

# 信頼性確保と長寿命化を目指す ガスタービンの予防保全技術

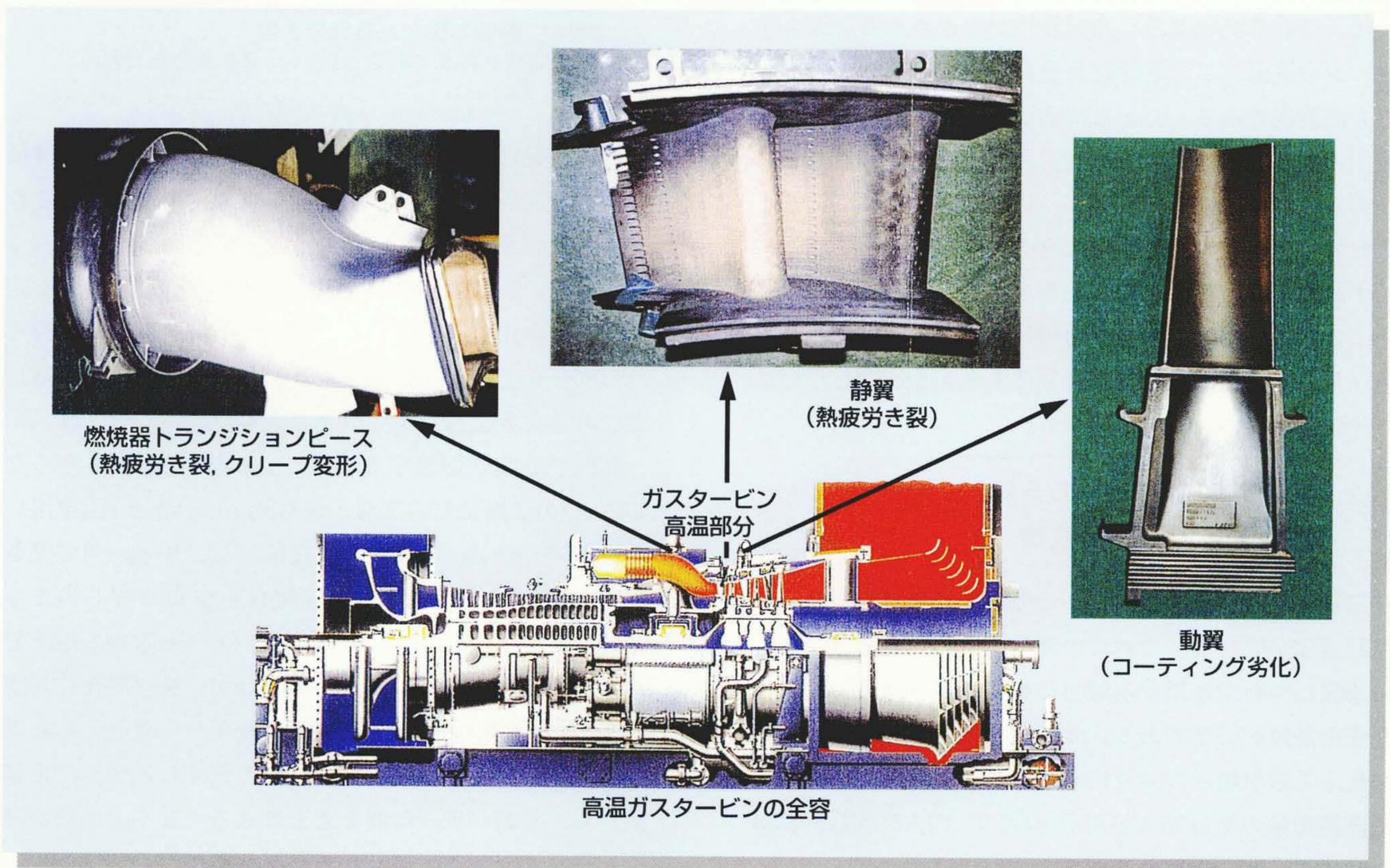
Preventive Maintenance Technology to Improve Reliability  
and Life Extension of High-Temperature Gas Turbines

