

大容量火力発電用蒸気タービンの新技術

Recent Technique of Large-Scale Steam Turbines

日立タービンは、昭和54年までの受注出力累計が60GWを突破した。創業以来、導入技術をベースとして幾多の技術開発を実施し、高性能、高信頼性を図っている。最近の例では、熱効率向上技術は既納タービン6台の改造で実証済みであり、ロータ材の信頼性向上などの技術も着々と実機に適用しつつある。更に、日立製作所では低速用大形一体鍛造ロータの試作試験が完了しており、将来の大容量機の間荷火力発電タービン運用にも備えようとしている。1980年代の蒸気タービンとしては、これらの新技術と現在までの実績の組合せにより、1,200~1,500MW級の設計製作も可能と考えるが、なおいっそうの技術開発を図ってゆく予定である。石炭燃焼火力発電プラントでは高効率、高信頼性技術に加え、中間負荷火力発電タービン用の技術、変圧運転などの運用上の技術が必要となるが、現有技術で十分に対処できるものと考えている。

久野勝邦* Katsukuni Hisano
 柏原克人* Katsuto Kashiwahara
 森谷新一* Shin'ichi Moriya

1 緒言

昭和54年までの受注累計で、日立タービンは創業以来60GWの大台に到達することができた。この成果の一端には、技術開発による顧客ニーズへの十分な対応が行なえたことも寄与していると考えられる。

1980年代の日立火力発電用蒸気タービンは、これまでに開発済みの高効率、高信頼性技術に、最近の火力発電用蒸気タービンに要求される中間負荷火力運用、及び高度な自動化、省力化に対応する新技術の開発を加えて、鋭意進行中である。本稿では、石炭燃焼中間負荷火力発電用蒸気タービンに採用可能な、開発済みの新技術について紹介する。

(中華人民共和国)納め2,800kW(3,000rpm)を1号機として世に送り出して以来、昭和54年までの受注残を累計するとガスタービンを含めて出力60GWの大台に到達した。日立蒸気タービンは、創業以来、西ドイツメーカー及び米国メーカーから技術導入を行なうとともに、幾多独自の技術開発により我が国電力、産業界の事情に適した製品を納入してきた。陸上用蒸気タービンから始まった技術は、船舶用、あるいは事業用、産業用の分野に広く進出したが、最近では原子力用蒸気タービン、ガスタービン、更には省エネルギー時代に突入してオイルフロントタービンなどの新製品も手がけるようになってきている。累計出力の内訳は、火力発電用75.4%、原子力発電用14.9%及びガスタービン9.7%である。総台数は1,377台でその内訳は、火力発電用81%、原子力発電用0.8%及び

