小特集・石 炭 火 カ

高効率・高信頼性蒸気タービン High Efficiency High Reliability Steam Turbines

日立製作所は、最近の省資源・省エネルギーの要請に応ずるべく、高効率・高信 頼性蒸気タービン技術の研究・開発に多年にわたる努力を払ってきた。蒸気タービ ンの高効率化のために、長翼の開発を行ない、蒸気通路部の各種損失メカニズムの 分析からそれぞれの要因について効率向上の技術を開発した。各々の技術は既に実 績のある従来技術を基礎とし、性能・信頼性の検証を積み重ねた。信頼性向上のた めに、材料・構造・制御の各面から検討を加え、最も効果的な改善・技術開発を指 向した。これらの努力の成果として、タービン効率の向上で1~2%、タービン各 機器の寿命でも数倍の長寿命を期待することができた。

Ninomiya Satoshi
Hisano Katsukuni
Ôtawara Yasuhiko
Sôma Akio
Moriya Shinichi

□ 緒 言

近年,火力発電設備は,その燃料の多様化とともによりい っそうの高効率・高信頼性が要求されている。最近再び注目 されつつある石炭火力発電設備も例外ではない。高効率化に より,燃料資源の有効活用を図り,また,信頼性向上により, 長寿命製品として稼動率を高めることがその目的である。本 稿では,日立製作所で多年にわたり研究・開発されてきた効 率向上・信頼性向上の技術について紹介し,関係者の参考に 供したい。 に応ずるべく、日立製作所の工場では、研究所との緊密な連 絡のもと多年にわたりタービンの高効率化の研究を行なって きた。この研究では、一貫して各コンポーネントの実証試験 を積み重ね、それを理論で裏付ける方法を採った。更に、研 究の各段階で、損失の発生するメカニズムを見直し、最も効 果的な効率向上策を選択した。このような着実な方法を採っ たため、多年の研究期間を要したが、その成果は現在実証さ れつつある。

2 高効率タービン

我が国の燃料事情を考慮すると、タービンの高効率化は、 大幅な運転経費の節約・貴重なエネルギー資源の有効活用と なり、発電設備メーカーの大きな開発課題である。この要望



2.1 タービン長翼の開発

効率向上の極めて大きな部分を占めるのは、タービン長翼 の開発である。タービン長翼の開発により、排気エネルギー 損失を減少させることができ、これによりタービンの熱消費 率は0.5~1%程度まで向上することができた。タービン長翼 の開発には、複雑に捩れた翼形の流体力学設計をはじめ、材 料強度、翼振動に高度の技術が要求される。そのため、風洞 での翼形性能実験、翼支持部(ダブティル)・翼連結構造の強 度試験、実機大翼の回転振動試験及び蒸気流中での長時間耐



図 | 完成した40in翼 33.5in翼と40in翼を比較して示した。

図2 40in翼ホイール 蒸気流中の翼挙動を,回転数同期のフラッシュ とビデオ装置により観察し,耐久性を確認した。

23

* 日立製作所日立工場

794 日立評論 VOL. 60 No. 11(1978-11)

項目			仕樹	も 比 較		
回 転 数 (rpm)	3,600	3,	000	1,800)	1,500
翼 長 (in)	33.5	33.5	40	38	43	41
平均直径 (in)	90.5	99.5	108	115/127.5	132	138
環帯面積(ft²)	66.1	72.7	94.3	95.3/105.7	123.8	123.4

翼仕様比較 表丨 開発された40in及び43in翼は、環帯面積で従来翼より 30%大きく,効率向上とともに大容量機のコンパクト化が期待できる。

久力試験を積み重ね,各種長翼の開発を行なってきた。最近 では3,000rpm用40in翼, 1,800rpm用43in翼を完成している¹⁾。

この3,000rpm用40in翼は、33.5in翼に比べ翼排気面積が 約30%大きく, また1,800rpm用43in長翼は,38in翼に比べ30 %から17%大きい。この結果、効率向上とともに、蒸気ター ビンの大容量化・コンパクト化をいっそう進めることが可能 となった。

表1に翼仕様の比較を、図1、2に完成した40in長翼とホ イールを示す。

2.2 効率向上策

段落内の損失原因を図解すると,図3に示すような原因が 挙げられる。これらの各項目について次に述べる効率向上策 を研究・開発した。

(1) コントロールド・ボルテックスノズル²⁾



蒸気流を得ることができる。



タービン内部効率は、動翼及びノズルの形状を決定する流 路設計に大きく支配される。従来のボルテックス理論に基づ く蒸気流路では、翼平均直径近傍では最適流路となっている ものの、翼先端付近では理論上の流れと実際の流れとに差が あり,この結果流れに乱れを生じ、タービン内部効率の低下 をもたらしていた。研究・開発されたコントロールド・ボル テックス理論では、ノズル翼の径方向に適正な捩りをもたせ ることにより、実際の流れ方向を動翼の入射角と一致させて いる。また、半径方向に膨張しながら流れて翼先端部から漏 れる蒸気を軸心方向に抑え、この結果漏れ蒸気を減少させ、 これらの効果でタービン内部効率を向上させている。 図4, 5 効率改善量は、それぞれの段落で0.5%~1%に上る。この コントロールド・ボルテックスノズルの最適な使用範囲は、ノ ズル高さにして50~200mmである。