桜井茂雄\* Shigeo Sakurai

笹田哲男\*\* Tetsuo Sasada

熊田和彦\*\* Kazuhiko Kumada

福井 寛\*\*\* Hiroshi Fukui



## ガスタービンの高温部品の主な損傷

高温ガスの通路にある部品は負荷条件が厳しく、その信頼性確保と長寿命化のためには余寿命評価が必要である。

コンバインド発電設備は、熱効率の高さと優れた起動特性からその需要が増加している。その主機であるガスタービンでは、高温化とともに運用の過酷化が進んでいる。高温部品では、劣化・損傷が蒸気タービンなどの従来の火力機器に比べて早期に現われることが多い。これに伴い、発電設備の信頼性確保と安定運用にはガスタービンの適正な予防保全が従来にも増して重要となっている。

そのため日立製作所は、ガスタービンの信頼性向上と運用費の低減を目的として、高温部品予防保全のための余寿命評価技術や寿命管理システムを開発している。

ガスタービンの高温部品である燃焼器、静翼、動翼に対して、実機の劣化・損傷の詳細な調査を基に各部品の余寿命を評価する技術を開発した。これは、部品損傷メカニズムの解明とその的確な損傷要因の限定により、検査期間の短縮も考慮している。開発技術による実機の寿命診断では、定期検査結果を合理的に説明できることを確認している。

これらの余寿命評価に基づく適正な検査や、補修時期を提案する寿命管理システムの開発により、ガスタービンの信頼性向上と長寿命化の実現を図っている。

\*日立製作所 機械研究所 工学博士 \*\*日立製作所 日立工場 \*\*\*日立製作所 日立研究所 工学博士

## 1. はじめに

コンバインド発電設備は、熱効率の高さと優れた起動特性からその需要が増加している。このコンバインド発電設備の主機であるガスタービンには高効率化が要求され、タービン入口ガス温度は年々上昇してきている。これに伴い、高温部品である燃焼器や動・静翼の負荷条件はますます過酷になっている。安定した設備運用のためには、これら高温部品に高信頼性が要求される。ガスタービンの高温部品は耐熱超合金を用いているので、高温でも高強度である。しかし、高温・長時間負荷や起動・停止の繰り返しによって材質劣化や損傷が生じるおそれがある<sup>1)</sup>。したがって、ガスタービンを高信頼性で運転するためには、これらの高温部材の劣化損傷を的確に把握して設備の保全管理を行う必要がある。

ここでは、ガスタービンの信頼性向上と長寿命化の観点から、高温部品の余寿命評価技術と寿命管理についての予防保全技術について述べる。

## 2. 高温ガスタービンの予防保全と余寿命評価技術

高温部品の劣化・損傷は、設備の運転条件によっても進行速度が異なる。これらの運転条件に対応して、個々の設備について運用費削減と信頼性確保を考慮した最適な保全計画が必要である。ガスタービンでの予防保全の強化とその取組みの主な内容<sup>2)</sup>は、(1) 余寿命評価に基づく高温部品の寿命管理と運用管理、および(2) 補修や構造改良による長寿命化などである。

この章では、高温部品の余寿命評価技術について述べる。

### 2.1 静翼のき裂成長予測による余寿命評価

第一段静翼は燃焼器からの燃焼ガスに最初にさらされる部位であり、高温部品で最も過酷な負荷条件下となる。第一段静翼のき裂の発生状況を図1に示す。起動・停止の繰り返し数と観察された最大き裂長さ、およびき裂の密度(発生したき裂長さの総和を面積で除したもの)の関係を定期検査から求めた結果を図2に示す。静翼の主な損傷は、起動・停止に伴う熱応力の繰り返しによって生じる熱疲労き裂と考えられる。このき裂の成長予測を強度上重要な翼部の肉厚方向について行うこととした。余寿命評価の基準として、従来はき裂の総和が採用されてきた。しかし、構造信頼性や検査時間短縮の観点から、ここでは最大き裂に基づく方法を提案する。



図1 静翼に生じた熱疲労き裂  
熱疲労き裂は、表面では長く、深さ方向では浅い。

このき裂に対しては、破壊力学と応力分布の簡易評価によって成長予測手法を開発している。実機で観察された最大き裂深さと、き裂成長予測結果を図3に示す。ここで横軸の値は、翼部でき裂が貫通した時点を寿命と定義した寿命比で表している。予測結果は、実機から得られたデータとよく一致している。このように余寿命は、表面の最大き裂長さから予測できる。

