

## 火力発電設備の材料関連研究

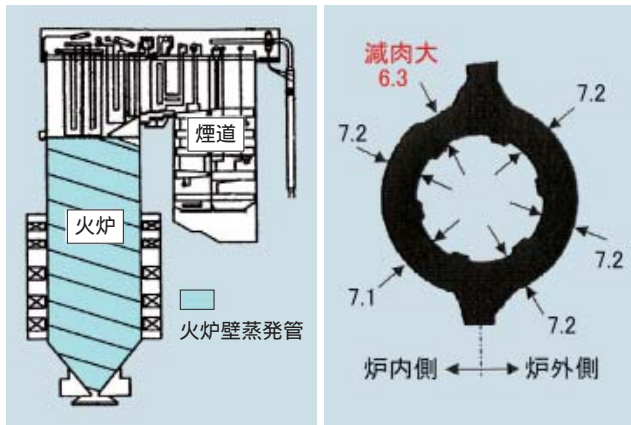
当社の総発電電力量の約67%を担う火力発電設備は、これまで大容量化・高効率化が追求され、それに伴って機器・配管等に使用されている材料もより高温強度に優れた新しいものが採用されてきました。機器を故障させることなく最適な点検・修理を行ない信頼性の確保とコストダウンを両立させるためには、これら材料に関する、寿命評価・特性回復・検査手法に関する研究が大変重要となっています。本特集では最新の火力設備の材料関連研究について紹介します。

### ボイラ設備

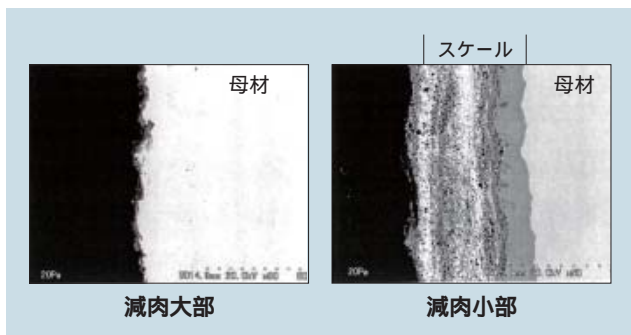
#### 1 石炭ボイラのアッシュエロージョン対策に関する研究

当社は、石炭を燃料とするボイラと蒸気タービンからなる従来型発電設備として、国内最大の碧南火力発電所1~5号機を有しています。

これら石炭火力ボイラでは、経年化に伴い各部の減肉現象が問題となります。(第1、2図)中でも火炉を構成する火炉壁蒸発管の減肉は、石炭燃焼域での腐食現象や、スケール、蒸気噴射を用いた灰落とし装置(スートフロア)によるエロージョン等の複合した要因が絡んでいるためそのメカニズムの解明と対策の検討が必要となりました。(第3図)



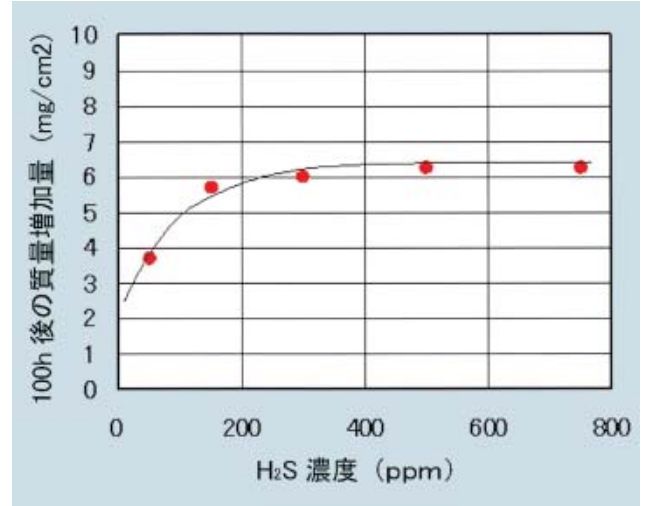
第1図 石炭ボイラ側面図 第2図 火炉壁蒸発管の減肉状況



第3図 蒸発管断面観察結果

#### (1) 腐食メカニズム解明試験

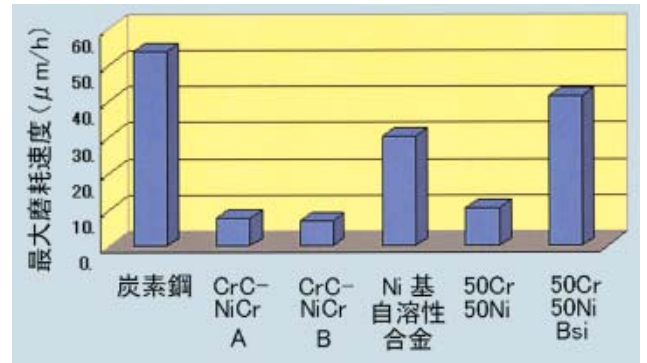
腐食減肉に対する影響因子を調べる試験を行った結果、腐食はH<sub>2</sub>S濃度の増加と共に進みますが、150ppm以上の濃度ではほぼ飽和しました。(第4図)付着灰は還元性雰囲気では腐食を抑制する効果があり、スートフロア等により付着灰の剥離が起きると腐食が進展することがわかりました。



