

蒸気タービン用ロータ材料の最近の技術進歩

Recent Development in Steam Turbine Rotor Materials

最近の蒸気タービン技術は、単機容量の増大と蒸気条件の高度化に対応して、特に高温用材料の開発の分野に目覚ましい進歩がみられ、すでに超々臨界圧蒸気条件も含めて、ほぼすべての要求に対応できる体制が整えられつつある。その中でもタービンロータ材については重要な進歩がみられ、高強度の新しいロータ材の開発や、製鋼、検査技術の高度化が図られている。

また、最近のタービンロータ材に対する新たなニーズとしては、大容量機だけでなく中・小容量機のコンパクト化、および再熱式コンバインドプラント用蒸気タービンのように、高圧、中圧、低圧を一軸上に構成するタービンからの要求が強まってきている。この対応策として、日立製作所では高靱性Ni-Cr-Mo-V鋼の開発を進行させているので、その概要についても述べる。

金子了市* Ryōichi Kaneko
森谷新一* Shin'ichi Moriya
福井 寛** Yutaka Fukui

1 緒 言

蒸気タービンを駆動する蒸気条件の高圧・高温化の傾向は、単機容量の増大に伴ってますます進展しつつある。特に、ここ数年の間に超々臨界圧(USC: Ultra-Super Critical)タービン技術の開発が急ピッチに進められるなど、高温用タービン材料に関する技術開発には目覚ましいものがある。

本稿では、その中でも蒸気タービンの主要材料の一つであるロータ材に焦点を当て、蒸気タービン設計技術者側からみた材料技術開発の推移について概説する。

2 蒸気タービン用ロータ材の開発推移

2.1 タービンロータ材に対するニーズと開発技術例

蒸気タービン技術の進歩にとっては、単機容量の増大化という大きな目標があり、このために必要となる技術の開発がこれまでに継続して行われてきている。この状況を実績の面からみると、1960年代から使用されるようになった16.6 MPa-566℃(主蒸気)/566℃(再熱)の蒸気条件は、それまでの単機容量が75 MWであったものを、約5年後に350 MWに増大させ、次のステップとして、1970年代には24.1 MPa-538/566℃の超臨界圧蒸気条件が採用されるようになり、それから約10年の間に一気に600 MW機、続いて1,000 MW機の実現をみている。また、この間には二段再熱蒸気条件[24.1 MPa-538℃(主蒸気)/552℃(第1段再熱)/566℃(第2段再熱)ほか]の採用も行われている。

このように、単機容量の増大と蒸気条件の高圧・高温化が

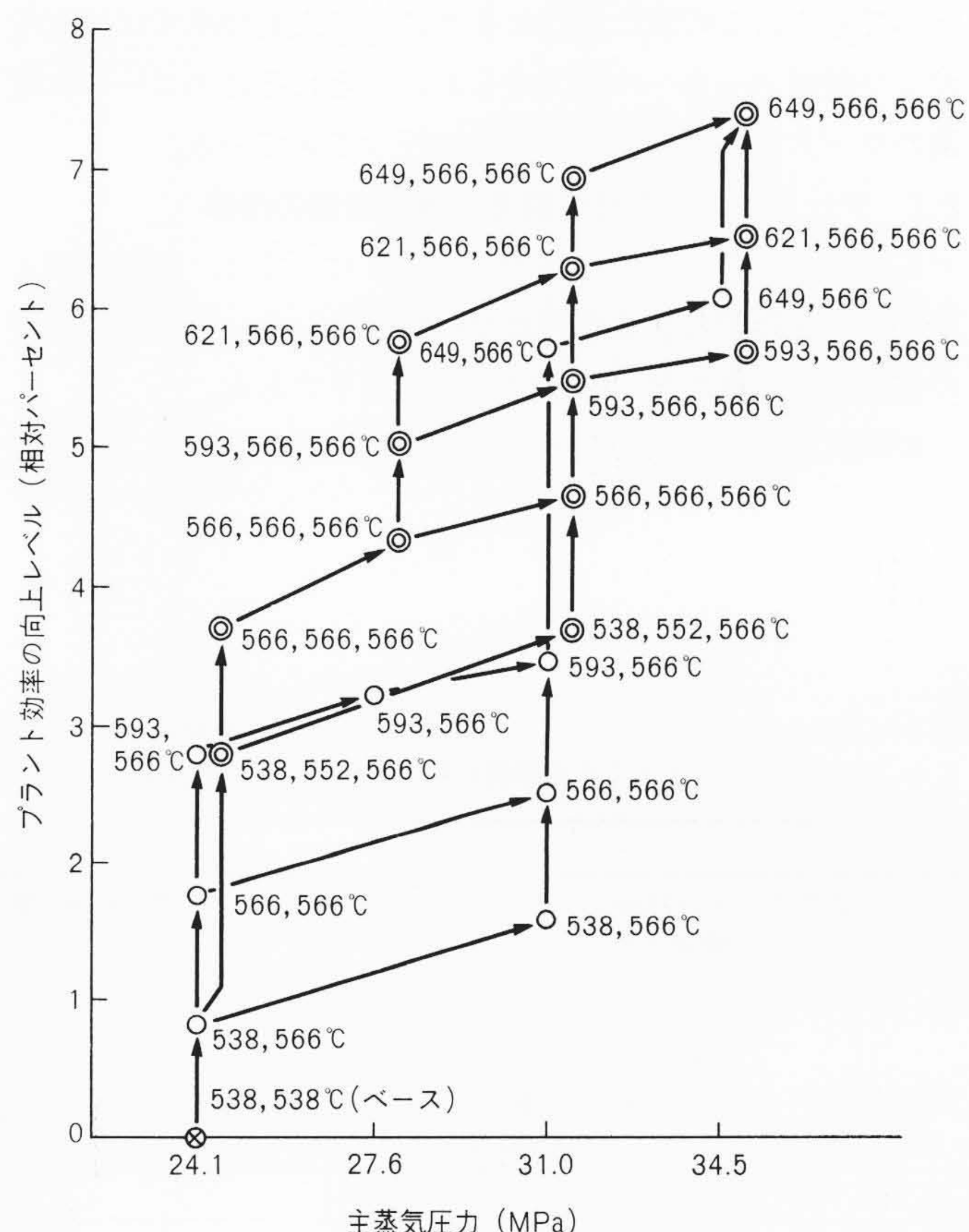


図1 蒸気条件の改善によるプラント熱効率の向上 蒸気条件の高度化によってプラント熱効率は大幅に向上し、649℃では7%強の効率向上が期待できる。しかし、このためにはロータ材を含むタービン材料の改良・開発が必須(す)となる。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 日立研究所 工学博士

同時に進行していくことは、蒸気タービン技術にとっては二重に課題が与えられていることになるが、このニーズは図1に一例¹⁾を示すように、蒸気条件の高度化による火力プラントの熱効率向上効果が大きいことから、避けることのできない課題と言える。したがって、ここ数年来、34.5 MPa-649℃/566℃/566℃にも高めたUSC蒸気条件を、将来の火力機に適用するための各種の技術開発が行われ^{1)~3)}、その成果の一部を使用して31.0 MPa-566℃/566℃/566℃蒸気条件を用いた700 MW機が運転されている⁴⁾。

これらの蒸気タービン技術の開発では、ロータ材の開発が重要な課題となるが、タービンロータ材に対するニーズとその対応例について、表1にまとめて示す。同表では蒸気タービン技術開発上のニーズとして、単機容量の増大、超高压・高温化と、将来展望としてのコンパクト化を取り上げた。また、ロータ材料特性に対するニーズとしては、高压、中圧ロータ材に要求される高温強度特性と低サイクル疲労特性、および低圧ロータ材に要求される低温強度特性と耐食性を取り上げた。なお、高速回転するタービンロータにとっては、材料の破壊力学的特性が優れていなければならないことはもちろんである。この表に示したように、日立製作所では研究所および製鋼メーカーの協力のもとに、それぞれのニーズに最適のロータ材の開発をこれまでに行ってきている。

2.2 タービンロータ材の製造・検査技術の推移

このような新ロータ材料の開発にあたっては、製鋼技術と非破壊検査技術の進歩が伴わなければならないが、この分野の技術進歩の概要は、図2に示すとおりである。

製鋼技術の進歩は、溶解・鑄込・熱処理の各工程ごとに行

われてきているが、これらの中で、真空脱酸(VCD：Vacuum Casting Deoxidize)、回転熱処理などが主要な技術進歩である。また、電気炉の大形化や合せ湯による大形鋼塊の製造技術の開発など、これらの主要技術の進歩が蒸気タービンの大形化と信頼性向上に果たした功績は大きい。

