

タービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究

平岡 克英*、井亀 優*、春海 一佳*、城田 英之*
森下 輝夫**、菅 進**

Research of Internal Reheat Hydrogen Gas Turbine

by

Katsuhide HIRAOKA, Masaru IKAME, Kazuyoshi HARUMI,
Hideyuki SHIROTA, Teruo MORISHITA and Susumu KAN

Abstract

We developed an experimental single stage turbine for demonstration of an internal hydrogen reheat gas turbine, in which hydrogen is discharged from the trailing edges of the nozzle vanes into the turbine passage to reheat the working gas. A series of experiments with this turbine were carried out and the results showed the possibility of its realization.

Almost complete combustion efficiencies of the hydrogen for the internal reheat are achieved in a wide range of hydrogen bleeding rate. The increments in the output power by the internal reheat indicate 30% to 70% of those by a one-dimensional turbine performance analysis. The reheat does not affect the amount of NO_x in exhaust gas in the experiment at temperature of 1240K, but the ratio of NO to NO_x is diminished by the reheat process and its tendency has a correlation with the concentrations of the unburned hydrogen gases in the exhaust gas. After the operation with reheat by hydrogen for eleven and a half hours in total, considerable problems associated with the internal reheat are not observed in the turbine structures.

* 機関動力部

** 元機関動力部

原稿受付 平成12年9月12日

審査済 平成13年1月10日

目 次

第1章 序論

第1章 序論	
1.1 はじめに	
1.2 タービン内再熱の概念	
1.3 本研究の経過	
第2章 試験タービンの設計製作	
2.1 基本設計	
2.2 ノズル翼およびロータ翼の設計と製作	
2.3 タービンの詳細設計および製作	
2.3.1 全体構造	
2.3.2 冷却空気系統	
第3章 試験装置と計測	
3.1 試験装置	
3.1.1 全体配置	
3.1.2 動力計	
3.1.3 主空気および冷却空気	
3.1.4 主燃焼器および主燃料供給系統	
3.1.5 水素供給系統	
3.1.6 排気系	
3.1.7 潤滑系	
3.2 監視・計測およびデータ処理	
3.2.1 タービン計測全般	
3.2.2 タービン入口・出口の温度および圧力	
3.2.3 動力計測	
3.2.4 振動監視	
3.3 排気ガス計測	
3.3.1 計測項目とサンプリング	
3.3.2 測定器	
3.4 タービン運転手順	
第4章 試験結果	
4.1 試験タービン運転経過	
4.2 試験タービン運転結果	
4.2.1 試験パラメータ	
4.2.2 出力	
4.2.3 再熱水素燃焼効率	
4.2.4 排気ガス特性	
第5章 試験タービンの分解点検	
5.1 分解点検結果	
5.2 ノズル翼の詳細検査	
第6章 結論	
謝辞	
参考文献	
グラビア1 タービン内再熱タービン試験装置	
グラビア2 試験タービン分解時の主要部品の状況	
グラビア3 タービン内での水素の燃焼状況	
グラビア4 2次元翼列下流における水素の燃焼状況	
付録1 ノズル翼とロータ翼の翼形状座標	
付録2 計測監視プログラム	
付録3 タービン出力計算方法	

1.1 はじめに

数十年にわたるガスタービン技術発展の中において実用化されたガスタービンの圧倒的多数は単純サイクルガスタービンすなわち圧縮機と燃焼器およびタービンの各要素で構成されるガスタービンである。そしてその性能向上のために一貫してタービン入口ガス温度の上昇がはかれてきた。近年、その温度は1500℃に達し¹⁾²⁾、さらに1700℃への挑戦が行われている³⁾。

一方、熱エネルギーの有効利用の観点からはガスタービン排熱回収技術が広く取り入れられるようになってきている。すなわち、大出力発電用の分野ではガスタービンと蒸気タービンサイクルの複合化（コンバインドサイクル）による高効率発電が一般化しており、中小規模の発電分野においては蒸気発生とのコジェネレーションが行われるようになった。

また、地球環境維持の観点から熱エネルギーの有効利用はますます強く求められるようになってきており、かつて経済的あるいは技術的に実用困難とされた各種の複雑なガスタービンサイクルの検討が再び行われるようになってきている。例えばスーパーマリンガスタービン⁴⁾やマイクロガスタービン⁵⁾などの再生サイクル、WR21ガスタービン⁶⁾などの中間冷却再生サイクル、GT24/26ガスタービン⁷⁾などの再熱サイクルなど各種サイクルのガスタービンが開発され、あるいは実用化されている。これらの中で再熱サイクルを採用したGT24/26はコンバインドサイクル発電用ガスタービンで、タービン入口ガス温度はやや低く抑えて高い信頼性を得るとともにNOxの排出量および保守費用の増加を抑えること、再熱による高いガスタービン排気温度を利用してより高効率の蒸気タービン性能を得ること等の特徴としている。

再熱はタービンの膨張過程で温度が下がった作動ガスに再び熱を加えて温度を上げることであるが、この再熱によってタービン仕事が増大し、単位空気流量当たりの出力すなわち比出力が高くなる。一方タービン出口ガス温度が上がり排熱損失が増大するので、高い熱効率を維持するためには再生器によって排気エネルギーを有効に回収することが必要となる。このような再熱再生サイクルはサイクル論的には単純サイクルより優れているにもかかわらず、これまで実用化された例は少ない。これは主にタービン本体の他に再熱器や再生器およびこれらのガスタービン構成要素を接続する配管などを必要とするために装置が複雑化して制御が複雑になるとともに容積、重量が増加するというデメリットのためと考えられる。

我々が約20年前に提案したタービン内再熱水素燃焼ガスタービン⁸⁾⁹⁾は、水素をタービン内部で燃焼させ

るためタービン外部に再熱用燃焼器を設置する必要がなくなり、コンパクトに再熱過程が実現できる。提案した当時には水素の入手可能性や排熱回収技術の困難さが指摘されたが、現在では水素エネルギーシステムの実現をめざした国家プロジェクト (WE-NET計画) が推進されつつある^{10) 11)}。さらにこのプロジェクトの中で新しい形式の再生サイクル水素ガスタービンが発明され、その可能性が実証的に示されている^{12) 13)}。

以上述べた状況の中で、我々が提案しているタービン内再熱ガスタービンの概念は、ガスタービンの将来技術のひとつとして位置づけることができる。本ガスタービンの概念実現の可能性は単段試験タービンの製作および一連の運転試験を通して既に示してきた。しかし本タービンの研究期間は1980年に試験タービンの設計・製作を開始して以来、一連のタービン運転試験を終えて分解点検を行うまで17年と長期間に亘った。本報告では研究経過と研究成果を既発表の研究成果¹⁴⁻²³⁾も含めて報告する。

1.2 タービン内再熱の概念

ガスタービンでは空気を圧縮機によって高圧の空気とし、燃焼器において燃料を燃焼させて高温高圧の燃焼ガス (作動ガス) とする。さらに作動ガスはタービンにおいて数段の静翼段と動翼段を断熱膨張しながら通過し、タービン軸に仕事を与え、かつガス圧力と温度を下げていく。再熱サイクルにおける通常の再熱方法はタービンの高圧段で仕事をした作動ガスをタービン外部に設置した再熱燃焼器に導き、燃料を燃焼させて、再び高温となった作動ガスを低圧タービンに戻す。これに対して我々の提案したタービン内再熱の場合は、図1に示すように、燃料を動翼後縁からタービン内を高速で流れるガス流中に噴き出して燃焼させる。再熱燃料としては燃焼速度が早い水素が適当である。水素はタービン内の高速ガス流中でも着火し、燃焼速度が速いので比較的短い距離で燃焼を終える。

タービン内部で水素噴き出しを複数回行えば、多段再熱が実現される。図2に多段再熱再生ガスタービンサイクルの温度・エントロピー線図を示す。多段再熱によってカルノーサイクルと同じ効率をもつエリクソンサイクルの等温膨張過程を近似的に実現できることになるが、排気温度は上昇するので、熱効率の改善には高温に耐える再生器が必要になる。あるいは排熱回収ボイラーを設置してコンバインドサイクル化することによっても熱効率の大幅な改善が期待できる。図3に多段再熱再生サイクルおよびこれと蒸気タービンサイクルを組み合わせたコンバインドサイクルの比出力と熱効率の計算例を示す¹⁶⁾。いずれの場合も多段再熱によって比出力と熱効率の改善が得られる。

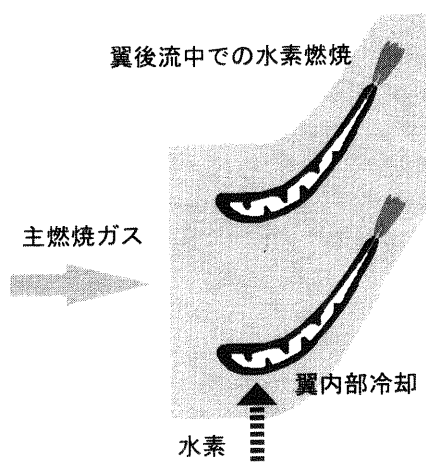


図1 タービン内再熱の概念 (水素吹き出し翼)

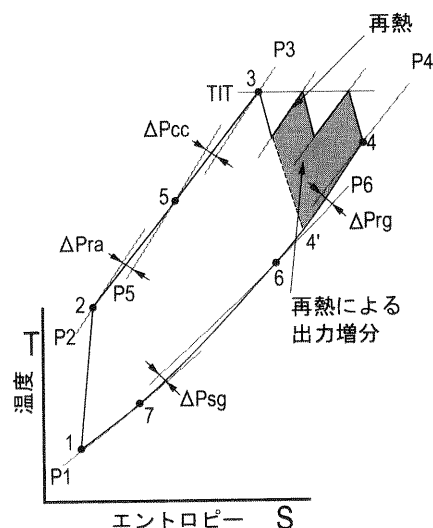


図2 多段再熱再生ガスタービンサイクルの温度・エントロピー線図

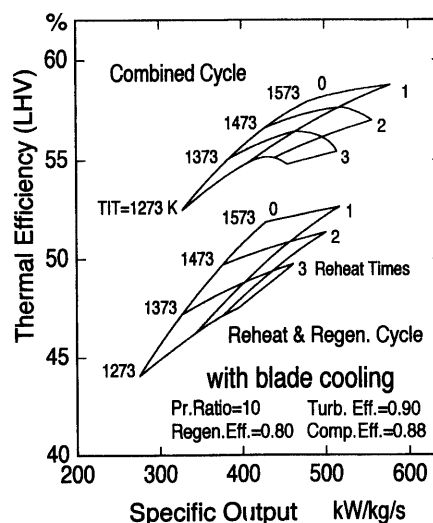


図3 多段再熱再生ガスタービンサイクルの性能計算例

1.3 本研究の経過

水素を燃料とするタービン内再熱の技術的可能性を検討するため、1976年にまず、高温風洞を用いて2次元翼列燃焼実験を行い、翼後縁から流速500m/sの高速流中に水素を噴き出した場合、主流ガス温度800℃以上で水素は安定して着火、燃焼することを確認した⁸⁾。グラビア4にスリット状の翼後縁噴き出し口11個を持つ翼⁹⁾で構成した2次元翼列の下流において水素が燃焼している状況を示す。写真では黒く見える翼の右端から右側に水素が噴き出されている。翼の下流には水素燃焼による高温域が形成され、翼ピッチ方向と翼高さ方向に強い温度不均一を生じる。タービン内部では温度均一化が必要であるため、実験では、翼下流における温度分布の変化を詳細に調べ、均一化に必要な距離に関するデータを得た。また燃焼による火炎からの加熱と翼内部を流れる水素による冷却をうける翼の表面温度をしらべた⁹⁾。

以上の2次元翼列燃焼実験結果により、翼後縁から噴き出した水素が着火燃焼すること、翼は水素により冷却されること、燃焼で発生した熱の主流における拡散状況を把握した上で、実機環境で再熱がどのように実施できるか、すなわち、温度分布をもった主流ガスがタービン内でどのように仕事を発生させるか、実機環境で再熱用水素がうまく燃焼できるか、再熱によってNOxの発生がどのようになるか、再熱部の構造が適切であるか、等の課題を研究するために、試験タービンを製作することにした。試験タービンの設計・製作は1980年から始められ、タービン詳細設計、ノズル翼およびローターの製作、タービン全体の製作および組立が順次行われて、試験タービンの試作は1984年に完了した。

試験タービンの製作が行われている間、当所ではノズル翼を用いた環状翼列試験を実施した¹⁰⁾。その結果、当初予定した噴き出し穴配置では内側ケーシングを過熱損傷する危険が明らかになったため、穴配置の変更を行った。次いで試験タービンに使用する主燃焼器の試験を実施した¹¹⁾。ここでは主燃焼器出口温度分布を一樣にすること、ガス温度制御、排ガス成分測定方法のチェックに重点をおいた。

試験タービンの製作と同時に、試験運転を行う実験場の整備と空気源および動力計の整備は極めて重要な課題であった。

1984年から1986年まで、旧実験棟を解体し、省エネルギー機関実験棟の建設の工事が行われた。試験タービン製作が完了した時、実験棟は建設工事中であったため、実験棟完成までの2年間、タービンは防錆措置を施し、内部に窒素を封入して保管した。

空気源は、主燃焼器単体の実験と試験タービンの初期の空気運転には既設の960kw遠心圧縮機(1940年製)を使用した。圧縮機は老朽化して故障が多く、安定

した長時間の使用は困難な状況であった。タービンの冷却空気は計画当初では主空気源とは別の空気源を予定したが、詳細設計の中で多量の冷却空気量が必要となり、空気流量が不足することになった。これらのため空気源の更新を計画し、1988年に新しい1000kw遠心圧縮機が設置された。新しい圧縮機は入口ガイドベーン制御により少流量の低負荷運転が可能となり、実験の利便性が改善された。

動力計(1968年製)は、制御系統を中心に老朽化が進んでおり、タービン試験中にトリップが発生する(1990年)など信頼性に欠けた。このため1993年に、計測系、自動制御系、非常用および制御用直流電源、運転操作台を更新し、翌年は高圧受電装置の更新を行った。

タービンの運転試験は、1986年に動力計駆動による無負荷回転試験を開始した。しかし、この時軸受潤滑油配管系の油圧計が脱落し、タービンの軸受けを損傷した。修理に6ヶ月を要したが、この際、タービンの後部軸受け周り冷却空気系統改造と出口側ストラットにガス温度計測用のK熱電対12本を取り付けた。また、タービン架台を改造し剛性を強化するとともに、支柱脚を水冷にして熱伸びによる軸心の変化を小さくすることをねらった。

1988年に圧縮機が新設されるのを待って1989年にタービン運転試験を再開した。空気運転試験段階では、タービンの振動が1次危険回転数付近で制限値を超える恐れが生じた。主空気供給管の剛性を強化するとともに、動力計との接続カップリング部を改造してランニングバランスを採用した。また、高回転時にタービン専用潤滑油タンクの油喪失問題が生じたので、タービン軸カップリングハウジング内に油返しを新設するとともに動力計潤滑装置と連結して対処した。空気による定格回転数運転試験を1991年4月に終了した。

所定のタービン入口ガス温度と空気流量による燃焼負荷運転試験を行った後、水素を導入し、水素着火確認試験を1991年7月に行った。水素導入と着火の確認試験は、すべて順調に行われ成功した。

水素の着火確認後、主空気流量、水素流量を順次増やし、経過を観察しつつ試験を進めた。これらの試験では、水素の燃焼効率率は予想以上に低かったため、主燃焼器出口温度分布の改善、温度計測法の改善、低温空気の漏れ込みの防止、タービン入口温度の上昇など、水素の燃焼効率改善のための様々な対策を試みた。

これらの対策によって燃焼効率100%が達成される見通しが得られたので、主空気流量、水素流量、回転速度を変えた一連の最終試験を実施し、1995年3月に全ての試験を終了した。続いて1996年に試験タービンを分解し内部の点検を行った。

以下、第2章で試験タービンの設計製作、第3章で試験装置概要と計測法、第4章で運転試験の結果、第5章

で試験タービンの分解点検、第6章でまとめを記する。

第2章 試験タービンの設計製作

2.1 基本設計

タービン内で再熱を実施する場合、ノズル翼を経て高速となった作動ガスがロータ翼で仕事を行って温度が低下したあと次のノズル翼に入る前にガス温度を上げる必要がある。すなわち、ロータ翼から水素を噴き出し、次のノズル翼に入る前に燃焼を完了させる必要がある。しかし、今回の試験タービンの計画にあたって、高速で回転するロータ軸を通してロータ翼に水素を導くことが技術的に困難と考えたため、水素は静止しているノズル翼後縁から噴き出すことにした。ノズル翼から水素噴き出しを行った場合、本来の再熱を模擬するものとはならないが、タービン内で流れが最も高速となるノズル翼下流での水素燃焼を確かめることができれば、実機としての技術的課題を調査するには十分であると考えた。

表1に試験タービンの計画時の設計要目を示す。試験タービンは、当所の試験設備を使って運転を行うために、動力計および空気源設備の容量の範囲であることが必要であった。動力計は最高回転数は30000rpm、最大吸収動力は1050kWであり能力には十分な余裕があった。一方、設計時に予定した空気源設備の能力は最大空気流量2.6kg/s、圧力比3.0であったため、試験タービンは圧力比2の単段とした。

あらかじめ実施した2次元高温翼列風洞実験の結果から、ノズル翼出口の400m/sの高速流中で水素が着火しうる温度は750℃以上が必要であった。試験タービンではタービン入口温度を900℃とし、ノズル翼出口の平均温度が800℃以上になるようにして、着火条件に余裕をもたせた。ノズル翼の冷却は水素のみで行う。

ノズル翼からの再熱用水素供給量は、基本設計では平均して主流空気1kg当たり167kJのエンタルピー上昇を与えるものとしてガス流量の0.15%wtを供給するとした。これによる主流ガスの温度上昇は約150℃であり、ロータ翼入口における平均ガス温度は相対温度では約1000℃となり、翼の冷却が必要となる。このためロータ翼には比較的簡単な冷却孔を設けて空気冷却することにした。

速度三角形の計算結果を表2に、半径方向3断面の速度三角形を図4に示す。計算では、翼列における速度流出係数は0.97とし、ノズル翼出口とロータ翼の間では周方向速度は角運動量一定として変わらず、軸方向速度が温度上昇による体積膨張で増大するものとし、壁付近の損失は考慮していない。

表1 試験タービンの設計要目

ノズル入口温度	1173 K
ノズル入口圧力	0.196 Mpa
タービン出口圧力	0.106 MPa
回転速度	20000 rpm
空気流量	2.63 kg/s
燃焼ガス流量	2.67 kg/s
再熱入力	440 kW
出力(再熱時)	405 kW
出力(非再熱時)	380 kW

表2 速度三角形の計算

回転断面直径	mm	330	320	290	260
ノズル翼					
流出速度	m/s	382.8	392	422.9	460.2
流出角	度	65	65	65	65
出口温度	K	1110	1107	1096	1082
出口圧力	MPa	0.154	0.153	0.146	0.138
ロータ翼					
周速	m/s	345.6	335.1	303.7	272.3
流入速度(絶対)	m/s	182.7	188.2	217.2	263.5
流入角(絶対)	度	62.3	62.3	62.2	62.2
流入角(相対)	度	0.41	6.16	21.5	33.3
入口静圧	MPa	0.153	0.151	0.145	0.136
入口静温	K	1250	1247	1236	1221
入口全温	K	1264	1262	1256	1250
流出速度(相対)	m/s	516.5	510.9	492	473.7
流出角(相対)	度	61.9	61.0	58.2	55.3
流出速度(絶対)	m/s	267.4	271.4	283.5	293.7
流出角(絶対)	度	24.3	24.3	23.8	23.5
出口静温	K	1151	1151	1153	1155
出口圧力	MPa	0.106	0.106	0.106	0.106

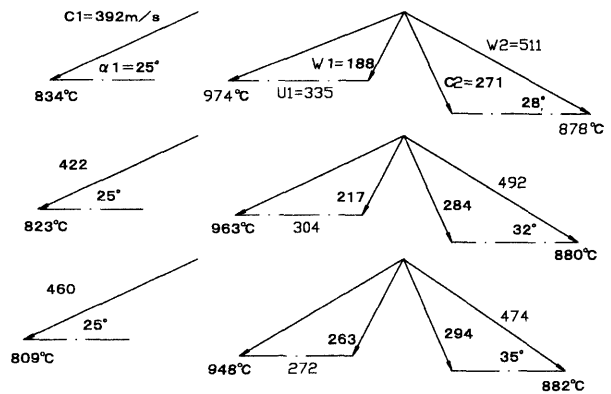


図4 速度三角形

2.2 ノズル翼およびロータ翼の設計と製作

ノズル翼およびロータ翼形状と翼列配置は当所の翼列計算プログラム²⁵⁾を用いて設計した。ノズル翼とロータ翼の翼列設計値を表3に、図5にノズル翼とロータ翼の各翼断面形状および翼列配置の概略を示す。翼形状の詳細は付録1に示す。

流出角は $\cos^{-1}(O/(t-1.6r\cos\zeta))$ によって推定する。Oは翼列スロート部大きさ、tは翼ピッチ、rは翼後端半径、 ζ はスタック角である。ノズル翼は複雑な内部形状を有するので翼高さ方向に形状の変化が小さくなるようにするため流出角一定の設計を行い、翼形状も

翼中心線と腹側形状は翼高さ方向に同一とし、背側の形状のみを変えた。ロータ翼は高さ方向に翼形状を相似とし、流入角が変わるのに対応しては、スタグガー角を変化させて設計流出角が得られるように設計した。翼形状のスタッキングは図心が半径に一致するようにした。

