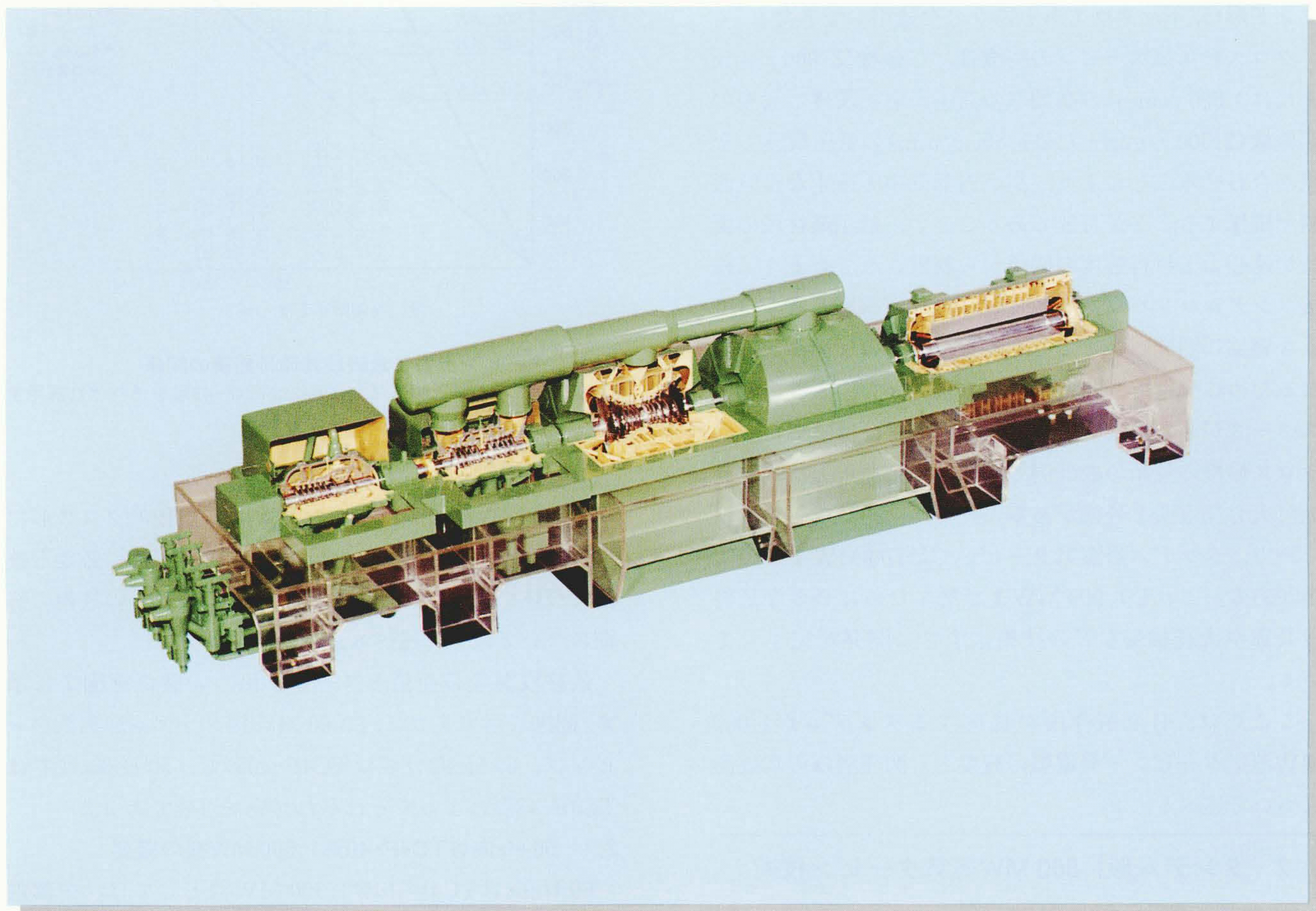


タンデム形1,000 MW蒸気タービン・発電機の開発

Development of Tandem-Compound Type 1,000 MW Steam Turbine and Generator

石川健志 Takeshi Ishikawa 佐藤淳二 Junji Satō
古川雅夫 Masao Furukawa 名村 清 Kiyoshi Namura



タンデム形1,000 MW蒸気タービン・発電機の鳥観図

タンデム形1,000 MW蒸気タービン・発電機のイメージ図を示す。蒸気タービンは、それぞれ独立した高圧および中圧車室と、二つの低圧車室で構成されている。最終段動翼としては60 Hz向けにはチタン合金製40インチ翼を、50 Hz向けには高強度12Cr鋼製の43インチ翼を採用している。タービン発電機は、大容量化に対して大径回転子を採用するとともに、靱性向上型の高強度軸材を採用している。

最近の火力発電プラントを取り巻く環境は、電気事業法の改正によって独立系発電事業者(IPP)の参入という新たな市場が台頭してきている。その中で、発電事業の経営効率化が以前にも増して大きな課題となっている。

火力発電プラント機器では、これまでの高信頼性・高効率化と並んで、機器仕様の合理化を含めた建設コスト低減が急務となっている。

大容量1,000 MW火力発電プラントの主機である蒸気タービン形式は、従来はクロスコンパウンド形であったが、このような設備合理化の観点から、タンデムコンパウンド形への傾向が顕著である。

日立製作所の火力発電プラント用蒸気タービン・発電機は、タンデム形化に必要な各種技術の技術開発を完了し、これらのニーズにこたえようとしている。

1. はじめに

最近の電力業界の規制緩和に伴う卸発電事業の電力市場への参入を引き金に、発電プラントの大幅な合理化とプラント機器の高効率化への要請はますます強まっている。

日立製作所は、1,000 MW大容量火力機に対して、米国GE社からの技術導入の経緯から、これまでクロスコンパウンド形(以下、クロス形と言う。)を適用してきた。

クロス形蒸気タービンの特徴は、二極機(3,000 r/minまたは3,600 r/min)の高効率の高圧・中圧段落と大型の四極機(1,500 r/minまたは1,800 r/min)の低圧段落とを組み合わせることにより、高い内部効率と適正な排気面積を確保することが可能であることと、低圧最終段の翼長が遠心力と材料強度の関係から制限されてしまう二極機タンデムコンパウンド形(以下、タンデム形と言う。)よりも容易に開発できることであった。その反面、二軸となるために発電機が2機必要であることと、大きい建屋スペースが必要になるといった側面も併せ持っている。クロス形機の最新の設計例としては、東北電力株式会社原町火力発電所2号機がある¹⁾。

