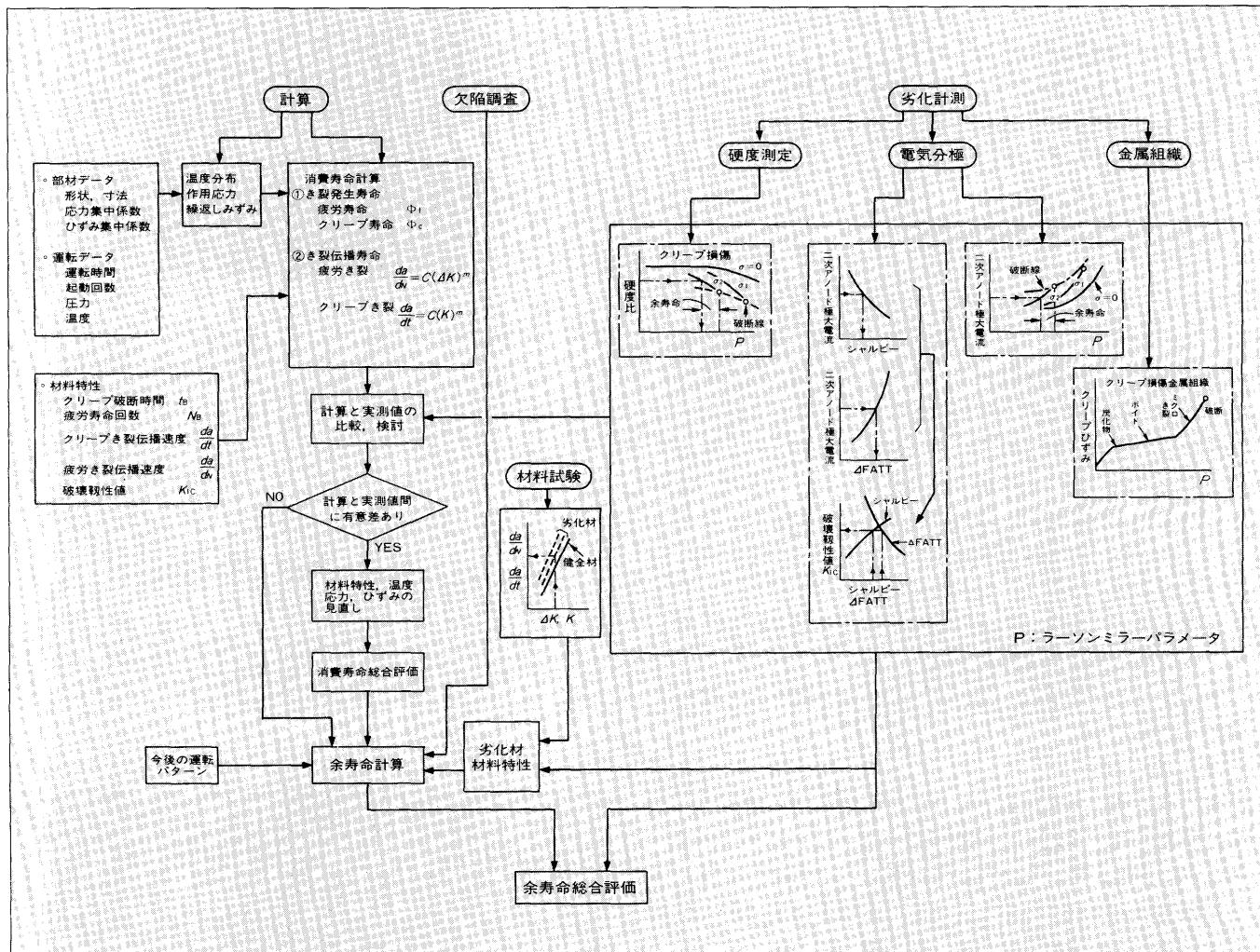


図2 余寿命評価方法



疲労による伝播速度とクリープによる伝播速度の線形和として、次式により算定される。

$$\frac{da}{dN} = C_f(\Delta K)^{m_f} + C_c(K)^{m_c} \cdot t_c \\ = C_f(\Delta \sigma \sqrt{a \cdot M})^{m_f} + C_c(\sigma \sqrt{a \cdot M})^{m_c} \cdot t_c \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

a : き裂長さ

N : 起動停止の繰返し回数

C_f, m_f : 疲労き裂伝播速度を支配する材料定数

ΔK : 応力拡大係数範囲

C_c, m_c : クリープき裂伝播速度を支配する材料定数

K : 応力拡大係数

t_c : 起動停止 1 サイクルごとの運転時間(クリープ時間)

