転開始予定)。このタービンは最終段に鋼製の1,150 mm(45.3インチ)翼を採用しており、設計排気圧力が低いため6流排気として性能向上を図っている⁽¹⁾。

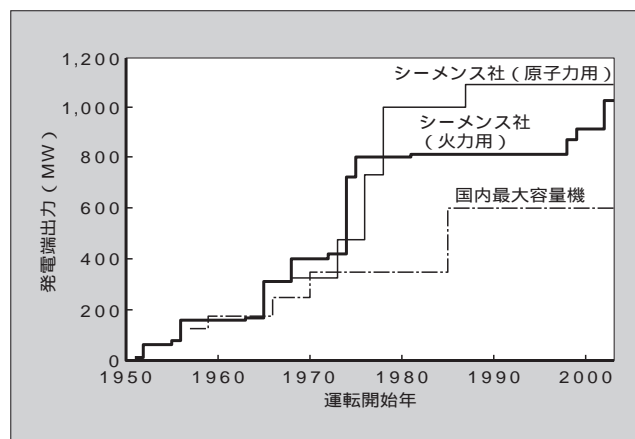
(2) 高温・高圧蒸気条件の採用

シーメンス社は1950年代から、蒸気温度600~650の超高温タービンを14台製作・納入してきた実績がある。主に化学プラントのトップタービンとして用いられ、出力は最大でも125 MWと比較的小容量のタービンではあったが、超高温タービンの貴重な運転経験は現在の高温・高圧タービンの設計に反映されている⁽²⁾。

その後、経済性の観点からドイツ国内では高温化が進まず、蒸気温度は540以下が標準となった。しかし、エネルギー価格の長期的な上昇に加えて、環境問題、特にCO₂排出規制がプラント熱効率の一層の向上を促しており、ドイツの新設機には再び超高温・高圧蒸気条件が採用される傾向にある。現在製作中のニーダーアウセム発電所Kユニット1,000 MW タンデムコンパウンド機には主蒸気圧力25.0 MPa、主蒸気温度580、再熱蒸気温度600の蒸気条件が採用されている。

高温化を進めるに際しては、タービンの基本的な構造は

図1 3,000 r/min用タンデムコンパウンド機の出力の変遷



酒井 吉弘

蒸気タービンの設計、開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部技師長。日本機械学会会員。



中村 憲司

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部担当課長。日本機械学会会員。



和泉 栄

蒸気タービンの設計に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部担当課長。ターボ機械協会会員。

従来と変わらず、材料のグレードアップによって対応することにより、高い信頼性を確保している。

(3) タービン内部効率の向上

蒸気条件の高温・高圧化と併せて、蒸気タービンの内部効率を向上させることも、発電プラントの熱効率向上のために重要である。富士・シーメンスの蒸気タービンは反動段の長所を生かした高効率タービンであるが、後述する三次元反動翼や新世代低圧翼の採用などにより、タービン効率の飛躍的な向上が実現された。

富士・シーメンスが電源開発(株)から受注し現在鋭意据付け中の磯子火力発電所新1号600MW蒸気タービン

(主蒸気圧力 25.1 MPa, 主蒸気温度 600 , 再熱蒸気温度 610)には、上述した技術開発の成果が生かされている。

③ 高温タービン用材料の開発

シーメンス社における高温タービン用材料の開発は、EC諸国の共同研究である COST501 プロジェクトの一環として行われてきた。

COST501 プロジェクトは 600 ~ 620 級の蒸気発電プラントの実用化を目的として、1983 ~ 1997年に EC 諸国のタービンメーカー、ボイラメーカー、鉄鋼メーカー、電力

表1 改良12%Cr鋼試作ロータの化学成分

化学成分 鋼種	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	V	W	Nb	B	N
B	0.17	0.07	0.06	0.007	0.001	0.012	9.34	1.58	0.12	0.27	-	0.059	0.0080	0.015
E	0.12	0.10	0.45	0.008	0.002	0.008	10.39	1.06	0.74	0.18	0.81	0.045	0.0002	0.052
F	0.11	0.03	0.52	0.010	0.005	0.006	10.22	1.42	0.58	0.18	-	0.05	0.0012	0.056

