

# 最近の1,000MW級大容量蒸気タービン

## Recent Technique of Large-Scale Steam Turbines

昭和52年2月、日立製作所製作の最大容量機で、かつ国内でも最大の出力機である東京電力株式会社納め袖ヶ浦火力発電所3号機1,000MW蒸気タービン設備が営業運転を開始した。本稿では、この50Hz 1,000MW蒸気タービンの運転データ及びタービンの特徴について紹介するとともに、将来の60Hz 1,000MW蒸気タービンの基本計画概要と高性能・高信頼性の要求にマッチした新技術の適用などについて述べる。

久野勝邦\* Hisano Katsukuni  
 宮井匡彦\* Miyai Masahiko  
 森谷新一\* Moriya Shin'ichi

### 1 緒言

最近運転に入った東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所納めの50Hz 1,000MW蒸気タービンは、日立製作所の最新の技術を駆使して設計・製作されたもので、これらの新技術は将来の60Hz域向け1,000MW級蒸気タービンの計画にも適用できるものである。

現在、60Hz域では600~700MWまでの運転実績が出ており、これらの大容量機でも変圧運転方式を導入して中間負荷火力とするなど、種々の試みが行なわれているが、将来の60Hz域の1,000MW級プラントを考える場合には、原子力発電プラントが運転開始することを考慮しても、なおベース負荷運転を基本とし、同時に電力需用の変動に追従するために部分負荷運転時の高効率化も十分に考慮する必要がある。

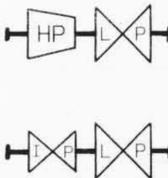
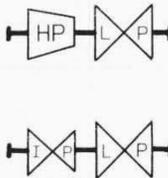
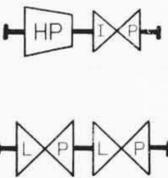
日立製作所では、現在50Hz 1,000MW蒸気タービンでの好調な運転実績を基礎に、60Hz 1,000MW級蒸気タービンの設計を完了しているが、その中には43in最終段翼の特性改善、高効率段落設計、大径軸受の開発、電子ガバナの性能向上など、特記すべきものも幾つか挙げられる。以下に、最近の1,000MW級蒸気タービンの計画概要と、蒸気タービン構造の特徴について紹介し、関係者の参考に供したい。

### 2 最近の大容量機とタービン形式

我が国の50Hz域での単機容量の増大は、350MWから600MW、次いで1,000MWと一定のステップで出力増加が行なわれてきた。しかも、どのタービン形式もクロスコンパウンド形であり、最終段翼長の増大がそのまま出力増加となって表われている。一方、60Hz域では、出力が多様であるのと同時に、車室数、再熱段数、蒸気温度などかなりのバラエティーがみられる(表1, 2)。しかし、最終段翼長としては33.5inが最長であり、これ以上の出力増加に対しては新しい長翼が必要となってくる。また60Hz機の特徴として、従来はタンデムコンパウンド形が採用されていたが、1,000MW級プラントになると1,800rpm低速部を採用する必要性が生じ、クロスコンパウンド形を採用しなければならない。

このように、将来の60Hz 1,000MW級蒸気タービンは、形式的、構造的に50Hz 1,000MW蒸気タービンとほぼ同様なものになることが分かる。すなわち、クロスコンパウンド形4車室4流排気方式とし、最終段には1,800rpm用43in長翼を用いた3,600/1,800rpm機となる(表3)。43in長翼は、50Hz 1,000MWの41in長翼とほぼ同等の環帯面積をもち、1,000MWタービンの熱効率向上に大きく寄与するであろう。

表1 50Hz機の標準仕様 50Hz機では1.7倍の割合での出力増加がこれまで採用されている。

出力項目	350MWタービン	600MWタービン	1,000MWタービン
第1号納入機 営業運転開始年	1968	1971	1977
タービン形式 回転数 (rpm)	CC4F-26* 3,000/3,000	CC4F-33.5 3,000/3,000	CC4F-41 3,000/1,500
車室数	4 	4 	4 
主蒸気条件 (kg/cm <sup>2</sup> ・g-°C/°C)	169-566/566	246-538/566	246-538/566
最終段翼長 (mm)	663.6(26in)	850.9(33.5in)	1,041.4(41in)

注:\* TC4F-26(3車室形)も採用されている。

図1は、タービンプラント出力と最終段長翼環帯面積との相関関係を示しているが、両1,000MWプラントともに従来の実績機よりも余裕をもった点にプロットされており、燃料費の高騰が予想される将来でも十分な経済性を維持できるであろう。

### 3 1,000MW級蒸気タービンの構造

1,000MW級蒸気タービンでは、41in、又は43in長翼が必要とされるため、高圧部-中圧部から成る高速軸(3,000rpm又は3,600rpm)と、低速軸(1,500rpm又は1,800rpm)の低速部との組合せとなる(図2)。

なお、アメリカTVA社の例では1,300MW蒸気タービンに両軸ともに3,600rpmとした6車室から成るクロスコンパウンド形が採用されており、我が国及びアメリカのメーカーが採用しているデュアルスピード方式(高速軸/低速軸)とどのような差があるのか検討の余地が残っているが、この方式では車室数が増大するとともに、保守点検因子が増加することが

\* 日立製作所日立工場

表2 60Hz機の標準仕様 60Hz機では、表に示すように種々の出力、形式がこれまで採用されている。

項目	350MWタービン	450MWタービン	500MWタービン	600MWタービン	700MWタービン	1,000MWタービン
第1号納入機 営業運転開始年	1971	1973	1974	1973	—	1977
タービン形式 回転数 (rpm)	TC4F-26 3,600	TC4F-30(又は33.5) 3,600	TC4F-30(又は33.5) 3,600	TC4F-33.5 3,600	TC4F-33.5 3,600	CC4F-43 3,600/1,800
車室数	3 	3 	3 	4 	4 	4 
主蒸気条件 (kg/cm <sup>2</sup> ・g-°C/°C)	169-566/538	246-538/566	246-538/538	246-538/552/566	246-538/566	246-538/538(566)
最終段翼長(mm)	663.6(26in)	762(30in)又は 850.9(33.5in)	762(30in)又は 850.9(33.5in)	850.9(33.5in)	850.9(33.5in)	1,092.2(43in)

