# 蒸気タービン新技術の適用

# Application of Recent Techniques to Large-Scale Steam Turbines

大容量火力用蒸気タービンの新技術については、これまでに種々の論文により紹介されている。しかし、それら新技術の実機への適用状況と、数個の新技術を組み合わせて適用した場合の相乗効果などについて論じたものは少ない。

本論文では、最近の大容量機でのロータ材新技術の適用状況などを紹介するとともに、これによってもたらされた組立、試験の合理化の一例について紹介する。このような新技術の組合せによる相乗効果は、より高い機械の信頼性をもたらすものと確信する。

ここに紹介した新技術は、火力機だけでなく原子力機についても有効であり、今 後のプラントへ鋭意適用を図ってゆきたい。 柏原克人\* Katsuto Kashiwabara 森谷新一\* Shin'ichi Moriya

河田安司\* Yasuji Kawada

#### 1 緒言

我が国の火力発電用プラントは、1,000MW級の大容量機が 次々と運転を開始しており、建設中、計画中のものについては 最新技術を導入して、中間負荷火力運用にも適した機械を採 用するようになってきている。

日立製作所では、これまでに大容量火力用蒸気タービン向け新技術の一端として、国産12 Cr(クロム)ロータ材、大形一体ロータ材などの信頼性向上技術を開発し実機に適用している。これらの新技術は、総合的に発電設備の信頼性を向上させることはもとより、機械の製造合理化にも寄与する。一例を挙げれば、従来焼ばめ式ロータを採用していた低速回転機では、製造手順と寸法精度の関係で採用できなかった CCS 組立方式(Computer Aided Clearance Control System)が、大形一体ロータ材の適用により採用可能となったなど効果が大きい。

更に最近、従来から現地試運転時に使用している軸振動解析装置を、カラーディスプレイと予測計算機能をもつ新形のもの(HICVA: High Level Computerized Vibration Analyzer)にして合理化を図ることも行なっている。

本論文では、これら新技術の導入状況を紹介するとともに、 数個の新技術の併用による相乗効果について論じる。

### 2 タービンロータ材の信頼性向上技術の適用状況

#### 2.1 国産12Crロータ材

再熱温度 566  $^{\circ}$ C の複流式中圧ロータでは、中央の蒸気入口部に蒸気が停滞するために、ロータの表面温度が 566  $^{\circ}$ C の高温となり、従来のCr-Mo-V(クロムーモリブデンーバナジウム)ロータ材では強度不足となる。このような高温蒸気にさらされるロータには、12Crロータ材が最適である。この12Crロータ材は、1,000MWタービン技術の一部として海外から導入されていたが、日立製作所では国産化のために実物大ロータ素材による開発・試作を実施し、良好な結果を得ることができた。

開発した12Crロータ材の材料規格としては、多数の実績のあるNb(ニオブ)入りのものを選択した。このロータ材の化学組成は、11%Cr-1%Mo-0.2%Vに焼入れ性の向上のため、約0.1%のNbを添加したものである。

試作したロータ素材は700-1,000MW級用中圧ロータ実物大のもので、鋼塊重量は約100tf、ドラム形状重量は約40tfである。

ロータ素材の製作は、日立製作所で行なった。日立製作所では従来からタービンロータ素材の製作を多数手がけており、今回の12Crロータ素材の試作でも十分に信頼性の高いものを製作できる技術をもっていたが、実物大ロータ素材の試作に先行して、8~45tfの小形ロータ材を数本製作している。これらの小形ロータ材は、既に産業用高速回転タービン向けに使用され良好な運転実績を得ている。

図1に完成した12Crロータ素材を示す。この試作では、大 形鋼塊の製造要領の確立はもとより、高温ロータ材としての 特性が十分に得られ、かつ信頼性の高いロータ素材とするこ とに努力した。これら一連の検討によって、インゴット形状 の最適化、化学成分の適正化、熱処理条件の向上などが図ら れた。

表1に試作ロータの材料試験結果のまとめを示す。化学分析結果,機械的性質は規格値どおりであり,顕微鏡組織も良好である。サルファプリントにより,同心ロータとなっていることも確認できた。タービンロータ材の高温特性で最も重

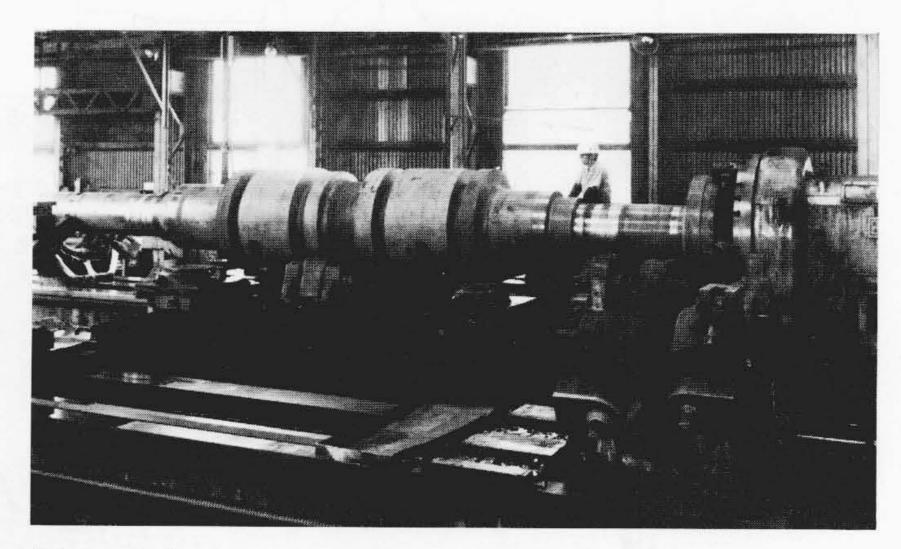


図 I 完成した I 2 Cr ロータ素材 700~ I,000 MW 用中圧ロータ素材の試作を実施した。本写真は I 00 t f 鋼塊から製造されたロータ素材を示すものである。

<sup>\*</sup> 日立製作所日立工場

要となる加熱振れ試験結果は、0.000mmと振れ量が検出されなかった。また、熱処理の均一性を確認する硬度のばらつきも、ショア硬度で1以下と小さく、均質なロータ素材が得られている。

12Crロータ材の最大の特徴である高温クリープ破断強度は、 図2に示すように試験データは、この材料のScatter Bandの 上限に近い値が得られている。これにより、566℃の高温蒸気 条件に対し十分に信頼性の高いロータ材となっていることが 分かる。