高温で長期間使用することによる材料劣化(もろくなること)の診断に対しては、SP(Small Punch)法を用いている。SP法は、実翼から直接採取した10 mm角で厚さ0.5 mmの薄肉試験片を用い、硬球を中央に押し当ててその荷重-変位曲線から破壊エネルギーを求める手法である。このSP破壊エネルギーの低下は、材料劣化に対応する。静翼表面材料のSP破壊エネルギーの運転時間に伴う変化の関係をき裂密度とあわせて図4に示す。この結果から、材料が使用時間とともにもろくなり、き裂が発生しやすくなることがわかる。

### 2.2 動翼コーティングの劣化診断

動翼は回転体の一部であり、高い信頼性が要求されて

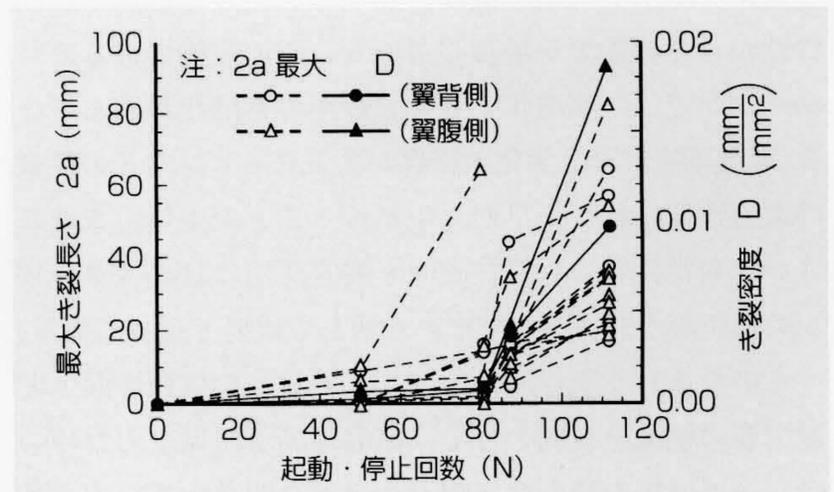


図2 起動・停止回数と静翼におけるき裂長さの関係  
き裂の最大長さを損傷の指標とすることによって静翼の余寿命が推定できる。

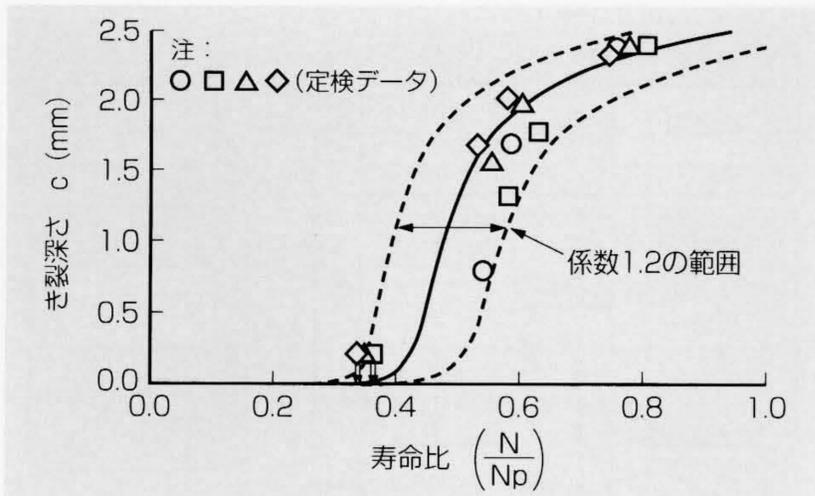


図3 き裂深さと寿命比(貫通寿命 $N_p$ と起動・停止回数 $N$ の比)との関係

これから、き裂長さを基に余寿命がわかる。き裂成長の予測精度は±20%である。

き裂を許容することができない。このため、動翼ではコーティングのき裂発生抵抗評価が重要である。このき裂発生抵抗を評価する方法として、前述のSP法を用いた。動翼コーティング層の厚さは200~300 μmと薄いため、SP法が好適である。室温から高温までのSP試験を行い、種々のコーティング材のDBTT(延性脆性遷移温度)を求めた。このDBTTの上昇は、き裂発生抵抗の低下に対応している。

