

有の損失、すなわちノズルからロータまでの長い流路における圧力損失と放熱損失、ロータ入口の温度および速度不均一による付加損失等の詳細な解析は行うことができなかった。

4.2.3 再熱水素燃焼効率

水素燃焼効率はガスクロマトグラフで測定した排気ガス中の残存水素濃度、酸素濃度、炭酸ガス濃度と、水素流量、主空気流量、冷却空気流量から計算で求める。

図24に排気ガス中の残存水素濃度から求めた再熱水素燃焼効率を示す。同図で実線はTIT970℃のシリーズ2、点線は940℃のシリーズ1における燃焼効率である。

シリーズ1では燃焼効率の最大値は95%であるが、シリーズ2では100%が達成された。水素流量が主空気流量の0.1%wtになるとシリーズ2においても燃焼効率は96%まで低下する。

シリーズ2の水素燃焼状況の例をグラビア3に示す。(a)は運転前の状況でロータ翼がストラットの奥に見える。左側と右側では使用したビデオカメラが異なり色合いが異なる。

(b)と(d)は水素流量1.5g/sで水素燃焼効率100%の場合であり、ノズルリングの全周にわたってよい燃焼状態が観察された。(e)は水素流量2.4g/sで水素の火炎が長くなっているがまだ水素燃焼効率100%の状態

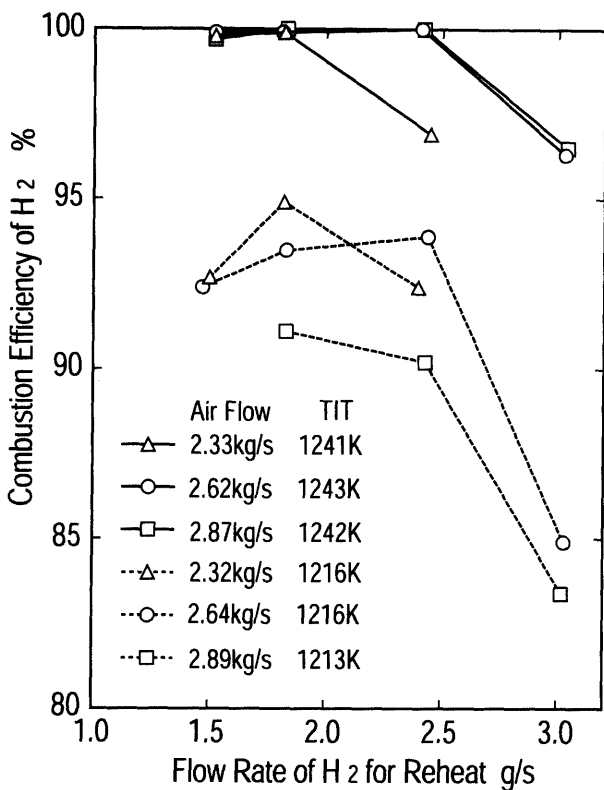


図24 再熱水素燃焼効率

である。(c)と(f)は水素流量3.0g/sの場合であり、水素燃焼効率が96%程度に下がった場合の写真で、ビデオ画面では水素火炎が連続して見えるようになる。また、一部の翼の下流で燃焼が不安定化している様子が観察された。火炎が連続して見えるのは、燃焼域が伸びてローターにまで達した結果と思われる。

以上から判断すると、水素の噴き出し量が過大でなく、全周で安定して火炎が保持されれば、タービン内に吹き出した水素の燃焼効率100%の達成は可能と考えられる。ノズルリングの周方向に主流ガスの温度不均一やノズル翼近辺で一部に強い冷却空気の流れ込みがある場合、局所的に火炎の着火・保持が乱され、燃焼効率は低下する。火炎はノズル翼の後流によって保持されるが、水素噴き出し速度が早すぎる場合、すなわち水素流量が過大の場合、火炎は下流方向に離れて不安定化し、燃焼効率は低下し、また燃焼領域が長くなってロータ前で燃焼が完了せず、出力の増加が少なくなるものと思われる。

4.2.4 排気ガス特性

図25にNO_x測定結果を示す。シリーズ1、2とも、NO_x総量は再熱、非再熱でほとんど変わらない。試験タービンの主燃焼器は灯油を噴霧燃焼させており、排気ガス中で計測されるNO_xのほとんど全ては主燃焼器で発生したNO_xと考えられる。タービン内水素燃焼による主ガスの平均温度上昇は最大で100℃であり、高温燃焼域のガスの滞留時間は0.001秒以下の短時間のため、水素燃焼によるNO_xの増加は極めて少なく、計測誤差の範囲に入ると考えられる。