高温用ロータ材のもつべき特性の一つに、経年曲りが発生しないロータ材であることが要求される。ロータの経年曲り現象については以前から十分に検討し、対策しているが、今

表 I I2Crロータ素材の試作結果 材料試験結果はすべて良好である。 特にHIT試験では加熱振れ量=0.000mmと極めて良く、クリープ特性試験結果 にも経年曲り防止対策効果が表われている。

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	HIT (加熱振れ試験)	目標值=0.05mm以下 実測值=0.000mm		
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	破壊靱性試験	従来のデータの上限		
10	高 温 強 度 試 験	Cr-Mo-V鋼よりも優れている。		
11	高温クリープ破断試験	Scatter Bandの上限		
12	高温クリープ特性試験	軸対象性良好及びクリープ伸び率小 (経年曲りが生じない)。		

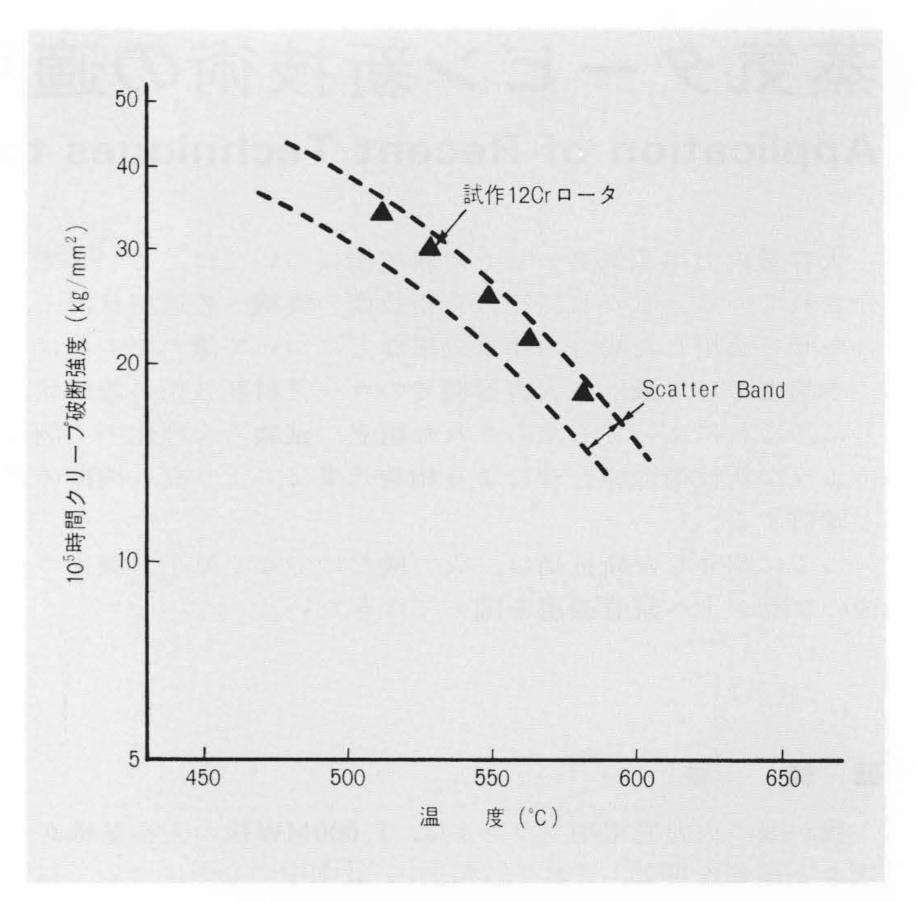


図 2 試作 I 2 Cr ロータ素材の高温クリープ破断強度 10<sup>5</sup>時間高温 クリープ破断強度は、従来の実績範囲内の上限に近い値が得られた。

回の試作ロータについても、均等加熱、回転焼入れ法の採用による均一な熱処理を行なった。その結果、経年曲り現象の主原因である高温クリープ伸び特性は図3に示すように良好な結果となっている。すなわち、ロータ材中央部胴周りのクリープ特性が均一で、かつクリープ伸び率も小さく20年以上の運転でも曲りが検出されない程度であることが分かった。

中間負荷火力用タービンに採用される場合の12Crロータに要求される特性としては、高頻度の起動-停止繰返し運転で、ロータの高温部での熱応力疲労に対しても特性が改善されることである。この特性は、低サイクル熱疲労強度により判別