$\Delta \sigma$: 繰返し応力振幅

M : き裂形状、位置、応力、耐力から決まる定数

σ : 作用応力

脆性破壊(急速破壊)は応力拡大係数 K が破壊靱性値 K_{Ic} に等しくなった時に生じるものとし、破壊を起こす限界き裂長さ a_c は次式で表される。

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma} \right)^2 \cdot \frac{1}{M} \quad \dots \dots \dots (3)$$

あらかじめ仮定した初期欠陥長さ、あるいは超音波探傷などで検出されたき裂長さ a_0 が成長して限界き裂長さ a_c に達するまでの起動停止の繰返し数 N_t は、式(2)及び式(3)を用いて、 a_0 から a_c まで積分することにより求められ、これから起動停止 1 回あたりのき裂伝播に対する寿命消費率 ϕ は、次式で算出される。

$$\phi_p = \frac{1}{N_t} \quad \dots \dots \dots (4)$$

材料の脆化が進むと、破壊靱性値 K_{Ic} が低下する。式(3)から明らかのように、破壊靱性値 K_{Ic} が低下すると、限界き裂長さ a_c が小さくなる。すなわち、各部材について式(3)で算定される限界き裂長さ a_c が、超音波探傷などで検出可能な限界寸法に等しくなる程度までに破壊靱性値 K_{Ic} が低下した場合は、脆性破壊に対する残存寿命も尽きたものと見なして、余寿命は 0 と評価される。

2.3 余寿命総合評価

実機部材と同種材料の材料特性と運転履歴、並びに温度と応力の解析結果から、現在の寿命消費が算定される。更に、劣化計測結果からも、直接に寿命消費が推定可能である。このため、算定された寿命消費と、劣化計測による寿命消費との間に有意差が認められる場合には、温度と応力

の解析精度についての再検討、並びに計算に使用した材料特性の見直しを行い、現在の寿命消費を総合的に評価し、更に今後の部材劣化速度を予測する。

このように、劣化特性計測結果と寿命消費計算を総合的に評価することにより、以後の運転における余寿命予測の精度を高めることができる。

③ 劣化計測による余寿命評価

蒸気タービンの主要部材における経年劣化では脆化、クリープ及び疲労が主となる。これらの劣化は、実機部材から試料を採取して、衝撃試験やクリープ試験などの機械的試験を行うことによって検出することができるが、供用中の実機では、劣化計測を必要とする部材について、多くの場合このような方法は実現不可能である。このため、劣化に伴って変化するいすれかの材料特性を、非破壊的に計測して、これから劣化の程度を推定し、余寿命を予測するという方法が必要となる。このためには、

- (1) 劣化に伴って変化する適当な材料特性を選定して、それの非破壊計測技術を開発する。
- (2) 計測された特性値と、劣化あるいは寿命消費との相関関係を把握する。

ことが必要である。

前者の非破壊計測技術としては、実機について精度良く手軽に計測でき、劣化との相関関係の良いものでなければならぬ。後者については、長期間運転された後に不要となつた使用済み部材について、広範な試験が必要であるが、更に劣化条件が任意に設定でき、かつ明確である人工的に劣化させた材料についての試験も必要となる。余寿命診断のために研究開発した非破壊計測方法と劣化特性について以下に説明する。

3.1 劣化計測方法

3.1.1 金属組織の方法

劣化に伴って材料の金属組織が変化することを利用したものである。蒸気タービンの主要部材に用いられる低合金鋼や、12% Cr 鋼に対しては、高温加熱やクリープによって凝集粗大化した炭化物及びクリープによって結晶粒界に生じるボイド（空孔）などが、劣化検出の目的に適している。実機において、これらの金属組織を観察する箇所を、研磨エッチングした後に現れた金属組織を転写したレプリカを作り、これを金属顕微鏡及び走査電子顕微鏡で観察する。特に炭化物やクリープボイドのよう微細な金属組織を観察するためには、走査電子顕微鏡による高倍率の観察が有効であるが、従来は実機からの金属組織レプリカについては、鮮明な像を得ることが難しかった。富士電機では、精度良く観察するためのレプリカ技術を開発し、実用に供している。