一方、タンデム形蒸気タービンでは700 MWまでの実績がある。これを1,000 MWまで増すために必要な最終段長翼や大径軸受などの技術はすでに開発が完了している。

ここでは、日立製作所が提案するタンデム形1,000 MW蒸気タービン・発電機の概要と、開発済みの新技術について述べる。

2. タンデム形1,000 MW蒸気タービン技術

大容量火力機の納入実績を表1に示す。

表1 日立製作所の大容量火力機の納入実績

出力700 MW以上の納入実績を示す。クロス形では1,000 MWが、タンデム形では700 MWが最大容量機である。

項目	顧客名	ユニット名	出力(MW)	形式	回転数(r/min)	蒸気条件(MPa-°C/°C)	運転開始年
タンデム形	九州電力株式会社	松浦1号	700	TC4F-33.5	3,600	24.1-538/566	1989
	中部電力株式会社	碧南2号	700	TC4F-40	3,600	24.1-538/566	1992
	某	某	700	TC4F-43	3,000	25.0-600/600	(2003)
クロス形	電源開発株式会社	竹原1号	700	CC4F-38	3,600/1,800	24.1-538/538	1983
	東京電力株式会社	袖ヶ浦3号	1,000	CC4F-41	3,000/1,500	24.1-538/566	1977
	東京電力株式会社	広野3号	1,000	CC4F-41	3,000/1,500	24.1-538/566	1989
	相馬共同火力発電株式会社	新地1号	1,000	CC4F-41	3,000/1,500	24.1-538/566	1994
	東北電力株式会社	原町2号	1,000	CC4F-41	3,000/1,500	24.5-600/600	(1998)
	東京電力株式会社	常陸那珂1号	1,000	CC4F-41	3,000/1,500	24.5-600/600	(2002)

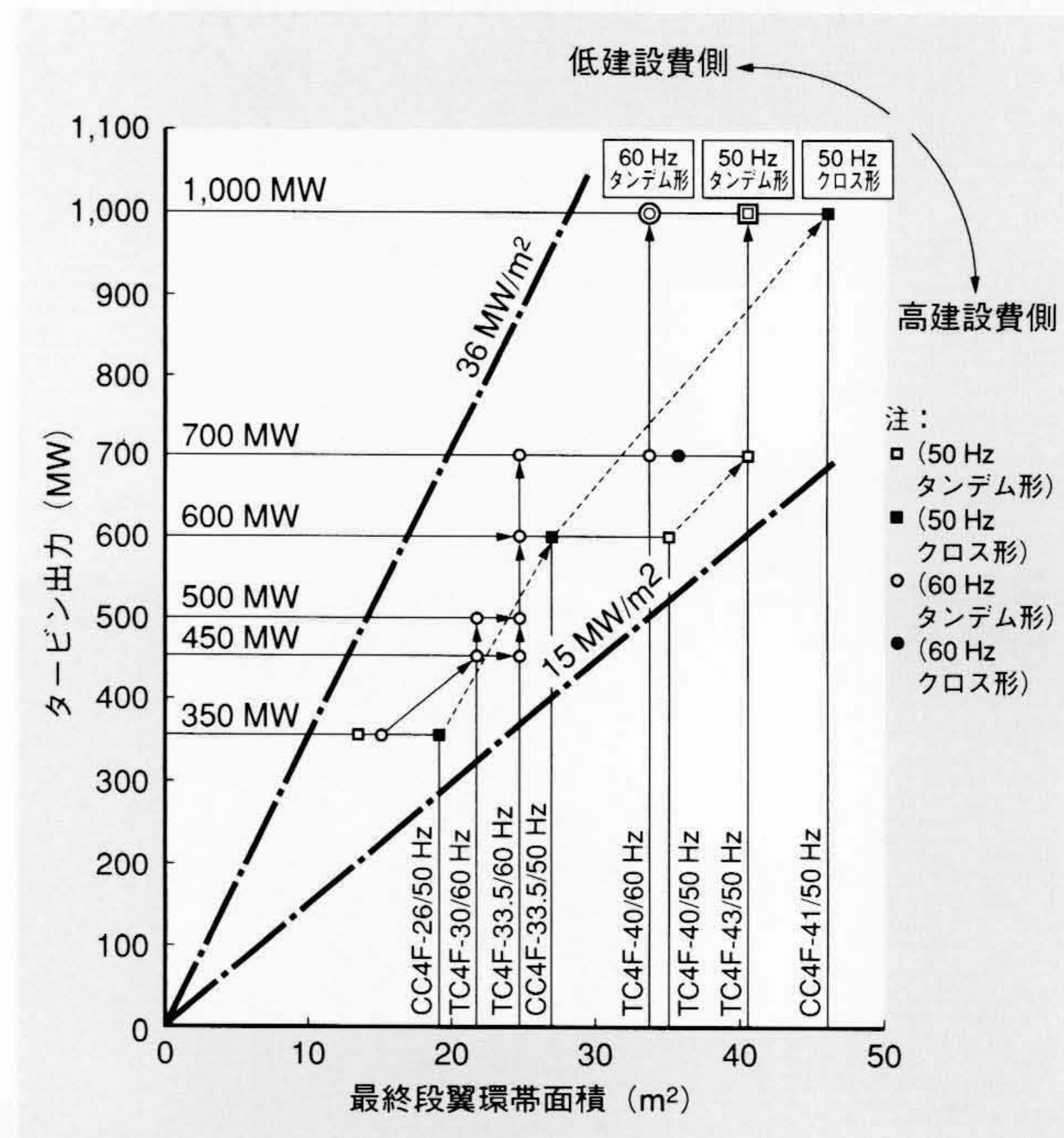


図1 タービン出力と最終段翼環帯面積の関係

60 Hz用にはTC4F-40形、50 Hz用にはTC4F-43形をそれぞれ採用することにより、低建設費側に移行する。

1,000 MW機のこれまでの実績は、50 Hzのクロス形だけであった。しかし、タンデム形1,000 MW機に必要な技術についてはすでに開発済みである。これらの技術の詳細について以下に述べる。