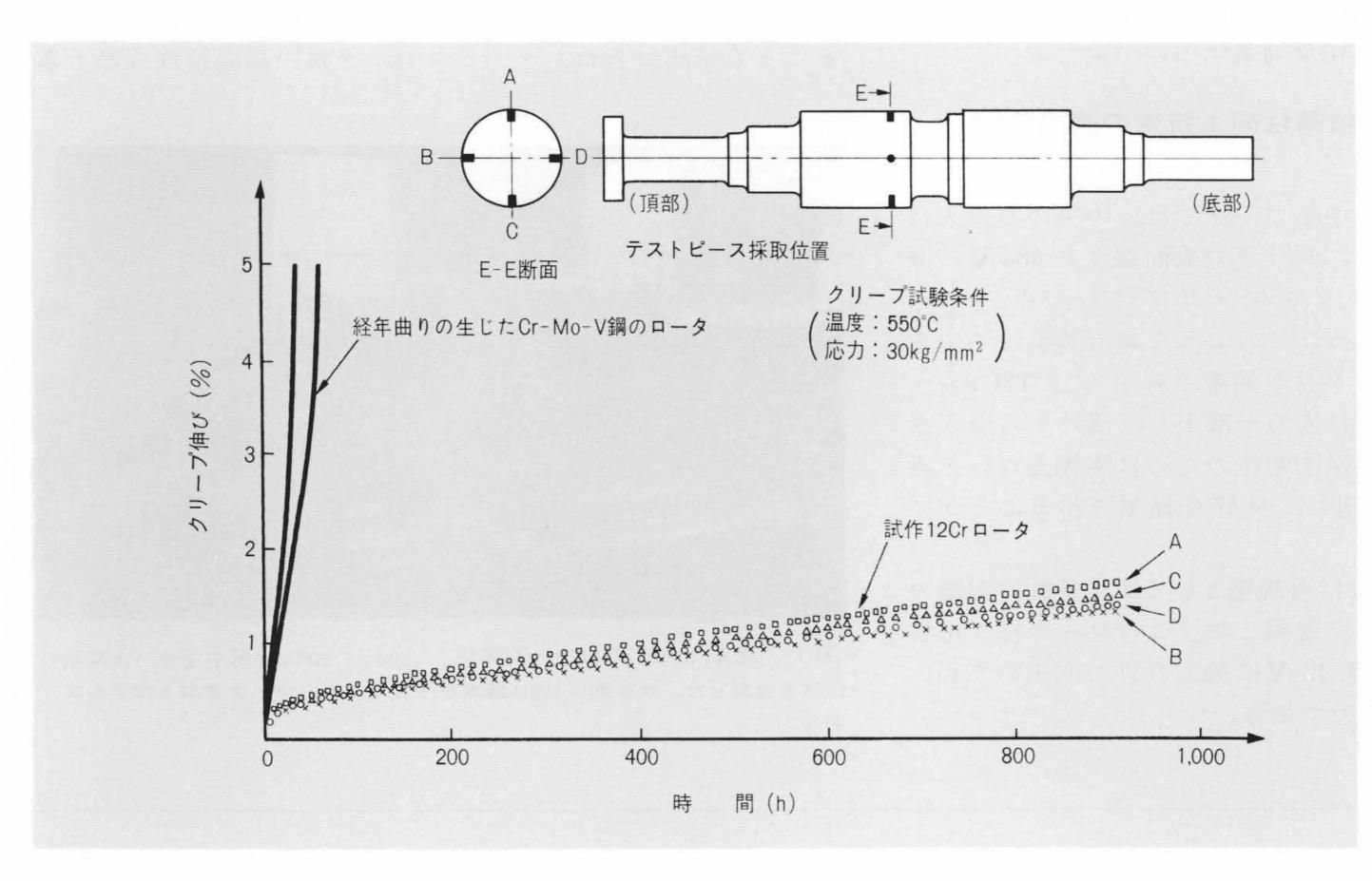


図3 試作12Crロータ素 材のクリープ伸び特性 経年ロータ曲りの主原因であ る高温クリープ伸び特性は良 好であり、対策が十分に行な われている。

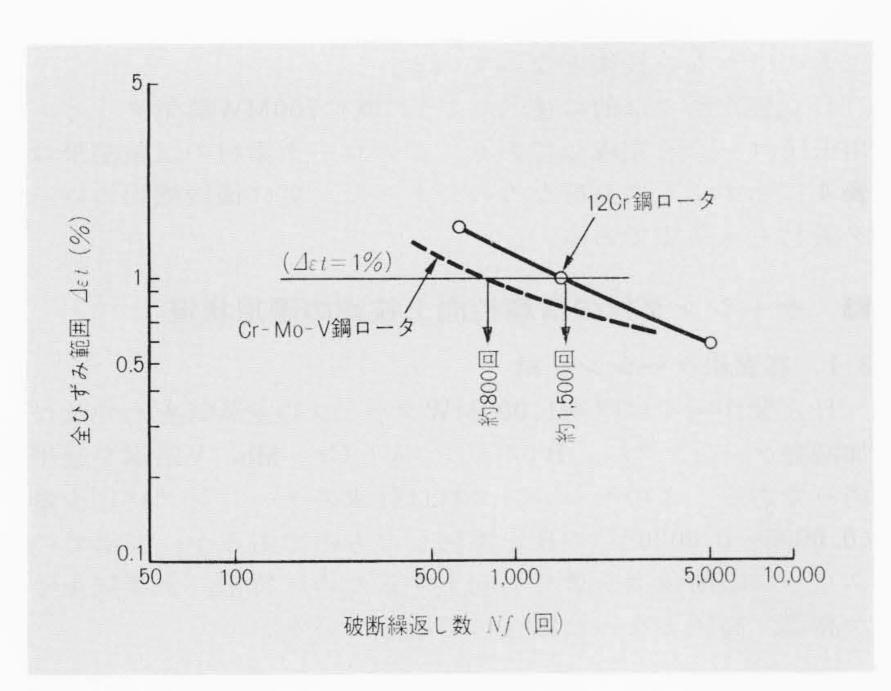


図 4 試作12Crロータ素材の低サイクル疲労特性 12Crロータ材は低サイクル疲労寿命も延びるため、中間負荷火力運用にも適している。

されるが、図4に示すように、従来のCr-Mo-Vロータ材のデータに比較して高い値となっている。すなわち、熱ひずみ1%が発生する比較的大幅な温度変化に対し、従来のCr-Mo-Vロータ材の破断繰返し数が約800回であるのに対し、12Crロータ材では約1,500回と2倍近くに寿命が延長されている。

更に、このロータ素材の特性を完全に把握するために、試作ロータ素材を切断し、中央付近から円板2枚を切り出してスピンテスタを用いて回転破壊試験を実施した。それぞれの円板には内孔のノッチ部に、あらかじめ初期疲労き裂を入れてあり、空気タービンにより回転数を上昇して破壊させた。試験の結果、破壊回転数は6,720rpmであり、3,600rpmの1.87倍であった。また、この回転破壊試験により求めた試作ロータ材の破壊靱性値と、別途実施したコンパクト試験片による

表 2 12Crロータ材の適用状況 12Crロータ材の導入当初は海外から購入していたが、最近のものは国産材料が採用されている(本表のNo.2)。

No.	出 カ (MW)	蒸気条件 (atg-℃/℃)	12Crロータ 使用 箇 所	運開年
1	1,000	246-538/566	中圧ロータ	昭和52年
2	1,000	246-538/566	中圧ロータ	昭和59年
3	700	246-538/566	中圧ロータ	昭和60年

破壊靱性値を図5に比較して示す。

以上述べたように、日立製作所ではNb入りの12Crロータ素材を試作し良好な結果を得ている。現在製作中のものも含めて、今後の12Crロータ材は国産で十分に信頼性の高いものを供給可能である。表2に日立製作所の12Crロータ材の使用状況を示す。

#### 2.2 一体鍛造式大形ロータ材

低速回転の低圧ロータでは、従来は焼ばめ式が採用されていたが、最新技術ではこれを一体鍛造化した大形一体式ロータとすることにより信頼性向上が図られている。図6に焼ばめ式ロータと一体式ロータの形状を比較して示す。日立製作所で開発試作した一体鍛造式大形ロータの詳細については文献<sup>1),2)</sup>に示されている。

日立製作所ではこの大形一体式ロータを既に表3に示す蒸気タービンに採用済みである。最近では、700MW蒸気タービンの低圧部に一体式ロータを採用した例がある。このタービンの低圧部には38in長翼を用いた大形ロータが2本必要であり、従来は焼ばめ式ロータが必須であったところを、大形一体式ロータの開発試作が良好であったことから初めて採用したものである。図7にこのタービンの現地据付状況を示す。