図3にCrMoV鋼のレプリカによる炭化物組織及びクリープボイドを示す。金属組織中に析出する炭化物の量と大きさは、運転時間とともに経年的に増大する。また、その

図3 CrMoV鋼のレプリカによる炭化物組織及びクリープボイド

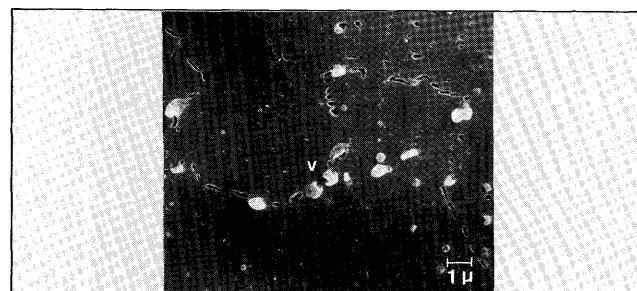


図4 CrMoV鋼の粒界炭化物の大きさの変化

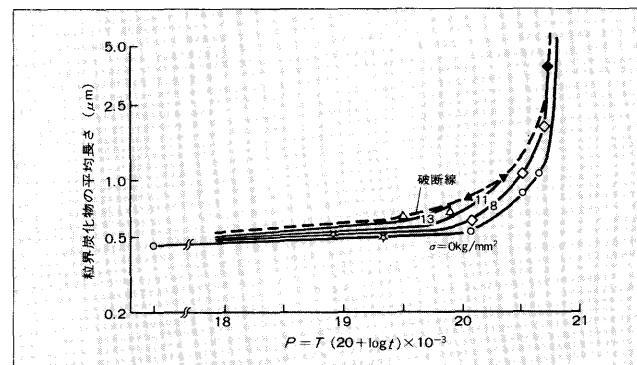
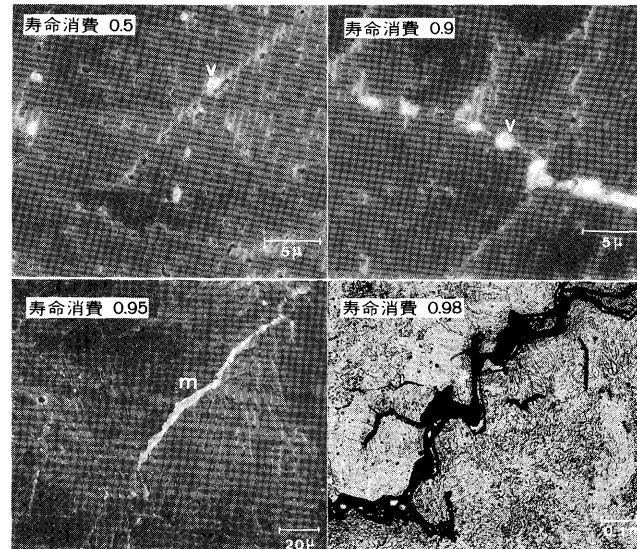


図5 CrMoV 鋄鋼のクリープボイド、ミクロ割れと寿命消費



析出は、応力の作用によって加速される。図4にCrMoV鋼のクリープ人工劣化材について得られた炭化物析出の関係を示す。図4の横軸は、加熱温度と時間の効果をローソンミラーのパラメータで表している。レプリカによる顕微鏡組織観察によって実機の炭化物の大きさを知れば、図4から余寿命に相当するパラメータの値が得られる。図5には、CrMoV 鋄鋼の実機部材について求められたクリープボイドと、これから生じたミクロ割れをクリープ試験によって求めた寿命消費率とともに示している。