図2 改良12%Cr鋼(E鋼)試作ロータの機械試験結果

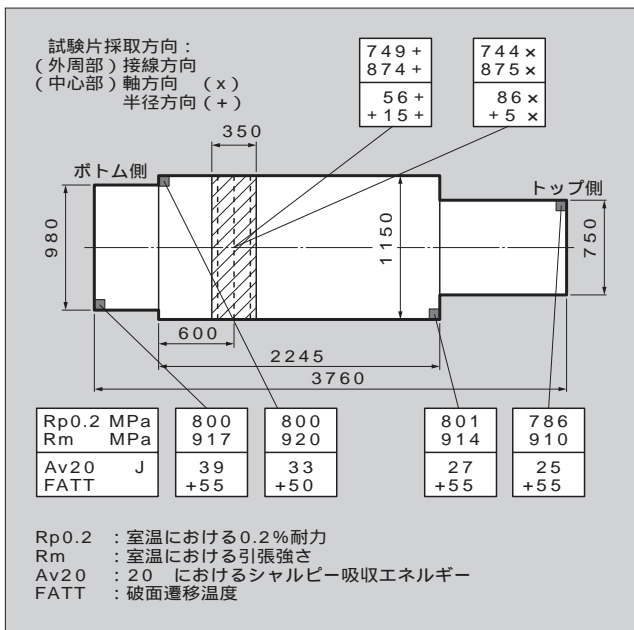


図4 製作中の改良12%Cr鋼(F鋼)試作ロータ

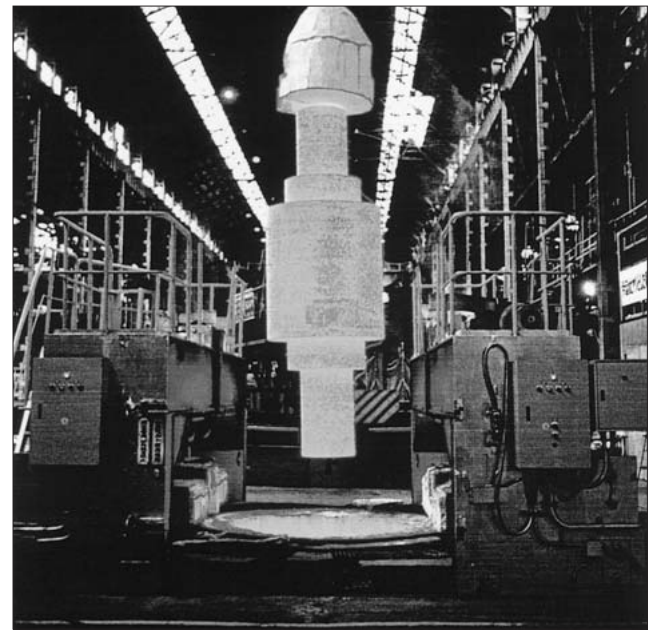


図3 改良12%Cr鋼試作ロータの長時間クリープ試験結果

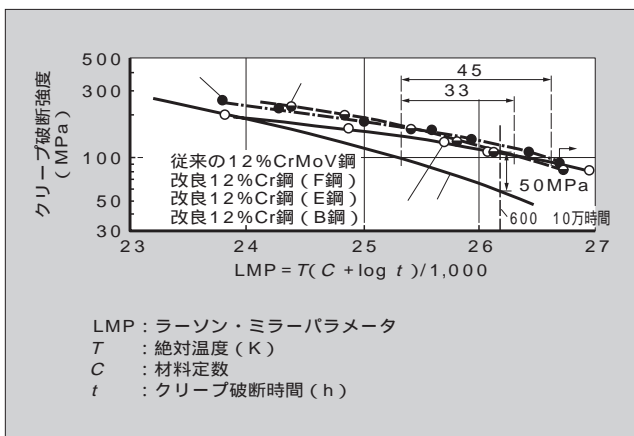
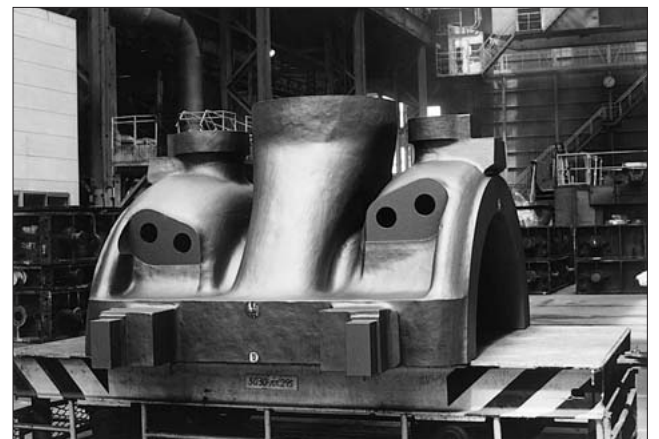


