

# タービンの予防保全技術

— 予防保全と耐力向上技術 —

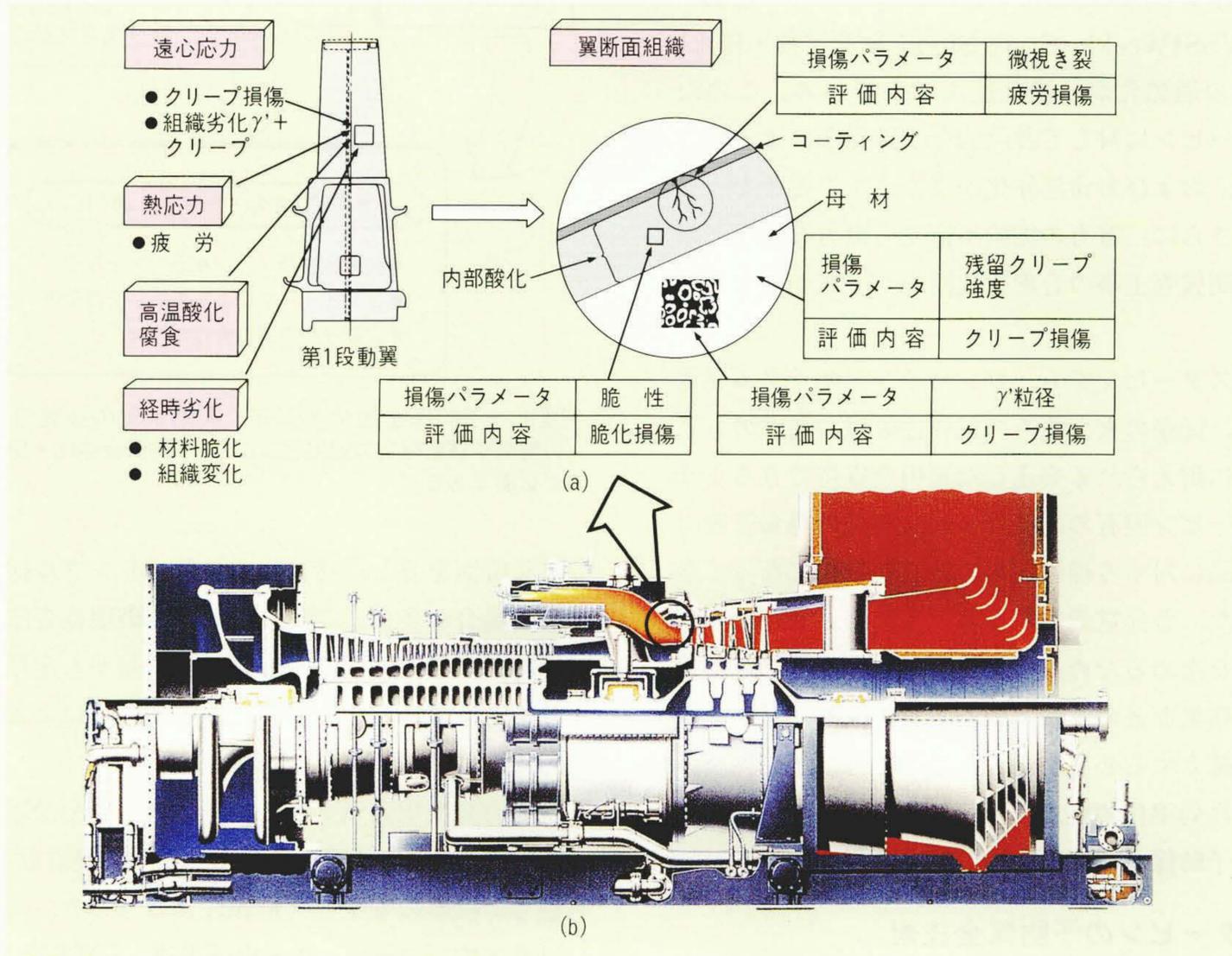
## Preventive Maintenance Technology for Turbine Components

丹 敏美\* *Toshimi Tan*

竹下豊男\* *Toyoo Takeshita*

熊田和彦\* *Kazuhiko Kumata*

桜井茂雄\*\* *Shigeo Sakurai*



ガスタービン高温ガス通路部品の余寿命診断 ガスタービンの余寿命診断法の一例としてタービン動翼の運転後の劣化状況要因図を(a)に示す。劣化状況と材料特性との比較により、余寿命時間を求めることができる。F7E型ガスタービンの断面図を(b)に示す。

蒸気タービンでは、経年火力設備の増加と電力需要の変化による運用の過酷化が進んでいる現状であり、これらの長寿命化の保守管理のためには、予防保全技術が重要な課題となっている。そのため日立製作所は、蒸気タービンの予防保全技術として、余寿命診断、耐力向上技術、コンピュータによる情報管理、定期検査工事での合理化技術など、予防保全強化・保守の高効率化に、総力を挙げて取り組んでいる。