2 日立蒸気タービンの歴史

日立蒸気タービンは、昭和8年長崎紡績株式会社青島工場

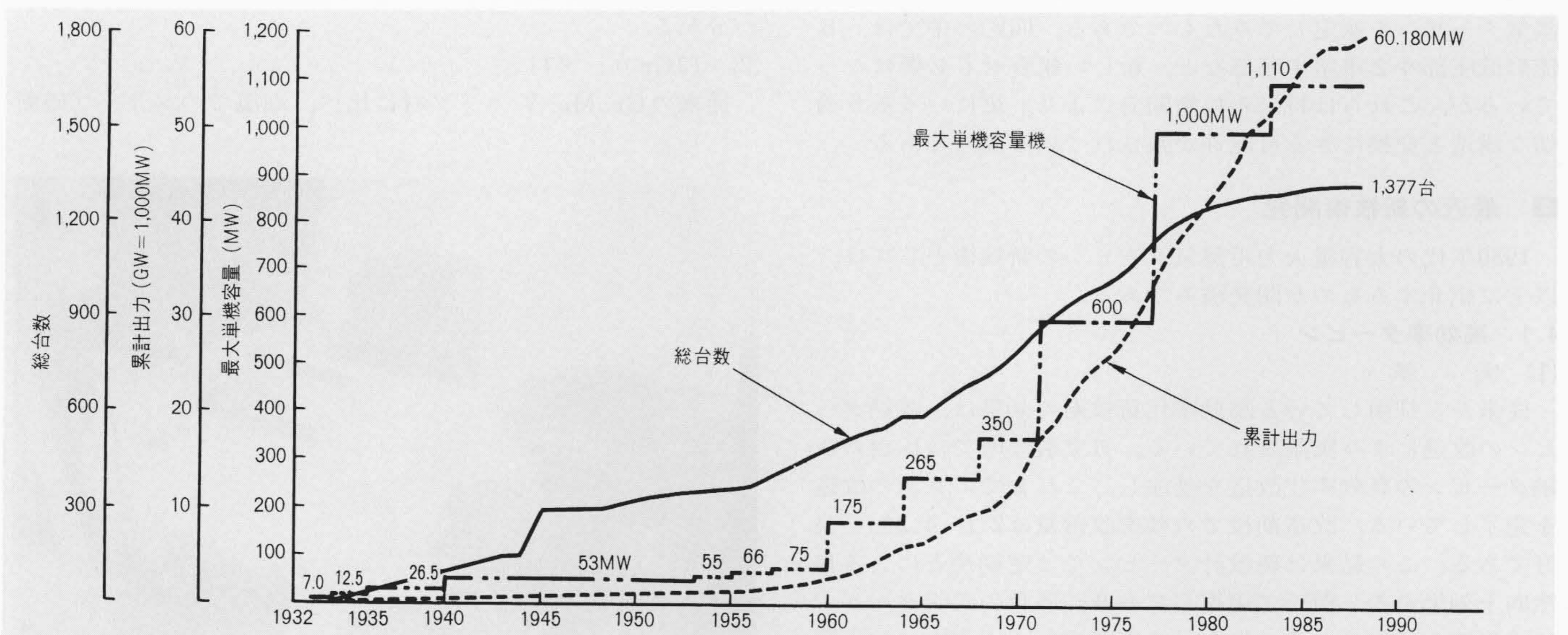


図1 日立蒸気タービンの歴史(運開年ベース) 導入技術をベースとし、更に日立製作所独自の技術開発を加えて、近年の急速な累計出力増加の原動力となっている。

* 日立製作所日立工場

	50Hz用				60Hz用			
	600MW	1,000MW	1,200MW級	1,500MW級	700MW	1,000MW	1,200MW級	1,500MW級
高速シングル スピード機 3,000/ 3,000rpm	TC4F-33.5形 CC4F-33.5形	—	CC8F-33.5形	—	TC4F-33.5形	—	CC8F-33.5形	—
デュアル スピード機 3,000/ 1,500rpm	—	CC4F-41形	CC6F-35形 CC4F-41形	CC6F-41形	デュアル スピード機 3,600/ 1,800rpm CC4F-38形	CC4F-43形	CC6F-38形 CC4F-43形	CC6F-43形

図2 将来の大容量火力発電用蒸気タービン形式 現在の技術レベル(600~1,000MW)により、将来の大容量タービン(1,200~1,500MW)を予想すると本図に示すようになる。今後の技術開発の方向は、これらのタービン形式を更に改善し、かつ高効率、高信頼性化してゆくことになる。

ガスタービン19.8%となっている。図1に累計出力と総台数の伸びを示すが、最近の出力増加傾向は大容量機時代に入ったこともあって、台数の増加に比べ出力は急激な増加を示している。

単機最大容量機の点からみると、火力発電用、原子力発電用ともに1,000~1,100MW級に到達しているが、世界的にみた場合、最大容量機は米国で稼働中の1,300MW機であり、今一步の所にある。しかし、我が国産業の発展速度を考えれば、1,200~1,500MW級のニーズも時間の問題と考えられる。したがって、これらの動向を十分に念頭におき技術開発に対処してゆかなければならない。

3 将来の大容量機

蒸気タービンは一面において組合せの技術と言える。すなわち、高、中、低圧部それぞれの技術が容量の増大に伴って特徴ある問題を提起することもあるが、逆に見れば現有技術の範囲でも、適当な組合せによりかなりの対応が可能であると言える。

図2は、試みに現状技術により可能な1,200~1,500MW級蒸気タービンを選定してみたものである。同図の中では、6流形低圧部や2車室中圧部など、新しい組合せも必要になっているが、これらは将来の技術開発により、更にいっそう適切な構造と交換できる可能性が残されている箇所である。