検査技術では、ロータ中心部の探傷技術の開発が主要課題となっているが、これは高速回転するロータ材の破壊力学的評価を十分に行うために、必要不可欠の技術である。

このような技術開発の推移によって、ロータ材の特性もしだいに改善されてきている。ある製鋼メーカーでの例であるが、ロータ中心部の遷移温度(FATT：Fracture Appearance Transient Temperature)は、図3に示すように改善されてきており、また、不純物成分の代表であるPとSの低圧ロータ材での含有量の推移は図4に示すように減少してきている。この例に見るように、製鋼技術の進歩によって、品質の高いロータ材が得られるようになり、また非破壊検査技術の進歩は、ロータ材の内部状況を精度よくチェックすることができるようになり、信頼性の高いロータ材を得ることが可能となっている。

2.3 日立製作所でのロータ材開発経緯

日立製作所はこれまでに、米国の技術導入先から導入した材料技術を十分に検討し、研究所および製鋼メーカーと共同で開発試作を行うなどして、より信頼性の高いロータ材とするように技術の改良および新ロータ材の開発を行ってきている。

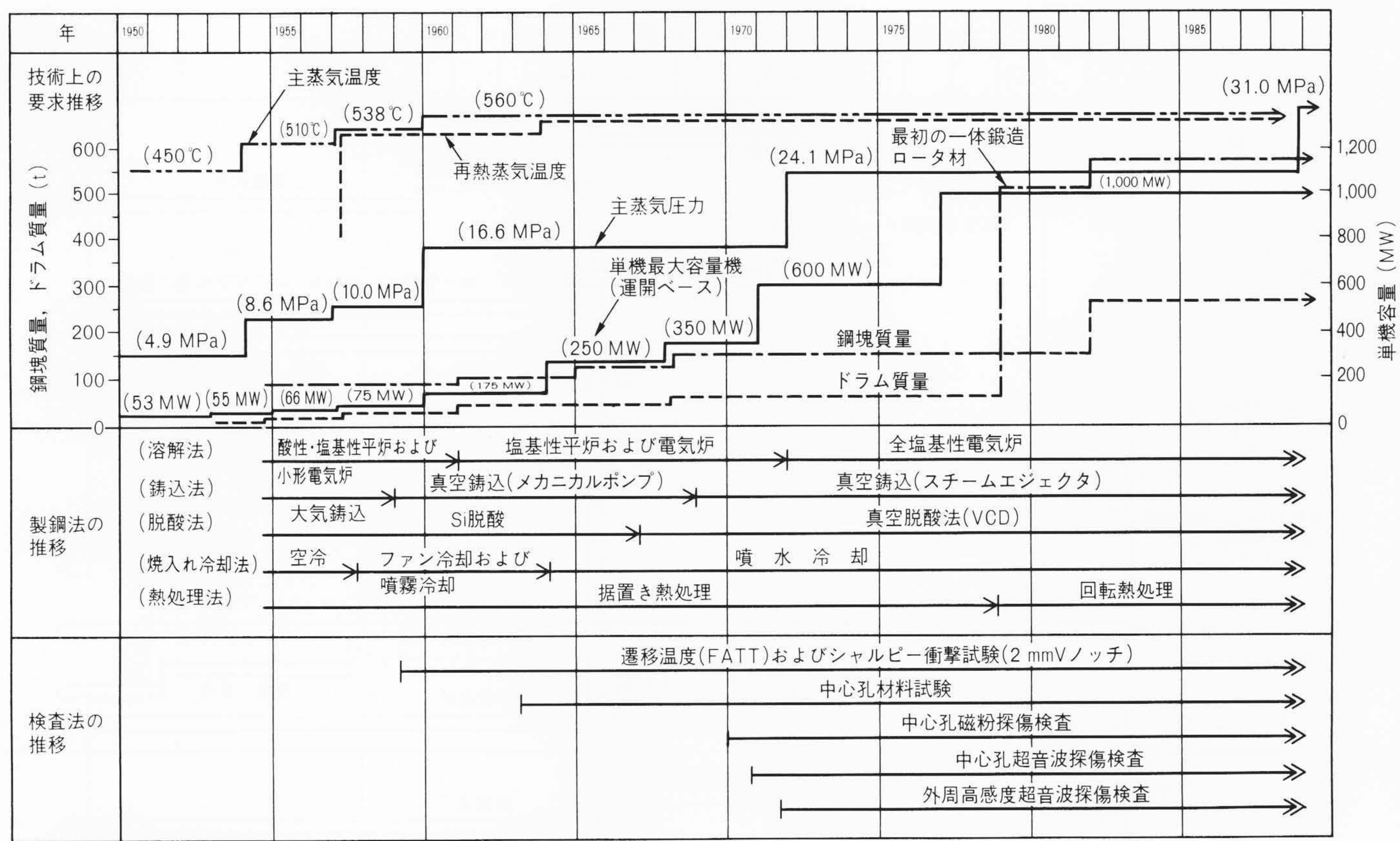
この過程で、日立製作所が行ったタービンロータ材の主な技術開発経緯を図5に示す。

単機容量の増大と蒸気条件の向上が急速に進展するように

表1 タービンロータ材に対するニーズの分類と開発例 タービンロータ材の開発では、蒸気タービン技術開発上のニーズと、材料特性に関するニーズの双方を満足できる鋼種が要求される。日立製作所では、おのこの用途に適したロータ材を開発することによってこれを達成している。

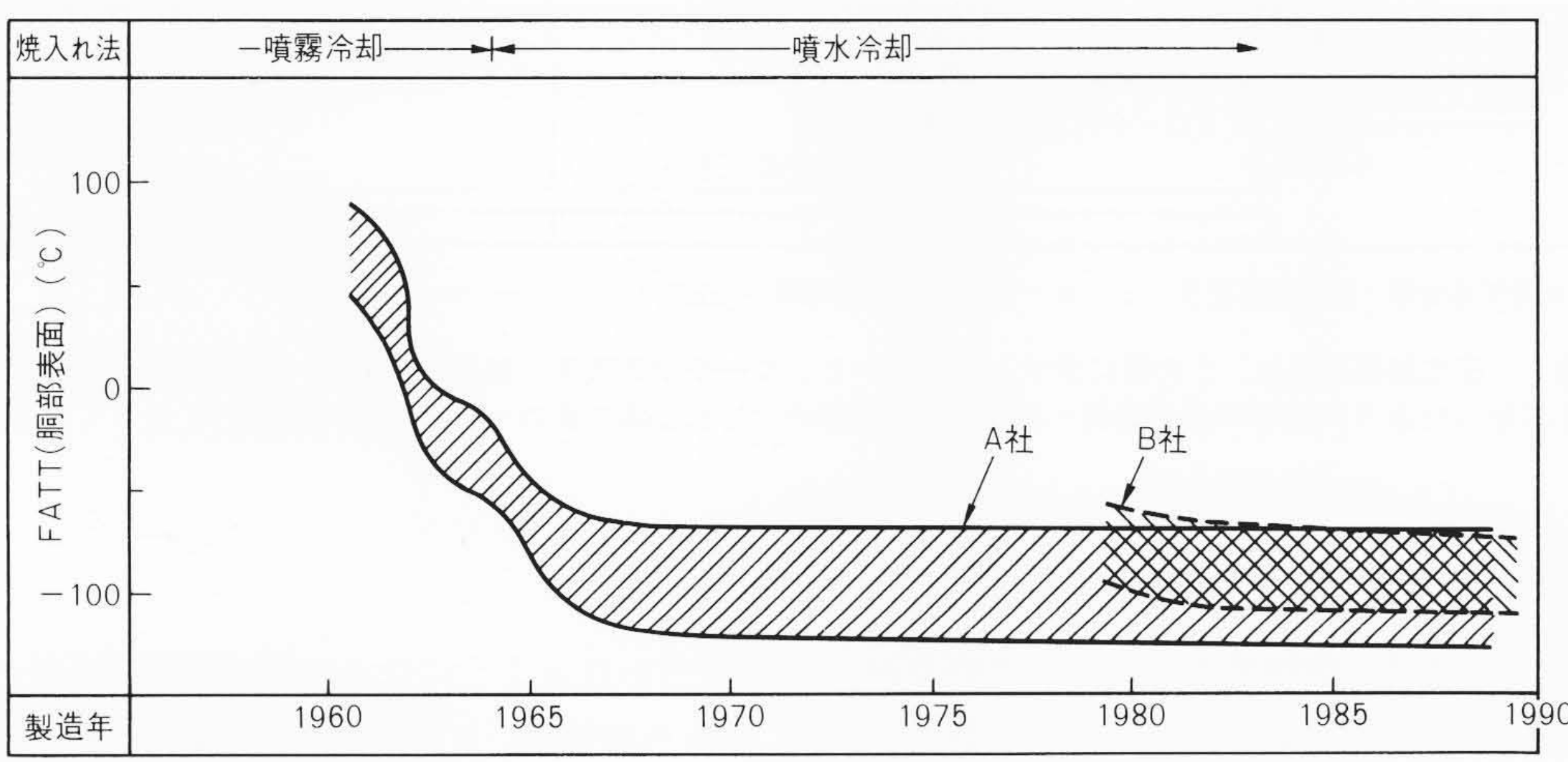
ニ ー ズ	ロ タ 材 開 発 例					
	単 機 容 量 増 大, 超 高 圧 ・ 高 温 化					コ ン パ ク ト 化
	高 圧, 中 圧 用 ロータ材の特性向上		USC タービン用	低速回転機の 信頼性向上	高速回転機の 大形化対応	高・中・低圧一体形 (シングルスパン) タービン対応
材料特性 に関するニーズ	低Siタイプ Cr-Mo-Vロータ材	新I2Crロータ材	改良A286ロータ材	大形一体 鍛造ロータ材	スーパークリーンタイプ Ni-Cr-Mo-Vロータ材	高靱性 Ni-Cr-Mo-Vロータ材
高 温 強 度 特 性	○	○	○	—	○(耐脆化)	○
低 温 強 度 特 性	—	—	—	○	○	○
破 壊 力 学 特 性	○	○	○	○	○	○
低 サ イ ク ル 疲 労 特 性	○	○	○	—	○(DSS対応)	○
耐食性(SCC, 腐食ほか)	—	—	—	○	○	○
実 機 適 用 例	566℃対応	593℃対応	650℃対応	火力, 原子力用焼 ばめロータの一体 削り出しロータ化	60 Hz向け40インチ 長翼用低圧ロータ 材	中・小容量機, コ ンバインドプラ ント用タービンなど