このDBTTと室温でのSP破断延性との関係を求めた

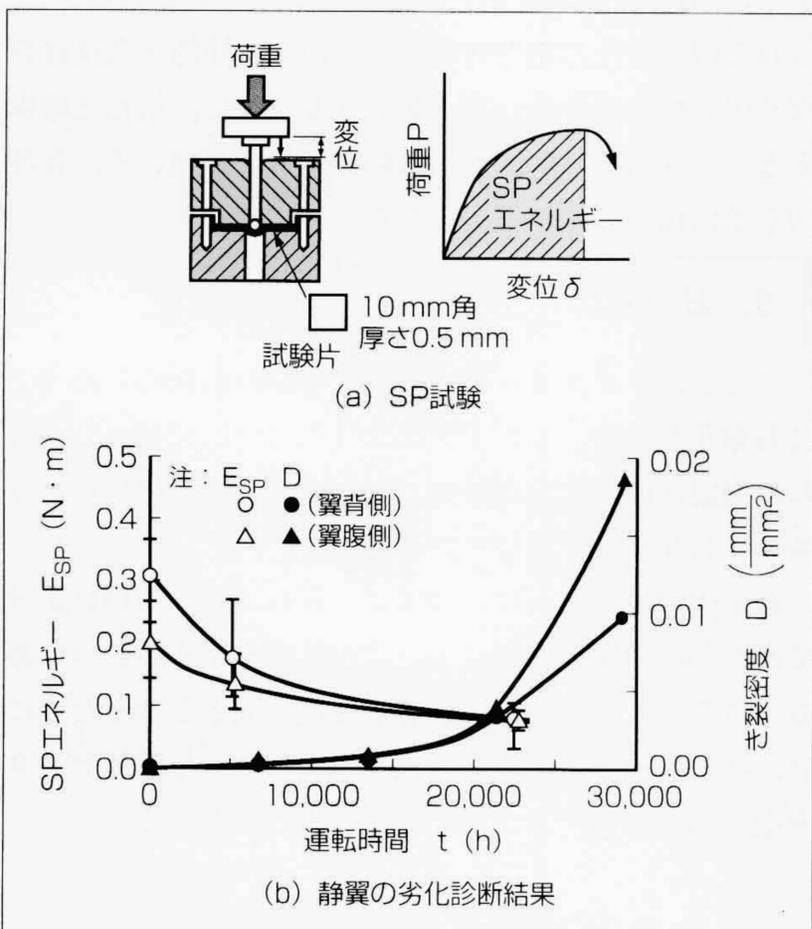


図4 SP試験(a)と静翼の劣化診断結果(b)