表3 1,000MW蒸気タービンの主要仕様 東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所3号機1,000MWタービン(50Hz)と、これをベースに設計した60Hz向け1,000MWタービンの仕様を比較して示す。

項目		比較区分	50Hz向け	60Hz向け
		単位		
定格出力		kW	1,000,000	1,000,000
タービン形式		—	CC4F-41	CC4F-43
回転数		rpm	3,000/1,500	3,600/1,800
車室数		—	4 	4 
主蒸気圧力		kg/cm <sup>2</sup> ・g	246	246
主蒸気温度		°C	538	538
再熱温度		°C	566	538(又は566)
排気真空		mmHg	722	722
抽気段数		段	8	8
タービン段数	高圧部	段	(初段のみ) 1×2流+8	(初段のみ) 1×2流+6
	中圧部	段	6×2流	5×2流
	低圧部	段	10×4流	8×4流
	計	段	25(52ホイール)	20(58ホイール)
最終段翼	翼長	mm	1,041.4(41in)	1,092.2(43in)
	平均直径	mm	3,505.2(138in)	3,352.8(132in)
	周速	m/s	357	419
	環帯面積	m <sup>2</sup>	45.86(493.6ft <sup>2</sup> )	46.01(495.3ft <sup>2</sup> )
外形寸法	プライマリー全長	m	17.27	17.03
	セコンダリー全長	m	24.78	23.83
	2軸間距離	m	11.28	11.28
構造	高圧初段	—	複流形	複流形
	アドミッション数	—	2	3~2
	中圧ロータ	—	12クロムロータ材	538°C再熱=Cr-Mo-Vロータ材 566°C再熱=12クロムロータ材
	低圧ロータ	—	全段焼ばめロータ	全段焼ばめロータ
制御装置	调速機	—	電子ガバナ(EHC)	電子ガバナ(EHC)
	主蒸気止め弁	個	4	4
	蒸気加減弁	個	4	4
	組合せ再熱弁	個	2	2

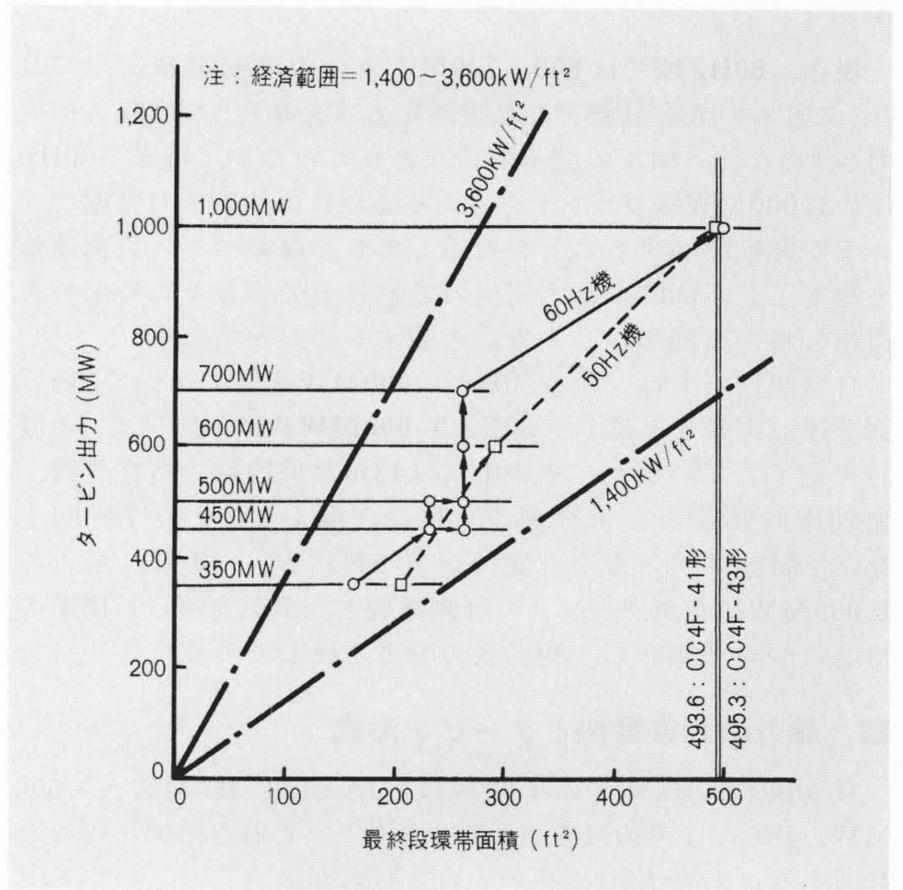


図1 タービン出力と最終段環帯面積の関係 1,000MW CC4F-41形(50Hz), CC4F-43形(60Hz)は、従来実績機に比較し環帯面積に余裕があり、熱効率が向上している。

懸念される。いずれにしても、最終段翼長は既設計の中より選択することになるため、おのずと車室数、回転数などが制限されるわけで、それぞれのタービンメーカーで最も信頼性が高く、熱効率の優れた形式を選択することがユーザー側からみても望ましいこととなるであろう。

日立製作所の場合、60Hz 1,000MW級蒸気タービンの計画では、50Hz 1,000MW蒸気タービンの形式を踏襲し、実績機の技術を全面的に生かして、信頼性の高い機械にしたいと考えている。次に、日立製作所で計画された60Hz 1,000MW級蒸気タービンの構造の特徴について紹介する。