4 最近の新技术開発

1980年代の大容量火力用蒸気タービンの新技术としては、以下に紹介するものが開発済みである。

4.1 高効率タービン

(1) 実績

従来から採用している高効率化新技术の効果は、既納タービンの改造により実証されている。日立製作所では10台の既納タービンの高効率化改造を受注し、これまでに6台の改造を完了している。改造前後での効率改善量は2.1~4.2%と良好である。この結果は新設計タービンでは定期検査による自然向上効果を差し引いて適用しており、多数の蒸気タービンに適用済みであり、その第1号の実績機はカナダ向け輸出機で良好な性能が確認されている。

(2) バランス翼の開発

これまでの好調な実績に加え、更に高効率化を図るために自社研究所内の火力実験所に、空気、蒸気共用の試験タービン(高圧用・低圧用に共用、図3参照)を設けて研究を

継続しているが、最近、動翼の効率を著しく向上したバランス(BALANCE)翼を開発した。従来の高効率技術は主に静止部の構造改善であったが^{1)~3)}、今回開発の新技术は動翼翼形の改善であり、画期的なものである。バランス翼では、従来のラミナ翼に比べ、混合損失、二次流れ損失の低減を更に徹底して図るとともに、蒸気の圧縮性も考慮し翼形を決定している。効率向上量としては段落効率の約1.0%が可能であり、高、中圧部に適用可能である。

4.2 タービンロータ材の信頼性向上技術

(1) 高、中圧ロータ材

高温蒸気条件で運転される高、中圧タービンロータの中には、一部経年曲り現象を発生するものもある。これには種々の原因が考えられるが、ロータ製造段階での問題点を検討し、より均質性を増すために均等加熱による熱処理を行なう方法を採用し、万全を期すこととした。更に、最終検査段階で胴部外周のクリープ伸び特性が、均一になっていることを確認することとした。図4は、従来ロータ材(経年曲り発生)と改善された方法によるロータ材(経年曲り発生せず)のクリープ伸び特性とを比較して示したものであるが、その改善効果が見られる。