(2) チタン合金止め翼の採用

24

動翼をディスクに植えるために、各段落の動翼のうち1本



図 5 コントロールド・ボルテックスノズルの理論によるノズル 出口角 ノズル高さに応じて、ノズルをわずかに捩り最適なノズル出口角 を得た。

分は動翼ダブティル挿入用溝を設けており、その部分には止 め金を入れて他の動翼の位置を固定することが行なわれてい る。この場合、止め金の遠心力は両隣の動翼のダブティルフ ックで支えるため、そのままでは止め金に動翼プロフィルを 載せることができない場合がある。すなわち、両隣の動翼ダ ブティルフックにかかる遠心力が過大になるからである。そ こで、チタン合金を用いるとチタンは比重量が鋼材の半分で あるため,止め金に動翼プロフィルを載せた止め翼として使 用することができる。またチタンの特質として、縦弾性係数 も比重量と同じく小さく,この結果遠心力による伸び量が合 金鋼である他の動翼とほぼ同一になり、群翼として組み合わ せることが可能となる。図6,7に流路状況と止め翼の効果 を示す。

(3) マルチプルフィンシール法(翼頂部シール法)

ダイアフラムとロータ間のシールはラビリンス式パッキン によって十分にシールすることができる。翼頂部のシールは 構造的には困難であるが, 動翼先端のテノンを埋込み形とす ることによってシール可能な面を増大させ、そこにフィンを 4 枚配置するシール法が効果がある。図8 に構造と効果を示

タービン段落損失の原因 ⊠ 3 タービン段落損失の原因を分析し, それぞれについて研究・開発を推進した。

す。埋込み形のテノンは、原子力タービン及びロータ伸びの 大きい大形火力タービンで既に実績のある技術であり、その 技術と複数フィンとを組み合わせることにより、効率向上の 成果を得たものである。シュラウドを階段状とし、フィン間 隔を適正に配置した4枚フィンによるシールが最も効果的で あるが、ロータ伸びが大きく、シュラウドを階段状にできな い場合にはフィン枚数を増加することによってもシール効果



図 6 止め金部,止め翼部の流路 止め金部では蒸気力が回転力に変換されず,また蒸気乱れが発生する。





図8 マルチプルフィンシール法(翼頂部シール法) 動翼先端のテ ノンを埋込み形とし、シール可能な面を増大させ、そこにフィンを配置する。 この結果、リーク蒸気を大幅に低減することができる。



図7 止め翼の効果 速度比(W/V₀)0.5近傍では,止め翼|本当たり段 落効率0.65%の向上が見込める。翼本数によっては向上量|%を超える場合も ある。

を高めることができる。更に、ダイアフラムとディスク間に ラジアルフィンを追加することにより、リークする蒸気量は 25%ほど低減することができ、この蒸気のもつエネルギーは 動翼内で回転エネルギーに回収され、タービン内部効率を向 上させる。

(4) 中圧排気室スクロール

中圧排気部にスチームガイドを設けて、排気流れを整流す ることは従来から行なわれてきたが、これらのガイドを排気 流線に即した形状に改善したものが中圧排気室のスクロール である。中圧排気はケーシング上部から低圧タービンへ導か れるから、上半部では上方へのガイドとし、下半部では排気 流れが乱れなく上方へ旋回するよう曲率をもたせた形状とし ている。図9に、この中圧排気室スクロールの効果を圧力降 下係数で示す。ここで、 $\Delta P_s=1.0$ がタービン内部効率の0.2 %以上に相当する。

(5) CCS 手法の採用



図 9 中圧排気室スクロール取付け 動圧と圧力損失の比である圧力 損失係数で示すと、スクロール設置により圧力損失はほぼ0となる。

ン効率向上に大きく寄与している。現在までの経験では 0.1 %から 0.2%の効率向上を期待することができる。またこの

25

CCS EltTurbine Computer Clearance Control Sys-	ような電子計算機による管理は, 各部品の品質維持にも好影
temの略称であり、電子計算機によってタービン組立てのシ	響を与えており、波及効果は大きい。図10に間隙偏差を示す。
ミュレーションを行なう手法である。各タービン部品の機械加	
工段階で、タービンの回転体と静止体の重要間隙に関する部	8 高信頼性タービン
品の寸法を電子計算機に記憶させ、タービンの組立時に間隙	3.1 材料技術の開発
がどのような寸法になるかをシミュレーションする手法である。	(1) 高靱性ケーシング
この結果、部品の集積偏差が極めて小さく抑えられ、タービ	蒸気タービンの主弁類, チェスト及び車室などの主要鋳鋼