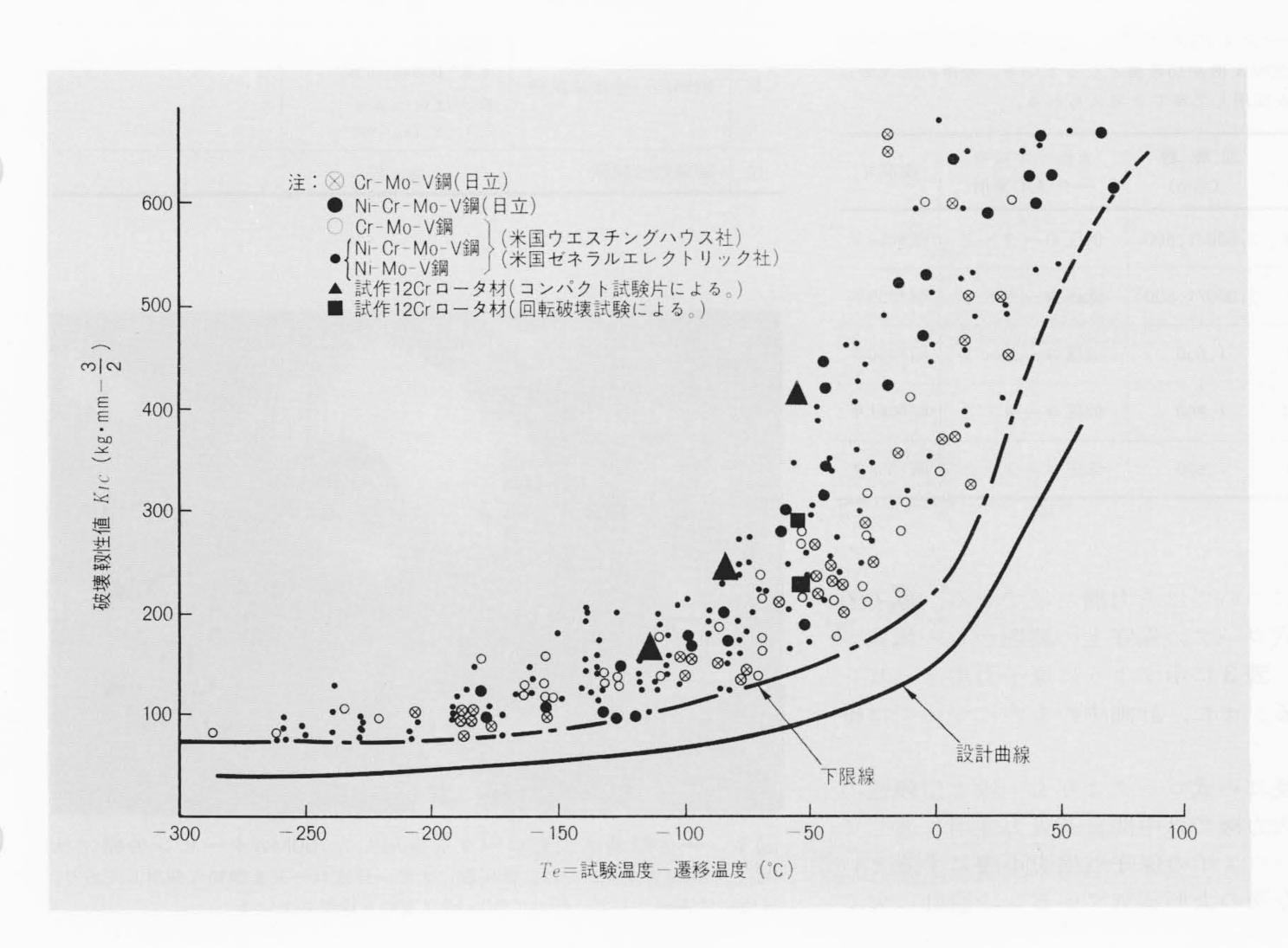


図5 試作12Crロータ素材の破壊靱性値(Kic) 従来の高温用Cr-Mo-V鋼,低温用Ni-Cr-Mo-V鋼と同等以上のKic値が得られた。これによって、内部欠陥に対する抵抗力が十分に大きいことが分かった。

