

蒸気タービンの予防保全技術

加藤 雅喜(かとう まさき)

中村 憲司(なかむら けんじ)

住廣 敦夫(すみひろ あつお)

1 まえがき

現在稼動している事業用・自家用火力発電設備は、その約7割が運転開始後15年以上経過したいわゆる経年機になっているが、最近では運用の過酷化〔ピークカット運用・DSS(Daily Start & Stop)/WSS(Weekly Start & Stop)運用・中間負荷調整運用〕などにより、従来にも増してその劣化が加速され、早急に適切な耐力強化対策が必要な状態になっている。

一方、電気事業法の改正により設置者責任がより明確になり、保守管理と予防保全への取組みの重要性がさらに高まっており、設備診断技術の提供と顧客ニーズにマッチした経済的かつ効果的な設備改善提案推進が期待されている。

このような背景から、富士電機では十数年前から余寿命診断技術を開発し、数多くのプラント実績から信頼度の高い劣化度評価を実現しており、さらに経年火力タービン設備における耐力強化補修や改造、同機種対策や新技術適用などの予防保全メニューを中長期設備改善プランとして提供している。

ここでは、経年蒸気タービンで経験している代表的な不具合事例を紹介するとともに、最近富士電機が実施している余寿命診断評価技術の概要や予防保全・耐力向上対策例を紹介する。

2 蒸気タービンの経年損傷形態とその事例

表1に蒸気タービンの主要部位に起こる代表的な経年損傷形態と富士電機が実施している余寿命診断・精密点検の手法を示す。

このように、蒸気タービン構成機器は、運転開始以降、摩耗や浸食、変形など使用環境や運転状況によりさまざまな状態変化や不具合が起こるが、一方、総運転時間が10万時間を境にして、クリープや疲労損傷、脆化などの材料的劣化も顕在化し、使用機器の強度的問題も併せて生じてくる。

いずれの経年劣化形態も蒸気タービンの各構成部材で複

合的に起こり、経年的に徐々に進行したり、あるいは急に使用限界になるほどの大きな損傷となって現れたりする。

経年機は、これらの不安を抱えながら運用されているわけであり、予想される損傷をより早い時期に余寿命診断や精密点検で見つければ、適切な処置・対策を講じることが重要となる。

以下に富士電機がこれまで経験した蒸気タービンにおける経年損傷形態の代表的な事例を紹介する。

(1) 高圧ケーシング外面のクリープ損傷

高圧外部ケーシング外面抽気取出しR部に発生したクリープ損傷の例を図1に示す。

金属組織観察結果では、金属粒界にクリープポイドとその結合によるマイクロクラックが観察され、また、エッチングの結果、亀裂近傍に製作時の溶接補修跡が認められることから、運転中の熱応力と残留応力が重畳してクリープ亀裂に至ったものと判断されている。

(2) 主要弁ケーシング内面のクリープ損傷

高圧複合弁ケーシング弁座外周R部に発生したクリープ損傷の例を図2に示す。

当該部は有限要素法(FEM)による解析結果からも応力が非常に高いことが確認され、金属粒界にもクリープポイドが観察されることから、典型的なクリープ損傷であることが分かる。

(3) 高圧ノズルのエロージョン損傷

図3に高圧ノズル翼後縁部に発生したエロージョン損傷の例を示す。これは、ボイラ・主蒸気管内ではなく離れた酸化スケールが高速でノズル翼に衝突するために起こる浸食現象であり、ソリッドパーティクルエロージョンと一般的に呼ばれている。

(4) 低圧動翼のエロージョン損傷

図4に低圧動翼前縁部に発生したエロージョン損傷の例を示す。これは、低圧タービンの湿り域段落以降の動翼においてドレン水により特に蒸気流入側の翼先端がピッチング状あるいは林状に浸食する現象であり、進行すると、亀裂損傷に至ることがある。

(5) 高温ボルトの亀裂損傷(脆化)



加藤 雅喜

火力発電設備のプラントサービスエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー火力事業部プラントサービス部長。



中村 憲司

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部担当課長。日本機械学会会員。



住廣 敦夫

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在、エネルギー製作所火力設計部。日本機械学会会員。

表1 蒸気タービン主要部位の代表的損傷形態と余寿命診断・精密点検方法

機 器	部 位	経年劣化事象									余寿命診断				精密検査					
		クリープ	疲労	脆化	腐食	浸食	軟化	摩耗	変形	曲がり	理論解析	硬度測定法	金属組織法	電気分極法	VI	DI	PT	MT	HT	UT
高・中圧 ロータ	外表面																			
	応力緩和溝部																			
	翼溝部																			
	グランド部																			
	ジャーナル部																			
	カップリング部																			
低圧 ロータ	外表面																			
	翼溝部																			
	グランド部																			
	ジャーナル部																			
	カップリング部																			
高・中圧 動静翼	シュラウド部																			
	翼根元部																			
低圧 動静翼	シュラウド部																			
	翼前縁部																			
	翼根元部																			
ノズル	ノズル室																			
	ノズル翼																			
	溶接部																			
高・中圧 ケーシング	コーナ R 部																			
	フランジ部																			
	接続管溶接部																			
	高温ボルト																			
低圧ケー シング	構造溶接部																			
	フランジ部																			
	ボルト																			
グランド バックキ	グランドバックキ																			
	フィン																			
	ボルト																			
主 要 弁	内表面 R 部																			
	外表面 R 部																			
	フランジ部																			
	高温ボルト																			
	弁棒・弁体																			
	シリンダ																			
	アクチュエータ																			
軸 受	軸受金																			
	シールフィン																			
	ボルト																			