796 日立評論 VOL. 60 No. 11(1978-11)



図10 CCS手法による間隙
偏差の減少 CCS手法により、
間隙の目標値に対する偏差がまに
減少する。

高靱性材……改良熱処理法 (FATT14°C, HB188) 10⁰



図II Cr-Mo-V鋳鋼の特性
開発材(高靱性材)では,衝撃特性,
クリープき裂進展速度とも,従来
材に比べ大きく改善された。

品には低合金鋼が使用され、中でも蒸気温度の高い部分には Cr-Mo-V鋳鋼が採用されている。Cr-Mo-V系鋳鋼は高温 破壊強度が非常に優れており、また焼入れ性も良いが、反面 溶接後の応力除去焼なまし割れ(SR割れ)を生じやすい。

高温破壊に対する安全性を増すには、高温破壊強度が優れ ているというほかに高温延性、靱性の向上が重要である。そ こで従来の規格内で焼入れ性を増すとともに、SR割れ感受 性の低減、クリープ破断伸びの向上をねらって研究を行ない、 クリープき裂進展速度が著しく小さく、かつSR割れ感受性 の低い、ケーシング材の信頼性を大幅に改善した材料の開発 に成功した。図11にその特性を示す。 (2) 最終段長翼 (a) ステライト板のき裂防止対策 最終段落用長翼のエロージョン防止のために取り付けて あるステライト板は、単機出力の増大に伴う長翼化のため、 取付方法を従来の銀ろう付方式から溶接方式に改善されて いる。近年,この溶接方式のステライト板に応力腐食によるものと推定されるき裂の発生がみられる。日立製作所工場では、このき裂発生防止対策として、溶接方法及びステライト板の材質検査法の改善を行ない良好な結果を得ている。

表2に、ステライト板の構造及びステライト板溶接法の 変遷を示す。図12は、エロージョンシールド構造の一例を 示すものである。

(b) エロージョン防止対策

湿り蒸気による最終段落翼のエロージョン防止対策とし

ては,ステライトエロージョンシールドを取り付けるほか に,適当なドレン排出構造をもったダイアフラムを採用す るのが効果的である。

ドレン排出のための構造によっては,収集したドレンを 翼に当ててしまう結果となり,そのような場合には,翼の 先端部分にVノッチエロージョンを発生させることがある。 そこで,信頼性の高いドレン排出機構を得るために,改

26

American and a second second second second											
区分	日立製作所										
項目	原設計	改訂-1	改訂-2								
溶 接 棒	インコネル	インコネル	インコネル								
ステライト板材質	旧規格	新 規 格 + 溶体化処理	新 規 格 + 溶体化処理								
表 面 処 理			ショット ピーニング								
検 査 法			HOT DYE CHECK法								

表 2 エロージョンシールド用ステライト板溶接法の変遷 溶接 方法, ステライト板の材質検査法の改善を行ない, 良好な結果を得ている。

良形ダイアフラム構造を採用し良好な運転実績を得ている。 図13にドレン排出機構の改善内容を示す。

(c) 低圧排気室スプレーの温度制御とグランド蒸気減温器 の設置

変圧運転を行なうユニットでは、30%以下の低負荷でも 再熱温度が一定に保たれることになり、復水器真空が低下 した場合には低圧タービン排気が湿り域から飛び出てしま う傾向にある。このことは、必然的に排気室内の温度を上 昇させることになり、スプレー水を噴射して、排気室の冷 却を行なう必要があるが、この場合、噴射された水滴を最 終段翼が巻き込んで翼根元部のエロージョンの原因となる ので、長時間運転は避けなければならない。



図12 溶接式エロージョンシールドの構造(長翼の例) フォーム ドエロージョンシールドは厚肉で、エロージョンに対する抵抗が大きくなっている。

この対策としては、スプレー水の噴射時期を従来のよう にタービン負荷によって決めるのではなく、室内の温度を 検出して必要な量だけスプレーさせる方法をとるなど、ス プレーしたままでの長時間運転を避けることも運転上重要 なこととなる。