第4図 H<sub>2</sub>S濃度と質量増加量の関係

#### (2) 寿命延伸材料の評価試験

調査・試験結果を基に、火炉壁管の減肉防止による寿命延伸方法としてボイラ内での施工が可能な溶射を選定し、評価試験を行った結果、品質・施工速度・装置の可搬性等から高速フレイム溶射(HVOF)が適し、溶射材料としてはCrC-NiCrが適していることがわかりました。(第5図)



第5図 溶射材の最大磨耗速度

#### 2 改良9Cr鋼の寿命診断技術確立に関する研究

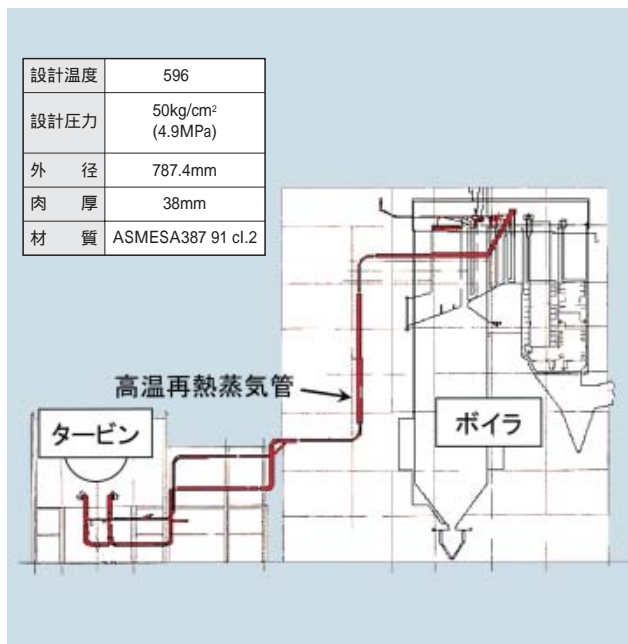
ボイラ・蒸気タービンからなる従来型火力発電設備の高効率化のために、蒸気タービン入口蒸気の高温・高圧化がなされてきました。当社川越火力発電所および碧南

火力発電所の高温蒸気配管においては、これに対応するための材料として新たに高温特性に優れた改良9Cr鋼(9Cr1MoNbV)を採用しています

近年両発電所では、経年化が進んでおり余寿命評価を行い健全性を確認する時期が近づいて来ましたが、改良9Cr鋼は比較的新しい材料であることから、実機での長期使用における損傷メカニズムに関する知見がなく、また寿命評価法も明確になっていなかったため、これらの説明はユニットの保安確保・適正補修の観点から重要な課題となりました。

本研究は、我が国で初めて高温再熱蒸気条件(593 )を採用した碧南火力発電所3号機再熱蒸気管を対象として、損傷メカニズムの解明および寿命評価技術の確立を目的として、石川島播磨重工業株式会社との共同研究にて実施しました。