ノズル翼は精密鋳造製とし、翼材料にはIN939を使用した。ロータ翼は翼とロータディスクの機械加工工程を省略するためにロータディスクと翼37枚を一体で精密鋳造することにし、ロータ材料にはIN713LCを使用した。IN939とIN713LCの組成を表4に示す。ノズル翼と一体ロータの鋳造は小松ハウメット（株）で行った。

写真1にノズル翼の外観と水素を翼内部に導入するインサートを示す。図6にノズル翼の高さ中央の翼断面図と中子の形状を示す。水素は翼の外周側（写真1の左側）からインサートを通してノズル翼外周側で全量がまず翼前縁部内側に導入され、前縁を外周部から内周側に向けて冷却した後、再びインサート内部に入りインサートを外周側に向けて流れつつインサート後流側に開けた2列14個の噴出孔から翼中央のピンフィン部に向けて翼を冷却しつつ流れ、後縁の噴出孔から排出される。水素噴き出し孔は7個で、幅1mm、長さ3mm、ピッチ5mmである。孔の総面積は、噴き出された水素の流速が、2次元翼列実験で確かめた吹き消えの生じない範囲にあることを条件にして決定した。しかし、ノズル翼7枚で構成した環状翼列により水素燃焼実験を行った結果、強い旋回のある流れの中で水素が燃焼する場合、主流との密度の違いから高温の水素燃焼ガスの中心部が流路の内側に強く曲げられ、内側ケーシングを過熱することがわかったため、7個の水素噴き出し孔のうち、内径側の4個の孔を溶接でふ

表3 翼列設計値

ノズル翼		
翼枚数	25	枚
外径(前縁)	334	mm
外径(後縁)	330	mm
内径	260	mm
コード	50	mm
スタグガ	36	度
流入角	0	度
流出角	65	度
ロータ翼		
翼枚数	37	枚
ケーシング内径	333	mm
外径	330	mm
内径	256	mm
断面直径	260 290 320	mm
コード	34.8 32.4 30.9	mm
スタグガ	24.2 29.2 34.8	度
流入角	33.3 21.5 6.2	度
流出角	55.3 58.2 61.0	度

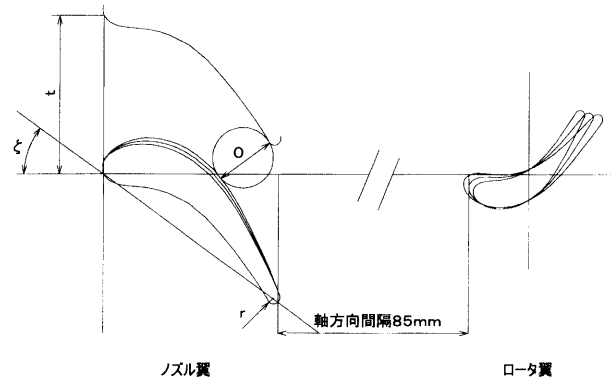


図5 翼断面形状と翼列配置

表4 翼材料IN939とIN713LCの組成

ノズル翼		ロータディスク	
IN939	wt%	IN713LC	wt%
Cr	22.0-22.8	Cr	11.0-13.0
Co	18.5-19.5	Ti	0.4-1.0
Ti	3.6-3.8	Al	5.5-6.5
Al	1.8-2.0	Nb+Ta	1.5-2.5
W	1.8-2.2	Mo	3.8-5.2
Cb	0.9-1.1	Cu	0.5Max
Ta	1.3-1.5	Fe	0.5Max
Fe	0.5Max	Si	0.50Max
Si	0.2Max	Mn	0.25Max
Mn	0.2Max	C	0.03-0.07
C	0.13-0.17	Zr	0.05-0.15
Zr	0.05-0.14	B	0.005-0.015
B	0.004-0.014	S	0.015Max
N2	0.005Max		
S	0.005Max		
Ag	0.0005Max		
Pb	0.00005Max		
Bi	0.00005Max		
Ni	Balance	Ni	Balance

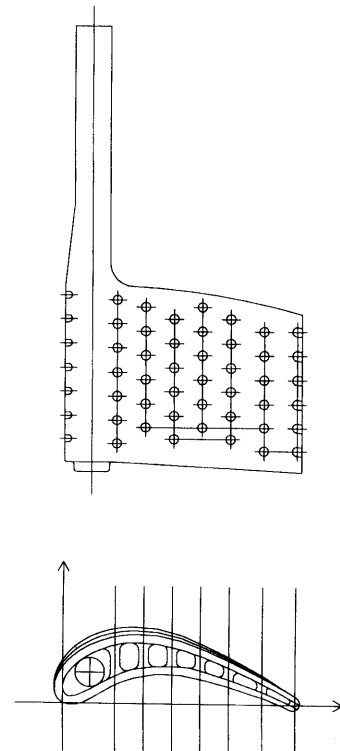
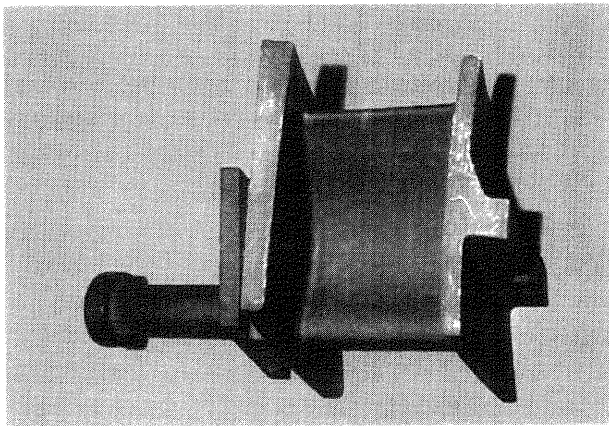
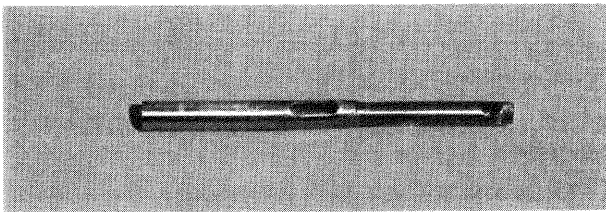


図6 ノズル翼内部形状



(a) ノズル翼



(b) インサート

写真1 ノズル翼外観とインサート

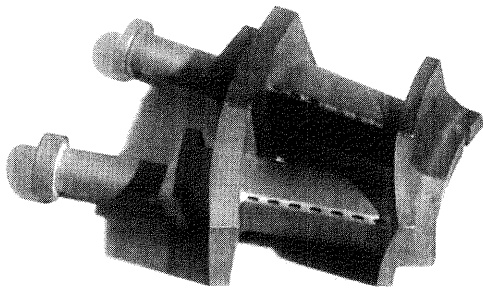


写真2 ノズル翼後縁噴き出し孔

さぐことにした。この設計変更の結果、噴き出し孔の総面積が計画の43%となり、初期設計時に150℃の温度上昇を見込んで水素噴き出し量を主空気の0.15wtとしたが、実際のタービンの試験では主空気の0.1% (温度上昇約100℃) が最大となった。写真2に7個の孔をもつ初期のノズル翼と溶接で孔を塞いで3個にした翼の後縁噴き出し孔を示す。

ローター入口ガス温度 (相対温度) は平均で1000℃となるため、ローター翼は翼中心線上に図7に示すように6本の丸孔を設け、空気冷却を行う。各翼の冷却空気孔はディスクの両側から3本ずつ入り、翼をルート部から翼先端へと通り抜ける。

試験タービンの製作上、技術的に最も困難であった

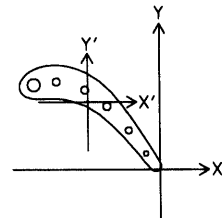
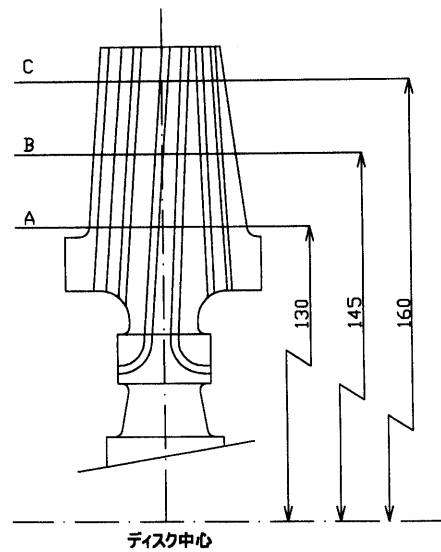


図7 ローター翼内部形状

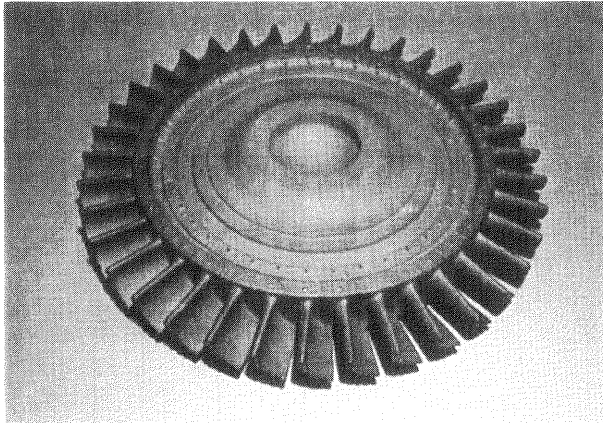
のがこの一体型ローターの鋳造であった。ローターの鋳型にはあらかじめ冷却孔に対応する位置にガラス繊維が組み込まれ、鋳造後にガラス繊維を溶かして冷却孔が開けられる。ガラス繊維の総数は $6 \times 37 = 222$ 本であり、特に翼中央部の2本はディスクの内部で直角に曲げられている。ガラス繊維は鋳造時に湯の強い浮力を受けるため折れやすく、全ての穴が健全な鋳造製品を得るのは非常に困難であったが、製造に携わった小松ハウメット (株) で試作を繰り返し、最終製品を得ることができた。写真3に機械加工前のローターディスクを示す。翼先端とディスク面に冷却孔が見える。

2.3 タービンの詳細設計および製作

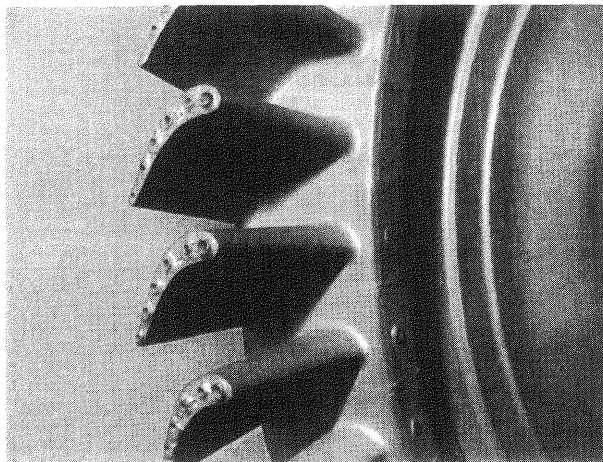
2.3.1 全体構造

試験タービンの詳細設計は (株) 東芝で行った。タービン本体の断面図を図8に示す。外観はグラビア1 (b) を参照。タービン上部に主燃焼器が設置され (グラビア1 (a) タービン内再熱タービン試験装置概観参照)、タービンと燃焼器は2重管で接続される。ローター軸は図の左端でギアカップリングで動力計に接続され、排気ガスは図の右側に排出される。

タービン内部の流路は高温ガス流路部と低温空気流路部からなり、内部ケーシングが両者を隔て、外部ケ



(a) ロータ翼ディスク



(b) 機械加工前のロータ翼先端

写真3 一体型精密铸造ロータ翼ディスク

ーシングが圧力と強度を保つ2重構造となっている。主空気はタービン下部の2つの空気入口からタービンに入り、内部ケーシングを冷却しながら内外ケーシングの間を通り、タービン上部の2重管の外側通路を通過して主燃焼器に至る。主燃焼器で主空気は高温の燃焼ガスとなり、2重管の内側を通過してタービンに戻る。

タービン主流ガス中にノズル翼から噴き出される水素はロータ翼までの空間で燃焼する。ノズル翼後縁とロータ翼前縁の距離は軸方向間隔で85mmとした。この距離は2次元高温風洞実験から噴出水素の燃焼が完了し、混合によって温度の均一化が進むには流れ方向にノズル翼弦長の8倍、軸距離で2倍程度が必要であることを考慮している。この距離が不十分の場合もありうるので、改造によってノズル翼と動翼との距離を変更できる構造にした。

ロータで動力を吸収された主流ガスは後部軸受け支持用ストラットおよび後部排気ケーシングを経て排気管へ導かれる。4本のストラットそれぞれにはタービン出口ガス温度分布を測定するために、半径方向に3点づつ計12本のK熱電対をとりつけた。後部排気ケーシングは環状ディフューザ形にして圧力回復を考慮している。

25枚のノズル翼はノズルリングに組み立てられて外部ケーシングに固定される。写真4およびグラビア1(d)にノズルリングを示す。ノズルリングの中で5枚の翼にはサーモカラーを塗布してある。ノズル翼への水素導入には1本ずつ水素導入管を設けている。水素

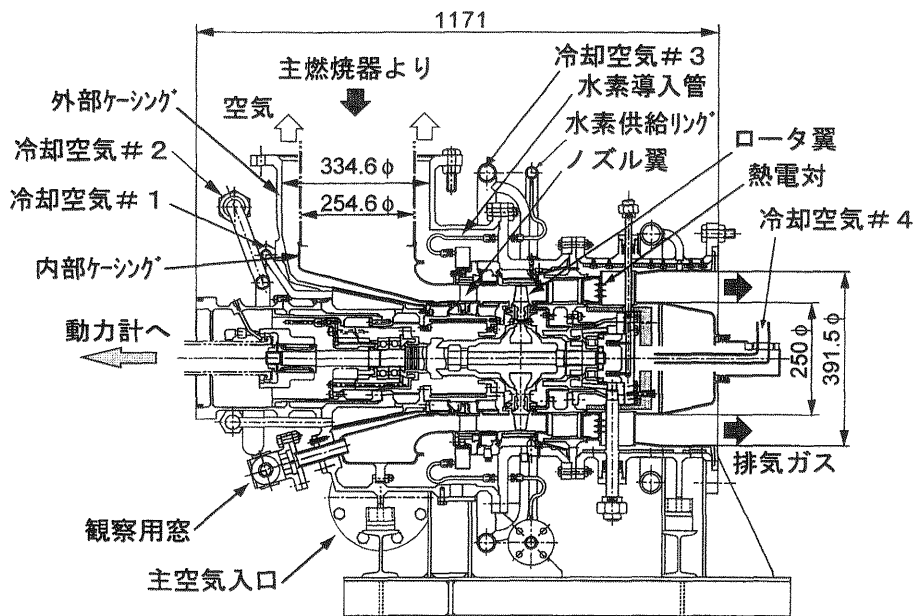


図8 試験タービン断面図

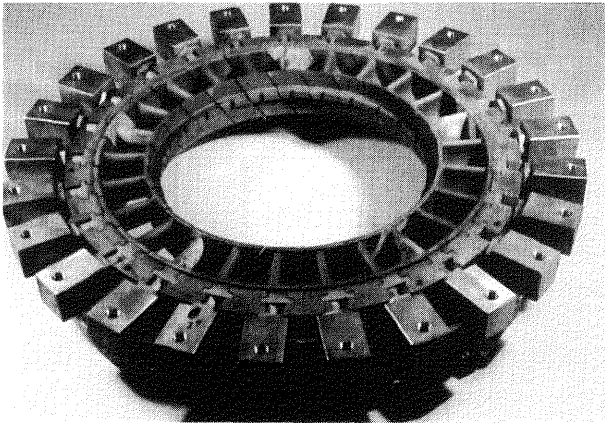


写真4 ノズル翼リングアセンブリー

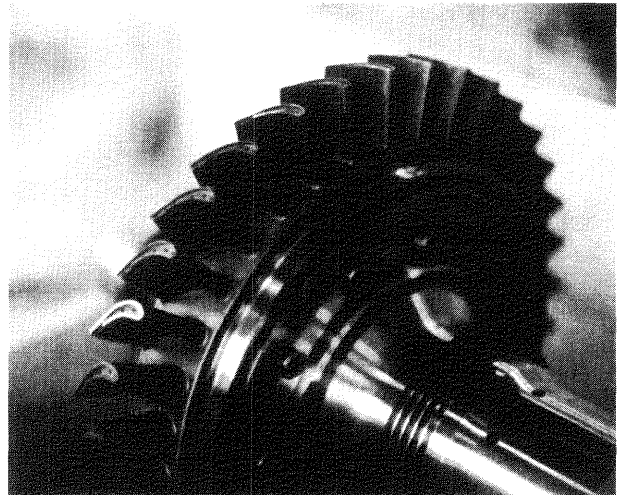


写真5 ロータ翼ディスク

導入管は、ケーシング外側の水素供給リング（図8）に溶接した25本の水素外部導入管を外部ケーシングディスクにおいてリングジョイントで内部導入管に接続する。内部導入管は主空気雰囲気内でそれぞれの静翼と接続し、シールのためには半割ナットを使用してパッキンを押さえた。水素分配の翼毎の偏りは水素の密度と粘性係数が小さく流動抵抗が小さいので特に注意を払う必要がないと考えた。

一体で鑄造されたロータディスクは翼先端とディスク両端面を機械加工し、両側からロータホルダーで支えボルトにより締結されている。ホルダーには心棒が挿入され、焼きばめとナットにより締め付けられている。グラビア1 (e) にロータ全体を、写真5にロータ翼部を示す。翼先端は冷却空気が翼後流側に流れるように機械加工で幅0.6mm高さ2mmのフェンスを残してある。但し腹側で後縁から8.5mmまではフェンスが削り落としてある。ロータ翼先端部とシュラウドリングの隙間は安全をみて約1.5mmをとっている。ロータ

はタービンケーシングの前部では2列組み合わせアンギュラ玉軸受け（動力計側）で後部では円筒ころ軸受けで保持される。潤滑方式はジェット給油である。

ノズル翼とロータ翼の間的高温ガス流路壁面は水素燃焼によって高温に過熱される可能性があるため、壁裏側から冷却空気を吹き付けて冷却する構造とした（図9参照）。

水素の燃焼状況を観察するため、動力計側の外部ケーシングの下部に観察用窓を設けた。しかし、ノズル翼を上流側から見る位置にあつて視野が限られていること、ガラス窓が燃焼ガスによって汚れやすく不鮮明になりやすいこと、運転中に直接のぞき窓に近寄ることが困難であることのために、この観察窓では観察しなかった。なお、水素の燃焼の様子は、後述するように下流側の排気管の曲がり部からビデオカメラによって観察することができた。

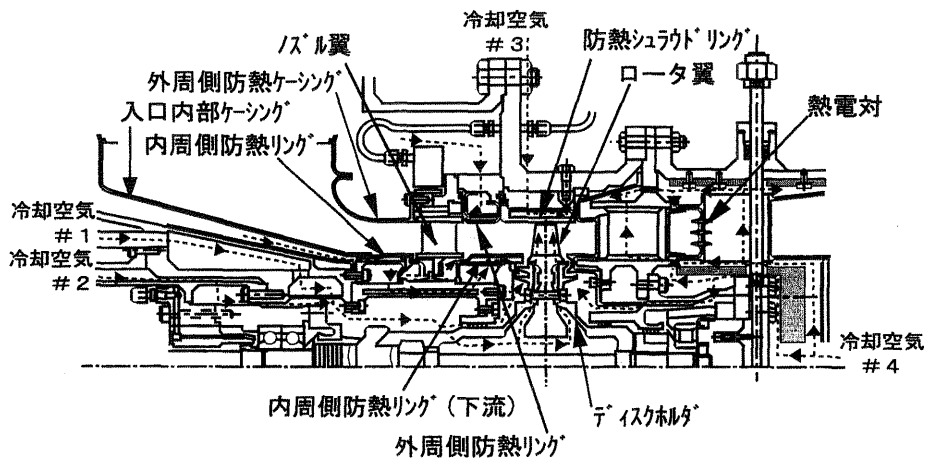


図9 タービン内部ケーシングと主要防熱部品

タービンは4本の箱形の脚で台座に据え付ける。外部ケーシングは熱膨張に対して前部支持脚で軸方向に固定され、後部は軸方向、左右方向自由に動くよう支持されている。運転中、タービン本体の温度上昇によって動力計と試験タービンの芯がずれることを防ぐため、タービンの脚は水で冷却した。

2.3.2 冷却空気系統

タービンの内部ケーシング全般、燃焼器ライナー、燃焼器とタービンをつなぐ2重管の内部ライナーの冷却は、その外側を流れる主空気によって冷却する。図9にタービン内部ケーシング・主要防熱部品と冷却空気流れの概略を示し、図10に試験タービンの冷却空気系統図を示す。

ノズル翼下部および下流直後の内周側と外周側防熱リングは主空気の一部を使用して冷却し、冷却後はタービン主流に流入する。設計では主空気流量の約6%が流入する。

主空気とは別に5系統の冷却空気を使用して次のタービン各部を冷却する。系1と系2はタービン前部から内周側ケーシング内側に供給され、ローターディスク、ロータ翼を冷却する。系3はタービン中央外部ケーシングから供給され、防熱シュラウドリングを冷却する。系4は排気ケーシング後方から供給され、排気ケーシング、後部軸受け箱を冷却する。図10中の冷却空気量は設計値であり、試験中は各経路の弁を調整してこの数値を保った。以上の系の冷却空気は大部分がロータ以降の隙間から主流に流入するが、設計では系1と系2の空気量の27%が前部後部軸受けの潤滑油封じ空気として外部に流出し、系4の5%がタービン排気管との接続部シールから排気流に流出する。系5はノズル翼から水素を噴き出さないときに冷却空気を供給する。