図5に再熱フランジ用締付ボルトに発生した亀裂損傷の例を示す。破面観察などの結果、へき開破面が観察され脆性破壊による損傷である。

③ 富士電機における余寿命診断技術

3.1 余寿命診断技術の開発

富士電機は1987年に低合金鋼（CrMoV 鋼）の余寿命診断手法を開発した。この手法により、延べ40プラントの蒸気タービンの余寿命診断を実施し、信頼性の高い劣化度評

図1 高圧外部ケーシング外面抽気取出し R 部のクリープ損傷

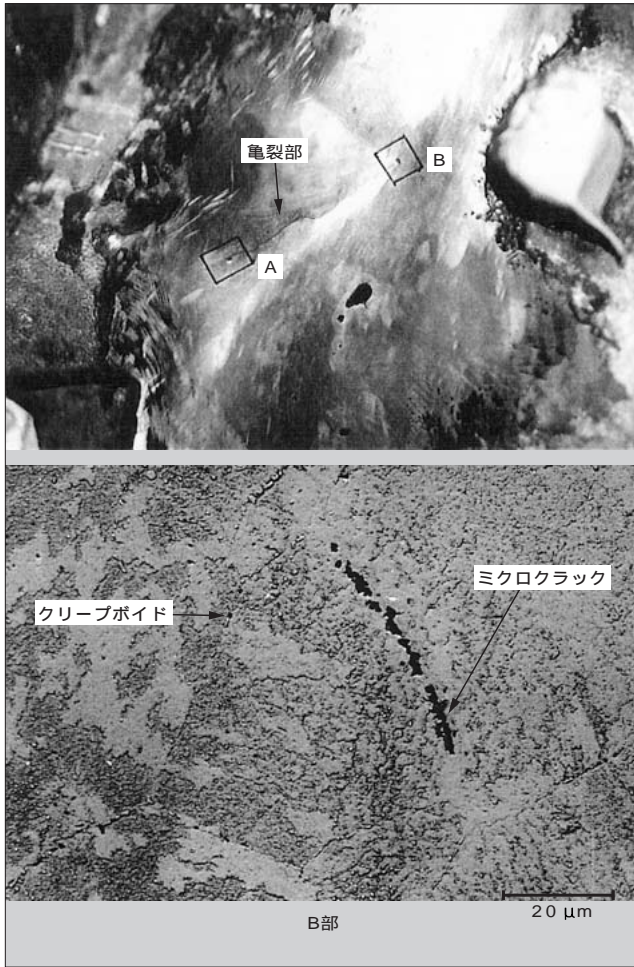
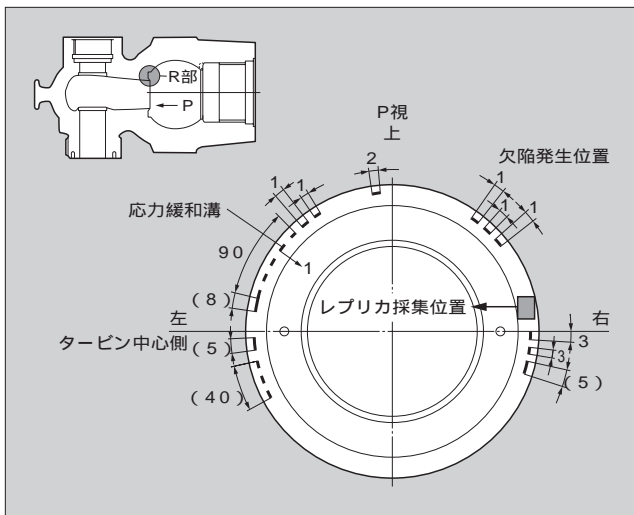


図2 高圧複合弁ケーシング弁座外周 R 部のクリープ損傷



価が可能となっている。

一方、富士電機では、早くから蒸気温度 566 の蒸気タービンに採用している高温クリープ強度などに優れた 12% Cr 鋼の余寿命診断技術の研究・開発に着手し、現在、実機での適用評価を行っている。