最終段翼環帯面積とタービン出力の関係を図1に示す。同図に示すように、1,000 MW機タンデム形蒸気タービンは、60 Hz向けではTC4F-40形で、50 Hz向けではTC4F-43形によってそれぞれ対応が可能である。

2.1 60 Hz向けTC4F-40形1,000 MW機の概要

60 Hz向けTC4F-40形1,000 MW機としては、中部電力株式会社碧南火力発電所2号700 MW機で実績のある

表2 60 Hz/50 Hz向け1,000 MW蒸気タービンの主な仕様
先行機である60 Hz向けタンデム形700 MW機と開発済みタンデム形1,000 MW機および先行機である50 Hz向けタンデム形700 MW機と開発済みタンデム形1,000 MW機の主な仕様をそれぞれ比較して示す。

項 目			60 Hz		50 Hz	
			開発済み 1,000 MW機	碧南火力2号機 700 MW機	開発済み 1,000 MW機	某次期火力機 700 MW機
タービン型式		—	再熱式タンデム形4車室 4流排気形 (TC4F-40)	同左	再熱式タンデム形4車室 4流排気形 (TC4F-43)	同左
回転数		r/min	3,600	同左	3,000	同左
蒸気条件		MPa ℃	24.5 600/600	24.1 538/566	24.5 600/600	25.0 同左
タービン仕様	タービン発電機 機器構成					
	高圧 初段	動翼	複流形2テノン 鞍形ダブテール	同左 同左	複流形2テノン 鞍形ダブテール	同左 アキシャル形ダブテール
		ノズルボックス	複流型	同左	複流型	単流型
	低圧最終段翼	翼長	1,016.0 (40インチ)	同左	1,092.2 (43インチ)	同左
		平均直径	2,641.6 (104インチ)	同左	2,646.4 (116インチ)	同左
	段落数	環帯面積	33.37 (4流分)	同左	40.44 (4流分)	同左
		翼材料	Ti-6Al-4V合金	同左	Cr-Ni-Mo-V鋼	同左
	主要弁 口径	高圧	1×2流+6	同左	1×2流+8	8
		中圧	5×2流	同左	6×2流	6
		低圧	5×4流	同左	6×4流	同左
主要部材料	合計 (ホイール数)		17 (38)	同左	21 (45)	20 (38)
	組合せ再熱弁 (ICV/RSV)	主蒸気止め弁	φ 11インチ×4	φ 9インチ×4	φ 11インチ×4	φ 12インチ×2
		加減弁	φ 9インチ×4	φ 8インチ×4	φ 9インチ×4	φ 8インチ×4
	全 長	組合せ再熱弁 (ICV/RSV)	(φ 34.5インチ/φ 30インチ) ×2	(φ 29.5インチ/φ 26.5インチ) ×2	(φ 34.5インチ/φ 30インチ) ×2	(φ 29.5インチ/φ 26.5インチ) ×2
		材 料	9Cr鍛鋼	Cr-Mo-V鍛鋼	9Cr鍛鋼	同左
	ロータ 材料	高圧ロータ	新12Cr鍛鋼	同左	新12Cr鍛鋼	同左 (高中圧一体)
		中圧ロータ	新12Cr鍛鋼	同左	新12Cr鍛鋼	—
	ノズルボックス 材料	低圧ロータ	Ni-Cr-Mo-V鍛鋼 (クリーンタイプ)	同左	Ni-Cr-Mo-V鍛鋼 (クリーンタイプ)	同左
		軸受ジャーナル保護 スラストカラー保護	オーバレイ (HP/IP) オーバレイ	— —	オーバレイ (HP/IP) オーバレイ	同左 同左
	車室 材料	高圧外部	Cr-Mo-V鍛鋼	同左	Cr-Mo-V鍛鋼	同左

注：略語説明
HP (高圧)
IP (中圧)
LP (低圧)
R/H (再熱器)
GEN (発電機)
ICV (インタセプト弁)
RSV (再熱蒸気止め弁)

TC4F-40形をベースとした設計を完了している。1,000 MW機と700 MW機の仕様比較を表2の左欄2列に示す。

60 Hz向けタンデム形1,000 MW機の特徴としては、以下の点があげられる。

- (1) 最終段動翼に中部電力株式会社納め碧南火力発電所2号機で採用したチタン合金製40インチ翼を採用¹⁾
- (2) 開発済み22インチ大径軸受の採用
- (3) 東北電力株式会社納め原町火力発電所2号機で初めて適用した蒸気条件24.5 MPa-600/600℃を採用し、熱効率を向上²⁾
- (4) 新開発のAVS (Advanced Vortex Stage) を採用³⁾

60 Hz向けTC4F-40形1,000 MW機の構造を図2に示す。

2.2 50 Hz向けTC4F-43形1,000 MW機の概要

50 Hz向け1,000 MW機は、最近、開発を完了し、某次

期火力700 MW蒸気タービンに適用する43インチ長翼を採用した設計を完了している。両者の仕様比較を表2の右欄2列に示す。

50 Hz向けタンデム形1,000 MW機の特徴としては、下記があげられるほか、60 Hz向け機で記述した(3)、(4)の技術も適用している。

- (1) 最終段動翼に某次期火力機に使用する11.75Cr-2.5Ni-2.25Mo-0.28V-0.1Nb鋼製43インチ翼を採用
- (2) 開発済み24インチ大径軸受の採用

50 Hz向けTC4F-43形1,000 MW機の構造を図3に示す。

2.3 3,000 r/min用43インチ長翼の開発

従来、3,000 r/min用最終段長翼は40インチが最大のものであったが、このたび日立製作所は、12Cr鋼系材料を使用したものとしては最大の43インチ長翼を開発した。