図10に示した主燃焼器に流入する主空気の割合は、燃焼器における燃料消費量と温度上昇から推定した数値である。残りは内部ケーシング接続部から高温ガス側へ漏れる主空気となる。

高温ガス通路を構成する内部ケーシングは内周・外周側とも流れの方向に数個に分割されており、それぞれは熱膨張による変形を避けるため、隙間のあるはめあわせによって接続されている。その隙間から圧力差によって高温ガス側に流れる低温空気の量は、隙間の大きさによって決まるため、予め計算で予測することは困難であったことから、設計時には無視したが、実際にタービンを運転した結果、無視できない量であることが分かった。このような予定外の低温空気のもれによって、試験結果で後述するように試験タービン出力は設計目標からかなり下回るようになった。また、水素燃焼条件として最も重要なノズル後縁部の主流温度を低下させ、さらに隙間の大きさが周方向に均一ではないため、隙間の大ききなところでは局所的に主流温

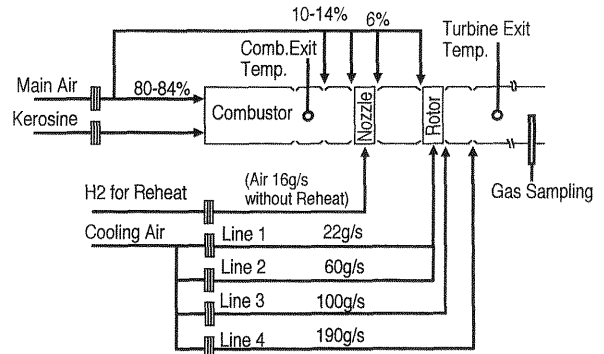


図10 冷却空気系統図

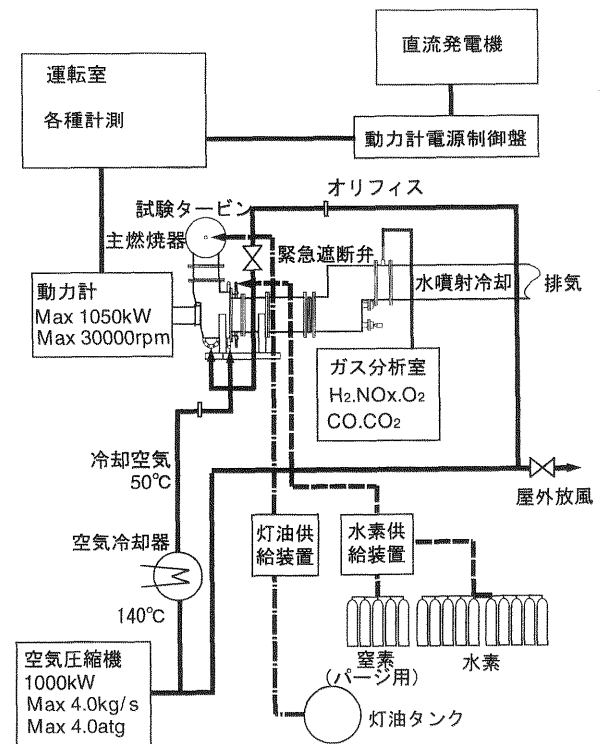


図11 試験装置全体系統図

度の大きな低下を生じさせ、この位置に噴き出された水素の着火を困難にし燃焼効率を悪化させる原因となった。

第3章 試験装置と計測

3.1 試験装置

3.1.1 全体配置

試験タービン運転設備の全体系統図を図11に、試験装置の全景を写真6、試験タービン部をズームアップしたものをグラビア1 (a) に示す。以下に詳細を記す。



写真6 タービン試験装置全景

3.1.2 動力計

動力計は(株)明電舎製の直流電気動力計で、制御は直流電動発電機によるワードレオナード方式、容量は吸収動力1050kW、駆動動力1100kW、最大試験回転速度は低速軸1800rpm、高速軸30000rpmである。動力計出力は当所の所内電力として使用される。

試験タービンの設計回転数は20000rpmであり、タービン軸は動力計本体に内蔵の速度比17.05の遊星歯車で増速された高速軸に接続される。

試験タービンは動力計高速軸側の据え付け台に固定され、専用の高速軸カップリングを用いて動力計と接続される。動力計とタービンの運転・監視・計測は動力計運転室で行う。監視・計測の詳細は3.2で述べる。

3.1.3 主空気および冷却空気

タービン主空気源および冷却空気源として980kW誘導電動機で駆動される中間冷却2段遠心空気圧縮機を使用する。圧縮機出口圧力は最大0.39MPa(ゲージ)、最大空気流量は4kg/s、吐出空気温度141℃であり、出口空気圧力あるいは流量は圧縮機のインレットガイドベーン開度を操作して制御する。

主空気は圧縮機出口から300A管で供給され、オリフィス流量計、緊急遮断弁、電動弁、125A手動弁を経て、タービン外部ケーシング内に入る。主空気流量は圧縮機出口圧力と屋外放風弁の開度、および電動弁を操作して調整する。緊急遮断弁は空気圧で駆動され、停電やタービンに重大な異常が生じた場合に自動あるいは手動で主空気を遮断することができる。

タービン冷却用空気は空気圧縮機の空気を分岐して

冷却器に通して約50℃程度まで温度を下げて100A管で供給する。冷却空気は5系統に分かれ、流量調整弁を操作してそれぞれ、所定の流量に保つ。各系統の流量はそれぞれオリフィス流量計で測定する。同じ100A管から主燃焼器着火トーチ用空気、タービン排気管シール用空気も供給する。

3.1.4 主燃焼器および主燃料供給系統

主燃焼器はタービンの上方に独立した架台上に水平に設置され、L型の2重管でタービンと接続される。タービンとの接続部は外管とタービンの熱膨張を吸収するためグラントバッキン方式とした。

主燃焼器の概観を写真7に断面構造を図12に示す。主燃焼器は逆流缶型で内筒は日立PG5361用のものを使用している(写真8参照)。低温の空気は燃焼器内外筒の間を通り、内筒頭部のスワラーと内筒周辺の1次、2次空気穴から内筒に入る。低温空気の燃焼器入口部には、燃焼器内の流れを周方向に均一にするため、整流羽根(写真9)、旋回羽根(写真10)を設けた。図12のA断面ではタービン入り口圧力、タービン入口温度(または燃焼器出口温度)を計測する(写真11参照)。B断面には温度計測に輻射の影響を考慮して追加設置されたシールド付き熱電対6本を設置したが、その様子を写真12に示す。

主燃焼器の燃料は灯油を使用する。図13に燃料油供給系統図を示す。燃料噴射弁は、川崎重工S2A-01用のデュアルオリフィス圧力噴霧型のもので、入り口圧力2.75MPa、プライマリー燃料流量0.012kg/s、メイン燃料流量0.77kg/sである。着火はプロパンガストーチを

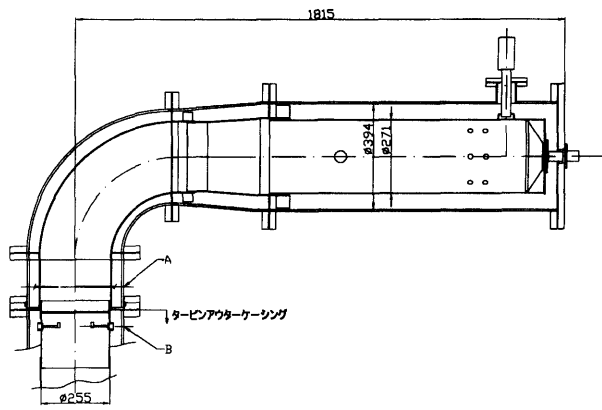


図12 主燃焼器断面図

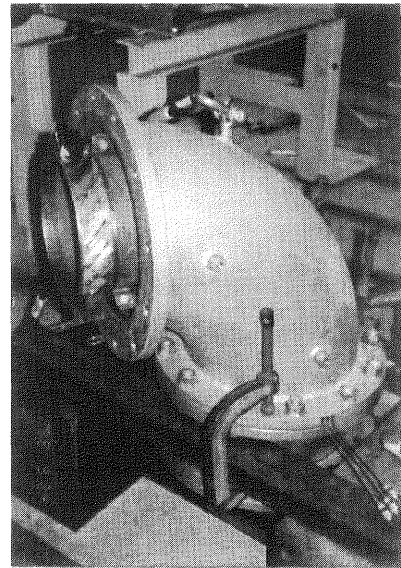


写真10 燃焼空気旋回羽根

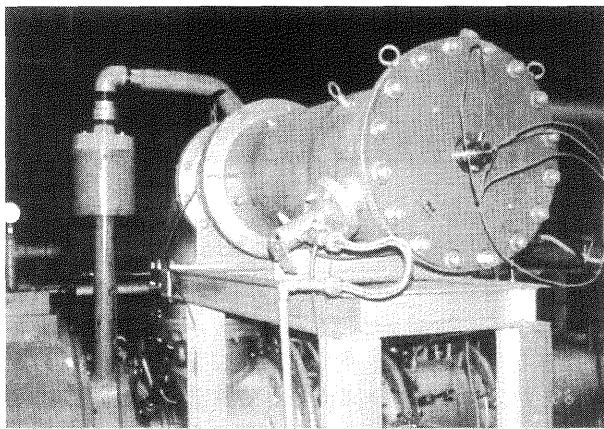


写真7 主燃焼器概観

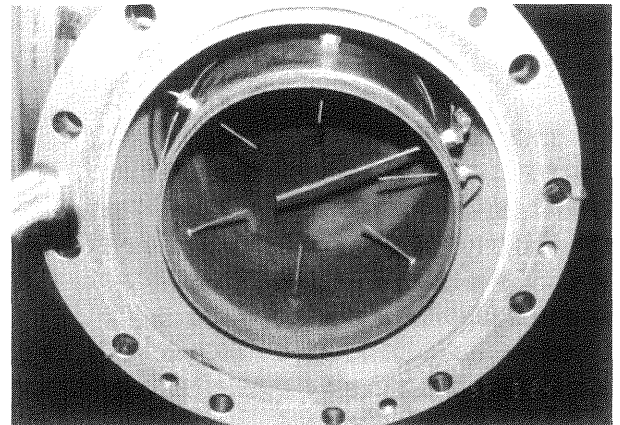


写真11 タービン入口温度（シールド無し熱電対）・圧力計測

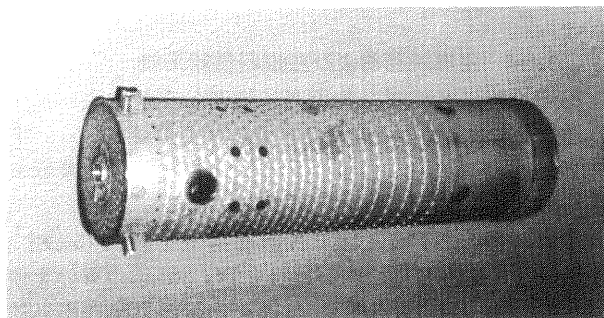


写真8 主燃焼器内筒

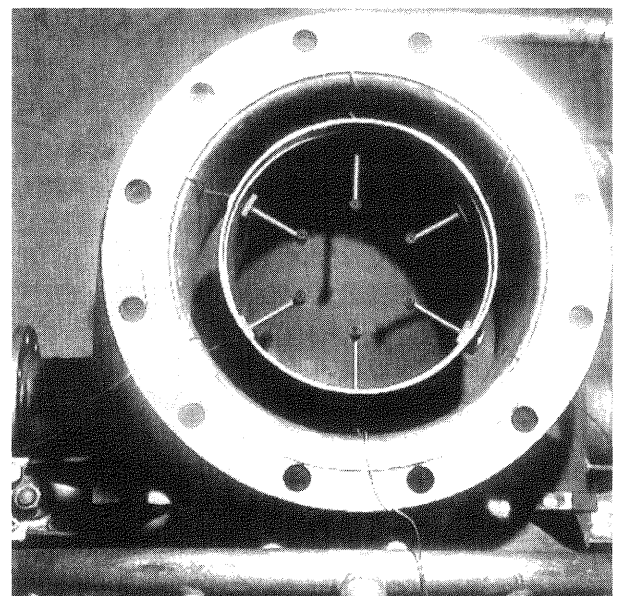


写真12 タービン入口温度計測（シールド付き熱電対）

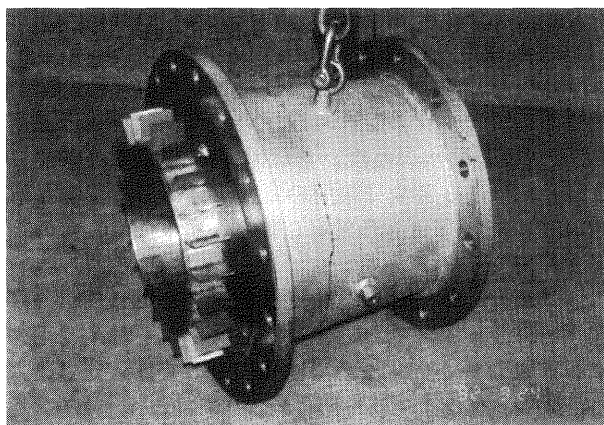


写真9 燃焼空気整流羽根

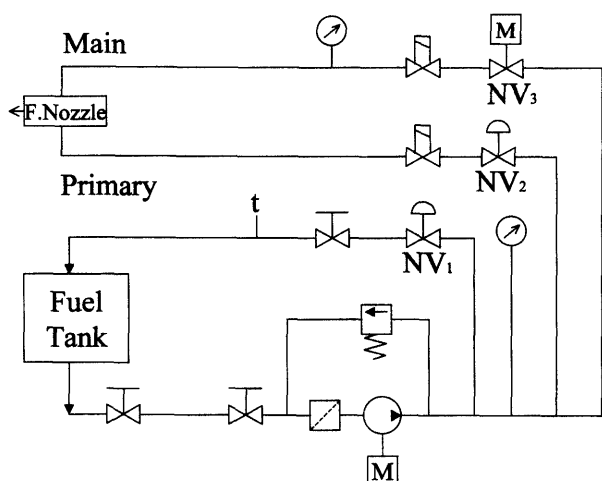


図13 燃料油供給系統図

利用し、プライマリー燃料は常時噴射し、燃焼器出口温度の制御にはメイン燃料流量を制御する。メイン燃料の噴射圧はニードル弁NV3をステップモータで自動操作させて変化させる。図14に燃焼器出口温度制御系統図を示す。始動時設定圧力は1.96MPaとし、実験時のメイン燃料圧力はおよそ0.13~0.98MPaであった。燃料消費量は燃料タンクの油面高さの変化をカセットメータと時計で測定し、燃料の比重と油タンク断面積から計算で求める。

3.1.5 水素供給系統

再熱水素の供給系統図を図15に示す。ノズル翼に水素を供給しない非再熱運転時にはノズル翼は空気で冷却する。このため、水素供給の前後には、窒素を流して冷却空気と水素の混合が生じないようにするので、水素供給系統には窒素および翼冷却空気系統も含まれる。空気、窒素、水素の切り替えは水素流量制御盤で電磁弁を切り替えて行う。

水素供給源として、当初は36本組のカードルを使用する予定であったが、安全上の配慮から7kl入り水素ボンベ(最大時は15本)を使用した。ボンベから出た水素は減圧弁、浮子式流量計、水素流量調整弁を経て、20mm銅管に入る。さらに、渦流量計、逆火防止弁を経て、タービンの水素供給リングに入り、6mmの水素導管により25枚のノズル翼に供給される。

水素流量制御は手動で行い、浮子式水素流量計は流量のおおよその監視のために使用し、試験データとしての水素流量は渦流量計により測定する。実験中は水素の消費が進むにつれて膨張によってボンベ中の水素の温度が下がるので水素流量が一定になるように手動で微調整を行った。渦流量計が正常に作動するためには圧力0.196MPaでの供給が必要であり、ボンベ元圧1.96MPaを使用限界の目安とした。

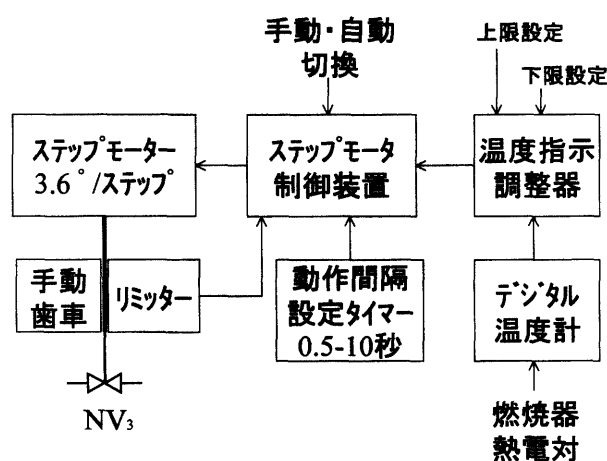


図14 燃焼器出口温度制御系統図

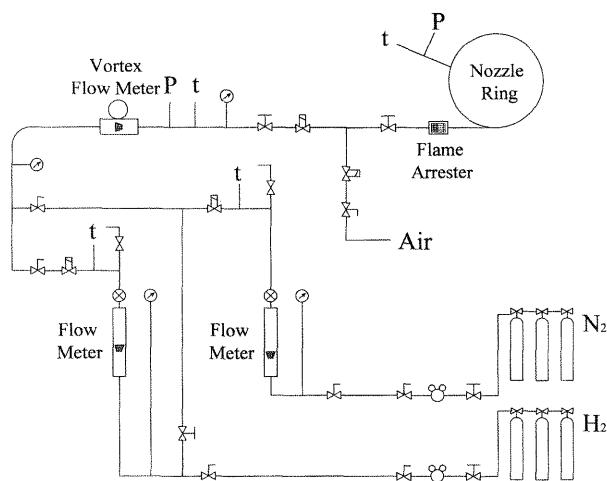


図15 水素供給系統図

3.1.6 排気系

タービン排気はタービン出口から計測用水冷排気管1、水冷伸縮継ぎ手管、クランク型水冷排気管、計測用水冷排気管2、水噴射排気管、消音器を通して屋外に排出される。図16にタービン排気系統の一部とタービン内ガス温度・圧力測定位置、分析ガス採取位置を示す(図11参照)。

タービンは計測用水冷排気管1とは熱膨張を吸収するためにグランドパッキン方式で接続し、冷却空気系からシール用空気を供給する。計測用水冷排気管1ではタービン出口圧力計測およびガス分析のためのガスサンプリングを行う。なお、水冷排気管1は内部にリデューサを有しており、ここを介してタービン後部排気ケーシングに冷却空気が供給されるとともにタービン出口温度および後部軸受け温度計測用熱電対のリード線がケーシング外部に導かれる。写真13に計測用水冷排気管1の出口側からタービンを臨む様子を示す。手前からリデューサ、4本の全圧管、ストラット、ロ

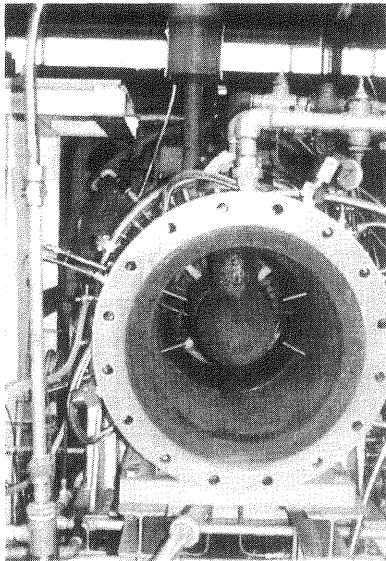


写真13 タービン出口排気管よりタービン出口を臨む

ータ翼が見られる。

水冷伸縮継ぎ手管は熱膨張の吸収を強化したものである。

クランク型水冷排気管は、最初のL部に3カ所の覗き窓をもうけており、この内2個にビデオカメラを設置した。これにより約2/3の枚数のノズル翼から噴き出された水素がタービン内部で燃焼する状況がモニターできた。

計測用水冷排気管2で、本報告で後述する最終試験のガス分析用ガスをサンプルした。

高温の排気ガスは、水冷管の下流で水噴射により200℃程度に温度を下げられ、消音器を経て、屋外に放出される。水噴射ノズルは12個を使用し、排気ガス温度によって自動的に水噴射ノズル弁を開閉して水噴射量を制御する。

3.1.7 潤滑系

タービンおよび動力計の潤滑油系統図（仕様は設計値）を図17に示す。

タービン潤滑油系統はタービンが20000rpmと高速で回転することから空気運転時初期までは動力計とは独立に容量150Lの油タンクを設けて構成されていた。しかし20000rpmの高速運転時になるとカップリングにおいてタービン側潤滑油が動力計側潤滑油戻り系統に流れ込み、タービン用潤滑油が不足する事態が生じた。このためこれ以後は、カップリングカバー内には油返しを取り付け、タービン側と動力計側の戻り油が混ざらないようにするとともに、動力計の潤滑油を分岐してブースター潤滑油ポンプで加圧し、タービンの前後軸受とカップリングに給油した。軸受からの戻り油はオイルミストが非常に多かったので一度オイルサンプ