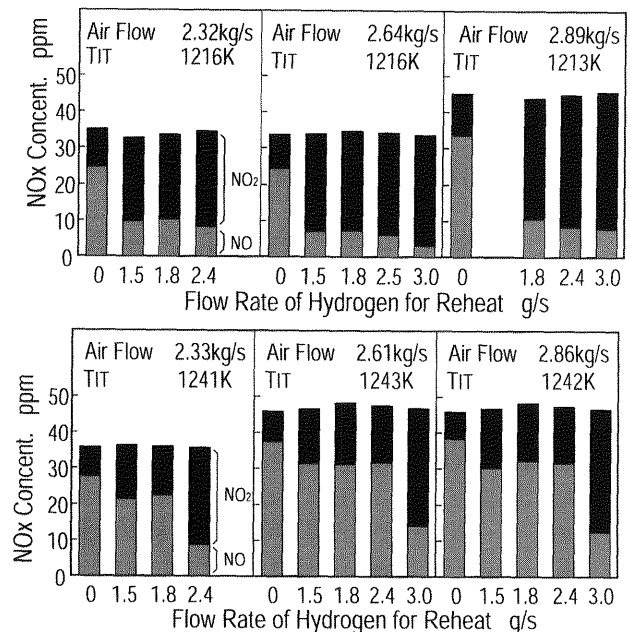


図25 排気中のNO_x濃度

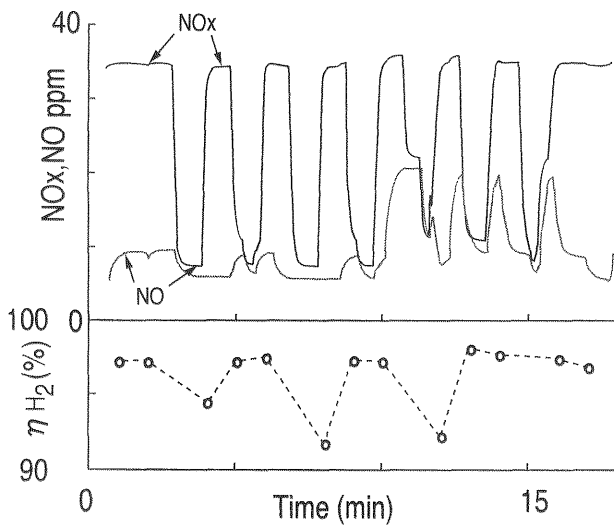


図26 NO・NOxと水素燃焼効率の時間的経緯

図25で注目されるのは再熱によるNO₂/NO_x比の変化である。NO₂/NO_x比は非再熱時には比較的小さいが、再熱時に増加し、特にシリーズ1の全般と、シリーズ2で水素流量が多い場合にNO₂の比率が増大する。これらのNO₂/NO_x比が大きいケースは水素燃焼効率が100%に達していない場合で、NO₂/NO_x比と水素燃焼効率の密接な関係は、NO_xと水素燃焼効率の時間的経緯を同時に示した図26の測定記録にも見られる。図26では、NOxとNOを1台の計測器で1分ごとに計測した結果とNOを連続的に別の計測器で計測した結果および水素の燃焼効率を示している。この計測中はノズル翼後方で水素は断続的に着火したり消えたりしており、この間の水素燃焼効率とNO濃度の変化がよく対応している。残存水素濃度とNO/NO_xの関係をさらに検討するため、試験タービン運転で計測されたすべてのデータを図27に整理した。図から明らかなように、NO/NO_x比と残存水素濃度とは相関の高い対数関数関係にある。

このようなNOのNO₂への変換がNO_x計測器の中で生じた現象ではないことを確かめるため、低温の標準空気にNO標準ガスを混入し、さらに水素ガスを微量混入した模擬ガスをNO_x濃度計で計測した。この場合、NOのNO₂への酸化は全く生じなかったため、上記の現象はタービン内で生じたものであり、水素の不完全燃焼がNOのNO₂への酸化を促進したと考えられる。