(2) 12Crロータ材

従来のCr-Mo-Vロータ材に比べ、高温でのクリープ破断

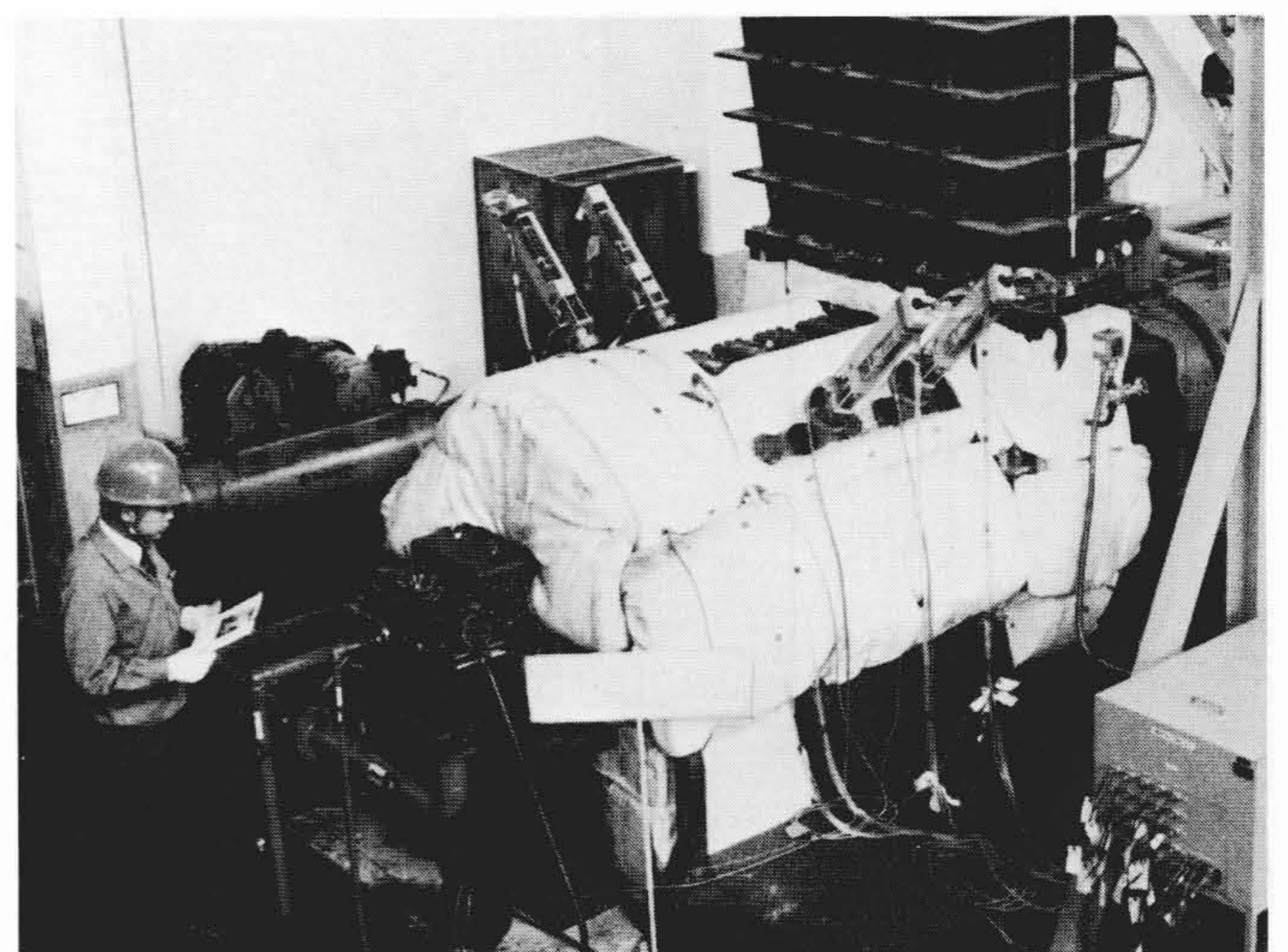


図3 空気、蒸気共用試験タービン 高効率化技術開発のために、空気、蒸気共用の試験タービン2基を設備している。計測結果は、別室のコンピュータにより自動的に記録、分析される。