SPエネルギーの低下は材料の脆化を意味する。SPエネルギー低下とともにき裂発生量が多くなる。

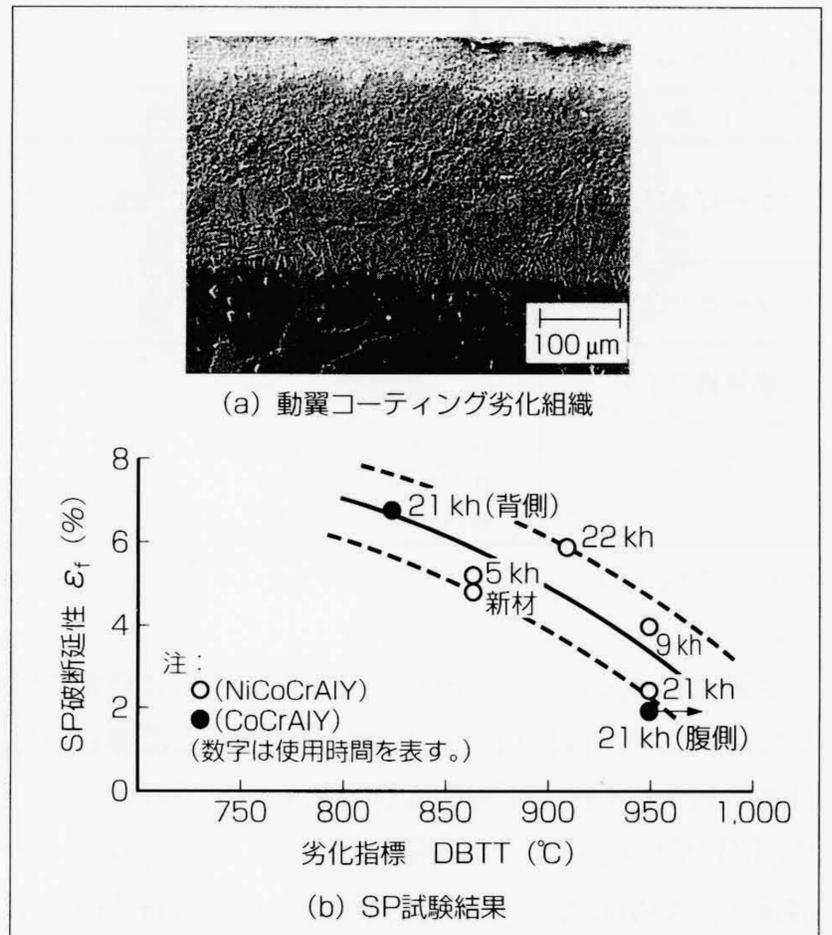


図5 動翼コーティング劣化組織(a)とSP試験結果(b)

コーティング劣化は界面に針状析出物が生じて起こる。この劣化はSP法で診断できる。

結果を図5に示す。室温でのSP試験結果から、長期使用されたコーティング材のDBTTが評価できる。これにより、動翼コーティングの劣化を診断できる。コーティングの劣化メカニズムについては、母材界面での元素挙動を詳細に調査し、窒化物の析出やσ相生成に関連することを明らかにしている。

### 2.3 燃焼器の材料劣化と熱疲労寿命評価

燃焼器については、材料劣化と熱疲労寿命に対する評価技術を開発している。材料劣化では、動翼材と同様に構成材料の組織変化を定量的に予測できる速度式を提案している。

一方、熱疲労では、寿命初期に発生する分布微小き裂の最大長さと寿命比の関係を求め、余寿命評価ができることを確認している。この熱疲労寿命評価技術は、蒸気タービンで多くの適用実績を持つ。

## 3. 高温ガスタービンの長寿命化技術

### 3.1 高温部品の補修技術

ガスタービンの高温部品は使用環境が厳しいため、さまざまな損傷を受ける。これらの損傷が定期検査時に許容値を越えた場合には、部品の長寿命化のため補修を施す。高温部品に対する代表的な補修内容を表1に示す。

表1 高温部品の補修方法

部品の劣化・損傷に応じて補修法を選択している。

部品名	補修内容
タービン静翼	<ul style="list-style-type: none"> <li>●き裂補修 : 溶接(肉盛り)                   : ろう付・拡散接合</li> <li>●再コーティング</li> </ul>
タービン動翼	<ul style="list-style-type: none"> <li>●先端・シールフィン部肉盛り</li> <li>●再コーティング</li> </ul>
燃焼器ライナ	<ul style="list-style-type: none"> <li>●き裂補修 : 溶接</li> <li>●再コーティング</li> </ul>
トランジションピース	<ul style="list-style-type: none"> <li>●き裂・摩耗補修: 溶接</li> <li>●クリープ変形修正</li> <li>●再コーティング</li> </ul>

き裂の補修には洗浄、溶接、熱処理、さらに必要に応じて回復処理、機械加工などが施される。高温部品の材料は、いずれも硬くて複雑な析出物で強化されているため、溶接補修には高度な技術が必要である。このために、溶接ワイヤの開発、ろう付・拡散接合などの新技術の開発を進めている。

一方、耐食性・耐熱性を向上させて長寿命化を図るために、高温部品の表面にはコーティングを施している。このはく離や損傷に対しては、全面を脱コーティングした後で再コーティングを行っている。

### 3.2 高温部品の長寿命化構造

ガスタービンの長期運転の実績と定検データの蓄積により、各設備の運用に応じた損傷・劣化形態が明らかになりつつある。これらに基づいて、そのメカニズムを解明し、長寿命化を図った構造改良を逆問題的に検討している。