注：略語説明 SCC(Stress-Corrosion Crack), USC(Ultra-Super Critical), A286(鉄基オーステナイト系超合金)



注：MW=1,000 kW：タービン・発電機銘板出力（最大値）

図2 タービンロータ製造・検査法の推移 単機最大容量機の推移を営業運転開始ベースにとって、それが要求した技術上のニーズと製鋼法・検査法の推移を対比することによって、1970年代に総合的な技術的進歩が行われたことがわかる。



注：略語説明
FATT (Fracture Appearance Transient Temperature：遷移温度)

図3 低圧用3.5Ni-Cr-Mo-Vロータ材の遷移温度の変遷 製鋼技術の進歩に伴って、ロータ材の遷移温度は急速に下げられ、靱性の高い材料が得られるようになっている。

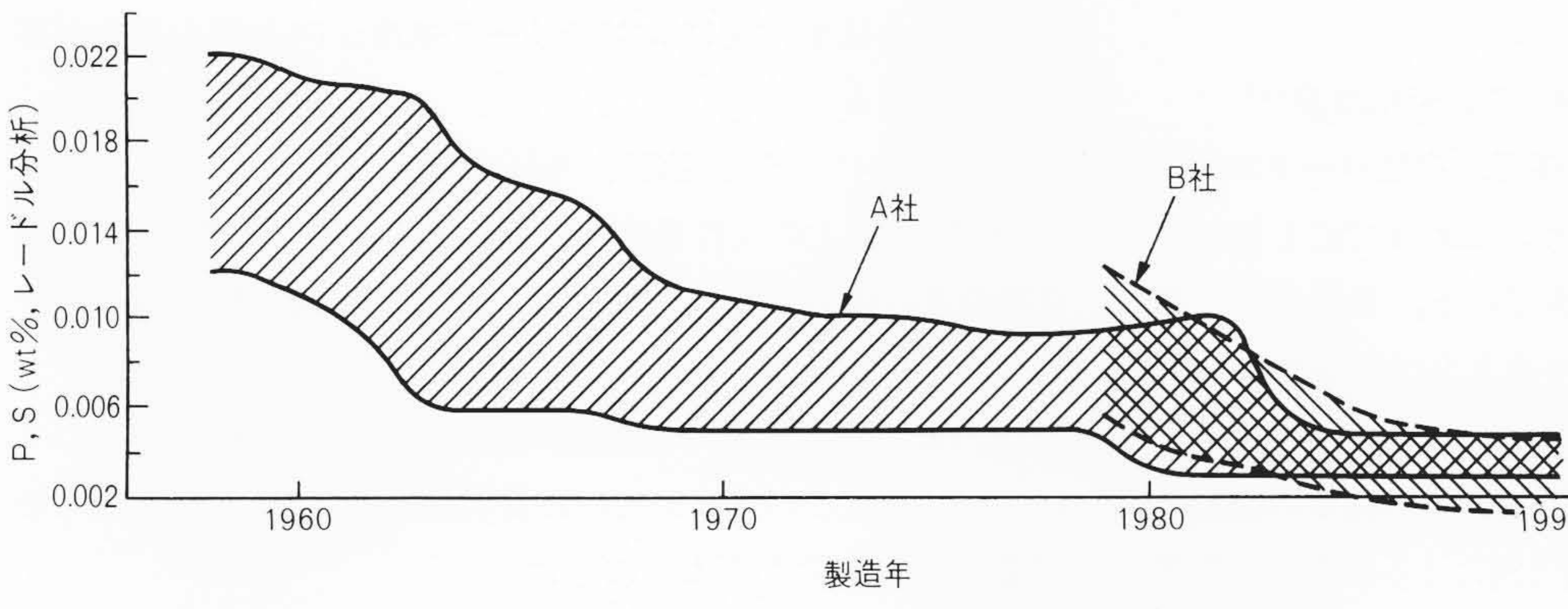
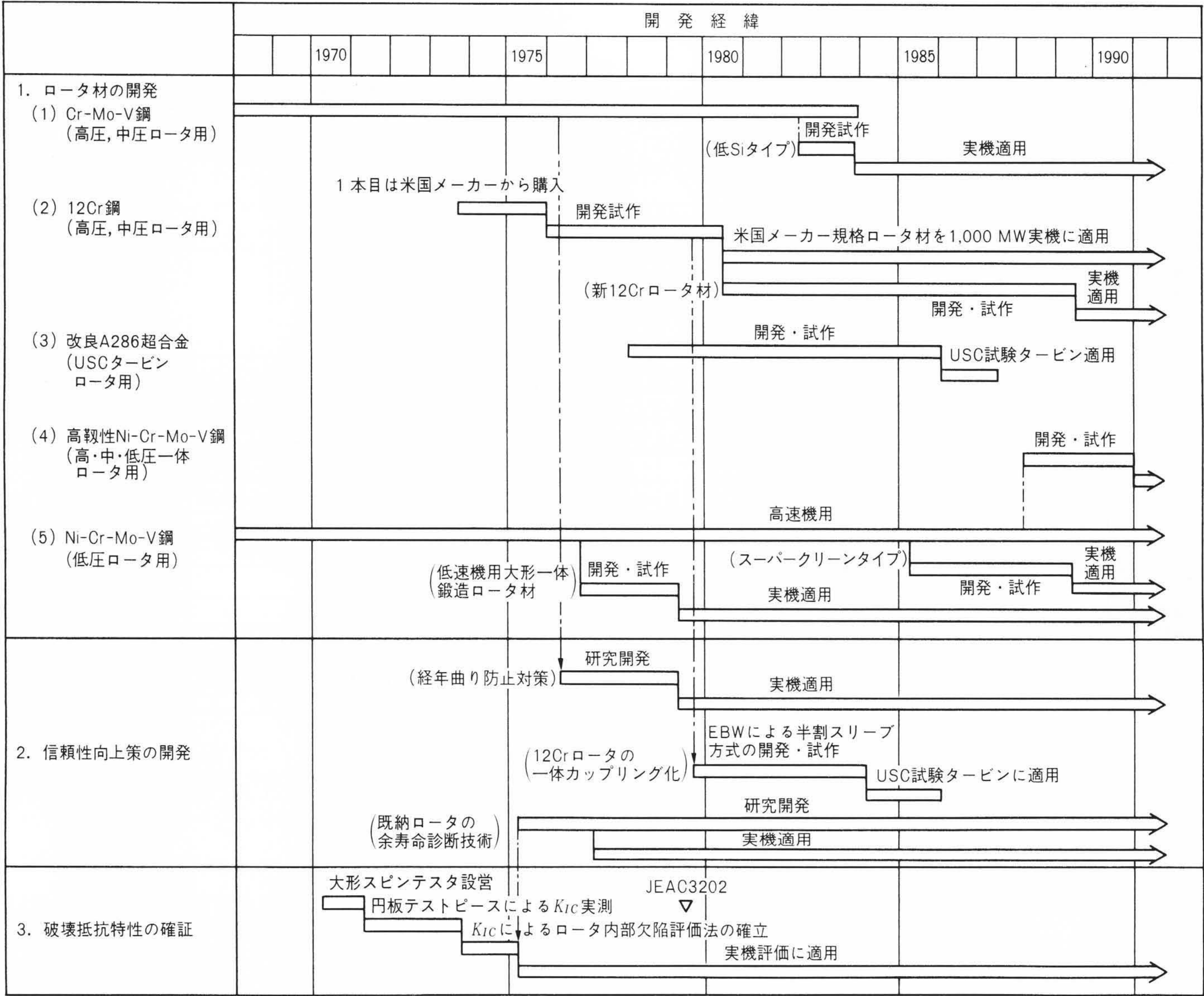