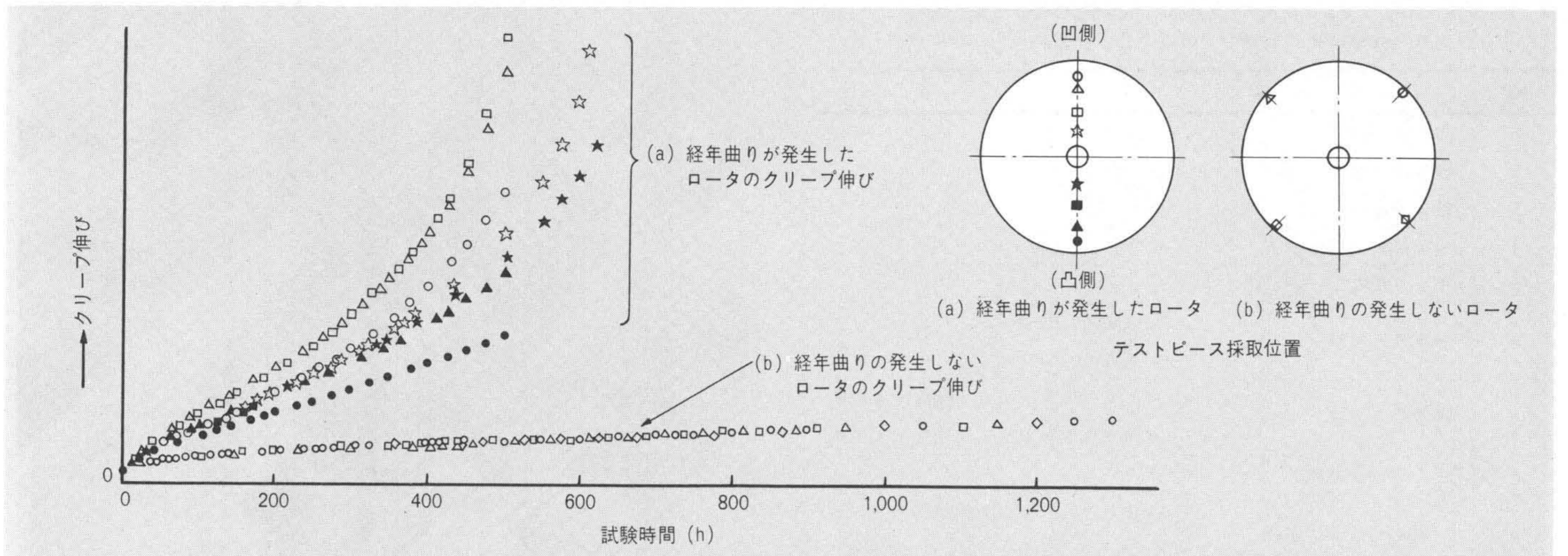


図4 高、中圧ロータ材の特徴 ロータの経年曲り現象は、クリープ伸び特性が関与していることが分かった。この場合、クリープ伸びデータに差があり、一方、改善されたロータ材では90度ごとの外周でのデータがほぼ均一であることが分かる。

強度が著しく改善された12Crロータ材は、蒸気温度566°Cの大容量蒸気タービンに適用される。日立製作所では、700MW級用中圧ロータ材を試作し、製鋼技術の確立を図った。

(3) 一体大形ロータ材

日立製作所では、世界で初めての一体鍛造方式による1,000MW級の超大形タービンロータを完成した。従来1,000MW級蒸気タービンロータの製作は、一連の製造技術上一体鍛造方式では困難(現状では600~700MW級が最大)とされており、

焼ばめ組立方式で行なわれていた。この焼ばめ組立方式によるロータは、負荷変化、起動・停止時の温度差による伸縮などにより、フレットイングコロージョンの可能性をもっている。しかし、今後の1,000MW級大形火力用タービンも、出力調整を行なう中間負荷運用が要求されてくる状況下において、この条件に十分に対応できる超大形鍛造式タービンロータの開発が望まれていた。このたび日立製作所では、製鋼メーカーの協力のもとに超大形鋼塊のための製鋼技術の改善に加え、大断面の鍛鋼品の高品質を確保するための鍛錬法、熱処理法にも技術開発を行ない、実寸法の一一体鍛造方式による超大形タービンロータの完成に成功した。図5にロータの製造手順を示す。

この一体鍛造方式による超大形ロータは、500tfの鋼塊から鍛造されたもので、仕上重量約220tf、最大外径2.5m及び長さ12mと一体鍛造方式のものとしては、我が国はもちろん世界でも最大のものである。図6に、一体鍛造方式ロータ材の寸法、重量を比較して示す。一体ロータは、従来の焼ばめ組立方式のものと比較して作用応力が約半になるなど、信頼性を飛躍的に向上させている。一方、蒸気タービンは高速回転機であり、ロータの径、長さが大きくなるほど、ロータの均質性が運転時の軸振動に大きな影響を及ぼすことになるため、一連の粗材製造技術と合わせて機械加工技術も従来以上に高い精度が要求される。日立製作所では、既にこのための製作体制〔超大形NC(数値制御)旋盤の導入〕を完備し、今回完成したロータについても、実際の大きさの状態でも、また実際の