以下に、その 12% Cr 鋼の劣化特性を含めた、富士電機における蒸気タービン余寿命診断技術の概要を紹介する。

図3 高圧ノズルのエロージョン損傷

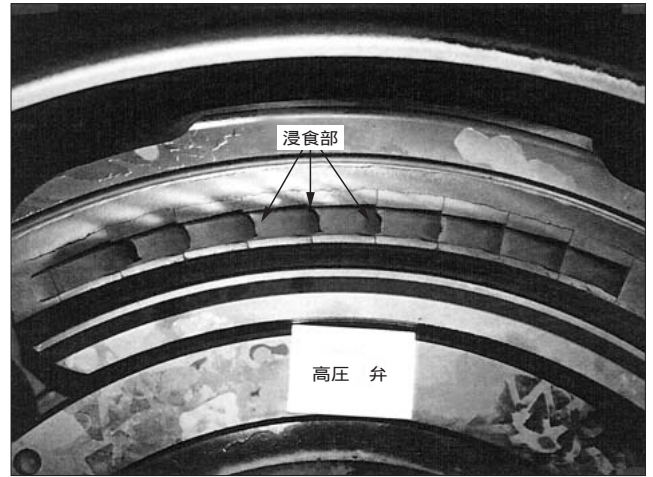


図4 低圧動翼のエロージョン損傷

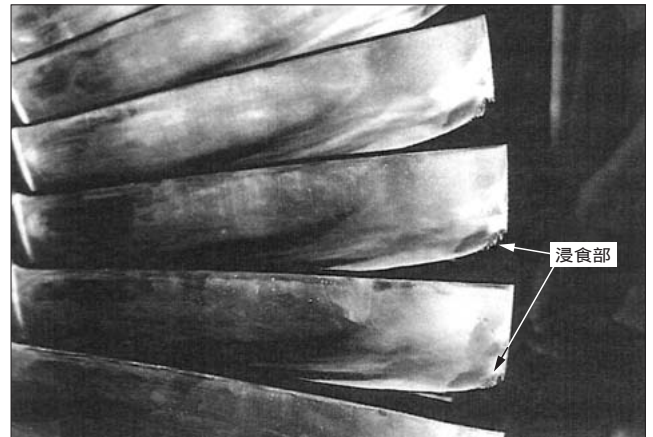
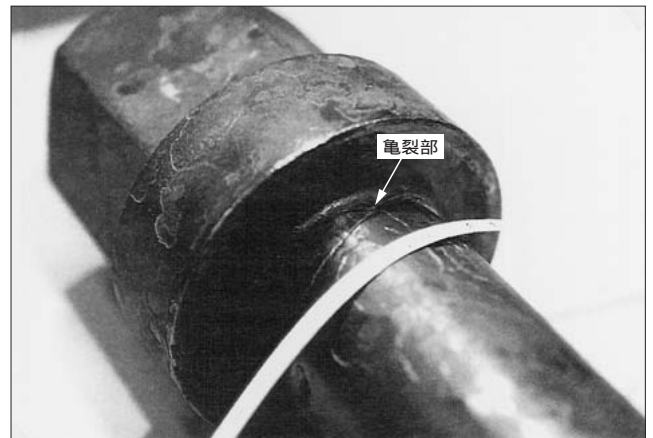


図5 高温ボルトの亀裂損傷（脆化）



3.2 余寿命診断手法の概要

現在、富士電機が余寿命診断に適用している手法は次のとおりであるが、表 1 で示した精密検査と併せて実施することで評価精度を高めている。

- (1) 理論解析法
- (2) 非破壊的手法
 - (a) 硬さ法

b. 金属組織法

(c) 電気化学分極法 (電気分極法)

3.2.1 理論解析法

材料特性と運転履歴,ならびに温度と応力の理論計算を基にクリープ損傷,疲労損傷を評価する。

3.2.2 非破壊的手法 (材料劣化計測)

(1) 硬さ法

クリープや疲労により,金属組織内の炭化物が析出,粗大化したり,あるいは転位密度の減少などが起こると,材料軟化となって現れるが,これを硬さ計で計測し,クリープ損傷,疲労損傷の程度を評価する方法である。

図6,図7は,CrMoV鋼,12%Cr鋼の人工劣化材から求めたクリープ劣化特性を示す。このカーブは,応力をパラメータとして,縦軸に劣化後の硬さと初期硬さの比を表し,横軸に温度・時間の使用条件要素からなるラーソン・ミラーパラメータとの関係を表している。

12%Cr鋼はCrMoV鋼同様,劣化すると硬度が低下する軟化現象がみられ,この図が示す材料特性カーブを使い,硬さの測定結果から余寿命を求める。

高温低サイクル疲労に関しても,硬さ比から,その時点における低サイクル疲労寿命消費を求めることができる。

図6 ラーソン・ミラーパラメータと硬さ比の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (CrMoV鋼)

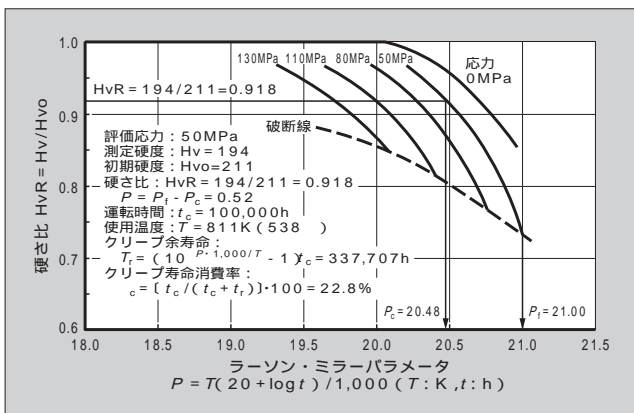
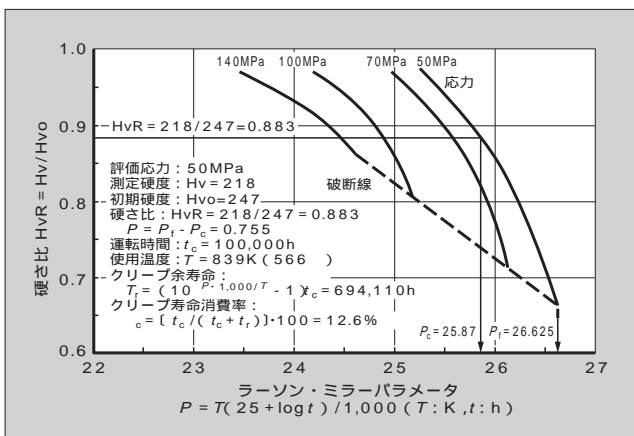