一般に排出ガス中のNOはNO₂に換算して評価されるため、タービン内で生じるNO₂変換は排ガス評価には関係しないので、特に問題とする現象ではないが、NO₂濃度の高いガスの計測にあたっての一般的注意事項であるコンバータ効率やコンバータ容量、およびサンプリングガス経路の温度保持について注意が必要で

(172)

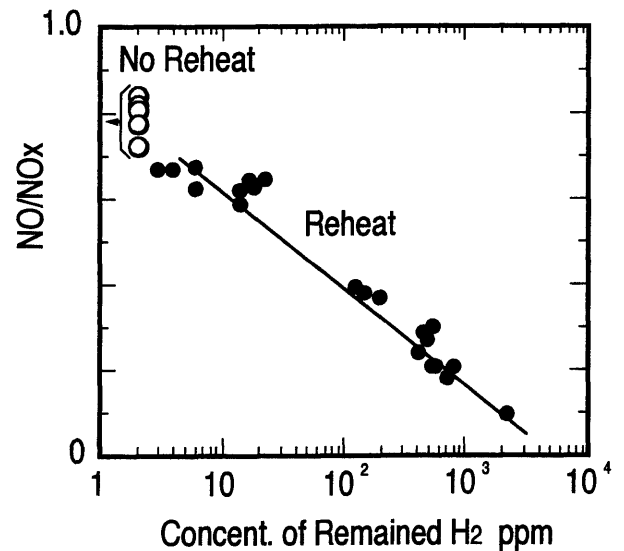


図27 NO/NO_xと残存水素濃度

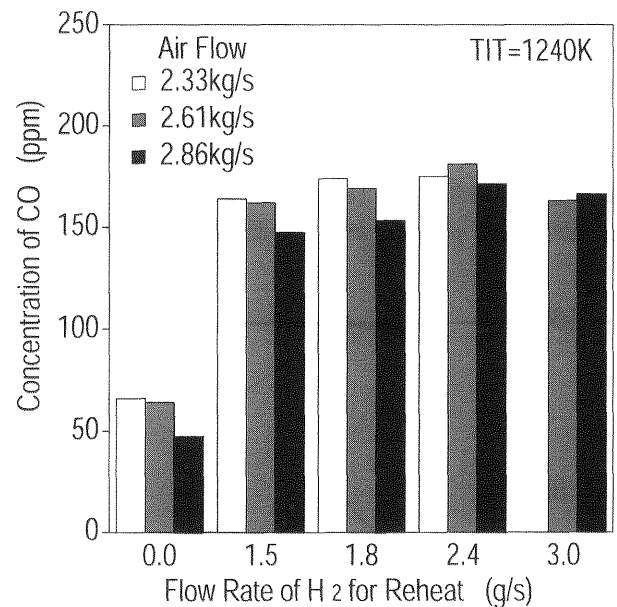


図28 排気中のCO濃度

ある。一方、水素の燃焼が時間的、場所的に変動する場合、水素燃焼効率を連続的に計測することは困難であるが、図26に示したようにNOまたはNO₂の計測によって水素燃焼状況を定性的にはあるが連続的に監視することができる。

図28にCO濃度測定結果を示す。CO濃度は再熱によって非再熱時の2倍程度に増加した。このようなCO濃度の増加が、水素燃焼域でCO₂が還元されたことによるものか、主燃焼器における未燃の灯油が不完全燃焼したものかについては、判断する資料は得られなかった。O₂およびCO₂濃度も参考のため表9、表10に示した。再熱時は水素燃焼によりO₂濃度が下がり、CO₂濃度は

酸素消費の比率だけわずかに上がる。O₂およびCO₂のこの濃度変化は計算による予測値と一致する。

第5章 試験タービンの分解点検

5.1 分解点検結果

最終シリーズの試験を終了後、試験タービンを分解し、内部の検査を行った。試験タービンの燃焼運転回数は40回、運転時間は約40時間であり、タービン内水素燃焼時間は約12時間である。

試験タービンの分解・点検は(株)東芝京浜事業所で行った。分解時には試験タービン各部の目視検査、内部ケーシング隙間の測定、ロータ翼チップクリアランスの測定、水素管路の漏れの有無、および测温塗料塗布部の温度の推定を行った。分解後の試験タービン主要部の様子をグラビア2に示す。タービン上流側から順に、(a) 入口内部ケーシング、(b) ノズルリング上流側の外周側防熱ケーシング、(c) ノズルリング上流側の内周側防熱リング、(d) ノズル翼腹側(上流側より)、(e) ノズルリング下流側、(f) ノズル翼下流の外周側防熱リングと防熱シュラウドリング、(g) ノズル翼下流の内周側防熱リング、(h) ロータ翼を示す。