一方、ガスタービンでは、近年、火力発電設備として、(1) 熱効率の高さ、(2) 起動・停止などの運用性

の良さ、(3) 建設期間が比較的短いことなどの優位性により、コンバインドサイクル発電設備への需要が高まり、今後ますます増加することが予想される。

この発電設備で主機となるガスタービンは、金属の融点を超える燃焼ガスを作動流体とするため、計画的な予防保全による耐力の維持向上が必要であり、日立製作所は(1) 余寿命診断に基づく部品の管理・運用技術の向上、(2) 部品の耐力向上・補修技術の向上、(3) 情報管理および定期検査合理化技術の確立を図っている。

\* 日立製作所 日立工場 \*\* 日立製作所 機械研究所 工学博士

## 1 はじめに

近年、火力設備では累積運転年数が15年を超えるタービン設備が70%以上に達するなど、経年設備が急速に増加してきている。一方、電力需要の変化、燃料の多様化などの事情により、DSS(Daily Start-Stop：毎日起動・停止)化、WSS(Weekly Start-Stop：毎週起動・停止)化など運用の過酷化が一段と進んできている。このため、経年タービンに対して計画的な予防保全による耐力の維持向上、および寿命延伸化がますます重要となってきた。さらに、電力の需給事情や労働力確保などの面から、定期検査工事の合理化技術のニーズが増大している。

一方、ガスタービンでも、コンバインドサイクル発電設備として、従来の火力並みの信頼性確保の要求のもと過酷な運転に耐えられる安定した運用を維持できるように、ガスタービン固有の高温ガス通路部品の寿命管理、経年劣化部品に対する補修技術の確立が重要になってきている。また、各発電設備個々の運用に合わせた計画的な予防保全を進めるためには、日常の保守点検、定期検査時の点検結果などの運転実績の蓄積を図り、最も効率的な運用を確立する必要がある。ここでは、予防保全強化・保守の高効率化の観点から蒸気タービンおよびガスタービンの予防保全技術について述べる。

## 2 蒸気タービンの予防保全技術

蒸気タービンでの予防保全の強化および取組みを図1に示す。主な内容は、(1) 余寿命診断に基づき、適切な時期に更新することによる設備の長寿命化、(2) 耐力向上技術を採用することによる信頼性確保、(3) コンピュータによる予防保全の管理、(4) 定期検査工事で合理化技術による工期短縮・省力化などである。

### 2.1 余寿命診断<sup>1)</sup>

余寿命診断は、定期検査時に非破壊検査などを行って余寿命を予測するものであり、特に、運転時間が10万時間を超えた経年火力設備の主要な機器を対象に実施される。

余寿命診断の利点は、診断結果に基づいて適切な時期に主要機器を更新することにより、設備の長寿命化が図れること、または定期検査インターバルが延長できることである。

診断の方法には、非破壊検査法、解析法および破壊検査法がある。解析法と破壊検査法(サンプル採取)は評価

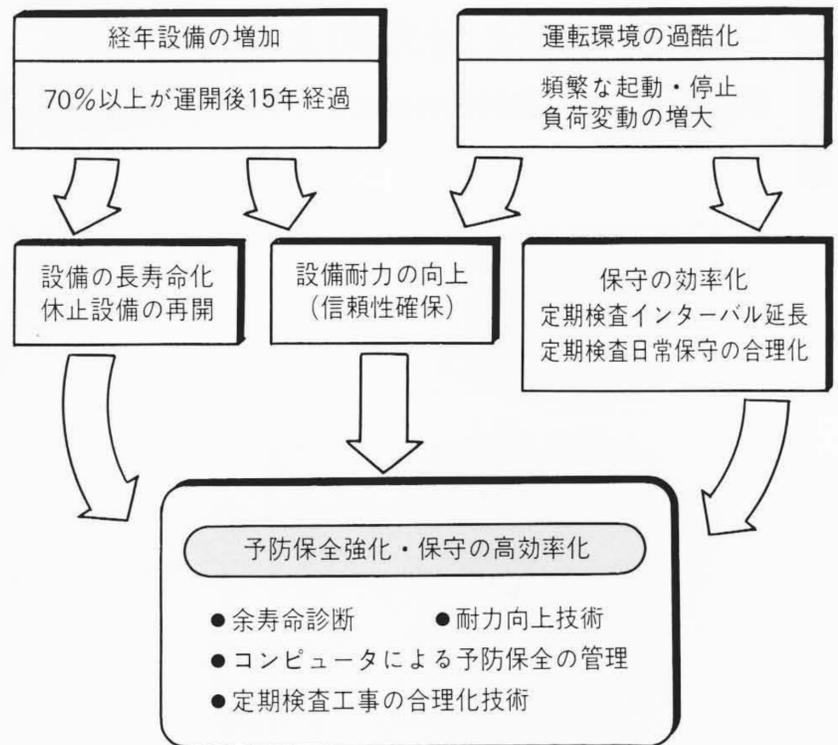


図1 予防保全強化・保守の高効率化の必要性 経年設備の増加や運転環境の過酷化により、予防保全強化・保守の高効率化が必要である。

に長時間を要し、特に後者では、サンプル採取が困難である場合が多い。これに対して非破壊検査法は、比較的短時間に多くの個所が診断でき、しかも定期的なモニタリングもできることから、非破壊検査による診断を主体的に進めてきている。