3.1.2 電気分極法

劣化を計測する部材をアノード（陽極）として、電解液中で電気分解を起こさせた時に生じる電圧と電流の関係

図 6 CrMoV 鋳鋼の分極曲線と金属組織の関係

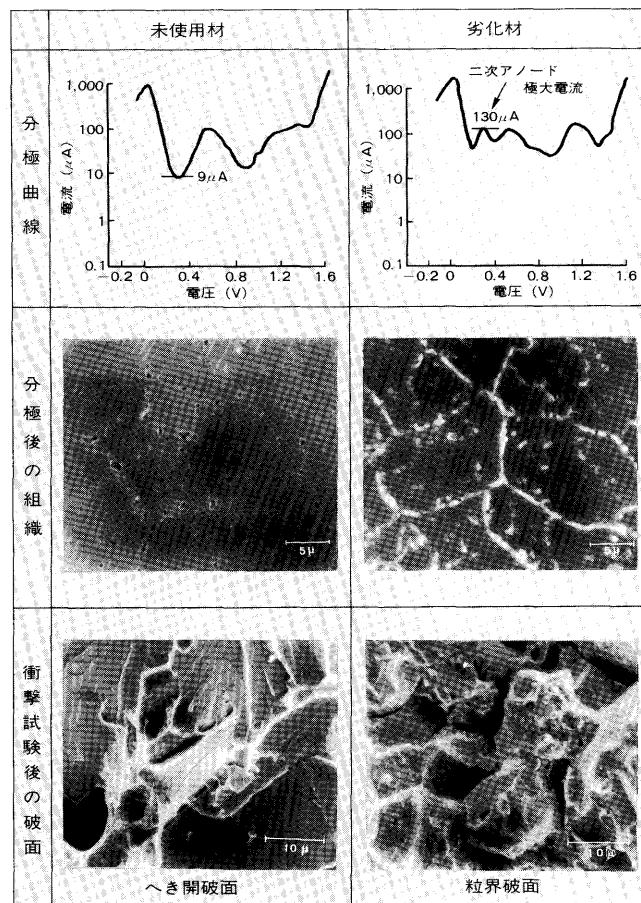
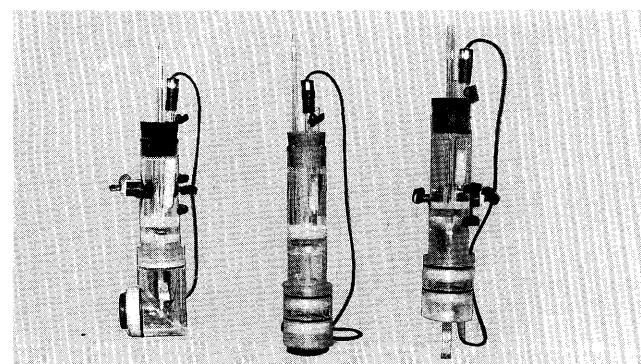


図 7 分極計測用の電解槽



(分極特性)が劣化の進行に伴って変化する現象を利用したものである。高温加熱やクリープによって、結晶粒界へ偏析したリン化合物や凝集粗大化した炭化物が分極特性を変化させるとともに、結晶粒界を脆弱化させて材料を脆化させる。図 6 に CrMoV 鋳鋼の未使用材と劣化材の分極曲線、分極試験後の金属組織、及びシャルピー衝撃試験後の破面を示す。未使用材と劣化材とでは、分極曲線の二次アノード極大電流と呼ばれる部分が顕著に異なっており、また劣化材では結晶粒界が電気分解によって著しく侵されているのが認められる。実機での分極特性計測では、計測する部分を局部的に覆うような小形の電解槽を用いる必要があるため、富士電機では図 7 に示すような水平面用あるいは垂直面用の電解槽のほかに、応力の集中する溝部で使用可能

図 8 CrMoV 鋳鋼の二次アノード極大電流の変化

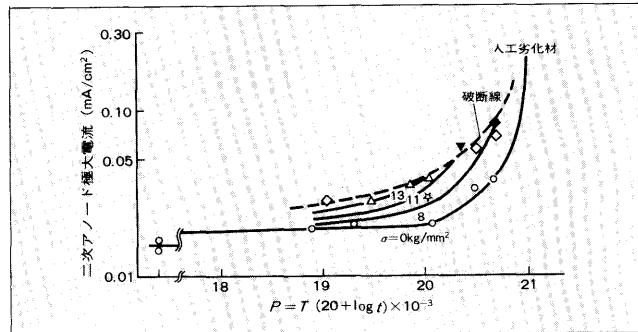
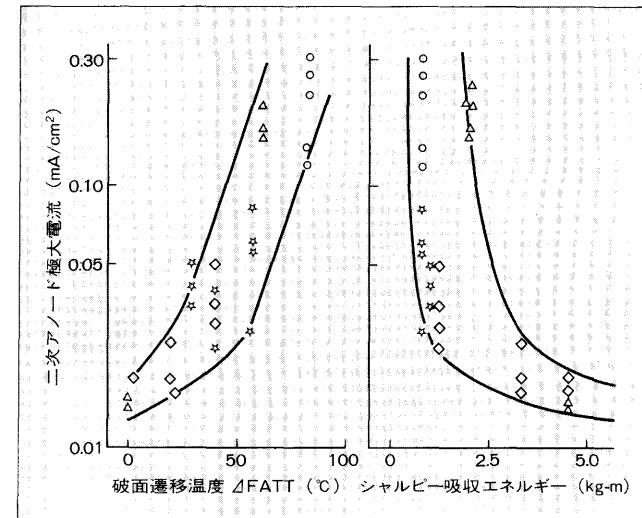