1) 目視検査

目視によりタービン構造上の異常の有無、特に水素燃焼区間の過熱状況を調べた。水素が燃焼するノズルリングからロータ翼までの高温通路区間に関しては、ノズルリングの内周側には後で写真に示すように変色の跡が見られたが、ノズル翼からロータまでの高温通路部の内周側及び外周側防熱ケーシングには测温塗料の剥離はあるものの水素燃焼による過熱跡や変形といった異常は見られなかった(グラビア2のf、g参照)。ロータ翼にも異常は見られなかった。その他の部位、すなわちロータディスク、ロータ軸、軸受、タービン内外ケーシングについても構造上の異常は見られなかった。

2) 内部ケーシング隙間の測定

図8、図9に見るようにノズルリング入口側のガス通路は、燃焼器からのガスの流れ方向を軸方向に直角に変える入口内部ケーシング(グラビア2a)、外周側防熱ケーシング(グラビア2b)、内周側防熱リング(グラビア2c)で構成される。これらは、内周側ははめ込みによって、外周側はリップ状の端部を押しつけて組み立てられている。入口内部ケーシングの上には燃焼器に続く内部ダクトが差し込まれている。以上の内部ケーシングと内部ダクトの接続部の隙間からはケーシングの外を流れる低温空気が高温ガス側に漏れ入り、ガス温度の低下を引き起こす。細い隙間からの漏れ量は隙間幅の3/2乗に比例するため、隙間の不均一は漏れ込み空気量の大きな不均一、その結果周方向に水素燃焼を不安定にさせるような局所的なガス温度低下を引

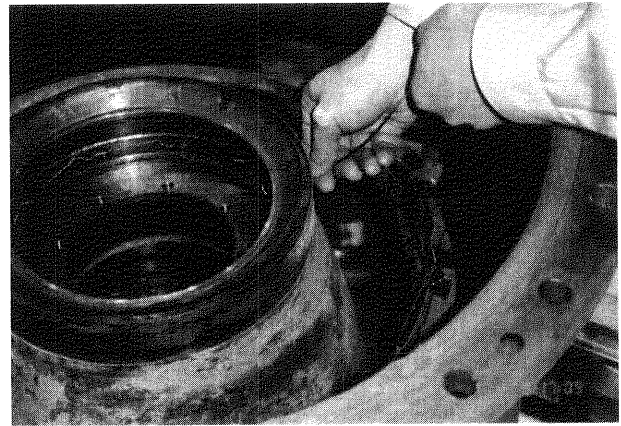


写真15 入口内部ケーシングと内周側防熱リング接続部の隙間計測

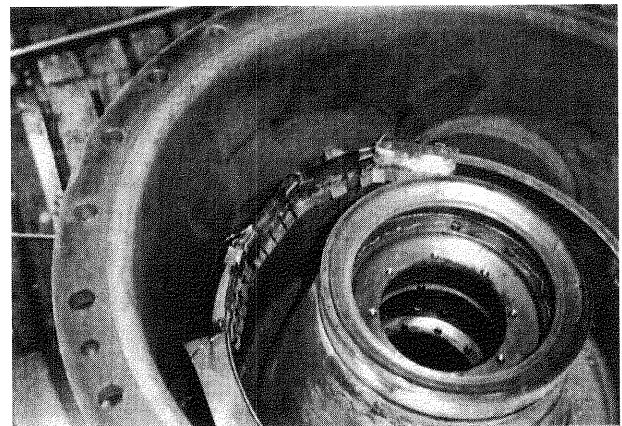


写真16 入口内部ケーシングの外周側接続部にシムを挿入した跡

き起こす可能性がある。このため、試験タービン分解にあたっては特にノズルリング入口ガス温度に大きな影響を与える可能性のある入口内部ケーシングと外周側防熱ケーシング・内周側防熱リングの間の隙間の計測を試みた。計測の結果、内周側には幅0.2~0.35mm、長さ10~20mmの隙間が6ヵ所確認された。写真15に内周側の計測状況を示す。外周側ケーシングの隙間はシリーズ1のあとシムを挿入した所(写真16参照)であり、タービン下部側は測定できなかったが、上半部180度の全範囲にわたって幅0.7~0.9mmの隙間が確認された。今回の測定では隙間幅は比較的一様であったが、入口内部ケーシングは軸に対して非対称な形状であり、高温での運転時には形状の変形が重なり、隙間の不均一を拡大する可能性が考えられる。