図5 改良12%Cr 鋳鋼製内部ケーシング



会社，研究機関の参加のもとに推進され，大きな成果を上げた。試験片によるスクリーニングを実施した後，表 1 に示す 3 種の実機サイズの試作ロータ（図 2）が製作され，長時間クリープ試験を含む検証試験が行われた。その結果，3 鋼種とも大容量高温タービン用ロータ材として必要な特性を満足することが確認され，まず E，F 鋼を用いたロータが実用化された。E，F 鋼よりさらにクリープ強度が優れている B 鋼については，製造技術上の難しさから実用化が遅れたが，大型試作ロータの製作に成功し，実機への適用が可能になった。図 3 に 3 鋼種の試作ロータの長時間クリープ試験の結果を示す。

富士電機は国内の鉄鋼メーカーと共同で改良 12 % Cr 鋼（F 鋼）を用いた実機サイズのロータを試作し，長時間クリープ試験，高温低サイクル疲労試験などの材料試験を独自に行った。図 4 は製作中の試作ロータの写真である。富士電機が行った材料試験でも，COST501 プロジェクトとほぼ同じ結果が得られ，改良 12 % Cr 鋼の優れた高温特性が確認された。

COST501 プロジェクトでは，600 ~ 620 級の改良 12 % Cr 鋳鋼ケーシング材についても，開発，検証試験を実施し，実用化した。図 5 は富士電機が台塑石化股份有限公司に納入した 600 MW 蒸気タービンの改良 12 % Cr 鋳鋼製中圧内部ケーシングである。このタービンは再熱蒸気温度が 566 であるが，経年的なクリープ変形を小さくする目的で，高温クリープ強度の優れた改良 12 % Cr 鋳鋼を採用した。

なお，EC 諸国は現在，650 級および 700 級蒸気発電プラントの実用化をめざした共同開発プロジェクトを推進している。

4 信頼性向上技術

大容量化，高温・高圧化，高効率化の進む火力プラントにおいて，富士・シーメンスが開発し，実機にて検証してきた事業用タービンの信頼性向上技術について以下に詳説する（図 6）。

(1) つぼ形ケーシング

高圧タービンの外部ケーシングは，厚肉の水平フランジを持たない軸対称円筒形状のつぼ形としている。起動時の加熱が均一となるため，熱応力，熱変形が小さく抑えられる。

(2) 調速段のない全周噴射方式

高圧タービンに調速段のない全周噴射変圧運転を採用することにより，翼根元径を小さく抑え，ロータに作用する応力の軽減，流入部構造のシンプル化，高効率化，軸振動に対する安定性向上を果たしている。また，部分負荷運転時でも各部の温度はほとんど変化しないため，負荷変化に伴う寿命消費がきわめて小さい。