図4 低圧用3.5Ni-Cr-Mo-Vロータ材の不純物成分含有量低減の推移 P, Sに代表される不純物の含有量も、技術の進歩とともに下げられて、現在ではスーパークリーンロータ材が実用化されている。



注：略語説明 K_{IC} (破壊靱性値), JEAC (日本電気協会編・発電用蒸気タービンロータ非破壊検査規程), EBW (Electron-Beam Weld)

図5 蒸気タービンロータ材料開発経緯 日立製作所では、この図に示すようなタービンロータ材の改良、開発を行って、蒸気タービン技術開発上のニーズに対応してきている。先の図2に示したように1970年代の製鋼・検査技術の進歩が、それ以降の新ロータ材開発の原動力となっている。

なった1970年代以降で、新しいロータ材の開発、信頼性向上のための開発、およびロータ材の最大の技術課題である破壊抵抗特性の確証技術について図5にまとめたが、個々の技術的内容について以下に概説する。

2.3.1 ロータ材の開発

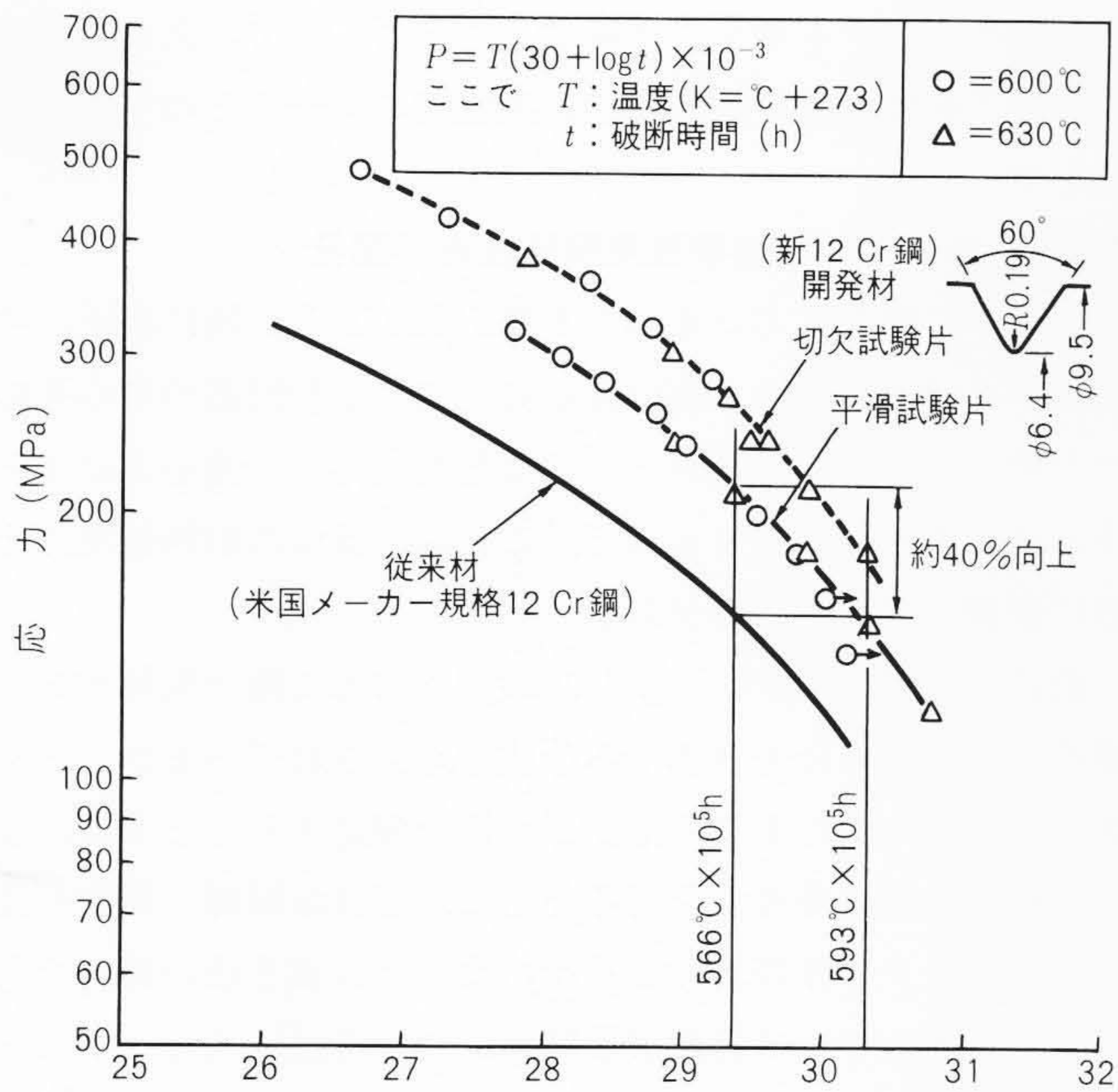
(1) Cr-Mo-Vロータ材(高圧、中圧用)の低Si化改良^{5),6)}

566℃までの蒸気温度域に適用する高圧、中圧ロータの標準材料としてはCr-Mo-Vロータ材があり、これまでも材料特性改善のために種々の改良を加えてきている。最近では、製鋼設備の改良が進んだので、真空アークとりべ精錬炉などの最新設備を用いて、Si量をごく微量に抑えた品質の良いCr-Mo-Vロータ材を製造できるようになった。先の図2の製鋼法の推移(脱酸法)に示したように、以前はSiによる脱酸法を採用