図7 ラーソン・ミラーパラメータと硬さ比の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (12%Cr鋼)



(2) 金属組織法

クリープによる金属組織の変化〔炭化物の析出粗大化,クリープキャビティ(クリープポイド)の生成〕をレプリカに転写して顕微鏡で観察し,クリープ損傷を評価する方法である。

(a) 炭化物による方法

図8,図9に,CrMoV鋼,12%Cr鋼について炭化物の大きさ・量の経年的な変化を示す。CrMoV鋼,12%Cr鋼ともクリープ損傷により炭化物が増加する。このことから,炭化物平均面積の初期値に対する比とラーソン・ミラーパラメータとの関係を示す線図(図10,図11)を利用して,クリープ余寿命を求めることができる。

b) Aパラメータ法

本手法は,レプリカの結晶像を横切る線上にある結晶粒界総数に対するクリープポイドが観察された粒界数の割合から,クリープ寿命消費率を求める方法である。

CrMoV鋼はクリープポイド量と損傷の関係に相関がある。一方12%Cr鋼は,図12に示すように損傷率70%以上にならないとクリープポイドは発生しない特性を有するため,損傷率の低い段階での余寿命評価手法には適していないといえる。

図8 CrMoV鋼のクリープによる炭化物の変化

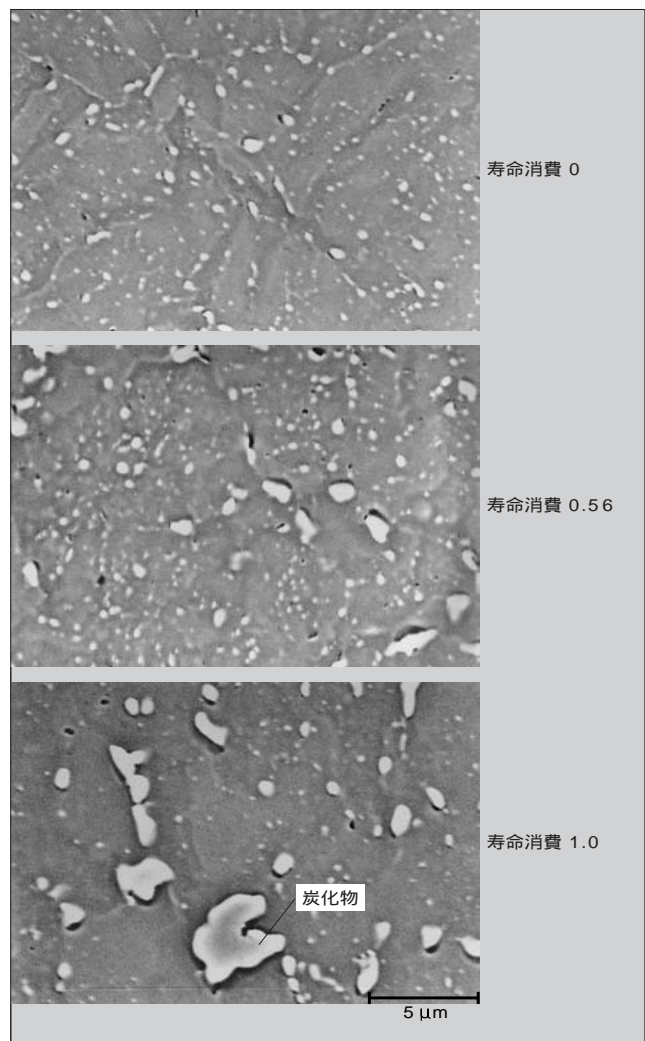
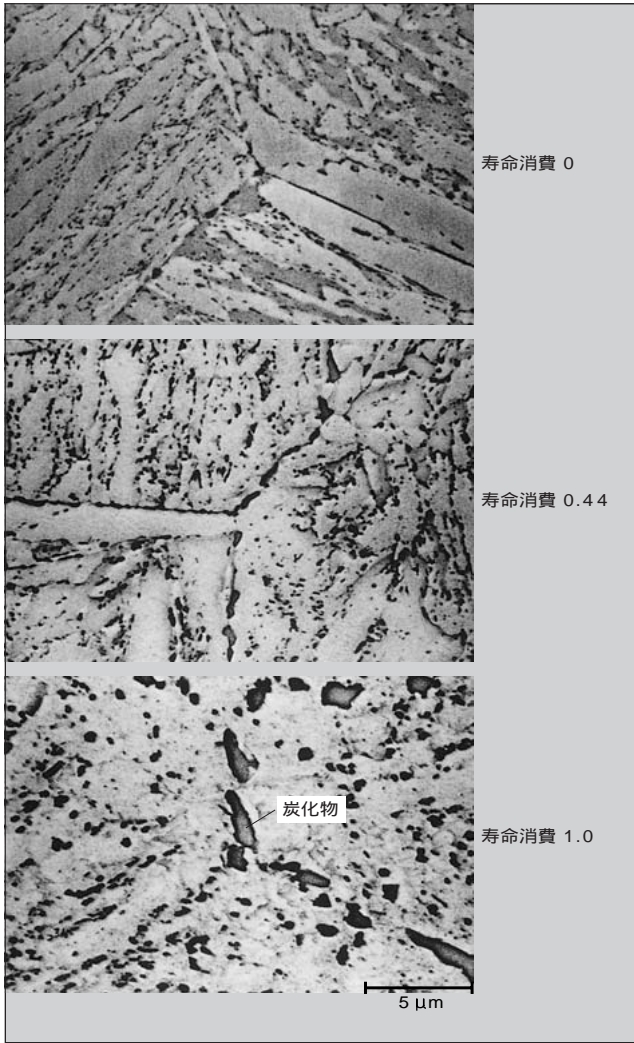