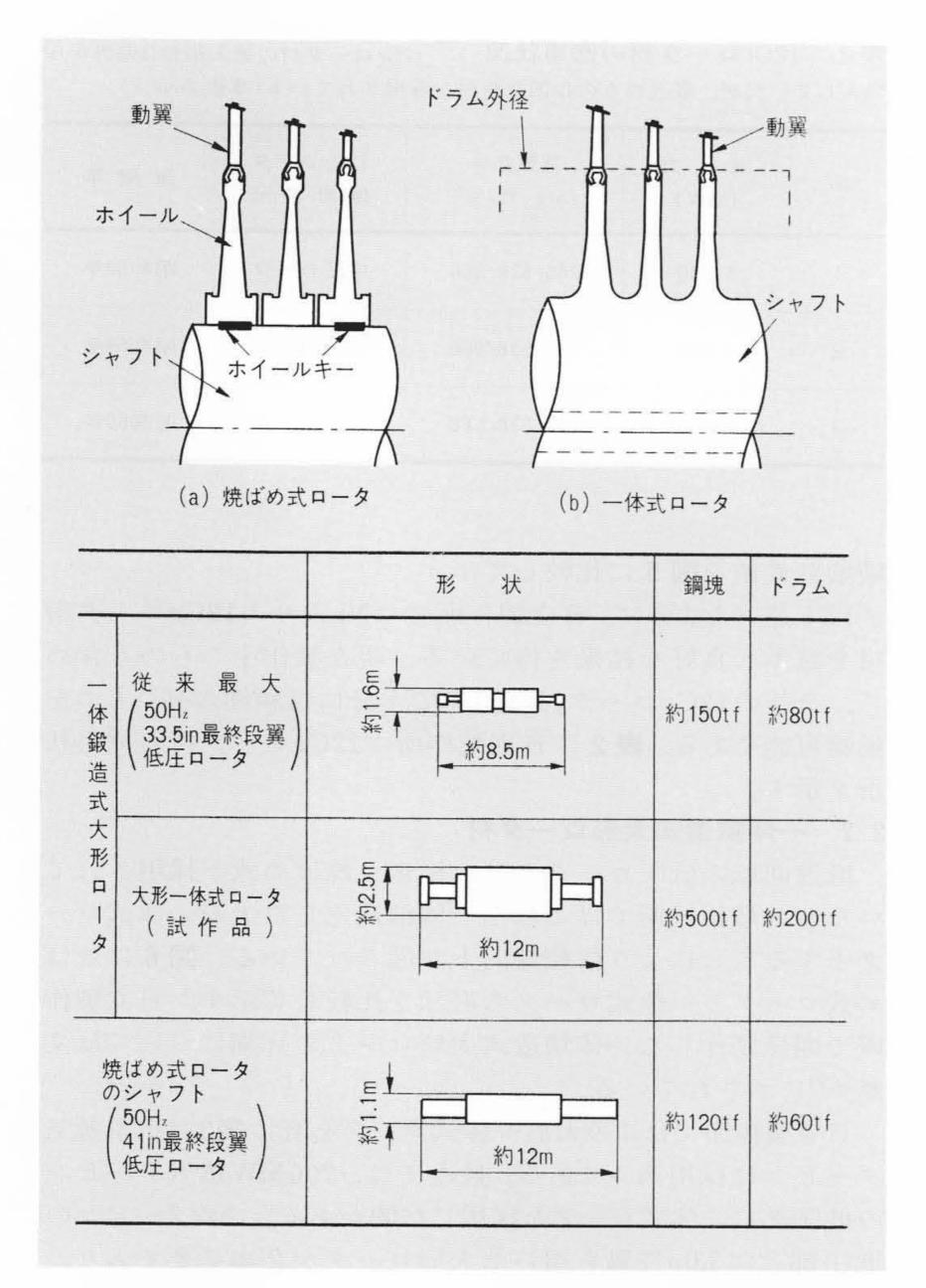


図 6 焼ばめ式ロータと一体式ロータの比較 一体鍛造式大形ロータ素材は鋼塊重量が大きく、焼ばめ式ロータシャフトの4.2倍、高速用一体鍛造式ロータの3.3倍となる。

表3 一体鍛造式大形ロータの納入実績 火力機では700MW機が初号機であり、原子力機では1,100MW機が初号機となっている。今後の低速機はすべて一体鍛造式大形ロータを採用してゆくと考えられる。

Ν	0.	出力 (MW)	タービン 形 式	回 転 数 (rpm)	大形一体式ロータ使用箇所	運開年
火力	1	700	CC4F-38	3,600/1,800	低圧ロータ× 2	昭和58年
機	2	1,000	CC4F-41	3,000/1,500	低圧ロータ× 2	昭和59年
原子力機	1.	1,100	TC6F-41	1,500	低圧ロータ× 3	昭和60年
	2	1,100	TC6F-43	1,800	低圧ロータ× 3	昭和61年
	3	1,100	TC6F-41	1,500	低圧ロータ× 3	昭和64年

また,一体式ロータについては火力機だけでなく,原子力用タービンでも焼ばめ式ロータの保守上の問題から一体式ロータとする傾向が強く,表3に示すように原子力用タービンも多数採用の予定である。また,計画中のものについては推奨中である。

このように、従来の焼ばめ式ロータよりも一段と信頼性の高い一体式ロータは、火力機では中間負荷火力運用に適しており、原子力機ではキーウエイの保守点検を不要にするという利点をもっており、今後の大形蒸気タービンの設計に欠く

ことのできない技術となっている。

日立製作所では前に述べたように既に700MW蒸気タービン 用低圧ロータを完成しており、このロータ素材の試験結果は **表4**に示すように良好なものであった。更に後続機用のロー タ素材も入荷中である。

## 3 ケーシング材の信頼性向上技術の適用状況

#### 3.1 高温用ケーシング材

日立製作所では既納1,000MWタービンの主蒸気止め弁及び加減弁ケーシングに、B(ボロン)入りCr, Mo, V鋳鋼を適用済みである。このケーシング材は従来のケーシング材に少量 $(0.0005\sim0.0020\%)$ のBを添付したものであるが、高温でのクリープ破断強度が著しく向上するため、将来、主蒸気条件が高温、高圧となった場合にも適している。

表4 一体鍛造式大形ローダの試験結果 1本目,2本目とも試験結果 果は良好で,信頼性の高いロータ材ができ上がった。これら2本のロータ材は,700MWタービンの低圧ロータに使用済みである。

No.	試験項目	本目ロータの  試験 結果	2 本目ロータの 試 験 結 果	
1	化学成分分析	良好	良好	
2	機械的性質	良好	良好	
3	顕微鏡組織検査	良好	良好	
4	外周超音波探傷検査	良好	良好	
5	中心孔検査	良好	良好	
6	HIT	目標值=0.02mm以下 実測值=0.008mm	目標値=0.02mm以下 実測値=0.009mm	
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	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	良好	
9	内部均一性確認試験	抗張力ばらつき= 0.5~0.8kg/mm <sup>2</sup> 耐力ばらつき= 2.4~2.7kg/mm <sup>2</sup>		
10	破壊靱性試験	良好	_	

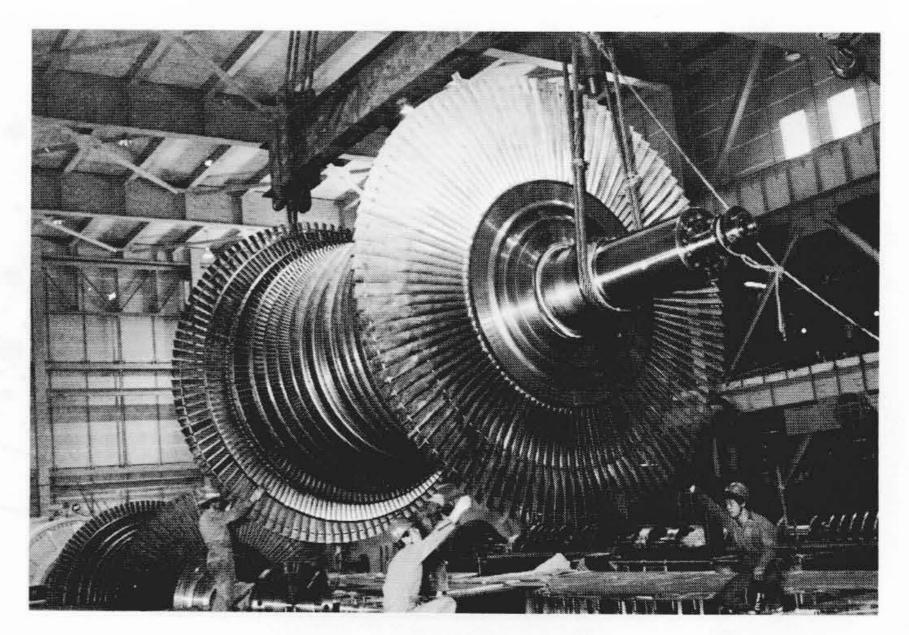


図7 一体鍛造式大形ロータを採用した700MWタービンの据付状況 700MWタービンは、低圧部に大形一体式ロータを最初に採用しており、同時に低速機として、初めてCCS組立方式も採用している。