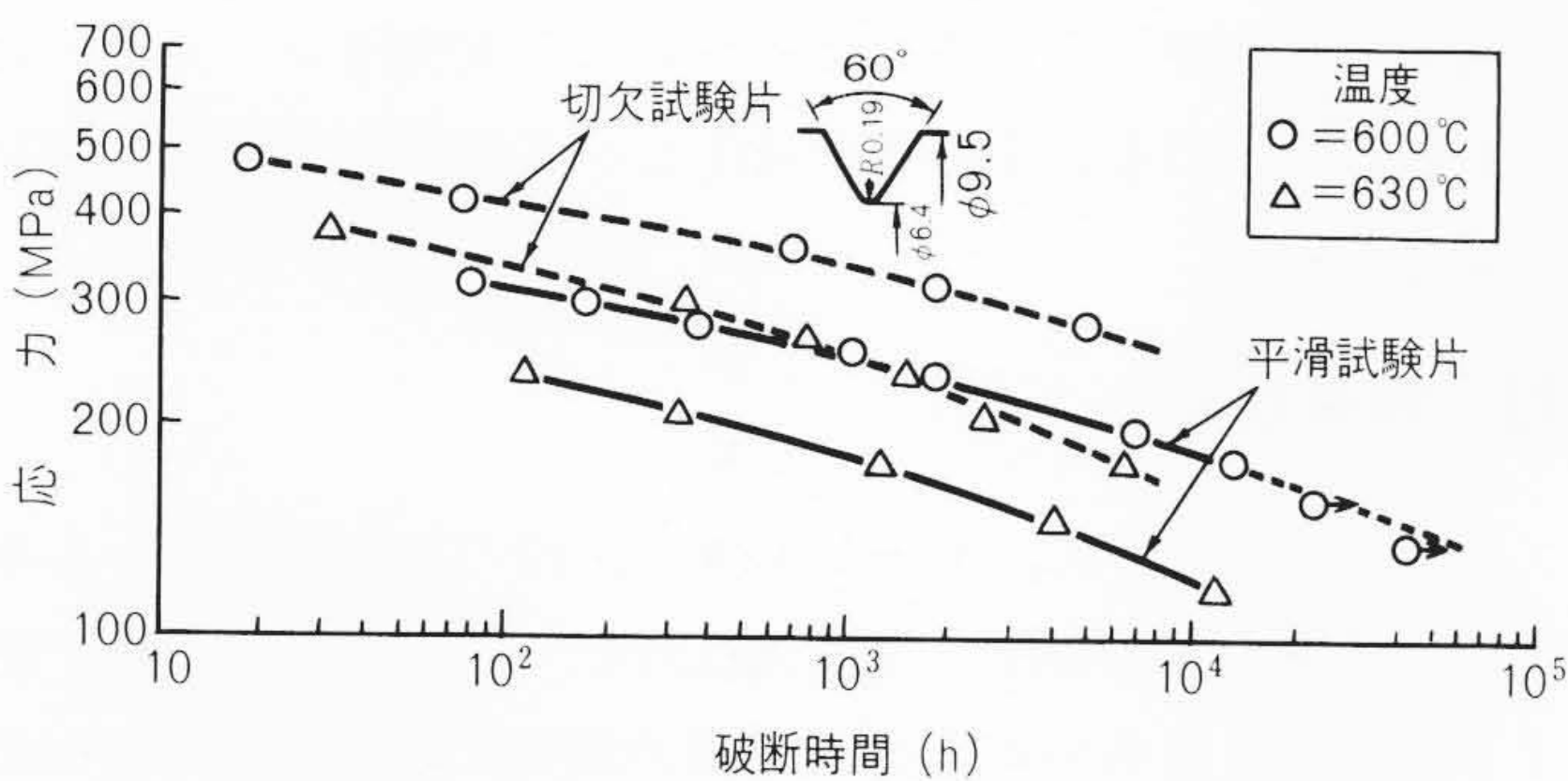
していたが、VCDが行われるようになってSiの添加が不要となったことから、Siを不純物扱いとしてその含有量の低減を行ったものである。また、従来Siを減量させると高温クリープ強度が下がってしまうと言われていたが、実際にSi量を減少させて試験した結果、逆に高温クリープ強度が向上することが確認されている。

(2) 新12Crロータ材(高圧、中圧用)の開発⁷⁾

700 MW以上の大容量機では、高圧、中圧ロータが大形となり翼の遠心応力も大きくなるので、566℃蒸気であっても、Cr-Mo-Vロータ材では強度不足となってくる。このようなケースでは、より高温クリープ強度の高い12Crロータ材を使用しているが、最近このロータ材の品質改良を行って、593℃まで使用温度を向上できるようにした。



(a) 高温クリープ強度比較



(b) 新12Crロータ材のクリープ破断試験結果

図6 新12Crロータ材の高温強度 新12Crロータ材の高温クリープ強度は、従来材と比較して566℃で約40%向上し、593℃でも従来材の566℃での強度と同等となっているが、このことは蒸気タービンの構造をそのままに593℃蒸気温度で運転できることを意味している。また、切欠試験片でのデータが平滑試験片のデータよりも高くなっており、安定性の高いロータ材であることがわかる。

この新12Crロータ材は、USCタービン用材料開発の一環として開発した材料で、化学成分的には従来のNbを含んだ12Crロータ材のC、Si、Nbを減じMoを調節し、新たにWを添加したものであり、製造上も安定した鋼種である。

図6に示すように、566℃での 10^5 時間クリープ破断強度が従来の12Crロータ材に対して約40%向上しており、さらに、593℃でも従来材と同等の強度が得られている。このことは、従来のロータ設計を変更することなく、新12Crロータ材を適用することによって、593℃蒸気温度として熱効率向上を図ることが可能となることを意味している。