(1) 43in最終段長翼

表4に43in長翼を他の長翼と寸法比較して示した(図3参照)。43in長翼については、運転周波数範囲を広げ、信頼性を増すために実物翼による試作回転試験を進行中である。

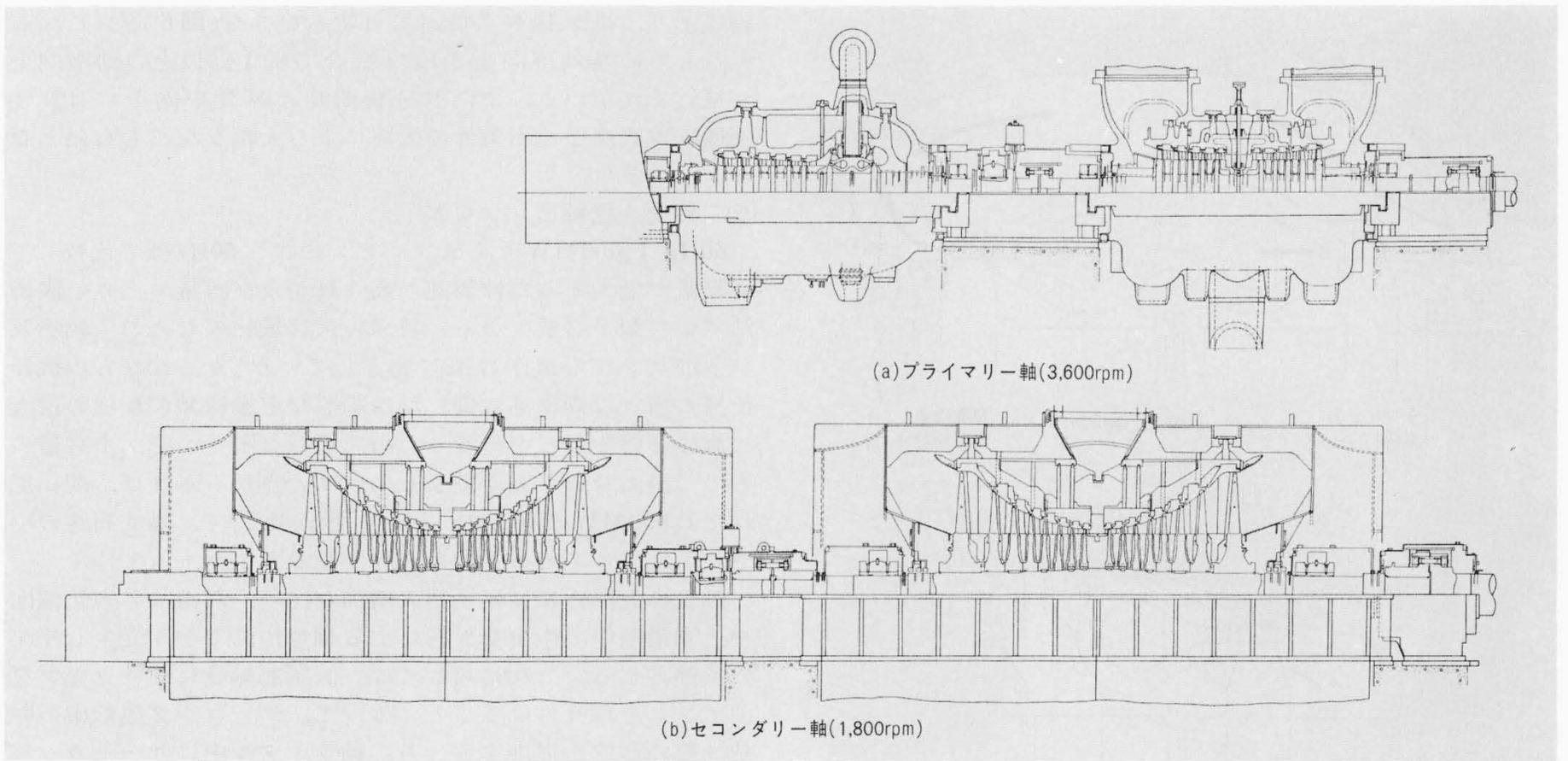


図2 CC4F-43形蒸気タービン断面図 将来の60Hz向きCC4F-43形タービンの断面を示す。

表4 1,800rpm用長翼の仕様 日立製作所が試作中の43in長翼の仕様を、1,800rpm用実績最長の38in長翼と比較して示す。

項目	比較区分		(1) 38in長翼 (実績最長)	(2) 43in長翼	(2)/(1)
	単位				
常用回転数	r.p.m		1,800	1,800	—
翼プロフィール部	翼長	mm	965.2	1,092.2	1.13
	平均直径	mm	3,238.5	3,352.8	1.04
	環帯面積	m <sup>2</sup>	8.85	11.50	1.30
	根本幅(軸方向)	mm	165	208	1.26
周波数変動許容範囲	Hz		58.5~60.5	58.5~60.5	—

(2) 焼ばめ式低圧ロータ

低速回転機では、ロータ寸法が大形となり、シャフトとディスクの素材を別々に製作し、ディスクに翼を植込んだ後、シャフトに焼ばめすることになる。このロータ構造は、原子力用蒸気タービンに広く採用されており製作上の問題はないが、火力用蒸気タービンでは低圧入口蒸気が比較的高温となるために、入口2段落にはピンブッシュ形ディスクを採用しなければならない。

(3) 複流形高圧初段

蒸気タービンの部分負荷効率は、調速方式の選択によって大幅に改善できる。従来、1,000MW級蒸気タービンでは、高圧初段翼の蒸気曲げ応力の制限から絞り調速方式が採用されていたが、50Hz 1,000MW蒸気タービンでは、高圧初段だけを複流形として翼応力の低減が図られている。一方、この複流初段構造では、翼応力が低減されたのに反して複流ノズルボックスの構造上の問題があって、結果として50Hz 1,000MW蒸気タービンでは2アドミッション方式が採用されるにとどまっている(図4)。ただし、単流ノズルボックスを採用している500MW蒸気タービンでは、4アドミッション方式を採用している例もあるので、将来複流ノズルボックスの改善