図 9 二次アノード極大電流値とシャルピー吸収エネルギー、破面遷移温度の関係



な、先端部が細くなった電解槽を開発して使用している。

図 8 に CrMoV 鋳鋼の人工劣化材についての二次アノード極大電流値とラーソンミラーのパラメータとの関係を示す。図 8 から、寿命が消費されるに従って二次アノード極大電流値が増加すること、更に増加の程度は作用する応力が高いほど加速されることがわかる。分極計測により分極曲線の二次アノード極大電流値を求めれば、その部材に作用している応力から、この図を利用して余寿命に相当するパラメータが求められる。富士電機ではパーソナルコンピュータを用いて、分極特性の計測値から二次アノード極大電流値を自動的に読み取り、これをあらかじめ入力されている電流値とパラメータとの関係と比較して余寿命を算出するプログラムを開発して実用に供している。

図 9 には CrMoV 鋳鋼についての二次アノード極大電流値と脆化の指標となるシャルピー吸収エネルギーと破面遷移温度との関係を示す。これからも分極特性が部材の脆化を良く表していることがわかる。

3.1.3 硬度による方法

材料硬度は高温加熱、クリープ及び疲労のいずれによつても変化する。蒸気タービン部材に使用されている低合金鋼や12% Cr 鋼では、劣化すると硬度が低下する、いわゆる軟化現象を示すことを利用して劣化を計測する。

硬度による劣化計測は、特別な計測技術を必要とせず、

図10 CrMoV 鋼の硬度変化

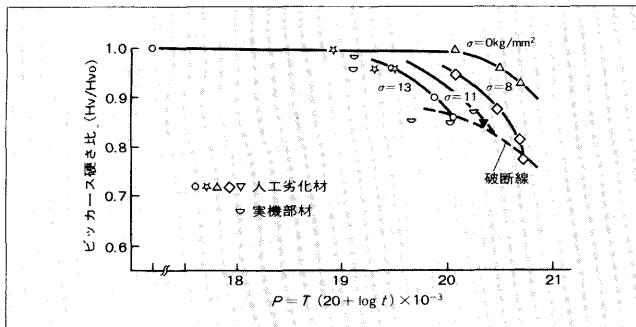
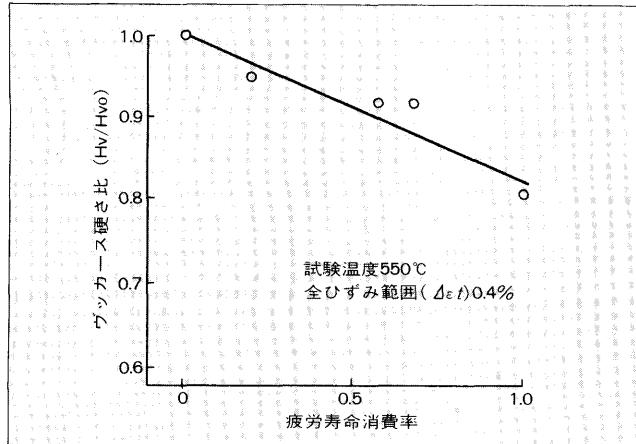


図11 CrMoV 鋼の硬度と低サイクル疲労寿命消費



かつ手軽な計測方法である。ただし、脱炭や加工などによる部材表面の変質層は、硬度計測に影響しないように完全に除去される必要がある。硬度は同一鋼種の部材であっても、化学成分や熱処理によって初期値がかなり異なるので、経年的な劣化を評価する場合には、部材硬度の初期値との相対的な変化に着目しなければならない。図10に実機使用済み材、及びクリープ人工劣化材についての硬度変化を示す。また、図11にはCrMoV鋼の低サイクル疲労による寿命消費と硬度変化の一例を示す。これらの関係は、いずれも硬度計測による寿命消費の推定に利用される。

3.2 劣化計測と材料特性

劣化した部材の余寿命を予測するためには、クリープや疲労による寿命消費のほかに、脆性破壊に対する余寿命の予測が必要なことを2.2節に記述した。このために必要な材料特性として、劣化材についての破壊靱性値、クリープき裂伝播速度及び疲労き裂伝播速度などがある。図9の分極計測による二次アノード極大電流値とシャルピー吸収エネルギーの関係及び図12の未使用材と劣化材の疲労き裂伝播速度の関係などが、この予測のために使われる。