火力発電用蒸気タービン本体の余寿命診断は、昭和59年から実施し、プラント数で約90件、機器数で約460台に達し、機器の安全性・信頼性に寄与している。主要機器は高・中圧ロータ、高・中圧車室、主要弁などである。非破壊検査による余寿命診断技術の例を表1に示す。高・中圧ロータでは、中心孔余寿命診断装置を開発した。

### 2.2 耐力向上技術

蒸気タービンの主要耐力向上技術を表2に示す。これらの技術は、信頼性向上、運用変化対応、効率向上および寿命延伸化を目的に開発したものである。

表1 非破壊検査による余寿命診断技術 各損傷形態での余寿命診断技術の例を示す。

手法	損傷形態				備考
	クリープ	疲労	脆化	その他	
電気抵抗法	◎	—	—	—	—
硬さ測定法	◎	—	—	—	—
組織観察法	○	—	—	—	レプリカ
微視き裂測定法	—	◎	—	—	レプリカ
エッチ法	—	—	◎	—	レプリカ
微小パンチ法	—	—	○	—	準非破壊

注：◎(実用化済み)、○(研究開発済み)

表2 蒸気タービンの耐力向上技術 信頼性向上, 運用変化対応, 効率向上および寿命延伸化の目的で, 各種の技術を開発している。

対象部位	適用新技術	信頼性向上	運用変化対応	効率向上	寿命延伸化
1. ロータ	(1) 低Siロータ材の採用 (2) ディスクコーナR加工(スキムカット)	○ ○	○ ○	— —	○ ○
2. 動翼	(1) 埋込テノン (2) 新型最終段翼の採用(23インチ, 26インチ, 40インチ) (3) 高性能動翼の採用	○ ○ —	○ ○ —	— ○ ○	○ ○ ○
3. 高・中圧車室	(1) コーナR拡大 (2) 鍛造フランジ(主蒸気入口管)の採用 (3) 脆化回復処理 (4) 高靱性ケーシング材の採用 (5) スタッドボルトのスルーボルト化	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ — ○ —	— — — — —	○ ○ ○ ○ ○
4. ノズルダイヤフラム	(1) 耐エロージョンノズル(Crバックノズル)の採用 (2) ノズルボックス上下反転構造の採用 (3) 90°型ノズルボックスの180°型化改造 (4) 高性能ノズルの採用	○ ○ ○ —	○ ○ ○ —	○ ○ — ○	— ○ ○ ○
5. 軸受	テイルティンパット軸受の採用	○	○	—	○
6. 主要弁	(1) 鍛造弁の採用 (2) 高靱性ケーシング材の採用 (3) 多弁型主蒸気止め弁の採用 (4) 低振動型加減弁の採用	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	— — — —	○ ○ ○ ○
7. 制御装置	(1) 2シフトガバーニングの採用 (2) コンバインドガバーニングの採用 (3) 電子油圧ガバナの採用	○ ○ ○	— ○ ○	○ — —	— ○ —