(3) 貫通中心孔のないロータ

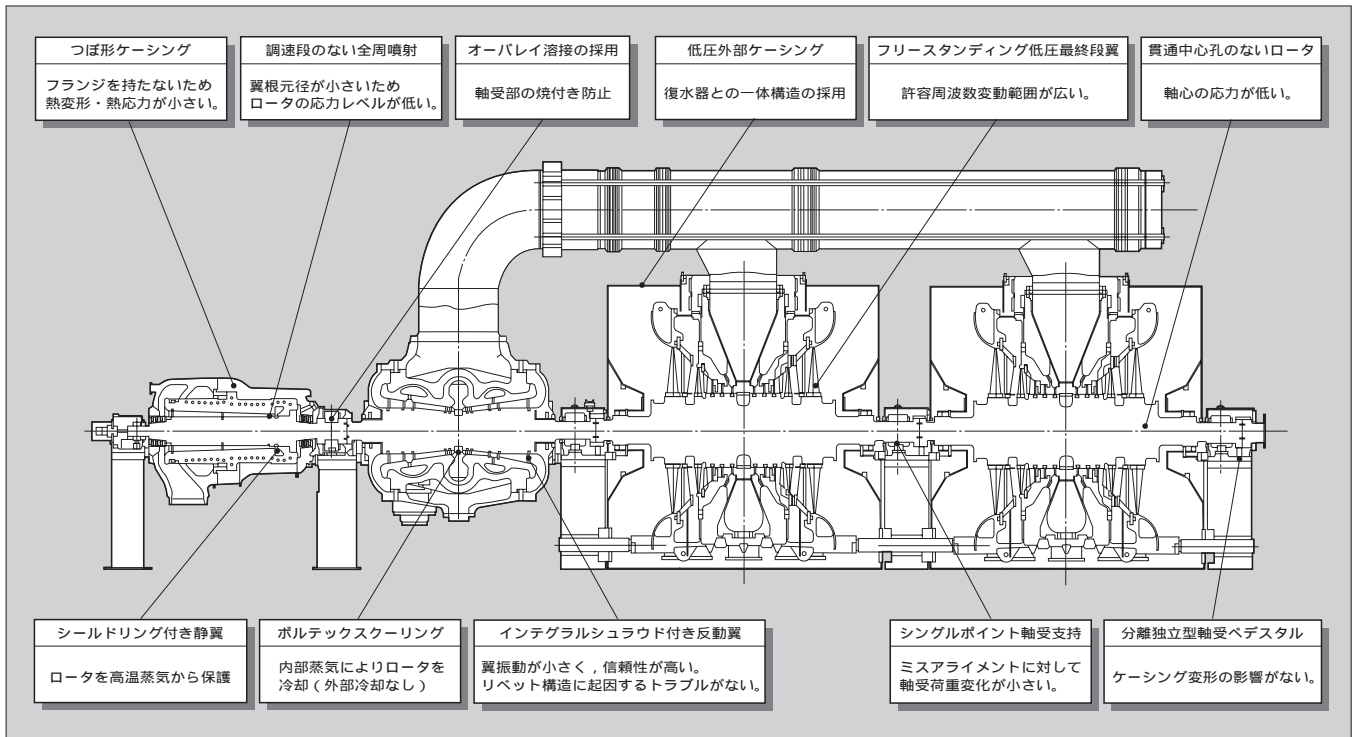
高圧・中圧・低圧ロータは貫通中心孔のない設計とすることにより，軸心応力を低減し，脆性破壊に対する安全性を向上させている。

(4) オーバレイ溶接

高温強度の要求される高圧・中圧ロータに適用される熱伝導率の小さい 12 % Cr ロータの軸受部の焼付き防止対策として，ジャーナル部，スラストカラー部，軸受台貫通部のロータ表面に低 Cr 鋼をオーバレイ溶接している。

(5) シングルポイント軸受支持

図 6 富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービンの特徴



高圧・中圧・低圧タービン間に軸受を各1個配置するシングルポイント軸受支持を採用することにより、アライメント変化に対する軸受荷重変化、曲げ応力変化が小さく抑えられる。そのためダブルポイント軸受支持と比較して、大きなアライメント変化を許容できる。

(6) 分離独立型軸受ペダスタル

軸受台はケーシングに載せず、タービン基礎に直接埋め込む分離独立型としている。これにより配管力、真空力などによりケーシングが変形しても軸アライメントは変化せず、また軸支持剛性が高いため、軸振動特性が向上する。

(7) シールドリング付き静翼

高圧タービン初段には、シールドリング付き静翼を採用し、初段静翼通過後の低温蒸気をロータ表面に流している。これにより、ロータ表面には高温の主蒸気が直接接触しないため、ロータのクリープ寿命消費を低く抑えることができる。

(8) ボルテックススクーリング (図7)

ダブルフロータイプの中圧タービン初段には、シールドリング付き静翼の採用に加え、シールドリングにあけた接線方向の穴から再熱蒸気の一部を高速の旋回流として噴出しロータ表面を冷却するボルテックススクーリングを採用している。これにより、ロータのクリープ寿命消費を低減している。