が図られることになろう。

高圧初段翼としては、単流当たりの出力負担が半減したことによって、従来どおりの鞍形ダブルティルと、ダブルテノンの組合せが可能となった。これら複流高圧初段の構造については、ノズルボックス及び高圧初段翼のそれぞれについて試作を実施済みである<sup>1)</sup>。

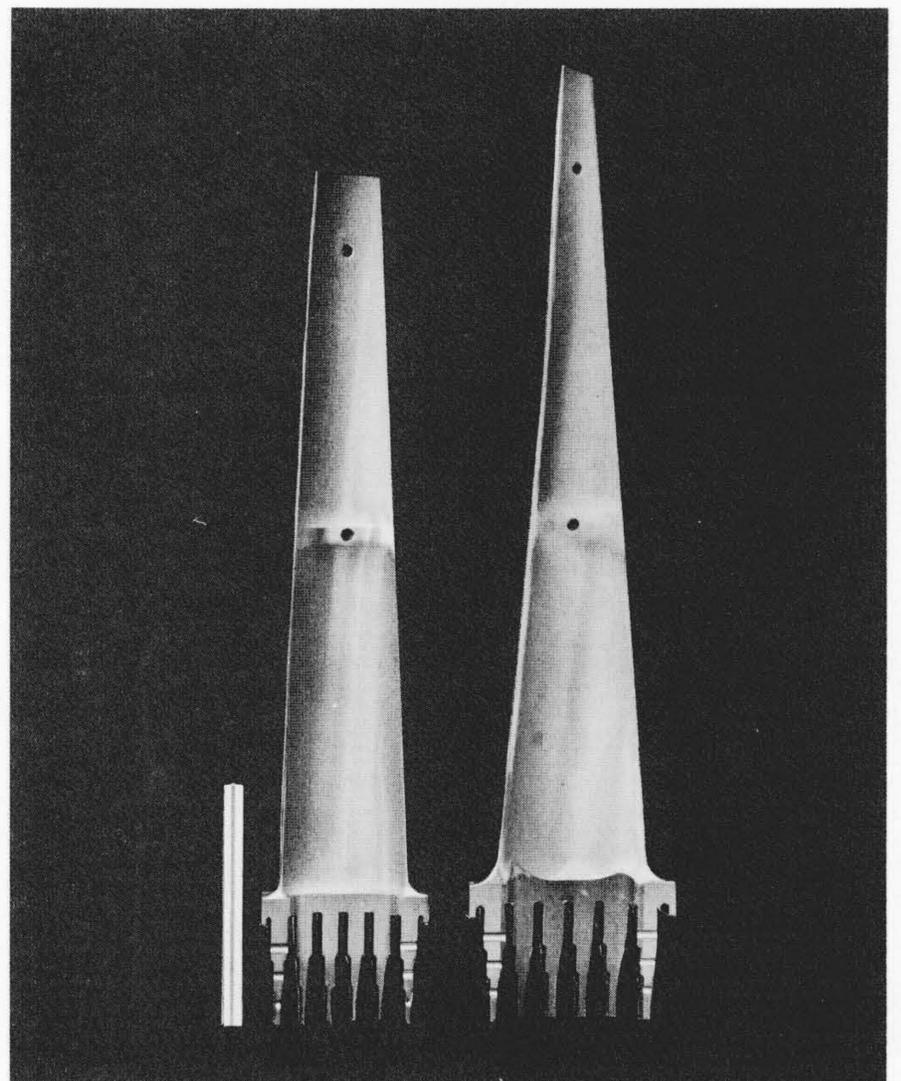


図3 38in長翼(左)と43in長翼(右) 日立製作所で製作した38in長翼と43in長翼の比較(いずれも1,800rpm用)を示す。

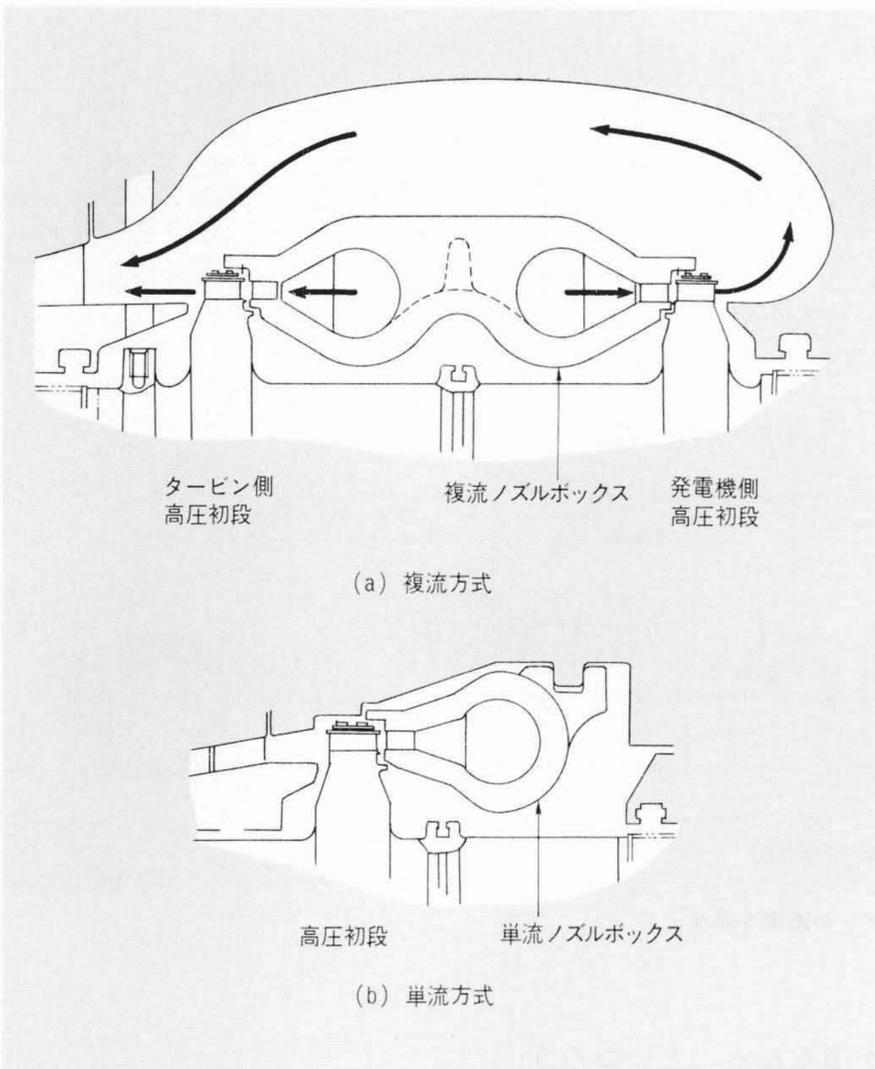


図4 高圧初段の構造比較 700MW級以上では複流形が採用され、高圧初段翼の応力緩和が図られている。

(4) 再熱蒸気温度と中圧部の構造

再熱蒸気温度は通常538°C、あるいは566°Cが採用されている。両者の温度差はわずか28°Cではあるが、566°C再熱蒸気温度とした場合には熱効率が全体として約0.8%向上されることになり、中圧部の強度向上対策のコストを差し引いても経済的に有利となる。この場合の中圧部の対策としては、逆クリスマスツリー形ダブティル、ロータ冷却、二重車室式再熱蒸気室などが挙げられるが、最近、高温クリープラプチャー強度の高い12クロムロータ材を採用することによって、ロータ冷却を廃止し、再熱蒸気温度の向上による利得をフルに活用しようという試みも行なわれている。このような観点から、50Hz 1,000MW蒸気タービンでは、12クロムロータ材を採用して566°C再熱蒸気温度としているが、60Hz 1,000MW級蒸気タービンへの適用についても十分に期待できるものである。

(5) 高効率化のための新技術