この新12Crロータ材は、すでに700 MW実機の中圧ロータに採用し、製造中である。

(3) 改良A286超合金ロータ材(USCタービン用)の開発^{8),9)}

さらに高圧・高温の蒸気条件に対応できるロータ材として

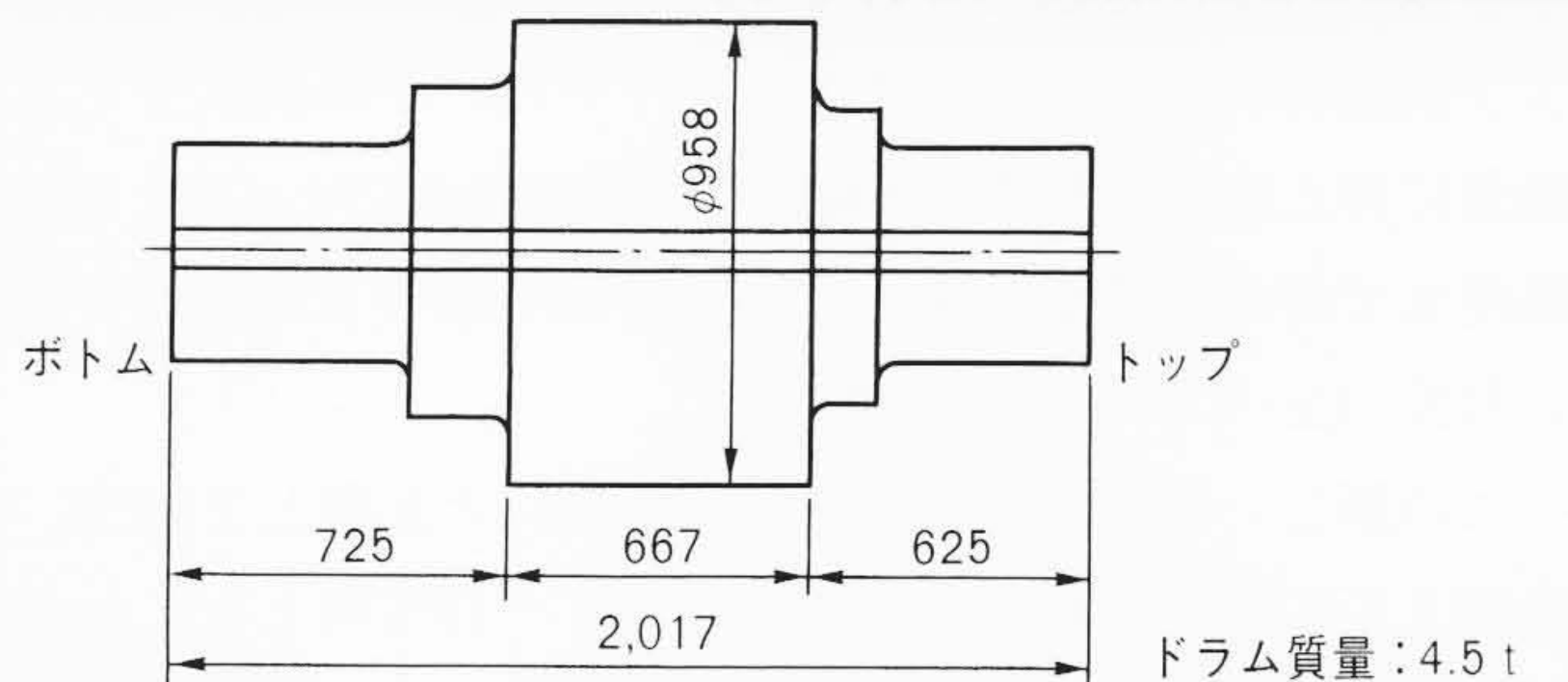
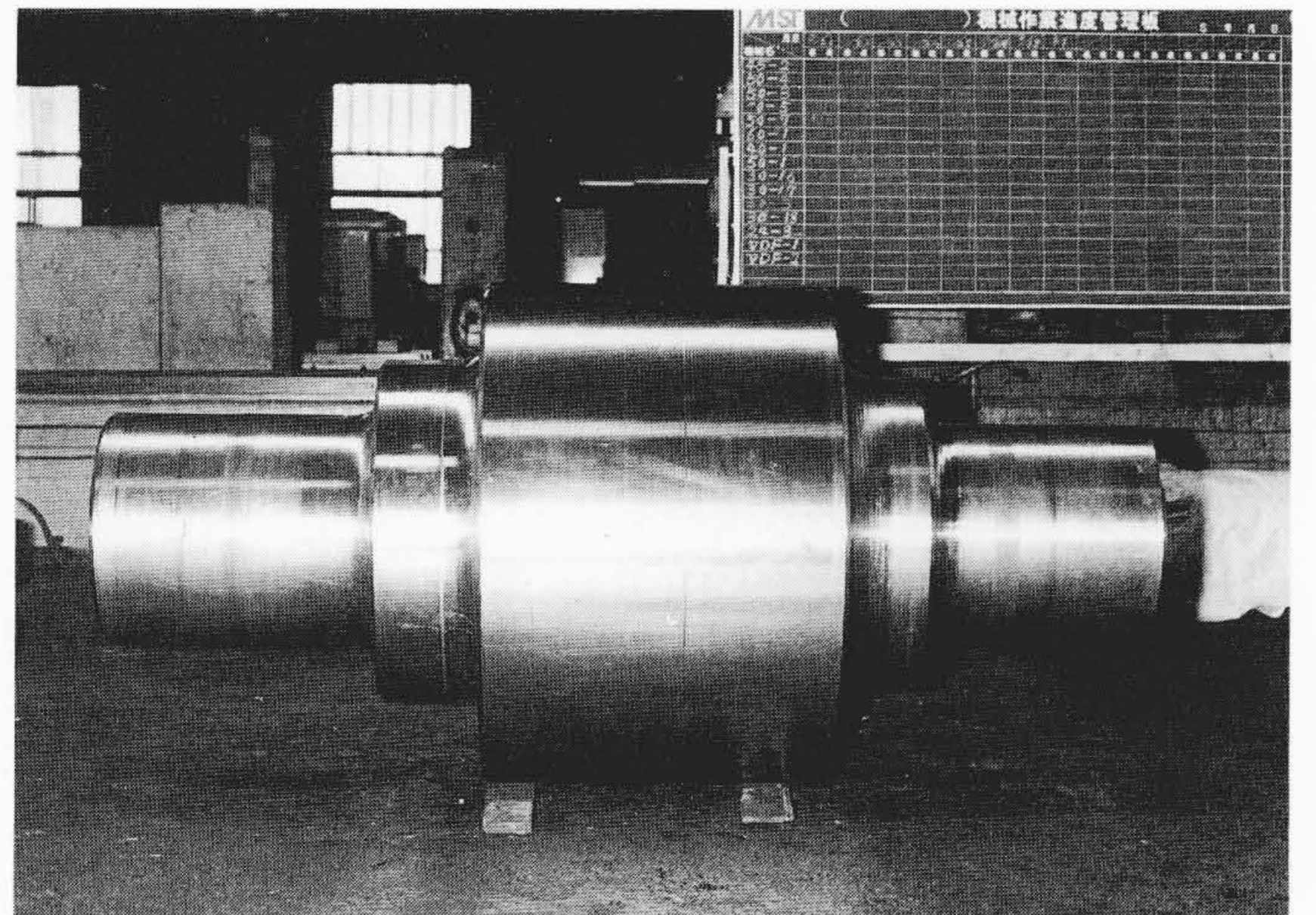


図7 改良A286超合金試作ロータ材 改良A286超合金を用いて、ESR(Electroslag Remelting)法で製造した20 t鋼塊から削り出した試作ロータ材を示す。このロータ材は、649℃対応として開発したものである。

は、34.5 MPa-649℃のUSCタービン用改良A286超合金ロータ材が開発されている。このロータ材は、15Cr-26Ni-1.25Moの鉄基合金であるA286鋼種に、タービンロータ材としての特性を持つように改良を加えたもので、主にTi、Alをコントロールした点に特徴があり、ESR(Electro-slag Remelting)製鋼法によって高純度の合金とする。このようなニーズが出てきたのは、これまでに開発済みのフェライト系鋼種では593℃を超えた温度域で高温脆化現象が発生してしまうので、このような高温でも特性変化の起こらないオーステナイト系の鉄基合金を必要としたためである。図7に20 tのESR鋼塊から削り出した改良A286超合金ロータ材(ドラム状態)を示す。なお、この新ロータ材はUSC試験タービンで約1年間の実証試験を行って特性を確認済みである³⁾。

(4) 大形一体鍛造ロータ材(低速機の低圧用)の開発^{10),11)}

700~1,300 MW級火力機や原子力機では、低圧部を低速回転機(1,800 r/minまたは1,500 r/min)とした蒸気タービンが一般的であるが、この低速機の低圧用ロータは、大形の鋼塊を必要とするために、製鋼設備上の制約も加わって、従来はシャフトにホイールを焼ばめた構造が採用されていた。

しかし、その後の製鋼メーカーでの設備増強や、大容量機でのDSS(Daily Start and Stop: 毎日起動・停止)運用の要求などニーズの変化に対応し、大形低圧ロータの信頼性向上を図るために、400~570 tの大形鋼塊を使用した一体鍛造ロー

タ材を製鋼メーカーと共同で開発した。この大形一体鍛造ロータ材は、実機運転条件下での回転実証試験によって信頼性を確認した後、1983年運開の700 MW機の1,800 r/min低压ロータに適用した。最近建設される低速機ではすべてこの一体鍛造ロータを採用しているばかりでなく、既納機の焼ばめロータを一体鍛造ロータと交換することによって、信頼性向上を図る作業も随時行われている。

(5) スーパークリーン形Ni-Cr-Vロータ材(低压用)の開発¹²⁾

低压用として従来使用されていたNi-Cr-Vロータ材の使用可能温度は高温脆化の点から350℃が上限であるが、最近の製鋼設備と技術の進歩に伴って、鋼塊中の不純物コントロールを十分に行うことができるようになってきたので、研究所および製鋼メーカーと共同でこのロータ材の不純物成分をごく微量に抑え耐脆化特性を大幅に改善することによって、450℃程度まで使用限界温度を上げることのできるスーパークリーン形Ni-Cr-Vロータ材を開発した。

この新しい低压用ロータ材は、従来材と比較して靱性、耐食性ともに改善され、さらに強度も5～10%向上しており、3,600 r/min用40インチチタン長翼を植え込む低压ロータ材として最適なものである。

2.3.2 信頼性向上策の開発

(1) 高温用タービンロータの経年曲り防止技術の開発¹⁰⁾

566℃の高温で使用するロータ材では、長年使用しているうちに経年曲りが発生して軸振動増加の原因となる場合がある。この現象の防止のために、日立製作所では次の技術を開発し、材料購入条件に加えるとともに実機設計に反映している。

(a) 製鋼上の対策

鍛造後の機械加工段階でチェックすることとなるが、ロータの両端面でサルファプリントの心と機械加工の心のずれが許容できる範囲に入っているように管理する。また熱処理工程では、回転加熱および回転焼入れを行って、ロータ表面のクリープ特性が均一なロータ材とする。

(b) タービン構造上の対策

複流形中圧ロータの中央部に低温のパージ蒸気を抽入して、経年曲りが発生しない温度以下とするロータ冷却系を採用する。

(2) 既納入ロータの余寿命診断技術^{13), 14)}

日立製作所では1932年に2,800 kWの初号機を営業運転開始させて以来、多数の蒸気タービンを納入してきたので、すでに納入したロータの寿命診断技術と余寿命評価技術が必要となってきた。特に、図2に示したように、古い時点に製造されたロータ材では製鋼技術、検査技術ともに未発達段階のものであって、現状では見逃すことのないような内部欠陥を許容したままで使用している可能性が以前から懸念されていた。しかし、最近の高度な検査技術を駆使することによって、この要求に対応できるようになっているので、現在ではこれら