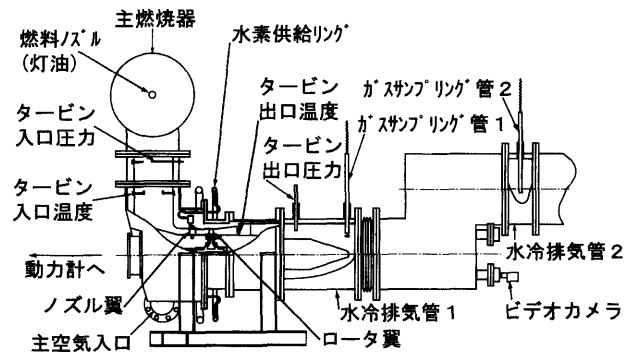


図16 タービン排気系統とタービン内ガス温度・圧力測定位置、分析ガス採取位置

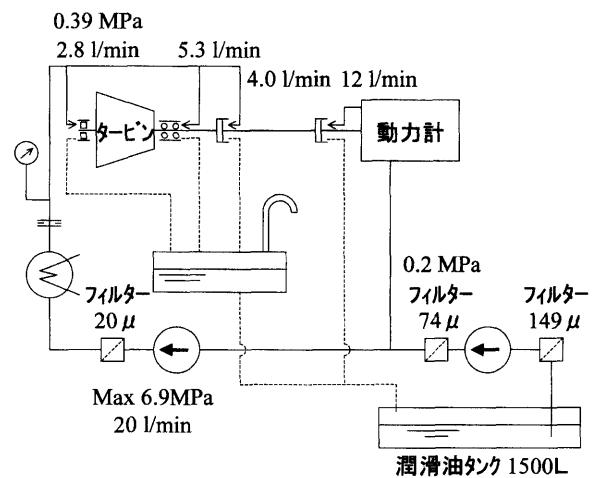


図17 潤滑油系統図

に入れてから動力計の潤滑油戻り管に戻した。軸受けの封じ空気は戻り管の途中からファンにより吸引し、オイルミストを分離したのち、大気に放出した。

タービン潤滑油供給圧は、当初の設計圧力は0.39MPaであったが、空気運転中に15500～16000rpm付近で振動値が異常に大きくなるのが判明した。戻り油温に注意しながら供給油圧を下げたところ振動値が下がることが分かり、以後は0.25～0.29MPaに設定圧を変更した。

3.2 監視・計測およびデータ処理

3.2.1 タービン計測全般

排気ガス分析を除くすべての監視・計測データは動力計制御室にとりこみ、ここで運転の監視と記録を行った。図18に計測系統図を、写真14にパーソナルコンピュータ計測システムの概観を示す。

主な計測項目はつぎの通りである。

- ・動力計回転数、トルク
- ・タービン振動（1カ所、上下・左右）

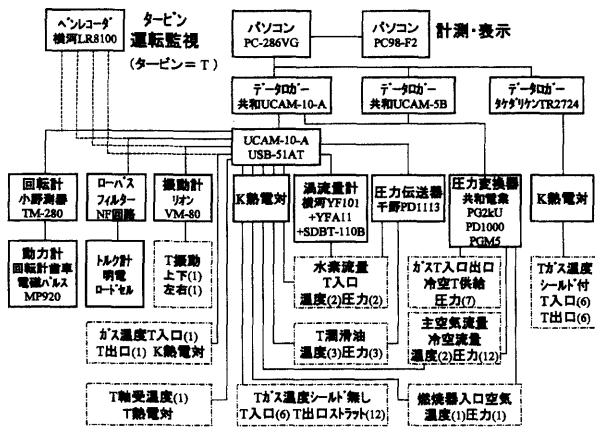


図18 計測系統図

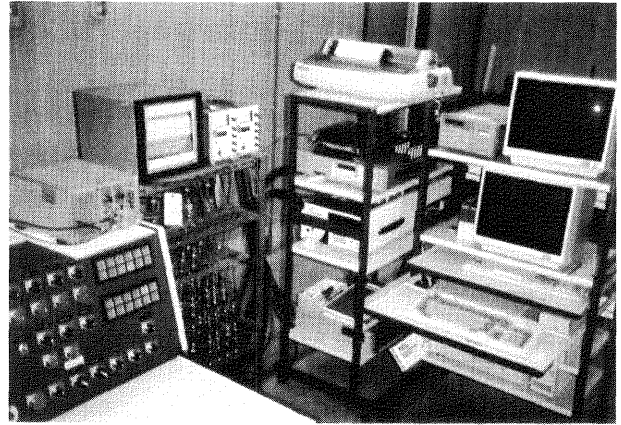


写真14 制御室パーソナルコンピュータ計測システム概観

- ・タービン軸受温度
- ・タービン潤滑油圧力および温度 (入口、出口)
- ・主空気流量
- ・冷却空気流量 (5系統)
- ・主空気および冷却空気のタービンケーシング流入口における温度および圧力
- ・水素流量、タービン流入口における水素の圧力と温度
- ・燃焼器入口空気圧力および温度
- ・タービン入口圧力
- ・タービン入口ガス温度 (シールド付き6点およびシールドなし6点各1断面)
- ・タービン出口ガス温度 (ストラット上12点、シールドなし)
- ・タービン出口ガス温度 (出口水冷ガスサンプル管先端6点、シールド付き)
- ・タービン出口圧力

これらの測定データは全てデータロガーにとりこみ、約5秒間隔で GPIB インタフェースを通してパーソナルコンピュータに送った。コンピュータは流量計算や零点補正などの処理を行い、ディスプレイ画面に表示するとともにハードディスクに記録した。測定データを十分に画面表示するために2台のパーソナルコンピュータを GPIB インタフェースで接続して使用した。プリンターには必要に応じて10回の平均値を計算して出力した。振動および潤滑油の圧力と温度については測定値があらかじめ設定した危険値をこえる場合はコンピュータで警報を発するようにした。付録2に BASIC で構成した計測監視プログラムを示す。

タービン入口温度、タービン出口温度、回転速度、トルク、振動などの監視上重要なデータについては、直接ペンレコーダに連続的に表示・記録した。

その他、排気管内ガス温度 (水噴射下流)、ガスサンプルリング部ガス温度、タービン排気管冷却水温度、サ

ンプルング管冷却水温度、サンプルラインリボンヒータ温度などの監視データは打点式記録計に表示・記録した。

3.2.2 タービン入口・出口の温度および圧力

図16にタービン入口温度・圧力と出口温度・圧力の測定位置を示す (図12参照)。

タービン入口ガス温度は図16に示すように燃焼器出口とタービンとの中間ダクトの2断面 (図12のA、B断面) で測定した。

試験の当初、A断面に幅射シールドをつけない熱電対3本を挿入したが、3本の温度差が大きいため数を6本に増やし、さらに温度測定値に幅射の影響を考慮して、B断面に幅射シールドをつけた熱電対6本を追加した。A、B断面における測定値の関係はガス流量とガス温度レベルを変えてタービンを運転して調べた。図19にその関係を示す。測定した温度域でB点温度はA点より約40℃～70℃高い値となる。本報告におけるタービン入口温度 (TIT) は全てB断面測定値を用い、初期の試験でB断面測定値がない場合はA断面測定値をB断面測定値に換算して示している。

タービン出口温度は、出口側の4本のタービンストラットに半径方向に3点ずつ、計12点のK熱電対で計測した。熱電対には幅射シールドは取り付けしていない。別に計測用水冷排気管1にガスサンプル管先端にシールド付き熱電対をつけたもの6本を挿入して計測したが、冷却水の影響でストラットより温度が低く計測された。そのため試験結果の整理にはストラット上の温度の平均値を用いた。

タービン入口圧力として、入口ガス温度測定位置A断面の中央で全圧を測定した。タービン出口圧は、タービン出口の計測用水冷排気管1に全圧管4本を挿入して測定した。ただし、タービン出口圧用の圧力変換器チャンネル数は1個であるのでタービン性能計測時にはコックを切り替えて出口圧を計測した。

3.2.3 動力計測

回転速度は動力計低速軸に取り付けられた歯数600の歯車からの電磁パルスで測定する。動力計のトルクは動力計本体（固定子側）の腕にかかる力をロードセルにより測定する。ロードセルの出力は動力計の慣性と速度制御の影響を受けて激しく変動するため、ローパスフィルターに通して0.2Hz以上の変動分をカットした。

ロードセルの校正は、検定用重錘を用いて、ロードセル交換時に行う。高速軸の遊星歯車は動力計本体に内蔵されているため、タービン出力を求める際に動力計の歯車損失を考慮する必要はない。

動力計始動時にはロードセルに過負荷となる場合があり、タービンを始動させた後で動力計クランプを開にする。

3.2.4 振動監視

タービンの振動はタービンケーシングの脚上部に加速度式振動計を取り付けて監視する。空気運転中には4本の脚のそれぞれに上下及び左右、計8点の振動センサーを取り付けて計測を行った。動力計側の脚の振動が比較的小さいことが確認されたので、監視箇所は後部脚1本とし、上下および左右、計2カ所を運転中常時監視した。脚は水で冷却しているがタービンケーシングからの熱伝導と輻射により、振動センサーが加熱され誤指示するおそれがあるため、振動計センサー取り付け台も水冷した。

3.3 排気ガス計測

3.3.1 計測項目とサンプリング

試験タービンの排気ガス特性に関しては、NO_x、CO、CO₂、O₂および残存H₂濃度を測定した。測定値は本報告ではすべて体積分率で表示する。測定に用いた計測器および測定系統図を図20に示す。

図20 (a) は図16のサンプル1断面とサンプル2断面の2つの断面で計測する時の機器構成を示し、図20 (b) はサンプル2断面だけで計測する時の機器構成を示す。断面1はタービン出口フランジから約420mm下流に位置し、周方向6カ所にガスサンプリング管の挿入穴を設け、周方向および半径方向分布を測定することができる。断面2はタービン出口フランジ面からL型曲がりを経過した約1580mm下流に位置する。断面2の成分ガス濃度分布は、予備試験でほぼ均一になっていることが確かめられたので、中心部のサンプリングを断面の平均値とした。本報告で後述する最終試験結果は断面2における測定値を用いている。すべての成分ガス濃度を調べるためにはサンプリング管1本のサンプリングガス量が不足するため、断面2ではほぼ同位置に2本のサンプリング管を挿入して、サンプリングを行った。

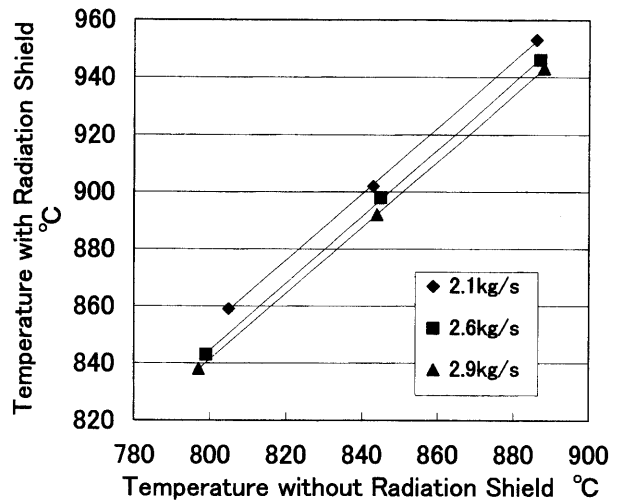


図19 タービン入口温度・輻射シールドの影響

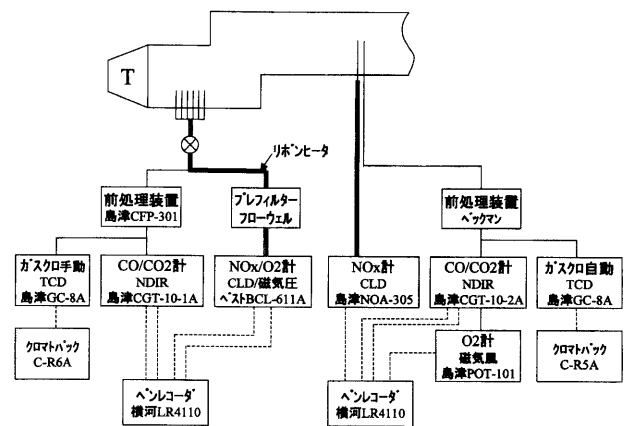


図20 ガス計測系統図 (a)

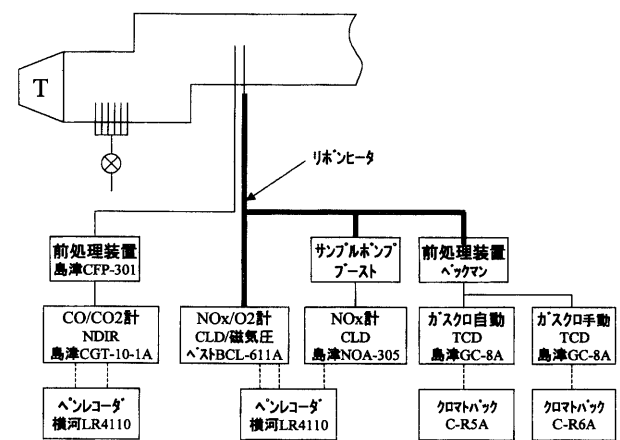


図20 ガス計測系統図 (b)

サンプリング管は高温ガス中に挿入するため水冷する。しかし冷却しすぎるとガス中の水分の凝縮が生じ、配管が塞ったり、管壁に水が付着してNO₂が吸収されるので、冷却水の温度はサンプリング管入口で60℃、出口で90℃以下に保つように、冷却水温度と水量を調節できる専用の冷却水ループを準備した。サンプル1断面測定に使用したサンプリング管の先端には幅射シールド付きのシース熱電対をとりつけ、サンプリング位置のガス温度が同時に測定できる。

サンプリング管からガス分析装置までは外径6mmのテフロンチューブで接続し、外面をリボンヒーターで約60℃に保温した。

H₂、O₂、CO、CO₂濃度測定ラインでは前処理装置で排ガス中の水分を除去し、NO_x測定ラインではNO₂の水への吸収誤差をさけるために前処理装置で水分除去は行なわなかった。

3.3.2 測定器

H₂はガスクロマトグラフにより測定した。ガスクロマトグラフによる1回の測定には2~4分が必要であるが、試験タービンの運転中、残存水素濃度はしばしば変動することがあり、できるだけ連続に近い測定が望まれた。このため、測定間隔が4分の自動ガスクロマトグラフと2分の手動ガスクロマトグラフを用いて、ほぼ1分に1回の測定を行った。

NO_xは化学発光式NO_x計 (CLD) を用いて測定した。NO_xはNOとNO₂の和と考える。4.2.4で述べるように、水素燃焼を行った場合、NO_x中のNOとNO₂の比は残存水素濃度によって大幅に変わる。化学発光式検出器はNO濃度のみを測定するもので、NO₂を含む全NO_x濃度の測定には採取ガスをコンバータに通し、NO₂をNOに変換して測定する。2台のNO_x計でNOとNO_xを別に測定すると、ゼロドリフトやスパンの時間的な変化が測定器で異なって生じるため、2つの測定値の差からNO₂濃度を求めると誤差が大きくなる。このため1台を監視用として常時NO_xを測定し、1台はコンバータ回路を切り替えて、NOとNO_xを交互に測定した。コンバータ切り替えを行う場合、計測器内部のガスの容量を考慮する必要があるが、ほぼ40秒で測定値が定常値となることを確認したので、切り替えは1分毎に行った。コンバータによるNO₂からNOへの変換率は96~98%で、NO₂量が多い場合はコンバータの変換効率を考慮する必要がある。本実験に際してはあらかじめコンバータ変換効率を校正実験で求め、NO_xとNO測定値の差の見かけのNO₂濃度から真のNO₂を計算で求めた。

O₂濃度の測定には当初、磁気風式測定器を用いたが、採取ガス中に濃度の高い未燃の水素が含まれると、誤差を生じるため、磁気圧式測定器を用いた。COおよびCO₂は赤外線式分析計 (NDIR) を用いた。

各測定器共、実験の測定開始直前と終了直後に標準ガスを用いてキャリブレーションを行った。連続計測値は多チャンネルペンレコーダで連続記録するとともに、1分毎にデジタル出力を行い、結果の整理にはデジタル出力の平均値を使用した。

3.4 タービン運転手順

試験タービンの運転には表5に示す運転制限値および規定値が設定されている。これを基にタービンの運転は実験目的に応じて様々に実施されてきた。最終運転シリーズにおいては表6に示すような運転手順に固まり、表6にはタービン定格の主空気流量2.6kg/s、回転数20000rpm、水素再熱運転時のガス分析計測実験の場合を例示している。

表5 タービン運転制限値および規定値

項目	単位	警報	制限値 (トリップ)	備考
振動(p-p)	μm	23	45	
危険速度域	μm	—	63	
入口油温	°C	50	55	設定値35°C以下
軸受け裏り油温度	°C	79	82	
油圧	kg/cm ²	2	1.6	設定値2.5~3
タービン排気温度	°C	900	—	
回転数	rpm	—	21000	
入口圧力	ata	2.1	—	
規定値				
昇速率	%/sec	0.2	—	40rpm/sec
減速率	%/sec	0.4	—	80rpm/sec
ターニング回転数	rpm	100	—	
ターニング時間(終了時)	h	1	—	

表6 タービンの標準的運転手順

1	圧縮機起動
2	タービン冷却空気供給
3	タービン潤滑油供給
4	主空気電動弁開、最小流量0.5kg/s
5	タービン起動、最低回転200rpm(保持10分)
6	動力計クランプ閉
7	主空気流量増、2.0kg/s
8	3000rpmへ増速(加速度2400rpm/min)
9	着火、プロパントーチ
10	プライマリー着火(250°C)、プロパンoff、保持10分
11	メイン着火(500°C)、保持10分
12	12000rpmへ増速(9000rpmで1分保持)
13	温度上昇800°C(100°C/6分)
14	主空気流量増2.6kg/s
15	温度上昇910°C
16	20000rpmへ増速
17	ノズル翼冷却N ₂ へ切換(保持1分)
18	H ₂ 噴き出し
19	ガス分析計測(16分/H ₂ —流量設定)
20	回転数切換計測(18000rpm、16000rpm)保持4分
21	ノズル翼冷却空気へ切換
22	12000rpmへ減速(2400rpm/min)
23	700°Cへ温度低下(6分)
24	空気流量減2.0kg/s(4分)
25	500°Cへ低下(保持10分)
26	3000rpmへ減速
27	メインoff(保持10分)
28	プライマリーoff(保持10分)
29	主空気流量ゼロ
30	最低回転(保持30分)
31	動力計クランプ閉
32	タービン停止
33	潤滑油、冷却空気閉
34	圧縮機停止

第4章 試験結果

4.1 試験タービン運転経過

1991年3月に空気運転による領収試験終了後、燃焼運転のための設備の整備と点検を行い、最初の燃料着火運転を1991年7月10日に、タービン入口温度(TIT)800℃までの温度上昇試験を7月15日に実施した。次いで7月17日には最初の水素導入・着火試験を行い、ノズル後縁からタービン内に噴き出した水素の着火を出口温度の上昇によって確認した。あらかじめ実施した高温翼列風洞試験によって、ガス温度800℃の条件で翼後縁から噴き出した水素が高速流中で確実に着火燃焼することは確認していたが、試験タービンではTIT800℃であっても、水素燃焼効率は低く、下流の温度上昇は不均一であった。ビデオ観察によっても周方向に燃焼状況が様でなく、水素着火に必要な温度がノズルリングの全周で維持されていないためと考えられた。このため、燃焼器出口温度の均一化をはかるため、燃焼器空気入口に旋回羽根と整流羽根を付けたり、燃料ノズルと燃焼器内筒の配置を変えるなど、種々の方策を講じた。以降、1992年2月まで、試験装置および計測装置の整備をはかりつつ試験・運転操作に習熟することを目的として、TIT800℃の条件で、空気流量を変えて試験を行った。表7に燃焼運転開始から後の運転の経過を示す。

1992年2月末から9月末まで、TITを設計目標値の900℃に設定して主空気流量と水素流量を変えた運転試験を行った。燃料消費量と燃焼器出口温度から推算される燃焼器を通過する空気量が主空気流量の約80%程度になり、タービン内部ケーシングの接続部の隙間から低温の主空気が高温主流ガス側へ漏れ込むことが推察された。この場合測定されたTITとノズルリング入口の主流ガス温度に約100℃の差が生じる。そのためシールド付き熱電対でTITを測定してTIT測定法の改善を行うとともに、さらにTITを上昇させて実験することにした。

試験・計測方法がひととおり確立された段階で、1992年10月から1993年7月まで、TIT900℃(シールド付き温度TITで940℃)の条件で、主空気流量、水素流量をパラメータとする一連の運転試験(シリーズ1)を行った。TITを940℃としたことにより、水素燃焼効率は従来に比べて大幅に改善される傾向が見られ、特に水素流量の少ない場合には水素燃焼効率は95%に達したが、依然としてノズルリングの一部に燃焼の不安定な部分が観察された。ノズルリングの周方向に見られる水素燃焼不均一の原因として、タービン高温ガス流路を構成する内部ケーシングの接続部、特にノズルリング直前の接続部の隙間に大きな不均一があり、一部の隙間から低温空気が高温ガス流路側に強く流れ込むためと考えた。試験タービンの冷体状態でノズルリ