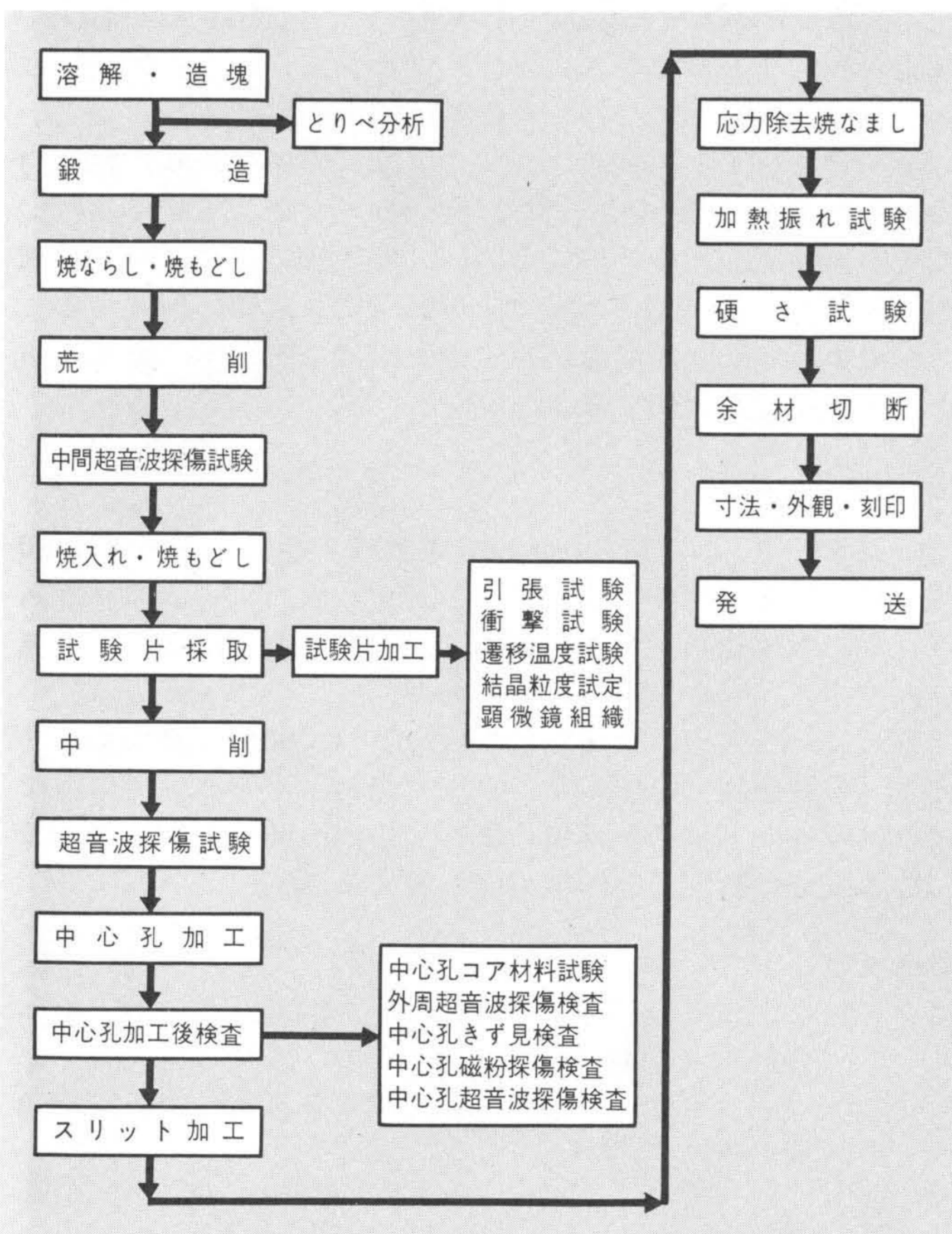


図5 一体鍛造方式大形ロータ材の製造フローチャート 製造中の新技術としては、熱処理法の改善、非破壊検査技術の改良などがある。

	形状	鋼塊	ドラム
従来最大 (50Hz, 33.5in 最終段翼 低压ロータ)	約1.6m 約8.5m	約150tf	約80tf
大形一体ロータ	約2.5m 約12m	約500tf	約220tf

図6 一体鍛造式ロータ材の比較 低速用大形一体ロータは、500tf鋼塊を必要とする。従来の最大である33.5in翼用ロータに比べ、約3倍となっている。

表1 一体鍛造方式大形ロータの試作試験結果 製鍛途中での諸試験検査及び実機と同様に高温蒸気中での高速回転試験で良好な結果が得られた。

No.	試験項目	結果
1	化学成分分析	良好
2	機械的性質	良好
3	顕微鏡組織検査	良好
4	外周超音波探傷検査	良好
5	中心孔検査	良好
6	加熱振れ試験 (HIT)	目標値=0.02mm以下 実測値=0.008mm
7	硬度分布検査	許容ばらつき=ショア硬度で4以内 実測ばらつき=ショア硬度で1以内
8	サルファ分布状態	良好
9	内部均一性確認試験	抗張力ばらつき=0.5~0.8kg/mm ² 耐力ばらつき=2.4~2.7kg/mm ²
10	破壊靱性試験	良好
試験特別発	加熱高速 ダイナミックバランス試験	良好 (軸振動=25μ以下)