既納機のロータを精密に点検することによって、余寿命評価を行い、必要な場合には新しい高性能のロータとの交換を実施している。

2.3.3 ロータ材の破壊強度確認技術の開発^{15), 16)}

ロータに働く応力は遠心力と熱応力がある。特に高圧、中圧ロータでは、高温と高い遠心力が加わる初段部の中心孔応力が最大となり、低压ロータでは最終段落部の遠心力による中心孔応力が最大となるので、これらの部位の材料強度は十分に評価しておく必要がある。

最近では破壊力学が進歩し、最大応力部に微小欠陥がある場合のロータ寿命を評価する手法も確立されているが、日立製作所ではこれら手法の信ぴょう性を確認するとともに、より信頼性の高い評価法を得るために、超音波探傷、磁粉探傷などのロータの非破壊検査技術の改善と評価手法の確立を行った。また、ロータ材耐破壊特性については、スピントスタによる実機規模ロータ材試作品から切り出した円板テストピースの回転破壊試験から、実際の破壊靱性値 K_{Ic} を測定して評価結果の信頼性を向上させた。さらに、実機用ロータ材のおおのについても、中心孔テストピースを用いた測定技術を確立している。

3 将来技術

以上述べたように、タービンロータ材の技術課題である単機容量の増大と超高压・高温化に対しては一通りの開発が完了しており、将来の本格的USC機の開発にも対応が可能な状態となっている。

ところが、最近のニーズとして、中・小容量機のコンパクト化、および1軸コンバインドプラントに再熱サイクルが採用されるようになったので、これに対応できる蒸気タービンの要求などがあげられるようになってきており、図8に示す例のように、従来の2車室構造のタービンを、1車室構造とするような技術の開発が必要となっている。

この1車室構造タービンについては、すでに最終段落に26インチ長翼を使用した125 MW機が運転されているが、現在与えられている課題は、より長い翼を用いて20～25万kW程度に単機容量の増加を図り、さらに、16.6 MPa-566/566℃の蒸気条件によって、熱効率向上を図った高圧、中圧、低压を1軸のロータ上に構成するシングルスパン機の実現というものである。このことは表1に示したように、材料特性に関するニーズのすべてを満足できるロータ材の開発が要求されていることになる。

これに対し日立製作所では、従来の高圧、中圧用Cr-Mo-Vロータ材と低压用Ni-Cr-Mo-Vロータ材の特性を合わせ持つような新しいロータ材を得るために、強度評価のサーベイにより表2に示す開発目標を定め、現在試作が進行中である。その成果の一部を図9に示す。

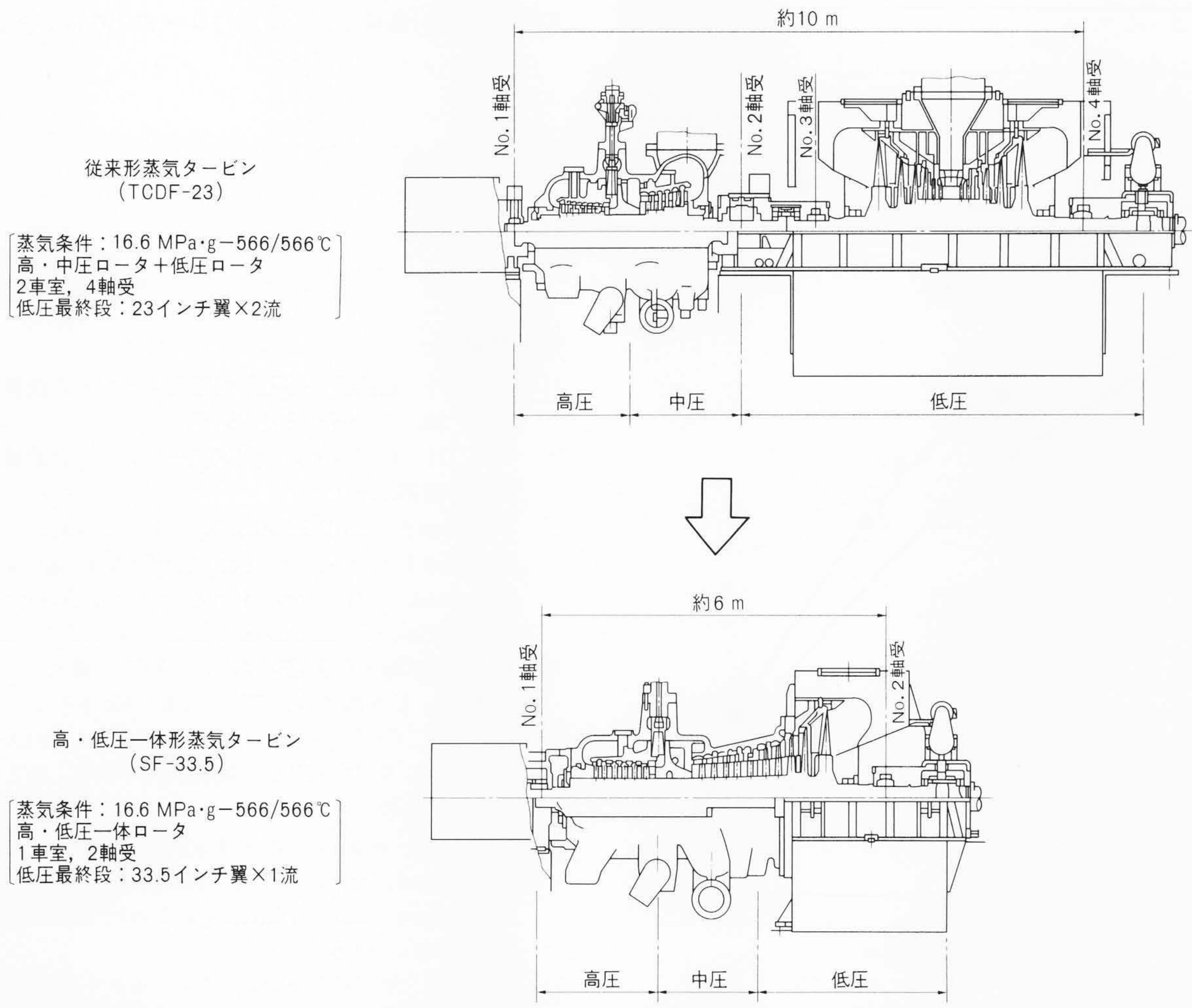


図8 200 MW級蒸気タービン構造比較 高靱性Ni-Cr-Mo-Vロータ材を採用することによって，従来の2車室構造のタービンを高圧・中圧・低圧を1車室内に収めたコンパクトな機械とすることが可能となる。

表2 高靱性Ni-Cr-Mo-Vロータ材の開発目標 高圧・中圧・低圧一体形タービン用ロータ材には，従来の高圧・中圧用Cr-Mo-Vロータ材と低圧用Ni-Cr-Mo-Vロータ材の相方の特性を合わせ持った新ロータ材が要求されている。

(a) 化学成分のねらい

(wt%)

(b) 機械特性値のねらい

		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	その他
現 用 材 の 規 格	高圧ロータ Cr-Mo-V鋼	0.26 ↘ 0.33	0.15 ↘ 0.35	0.65 ↘ 0.85	≤ 0.60	0.90 ↘ 1.20	1.10 ↘ 1.50	0.20 ↘ 0.30	P<0.015, S<0.018
	高圧・低圧一体 ロータ Ni-Mo-V鋼	≤ 0.30	0.15 ↘ 0.35	0.20 ↘ 0.40	≥ 2.50	≤ 0.50	0.40 ↘ 0.60	0.04 ↘ 0.12	P<0.012, S<0.015
	低圧ロータ Ni-Cr-Mo-V鋼	≤ 0.28	≤ 0.10	0.20 ↘ 0.40	2.85 ↘ 3.75	1.30 ↘ 2.00	0.25 ↘ 0.50	0.05 ↘ 0.15	P<0.015, S<0.018
開発材の成分 調整のねらい		↘	↘	↘	↗	↗	↗	→	—