3) ロータ翼チップクリアランスの測定

ロータ翼外径と外周側防熱シュラウドリング内径を測定した結果は、それぞれ329.94mm、333.43mmであった。ロータ翼のチップクリアランスは1.75mmであり、通常のタービンに比べてかなり過大である。これ

は初のタービン内燃焼の試験機として回転部の安全を重視してクリアランスに余裕をとった細部設計の結果であるが、試験タービン出力が、クリアランスゼロで行った基本設計値に対して大幅に低い結果となった理由のひとつに、このチップクリアランスの過大が考えられる。

4) 水素導入管継手部の漏れの有無

水素はタービン外部ケーシングの外に設けられた環状の水素導入管からノズルリングを構成する25枚のノズル翼にそれぞれ6mmの管により導かれる。水素経路でもれが生じた場合、再熱温度上昇は不足し、さらに予定しない場所で燃焼が起きたり、爆発の危険が生じたりする。水素導入経路の確認のため、水素導入管から0.1MPaの空気圧をかけ、6mm管の経路に翼ごとに4カ所あるリングジョイント全てについて石鹼液を用いて漏れの有無を調べた(写真17参照)。検査の結果、写真18に示すわずかな漏れが1カ所に認められた。この程度のもれ量は周囲を流れる主空気によって薄められ、爆発の危険はなかったと思われるが、リングジョイントの使用は極力避けて、漏れの防止に十分な注意を払う必要がある。

5) 測温塗料を塗布した部分の温度の推定

試験タービンの製作・組立時に、高温流路部表面や軸受けケーシング、冷却空気通路などに測温塗料を塗布し、今回の試験タービン分解後、塗料の変色からその部位の温度を推定した。高速流にさらされた面、特に外周側壁面ではほとんど全面にわたって、塗料がはがれており、また煤や錆の付着もあって推定温度範囲幅は大きい、参考値として表12に推定された温度を示す。

5.2 ノズル翼の詳細検査

ノズル翼内周側エンドウォール上には、写真19に示すように、高温ガス流によると思われる変色跡が見られた。変色域はノズル翼後縁から始まって下流に広がり隣接するノズル翼エンドウォール(写真左側)までわたっている。しかし、この変色域に変形や溶融といった物理的变化は認められなかった。外周側エンドウォールにも変色跡が見られたが、変色の程度はわずかでその範囲も小さい(写真20)。翼後縁の再熱水素

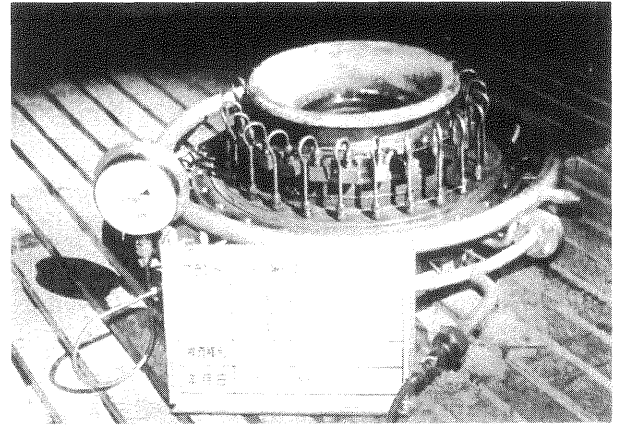


写真17 水素導入管継手部の漏れ検査

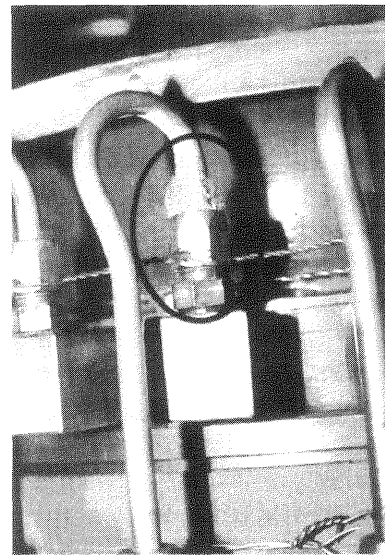


写真18 水素導入管リングジョイントからの空気漏れの様子

表12 測温塗料による温度推定

部品名	推定温度
内部入口ケーシング(内周側)	550-825°C
ノズル上流外周側遮熱ケーシング(ガス側)	670-825°C
ノズル上流内周側防熱リング(ガス側)	430-825°C
ノズル翼表面	670-825°C
外周側防熱リング(ガス側表面)	不明
内周側防熱リング(ガス側表面)	670-825°C
防熱シュラウドリング(ガス側表面)	不明