表7 タービン運転試験経過要約表

年月日	タービン入口温度 ℃	主空気流量 kg/s	再燃水素流量 x100Nl/m	回転数 x1000rpm	実験目的、備考
910710	500	2.0		10	主燃器着火、温度上昇時振動チェック
910715	800	2.0		10, 20	500℃2万rpm、800℃1万rpm振動チェック
910717	800	2.0		10	水素着火初テスト
910719	800	2.8	8	20	再燃器定常状態
910818	800	2.8	12	10	水素着火テスト、予加圧テスト、出口全圧管チェック
910925	800	2.0	10, 14	10	主燃器減速+水素燃焼試験
911002	800	2.0, 2.8		10	主燃器入口圧力分布チェック、主燃器流量チェック
911015	800	2.0		10	主燃器燃料噴射弁取り付け位置変更、TIT分布
911018	800	2.0, 2.8		10	TIT温度計4台、回転、TIT分布
911211	700	2.0		10	TIT温度計8本に増し、異常燃焼発生
920225	800	2.0		10	タービン排気管に水冷伸縮継ぎ手設置
920227	800	2.0		10	主燃器弁圧力不調につき実験中断
920228	900	2.0		10	TIT上昇+水素燃焼試験
920312	900	2.8	11, 16	20	定格時再燃試験
920330	900	3.1	12, 16	20	燃焼比を目標とする、雷雨のため中断
920402	900	2.9	12, 16, 20	20	主燃器2、9kg/s時再燃試験
920430	900	2.0	12, 16	20	ケラ上流でガス分析
920615	900	2.8		10	ケラ上流でガス温度分布測定、振動計冷却台設置
920822	900	2.8	12	10	ケラ上流でH2, NOxガス温度分布測定
920911	900	2.8	12, 16	20	定格時再燃試験、ガス分析
920709	900	2.0	12, 16	10	ケラ上流でガス分析(920430の再確認)、TIT分布変化
920929	900	2.8		10	主燃器端に清流羽根設置後TIT分布測定
921014	900	2.8	12, 16, 18	20	定格時再燃、ガス分析
921029	900	2.9	12, 16, 20	20	主燃器2.9kg/s時再燃試験、ガス分析
921130	800, 900	2.0, 2.8, 2.9		10, 20	TITシールド付き熱電対6本追加、温度校正試験
930715	900	2.3	10, 12, 16	20	主燃器2.3kg/s時再燃試験、ガス分析
931116	900	2.8	12	20	タービン出口(ケラ上流)H2, NOx, O2周方向分布
931130	900	2.8		18, 20	再燃器タービン出口NOx, O2周方向分布
931207	900	2.8	12, 16, 20	20	バル上流にシム挿入、定格時再燃試験
940707	900	2.8	12	20	動力計定額、トルク出力にトルク設置、自動ガス追加
940715	900	2.8	10, 12, 16, 20	20	定格時再燃、ガス分析
940802	910	2.8	12	18	TIT上昇によるH2燃焼効率向上テスト
940905	910	2.8	10, 12, 16	16, 18, 20	シム追加挿入、ガス分析、出力変化計測
940908	910	2.3	10, 12, 16	16, 18, 20	ガス分析、出力変化計測
941020	910	2.8	10, 16, 20	16, 18, 20	ガス分析、出力変化計測
950322	900	2.0		9	計測系統チェック確認
950323	910	2.9	10, 12, 16, 20	16, 18, 20	ガス分析、出力変化計測
950328	910	2.8	10, 12, 16, 20	16, 18, 20	ガス分析、出力変化計測

ング直前の内部ケーシング接合部の隙間を計測したところ、0.5mm~1.5mm程度であるとわかったので、2回にわたって0.3mmのステンレス薄板(シム)を挿入できる隙間に押し入れた。

1993年12月から翌年4月まで動力計の自動制御、操作盤、直流電源設備の更新を行い、工事終了後、シム挿入効果とTIT上昇効果の確認試験を行ったのち、1994年9月から1995年3月までの間、TITを910℃(シールド付き温度TITで970℃)に上昇させた一連の最終運転試験を行った(シリーズ2)。その結果、ほぼ100%の水素燃焼効率が得られた。本章ではシリーズ2の試験結果と比較のためのシリーズ1の試験結果について述べる。

4.2 試験タービン運転結果

4.2.1 試験パラメータ

試験タービンの運転パラメータは、TIT(タービン入口温度)、主空気流量、水素流量、タービン回転速度である。主空気と別系統の冷却空気流量は常に一定にした。

主空気は主空気配管のオリフィス流量計により流量が測定され、全量がタービンケーシング下部の左右2本の空気入口部からタービン内に入る。そして内部ケーシングを冷却しながら燃焼器に導かれる。ただし、主空気の一部は燃焼器に到達せず、燃焼器からタービンノズル前までの内部ケーシングの接続部隙間から高温ガス側に流入するものとノズル翼下流の防熱リングを冷却した後に高温ガス側に流入するものがある。このように主空気の一部が燃焼器をバイパスするが、ロータ翼は全ての主空気量が通過する。燃焼器を通過する空気量は燃料消費量と燃焼器出口温度から推算す

ると80~84%程度になる。ノズルリング周囲の主流ガス温度は低温空気の漏れ込みによって、TIT測定値より100℃程度下がると推定されるが、本報告ではTITとして測定値(6点の平均)をそのまま示した。

本章で述べるシリーズ1およびシリーズ2の試験条件

表8 タービン試験条件

項目	単位	シリーズ1		シリーズ2		
		940	970	16000	18000	20000
タービン入り口温度	℃	2.332	2.323	2.320	2.314	2.323
タービン回転速度	rpm	20000	16000	18000	20000	20000
主空気流量	kg/s	2.3	2.6	2.9		
再熱水素流量	g/s	1.5	1.8	2.4	3	
	(kW)	(180)	(220)	(290)	(365)	

を表8に示す。シリーズ1ではまだ周方向に水素の着火しにくい部分が見られ、水素燃焼効率も95%程度に止まったが、シリーズ2ではほぼ全周に一樣な燃焼が観察され、水素燃焼効率もほぼ100%が達成された。表9および表10に試験結果をまとめて示す。

4.2.2 出力

図21にシリーズ2の出力測定結果を示す。再熱により主空気量がわずかであるが変わり、これによる出力の増減が無視できないため、図では出力を主空気量で割った比出力で示した。TITおよび圧力比も再熱時と

表9 タービン試験結果 (シリーズ1)

実験番号	項目	930715					940715					921029						
		2.332	2.323	2.320	2.314	2.323	2.655	2.644	2.636	2.633	2.636	2.650	2.903	2.888	2.884	2.881	2.892	
	主空気流量 GO	kg/s	19980	20025	19990	19990	19980	19970	19980	19980	19980	19980	20010	20010	20020	20010	19950	
	タービン回転速度 n	rpm	—	1.50	1.82	2.40	—	—	1.83	2.44	3.03	1.47	—	1.83	2.43	3.02	—	
	再熱水素流量 GH	g/s	939.7	942.5	943.6	945.0	942.5	938.6	941.9	943.9	944.9	943.8	943.4	936.5	939.7	940.8	942.9	938.6
	タービン入り口温度 TIT	℃	40.7	→	→	→	→	48.1	→	→	→	→	→	50.5	→	→	→	→
	燃料流量 Gf	g/s	80.1	→	→	→	→	83.8	→	→	→	→	→	79.7	→	→	→	→
	燃焼器空気通過空気流量比	%	642.5	692.6	703.9	720.6	645.7	639.1	686.9	703.5	711.8	680.5	644.0	628.0	676.0	692.0	705.0	632.0
	タービン出口温度 TOT	℃	117.9	118.0	118.8	119.0	119.8	122.3	123.2	124.0	124.8	125.0	125.4	114.0	115.0	115.0	116.0	117.0
	燃焼器入口温度	℃	37.3	38.0	38.8	39.6	40.0	41.3	42.5	43.7	44.6	45.0	46.0	30.0	31.0	32.0	32.0	33.0
	冷却空気温度	℃	—	30.0	30.0	30.0	—	—	42.5	42.7	40.5	40.5	—	—	30.0	30.0	30.0	—
	水素温度	℃	1.827	1.636	1.678	1.640	1.627	1.792	1.804	1.808	1.808	1.800	1.791	1.771	1.782	1.785	1.786	1.769
	タービン入口圧力	kg/cm2	1.111	1.117	1.118	1.121	1.111	1.146	1.157	1.161	1.164	1.154	1.146	1.141	1.152	1.154	1.155	1.146
	タービン出口圧力	kg/cm2	211.5	225.8	226.7	225.7	213.2	301.9	315.5	318.6	317.4	312.7	302.8	362.4	372.2	374.6	374.2	362.1
	タービン出力 L	PS	16	—	—	—	16	16	—	—	—	16	16	—	—	—	16	
	冷却空気0	g/s	30	30	30	30	30	31	31	31	30	30	31	31	31	31	31	
	冷却空気1	g/s	83	83	83	83	83	84	85	84	84	84	84	85	85	85	85	
	冷却空気2	g/s	100	100	100	100	100	102	102	102	102	102	101	102	103	103	102	
	冷却空気3	g/s	199	201	201	201	198	202	205	205	204	203	201	205	207	207	207	
	冷却空気4	g/s	16.1	15.7	15.6	15.5	—	16.2	15.8	15.6	15.5	15.8	16.1	16	15.5	15.4	15.2	—
	O2濃度	%	3.46	3.48	3.48	3.47	—	3.52	3.61	3.61	3.64	3.7	3.63	3.48	3.53	3.53	3.51	—
	CO2濃度	%	113	205	217	219	—	81.6	186	197.2	187.1	188.7	75.9	79	172	177	161	—
	CO濃度	ppm	35.1	32.6	33.6	34.4	—	34.2	34.5	34.3	33.6	33.8	33.7	45.3	43.9	44.9	45.7	—
	NOx濃度	ppm	25	9.6	10.3	8.2	—	24.8	7.1	6.2	3.2	7	24.4	33.5	10.6	8.3	7.9	—
	NO濃度	ppm	—	600	510	1010	—	—	568	711	2190	536	—	—	730	1080	2230	—
	H2濃度	ppm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	91.1	90.2	83.4	—
	水素燃焼効率	%	—	92.7	94.9	92.4	—	—	93.5	93.9	84.9	92.4	—	—	—	—	—	—

イタリック表示はシールド付き温度に換算

表10 タービン試験結果 (シリーズ2)

実験番号	項目	940808					950328					950323							
		2.339	2.328	2.321	2.324	2.330	2.623	2.614	2.601	2.595	2.613	2.599	2.875	2.860	2.844	2.846	2.863	2.844	
	主空気流量 GO	kg/s	19970	19970	19970	19980	19970	20000	20010	20010	20020	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	タービン回転速度 n	rpm	—	1.82	2.49	1.52	—	—	1.51	2.41	3.02	—	1.81	—	1.51	2.42	3.05	—	
	再熱水素流量 GH	g/s	965.0	967.6	970.7	969.7	968.6	966.9	969.5	971.0	971.2	967.9	971.9	963.5	966.5	969.6	971.0	969.5	
	タービン入り口温度 TIT	℃	44.2	→	→	→	→	49.2	→	→	→	→	→	53.6	→	→	→	→	
	燃料流量 Gf	g/s	84.0	→	→	→	→	82.8	→	→	→	→	→	82.6	→	→	→	→	
	燃焼器空気通過空気流量比	%	672.1	728.5	747.5	722.5	676.3	664.7	708.4	732.8	745.2	667.7	719.4	655.6	696.0	722.8	736.3	662.1	
	タービン出口温度 TOT	℃	118.0	118.3	120.0	120.0	121.0	113.9	114.0	115.8	116.0	118.0	118.0	113.0	114.0	115.8	116.0	118.0	
	燃焼器入口温度	℃	40.9	41.0	42.4	43.0	43.2	31.4	32.0	33.0	33.9	36.0	36.0	29.9	30.0	32.0	32.4	34.9	
	冷却空気温度	℃	—	39.6	38.6	39.0	—	—	24.3	23.0	22.0	—	26.2	—	25.8	24.0	22.8	—	
	水素温度	℃	1.654	1.666	1.668	1.662	1.653	1.786	1.797	1.802	1.802	1.783	1.795	1.907	1.917	1.921	1.923	1.903	
	タービン入口圧力	kg/cm2	1.125	1.133	1.136	1.131	1.125	1.146	1.154	1.162	1.160	1.144	1.156	1.165	1.173	1.178	1.181	1.167	
	タービン出口圧力	kg/cm2	220.7	235.5	237.4	233.8	221.6	292.2	303.7	305.6	308.2	290.0	302.1	367.6	377.4	381.5	382.1	364.9	
	タービン出力 L	PS	16	—	—	—	16	16	—	—	—	16	—	15	—	—	—	16	
	冷却空気0	g/s	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	31	31	31	31.0	30	
	冷却空気1	g/s	83	84	83	83	83	84	84	84	84	84	84	85	86	85	85.0	85	
	冷却空気2	g/s	100	100	100	100	99	101	101	101	101	101	100	103	103	103	102.0	102	
	冷却空気3	g/s	198	202	202	201	197	202	205	205	205	201	204	206	208	208	208.0	204	
	冷却空気4	g/s	16.1	15.6	15.5	15.7	16.1	16.1	15.8	15.6	15.5	16.2	15.8	16.1	15.8	15.6	15.5	16.1	
	O2濃度	%	3.68	3.74	3.74	3.71	3.64	3.69	3.68	3.66	3.67	3.67	3.58	3.67	3.65	3.68	3.7	3.58	
	CO2濃度	%	70.1	174	175.7	164	62.4	63.7	161.7	180.9	162.8	64.4	168.5	49.9	146.7	171.2	165.8	44.3	
	CO濃度	ppm	34.8	36	35.7	36.4	35.8	45.1	46.6	47.4	46.7	46.7	48.2	45.2	46.8	47.3	46.5	46.9	
	NOx濃度	ppm	27.4	22.5	8.6	21.4	27.8	37	31.3	31.6	14	37.7	31	37.8	30.1	31.5	12.4	38.7	
	NO濃度	ppm	—	6	407	14	—	—	6	0	544	—	16	—	21	3	478	—	
	H2濃度	ppm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	水素燃焼効率	%	—	99.9	96.9	99.8	—	—	99.9	100	96.3	—	99.9	—	99.7	100	96.5	—	

非再熱時でわずかに変わるがこれによる出力の変化量は主空気流量の影響にくらべると小さい。回転速度によっても比出力は変わるが、その変化量は比較的小さい。比出力は試験パラメータである主空気流量の増加と共に増加するが、これは試験タービンの膨張比が増加する結果である。

水素再熱によって比出力は非再熱時（水素流量0）から約5%増加する。しかし水素流量を変えても比出力の変化は小さい。比出力と水素流量の関係をさらに検討するため、図22に非再熱時からの比出力の増加量を示す。図中の実線は計算値を示す。計算方法の詳細は付録3に示す。計算ではノズルから吹き出した水素がロータ翼前で燃焼を完了しロータ入口ガス温度は一樣に上昇しているものとした。計算によれば比出力は水素流量の増加とともに増大するが、試験結果では水素流量を大きくしても比出力はあまり増加しない。タービンの下流で計測した水素燃焼効率ほとんど100%であるので、水素流量が多い場合、燃焼反応はロータ翼出口まで続き、ロータ入口で水素の発熱量に相当するガス温度が上昇するものとした仮定は適当でなかったと考えられる。

表11に試験タービンの出力と運転条件について計画値と試験結果を比較する。試験タービン出力は計画時は再熱時405kW、非再熱時は380kWとしたが、試験結果の出力は計画出力を大幅に下回り、非再熱、再熱ともに当初計画の60%程度に止まった。計画性能と実機との差は、翼列設計誤差、設計時に考慮しなかった各種損失、冷却空気に起因する損失、タービン機械損失等、多くの要因が考えられるが、表11から、特にタービン入口および出口圧力が設計目標値と大きく異なっていることがわかる。図23に試験タービンの主空気流量と膨張比の関係を示す。試験タービンの膨張比が流量に対して計画値より著しく低いことが明瞭であり、膨張比の不足が出力が設計目標値に達しない最も大きな理由である。膨張比不足の理由にはタービン翼列出口流出角設計の誤差、主空気のガス側への漏れ込みによるTITの低下および有効な作動ガス量の減少、ロータ翼チップクリアランスの過大が考えられる。このような出力の大きな差異を定量的に解析することができなかったため、より精度を要するタービン内再熱に固

表11 試験タービンの設計性能と試験結果の比較

項目	単位	設計値	試験結果			
ノズル入口温度	K	1,173	1,240	1,243	1,244	
ノズル入口圧力	MPa	0.196	0.175	0.176	0.177	
タービン出口圧力	MPa	0.106	0.112	0.113	0.114	
膨張比	-	1.85	1.56	1.56	1.55	
回転速度	rpm	20,000	20,000	20,010	20,020	
空気流量	kg/s	2.63	2.62	2.61	2.60	
燃焼ガス流量	kg/s	2.67	2.67	2.66	2.64	
再熱入力	kW	440	0	180	360	
出力(再熱時)	kW	405	-	223	227	
出力(非再熱時)	kW	380	215	-	-	
比出力	kW/kg/s	154	81.9	85.5	87.4	