高温再熱蒸気管の概略図を第6図に示します。



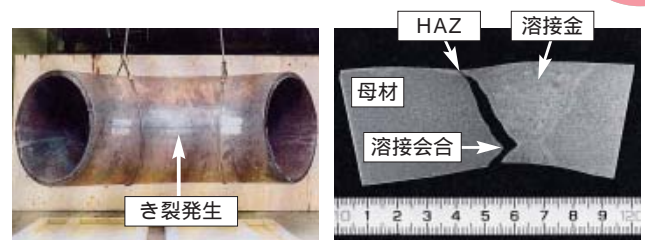
第6図 高温再熱蒸気管概略図

### (1) クリープ破断試験

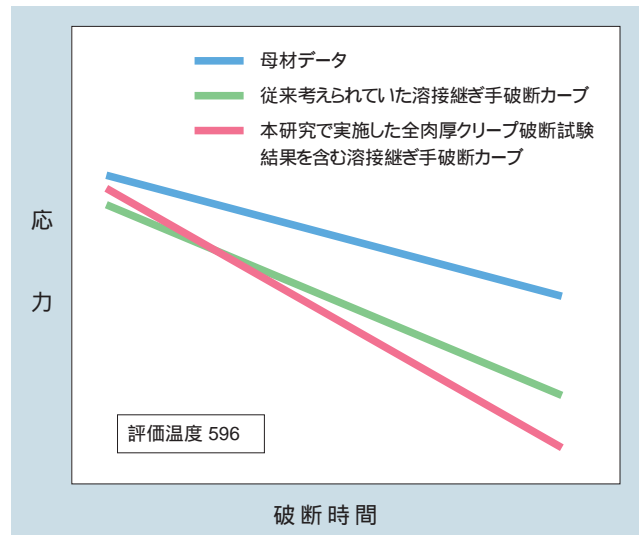
高温蒸気配管は、直管およびエルボから構成されますが、それぞれについて実機配管に発生する応力をより忠実に模擬するため実機と同サイズ・同材質の試験体を作製し、大型試験炉にて実機模擬内圧クリープ試験を実施しました。(外径約787.4mm、肉厚38mm、重量1530kg)この試験により実機配管の寿命や損傷形態が明らかとなりました。

クリープ破断後のエルボ試験体を第7図に、エルボき裂発生部断面を第8図に示します。

本研究により得られたクリープ破断カーブを用いることで、より正確な寿命評価を行うことができるようになりました。(第9図)



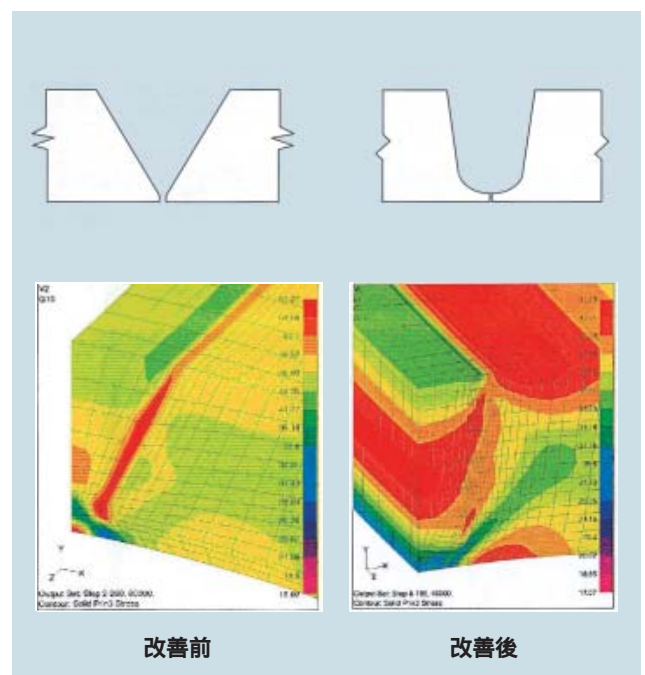
第7図 クリープ破断後のエルボ試験 第8図 エルボき裂発生部断面



第9図 溶接継手のクリープ破断カーブ

### (2) クリープ解析

実機模擬試験におけるクリープ破断事象を詳細に検討するため、試験体の断面形状をもとにモデルを作成し、有限要素法によりクリープ解析を実施しました。さらに、劣化修理時の寿命延長を図るため開先形状の見直しを行いました。(第10図)これにより応力のピークを約10%少なくすることができ、クリープによる寿命を約4割延長することが可能となりました。



第10図 開先形状とクリープ解析結果

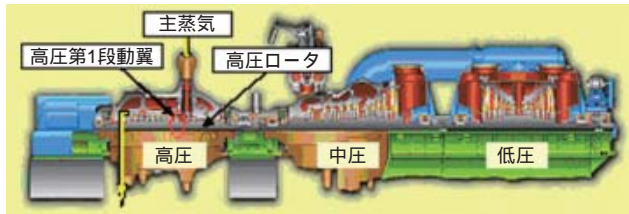
## 蒸気タービン設備

### 1 タービンロータ動翼植込部のフレットング疲労

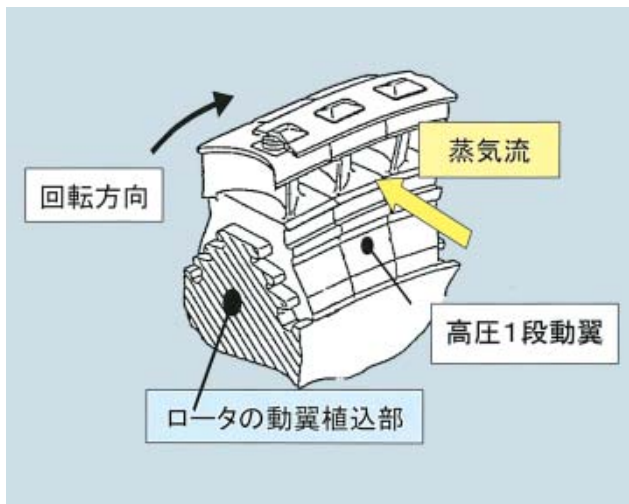
火力発電所で使用されている蒸気タービンの高圧ロータの寿命は、これまで、中心孔のクリープ損傷により評価されてきましたが、廃却ロータを破壊調査したところクリープ損傷量は懸念されたほど多くありませんでした。