ロータではクリープ強度の向上した低Siロータ材や経年曲りを防止した製造法を, 車室では主蒸気入口管の鍛造フランジ化, 高靱性材などをそれぞれ採用している。

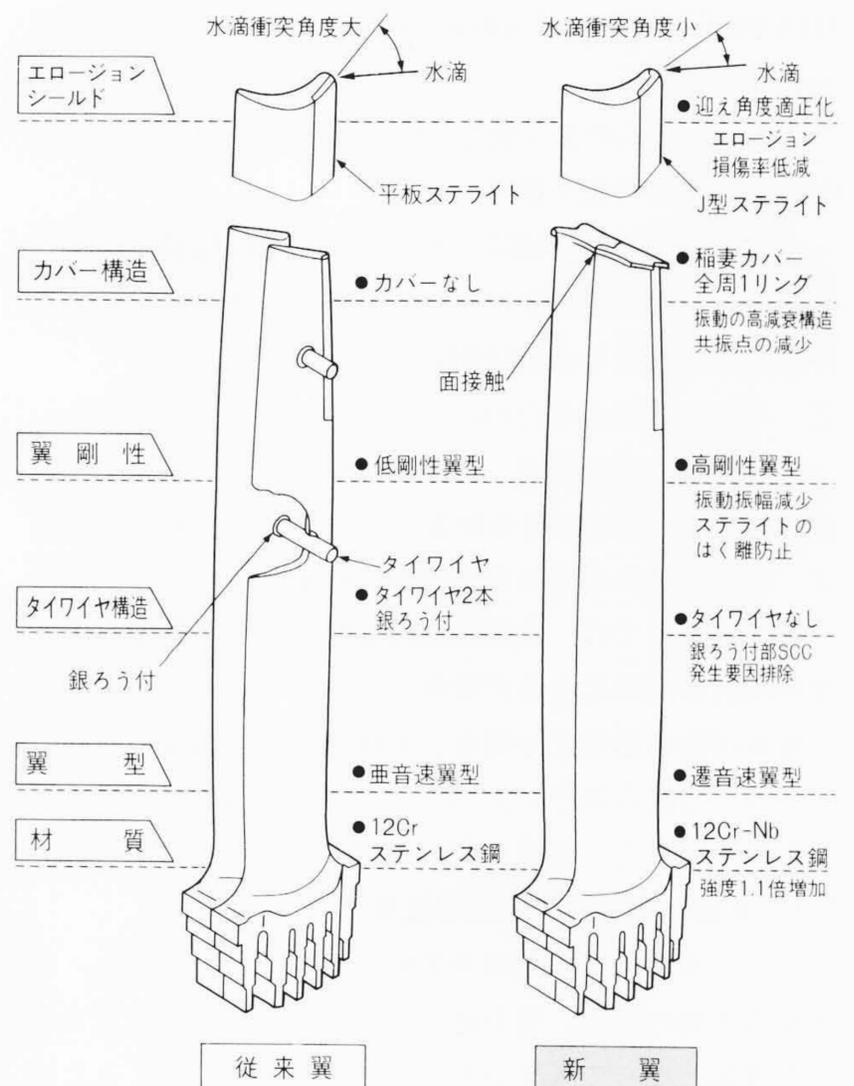
酸化スケールなどの固体粒子によるエロージョン防止対策として, 動翼の埋込テノン, Crバックノズル翼, ノズルボックス上下反転構造や多弁型主蒸気止め弁を採用している。

主要弁では高靱性材の鍛造弁, 低振動型加減弁を, 制御装置では電子油圧ガバナなどを採用し, いずれも有効な結果を得て, 信頼性に大きく寄与している。

新型長翼では, 16.6インチ動翼(60 Hz, L-1翼), 23インチ最終段動翼(50 Hz, 60 Hz), 26インチ最終段動翼(50 Hz, 60 Hz), 40インチ最終段動翼(50 Hz, 60 Hz—チタン翼)を実用化している。新型長翼の開発では, 実機と同一のモデルロータを製作し, 新型長翼を組み立て, 回転試験で翼の振動特性などの健全性を確認している。

60 Hz用26インチ最終段動翼での従来翼と新翼の形状を図2に示す。新翼は, 従来翼と比べて次のような特長を持っている。

- (1) 最適遷音速翼型(効率向上)
- (2) 翼と一体削り出しのS形カバー(高減衰構造)
- (3) タイワイヤの廃止(効率・信頼性向上)
- (4) 最適水滴衝突角度(エロージョン損傷率低減)



注: 略語説明 SCC (応力腐食割れ)

図2 新26インチ翼(60 Hz用)の特長 新26インチ翼は, 効率向上と信頼性向上を目指した長翼である。

顧客名		発電所名		号機		タービン 予防保全及び改善御推奨一覧表											
出力						運転開始日		前回点検		次回点検		定検区分		定検区分		定検区分	
3600/0 RPM						1972年 4月		1989年 9月 8日		1989年 11月 2日		1989年 9月 8日		1989年 11月 2日		1989年 9月 8日	
型式						燃焼運転時間		起動停止回数		次回点検		定検区分		定検区分		定検区分	
IC4F26						123497時間 (1989年12月現在)		344 回 (1989年12月現在)		1990年10月17日		1990年12月20日		1990年10月17日		1990年12月20日	
通番	目的	大分類	小分類	品名	件名	推奨ランク	技術説明書 ナンバ 見出番号	周 期 年	納 期 月	場 所	工 期 日	右 記 前 状 況	実 施 推 奨 (下段は運転開				
													90	91	92	93	94
001	B	C		タイヤブラム	IP8Sタイヤブラムラジアルスビルストリ ップ基準径面の修理推奨	A		2	8	現地		○	○	○	○	○	
002	B	B		車室	高圧内車室ボルト3本(NO. 69, 70, 73)新替推奨	A		2	2	現地		◆	○	○	○	○	
003	B	C		動翼	A, B低圧ロータ最終段ワイヤ補修 推奨; 次回定検時グラオア, 再銀ロー実施	A		2		現地	20	○	○	○	○	○	
004	B	D		動翼	L PロータL-0銀ロー付部P工結果 精密点検実施	A		2		現地	2	○	○	○	○	○	
011	B	D		ロータ	低圧ロータ低速・高運動的約合試験	C	IBA-75-017	8		工場			○	○	○	○	
012	B	D		ロータ	カップリングインロー部検査	C		8		現地			○	○	○	○	
013	B	C		ロータ	カップリングボルトカバー形状改善	C				現地		◆	○	○	○	○	
014	B	E		ロータ	カップリングボルト検査	C		4		現地			○	○	○	○	
015	B	C		ロータ	カップリングボルト芯ずれ対策	C				現地		◆	○	○	○	○	
016	B	E		動翼	L-0ワイヤ及び取付部検査(銀ロー 付式)	C		2		現地			○	○	○	○	