(9) インテグラルシュラウド付き反動翼

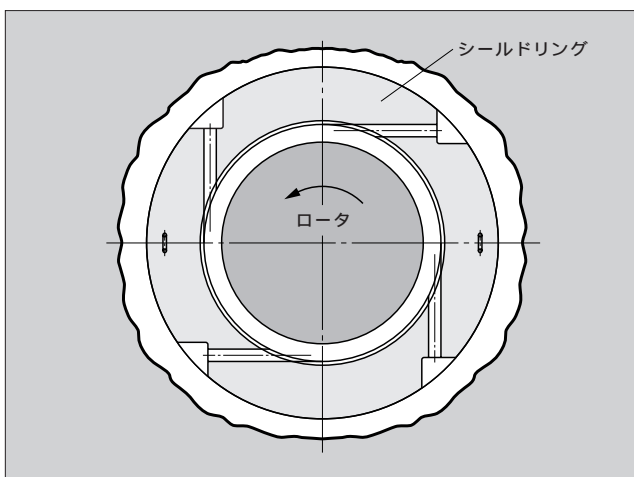
低圧長翼を除く高圧・中圧・低圧タービンの動翼のシュラウドは、翼と一体に削り出したインテグラルシュラウド構造を採用している。テノンをリベット止めする必要がなく、運転中にはシュラウド相互間の摩擦により高い制振効果が得られる。

(10) フリースタANDING低圧最終段動翼

低圧最終段動翼はシュラウドやレーシングワイヤなどの付属物がないフリースタANDING翼を採用している。個々の翼の固有振動数を正確に調律できるため、-5%から+3%までの広範囲の周波数変化に対して連続運転を許容できる。

(11) 復水器一体型低圧外部ケーシング (図8)

図7 中圧タービン流入部のボルテックススクーリング



低圧外部ケーシングと復水器は溶接で一体の真空容器とし、荷重はすべて復水器の台板で支持する構造としている。良好な気密が得られるとともに、真空力がタービン基礎に作用しないため、タービン基礎を軽量化できる。また、低圧内部ケーシングの自重は、外部ケーシングで支持するのではなく、タービン基礎上に設置したタービン前後の軸受台で支持する構造としている。真空力により外部ケーシングが変形しても、内部ケーシングが変位しないため、ラビングに対する安全性が向上している。

(12) 伸び差軽減対策 (図8)

タンデムコンパウンド機では、特に低圧タービンにおける伸び差が問題となるが、中圧外部ケーシングと低圧内部ケーシングを連結ロッドにより軸方向に結合する構造を採用し、低圧タービンの伸び差を小さくしている。

5 性能向上技術

タービン内部効率向上のため、富士・シーメンスは、その大きな特徴となっている反動タービンのメリットを十分に生かした新技術の開発を推進し、逐次実機に適用していくことによって、図9に示す大きな成果を収めてきた。