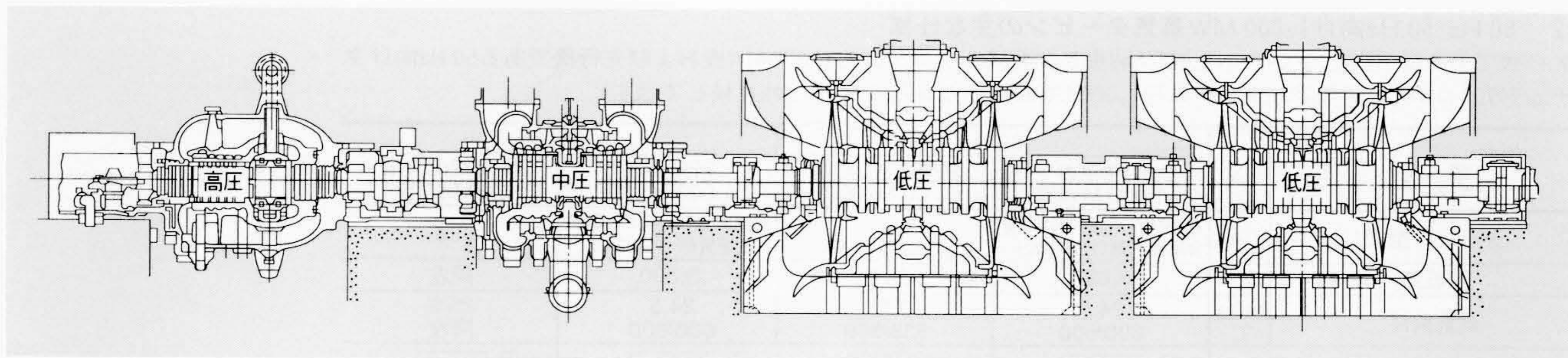


図2 60 Hz向けTC4F-40形1,000 MW機の構造

先行実績機であるタンデム形700 MW機と基本構成は同一だが、高蒸気条件を採用しているため、若干の全長増加となる。

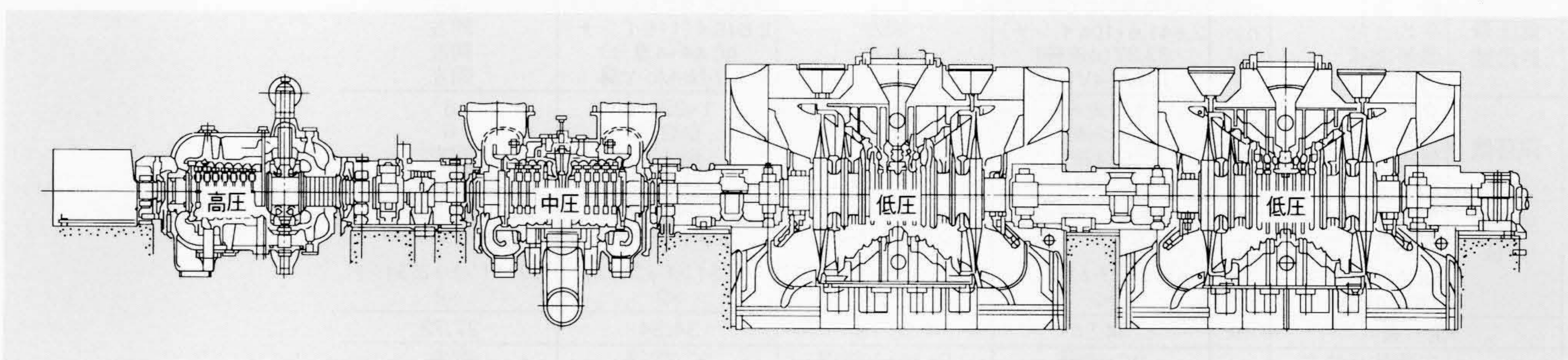


図3 50 Hz向けTC4F-43形1,000 MW機の構造

最終段に43インチ長翼を採用した1,000 MW機の構造を示す。

この長翼開発の要点は、従来使用していた12Cr鋼を成分調整することによって焼入れ性を改善し、強度の向上を図ることによって長翼化が達成できたことである。

翼の構造としては、インテグラル シュラウド カバーとタイボスで全周一リングとしたCCB(Continuous Cover Blade)構造の採用により、翼振動に対して安定した特性を持たせた。