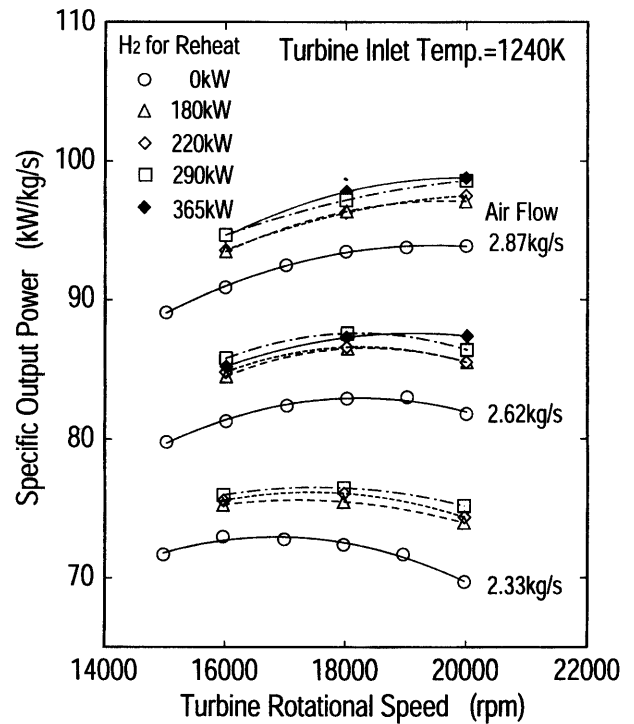


図21 試験タービンの出力

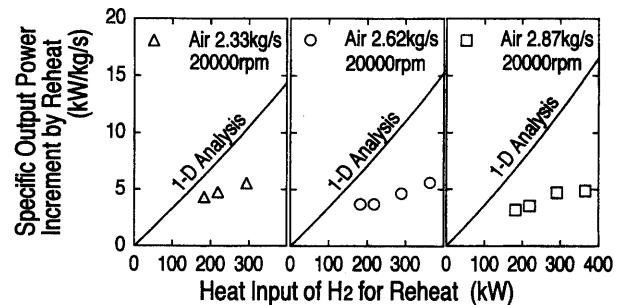


図22 再熱水素流量と出力増加

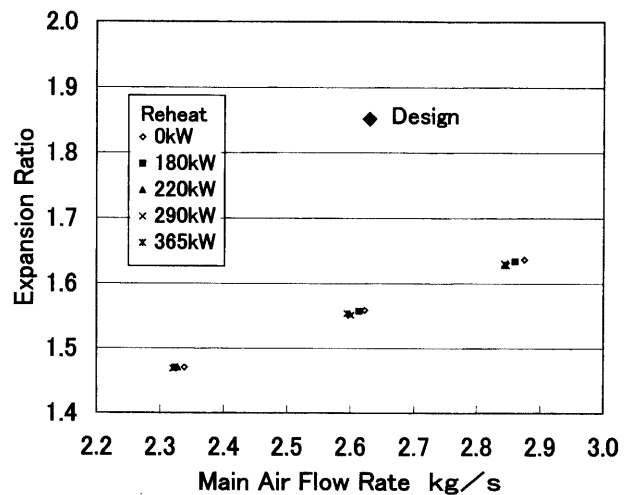


図23 試験タービンの主空気流量と膨張比の関係

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

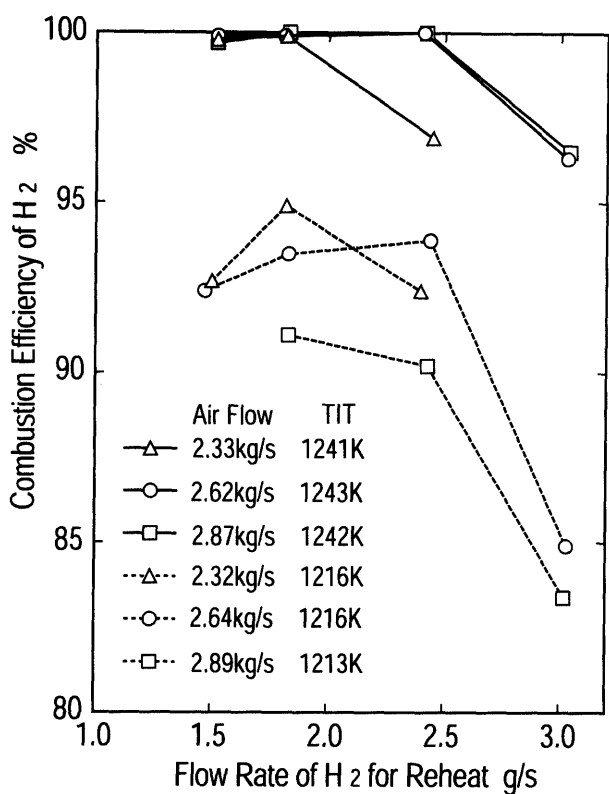


図24 再熱水素燃焼効率

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。

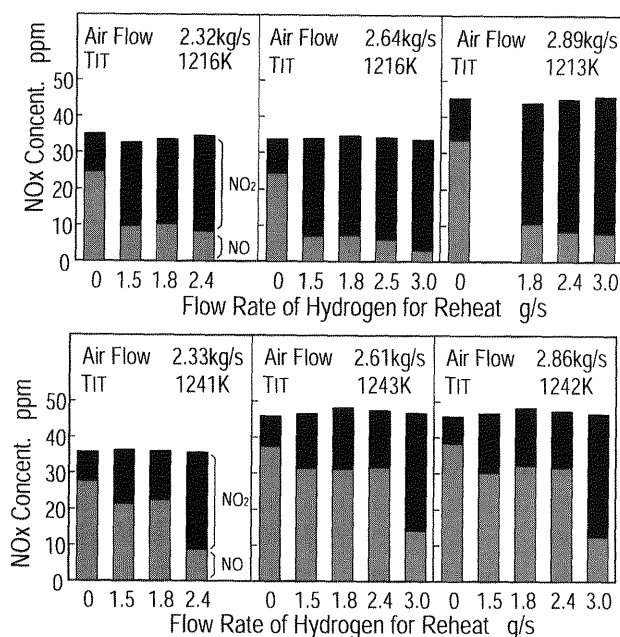


図25 排気中のNO_x濃度

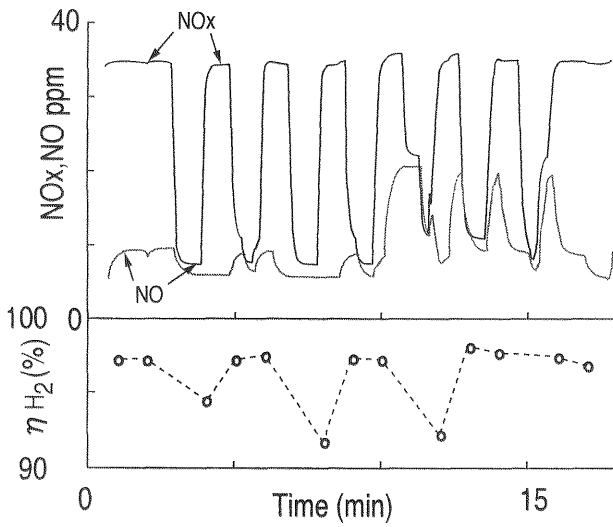


図26 NO・NOxと水素燃焼効率の時間的経緯

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

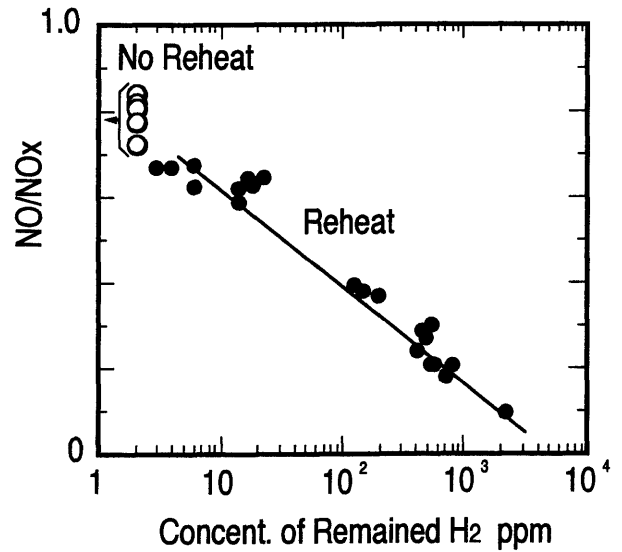


図27 NO/NOxと残存水素濃度

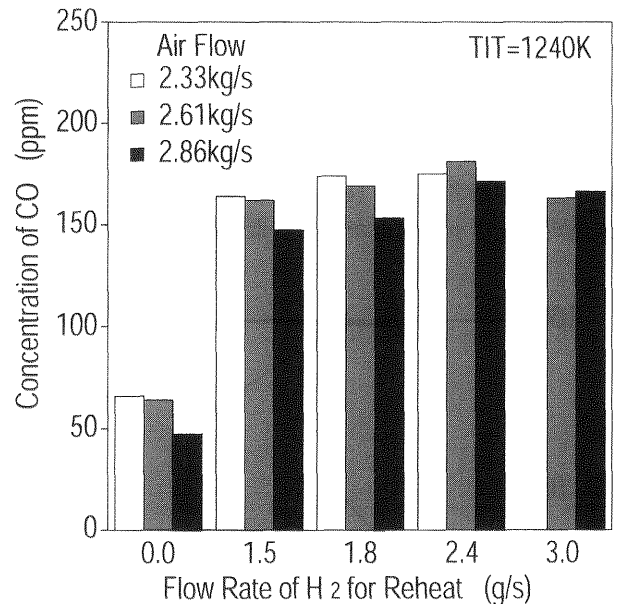


図28 排気中のCO濃度

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

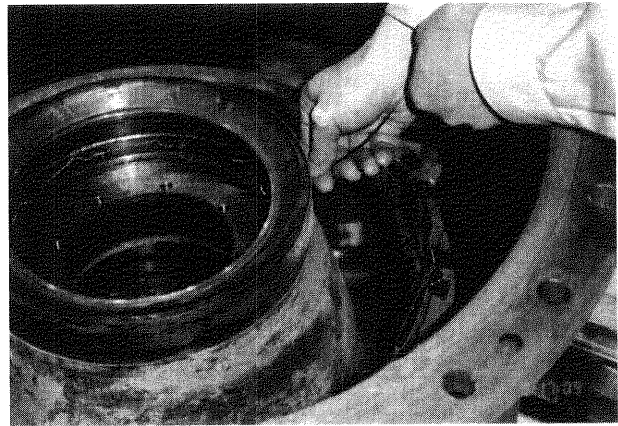


写真15 入口内部ケーシングと内周側防熱リング接続部の隙間計測

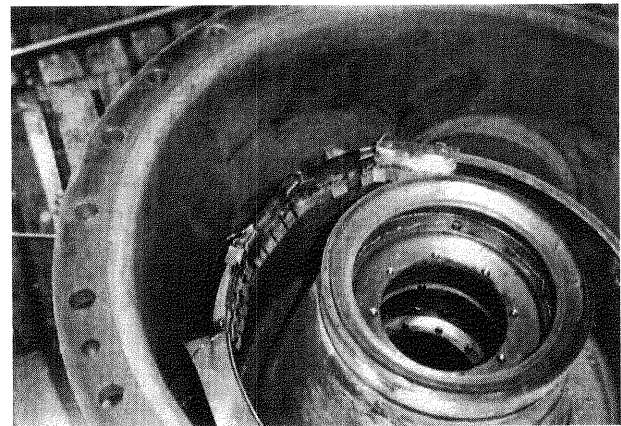


写真16 入口内部ケーシングの外周側接続部にシムを挿入した跡

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

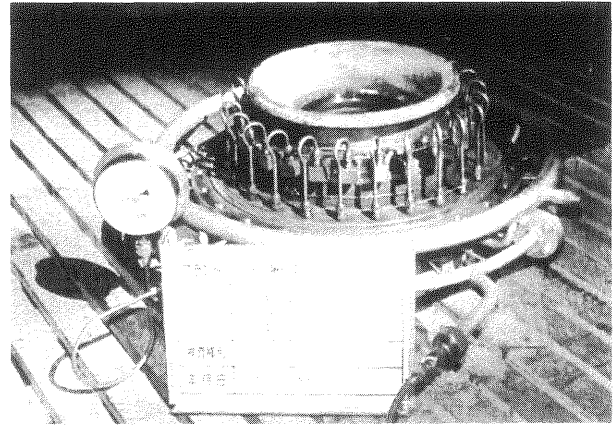


写真17 水素導入管継手部の漏れ検査

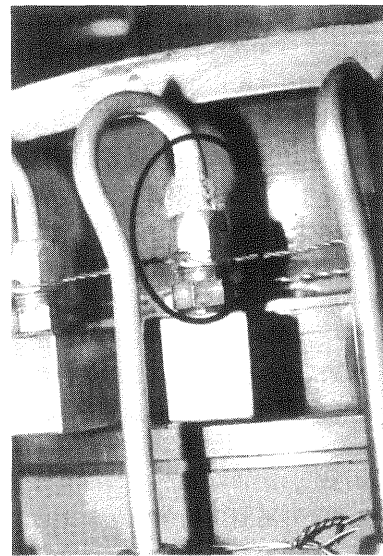


写真18 水素導入管リングジョイントからの空気漏れの様子

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

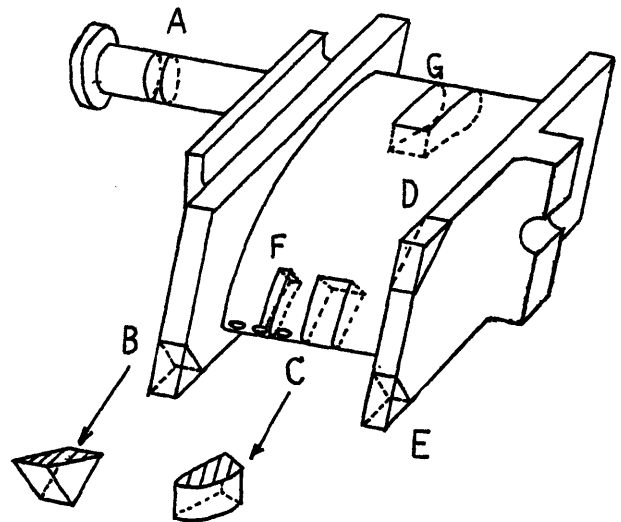


図29 EPMA試験片位置

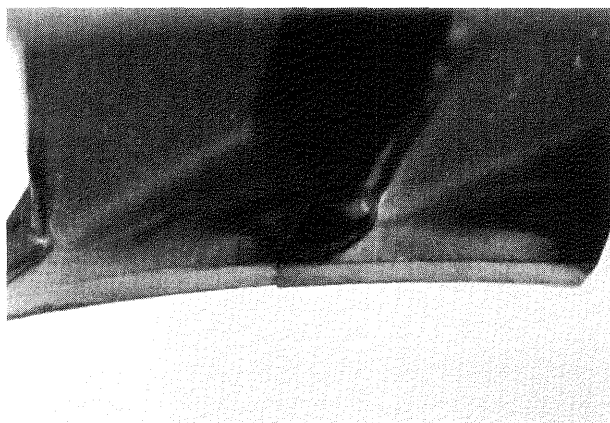


写真19 ノズル翼内周側エンドウォール上の変色跡

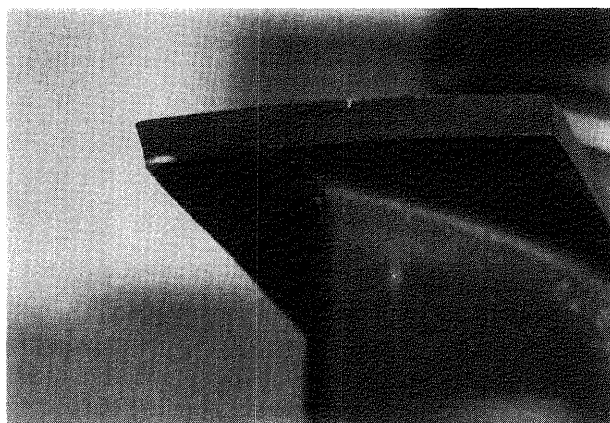


写真20 ノズル翼外周側エンドウォールの変色跡

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。

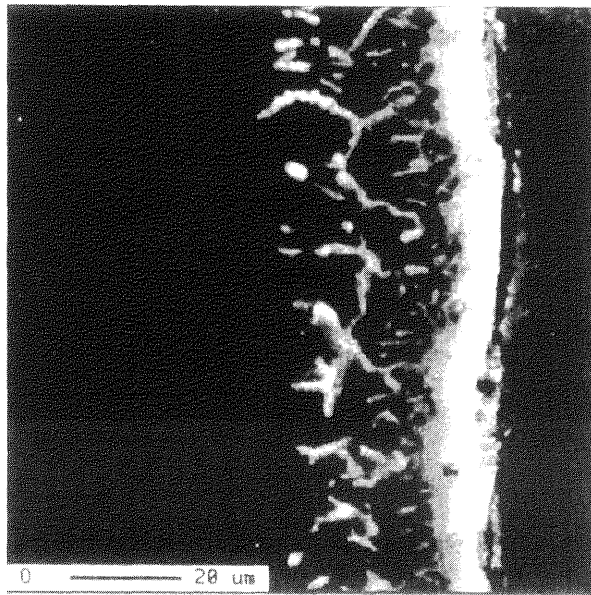
(a)、(b)に見られる部材表面に近い酸素及びクロムの高濃度の領域(I層)は、保護膜として形成されたクロムの酸化膜である。(b)では、I層の下に、クロム原子が表面のI層に移動したことによって生じたクロム濃度の低い層が観察される(II層)。さらにその内部に再び濃度の高い層が見られるが、この層が本来のクロム濃度を示している。(c)では、II層の濃度が低下したクロムを補う形で内部からコバルトが移動し、II層にコバルト濃度の高い層を形成している。ニッケルの分析結果においても、コバルトと同様にII層に高濃度のニッケル層が見られる。II層ではまた(a)~(d)

のすべての観察像において、組成の一樣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、以下のようになった。

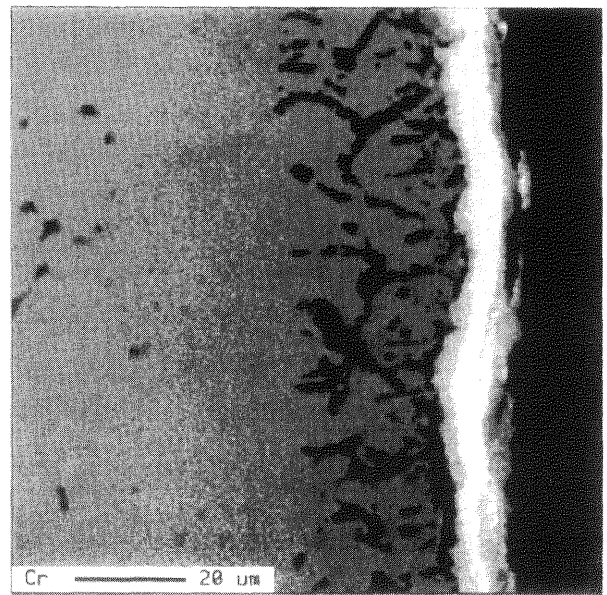
- A部：酸化影響は全くない。
- B部：10 μ mに達しない程度の非常に薄い酸化影響層が見られる。
- C部：10 μ mに達しない程度の非常に薄い酸化影響層が見られる。
- D部：30 μ mの酸化影響層が見られる。
- E部：D部と同程度の酸化影響層が見られる。
- F部：水素吹き出し孔側及び翼外面側とも全く酸化影響は見られない。
- G部：酸化影響は全くない。

(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 $^{\circ}$ C程度に、B及びC部では840 $^{\circ}$ C程度に達したものと推定される。測温塗料により推定される翼表面温度は670 $^{\circ}$ C~825 $^{\circ}$ C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。

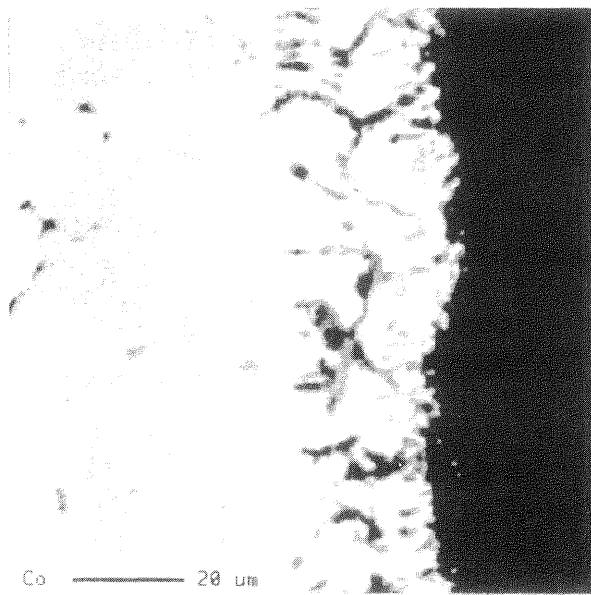
今回の試験タービンではこの変色域の酸化影響層の厚さは高々30 μ mであり、溶融跡もないことから強度的には全く問題はないと判断される。今回の試験タービンの再熱運転時間は12時間であるが、運転時間がさらに長くなった場合でも、酸化クロム層が保護膜として働き、酸化層厚さは時間の対数関数となり、成長は遅くなるので、急な強度劣化にはいたらないものと推



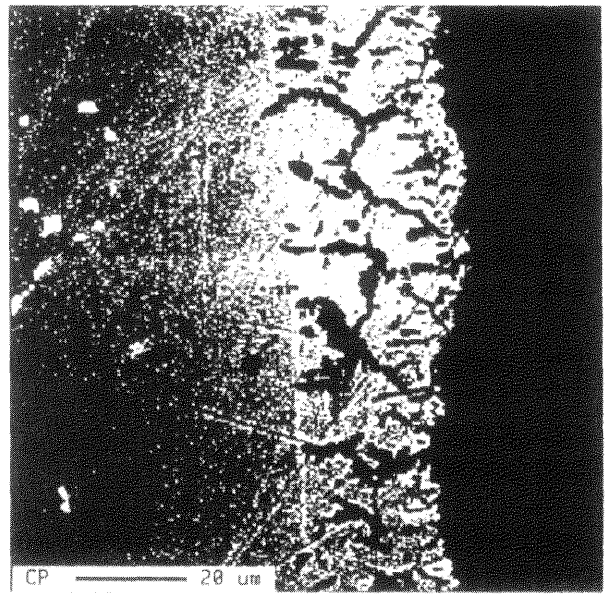
(a)



(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

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

いう高速ガス流雰囲気中で着火し、主流ガス平均温度上昇約100℃の再熱熱負荷において、ほぼ100%の燃焼効率を達成した。ただし、安定な着火を得るためには、主燃焼器出口温度分布とケーシング空気冷却の不均一な流入によって生じる主流ガス温度の局所的な低温部分に注意を払う必要がある。

- 2) 水素再熱によってノズル翼下流の内部防熱ケーシングとロータ翼に異常は認められなかったが、ノズル翼内周側のエンドウォールに変色跡が見られた。この変色域の酸化影響層の厚さは30 μ m程度であり、強度的な問題を生ずるものではなかったが、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る。
- 3) ノズル翼入口温度940℃レベルにおいて、水素再熱によって排気中のNOx総量は変わらない。このことは低NOx燃焼方式の一つとして注目されている高温燃焼の具体的実現方法の一つとしてこの燃焼方式が考えられることを示唆しており、燃焼器そのものへの応用も可能と考えられる。一方、水素再熱によってNOのNOx中に占める割合は低下する。さらにNO/NOx比は残存水素濃度と強い相関関係を有する。
- 4) 再熱により非再熱時(水素流量0)から約5%の出力増加を得、再熱の有効性は確認された。得られた出力増加は計算値の30~70%程度であり改善の余地がある。この原因として、水素流量が多く噴き出し速度が大きい場合、ロータ入口で水素の発熱量に相当する平均ガス温度上昇が得られていないことが考えられる。主流ガス流速の遅いノズル翼上流から水素を噴き出す方式の検討が次の課題として考えられる。
- 5) 試験タービン出力は非再熱、再熱時ともに当初計画の60%程度であった。この理由は主として膨張比不足によると考えられるが、タービン翼列出口流出角の誤差、主空気への漏れ込みによるタービン入口温度の低下および有効な作動ガス量の減少、ロータ翼チップクリアランス損失に対する適切な設計が必要である。
- 6) 試験タービンにより、タービン内再熱ガスタービンを実現する可能性は示され、その高温排ガス温度を利用しコンバインドサイクルの総合効率の向上といった応用も考えられる。今後の高出力化を考慮して、より高温ガス流中での再熱とより高負荷での再熱、多段タービンにおける再熱水素の燃焼方法、タービン内再熱タービンとしてのタービン設計方法の検討が将来的課題として残されている。

謝辞

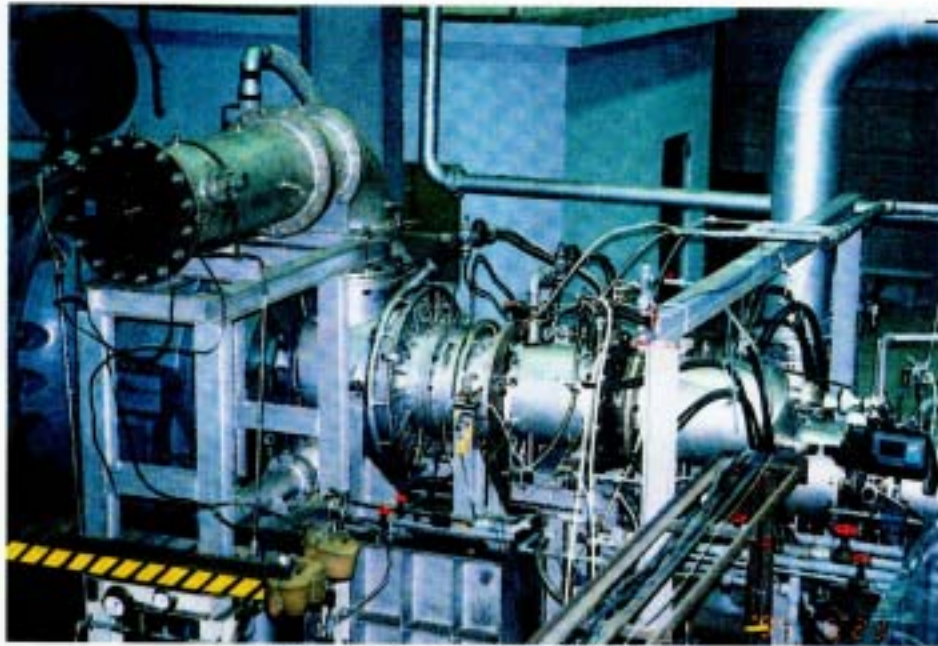
試験タービンの製作および分解・点検に際しては、(株)東芝京浜事業所に多大な御協力をいただいた。関係各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 秋田栄司、西田美紀、1500℃次世代高効率Gシリーズガスタービンの開発と実証運転状況、日本ガスタービン学会誌、VOL. 27, NO. 3, 1999. 5, pp2-9
- 2) 石井潤治、1500℃級蒸気冷却ガスタービンを用いた次世代高効率コンバインドサイクルプラント、日本ガスタービン学会誌、VOL. 27, NO. 3, 1999. 5, pp25-29
- 3) 山口佳和、石澤和彦、HYPRプロジェクトの概要、日本ガスタービン学会誌、Vol. 28, NO. 1, 2000. 1, pp2-7
- 4) T. Sugimoto, H. Miyaji, T. Shikina, T. Kato, K. Nakanishi, M. Murota, M. Tanaka, M. Kawamoto, R&D Plan for the Next-Generation Marine Gas Turbine (Super Marine Gas Turbine), Proceedings of the International Gas Turbine Congress 1999 Kobe, 1999, pp93-98
- 5) 徳本 勉、マイクロタービンを使用したコージェネシステムについて、日本ガスタービン学会ガスタービンセミナー第28回資料集、2000年1月
- 6) M. L. Parker, D. A. Branch, Qualification of the WR-21 Gas Turbine System for Service, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 1999 Kobe, 1999, pp107-114
- 7) F. Joos, P. Brunner, B. Schulte-Werning, K. Syed, A. Eroglu, Development of the Sequential Combustion system for the ABB GT24/GT26 Gas Turbine Family, ASME paper 96-GT-315 (1996).
- 8) 菅 進、森下輝夫、平岡克英、翼列内水素燃焼ガスタービンの研究、日本ガスタービン学会講演論文集(第5回定期講演会)、pp31-36, 1977
- 9) 森下輝夫、菅 進、平岡克英、翼列内水素燃焼ガスタービンの研究(第2報)、日本ガスタービン学会講演論文集(第8回定期講演会)、pp35-40, 1980
- 10) WE-NET水素エネルギーシンポジウム講演予稿集、新エネルギー・産業技術総合開発機構、1999年2月
- 11) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発、平成10年度研究成果報告書概要集、新エネルギー・産業技術総合開発機構、NEDO-WE-NET-98
- 12) 幸田栄一、水素燃焼タービン発電システム、日本ガスタービン学会誌、Vol. 27, NO. 4, 1999. 7, pp3-6