目的 (大分類)

A: 延命化対策  
B: 信頼性向上  
C: 運用及び操作性の改善  
D: 省エネルギー

(小分類)

A: 寿命診断 E: 一般点検  
B: 取替  
C: 改造・改善  
D: 精密点検

推奨ランク

A: 最優先で実施  
B: 優先して実施  
C: 時間をみて実施

定検区分

A: 簡易定検  
B: 適本指定検  
C: 本指定検

実施区分

○: 実施推奨  
◆: 実施  
▼: 一部実施

実施計画

有: 有り  
無: 無し  
検: 検封中

図3 推奨項目一覧表の出力例 件名(推奨項目)ごとに推奨ランク・実施時期が表示され、顧客の実施選択の目安となっている。

### 2.3 火力総合予防保全システム<sup>2)</sup>

火力設備は数も多く、各種の記録や情報も膨大な量に上っている。そこで、ペーパーレス、省力化を目的としたコンピュータによる予防保全管理を実施している。このシステムを「火力総合予防保全システム」“New-HIAMPS” (Hitachi Advanced Maintenance Planning System) と言う。

このシステムの主な機能とねらいは次のとおりである。

#### (1) 予防保全の先手管理

点検・補修記録や故障・事故記録、運転稼動状況などを基に、余寿命診断などを行って事故未然防止のための寿命管理の強化と点検時期の最適化を図る。

#### (2) 事故未然防止のための予防保全対策

設計仕様、運転情報、点検履歴情報などに基づく類似設備の検索と共通不具合対策の水平展開や迅速化を図る。

#### (3) 保守計画の立案と点検推奨の提案

定期検査時での、次回定期検査作業内容・懸案事項・改善項目の抽出による点検推奨一覧表の発行と、顧客への提案活動の迅速化を図る。具体的な例を図3に示す。

一方、これらのデータベースや各種情報は、今後の新設計機に反映し、技術の向上を図っている。

### 2.4 定期検査工事の合理化技術

近年、電力の需給事情や労働力確保などの面から、定期検査工期の短縮、省力化の必要性は、今後ますます重要な課題となってきている。このニーズにこたえるために、日立製作所および日立グループが現在、技術の実用化を図っている主な装置は、(1)タービン翼車間隙(げき)自動計測装置、(2)カップリングボルト自動締め付け装

置、(3)多点振れ自動計測装置、(4)ボルト伸び計測装置である。

定期検査時、タービン停止後の冷却期間を短縮することも重要であり、一例として、蒸気タービン強制冷却装置の概要を図4に示す。高圧タービンは低温再熱側から、また中・低圧タービンは低圧タービン排気側からそれぞれ冷却空気を導入する。タービン内部で徐々に昇温した空気を、高圧タービン入口部および中圧タービン入口部から排出することにより、タービン本体に過度の熱応力をかけることなく、最適な冷却が行える。冷却空気の導入は、強制冷却装置の真空ポンプによって行う。この装置により、ロータのターニング時間の短縮が図れる。

### 3 ガスタービンの予防保全技術

ガスタービンでの予防保全の強化および取組みを図5に示す。主な内容は、(1)余寿命診断に基づく部品の寿命管理および管理と運用技術の向上、(2)補修技術向上による信頼性確保などである。

#### 3.1 寿命管理・運用技術

ガスタービンの高温ガス通路部に使用される部品は、高温・高応力の特に厳しい条件下で運転されるため、経年劣化度を把握し、計画的な補修あるいは予備品との交換が信頼性確保の上で必要となる。