図9 12% Cr 鋼のクリープによる炭化物の変化



(3) 電気化学分極法 (電気分極法)

電気分極法は、部材の劣化を計測する部分をアノード (陽極) として、電解液中で電気分解を起こさせたときに生じる電圧と電流の関係 (分極特性) が劣化の進行に伴って変化する現象を利用して、劣化程度を評価する方法である。分極特性の変化は、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の程度を表しており、材料の脆化度を評価できる。

この方法は CrMoV 鋼の粒界脆化の検出に非常に有効であるが、12% Cr 鋼は脆化しにくい特性を有しているため脆化度が低い段階での余寿命評価手法には適していない。

なお、クリープ損傷と相関のある M_6C 炭化物が電気分極法により評価できることが分かったため、富士電機では、実用化に向けて現在データを蓄積し、評価手法として確立すべく開発を行っている。

3.3 今後の余寿命診断

以上のごとく、現在富士電機では、従来から多くの実績がある CrMoV 鋼に加え、12% Cr 鋼の余寿命診断技術についても確立し、さらに精度改善を進めており、経年蒸気タービンに対し信頼性の高い余寿命・劣化度診断技術の提

図10 ランソン・ミラーパラメータと炭化物平均面積増加割合の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (CrMoV 鋼)

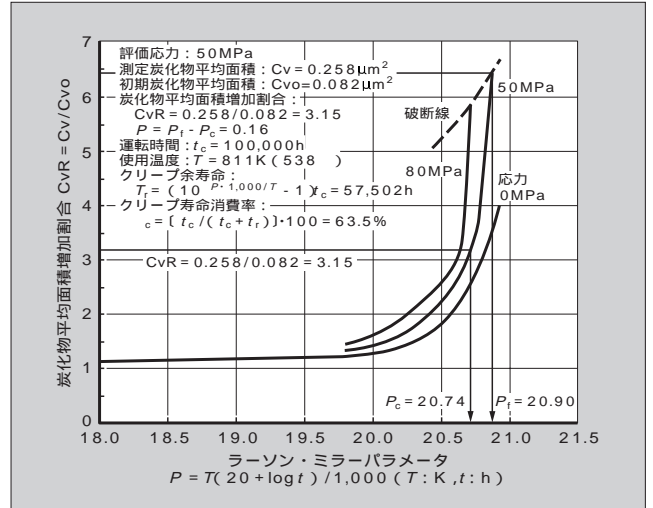


図11 ランソン・ミラーパラメータと炭化物平均面積増加割合の関係によるクリープ寿命消費率の計算例 (12% Cr 鋼)

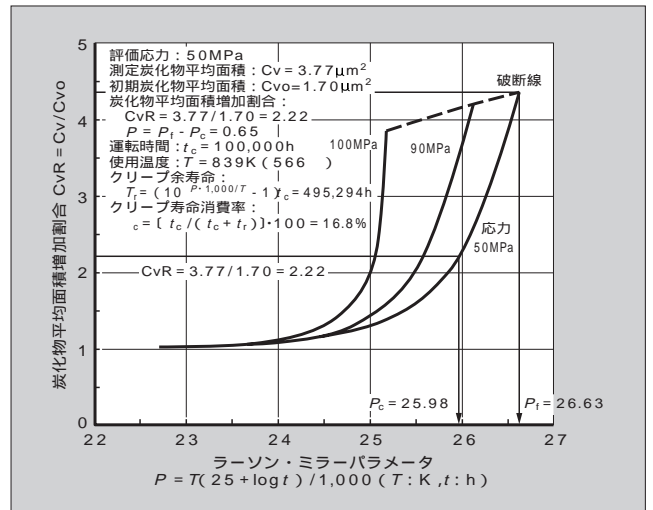
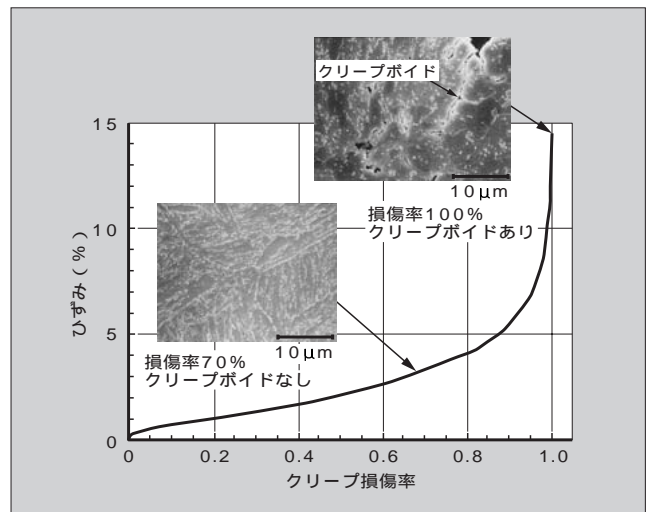