新開発の43インチ長翼を図4に、実物翼モデルロータを用いた回転実証試験の状況を図5にそれぞれ示す。

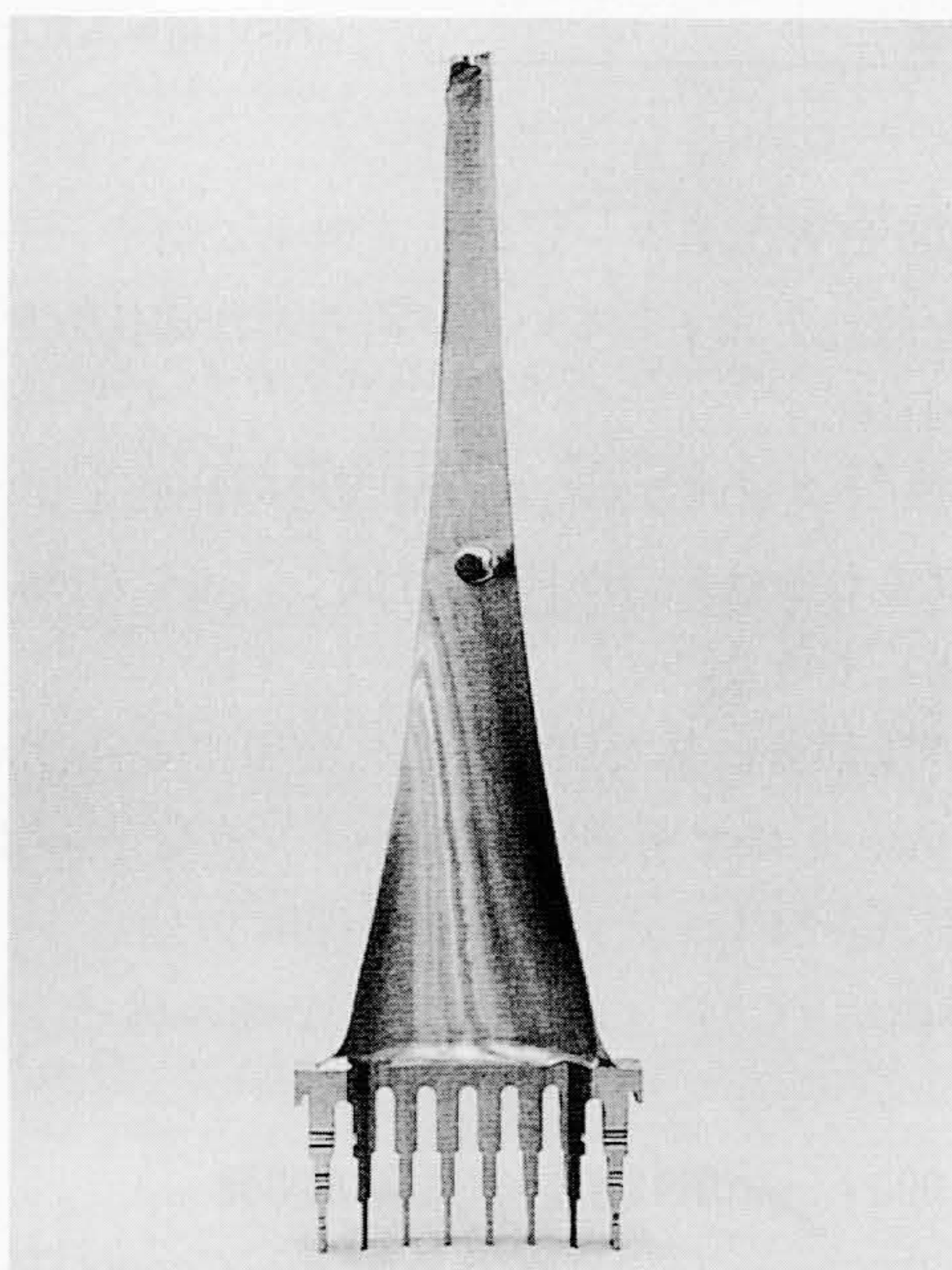


図4 50 Hz向け新開発43インチ長翼

最新の高強度12Cr鋼の適用により、12Cr鋼系としては最長の43インチを実現した。

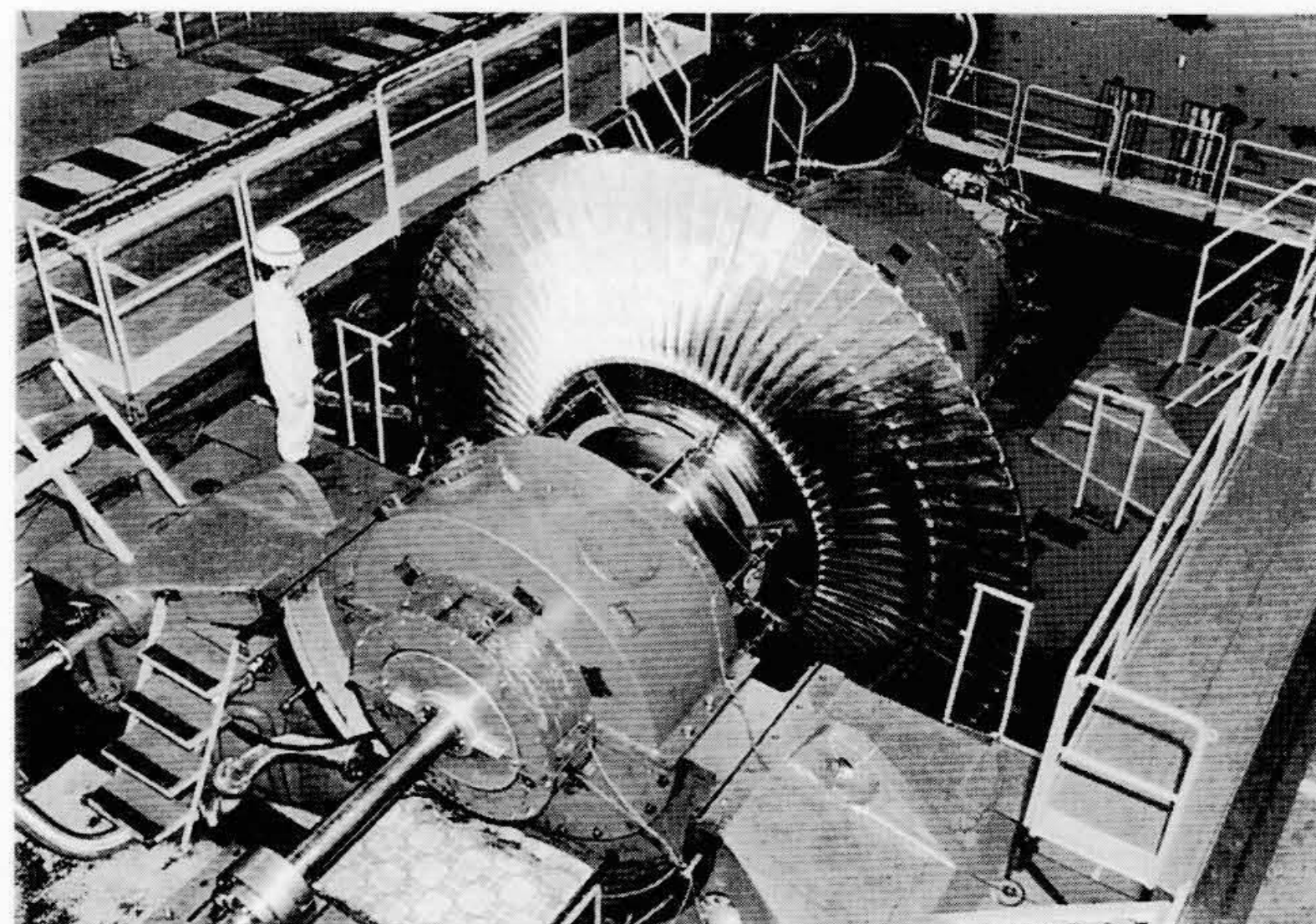


図5 新開発43インチ長翼の回転実証試験

設計着手から13か月で開発を終了した。実物翼モデルロータを製作し、回転実証試験によって信頼性を確認した。

表3 1,000 MW機用発電機の基本仕様
タンデム形用とクロス形用の60 Hzおよび50 Hz向け1,000 MW発電機の主仕様項目での比較を示す。

項 目	1,000 MW						700 MW
	60 Hz			50 Hz			60 Hz
	タンデム形用	クロス形用		タンデム形用	クロス形用		タンデム形用
		プライマリ	セカンダリ		プライマリ	セカンダリ	
容 量(MVA)	1,120	690	450	1,120	675	488	800
力 率	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
短 絡 比	0.58	0.58	0.58	0.60	0.60	0.60	0.58
電 圧(kV)	26	22	22	25	19	19	25
電 流(A)	24,871	18,108	11,810	25,866	20,512	14,829	18,475
極 数	2	2	4	2	2	4	2
回 転 数(r/min)	3,600	3,600	1,800	3,600	3,600	1,800	3,600