4 余寿命評価の実施例

4.1 中圧タービンロータ

下記の運転履歴と仕様のタービンロータについて余寿命評価を実施した。

図12 CrMoV 鋼未使用材と劣化材の疲労き裂伝播速度

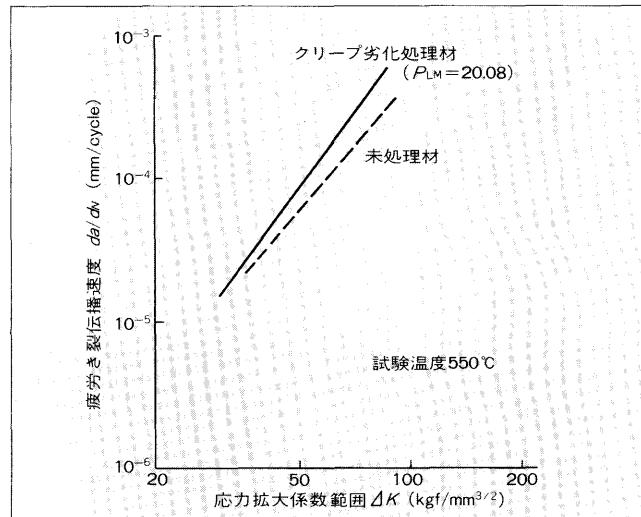
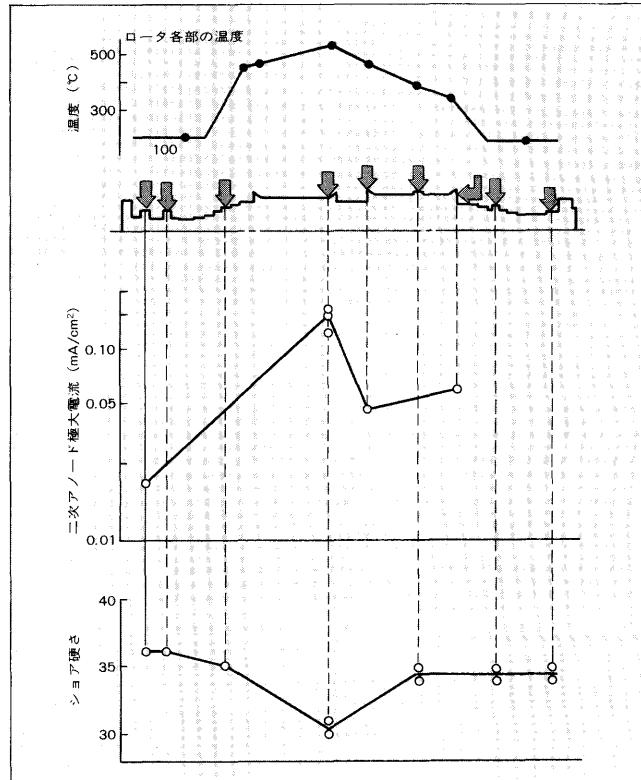


図13 中圧タービンロータの分極及び硬度計測結果



- ・運転経過年数：21年
- ・総運転時間：11.4万時間
- ・蒸気条件：190atg, 538°C/538°C
- ・ロータ材質：CrMoV 鍛鋼

4.1.1 劣化計測結果による寿命評価

図13に劣化計測位置及び温度と対比して各部のアノード極大電流値と硬度を示す。ロータの最高温度部におけるニセアノード極大電流値を図8と対比すると、ロータ表面における運転時に作用している応力は低いが、脆化はかなり進行しており、脆化の点からは、余寿命はかなり短いと推定された。この部分の硬度は、低温部を基準として約15%低下している。レプリカ法による金属組織は図14に見られ