図12 クリープ曲線とクリープポイド発生状況 (12% Cr 鋼)



供が可能となっている。

今後、蒸気温度 610 クラスの蒸気タービンに採用する改良 12 % Cr 鋼についても、12 % Cr 鋼で得られた開発成果をベースに余寿命診断技術の開発・確立を行う計画である。

④ 予防保全・耐力向上適用技術

既設蒸気タービンにおいて、通常実施されている設備保全では、機器の損傷部位の補修や取替え、さらには機器の更新または改造などが、定期点検時に適宜行われているが、その際、トラブルに対する同機種対策や最新技術を適用することによって、機器の長寿命化や信頼性向上、効率向上を図ることができる。

ここでは、富士電機が行っている主な予防保全、耐力向上、性能向上技術の適用例について紹介する。

4.1 信頼性向上適用技術

(1) 応力緩和対策（長寿命化）〔本特集号の別稿「中容量再熱蒸気タービン」の図 5 参照〕

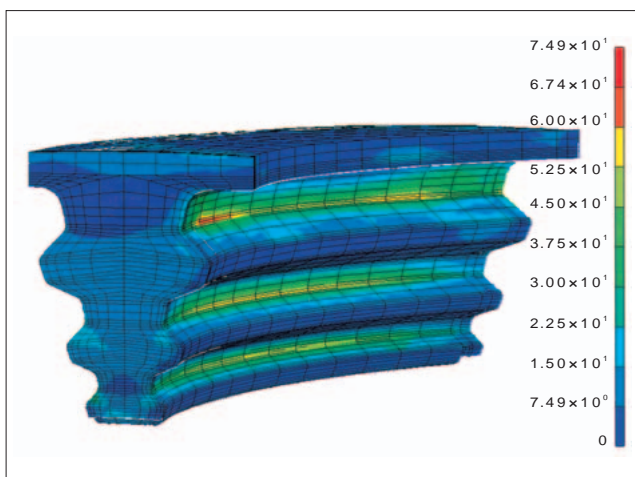
蒸気タービンのロータの高温部には、起動停止によって大きな熱応力が発生し、ロータの寿命管理上のクリティカルポイントとなっている。この熱応力の大きい部位の応力を緩和することにより、プラントの運用のフレキシビリティを改善させると同時に、ロータの延命化を図る。

具体的には、精密な FEM 計算による応力解析と運転シミュレーションをベースに、主として初段動翼の翼溝底部のフラット化、翼溝コーナ部の R 増大による応力集中の軽減、およびロータの応力緩和溝の最適化を実施する。

(2) 翼脚溝形状の最適化（信頼性向上）〔図 13 参照〕

主として、温度は低いが、応力レベルの高い低圧翼の翼脚溝に対して適用される。通常、低圧翼の翼脚溝に対しては、クリスマスツリー形の翼脚が使用されているが、この翼脚溝に対して、精密な FEM 計算によるシミュレーションを実施し、形状（特に溝の R 部）の最適化により、応力集中を軽減し、SCC（Stress Corrosion Cracking）などに対す

図 13 クリスマスツリー脚の FEM 応力解析例



る信頼性を向上させる。

さらに、必要な場合には、翼脚部や溝部にショットピーニングやローラ掛けなどにより、圧縮応力を追加することにより、翼脚溝部の損傷を防止する。

(3) 内部ケーシングの熱変形対策〔本特集号の別稿「富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン」の図 5 参照〕

蒸気温度の高いタービンの場合、経年的に内部ケーシングにクリープによる熱変形が発生し、ロータとのギャップの確保が困難になる。この内部ケーシングを、高温クリープ特性の優れた改良 12 % Cr 鋼のものに交換することによって、熱変形が抑えられ適性なギャップの確保が可能となり信頼性向上が図れる。

(4) 低圧翼のエロージョン対策〔図 14 参照〕

湿度の高い蒸気中で運転される低圧翼は、経年的なエロージョンの進行によって、効率が低下するだけでなく、表面の損傷が極端に進行した場合、亀裂の発生や翼破損の可能性が懸念される。通常対策としては、低圧翼自体の更新により運転の継続を図ることが可能だが、さらに効果的な対策として、蒸気中の水分を直接除去する方法がある。具体的には、ケーシング側にドレンキャッチャを設けたり、静翼にドレンスリットを採用したりする方法である。

また、特に、エロージョンに対する条件の厳しいタービンに対しては、静翼中に温度の高い蒸気を通すことによって、さらに水分を除去する効果を高めた静翼ヒーティングを採用することによって、エロージョンの進行を鈍化させることができる。