一方、回転中に様々な力を受ける動翼植込部は、き裂の発生が懸念され、き裂によってロータの寿命が支配される可能性が考えられました。(第11、12図)

本研究では、当社が有するユニット種類別に動翼植込部に作用する応力状態を推定し、これを模擬した試験を行うことで、き裂の発生傾向を把握しました。



第11図 蒸気タービン断面図

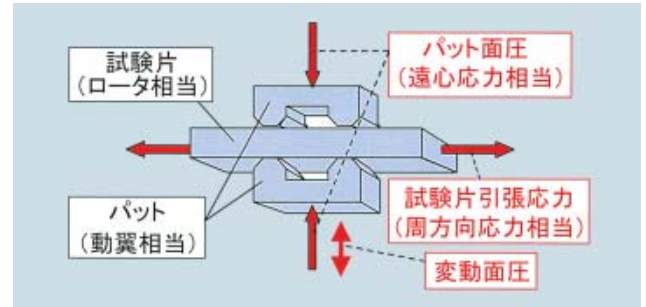


第12図 ロータの動翼植込部の構造図

#### (1) 動翼植込部に作用する応力の推定と試験法の考案

ロータの回転に伴い、動翼植込部には、遠心応力と周方向引張応力が作用します。また、動翼が蒸気の力により振動することで、動翼植込部には、遠心方向に変動面圧が、周方向に摺動力が生じると推定されました。

このモデルの状態を再現する試験方法を考案した結果を第13図に示します。(第13図は、動翼に見立てたパットで試験片(ロータ相当)を挟むことで遠心応力を再現しています) この試験方法は、実機における複雑な作用力の状態を比較的単純な動きで良く再現できる方法となっています。



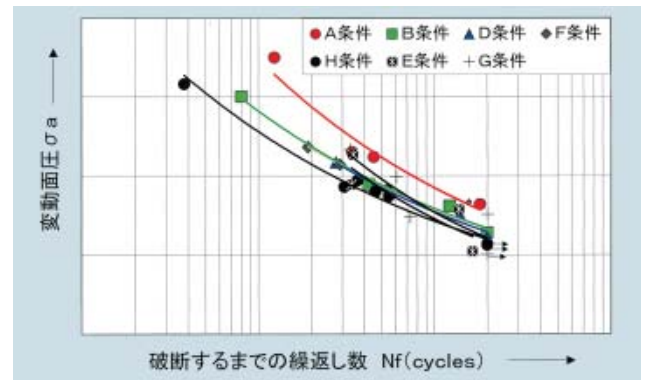
第13図 試験方法の概念図

#### (2) 破断試験

各ユニット当該部の材質および当該部に作用する遠心応力・周方向応力の推定値(FEM解析)を反映した試験を行った結果(第14図) 実機のフレットング疲労は、以下の状態において発生しやすくなると考えられました。

- ・変動面圧が大きい
- ・遠心応力が高い
- ・周方向応力が高い

これらの結果を、今後の実機の点検計画等に役立てていきます。

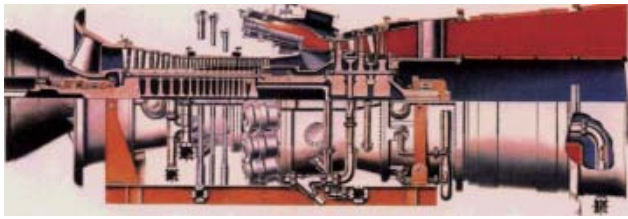


第14図 各ロータの応力を反映した試験結果

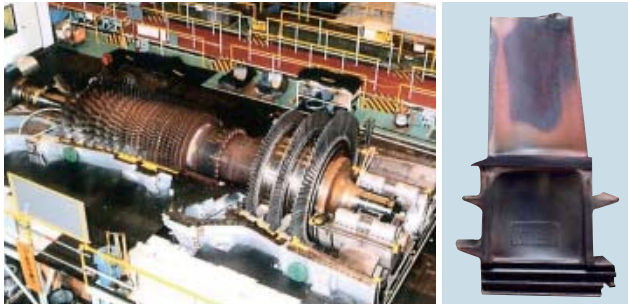
## ガスタービン設備

### 1 ガスタービン第1段動翼の劣化シミュレーション技術の開発

LNGを燃料とするガスタービンは、排熱回収ボイラ・蒸気タービンと組み合わせて高い発電効率を得ることができますが、高温ガスにさらされる部品、中でも第1段動翼(第15~17図)は、60回転/秒による遠心力や、融点に近い高温燃焼ガスにさらされるなど、最も厳しい使用条件となっています。動翼の寿命を左右する要因として、クリープ強度の低下が挙げられますが、これまでその進展度合いを正確に予測することは困難でした。そこで本研究では、これまでに得られた様々な調査結果を基に、ガスタービン第1段動翼のクリープ劣化シミュレーション技術の開発に取り組みました。