##### (1) 経年劣化に影響する要素

ガスタービンは開放サイクルであるため、使用燃料、大気の状態などがその劣化の進行程度に大きく影響する。

経年劣化に影響する要素と予防保全措置を表3に示す。

##### (2) 余寿命診断

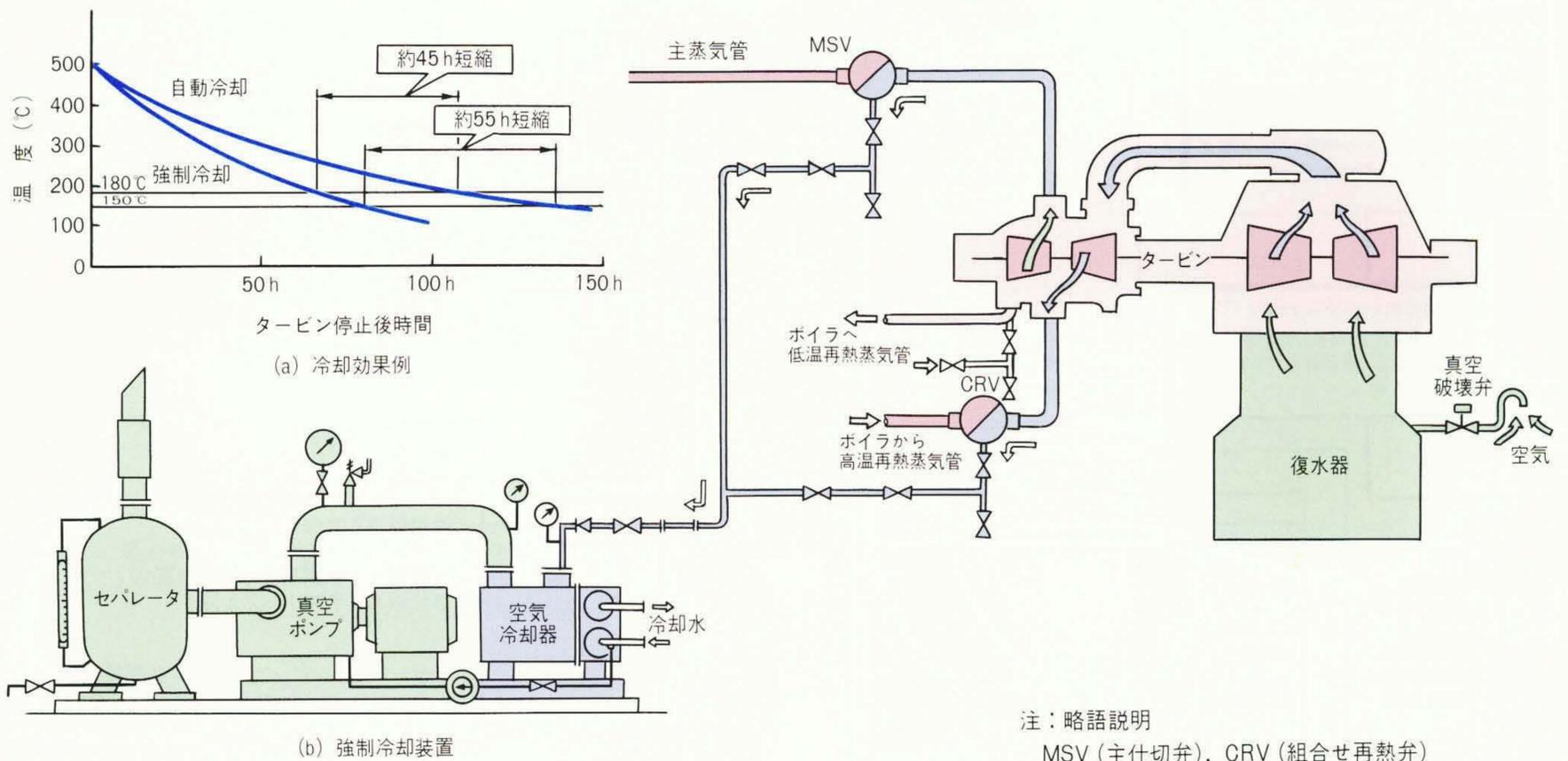


図4 蒸気タービン強制冷却装置 タービン冷却を強制的に行うことで、ロータのターニング時間の短縮が図れる。

高温ガス通路部に使用される部品の余寿命診断手法を図6に示す。この手法は、運転条件、材料データ特性をもとに、定期検査時の実機使用材料データ特性から余寿命を予測するものである。この診断結果に基づき次回定期検査時の補修また取り替え計画を精度よく行うことが可能となる。余寿命診断の方法は、前述の蒸気タービンの個所で説明した方法を同様に使用することができる。