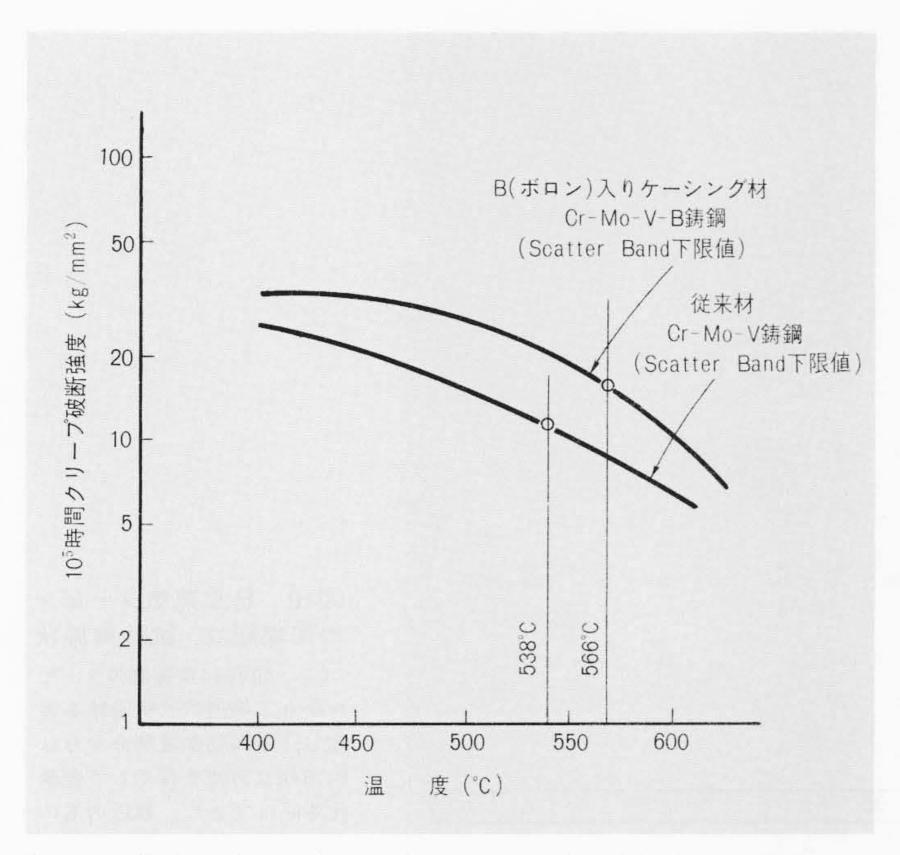


図 8 B(ボロン)入り鋳鋼の高温クリープ破断強度 105時間クリープ破断強度を比較すると、B(ボロン)入り鋳鋼は、従来材に比較して数段強い。

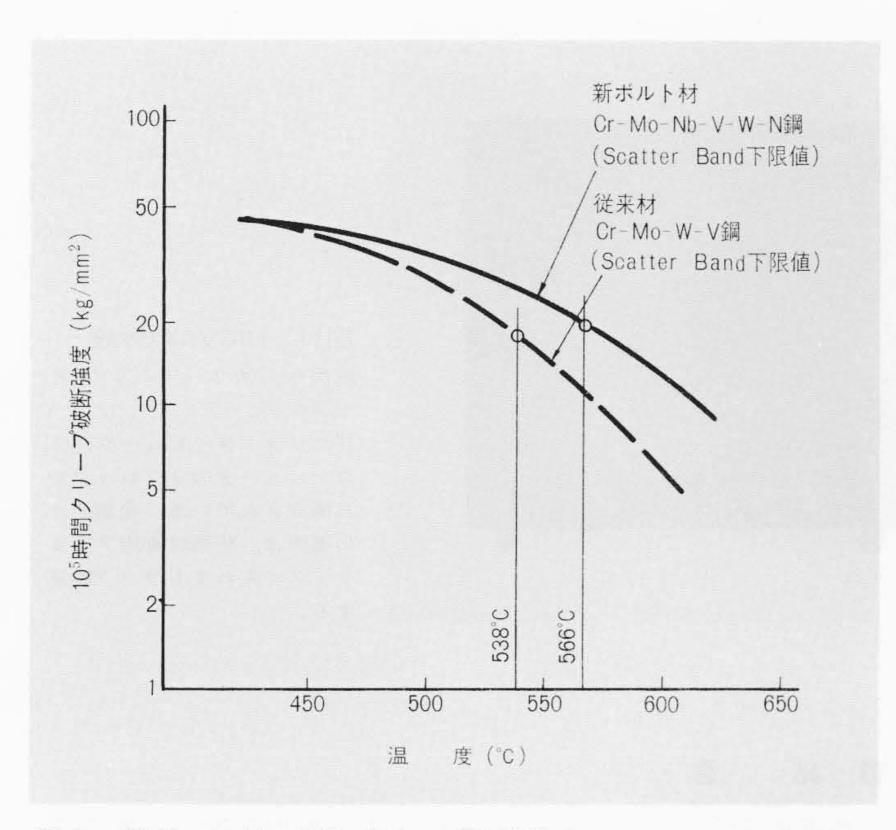


図 9 新ボルト材の高温クリープ破断強度 新ボルト材(Cr-Mo-Nb-V-W-N鋼)では、従来材(Cr-Mo-W-V鋼)の538℃の強度が、566℃でも得られる。したがって、高温部の締付ボルトに適している。また、同一条件では I ランク細いボルトにできる。

このケーシング材の製作に当たっては、構造溶接部の熱影響範囲の微細割れ防止対策を十分に配慮した。これまでの運転経過は良好であり、更に大形の鋳鋼品への適用も可能であると考えている。図8に、B入り鋳鋼材の高温クリープ破断強度を示す。