- 13) 久松 暢、水素燃焼タービンの開発、日本ガスタービン学会誌、VOL. 27, NO. 4, 1999. 7, pp7-13
- 14) S. Kan, T. Morishita, K. Hiraoka, Reheat Gas Turbine with Hydrogen Combustion between Blade Rows, Proceedings of 1983 Tokyo International Gas Turbine Congress, 83-Tokyo-IGTC-27, pp205-212
- 15) 平岡克英、熊倉孝尚、井亀 優、菅 進、森下輝夫、春海一佳、タービン内熱ガスタービンの性能試験に使用する燃焼器の設計と燃焼器性能、船舶技術研究所報告、第24巻第3号、pp61-70, 1987
- 16) K. Hiraoka, T. Morishita and S. Kan, Thermodynamic Performance of an Internal Reheat Gas Turbine (IRGT) with Hydrogen Combustion, Papers of Ship Research Institute, VOL.24, NO. 3, May 1987, pp17-36
- 17) K. Hiraoka, S. Kan, T. Kumakura, M. Ikame, K. Harumi, H. Shiota and T. Morishita, Study of Internal Reheat Hydrogen Gas Turbine, Proc. of 1995 Yokohama International Gas Turbine Congress, 95-YOKOHAMA-IGTC-84 (1995), ppIII-197-204
- 18) 春海一佳、菅 進、平岡克英、井亀 優、城田英之、森下輝夫、タービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究、日本ガスタービン学会誌、VOL. 26, NO. 101, 1998. 6, pp107-114
- 19) 森下輝夫、菅 進、平岡克英、井亀 優、タービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究 (第1報)、第7回ガスタービン秋季講演会講演論文集 (長崎)、11992年
- 20) 菅 進、平岡克英、熊倉孝尚、井亀 優、城田英之、森下輝夫、タービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究 (第2報)、第8回ガスタービン秋季講演会講演論文集 (盛岡)、1993年
- 21) 平岡克英、菅 進、熊倉孝尚、井亀 優、春海一佳、城田英之、森下輝夫、タービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究 (第3報)、第9回ガスタービン秋季講演会講演論文集 (松江)、1994年
- 22) 春海一佳、菅 進、平岡克英、井亀 優、城田英之、森下輝夫、タービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究 (第4報)、第10回ガスタービン秋季講演会講演論文集 (新潟)、1995年
- 23) 春海一佳、菅 進、平岡克英、井亀 優、城田英之、予田哲也、森下輝夫、タービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究 (第5報)、第11回ガスタービン秋季講演会講演論文集 (宮崎)、1996年
- 24) 森下輝夫、菅 進、平岡克英、船用ガスタービン翼の内部冷却孔の熱伝達率と圧力損失、日本ガスタービン学会講演論文集 (第9回定期講演会)、pp33-38, 1981
- 25) K. Hiraoka, T. Morishita, S. Kan, Experiment on Aerodynamic and Heat Transfer Characteristics of a Cooled Turbine Cascade losing a Few Blades, Proceedings of 1977 Tokyo Joint Gas Turbine Congress, pp215-222
- 26) 今井 潔 ((株) 東芝重電技術研究所)、私信

グラビア1 タービン内再熱タービン試験装置



(a) タービン内再熱タービン試験装置概観



(b) タービン本体



(c) 組立前の試験タービン部品



(d) ノズルリング (赤色は測温塗料)



(e) ロータ軸とロータ翼

グラビア2 試験タービン分解時の主要部品の状況



(a) 入口内部ケーシング



(b) 外周側防熱ケーシング



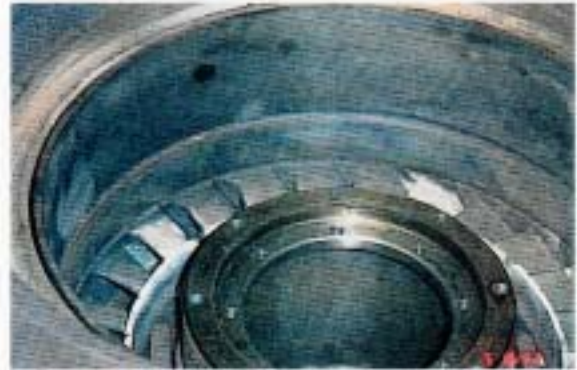
(c) 内周側防熱リング



(d) ノズル翼 (上流側)



(e) ノズル翼 (下流側)



(f) ノズル翼下流側の外周側防熱リングと防熱シュラウドリング



(g) ノズル翼下流側の内周側防熱リング



(h) ロータ翼

グラビア3 タービン内での水素の燃焼状況 (タービン入口温度 $TIT=970^{\circ}$)



(a) 回転前のロータ翼



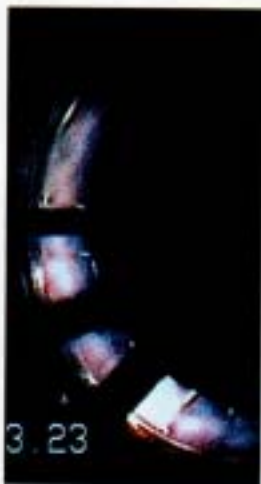
(b) 主空気流量 2.8kg/s 、再熱水素流量 1.5g/s



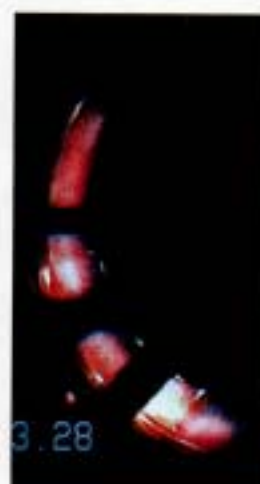
(d) 主空気流量 2.6kg/s 、再熱水素流量 1.5g/s



(e) 主空気流量 2.6kg/s 、再熱水素流量 2.4g/s



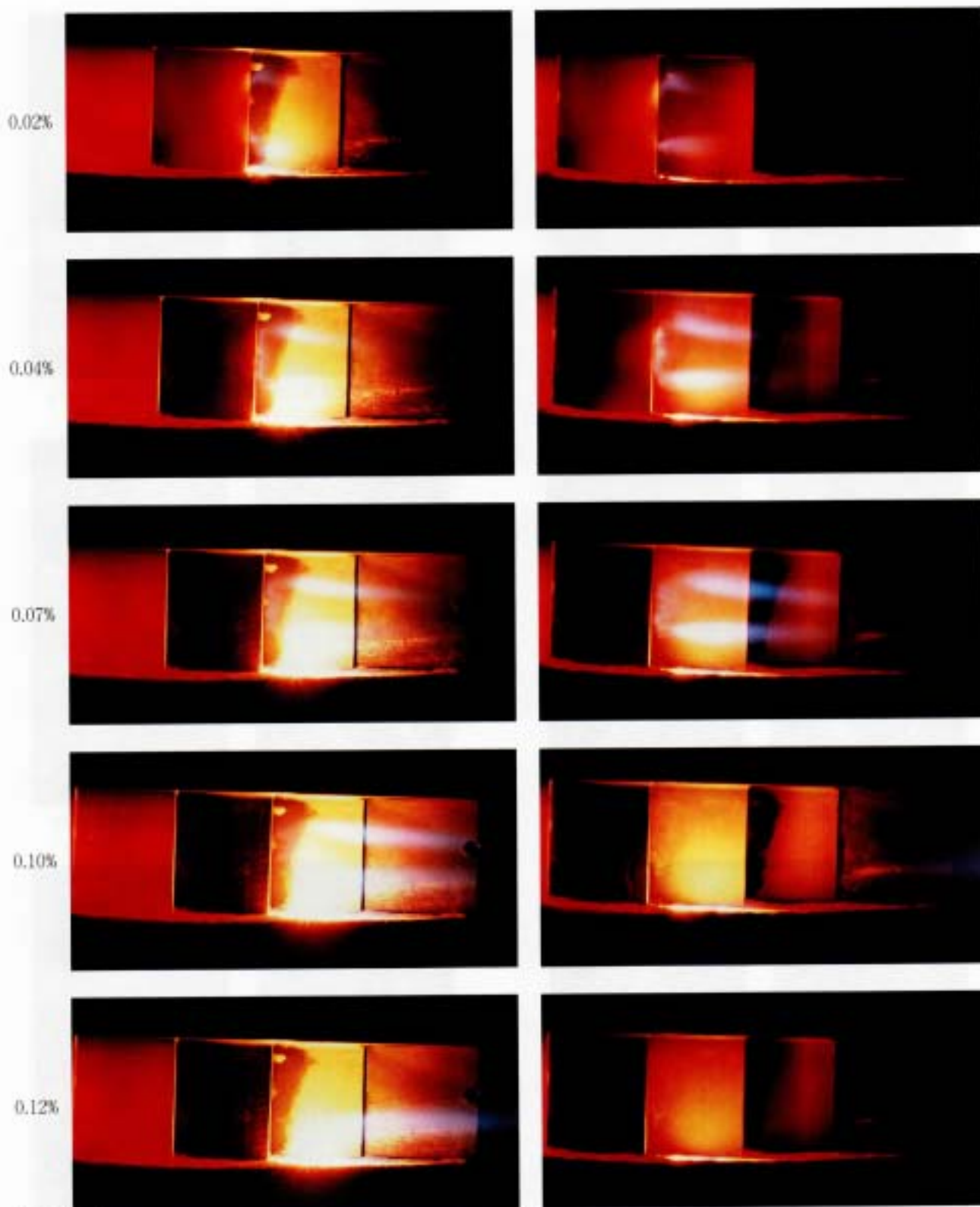
(c) 主空気流量 2.8kg/s 、再熱水素流量 3.0g/s



(f) 主空気流量 2.6kg/s 、再熱水素流量 3.0g/s



グラビア4 2次元翼列下流における水素の燃焼状況



水素噴き出し量
(対主流ガス質量%)

TIT=900℃
Re=180000

TIT=800℃
Re=200000

付録1 ノズル翼とロータ翼の翼形状座標

付録1 (a) ノズル翼翼形座標

ノズル翼翼形座標				
x	y(腹側)	y(背側)		
		a(r=130)	b(r=145)	c(r=160)
-1.50	1.80	4.65	5.25	5.90
-1.00	0.85	6.00	6.60	7.25
0.00	0.00	7.65	8.40	9.10
1.00	-0.30	8.90	9.65	10.45
2.00	-0.40	9.80	10.65	11.50
3.00	-0.25	10.65	11.50	12.40
4.00	0.00	11.30	12.20	13.10
5.00	0.45	11.95	12.80	13.70
6.00	1.00	12.45	13.33	14.25
8.00	2.20	13.30	14.20	15.10
10.00	3.35	13.90	14.80	15.70
12.50	4.50	14.40	15.25	16.15
15.00	5.30	14.65	15.45	16.30
20.00	6.20	14.40	15.15	15.90
25.00	5.95	13.25	13.90	14.50
30.00	4.95	11.40	11.90	12.40
35.00	3.60	9.15	9.55	9.95
40.00	2.00	6.65	6.95	7.20
42.50	1.20	5.38	5.58	5.78
45.00	0.20	4.03	4.15	4.27
47.50	-0.85	2.65	2.70	2.75
50.00	0.00	0.60	0.60	0.60

ノズル翼冷却孔座標		
x	y	
	腹側	背面
0.00	3.40	3.40
0.50	1.90	5.25
1.00	1.50	6.12
2.00	1.40	7.35
3.00	1.58	8.33
4.00	1.92	9.17
5.00	2.48	9.84
6.00	3.03	10.43
8.00	4.20	11.35
10.00	5.25	12.05
12.50	6.36	12.68
15.00	7.18	12.88
20.00	7.97	12.60
25.00	7.78	11.47
30.00	6.67	9.75
35.00	5.10	7.65
40.00	3.36	5.30
42.50	2.40	4.08
45.00	1.35	2.83
47.00	0.45	1.75
49.00	-0.54	0.60
50.00	-1.10	0.00

前縁部座標			
y	x(前縁部)		
	a(r=130)	b(r=145)	c(r=160)
4.50	-1.55	-1.65	-1.75
3.00	-1.70	-1.75	-1.80

後縁部	
中心座標	(48.50, 0.30)
曲率半径	1.50mm

付録1 (b) ロータ翼翼形座標

ロータ翼翼型座標						ロータ翼冷却孔中心座標、孔径			
断面A (r=130)		断面B (r=145)		断面C (r=160)		断面C (r=160)			
X	Y	X	Y	X	Y	孔番号	孔径	X'	Y'
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
-0.375	-0.327	-0.375	-0.273	-0.381	-0.224	1	2.6	-9.850	4.300
-0.821	-0.469	-0.800	-0.369	-0.793	-0.276	2	1.6	-5.300	4.425
-1.335	-0.428	-1.275	-0.289	-1.237	-0.156	3	1.6	0.500	1.925
-1.765	-0.197	-1.655	-0.040	-1.574	0.116	4	1.6	4.675	-2.225
-2.201	0.189	-2.029	0.345	-1.892	0.525	5	1.4	8.000	-7.075
-2.721	0.728	-2.468	0.897	-2.258	1.080	6	1.0	11.000	-12.175
-3.248	1.250	-2.915	1.425	-2.633	1.623				
-4.562	2.565	-4.029	2.753	-3.566	2.986				
-5.869	3.895	-5.135	4.095	-4.490	4.362				
-8.497	6.524	-7.363	6.750	-6.356	7.087				
-11.268	8.836	-9.748	9.123	-8.396	9.560				
-14.153	10.894	-12.260	11.269	-10.581	11.829				
-17.251	12.477	-15.010	12.991	-13.029	13.718				
-20.677	13.331	-18.122	14.063	-15.882	15.024				
-22.490	13.536	-19.789	14.400	-17.432	15.500				
-24.403	13.519	-21.567	14.540	-19.105	15.798				
-26.400	13.313	-23.440	14.510	-20.884	15.944				
-27.608	13.169	-24.573	14.475	-21.962	16.016				
-28.398	13.106	-25.312	14.481	-22.663	16.089				
-29.160	13.105	-26.020	14.542	-23.329	16.214				
-29.866	13.232	-26.665	14.717	-23.924	16.439				
-30.542	13.421	-27.278	14.948	-24.484	16.716				
-31.148	13.770	-27.812	15.321	-24.956	17.119				
-31.696	14.245	-28.283	15.807	-25.357	17.624				
-32.053	14.977	-28.555	16.515	-25.549	18.321				
-32.134	15.813	-28.562	17.299	-25.483	19.065				
-31.951	16.645	-28.324	18.057	-25.187	19.762				
-31.460	17.568	-27.793	18.874	-24.608	20.487				
-30.779	18.404	-27.093	19.596	-23.876	21.107				
-30.089	19.008	-26.402	20.101	-23.174	21.522				
-29.303	19.570	-25.627	20.558	-22.396	21.884				
-28.313	20.077	-24.666	20.949	-21.449	22.165				
-27.394	20.426	-23.785	21.199	-20.589	22.320				
-26.518	20.680	-22.950	21.363	-19.782	22.398				
-24.880	20.935	-21.408	21.466	-18.310	22.353				
-22.953	20.983	-19.614	21.355	-16.619	22.080				
-21.140	20.778	-17.947	21.017	-15.069	21.605				
-19.427	20.351	-16.391	20.481	-13.643	20.952				
-17.786	19.765	-14.914	19.804	-12.304	20.172				
-14.702	18.151	-12.180	18.054	-9.874	18.257				
-11.888	15.934	-9.747	15.766	-7.779	15.861				
-9.288	13.242	-7.551	13.054	-5.948	13.084				
-6.788	10.327	-5.466	10.144	-4.241	10.130				
-4.359	7.255	-3.459	7.093	-2.622	7.049				
-3.145	5.718	-2.456	5.567	-1.812	5.509				
-1.945	4.150	-1.469	4.013	-1.020	3.943				
-1.352	3.350	-0.983	3.222	-0.633	3.147				
-0.759	2.551	-0.497	2.431	-0.246	2.352				
-0.296	1.885	-0.121	1.775	0.050	1.695				
0.182	1.252	0.270	1.148	0.363	1.064				
0.242	0.539	0.269	0.481	0.300	0.431				
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				