(3) 補修・取り替え計画

ガスタービンの高温ガス通路部に使用される部品は、運用管理の面から表4に示すように分類管理される。

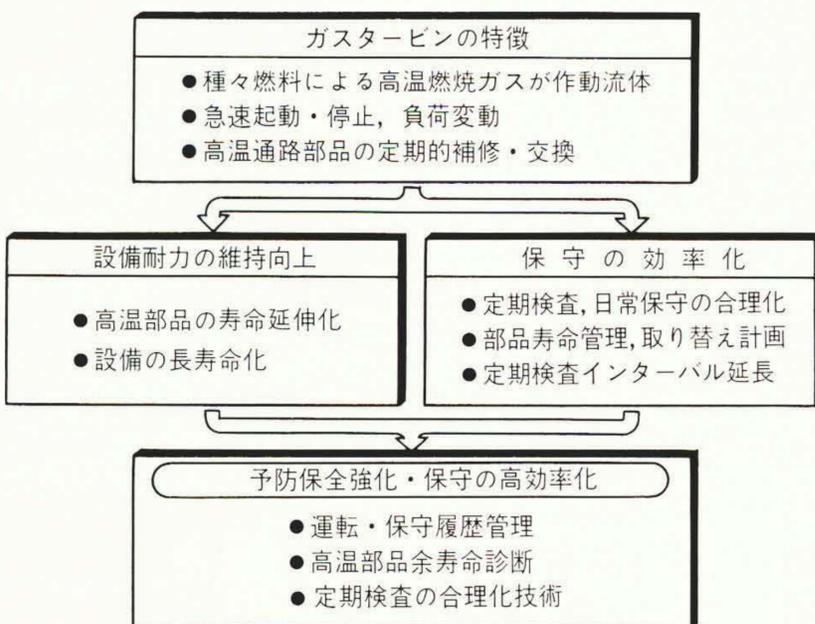


図5 ガスタービン発電設備の予防保全強化 運転条件に合わせた個々の発電設備の予防保全強化, 保守の高効率化が必要である。

これらの部品は寿命時間に対する管理を行い、複数ユニットのある発電設備では、各ユニット間で補修した部品をローテーションしながら最も効率よく運用し、寿命時間に達した時点で廃却する運用が可能となる。

3.2 補修技術

高温ガス通路部品は、その作動環境によって高温の酸化、腐食、高温・高応力下でのクリープ損傷、材料組織変化、熱サイクルによる低サイクル疲労、振動などによる高サイクル疲労など、さまざまな経年劣化を示す。高温ガス通路部品の経年劣化とその内容を図7に示す。

このように、ガスタービン高温ガス通路部品の劣化形態は多岐にわたり、これらの劣化傾向を事前に把握するためにも、定期検査時の点検調査、部品の取り替えなど適切な予防保全措置を講じ、機器の耐力維持、向上を図る必要がある。

表3 経年劣化に影響する要素 ガスタービン部品の経年劣化に影響する各要素に対し、寿命延伸化を目的に予防保全措置が必要となる。

経年劣化に影響する要因	予防保全措置
環境 (じんあい, 微量金属元素)	空気取り入れ室フィルタシステムの選定
使用燃料	微量金属元素, 水分, じんあいの除去
運転モード	起動・停止時の熱負荷緩和制御の採用
運転条件 (燃焼温度, 振動など)	(1) 高温部に対する耐熱合金, 各コーティングの採用 (2) 燃焼器耐摩耗, 耐変形構造の採用