第15図 ガスタービン断面図



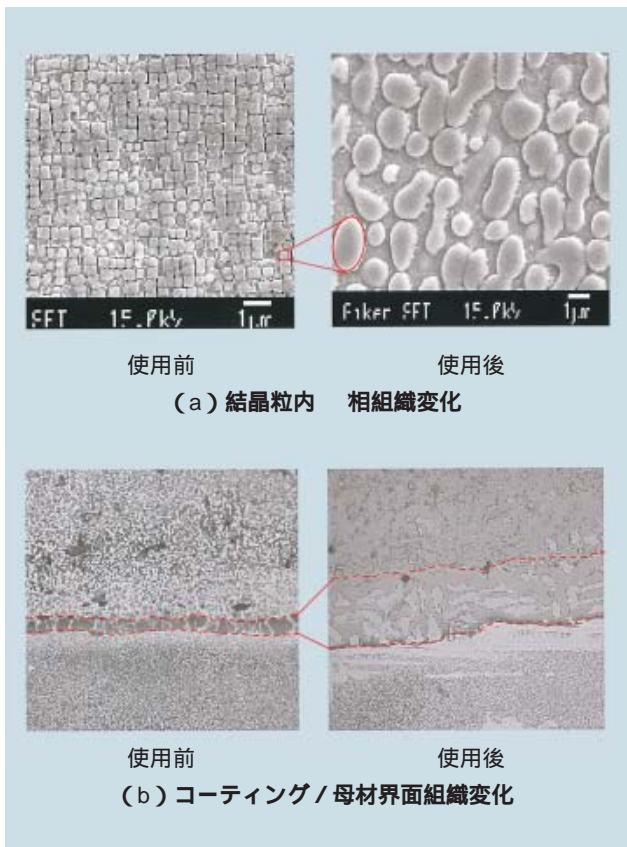
第16図 ガスタービンロータ



第17図 第1段動翼

### (1) 動翼の使用温度の推定

シミュレーションを行うためには動翼各部の温度を正しく把握する必要があります。本研究では、温度推定法として、第18図に示す、(a) 結晶粒内相の粗大化に注目した方法と、(b) コーティング/母材界面の組織変化に注目した方法を併用し、互いに補完することでこれまで以上に精度良く動翼の使用温度を推定することができました。なお、(b)の方法は(財)電力中央研究所の協力を得て実施しました。