### 3.2 高温用ボルト材

高温部の締付ボルト材についても、新材料を試験的に使用し実績が出ている。このボルト材は日立製作所が独自に開発した材料で、主要成分は11Cr-1 Mo-0.2Nb-0.2V-0.2W(タングステン)-N(窒素)である。このボルト材の高温クリープ破断強度は、 $\mathbf{図}$ 9 に示すように改善されており、ボルトサイズ

を1ランク下げても従来材と同等の締付力が得られる。

この特性を生かすことによって、ケーシングフランジの小形化が図られ、中間負荷火力用高圧ケーシングの信頼性が向上する。また、566℃の高温部のフランジボルトに最適なボルト材でもある。

#### 4 組立,試験新技術の適用状況

# 4.1 CCS(Computer Aided Clearance Control System) 組立方式

日立製作所では昭和44年運開の火力機から工場通気試験を 省略し、昭和46年運開の火力機からCCS組立方式を採用して いる。

最近ではほとんどのタービンがCCS組立方式の採用により、 工場組立を行なわずに現地に発送している。このCCS組立方 式では、部品単位の寸法、品質管理が厳重に行なわれるため、 信頼性の高い部品ができ上がるとともに適正間隙が得られる ので熱効率向上にもつながる。また、工場通気試験による正 常状態から外れた条件での無理な運転をすることもなく、機 械を納入できることになる。

日立製作所での工場試験合理化は、(1)工場通気試験省略、(2)ブロック組立(各車室単体ごとの組立実施)の採用、(3)CCS組立方式の採用の順で進められてきた。図10にその経緯を示す。また、工場通気試験を省略し始めた昭和44年運転開始以降の実績では、表5に示すようにCCS組立方式の占める割合は44%に、工場通気試験省略の割合は73%になっている。

最近工場出荷した700MWタービンでは、低速回転の低圧部を採用しているが、前項2.2で述べたように一体鍛造式大形ロータを適用した。このため、低圧ロータの機械加工手順が高速機用ロータと同一にできたこと、仕上加工精度が焼ばめ式ロータに比較して著しく向上したことなどにより、初めて低速回転機へのCCS組立方式が適用可能となった。従来の焼ばめ式ロータでは、正確なロータ寸法がオーバスピードテスト完了時まで把握できないため、ブロック組立てが限界であった。このような大形低圧部を含むタービンへのCCS組立方式の適用は初めての試みであり、長間隔のディスク間寸法や、大径のロータ径を精度良く測定するための数々の測定工具の考案が必要であった。現地据付では、コンピュータの予測どおりの組立てが実施されており、大形機のCCS組立方式も確立されたことになる。

この例では、一体鍛造式大形ロータの適用がCCS組立方式の採用を可能とし、結果的に建設工程の短縮、組立間隙精度向上による熱効率の向上などの相乗効果が表われている。

#### 4.2 HICVA(新形軸振動解析装置)の導入

現地試運転時のタービン発電機軸振動調整は、手間のかかる作業である。従来からポータブルな軸振動解析装置を発電所に持ち込んでバランシング作業を実施していたが、このたび、最新の解析技術を導入したHICVA(High Level Computerized Vibration Analizer:新形軸振動解析装置)を開発した。

このHICVAは、常設の軸振動検出器の出力を用いて解析を行なえるようになっている。専用コンピュータにカラーディスプレイ表示、記憶用フロッピーディスク、X-Yプロッタ、タイピュータを組み合わせたコンパクトな設計となっており、発電所の中央操作室に搬入して、短時間に振動解析を行なう機能をもっている。この解析装置の特徴は、リアルタイムの解析結果がカラーディスプレイに表示されるので、視覚的判断が可能となっていることである。また、アンバランス量調整