ここでは、翼を中心に、主な性能向上技術について紹介する。⁽⁶⁾⁽⁷⁾

5.1 反動翼の性能向上

富士・シーメンスにおける蒸気タービンの翼列は、通常、全段、効率の高い反動段で構成されている。反動翼の性能をさらに向上させるため、下記の開発を行った。

(1) 反動翼の完全三次元設計

蒸気タービンの高中圧部に使われる反動段翼列のうち、比較的翼長の短い翼は、発生する損失のうち、壁面付近の境界層に発生する渦流(二次流れ)に起因する損失の占め

図8 復水器一体型低圧外部ケーシング

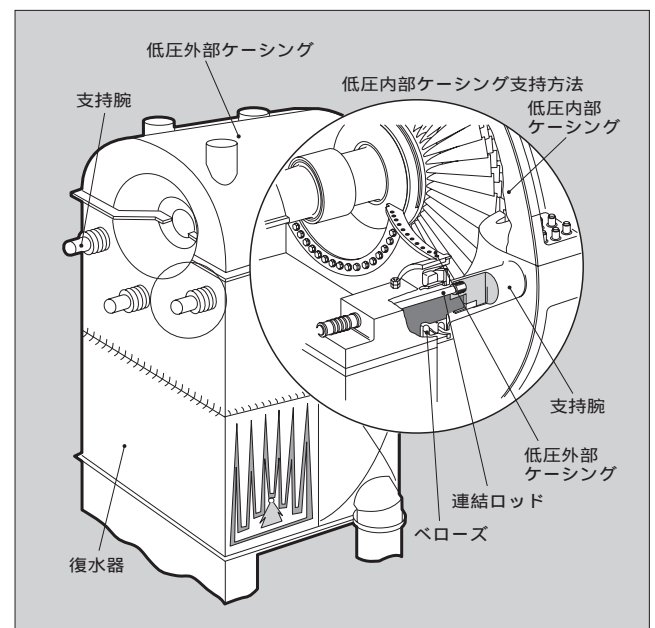


図9 性能向上技術と効率改善量

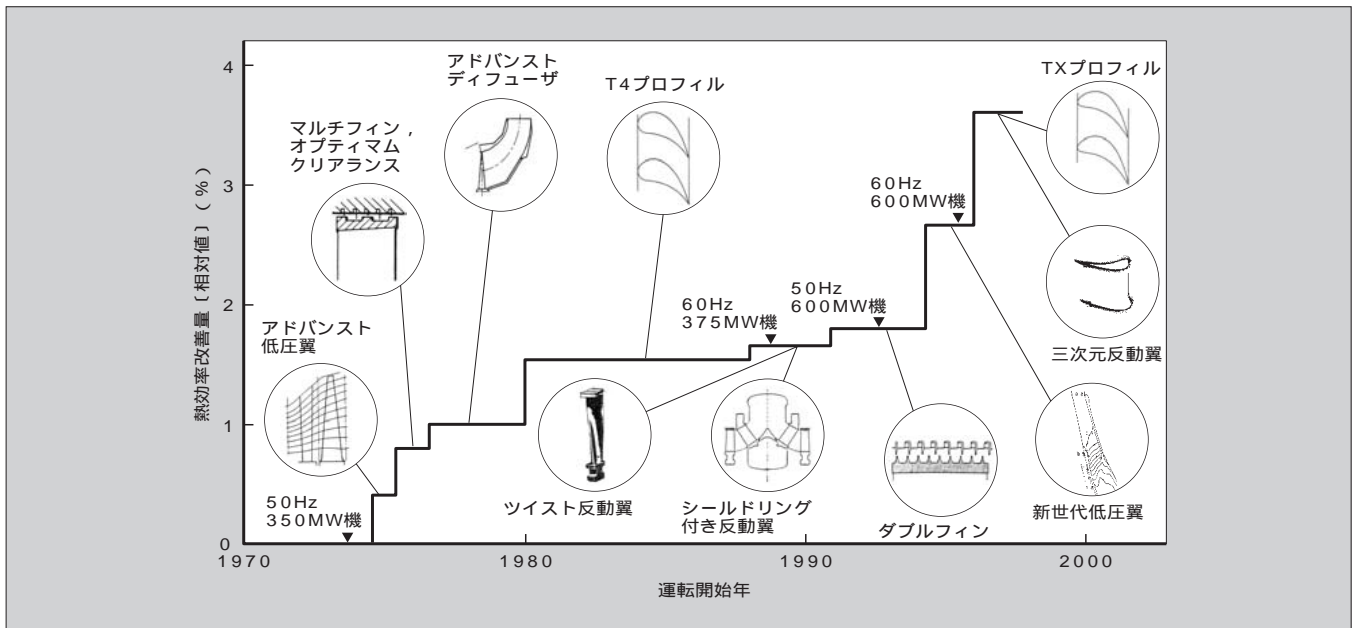
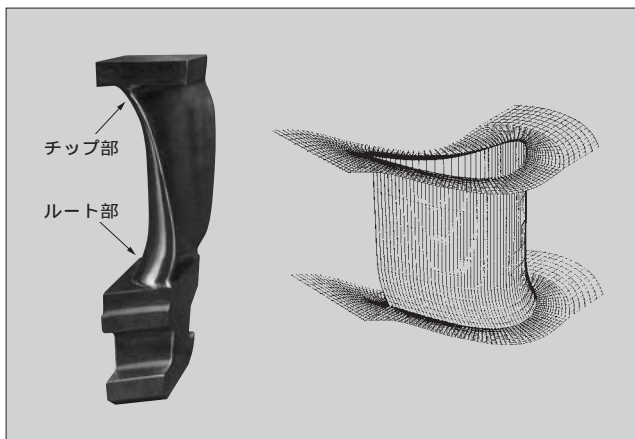


図10 完全三次元設計翼と計算メッシュ



る割合が大きい。この部分の翼列には、従来、翼の長さ方向に同一の翼形断面を持った翼（円筒翼）が使用されていた。しかし最近では数値流体解析技術の進歩に伴い、翼間の粘性流れの解析を精度よく行うことが可能となり、複雑な流れに対する、翼面の傾き、湾曲度などを最適化した三次元反動翼が実現可能となった（図10）。