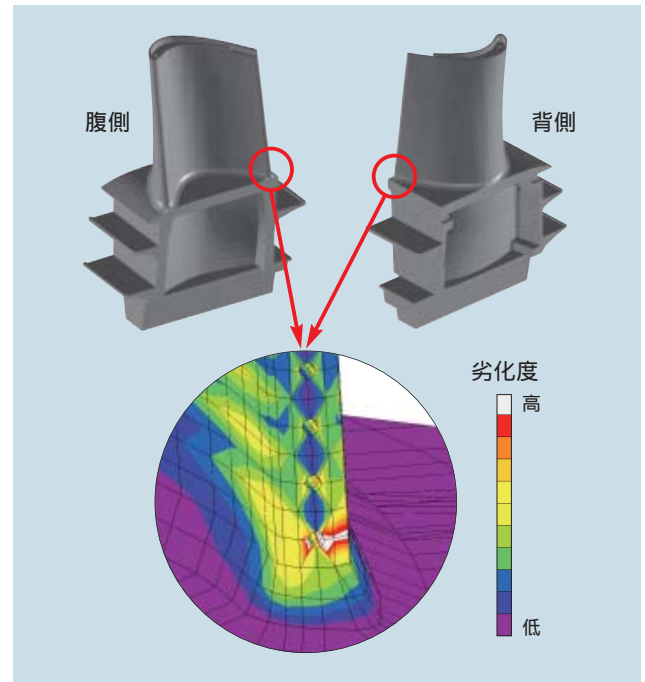


第18図 金属組織からの温度推定法

### (2) クリープ劣化シミュレーション

動翼の精密形状計測を行い、モデル要素形状を工夫することで内部の複雑な冷却構造を反映した3次元動翼モデルを構築し、シミュレーションを行いました。

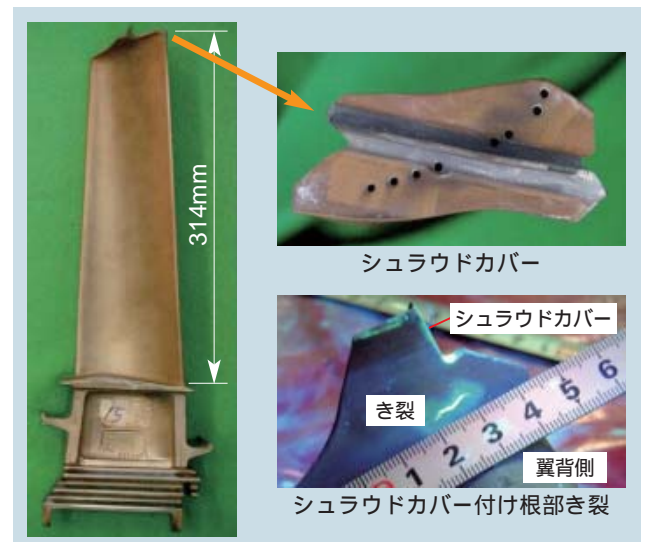
これにより、複雑な3次元形状であるガスタービン動翼を長期間使用したときのクリープ劣化傾向を把握する事ができました。(第19図)



第19図 クリープ劣化度分布

### 2 ガスタービン第2段動翼長寿命化技術の開発

1300 級ガスタービン第2段動翼は、1段動翼に続いて厳しい使用環境にあるため、翼先端のシュラウドカバー（隣接翼と接触してリング状となり長翼振動を低減する役目）付け根部においてクリープき裂が発生した事例があります（第20図）。



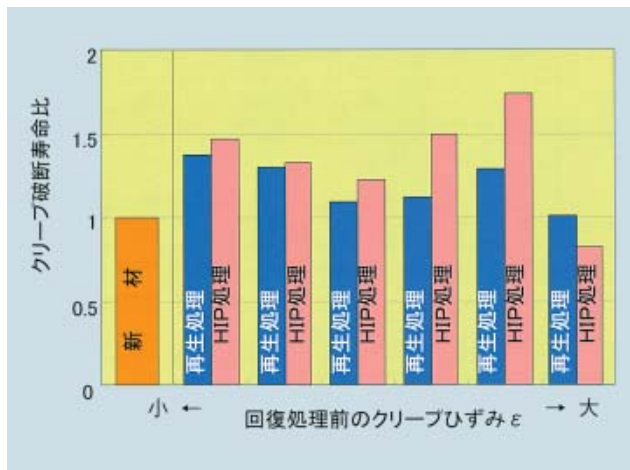
第20図 1300 級GT第2段動翼形状

対策としては、シュラウドカバーの形状変更による遠心力低減を実施しましたが、最終的には、この損傷が寿命支配因子になると考えられました。そこで、(株)日立製作所と共同で、クリープ損傷回復処理をガスタービン第2段動翼に適用し、寿命を延長させる技術の開発に取り組みました。

(1) クリープ損傷回復処理方法と最適時期

クリープ損傷を回復させる手法としては、一般的に再生処理(溶体化熱処理)やHIP処理(Hot Isostatic Pressing、超高温高圧処理)があります。再生処理は、材料を高温で熱処理を行うことで、強度の基となる金属間化合物を再生する手法です。また、HIP処理は熱処理に併せて高い圧力(約1,000気圧)を加えることでクリープボイドを押しつぶし、新材相当まで特性が回復できる手法です。本研究ではこれらの手法に着目し、回復処理材のクリープ試験、解析およびモックアップ試験により回復効果と処理時期について評価を行いました。

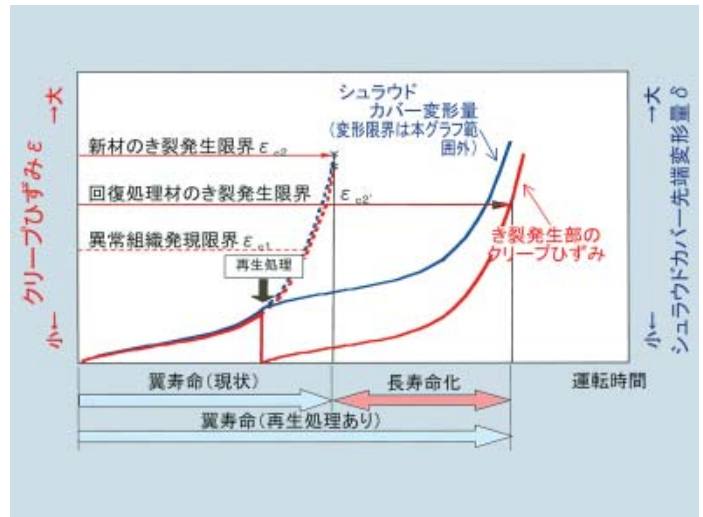
処理効果としては、再生処理、HIP処理のどちらも、処理前のクリープひずみがある値以下であれば、新材のクリープ破断寿命と同等以上に回復させることが確認できました。HIP処理はクリープボイドを潰す効果があるため、クリープひずみがより大きい段階での効果が期待されましたが、再生処理、HIP処理ともにクリープひずみがある値を超えると、回復処理により異常組織が発現し、クリープ強度の回復が十分に得られないことが明らかになりました。(第21図)