水 素 圧 力(MPa)	0.52	0.41	0.31	0.52	0.41	0.31	0.41
冷却方式							
固定子	水冷却	同左	同左	同左	同左	同左	同左
回転子	水素直接冷却	同左	同左	同左	同左	同左	同左
励 磁 方 式	静止型	同左	同左	同左	同左	同左	同左
発電機長さ比(%)	109	98	85	114	98	95	100
回転子径比(%)	106	93	138	111	96	145	100

3. タンデム形1,000 MW機用タービン発電機技術

クロス形1,000 MW機の場合、2 台の発電機で出力を分担するのに対し、タンデム形では1 台の発電機で1,000 MW出力するため、大容量化技術が必要となる。

3.1 基本仕様

タンデム形1,000 MW機用発電機の基本仕様を表3に、鳥観図を図6にそれぞれ示す。

タンデム形1,000 MW発電機の大容量化に対応するため、以下の点を考慮している。

- (1) 電圧25～26 kVを採用して電流の増加を抑制

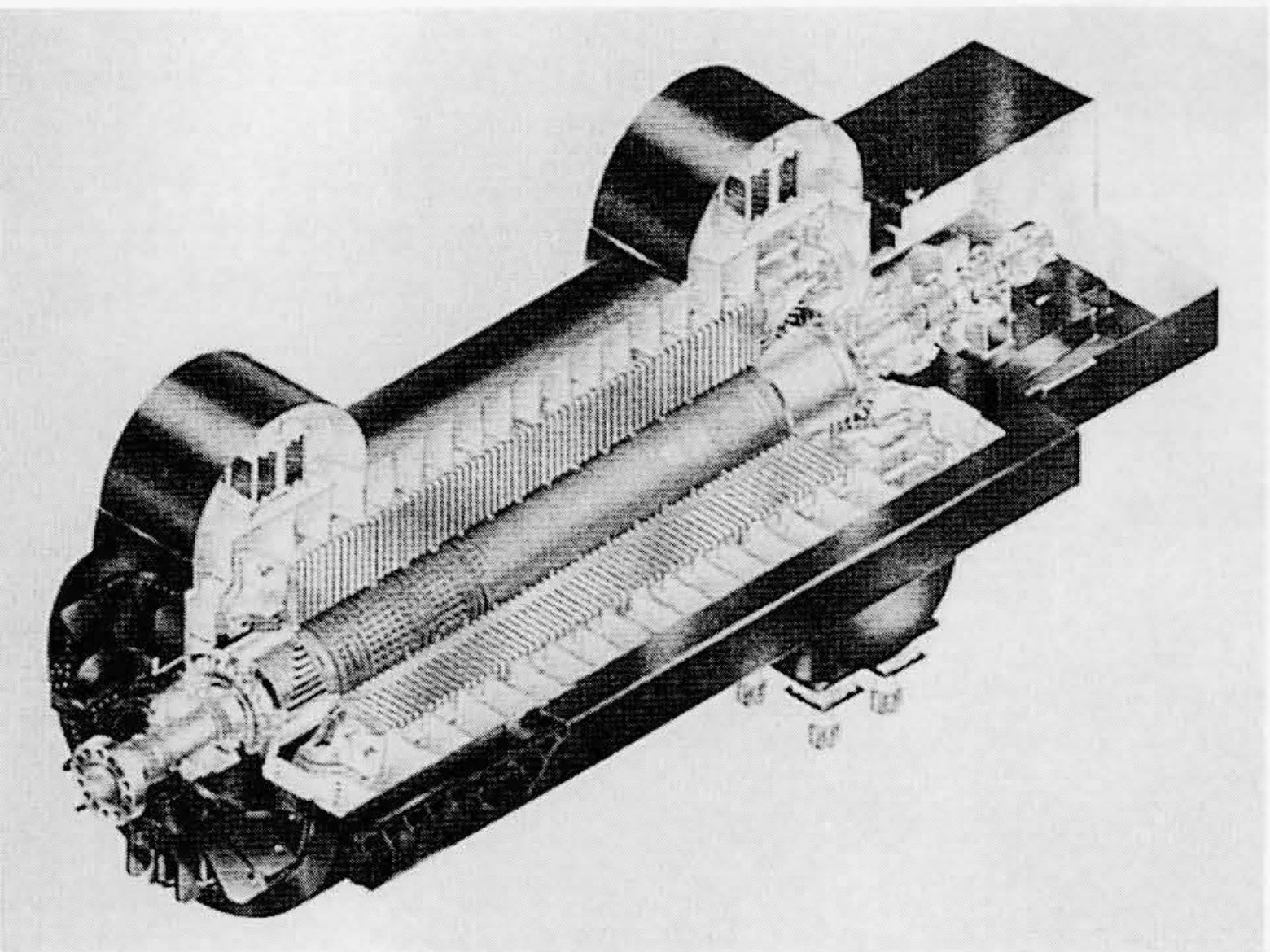


図6 タンデム形1,000 MW発電機の鳥観図
大容量火力・原子力発電機用に開発済みの大容量化コンポーネント技術を組み合わせて、バランスのとれた設計としている。

- (2) 水素圧0.52 MPaを採用して冷却性能を向上
(3) 大径回転子を採用して回転子の長さを抑制

3.2 大容量化コンポーネント技術

タンデム形1,000 MW機に採用される大容量化コンポーネント技術を表4に示す。中部電力株式会社碧南火力発電所2号700 MW機の設計をベースとして、火力・原子力発電所で実績のある大容量化コンポーネント技術を組み合わせ、バランスのとれた設計としている。