蒸気タービンの内部効率は、段落内部効率と蒸気漏洩、圧力・蒸気の摩擦損失などの損失の大小によって評価される。段落内部効率を更に詳しく検討すれば、ノズル及び翼プロフィールでの渦流損失や二次流れ損失を減少させることが、熱効率の向上に結びつくことが分かる。これら翼形状の改善による熱損失の低減については、長年月の研究を要するものであり、タービンメーカーが最も重視するところである。日立製作所では永年の研究の結果、過去にラミナー翼形、三次元翼列設計法などの開発を行なったが、最近、特殊なねじれ角度を与えたコントロールド・ボルテックスノズルの開発に成功した(図5)。更に、翼とノズルの適正な組合せによって段落内の熱損失を大幅に低減できることも分かっている。一方、翼プロフィール以外の部分で発生する損失の低減に対しても、翼頂部フィンの倍増や、中圧排気室及び低圧排気室の構造改

善により、排気損失の低減も可能となった(図6)<sup>2)</sup>。これらもろもろの熱効率向上手段は総合で約1%以上の効率向上が見込まれている。また部分負荷時の熱効率向上には、変圧運転方式など運用条件の変更による大幅な改善も有効となる。

(6) 軸受、主軸ポンプなど

60Hz 1,000MW級蒸気タービンでは、50Hz機と比較して回転数が増大するだけ周速の高い軸受及び容量の大きい潤滑油ポンプ類が必要となる。将来の大容量化のための主軸受及び主油ポンプの試作は既に完了している<sup>3)</sup>が、これらの機器仕様の増大は潤滑油設備、油冷却器など補機類の仕様の増大に直接影響することになるため、可能な限り小形、小容量のもので済ませることが望ましい。この点からみれば、前に触れた1,000MW級蒸気タービンの形式比較で、軸受周速の小さいデュアルスピード機が有利となる。

軸受の大形化には軸受損失増加が伴い、潤滑油の劣化傾向や、潤滑油中の微小な異物による軸受損傷などが発生しやすい条件となる。これに対しては、低圧部軸受にジャッキング油ポンプを取り付けることによって、ターニング運転中の軸受油膜の形成を促進する一方、軸受メタル中にサーモカップルを埋め込んで、運転中、特に降速時の軸受メタル温度の異常変化を監視するなどの対策が必要である。