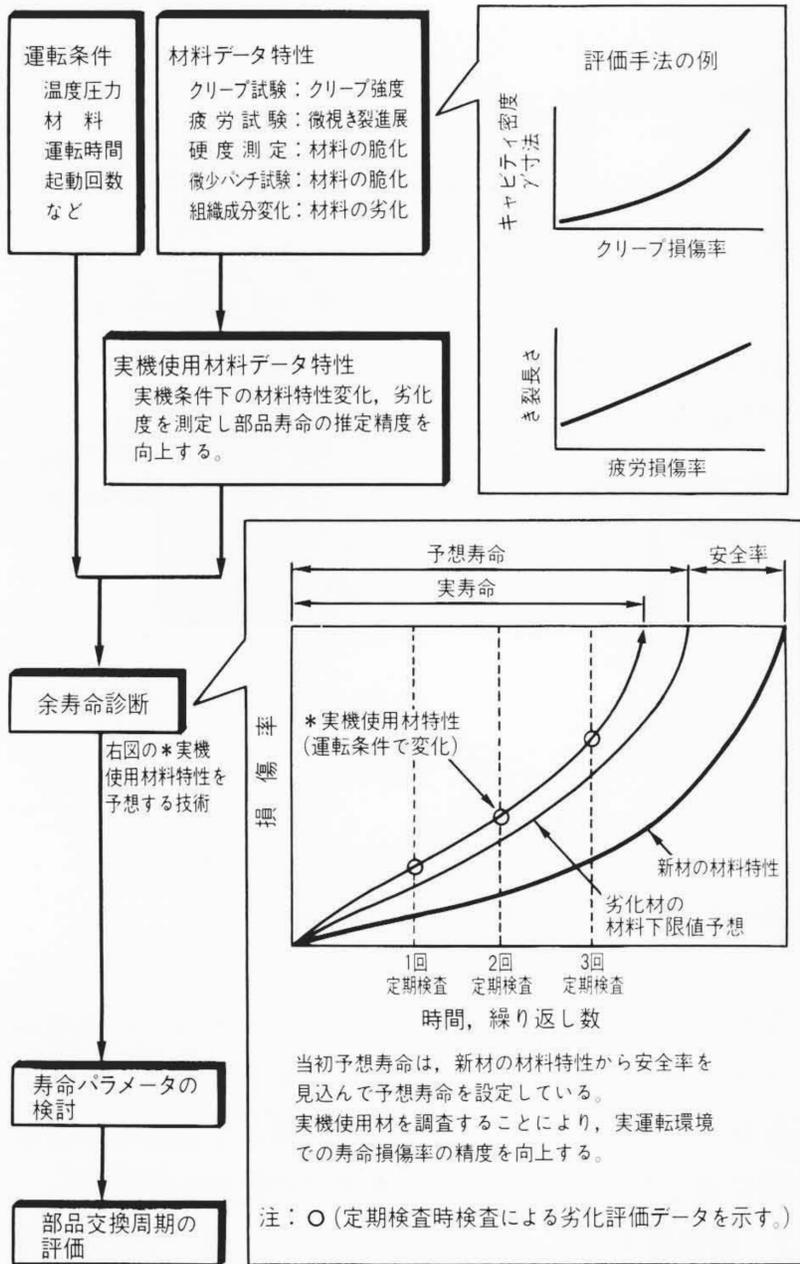


図6 ガスタービン部品の余寿命診断手法 各発電設備の運転条件に合わせた余寿命診断、部品の管理、運用が必要となる。

表4 高温ガス通路部品の管理上の分類 各部品ごとに、交換および補修が分類される。

分類	対象部品
定期検査時に定期的に交換する必要がある部品	燃焼器
回転体部品で、基本的には補修を行わず設計寿命時間に近づいたら交換する部品	タービン動翼
運転時間の経過とともに発生するき裂、変形、摩耗、腐食などで溶接補修しながら使用する部品	タービン静翼 トランジションピース

特に、寿命時間に至るまでの途中段階で補修を繰り返しながら運用することになるため、各部品について損傷状態がどのようになれば補修を必要とするかの基準を設

参考文献

1) 丹, 外: タービンの予防保全技術, 日立評論, 72, 8, 725~732(平2-8)

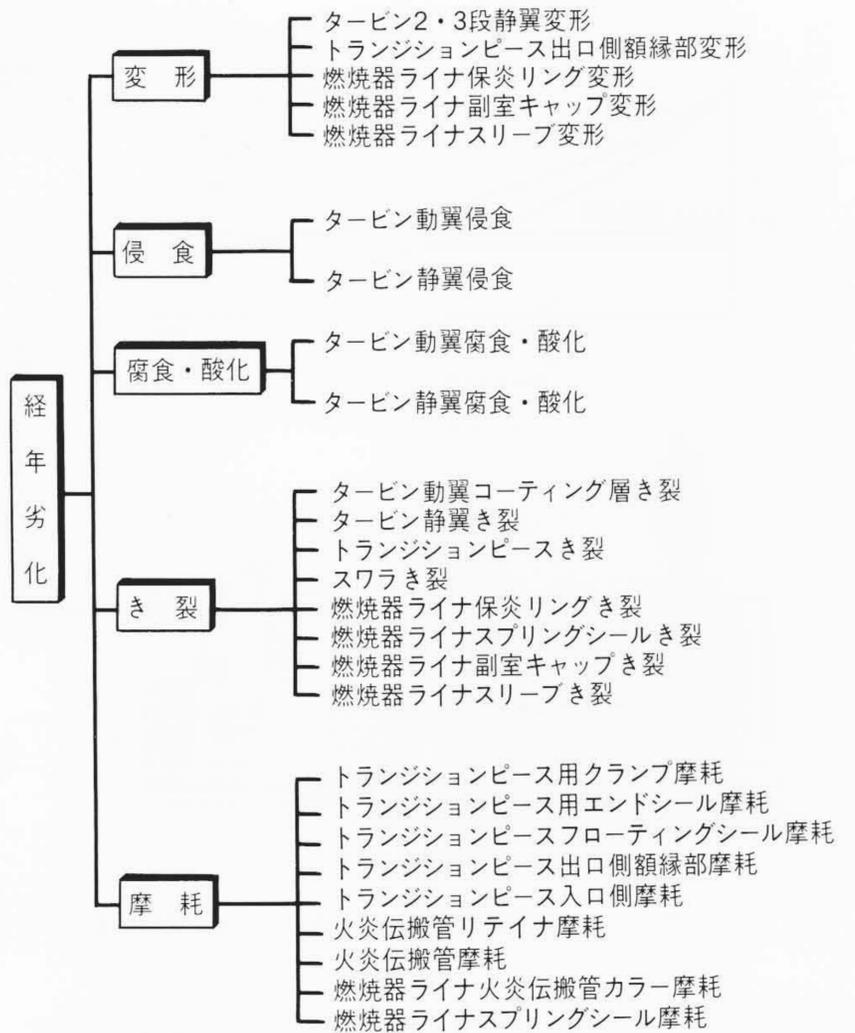


図7 高温ガス通路部品の経年劣化とその内容 経年劣化の形態は多岐にわたり、信頼性確保のためには部品の取り替えを含めた適切な予防保全計画が必要である。

けておくことは予防保全の見地から必要なことである。この基準に基づいて補修を行った場合、いかに元の状態に近く回復させることができるかも寿命延伸、信頼性確保の上で重要なことである。

4 おわりに

蒸気タービン設備の余寿命診断、耐力向上技術、火力総合予防保全システムおよび合理化技術について述べた。

また、ガスタービンについては、予防保全上の特徴および信頼性確保のための余寿命診断に基づく部品の管理について述べた。

タービンの予防保全技術は、社会情勢や環境状況により、ニーズがさまざまに変化していくものと思われる。顧客ニーズの把握と信頼性の向上に、今後とも予防保全を進めていく考えである。