(2) 高効率反動翼形の開発

従来の反動翼形（T4 プロフィール）より大幅にプロフィール損失を低減させた、新しい反動翼形（TX プロフィール）を開発した（図11）。

新反動翼形は、従来プロフィールより広い流入角に対して、損失が小さいという特性を持っており、円筒翼の翼列効率の改善に大きく貢献している（図12）。

5.2 低圧翼の性能向上

40年以上にわたるフリースタンディング低圧翼の信頼性を維持しながら、性能を飛躍的に高めた新世代低圧翼を開発し、実機に適用している。50 Hz 用としては、1,150 mm

図11 高効率反動翼形

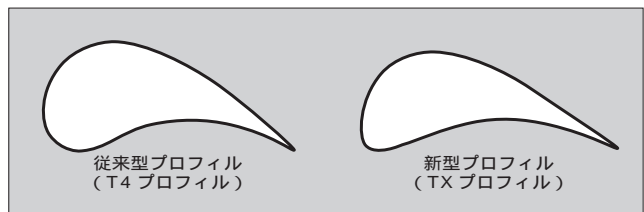
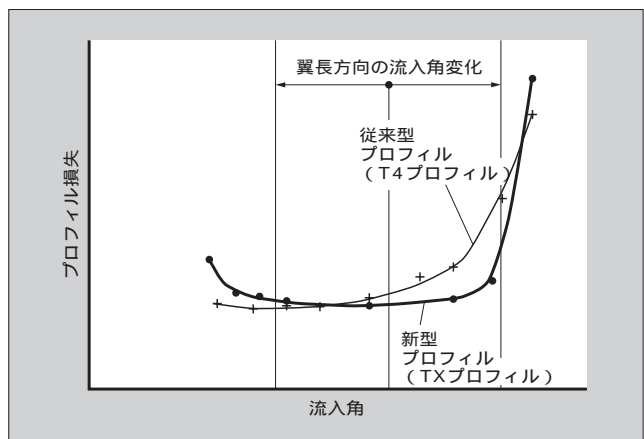


図12 流入角とプロフィール損失の関係



（45.3 インチ）翼の開発を完了し、実機における良好な運転を継続中である。現在、さらに大きい 1,400 mm（55.1 インチ）翼の開発を進めているところである。以下に、新世代低圧翼の効率面での特徴を説明する。

(1) 遷音速プロフィール

近年の数値流体解析技術の進歩により、翼列内の流れを精度よくシミュレートすることができるようになったため、翼列内の速度分布を最適化して、損失の少ないプロフィールを実現することが可能になった（図13）。新プロフィールは遷音速流れに適したコンバージェント・ダイバージェント

図13 新世代低圧翼の解析例と蒸気風洞試験結果

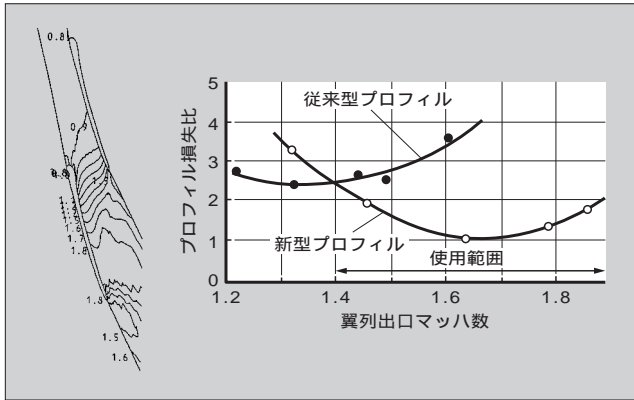
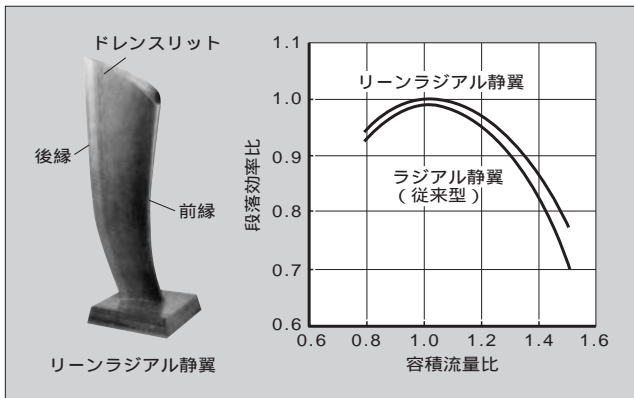