図14 中圧タービンロータのレプリカによる金属組織

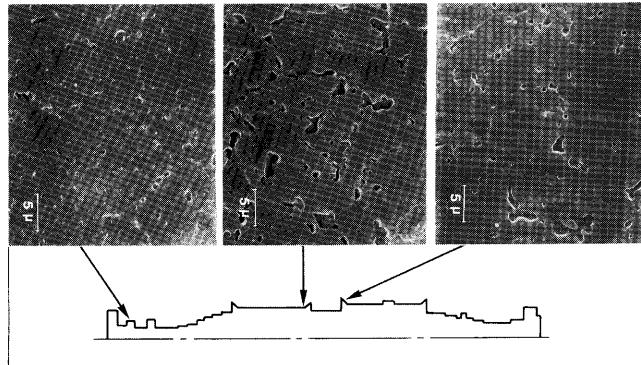
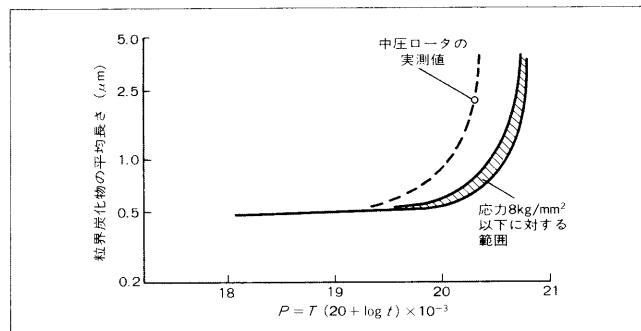


図15 中圧タービンロータの粒界炭化物の大きさ



るよう、低温部より高温部の炭化物が増大している。これから求めた炭化物の大きさを、炭化物の大きさとラーソンミラーのパラメータの関係を示すグラフに重ねてプロットしたものが図15である。この図からも、このロータの高温部の寿命消費がかなり進んでいることが判断される。

4.1.2 計算による寿命評価

図13に示した最高温度部のロータ表面と内部について寿命評価を行った。

(1) き裂発生寿命

劣化計測を行った場所は、ロータ表面の応力集中の無い部分であり、クリープ応力及び起動停止に伴う繰返し応力ともに低い値である。このタービンの起動パターンは、運転年数とともに変化しているため正確な寿命消費は算定されていないが、応力集中のない表面で10%以下、応力集中のある翼脚溝部でも30%以下である。したがって、計算からはマクロき裂発生までの残存寿命が十分あることになり、探傷検査でもマクロき裂は検出されていない。

(2) き裂伝播寿命

最高温度部のロータ内部の脆化の程度は計測できないが、ロータ温度分布の解析から、この部分の表面と内部とでは同温度であるので、同程度の脆化が進んでいるものと考えられる。ロータ中心について破壊靭性値の劣化を考慮し欠陥の存在及び従来の起動パターンを仮定すると、脆性破壊に対する余寿命は5~6年程度と算定された。

4.1.3 余寿命総合評価

劣化計測の結果からは、ロータの最高温度部の脆化が進行しており、このロータの使用応力が低いことから表面のマクロき裂発生に対する寿命は十分残っているが、比較的

図16 主蒸気止め弁ケーシングのレプリカによる金属組織

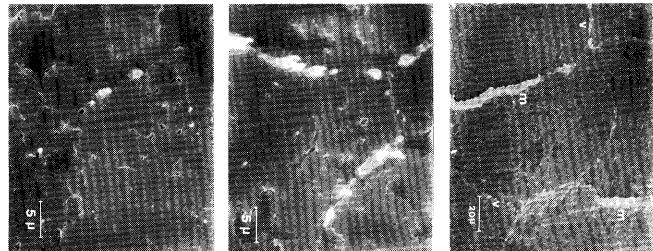


図17 主蒸気止め弁ケーシングの分極計測結果

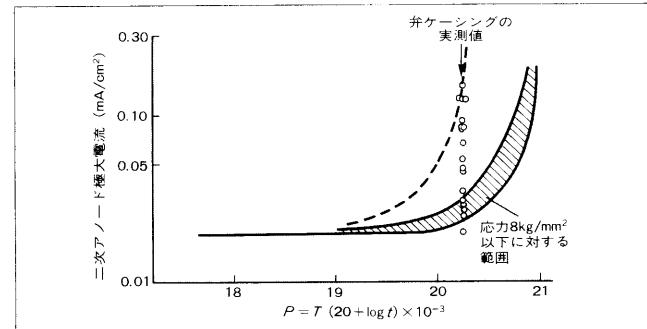
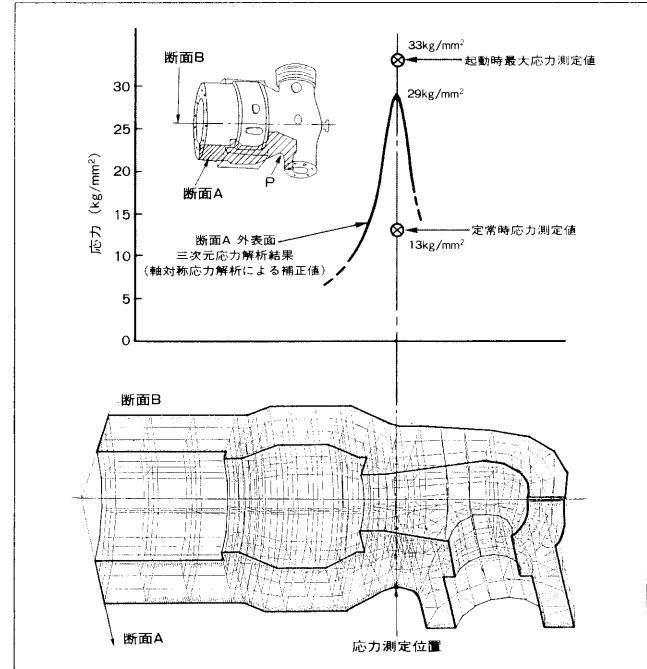