第21図 回復処理によるシュラウドカバーのクリープ強度回復効果

(2) 寿命延長効果

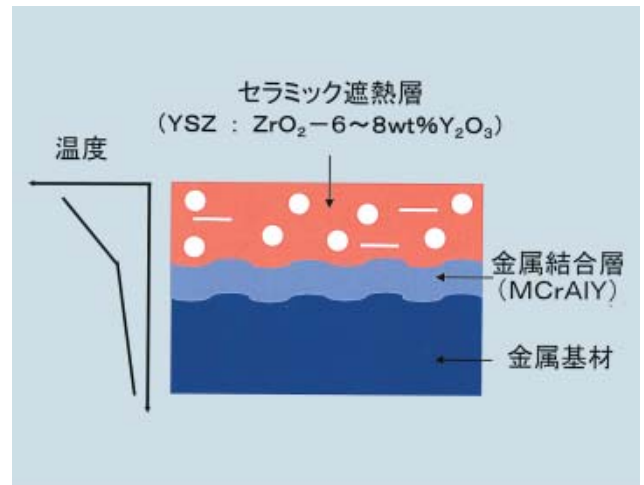
回復処理試験結果に基づき処理方法として安価な再生熱処理を選定し、モックアップ試験により変形量の確認を加えてクリープ歪み・変形量と運転時間の関係を明らかにしました。その結果、回復処理により現寿命の約2倍へと延長させることができることがわかりました。(第22図)



第22図 シュラウドカバーの寿命延長効果

3 ガスタービン用高性能遮熱コーティング(TBC)の開発

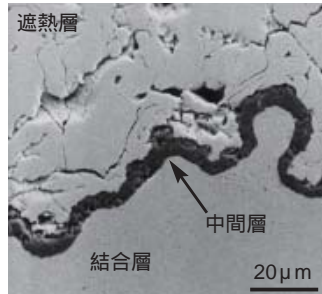
ガスタービン高温部品は、耐熱性に優れたNi基やCo基超合金が用いられていますが、さらに耐熱性を高めるため、表面に遮熱コーティング(Thermal Barrier Coating)が施されています。このTBC(第23図)は、熱伝導率の小さいセラミックス製の遮熱層(イットリア安定化ジルコニア:YSZ)と、遮熱層と基材の間の熱膨張差を緩和して密着性を向上するためのMCrAlYと呼ばれる結合層を基材上に成膜した2層構造からなっていますが、長期使用により結合層が酸化し、割れやはく離が発生する問題があり、定期的なりコーティング補修が必要とされています。また、遮熱層には、球状や層状の気孔が多く含まれ、この気孔の効果によって熱伝導率の低下を図っていますが、セラミックスの焼結により気孔が少なくなると、熱伝導率が上昇してしまい、高温部品の信頼性を低下させるといった問題もあります。そこで、本研究では、耐酸化性、遮熱性および耐焼結性に優れたTBCの開発に取り組みました。



第23図 遮熱コーティング(TBC)構造

## (1) 耐酸化性の向上

TBCを使用すると、結合層表面が酸化され、遮熱層/結合層界面では酸化物(Thermally Grown Oxide: TGO)が形成されます。このTGOが長期使用により、次第に厚膜化すると、遮熱層のはく離をもたらす直接原因となると考えられています。本研究では、結合層上に酸素進入防止を目的とした薄くて緻密な中間層を生成させることができ、耐酸化性および耐熱衝撃性を向上させることができました。(第24図)