図 14 静翼ヒーティングによるエロージョン防止対策

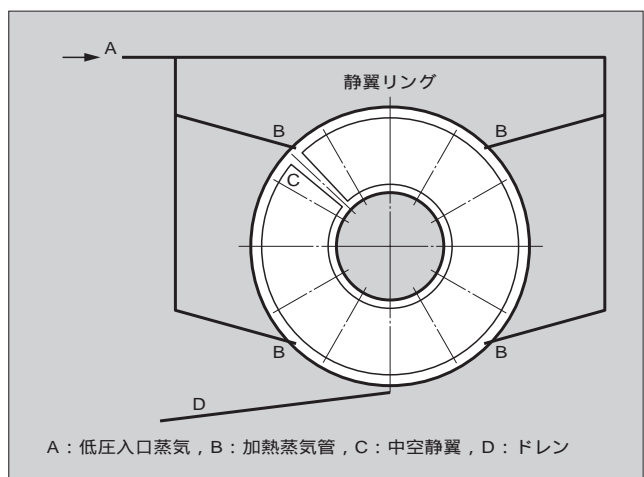
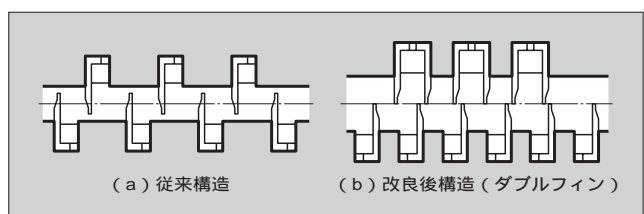


図 15 グランドシールフィンの改良



(5) グランドシールフィンの改良〔図15 参照〕

ケーシングなどの経年的な熱変形の影響によって、タービンランド部においてラッピングによる振動が発生する可能性がある。このランドのシールフィンを従来のラピンス型やシースルー型のフィンから、対向型のダブルフィンに変更することによって、ラッピングによる振動の発生を防止する。

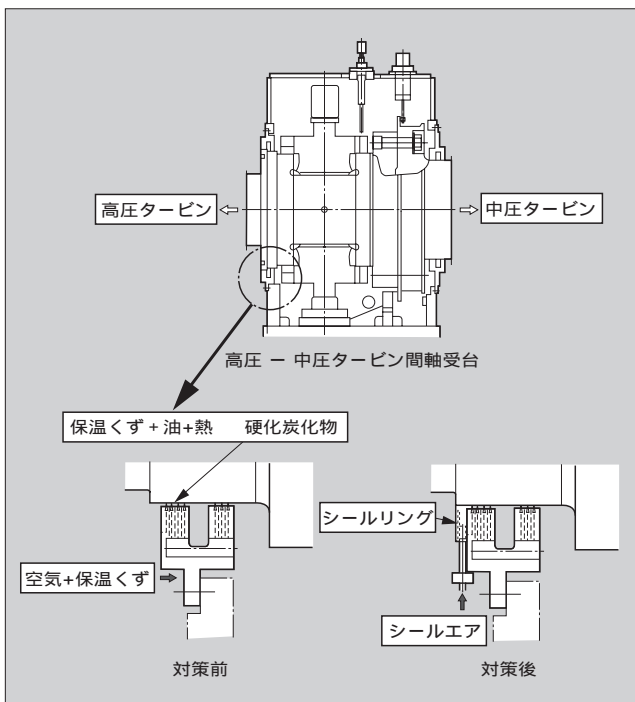
(6) 弁のしゅう動性の改善〔図16 参照〕

主要弁の弁体、弁棒に従来施工されていたステライト盛金に代えて、クロムカーバイドのジェットコート溶射を実施することによって、高温下でのしゅう動性、耐摩耗性の向上が図れる。また、同時に、酸化皮膜の生成を減少させる効果により弁すきまの減少を抑止することが期待でき、メンテナンス期間の延長も可能となる。

図 16 弁棒のジェットコーティング施工例



図 17 軸受台漏止めリングのカーボンラッピング対策例



(7) 漏止めリングのカーボンラッピング対策〔図17 参照〕

各軸受台油漏止めリングに空気中の保温くずなどのじんあいが付着し、このじんあいに吸着した潤滑油がタービンの輻射（ふくしゃ）熱で炭化（カーボナイズ）する現象があるが、この炭化物の硬化により、ロータとラッピング振動を発生させることがある。この対策として、油漏止めリングの外側にシールリングを取り付け、エア吹付けを行うことによりじんあいの吸込み・付着を防止しかつ冷却が図れる。この結果、カーボナイズ化を抑制することができる。

(8) ジャーナル軸受の形状改善〔図18 参照〕

通常、低圧部のジャーナル軸受に使われている真円軸受または二円弧軸受を、ポケット付軸受（トラークシュピーゲル軸受）に形状変更することによって、ロータの振動に対する安定性を高める。

4.2 効率向上適用技術

(1) 高効率低圧翼の採用〔本特集号の別稿「地熱タービン」の図2 参照〕

40年以上にわたるフリースタンディング低圧翼の信頼性を維持しながら、最新の数値流体解析技術（CFD）によって性能を飛躍的に高めた新世代低圧翼を開発し、モデルタービン試験による検証を経て実機に適用している。