(7) 車室

高圧及び中圧車室には、ウォーターインダクション監視用サーモカップルを各抽気室と蒸気室に取り付ける。また、低

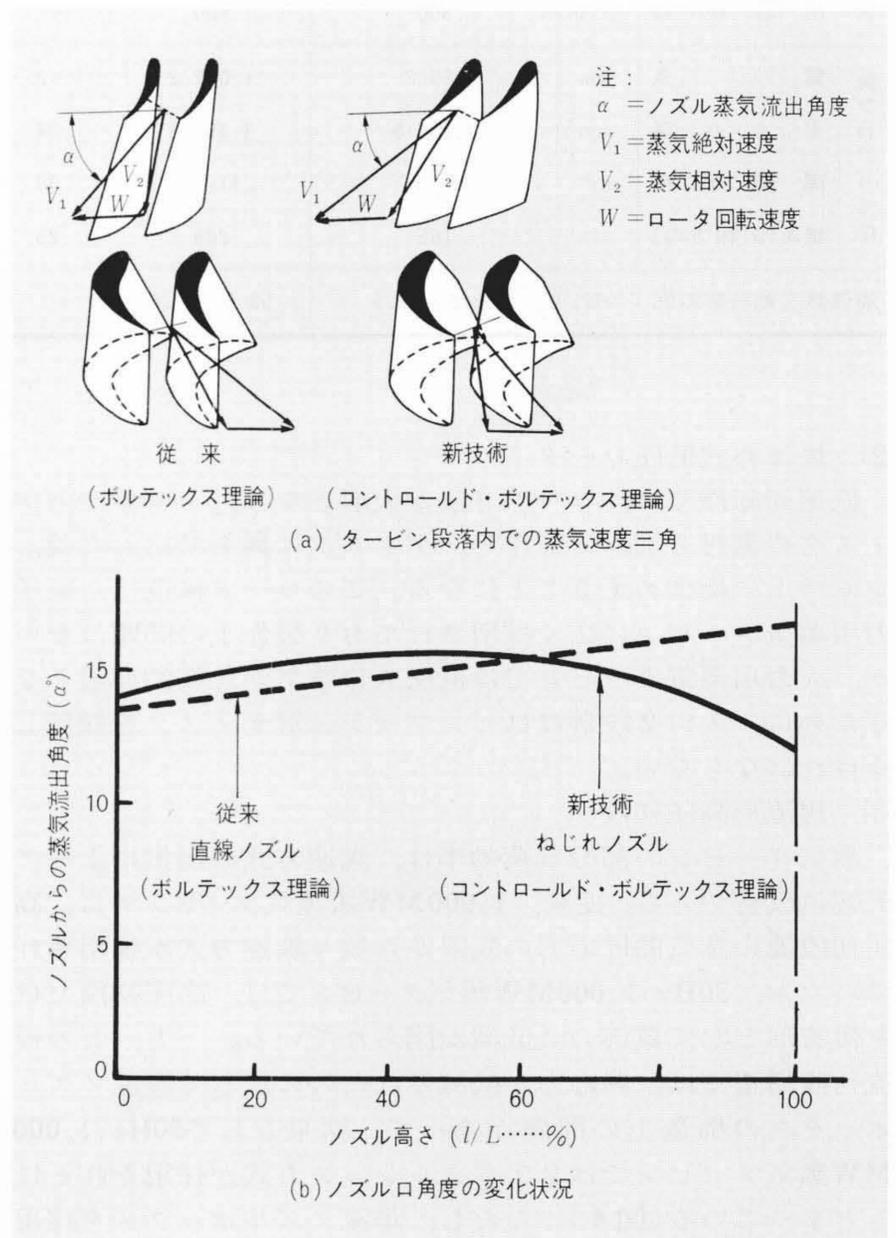


図5 コントロールド・ボルテックスノズル ノズル出口角度に特殊なねじれを与えることにより、段落効率の向上が図られる。

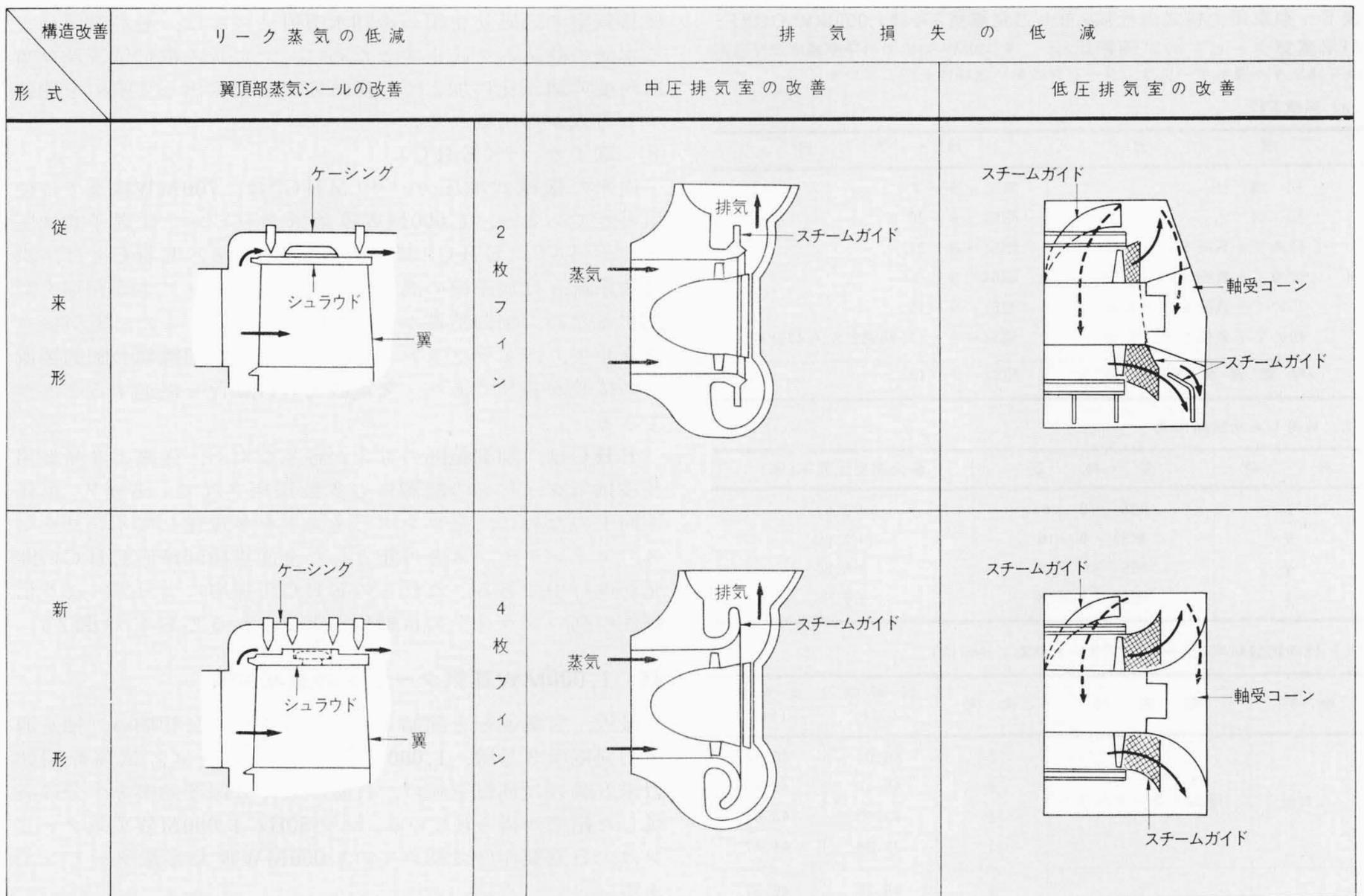


図6 高効率化のためのタービン構造改善 段落内部効率の改善のほかに、段落内リーク蒸気の低減及び排気損失の低減によってもタービン効率の改善が図られている。段落内部効率の改善とタービン構造改善とによる熱効率の向上は、総合で約1%以上が見込まれる。

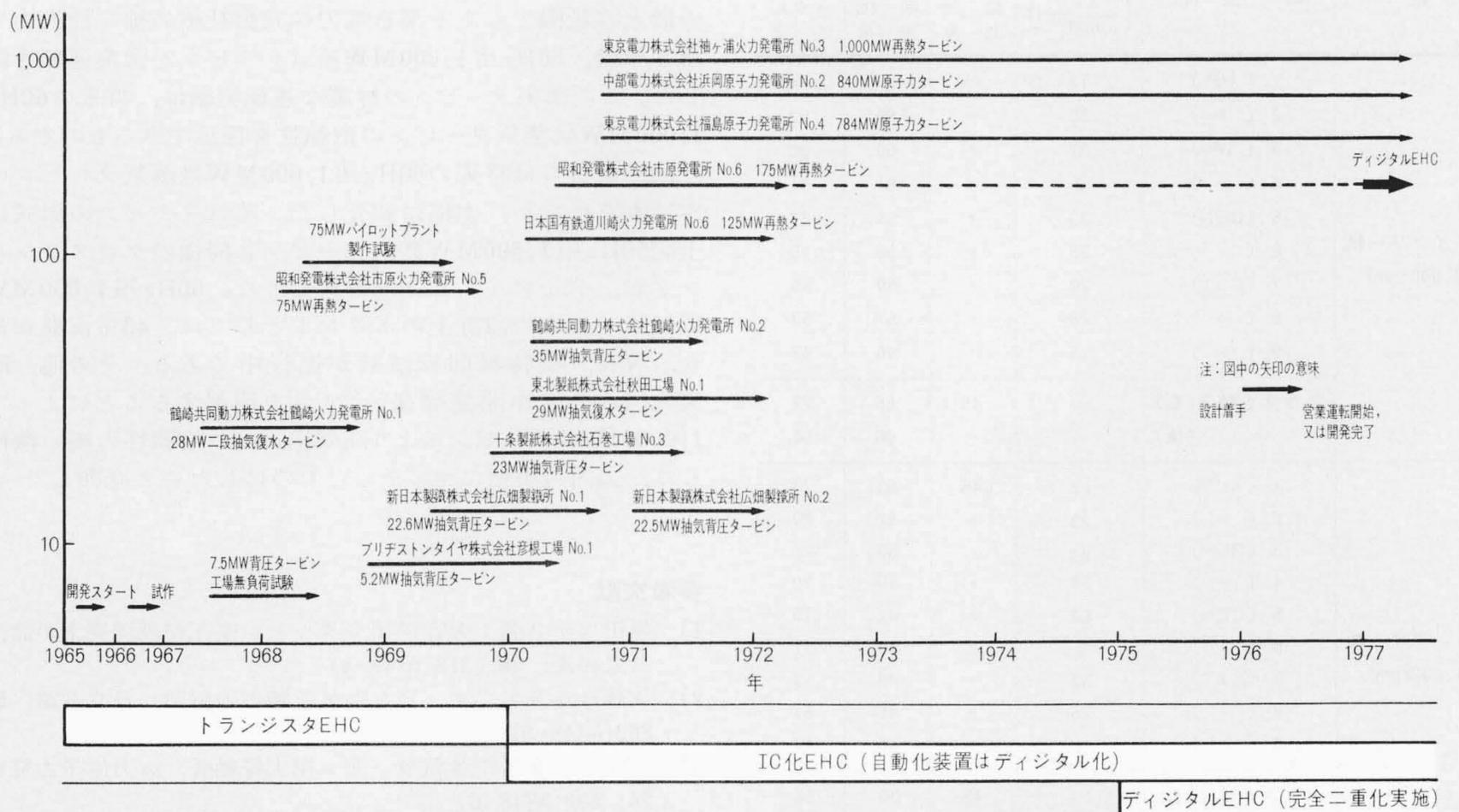


図7 電子ガバナ(EHC)の開発過程 頭初、産業用タービン向けに開発を着手した電子ガバナは、その後急速に大容量タービンへも適用されている。更に、装置の信頼性向上のための完全二重化を実施したデジタル電子ガバナの開発が進行中である。

表5 東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所3号機1,000MW CC4F-41形蒸気タービンの試運転記録 1,000MW初出力の早期達成及び計画値を満足する運転データは、タービンの高い信頼性を示している。

(a) 実績工程

項目	年 月 日
初 通 気	昭51-8-2
初 併 入	昭51-8-30
初めて $\frac{1}{4}$ 負荷をとった日	昭51-8-31
初めて $\frac{1}{2}$ 負荷をとった日	昭51-9-3
初めて $\frac{3}{4}$ 負荷をとった日	昭51-9-16
初めて $\frac{1}{4}$ 負荷をとった日	昭51-9-17(初通気から47日目)
営業運転開始日	昭52-2-18