注：↗：増加，↘低減，→同等

鋼 種		引張強さ MPa	0.02%耐力 MPa	伸び (%)	絞り (%)	衝撃値 J	FATT (℃)	538℃, 10 ⁵ h 高温クリープ 破断強度MPa
現 用 材 の 規 格	高圧ロータ Cr-Mo-V鋼	≥724	≥551	≥14	≥40	≥6.8	≤135	108~196*
	高圧・低圧一体 ロータ， Ni-Mo-V鋼	724~861	≥585	≥15	≥35	≥24	≤60	63~105**
	低圧ロータ Ni-Cr-Mo-V鋼	≥792	≥620	≥16	≥45	≥47	≤6	(<59)**
開 発 目 標	下 限	≥792	≥620	≥16	≥45	≥29	≤60	≥108
	ね ら い	≥792	≥620	≥16	≥45	≥47	≤40	≥137

注：* 中心孔長手方向の性質
** 実ロータのクリープ破断強度
()内は参考値を示す。

試番	組成 (%)					試験温度 (℃)		
	C	Ni	Cr	Mo	V	550	600	650
2	0.27	1.51	1.04	1.28	0.26	○	△	□
7	0.29	1.98	1.03	1.25	0.25	●	▲	■

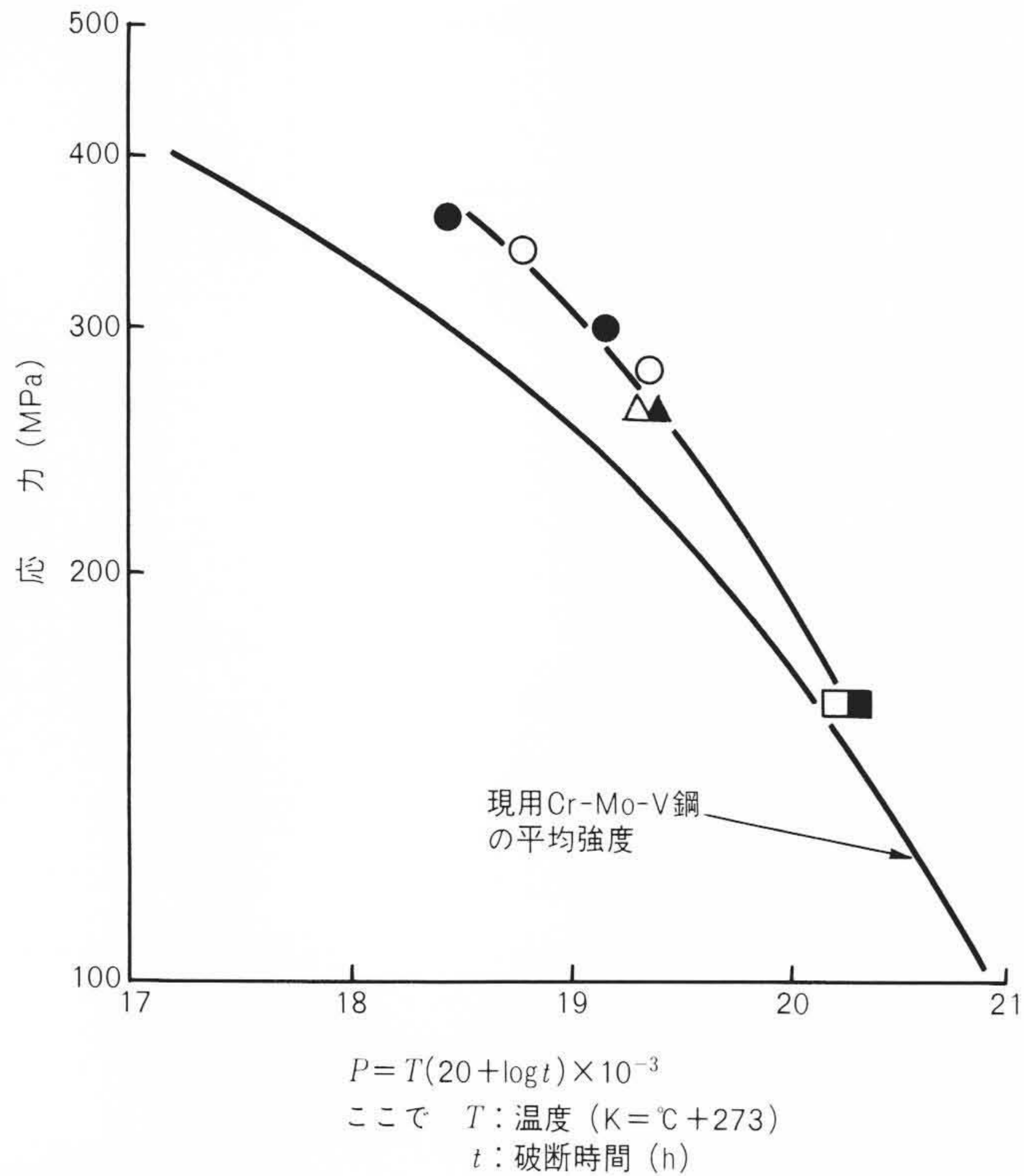


図9 高靱性Ni-Cr-Mo-Vロータ材の高温強度特性 低温強度特性を満足したうえで、さらに高温側でも従来の高・中圧用ロータ材以上の特性を持つように開発を進めているが、第1回目の試作でこの図に示すような高い値が得られている。

4 結 言

本稿では、蒸気タービン用材料のなかでも特に重要なロータ材に焦点を当てて、単機容量の増大と超高压・高温化という二重の課題に対して、日立製作所がこれまでに取り組んできた新ロータ材の開発、および信頼性向上技術と検査技術の進歩について述べるとともに、製鋼メーカーでの製鋼技術の高度化の推移についても述べた。

これまでに開発したロータ材はUSC蒸気タービン用のものも含めると、およそすべてのニーズに対応できるようになっているが、最近では1車室形蒸気タービンの容量増大と運用性の向上という新しい要求が出てきている。日立製作所では、現在この新しいニーズに対しても対応を可能とするため高压、

中圧、低压一体構造用の高靱性ロータ材の開発を進めている。

参考文献

- 1) 二宮, 外: 超高温・高压蒸気発電プラントの技術展望, 日立評論, **63**, 7, 455~460(昭56-7)
- 2) 久野, 外: 超高温・高压蒸気タービン, 日立評論, **64**, 10, 757~762(昭57-10)
- 3) T. Hanada: EPDC's Atmospheric Fluidized-Bed Combustion and Ultra-Supercritical R&D-A Progress Reports, Presented at The Second International Conference on Improved Coal-Fired Power Plants, Nov.2-4, 1988
- 4) 石木: 超々臨界圧発電プラントの採用(川越火力1, 2号機の計画概要), 日本機械学会講演論文集, No.870-10
- 5) 志賀, 外: Cr-Mo-V鋼ロータ材の焼もどし脆化及びクリープ破断強度に及ぼすSi及び不純物低減の影響, 鉄と鋼, 第72年(1986)第14号
- 6) K. Iijima, et al.: Steam Turbine Materials for Improved Coal-Fired Plants, EPRI, Presented at The First International Conference on Improved Coal-Fired Power Plants, Nov.19-21, 1986
- 7) 伊東, 外: 超々臨界圧発電プラント用ボイラチューブ及びタービンロータの開発, 火力原子力発電, Vol.37, No.7, 727~740(Jul. 1986)
- 8) K. Iijima, et al.: Fundamental Investigation of Materials for High Temperature and Pressure Steam Turbine, ASME Paper No.82-JPGC-Pwr-33
- 9) 塚田, 外: 大型鉄基合金A286鍛造品の開発と製造, 日本製鋼技報, No.43
- 10) 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)
- 11) T. Tan, et al.: Development of Large Solid Block Lp Turbine Rotor
- 12) S. Kinoshita, et al.: Quality of High Purity Low Pressure Rotor Forging, EPRI Superclean Steel Workshop, Sapporo, Japan, Aug. 30~31, 1989
- 13) 桐原, 外: 火力タービン材料の劣化診断技術の開発, 火力原子力発電, Vol.35, No.9(Sep. 1984)
- 14) 森, 外: 既設発電設備の寿命診断, 日立評論, **69**, 10, 973~978(昭62-10)
- 15) K. Kumeno, et al.: Defects and Fracture Strength of Large Rotor Forgings for Steam Turbines, ASME Paper No.75-Pwr-10
- 16) T. Iwasaki, et al.: Evaluation of Strength Reliability of Power Plant Machine Components Using Large-Scale Models, Hitachi Review, Vol.28, No.1(1979)