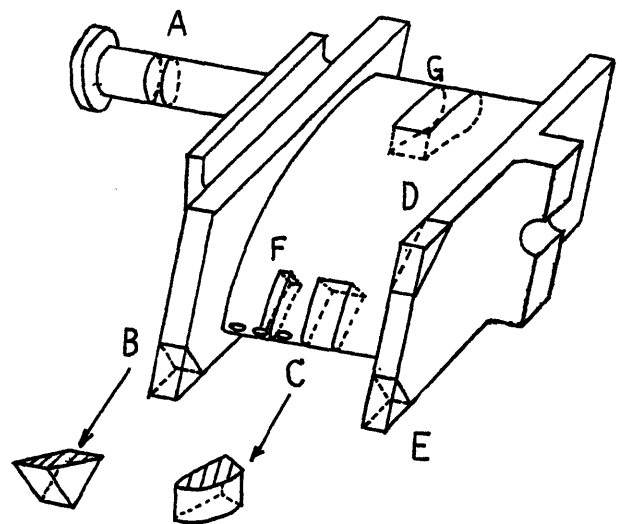


図29 EPMA試験片位置

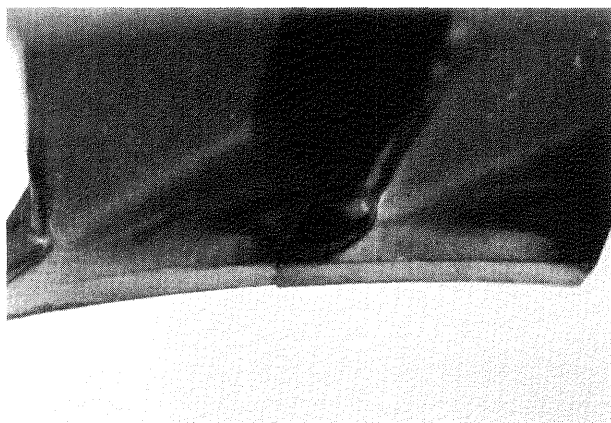


写真19 ノズル翼内周側エンドウォール上の変色跡

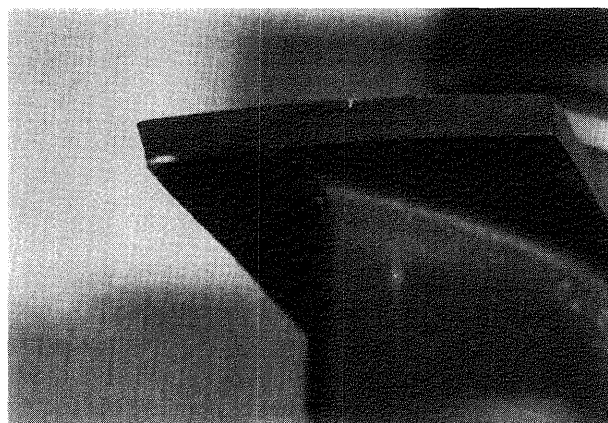


写真20 ノズル翼外周側エンドウォールの変色跡

の吹き出し孔近傍及び吹き出し孔を塞いだ溶接部に異常は全く観察されなかった。

ノズル翼各部における材質変化の有無を調べるため、図29に示す7カ所から試験片を切り出し、EPMA（電子プローブX線マイクロアナライザ）を用いて、断面の元素濃度分布を調べた。検査部位は以下の通りである。

- A部：再熱用水素導入部（燃焼ガスにはさらされない）
- B部：外周側エンドウォールの比較的軽微な変色部（写真20参照）
- C部：翼後縁の溶接補修部
- D部：内周側エンドウォールの濃い変色域（隣接翼からの加熱）（写真19参照）
- E部：内周側エンドウォールの濃い変色部（写真19参照）
- F部：翼後縁の水素吹き出し孔
- G部：翼前縁部