図14 リーンラジアル静翼のモデルタービン効率測定結果



翼形（翼間流路が末広がりになるように設計された翼形）としているのが特徴である。蒸気風洞試験の結果，出口マッハ数が大きい場合には，新翼形を採用することによりプロフィール損失が従来の2分の1以下に低減されることが確認できた。

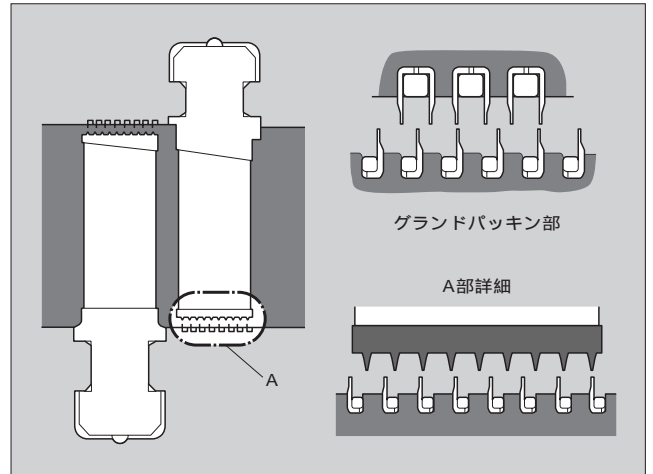
(2) リーンラジアル静翼

三次元タイムマーキング法を用いて種々の翼形状についてフローパターンの変化を比較検討した結果，図14のように，ルート側で周方向の傾斜を持ちチップ側でラジアル方向になるような「バナナ形」の静翼が最適であることが分かった。このようなリーンラジアル静翼を用いることにより，はく離を生じやすいルート付近の流れが大幅に改善される。モデルタービン試験の結果，従来形の静翼に比べ段階効率が2%以上改善されることが確認できた。

5.3 リークージ損失の低減

翼端およびグラウンドのシール方法としては，従来，高・中圧タービンに対してはラビリンズ形，また伸び差が大きい低圧タービンに対してはストレート形のシールフィンが用いられてきた。モデル実験によって種々の形状のシールフィンを比較検討した結果，伸び差の関係でフィンのピッチが大きくなる場合には新しく開発されたダブルフィン形

図15 ダブルフィンの構造



を採用することによって，リークージ損失を減少させることが分かったので，低圧タービンには，このダブルフィンを適用している。図15にダブルフィンの適用例を示す。

⑥ あとがき

富士・シーメンスの大容量高温・高圧タービンは，これまで長年にわたって積み重ねられてきた良好な運転実績をベースに，最新の材料・流力・制御技術を取り入れて，一層の性能・信頼性・運転・保守性の向上を図ったものであり，最近運転開始した実機でも良好な結果が得られている。

今後ともユーザー各位のご指導を得て，高性能で使いやすい蒸気タービンを供給すべく，着実な開発を推進していく所存である。

参考文献

- (1) Zörner, W. : Steam Turbines for Power Plants Employing Advanced Steam Conditions, 10th CEPSI (1994)
- (2) Engelke, W. et al. : Turbines for High Steam Parameters, Int. Joint Power Generation Conference (1994)
- (3) Berger, C. et al. : Steam Turbine Materials : High Temperature Forgings, 5th Int. Conf. Materials for Advanced Power Engineering (1994)
- (4) 山下満男ほか：600 級高温タービン用ロータの開発，火力原子力発電大会（1995）
- (5) Oeynhausien, H. et al. : Steam Turbines for the New Generation of Power Plants, VGB Kraftwerkstechnik, Vol.76, No.12, p.890-895 (1996)
- (6) Drosdziock, A. ; Feldmüller, A. : High-Efficiency Steam Turbines for Coal-Fired Power Plants, Power Gen Asia 95 (1995)
- (7) 中村憲司・加藤秀雄：蒸気タービン設計への流れ解析技術の適用，富士時報，Vol.69，No.9，p.457-460（1996）



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。