例えば、静翼でき裂の多く発生する部位では、熱応力が大きい。このき裂の成長を抑制するには、その部位の発生応力を低減する分割構造や冷却強化の検討を行っている。定検時に現れた不具合の兆候に対しても、余寿命評価に基づいて構造や補修の適正化を行い、長寿命化を進めている。

## 4. ガスタービンの高温部品の寿命管理システム

高温部品の寿命は、負荷条件すなわち設備の運用条件と材料強度によって決まる。実際の各機器の余寿命を予

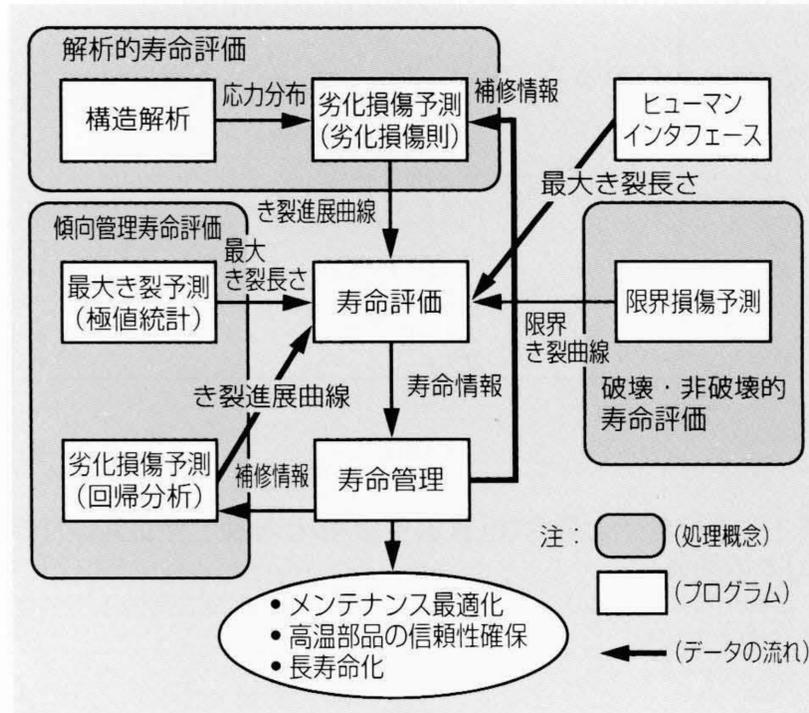


図6 ガスタービンの高温部品の寿命管理システム

解析的、破壊・非破壊的、傾向管理寿命評価によって総合的に寿命管理を行い、信頼性確保と長寿命化を図っている。

測して設備の予防保全を行えば、適正な補修間隔、定検間隔の合理化や運用費の削減を図ることができる。このための寿命管理システムの構成を図6に示す。

高温部品の余寿命評価には、き裂などの損傷の成長と長時間使用による材料劣化を評価する必要がある。このために、解析的、破壊・非破壊的、傾向管理寿命評価により、総合的な高温部品の状態診断を行うことができる。これらの各部品の余寿命評価結果から、補修・交換計画などの寿命管理を行うことができる。また、信頼性確保とともに運用費の削減や部品の長寿命化が図れる、合理的な予防保全計画が提案できる。

## 5. おわりに

ここでは、ガスタービンの高温部品の信頼性の維持と長寿命化を目的とした予防保全技術について述べた。特に、高温部品の余寿命評価については、部品の損傷メカニズムに基づく手法について述べた。

わが国のガスタービン設備は、運転実績の蓄積によって高温部品の保全管理についての技術が確立されつつある。さらに、設備の経済性と信頼性を向上させるためには、ユーザーとメーカーの相互協力によって実機データを継続的に蓄積することが必要であると考えられる。

### 参考文献

- 1) 桜井, 外: 経年劣化CrMoV鋼平滑材における微小き裂の発生と成長挙動, 機械学会論文集, 53-487, A 332(昭62)
- 2) 丹, 外: タービンの予防保全技術, 日立評論, 75, 12, 801~806(平5-12)