目視で変色の程度が顕著であったD部のEPMA画像を写真21に示す。(a)が酸素、(b)がクロム、(c)がコバルトの濃度分布であり、明るい領域ほど相対的濃度が高い。(d)は反射電子像で表面の凹凸に対応した像が得られる。

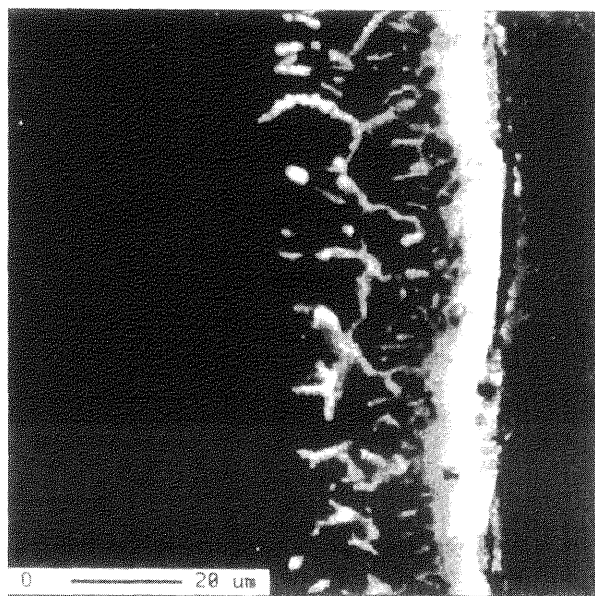
(a)、(b)に見られる部材表面に近い酸素及びクロムの高濃度の領域（I層）は、保護膜として形成されたクロムの酸化膜である。(b)では、I層の下に、クロム原子が表面のI層に移動したことによって生じたクロム濃度の低い層が観察される（II層）。さらにその内部に再び濃度の高い層が見られるが、この層が本来のクロム濃度を示している。(c)では、II層の濃度が低下したクロムを補う形で内部からコバルトが移動し、II層にコバルト濃度の高い層を形成している。ニッケルの分析結果においても、コバルトと同様にII層に高濃度のニッケル層が見られる。II層ではまた(a)～(d)

のすべての観察像において、組成の一様性が失われ縞状の元素の分布が見られる。このようにI層とII層は、加熱によって生じた酸化影響層と考えることができる。各検査部位の酸化影響層の厚さは、以下ようになった。

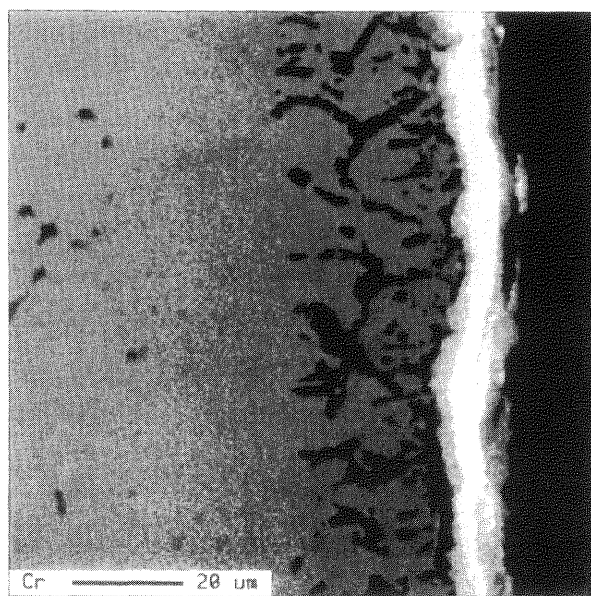
- A部：酸化影響は全くない。
- B部：10 μm に達しない程度の非常に薄い酸化影響層が見られる。
- C部：10 μm に達しない程度の非常に薄い酸化影響層が見られる。
- D部：30 μm の酸化影響層が見られる。
- E部：D部と同程度の酸化影響層が見られる。
- F部：水素吹き出し孔側及び翼外面側とも全く酸化影響は見られない。
- G部：酸化影響は全くない。