図18 主蒸気止め弁ケーシングの応力解析モデルと応力値



高い応力が作用しているロータ中心については、脆性破壊に対する余寿命は5~6年程度と判断された。

4.2 主蒸気止め弁ケーシング

定期点検時に弁ケーシング表面に、き裂発生が確認された下記の運転履歴と仕様の主蒸気止め弁ケーシングについて余寿命評価を実施した。

- ・運転経過年数 : 14年
- ・総運転時間 : 9万時間
- ・蒸気条件 : 190atg, 538°C/538°C
- ・ケーシング材質 : CrMoV 鋳鋼

4.2.1 劣化計測結果による寿命評価

図16にレプリカ法による劣化程度の異なる3か所の金属組織を示す。図5の実機使用済み材のクリープボイドの見られる金属組織と対比して判断すると、この弁ケーシングの寿命消費率は計測位置による差があるが、およそ0.5~0.95の範囲にあることがわかる。図17は分極計測の結果を図8のグラフに重ねてプロットしたものである。計測位置の応力は、いずれもおよそ5kg/mm²以下であるが、安全側に見て計測値は応力値0の曲線上にプロットしてある。二次アノード極大電流値は計測位置によって大きな差があるが、ほとんど余寿命が無い箇所が存在していることを示している。

4.2.2 計算による寿命評価

(1) き裂発生寿命

比較的複雑な形状をした弁ケーシングについて、計算による寿命評価を正確に行うために、有限要素法による三次元応力解析と、実機運転状態における応力測定を行った。図18に応力解析モデルと計算結果、及び実測応力を併せて示している。起動時の最大応力は図18に示した弁ケーシングのP点に生じており、その値は33kg/mm²であった。この値から起動停止に伴う疲労寿命消費は1%程度と算定された。定常運転時の同じ位置の応力は13kg/mm²であり、これによるクリープ寿命消費は5%と算定された。したがって、この弁ケーシングの材料が全体に均質で健全であったとすれば、応力値も低いため現在までの寿命消費は6%程度であり、マクロき裂発生に対する寿命は十分残っていると算定された。

(2) き裂伝播寿命

劣化計測から得られたこの弁ケーシング材についての劣

化特性及びき裂の発生度合と進展状況を考慮して、この弁ケーシングに内在するマクロき裂が拡大伝播したとして弁ケーシングが脆性破壊を引き起こす、あるいはき裂が弁ケーシング壁を貫通して運転中に蒸気漏れを起こす限界のき裂に達するまでの余寿命は、2年程度と算定された。

4.2.3 余寿命総合評価

この弁ケーシングは、運転時の応力値が低いにもかかわらず劣化が進行した原因として、この弁ケーシング材には製作当初より非性の低い部分が偏在しており、この部分からマクロき裂が発生したものと判断された。このため、この弁ケーシングは早い時期に更新することが望ましいと判断された。

5 あとがき

余寿命診断技術は現在、まだ緒についたばかりであり、今後の研究開発に負うところが大である。特に劣化計測に基づく余寿命予測の精度向上と適用範囲拡大のための今後の課題としては、

- ・材料劣化に関するデータベースの充実
- ・劣化計測技術の改善
- ・余寿命評価方法の改善とシステム化

が求められている。

余寿命診断技術の確立は、火力発電設備に求められている電力の安定供給と経済性の維持向上に資するものである。このため、富士電機として、今後とも余寿命診断技術の研究開発を進め、顧客並びに社会の要請にこたえて行く所存である。ここに紹介した技術がユーザー各位の保守管理業務に役立てば幸いである。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。