表4 大容量化コンポーネント技術
大容量化に必要なコンポーネント技術を示す。特に回転子に対しては、実断面モデルによる信頼性評価試験を実施した。

項 目	内 容
固定子フレーム (水素圧0.52 MPa)	原子力用1,100 MW発電機で採用実績のあるターミナルボックス、トップドーム構造を採用
固定子鉄心	原子力用1,100 MW発電機で採用実績のあるシャントコアを採用
固定子コイルエンド支持方式	火力・原子力用発電機で採用実績が多数ある支持方式を採用
22インチシールリング	26インチ、3,600 r/minまで開発済み
シャフト	・大径回転子の採用 ・高強度軸材の採用 ・サーマルバランスの採用 (回転子実断面図モデルで信頼性評価試験実施済み)
リテイニングリング	・大径リテイニングリングの採用 ・高強度耐SCC性材(18Mn-18Cr)の採用 (回転子実断面図モデルで信頼性評価試験実施済み)
口出しブッシング	火力・原子力用発電機で採用実績が多数ある水素直接冷却ブッシングを採用

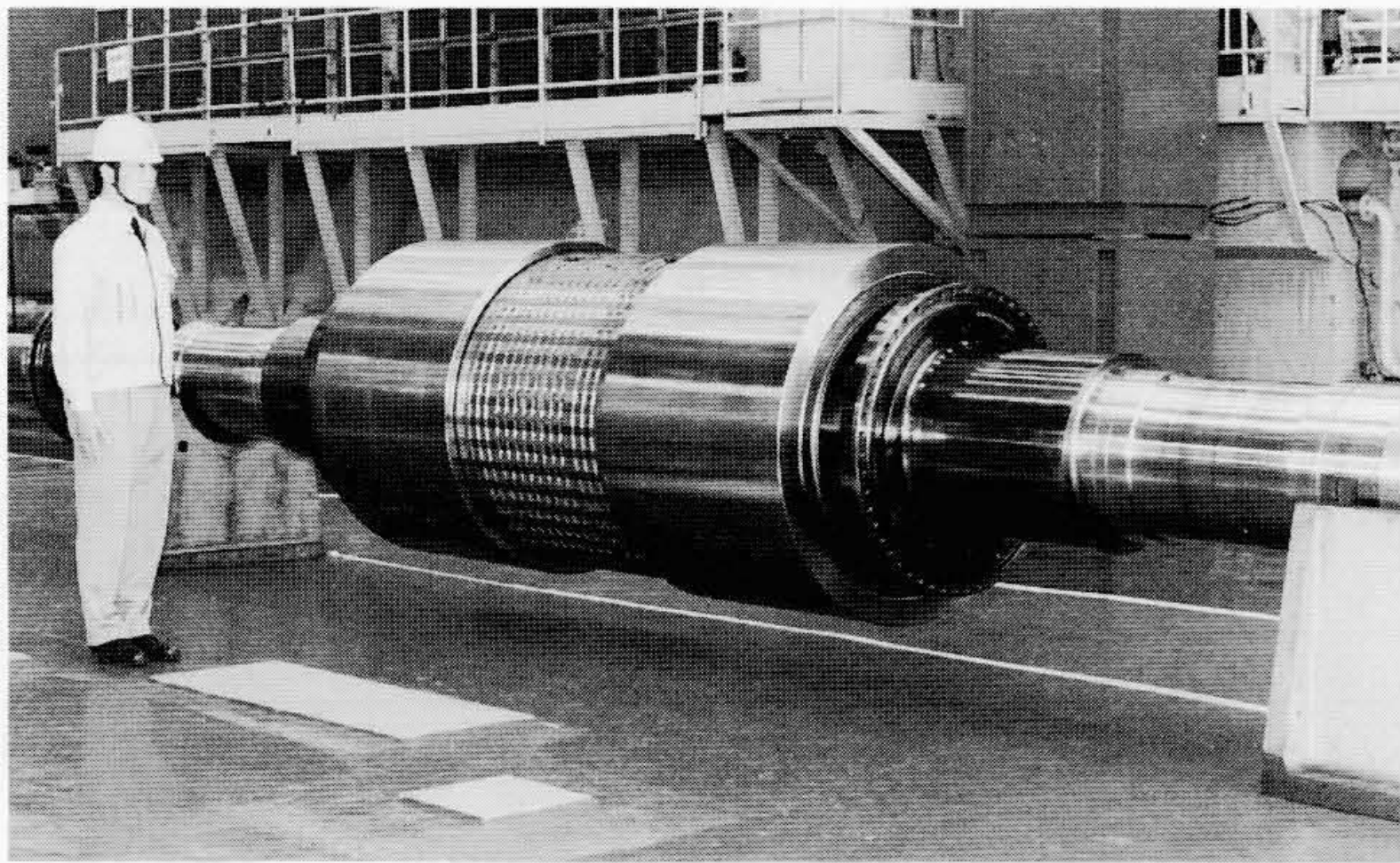


図7 大径回転子の実断面モデル

実際の60 Hz向け1,000 MW発電機の、断面寸法で胴体部の長さを $\frac{1}{10}$ としたモデルを示す。

その中でも重要な大径回転子については、遠心力が大きい60 Hz機の実断面モデルによって回転試験を実施した。起動・停止や長時間運転に伴う疲労強度を評価し、信頼性の検証を完了している。大径回転子の実断面モデルを図7に示す。