高速回転、高温状態で振動試験を実施し、軸振動25μ以下という高い均質性が得られていることを確認している (表1に試験結果を、図7に機械加工中のロータを示す)。

今回のロータの完成により、今後の1,000MW級大形中間負荷運用火力タービンの信頼性向上に大いに寄与するものと考えられる。

4.3 ケーシング材の信頼性向上技術

(1) 高靱性ケーシング材

主蒸気止め弁、蒸気加減弁、組合せ再熱弁のケーシング、及び高、中圧車室には、Cr-Mo-V 鋼が使用されているが、これらのケーシング材の靱性を増す目的で、規格値よりも厳しい化学成分制限範囲を設けている。クリープき裂進展速度が著しく改善された結果、熱疲労による割れの発生を最少にすることができるため、温度変化の激しい中間負荷火力タービンに適した材料である。

(2) 高靱性ボルト材

ケーシング材の高靱性化とともに、締付ボルト材の高靱性化も図っている。日立製作所で開発した新ボルト材では残留応力が従来ボルト材の20~30%向上するため、中間負荷火力タービンでのボルトの寿命改善が可能である。

4.4 その他の信頼性向上技術

以上述べた新技術に加えて、石炭燃焼中間負荷火力用タービンでは、次に述べるような技術を採用することとなる。

(1) 長寿命設計

タービンロータは、熱応力による寿命消費量を低減するために、フラットロータ形状、新形ロータ形状が採用される。また、熱応力の低減には、コンパインドガバニング方式も有効である。

熱応力による寿命消費量は自動的に評価積算され、コンピュータに記憶される。なお、日立製作所ではマイクロコントローラによるタービン起動時の熱応力制御装置も開発済みである⁴⁾。

(2) 複合変圧運転

調速段落をもつ蒸気タービンによる変圧運転は、定圧運転域と変圧運転域の分担割合を自由に定めることができるため、主蒸気条件に合わせて変圧開始点を選定できる。通常、亜臨界圧タービンでは75%に、超臨界圧タービンでは95%に変圧