(b) 負荷しゃ断試験結果

負 荷	実 施 日	最大速度上昇率(%)
$\frac{1}{4}$	昭51-9-6	+3.67
$\frac{1}{2}$	昭51-9-16	+3.60
$\frac{3}{4}$	昭51-11-18	+5.60
$\frac{1}{4}$	昭52-1-18	+7.56

(c) 性能試験結果(タービンプラント効率)(速報値)

燃 料	実 施 日	負 荷	計 画 値 (%)	実 測 値 (%)
L N G	昭52-2-4~7	$\frac{1}{4}$	46.04	46.13
		$\frac{1}{2}$	45.14	45.40
		$\frac{3}{4}$	43.13	43.81
		$\frac{1}{4}$	38.84	41.47
ミ ナ ス	昭52-1-12~13	$\frac{1}{4}$	46.29	46.57
		$\frac{1}{2}$	45.41	46.01
		$\frac{3}{4}$	43.30	44.51

(d) 軸振動, 軸受給排油温度, 軸受メタル温度実測値(昭52-2-17測定)

軸	軸 受 No.	軸 振 動 ( $\frac{1}{1,000}$ mm)	軸 受 温 度(°C)		
			給 油 温 度	排 油 温 度	メタル 温 度
プライマリー軸 (3,000rpm)	1 (HP)	12	45	57	94
	2 ( " )	30	"	65	97
	3 (IP)	37	"	60	90
	4 ( " )	2	"	61	91
	5 (GEN)	30	"	55	77
	6 ( " )	35	"	58	75
	7 (EXT)	20	"	50	55
	8 ( " )	28	"	51	53
	9 ( " )	15	"	46	47
	スラスト軸受(前)	—	45	65	73
	" (後)	—	"	66	66
セコンダリー軸 (1,800rpm)	1 (ALP)	28	45	53	75
	2 ( " )	23	"	52	80
	3 (BLP)	43	"	50	75
	4 ( " )	51	"	50	79
	5 (GEN)	63	"	47	79
	6 ( " )	5	"	49	71
	7 (EXT)	32	"	49	53
	8 ( " )	25	"	48	51
	9 ( " )	7	"	46	47
	スラスト軸受(前)	—	45	50	56
	" (後)	—	"	51	58

注: HP = 高圧部 ALP = A低圧部  
 IP = 中圧部 BLP = B " "  
 GEN = 発電機 EXT = 励磁機

圧排気室の過熱防止用の冷却水噴射ノズルは、最終段翼による水滴の巻込みを防止するために、ノズルの取付位置及び噴射角度の適正化に加えて、排気室温度を検出して噴射を開始する方式が採用される。

(8) 電子ガバナ(EHC)

従来の機械式油圧ガバナ(MHG)は、700MW級までは使用可能であるが、1,000MW級蒸気タービンでは電子式油圧ガバナ(以下、EHCと略す)が必要となる。EHCでは、潤滑油系統とは別系統の高圧の不燃性油によって主要弁類を開閉するため、制御特性が一段と向上される。また、電気接点を介して、ボイラプラントの制御装置及び補機類の制御装置への接続が容易であり、発電設備の自動化を促進することができる。

EHCは、制御範囲の拡大が容易なため、従来より産業用多段抽気タービンの制御にも多数採用されているが<sup>4)</sup>、信頼性向上のために、全コンポーネントを多重化してインサービス、メンテナンスを可能とした全面集積回路形EHCの開発が進行中である。これらのEHCの採用によって、より信頼性の高いプラントの自動化が実現されるであろう(図7)。

4 1,000MW蒸気タービンの運転実績

最近、営業運転を開始した東京電力株式会社納め、袖ヶ浦火力発電所3号機、1,000MW蒸気タービンは、試運転開始以来好調裏に運転を続け、性能試験でも保証効率を十分に満足した結果が得られている。この50Hz 1,000MW蒸気タービンは、日立製作所で初めての1,000MW級大容量タービンである。

袖ヶ浦3号機、1,000MW蒸気タービンの仕様は、表3に示すとおりであり、表5にその試運転記録を示す。

5 結 言

昭和52年2月に、日立製作所の最大容量機で、かつ我が国の最大容量機でもある東京電力株式会社納め袖ヶ浦火力発電所3号機、50Hz用1,000MW蒸気タービンが営業運転を開始した。この蒸気タービンの好調な運転実績は、将来の60Hz用1,000MW級蒸気タービンの信頼性を保証できるものである。今回、筆者らは将来の60Hz用1,000MW級蒸気タービンの基本計画を行ない、本稿に紹介した。蒸気タービンの形式は、上記50Hz用1,000MW蒸気タービンと同様のクロスコンパウンド形、デュアルスピード方式とした。60Hz用1,000MW級蒸気タービンの設計上のポイントとしては、43in長翼があるが、現在、実物翼回転試験が進行中である。その他、既に実施済みの試作開発結果<sup>1), 2), 4), 5)</sup>を適用することによって、1,000MW級タービンはより高効率、かつ信頼性の高い機械として、国内の事情にマッチしたものにしたいと願っている。

参考文献

- 1) 黒田ほか3名: 大容量蒸気タービン高圧初段開発上の諸問題 日立評論, 56, 313(昭49-4)
- 2) 佐藤ほか3名: タービン排気室特性の解明, 日立評論, 55, 863(昭48-9)
- 3) 今井ほか3名: 蒸気タービン用大径軸受, 火力原子力発電, 24, 690(昭48-6)
- 4) 安元ほか2名: 運転の自動化と電子油圧式ガバナ(EHG), 日立評論, 54, 828(昭47-9)
- 5) 加藤: 大容量蒸気タービンの動向と計画上の諸問題, 日立評論, 54, 805(昭47-9)