また、信頼性のいっそうの向上のため、靱性向上型の高強度軸材〔引張強度9.8 MPa以上、中心孔実力引張強度10.7 MPa、破面遷移温度(FATT) -30°C 〕の開発も完了した。完成した靱性向上型高強度軸材を図8に示す。

3.3 まとめ

以上の大容量化に対する技術により、十分な信頼性を備えたタンデム形1,000 MW機用発電機を製作することが可能となった。

4. おわりに

ここでは、火力発電プラント機器の合理化という観点から、タンデム形1,000 MW蒸気タービン・発電機用の開発済み技術について述べた。

今後も、プラント機器全体について、いっそうの合理化を図っていく考えである。

参考文献

- 1) 森谷, 外: 高効率石炭火力発電プラント, 日立評論, 79, 3, 255~260(平9-3)
- 2) 石木, 外: 大容量蒸気タービン用チタン合金製40 in長翼の開発, 日立評論, 69, 10, 925~932(昭62-10)
- 3) 坪内, 外: 蒸気タービンの最近の開発動向, 動力, 第45巻, 第232号, 7~15(平9-1)

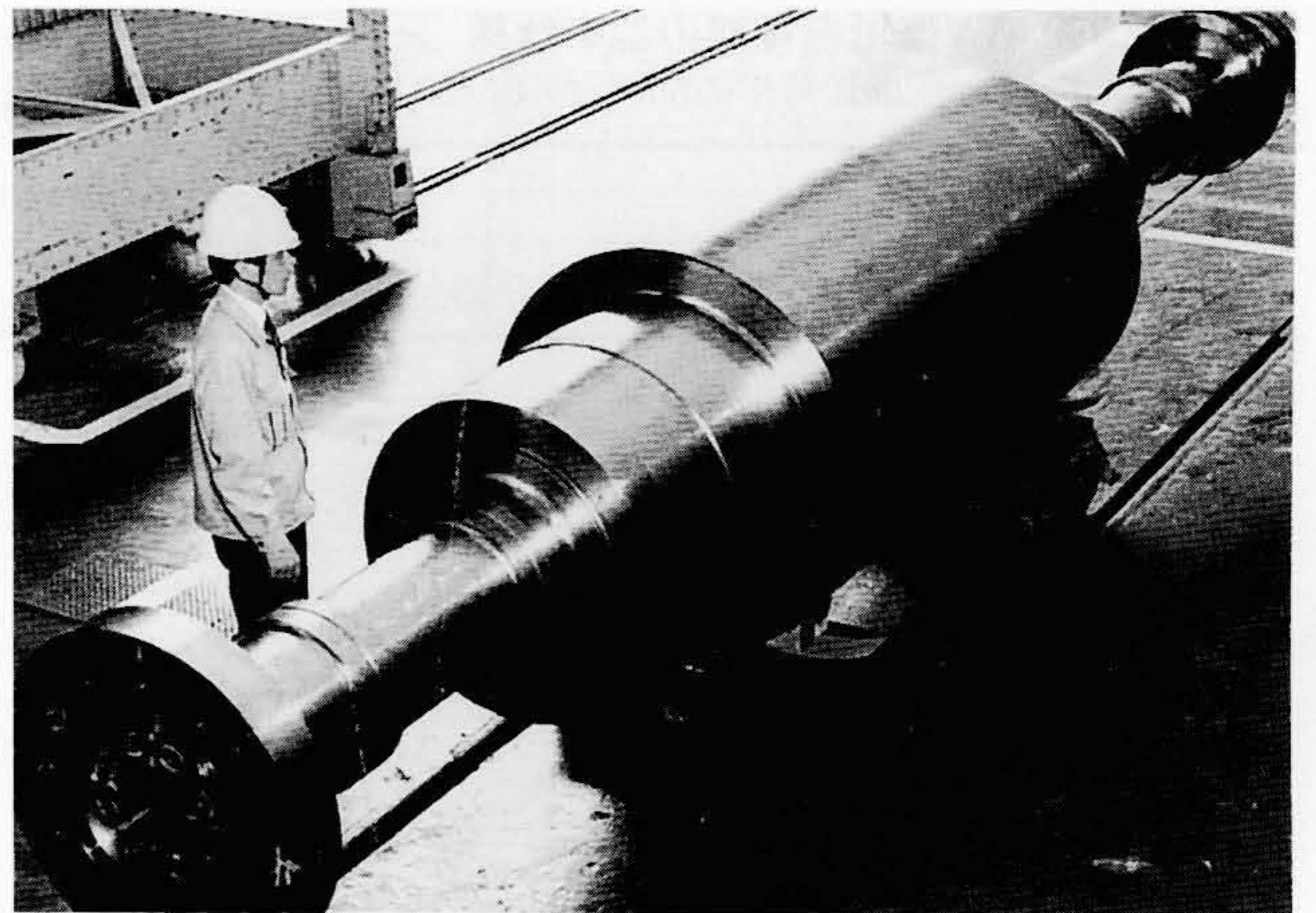


図8 完成した靱性向上型高強度軸材

実径で、胴部長が $\frac{1}{3}$ の軸材を製作した。引張強度9.8 MPaの仕様に対して、実力引張強度(中心孔)10.7 MPa、破面遷移温度 -30°C が得られた。

執筆者紹介



石川健志

1991年日立製作所入社, 日立工場 火力設計部 所属
現在, 蒸気タービンの設計に従事
E-mail: t.ishikawa@cm.hitachi.hitachi.co.jp



古川雅夫

1978年日立製作所入社, 日立工場 火力設計部 所属
現在, 蒸気タービンの設計に従事
日本機械学会会員



佐藤淳二

1982年日立製作所入社, 日立工場 電力設計部 所属
現在, 火力・原子力用タービン発電機の設計・開発に従事
電気学会会員
E-mail: junji_satou@cm.hitachi.hitachi.co.jp



名村 清

1968年日立製作所入社, 電力・電機開発本部 所属
現在, 火力・原子力用蒸気タービンの研究開発に従事
工学博士
E-mail: namura@erl.hitachi.co.jp