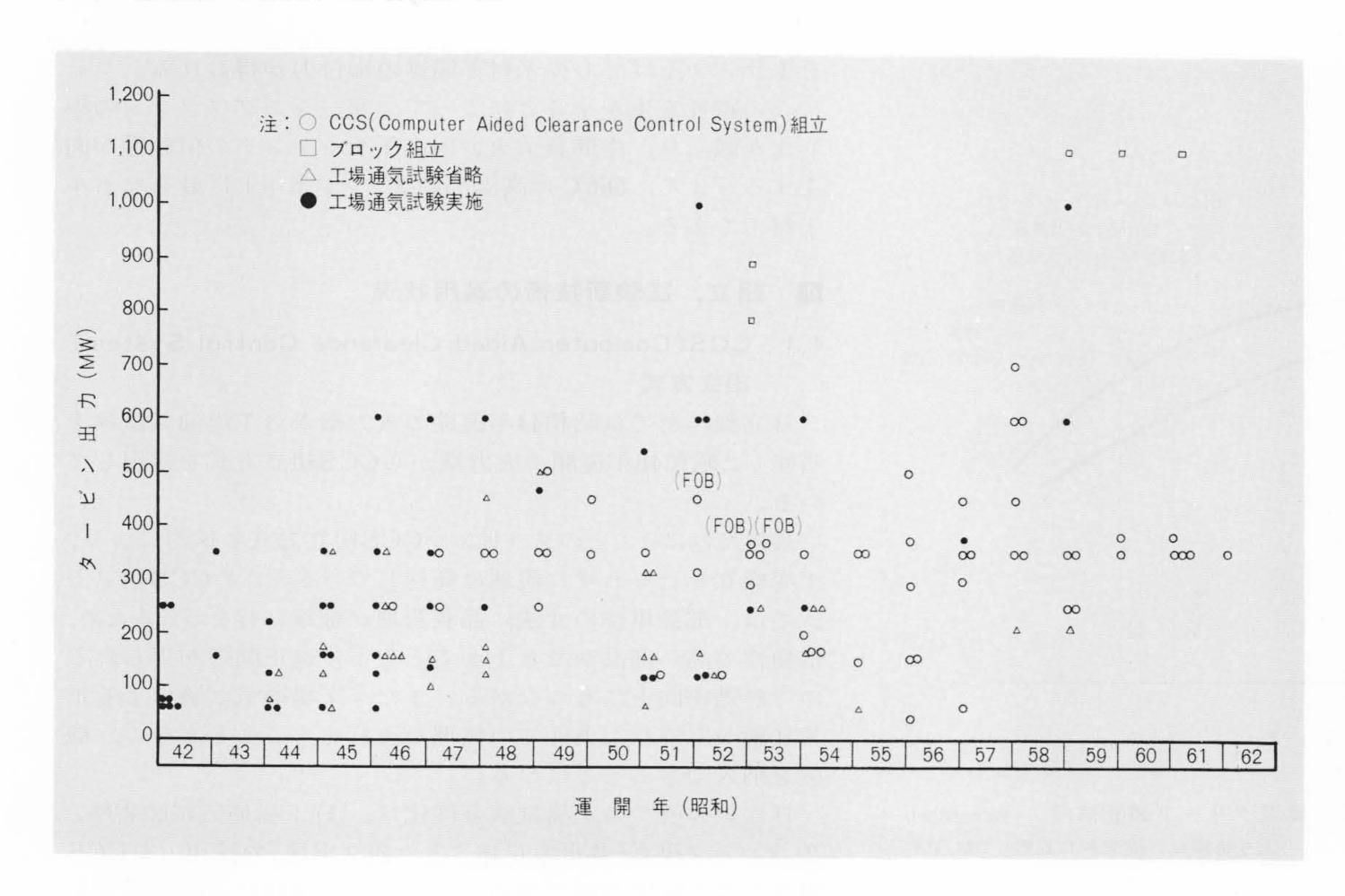
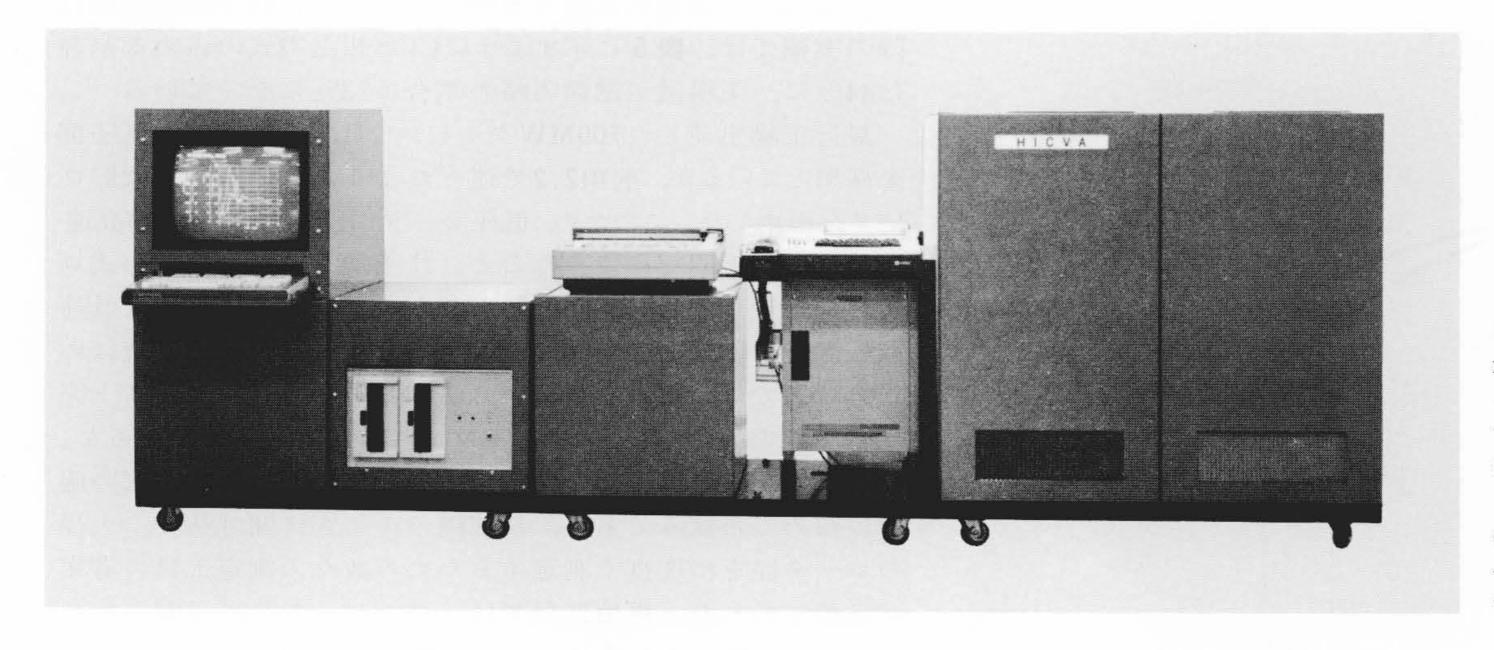


図10 日立蒸気タービンの工場組立,試験実施状況 昭和44年運開のタービンから工場通気試験省略を実施し、昭和46年運開分からはCCS組立方式を採用して合理化を図ってきた。最近のものは、ほとんどすべてのタービンにCCS組立方式を採用している。



図II HICVAの外観 左から(I) カラーディスプレイ +フロッピーディスク, (2) X-Y プロッタ+タイピュータ, (3) コンピュータの3ブロックか ら構成されている。発電所へ の運搬は、防振付専用アルミ ケースに入れてトラック輸送 する。

表 5 昭和44年運開分以降の工場組立,試験合理化割合 昭和44年運開分以降の35MW以上のタービンのうち73%は工場通気試験を省略し,44%にはCCS組立を採用している。

No.		実績台数 (合計128台)		
Ī	工場通気試験実施済み			(27%)
2	CCS組立	(44%)		,
3	ブロック組立	(4%)	工場通気試験省略済み	(73%)
4	総合組立	(25%)		

のための予測計算機能をもっているので、バランス作業の精度が向上する。解析結果のレポートは、タイピュータとX-Yプロッタによって随時取り出せるようになっている。

本HICVAの導入により、試運転時のバランス作業の合理化が図られるとともに、定期点検後の立上げなどアフターサービスについても能率向上が図られるものと考えている。図11にHICVAの全体写真を示す。

# 5 結 言

最近の大容量火力機に対する新技術の適用状況の一端を紹介した。ロータ材の品質向上は、蒸気タービンの信頼性のために最も重要な因子であるが、高品質の12Crロータ材及び大形一体式ロータは定着化した感がある。

このように、ロータ材の品質向上とともにCCS組立方式の 完全採用など、品質管理技術の推進は、いっそう信頼性の高 い機械の供給へと連なるものと確信する。また、HICVAの導 入によりバランス作業の合理化も図られている。

これらの技術は、火力機だけでなく原子力機についても有 効であり、今後のプラントへ鋭意適用を図ってゆきたい。

#### 参考文献

- 1) 二宮,外:大容量タービン用一体ロータの開発,火力原子力 発電, Vol. 32, No.11, 1193~1197(昭56-11)
- 2) 久野,外:大容量火力発電用蒸気タービンの新技術,日立評論,62,4,263~266(昭55-4)