3.2 熱応力設計

(1) 起動·停止条件

蒸気タービンを停止すると、タービンはその熱容量に応じ てしだいに冷却され、長時間停止後の起動時には、通気温度 に比較して相当低い温度となる。したがって、適正なメタル マッチングを行なうには、冷却されたタービンと通気温度と の差が問題となり、タービンが許容できる温度差以下でなけ れば、起動時暖機が必要となる。通常、急速起動を行ないた い場合には、停止時のメタル温度を高くしてタービンが冷却 しにくい条件とし、起動時にはメタルマッチングが適正にな るように蒸気温度を制御しボイラの運転を行なうことになる が、再熱タービンでは、通気時の再熱温度制御が難しく、(主 蒸気温度を適正にすると、再熱温度は下がる傾向がある)中 Eタービンの熱応力も考慮する必要が出てくる。このように 起動時の温度条件の適正化のためには、タービンとボイラと の十分な協調が必要となる。

図14にタービン停止~起動時のメタル温度変化の例を示す。



図13 ドレン排出装置の構造 ダイアフラム外輪側面に沿って流れる 水滴流を,最終段動翼に当てることなくドレンコレクタで収集する構造とした。

近の翼車付け根のパッキン部で熱応力が最大となる。したが って、この部分でのロータ形状に十分な検討を行ない、応力 集中係数の低いパッキング形状を採用することが最も有効な 対策となる。

ロータ形状については、古くは左右にヒートグルーブをも った従来形ロータ形状が使用されていたが、最近では低サイ クル疲労強度の向上のために、コーナ半径を増大した新形の ロータ形状が専ら採用されている。フラットロータ形状では、 更にコーナ半径を大きくとることができ、疲労強度を一段と

27

(2) フラットロータ形状	向上させる。ただし、フラット形パッキンでは蒸気漏れ係数
ロータに発生する熱応力の大小は,温度変化率(℃/h)と	が大きくなるため、歯数を増加させるなど蒸気漏れ防止に努
ロータ形状による応力集中係数(ひずみ集中係数)に大きく影	めなければならず、高温度の熱応力的にクリティカルな段落
響される。	にだけ適用する。図15にロータ寿命損耗率の比較を示す。
タービンロータの中で最少のコーナ半径を採用しているの	(3) コンバインドガバニング方式
はパッキンくし歯の部分であるが、これと高温度と隣合う翼	起動~停止時の温度変化幅を低減するにはスロットルガバ
車の遠心力とが併合して作用する高圧,中圧それぞれ初段付	ニング方式とするのが有効であるが、この場合には、高負荷

798 日立評論 VOL. 60 No. 11(1978-11)



図14 タービン停止~起動 時のメタル温度変化例 ここでの要点は、①メタルマッチ ング温度(MHP, MIP)を小さくす ること, ②温度変化幅(ΔTHP, △TIP)を小さくすることである。





図15 タービンロータの寿命損耗 同一のメタル温度変化幅に対し, ロータ形状改善により同一の寿命損耗で温度変化率を大きくとることができる。

時のタービン熱効率が若干低下する。コンバインドガバニン グ方式では、高負荷時にはノズルガバニング方式とし、低負 荷時にはスロットルガバニング方式に移行させて両者の長所 図16 コンバインドガバニング方式の特性 コンバインドガバニン グでは、高負荷側ではノズルガバニングの特性をもち、低負荷側ではスロット ルガバニングの特性をもっている。

言 結 4

最近の大形火力発電タービンの効率と信頼性に関する技術 開発状況と成果について報告した。これらの技術開発は、日 立製作所の工場と研究所が緊密な協力の上で行なわれたもの であり、本稿ではその成果をまとめて紹介した。関係各位の 参考になれば幸いである。

を	$+ \cdot$	分	に	生	か	L	7	62.	る。	3	Z 1	61	こ化	生自	目と	: 衫	刀毛	史温	記馬	EO)	臣任	くを	刁	ミす	0
	コ	ン	13	イ	ン	ド	ガ	バ	Ξ	2	グ	方	式	は	,	蒸	気	加	減	弁	0	開	閉川	頁)	序を	12
変	化	3	せ	る	2	と	に	よ	っ	て	容	易	に	達	成	で	き	る	技	術	で	あ	ŋ,		実終	責
機	\sim	Ø	適	用	に	際	L	て	も	力	Д	を	取	ŋ	替	Ż	る	だ	け	の	変	更	でそ	斉	む。	
	な	お	,	5	の	新	技	術	は	日	立.	製	作	所	独	自	Ø	も	の	で	あ	ŋ,	围	旡	に 国	E
内	及	び	輸	出	向	け	9		ビ	ン	に	多	数	採	用	3	n	て	お	ŋ .	,	ま	た思	Æ;	納品	
に	対	す	る	改	造	に	も	適	用	L	た	例	が	あ	る。	þ										

28

参考文献

- 1) 久野, ほか2名:最近の1,000MW級大容量蒸気タービン, 日 立評論, 59, 259 (昭52-4)
- A. Sohma, et al.: Development of Large Steam Turbine 2) with Higher Efficiency, Hitachi Review Vol. 27, 153 (1978)