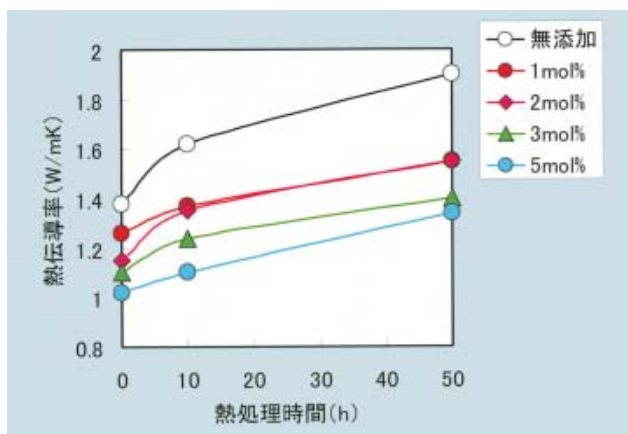


第24図 酸化試験後の組織

## (2) 遮熱性および耐焼結性の向上

遮熱層には、元来、安定化剤として微量の希土類元素(イットリウム:Y)が添加されています。本研究では、この希土類元素の中で最もイオン半径が大きな元素で、遮熱層の焼結を抑制し、低熱伝導率化が期待できるランタン(La)に着目し、YSZに $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ を添加した皮膜を作製した結果、熱伝導率が低下する事が確認できました。(第25図)

以上の技術を組み合わせることで、低熱伝導率で耐酸化性および耐熱衝撃性に優れた実用的な皮膜が開発できました。

第25図 遮熱層に及ぼす $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 添加量の効果

## 新しい検査技術

## ① ホール素子を用いた亀裂評価技術の開発

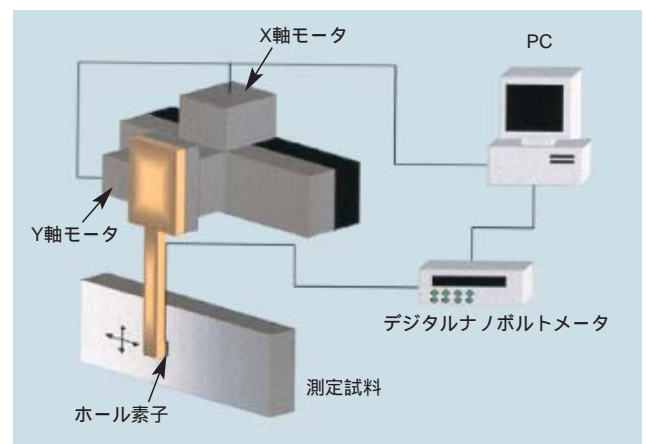
火力発電設備のメンテナンスを高度化するためには、新たな検査技術の開発が求められています。本研究ではその取り組みの一つとして、豊橋技術科学大学 太田昭男教授の協力を得て磁場が測定できるホール素子顕微鏡の亀裂評価への適用性を調査しました。

## (1) ホール素子顕微鏡

1879年にE.H.Hallによって発見されたホール効果をもとにした、磁界の強度を直接電気信号に変換できる半導体固体素子はホール素子と呼ばれています。ホール素子は小さく作ることができることから、金属表面の磁場分布を高分解能で精度良く測定することができます。(第26図)

一方、金属材料が使用されるのに伴い亀裂が発生する場合、亀裂先端で金属組織の滑りが生じ何らかの特徴的な磁場分布が発生することが考えられます。

ホール素子によってこういった特徴的な磁場分布を捉えることで、亀裂の進展性等を評価できれば、設備の合理的な補修に繋がる事が期待されます。

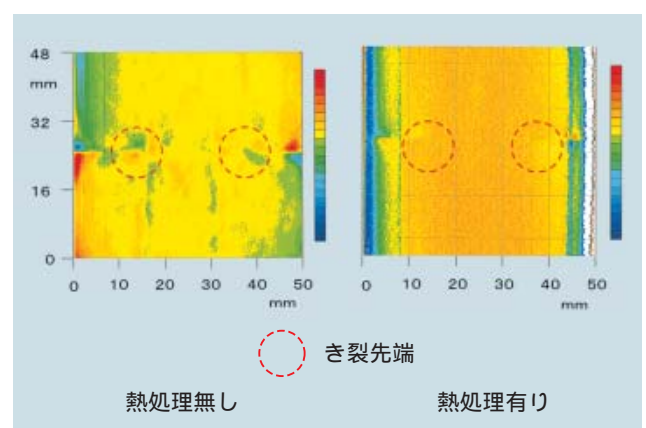


第26図 ホール素子顕微鏡

## (2) 亀裂測定結果

低合金鋼の疲労試験片に疲労亀裂を導入したものと、亀裂導入後に熱処理を加えたものをホール素子顕微鏡で測定した結果を第27図に示します。疲労亀裂を導入したままのものは、亀裂先端に相当する位置を中心に磁場の高まりが見られるのに対し、熱処理を加えたものは、磁場分布が一樣で特徴のない様相を示しています。

これらのことからホール素子顕微鏡によって、使用中に発生し進展中の亀裂と、製造時の初期亀裂で進展性が無いものを区別できる可能性が見出されました。



第27図 ホール素子顕微鏡観察結果