（株）東芝の今井らはIN939に近い組成を有するニッケル基超合金IN738LCについて、放物線則及びWagner理論に基づき、材料温度と酸化層の厚さの時間的な変化の関連を考察している²⁶⁾。その結果を本報告のケースに適用すると、酸化影響が顕著に見られたD及びE部では表面温度はおよそ870℃程度に、B及びC部では840℃程度に達したものと推定される。测温塗料により推定される翼表面温度は670℃～825℃であり、内周側エンドウォールの変色域はタービン内の旋回流れによる半径方向圧力分布によって高温の水素燃焼ガスが翼後縁に沿って内周側に流れ、エンドウォールを加熱した結果と考えられる。

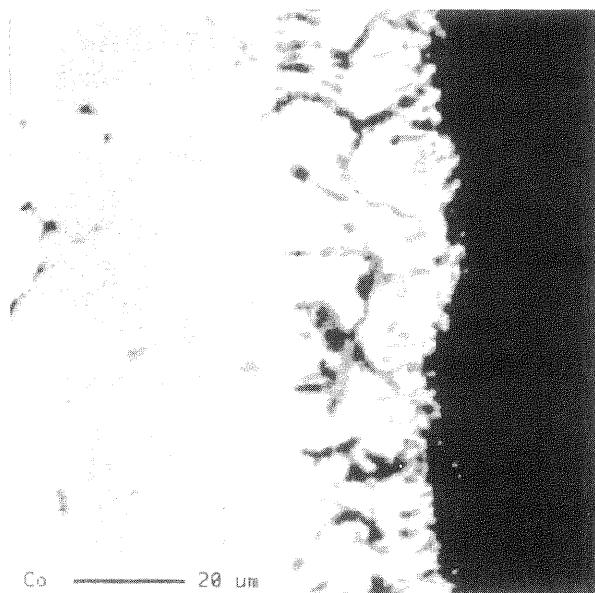
今回の試験タービンではこの変色域の酸化影響層の厚さは高々30 μm であり、溶融跡もないことから強度的には全く問題はないと判断される。今回の試験タービンの再熱運転時間は12時間であるが、運転時間がさらに長くなった場合でも、酸化クロム層が保護膜として働き、酸化層厚さは時間の対数関数となり、成長は遅くなるので、急な強度劣化にはいたらないものと推



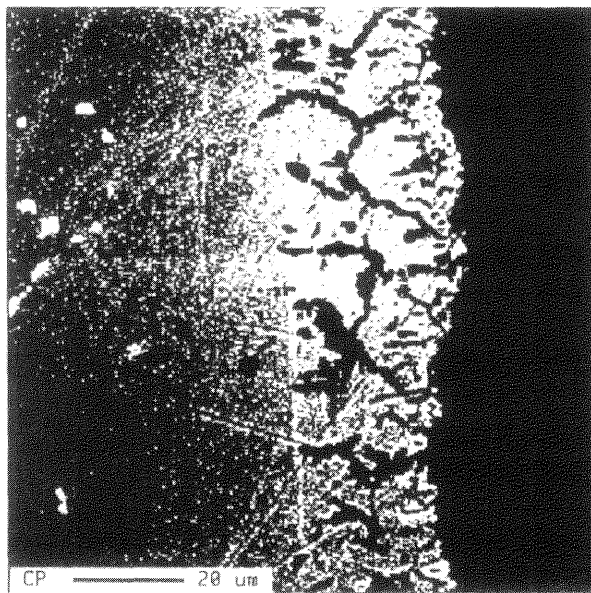
(a)



(b)



(c)



(d)

写真21 内周側エンドウォール上変色跡 (D部) 断面のEPMA写真

測される。しかし、タービン内水素燃焼の設計にあたっては、ラジアルバランスによる主流の偏りだけではなく、2次流れや翼後縁部分の局所的な高温ガス流れによる内周側壁面の加熱に対する配慮が必要であろう。

第6章 結論

タービン内再熱水素燃焼ガスタービンは、タービン内部に独創的な方式によるコンパクトな再熱過程を実現し、再熱再生サイクルとすることで高熱効率が得ら

(176)

れるシステムである。

本研究ではタービン内再熱の概念を実機を模擬した環境下で実証するために単段試験タービンを製作し、水素再熱運転試験を実施した。主たる結果を以下に示す。

1) 試験タービンのノズル翼入口温度940℃レベルにおいて、全てのノズル翼からノズル翼とロータ翼に挟まれた軸方向距離85mmの空間に水素を噴き出し、燃焼させた。

水素は、燃焼が困難と予想されたノズル翼下流と