特に、最終段の静翼には、三次元のフローパターンを最適化するためリーンラジアル静翼を採用し、従来に比べて大幅な性能改善が可能となった。

図 18 ジャーナル軸受の形状改善

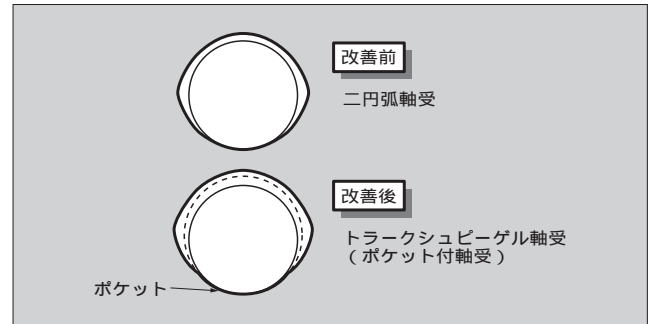


図 19 高性能新型反動翼形の流れ解析計算例

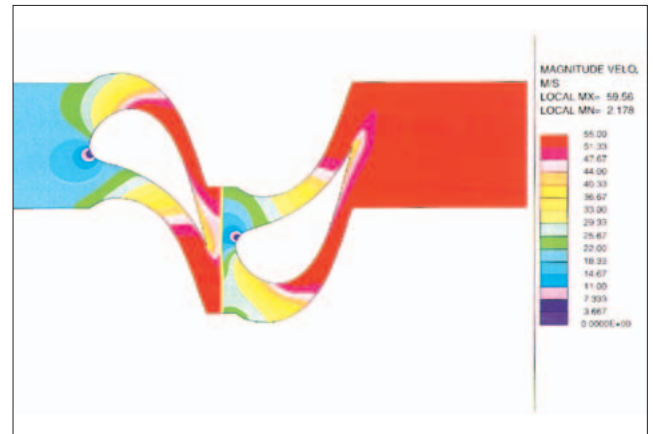
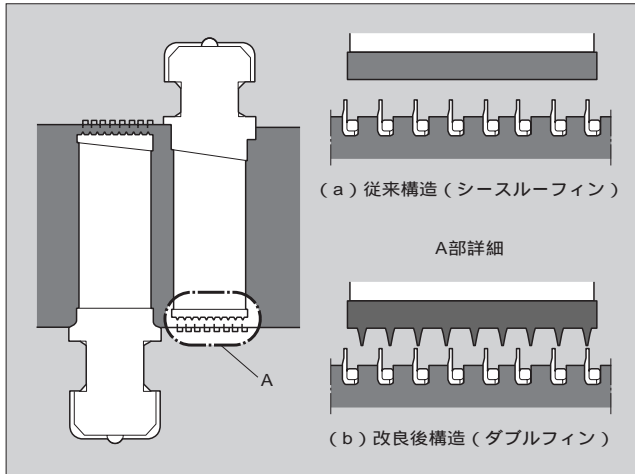


図 20 ダブルフィンの構造



用いられてきた。モデル実験によって種々の形状のシールフィンを比較検討した結果、対向形のダブルフィンを採用することによって、リークage損失を減少させ得ることが分かった。

5 あとがき

以上、富士電機の蒸気タービンに関する予防保全技術の概要について紹介した。

今後もこれら経年火力設備が主力電源設備として重要な役割を担っていかなければならない現状を踏まえ、富士電機は、顧客ニーズにマッチした適切な設備診断技術と最適な設備ライフプラン（予防保全・耐力向上対策技術）を提供していく所存である。

参考文献

- (1) 土信田徹也ほか：火力発電設備の余寿命診断技術，富士時報，Vol.60，No.5，p.348-354（1987）
- (2) 大野芳一ほか：火力発電設備における予防保全技術，富士時報，Vol.61，No.9，p.593-599（1988）
- (3) Yamashita, M. et al. : Detection of Carbides in CrMoV Steel by Electrochemical Method. PVP-Vol.276/NDE-Vol.12, ASME（1994）

(2) 高性能反動翼形の採用〔図19参照〕

従来用いられてきた反動翼形と同じ強度を保ちながら、翼列性能の改善を図った、新しい反動翼形を開発した。

新反動翼形は、従来プロファイルより幅広い負荷条件に対して、損失が小さいという特性を持っており、ストレート翼の翼列効率を大幅に高めることができる。

(3) ダブルフィンの採用〔図20参照〕

伸び差が大きい低圧タービンに対しては、従来、翼部のシールフィンとして、ストレート形のシールフィンが

最近登録になった富士出願

〔特 許〕

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
3102190	印字式記録計	高木 敏光	3102233	塗装設備における鋼板の加熱方法	田口 一洋
3102194	インクジェット記録ヘッドの製造方法	門脇 昭彦 相馬 伸一 武居 正彦 松田 幹彦	3102246	熱交換器	原 信
			3102254	自動販売機の制御装置	古賀 恒治 繁田 雅信
3102197	ウエハの誘電体分離方法	松崎 一夫 平林 温夫	3102316	電子写真感光体	会沢 宏一 伊藤 成通
3102201	平形半導体装置	兼田 博利	3102401	電力変換器の制御装置	海田 英俊 尾崎 一寛 江口 直也 笹川 清明
3102212	制御機器の取外し具	石川 雅英 月花 正志 柴田 勝美			3102653
3102214	半導体装置の製造方法	西澤 正人	3102828	プログラミング装置	引地 正則 丸山 吉晴 日向 一人 高橋 孝一
3102226	自動販売機用製氷機の氷吐出量制御装置	森 俊二 西脇 正剛 谷口 宏也 横山 勝治 太田 春夫			3103711
3102232	薄膜太陽電池およびその製造方法	佐藤 広喜			



*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。