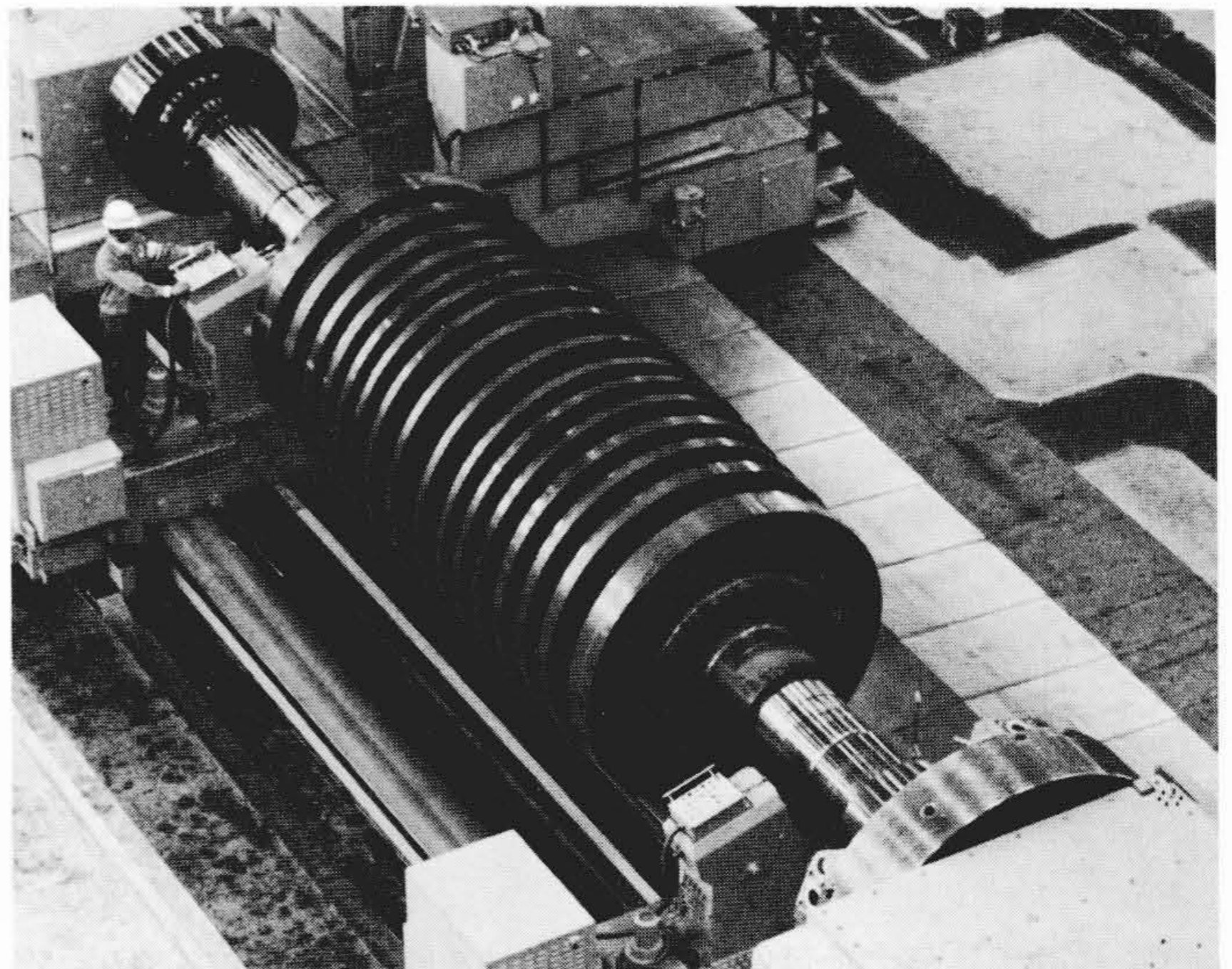


図7 一体鍛造方式大形ロータ材 超大形NC旋盤による1,000MW級大形中間負荷火力タービン用低圧ロータの機械加工状況を示す。

開始点が選ばれており、部分負荷の全域を通じて高い熱効率を得られる。

また、変圧運転タービンでは、低圧排気室内の蒸気温度が上昇する傾向にあるので、低圧排気室冷却スプレー水噴射は温度制御方式となる。

(3) 所内単独負荷運転などの過渡現象対策技術

石炭燃焼プラントでは、微粉炭設備及びボイラの燃料制御の特性との関連もあって、他の燃料を使用したプラントに比べ全体として応答が緩慢となる。したがって、タービンバイパス装置や起動バイパス装置の設備、FCB (Fast Cut Back) 機能の具備などが考慮されなければならないが、蒸気タービンとしてはこれらに対応した技術は開発済みである。

タービンバイパス装置については既にも実績もあり、容量的検討を残すだけである。また、タービン負荷しゃ断に連続して所内単独運転に移行する際には、低圧排気室にスプレー水を噴射する必要がないように、再熱温度を適切に制御することが望ましいし、逆電流防止装置を設けてモータリングの防止を図ることも大切である。

5 結 言

日立タービンは、累計出力60GW突破を達成し、鋭意、1980年代の大容量火力発電用蒸気タービン技術の研究開発を進めている。本稿で紹介した高効率、高信頼性新技術は、石炭燃焼火力プラントに適用が可能である。

更には、現有の技術範囲でも1,200~1,500MW級大容量タービンの製作は可能であり、ロータ素材、ケーシング素材などの信頼性向上技術の採用により、中間負荷火力タービンとしても十分に設計、製作は可能と考える。

参考文献

- 1) 二宮, 外: 高効率・高信頼性蒸気タービン, 日立評論, 60, 793~798 (昭53-11)
- 2) 久野, 外: 最近の1,000MW級大容量蒸気タービン, 日立評論 59, 259~264 (昭52-4)
- 3) 岩井, 外: 蒸気タービンの省エネルギー対策, 火力原子力発電, 30, 1197 (昭54-11)
- 4) 上野, 外: 中間負荷火力用変圧運転プラント, 日立評論, 59, 265~268 (昭52-4)