断面Aの面心		断面Bの面心		断面Cの面心	
X	Y	X	Y	X	Y
-17.070	13.406	-14.706	13.854	-12.661	14.509

付録2 計測監視プログラム

```

10 PROGVER="MS80.BAS"
20 水素燃焼再熱ガスタービン計測プログラム 93.8.26 熱遮蔽付き T E T 追加
30 MS70 より変更 93.8.26
40 ***-熱遮蔽付き出口温度-**
42 ' 北側下より順へ時計方向に番号を付ける。
44 ' 北下=TSHE (1) 北中=TSHE (2) 北上=TSHE (3)
46 ' 南上=TSHE (4) 南中=TSHE (5) 南下=TSHE (6)
50 ' T I T 温度: 従来は 西=T (2) 南=T (3) 北=T (4)
60 ' MS60 より W=T (2), S=T (3), E=T (28), NE=T (4), NW=T (29)
70 ' 冷却空気温度 1-2 (T (7)) は計測を省略する。
80 ' 西より反時計方向 TSH (1).....TSH (6) DATALOGGER TR2724
90 '
100 '
110 HYDROGEN GAS TURBINE PERFORMANCE EXPERIMENT
120 *****DATA ACQUISITION PROGRAM*****
130 ---OUTLINE OF THE PROGRAM---
140 ' MAIN
150 ' <SUBROUTINES>
160 ' *CALIB - *INITIAL
170 ' *MES - (*INITIAL)
180 ' - (GENERAL) - *SUBTIME *SUBBEEP *FLAGS
190 ' - (DATA IO) - *SUBINPUT *MONHD (or *MONRRAM) *SLAVE
200 ' - (DISPLAY) - *MAINDISP *FLDISP
210 ' - (MEAN) - *MEANMMS *MEANCALC
220 ' - (FLOW RATE) - *F.RATE *ALPHRE
230 '
240 This PROGRAM is to be executed with the partner.
250 ' "SL80.BAS", in No.2 COMPUTER.
260 *****
270 ***** MAIN PROGRAM *****
280 *****
290 ARRAYS
300 DIM PR (19), T (31), E (10), MPR (19), MT (31), ME (10), EC (10), PRSTR (19)
310 DIM PC (5), D (9), COEF (5), EV (5), MEV (5)
320 DIM WW (5), RRE (5), AAL (5), MW (5), MRE (5), MAL (5)
330 DIM DP (5), AP (5), AOR (5), BD4 (5)
340 DIM DRE (7), LRE (7)
350 DIM ALPH (7), ALPH1 (7), ALPH2 (7), ALPH3 (7), ALPH4 (7), ALPH5 (7)
360 DIM LPTS (10)
370 DIM TSH (6), MTSH (6), TSHE (6), MTSHS (6)
380 ORIFICE FLOW COEFFICIENT DATA
390 DATA 5000,10000,20000,30000,50000,100000,1E6,1E7 'REYNOLDS NUMBER
400 DATA 0.690,0.678,0.673,0.667,0.663,0.660,0.659 'MAIN AIR
410 DATA 0.619,0.613,0.611,0.608,0.607,0.607,0.606,0.606 'COOL AIR #1
420 DATA 0.695,0.682,0.677,0.671,0.667,0.664,0.663 'COOL AIR #2
430 DATA 0.731,0.714,0.707,0.700,0.695,0.691,0.689 'COOL AIR #3
440 DATA 0.803,0.792,0.782,0.772,0.762,0.761 'COOL AIR #4
450 DATA 0.611,0.606,0.605,0.604,0.603,0.603,0.602,0.602 'COOL AIR #5
460 FOR I=0 TO 7:READ DRE (I):NEXT I
470 FOR I=0 TO 7:LRE (I)=LOG (DRE (I)):NEXT I
480 FOR I=1 TO 7:READ ALPH (I):NEXT I
490 FOR I=0 TO 7:READ ALPH1 (I):NEXT I
500 FOR I=1 TO 7:READ ALPH2 (I):NEXT I
510 FOR I=1 TO 7:READ ALPH3 (I):NEXT I
520 FOR I=2 TO 7:READ ALPH4 (I):NEXT I
530 FOR I=0 TO 7:READ ALPH5 (I):NEXT I
540 ORIFICE DIMENSIONS IN mm
550 DP (0)=304.7 'DOR0=193 'BDD0=DOR0/DP (0) 'BD4 (0)=BDD0*BDD0*BDD0*BDD0
560 DP (1)=52.9 'DOR1=201 'BDD1=DOR1/DP (1) 'BD4 (1)=BDD1*BDD1*BDD1*BDD1
570 DP (2)=DP (1) 'DOR2=341 'BDD2=DOR2/DP (2) 'BD4 (2)=BDD2*BDD2*BDD2*BDD2
580 DP (3)=DP (1) 'DOR3=371 'BDD3=DOR3/DP (3) 'BD4 (3)=BDD3*BDD3*BDD3*BDD3
590 DP (4)=DP (1) 'DOR4=42.3 'BDD4=DOR4/DP (4) 'BD4 (4)=BDD4*BDD4*BDD4*BDD4
600 DP (5)=52.9 'DOR5=16.7 'BDD5=DOR5/DP (5) 'BD4 (5)=BDD5*BDD5*BDD5*BDD5
610 AREAS IN m sq
620 DP (0)=DP (0)/1000 'DP (1)=DP (1)/1000
630 DP (2)=DP (1) 'DP (3)=DP (1) 'DP (4)=DP (1) 'DP (5)=DP (1)
640 AP (0)=25*3.1415*DP (0) 'DP (0)
650 AP (1)=25*3.1415*DP (1) 'DP (1)
660 AP (2)=AP (1) 'AP (3)=AP (1) 'AP (4)=AP (1) 'AP (5)=AP (1)
670 AOR (0)=25*3.1415*DOR0*DOR0/IE+06
680 AOR (1)=25*3.1415*DOR1*DOR1/IE+06
690 AOR (2)=25*3.1415*DOR2*DOR2/IE+06
700 AOR (3)=25*3.1415*DOR3*DOR3/IE+06
710 AOR (4)=25*3.1415*DOR4*DOR4/IE+06
720 AOR (5)=25*3.1415*DOR5*DOR5/IE+06
730 '
740 FUNCTION FOR VISCOSITY OF AIR
750 A#=000017542699#B#=000000050102678#C#=-3.2091612D-12
760 D#=-1.801007D-15E#=-4.222132D-19
770 DEF FNMU (T)=A#*T*(B#+T*(C#+T*(D#+T*E#)))
780 '
790 COLOR SCREEN FOR FUNCTION KEYS
800 SCREEN 0,0,0,LINE (87,191)-(135,199),2,BF
810 SCREEN 0,1,0,LINE (143,191)-(191,199),2,BF
820 SCREEN 0,2,0
830 LINE (199,191)-(247,199),2,BF:LINE (87,191)-(135,199),2,BF
840 SCREEN 0,3,0
850 LINE (199,191)-(247,199),2,BF:LINE (143,191)-(191,199),2,BF
860 '
870 'CONSTANTS
880 G=9.807
890 KA=1.417 'RKA=1/KA
900 R=29.27
910 '
920 'CONSTANTS FOR mV TO DIMENSIONS
930 EC (0)=1 '100kg-m=1000mV TORQUE
940 EC (1)=101 '10000rpm=1000mV TM280 REV meter analogue output
950 EC (2)=0.12 '1000mV=0 m3/hr 5000mV=48m3/hr H2 FLOW METER
960 ECH2=1000/601 'H2 flow m3/h -> l/min
970 EC (3)=16 '6kg/cm2=10mV H2 PRES. AT H2 FLOW METER
980 EC (4)=3 '3kg/cm2=10mV HYDROGEN PRES. AT NOZZLE RING INLET
990 EC (5)=6 'LUB OIL PRESSURE FOR COUPLING
1000 EC (6)=6 'LUB OIL PRESSURE FOR FRONT BEARING
1010 EC (7)=6 'LUB OIL PRESSURE FOR AFT BEARING
1020 EC (8)=1 'Temp of GT BEARING
1030 EVC=1 'VM-80 0.1RANGE (0.1mm)=1V OUT=(1000mV)
1040 '
1050 CONSOLE 0.25,0.1:WIDTH LPRINT 80
1060 CLS:COLOR 4:LOCATE 20,10
1070 PRINT "水素燃焼再熱ガスタービン性能試験"
1080 LOCATE 25,11:COLOR 7:PRINT "Prog.Ver.:"PROGVER$
1090 COLOR 7
1100 LOCATE 20,15:PRINT "今日の日付は----->":DATES
1110 LOCATE 20,16:INPUT "正しい日付の入力またはリターン:"CRDATES
1120 IF CRDATES < "" THEN DATES=CRDATES
1130 LOCATE 20,18:PRINT "ただ今の時刻は----->":TIMES
1140 LOCATE 20,19:INPUT "正しい時刻の入力またはリターン:"CRTIMES:CLS
1150 IF CRTIMES < "" THEN TIMES=CRTIMES
1160 '
1170 ---PRIMARY OPTION MENU---
1180 '
1190 *PRIMARY
1200 CLS:COLOR 7:GOSUB *SUBTIME
1210 COLOR 4:LOCATE 25,5:PRINT "プライマリー メニュー":COLOR 7
1220 LOCATE 22,7:PRINT "1-圧力変換器のキャリブレーション"
1230 LOCATE 22,9:PRINT "2-測定ルーチン"
1240 LOCATE 22,11:PRINT "3-終了"
1250 LOCATE 25,14:INPUT "KEY IN 1, 2 OR 3 ":"SS
1260 ON SS GOSUB *CALIB,"MES,"ALEND
1270 GOTO *PRIMARY
1280 *ALEND
1290 CLS:CONSOLE 0.25,1
1300 *KEY REDEFINITION
1310 KEY 1,"load "+CHR$( &H22):KEY 6,"save "+CHR$( &H22)
1320 KEY 2,"auto":KEY 7,"key "
1330 KEY 3,"go to "+CHR$( &H22),"print "
1340 KEY 4,"list":KEY 9,"edit "+CHR$( &H22)
1350 KEY 5,"run"+CHR$( &H22):KEY 10,"com"+CHR$( &H22)
1360 END
1370 '
1380 --- MAIN PROGRAM END ---
1390 '
1400 *****
1410 *****SUBROUTINE FOR UCAM STRAIN COEFFICIENTS CALIBRATION*****
1420 *****
1430 ---SUBROUTINE *CALIB
1440 ' (PRESSURE-STRAIN COEFFICIENT CALIBRATION)
1450 '
1460 *CALIB
1470 OPEN "A:\HG2GTPRSTR1.DAT" FOR INPUT AS #1
1480 INPUT #1, CALDATES
1490 FOR I=0 TO 19
1500 INPUT #1, PRSTR (I)
1510 NEXT I
1520 CLOSE #1
1530 PRINT CHR$(12):LOCATE 25,5
1540 PRINT "圧力変換器のひずみ係数"
1550 LOCATE 25,6:PRINT "1-ひずみ係数の測定"
1560 LOCATE 25,7:PRINT "2-ひずみ係数のリスト"
1570 LOCATE 25,9:INPUT " KEY IN 1 OR 2":SC:PRINT
1580 ON SC GOTO *CAL10,*CAL20
1590 *CAL10:COLOR 6
1600 *GPIB INTERFACE CLEAR
1610 ISET IFC
1620 ISET REN
1630 CMD DELIM=0
1640 *INITIALIZE
1650 CLS:LOCATE 25,5:COLOR 6:PRINT "U C A M の初期化をします。"
1660 LOCATE 25,6:INPUT "全ての圧力をゼロにしましたか? (リターン):"YNS
1670 COLOR 4:GOSUB *INITIAL:GOSUB *SUBTIME
1680 LOCATE 25,8:PRINT "U C A M の初期化終了":COLOR 7
1690 *CAL11
1700 LOCATE 25,10
1710 INPUT "測定するチャンネル番号=":CHN
1720 LOCATE 28,11:INPUT "よろしいか? (リターン):"YNS
1730 IF YNS="N" OR YNS="n" GOTO *CAL11
1740 CALDATES=DATES
1750 IF CHN < 10 THEN UCAMS="10A":GOTO *CAL12
1760 IF CHN < 20 AND CHN > 9 THEN UCAMS="5B":GOTO *CAL13
1770 GOTO *CALCANCEL
1780 *CAL12 UCAM=10A
1790 CHNS=RIGHTS (STR$(CHN),1)
1800 AS="CHR00"+CHNS+"00"+CHNS+"01X":PRINT@10,AS
1810 PRINT@10,"MES"
1820 GOTO *CAL14
1830 *CAL13 UCAM=5B
1840 CHNS=RIGHTS (STR$(CHN),1)
1850 AS="CHR00"+CHNS+"00"+CHNS+"01X":PRINT@5,AS
1860 PRINT@5,"MES"
1870 *CAL14
1880 K=0
1890 *CAL15
1900 CLS:LOCATE 25,10
1910 PRINT "測定するチャンネル番号=":CHN
1920 LOCATE 25,11:INPUT "圧力計の読みを入力 (kgf/m2)=":PCALIB
1930 PC (K)=PCALIB
1940 AS="STA"+GOSUB *SUBTIME
1950 IF UCAMS="10A" THEN PRINT@10,AS ELSE PRINT@5,AS
1960 IF UCAMS="10A" THEN INPUT@10,CKD (K) ELSE INPUT@5,CKD (K)
1970 IF D (K)=0 THEN PRINT "計測した圧力データは 0 です。":COEF (K)=0!
1980 IF D (K) > 0 THEN COEF (K)=PC (K)/D (K)
1990 LOCATE 25,13:COLOR 4:PRINT "チャンネル番号=":CHN:"の圧力計測終了"
2000 LOCATE 25,14:COLOR 7:INPUT "もう一回測定しますか? (リターン):"YNS
2010 IF YNS="N" OR YNS="n" GOTO *CAL16
2020 K=K+1:GOTO *CAL15
2030 *CAL16
2040 SCC=0
2050 FOR KK=0 TO K
2060 SCC=SCC+COEF (KK)
2070 NEXT KK
2080 PRSTR (CHN)=SCC/(K+1):GOSUB *SUBTIME
2090 PRINT CHR$(12):LOCATE 10,5:COLOR 4
2100 PRINT "測定結果 チャンネル番号=":CHN:PRINT:COLOR 7
2110 PRINT " P (kgf/m2) STRAIN P/S (kgf/m2)/(micron) "
2120 FOR I=0 TO K
2130 PRINT USING "####.#":PC (I):PRINT " "
2140 PRINT USING "####.#":D (I):PRINT " "
2150 PRINT USING "#####":COEF (I)
2160 NEXT I
2170 PRINT
2180 PRINT "チャンネル番号:"CHN:"のひずみ係数は:"PRSTR (CHN)
2190 PRINT
2200 *CALCANCEL
2210 INPUT "全てのチャンネルの計測を終りましたか(リターン):"YNS:CLS
2220 IF YNS="N" OR YNS="n" GOTO *CAL11
2230 LOCATE 25,5:COLOR 6
2240 INPUT "ひずみ係数が更新されます。よろしいか(リターン):"YNS
2250 IF YNS="N" OR YNS="n" GOTO *CAL20
2260 OPEN "A:\HG2GTPRSTR1.DAT" FOR OUTPUT AS #1
2270 WRITE #1,CALDATES
2280 FOR I=0 TO 19
2290 WRITE #1, PRSTR (I)
2300 NEXT I
2310 CLOSE #1
2320 GOTO *CAL30
2330 *CAL20 TO SEE THE LAST CALIBRATION DATA
2340 OPEN "A:\HG2GTPRSTR1.DAT" FOR INPUT AS #1
2350 INPUT #1, CALDATES
2360 FOR I=0 TO 19
2370 INPUT #1, PRSTR (I)

```

```

2380 NEXT I
2390 CLOSE #1
2400 CLS:COLOR 4:LOCATE 20,0:PRINT "圧力変換器のひずみ係数のリスト"
2410 LOCATE 5,1:COLOR 7:PRINT "こう正年月日=";CALDATES
2420 LOCATE 5,2:PRINT "チャンネル番号"
2430 LOCATE 25,2:PRINT "ひずみ係数 (kgf/m2) /Micron"
2440 FOR I=0 TO 19:II=I+3
2450 LOCATE 15,II:PRINT I
2460 LOCATE 25,II:PRINT USING "###.####":PRSTR (I)
2470 NEXT I
2480 GOSUB *SUBTIME
2490 *CAL30 "HARD COPY OF THE LIST OF STRAIN COEFFICIENTS"
2500 COLOR 4:LOCATE 10,23
2510 INPUT "ひずみ係数のリストを印字しますか(リターン/N)";YNS
2520 COLOR 7
2530 IF YNS="N" OR YNS="n" GOTO *CAL.END
2540 GOSUB *COEFFPRINT
2550 *CAL.END
2560 CLS:LOCATE 25,5:COLOR 4
2570 INPUT "圧力変換器のキャリブレーション終了";YNS:COLOR 7
2580 RETURN
2590
2600 ---SUBROUTINE FOR STRAIN COEFFICIENTS LPRINTING
2610 *COEFFPRINT
2620 LPRINT "THE LIST OF STRAIN COEFFICIENTS"
2630 LPRINT "CALIBRATION DATE=";CALDATES:LPRINT
2640 FOR I=0 TO 9
2650 LPRINT "CH NO.=",I," ":LPRINT USING "###.####":PRSTR (I);
2660 LPRINT TAB (30) "CH NO.=",I+10:LPRINT TAB (43);
2670 LPRINT USING "###.####":PRSTR (I+10)
2680 NEXT I
2690 I=7:LPRINT "CH NO.=",I," ":LPRINT USING "###.####":PRSTR (I)
2700 LPRINT:LPRINT:LPRINT
2710 RETURN
2720
2730 *****SUBROUTINE *INITIAL *****
2740 --- UCAM 10A AND 5B - STRAIN OF PRESSURE TO BE SET ZERO
2750 *INITIAL
2760 --- UCAM-10A PARAMETER SETTING---
2770 *CONSTANT,INTERVAL,PRINTER,STORAGE ---> OFF
2780 PRINT@ 10;"COF,IOF,POF,SOF"
2790 PRINT@ 10;"CHR0000901X" 'SCANNING CH000 TO CH009,REPEAT=01
2800 PRINT@ 10;"MOD07X,DUP009X" 'PRES.TRANSDUCER CH000 TO CH009
2810 --- UCAM-5B PARAMETER SETTING---
2820 *CONSTANT,INTERVAL,PRINTER ---> OFF
2830 PRINT@ 5;"COF,IOF,POF"
2840 *SCANNING CHANNELS AND MODE SETTING
2850 PRINT@ 5;"CHR0000901X" 'SCANNING CH000 TO CH009 ,REPEAT=01
2860 PRINT@ 5;"SET107XD0009X" 'PRES.TRANSDUCER CH000 TO CH009
2870 AS="INT"
2880 PRINT@ 5:AS:PRINT@ 10:AS 'INITIALIZE MODE SETTING
2890 AS="STA"
2900 PRINT@ 5:AS:PRINT@ 10:AS
2910 FOR K=0 TO 9
2920 INPUT @10;CK,D(K)
2930 NEXT K
2940 FOR K=0 TO 9
2950 INPUT @ 5;CK,D(K)
2960 NEXT K
2970 RETURN
2980
2990 *****
3000 *****SUBROUTINES FOR MEASUREMENT*****
3010 *****
3020
3030 *****SUBROUTINE *MES (MEASURE) *****
3040
3050 *MES
3060
3070 ISET IFC
3080 ISET REN
3090 CMD DELIM=0
3100 TIMEOUT=3
3110
3120 CONSOLE ,1,1 -COLOR 7
3130 FOR I=1 TO 10:KEY I,"NEXT I"
3140 KEY 1,"AHEAD":KEY 2,"MN ON":KEY 3,"MN OFF":KEY 4,"MEAN"
3150 KEY 5,"newsp"
3160
3170 *ERROR TRAP BEGINS HERE
3180 ON ERROR GOTO *ERRTRP
3190 TO READ THE PRESSURE-STRAIN COEFFICIENTS DATA
3200 OPEN "A:\H2GTW\PRSTR1.DAT" FOR INPUT AS #1
3210 INPUT #1, CALDATES
3220 FOR I=0 TO 19
3230 INPUT #1, PRSTR (I)
3240 NEXT I
3250 CLOSE #1
3260 *UNIT CHANGE OF CH0,2,4,6,8,10,12,13...19 (kg/cm2) -> (kg/cm2)
3270 FOR I=0 TO 12 STEP 2:PRSTR (I)=PRSTR (I)/10000:NEXT I
3280 FOR I=13 TO 19:PRSTR (I)=PRSTR (I)/10000:NEXT I
3290
3300 *MESSTART
3310 *CHECK OF SLAVE COMPUTER
3320 CLS:LOCATE 25,10
3330 PRINT "N o . 2 C O M P U T O R をスタートしてください"
3340 PRINT@ 2;"SLAVE"
3350 INPUT@ 2;YNS
3360 IF YNS="YES" THEN *STARTI
3370 *LOCATE 25,12:INPUT "データが異なります。測定を中止します。";YNS
3380 *GOTO *MEND
3390 *STARTI
3400
3410 *MESMORE
3420 MNFLAG=1
3430 PRINT CHR$(12):GOSUB *SUBTIME:COLOR 4
3440 *LAST EXPERIMENT NUMBER TO RECALL
3450 OPEN "A:\H2GTW\LASTXN.DAT" FOR INPUT AS #1
3460 INPUT #1,PROGVERS,LXNS,SCN,PP,TTI,PPLO,TTLO,EZERO,ETORQ:CLOSE #1
3470 LOCATE 15,1:PRINT "前回の実験番号"---->"LXNS"
3480 LOCATE 15,2:INPUT "新実験番号の入力または(リターン)";EXPNUMS:COLOR 7
3490 IF EXPNUMS="" THEN EXPNUMS=LXNS
3500
3510 LOCATE 15,4:PRINT "本日の大気圧 (mmHg) ----->";
3520 PRINT USING "###.#":PP
3530 LOCATE 15,5:INPUT "正しい大気圧の入力または(リターン)";PAHG
3540 IF PAHG=0 THEN PAHG=PP
3550 LOCATE 15,7:PRINT "本日の大気温度 (°C) ----->";
3560 PRINT USING "###.#":TT
3570 LOCATE 15,8:INPUT "正しい大気温度の入力または(リターン)";TAC
3580 IF TAC=0 THEN TAC=TT
3590 LOCATE 15,10:PRINT "平均値測定時のスキャン回数----->";SCN
3600 LOCATE 15,11
3610 PRINT "正しい回数を入力または(リターン)";INPUT NSCN$
3620 IF NSCN$="" THEN SCN=SCN ELSE SCN=VAL (NSCN$)
3630 LOCATE 15,13:PRINT "潤滑油最低圧力設定値 (kg/cm2) ----->";
3640 PRINT USING "###.#":PPLO
3650 LOCATE 15,14
3660 PRINT "新しい圧力を入力または(リターン)";INPUT PLO
3670 IF PLO=0 THEN PLO=PPLO
3680 LOCATE 15,16:PRINT "潤滑油最高温度設定値 (°C) ----->";
3690 PRINT USING "###.#":TTLO
3700 LOCATE 15,17
3710 PRINT "新しい温度を入力または(リターン)";INPUT TLO
3720 IF TLO=0 THEN TLO=TTLO
3730 LOCATE 15,19
3740 INPUT "G T 回転数のゼロ補正値変更する(リターン)/(N)";YNS
3750 IF YNS="N" OR YNS="n" THEN RZERO=0 ELSE RZERO=1
3760 LOCATE 15,19
3770 INPUT "G T トルクのゼロ補正値変更する(リターン)/(N)";YNS
3780 IF YNS="N" OR YNS="n" THEN TORQ=0 ELSE TORQ=1
3790
3800 COLOR 4:LOCATE 15,19:PRINT STRINGS(60," ")
3810 LOCATE 15,19:INPUT "実験のタイトルを印字しますか(リターン)/(N)";YNS
3820 IF YNS="N" OR YNS="n" GOTO *NOHEAD
3830 LPRINT "*****"
3840 LPRINT "***** 水素燃焼再燃ガスタービン性能試験 *****"
3850 LPRINT "***** Ver.=";PROGVERS;" *****"
3860 LPRINT "*****"
3870 LPRINT "DATE=";DATES," TIME=";TIMES
3880 LPRINT "PA =";LPRINT USING "###.#";PAHG:LPRINT "mmHg TA=";
3890 LPRINT USING "###.#";TAC:LPRINT "C":LPRINT:LPRINT
3900
3910 LOCATE 15,20:INPUT "圧力歪係数リストを印字しますか(リターン)/(N)";YNS
3920 IF YNS="N" OR YNS="n" GOTO *NOHEAD ELSE GOSUB *COEFFPRINT
3930 *NOHEAD:COLOR 6
3940 *LAST EXPERIMENT NUMBER RECORDED
3950 OPEN "A:\H2GTW\LASTXN.DAT" FOR OUTPUT AS #1
3960 WRITE #1,PROGVERS,EXPNUMS,SCN,PAHG,TAC,PLO,TLO,EZERO,ETORQ:CLOSE #1
3970 *TRANSFER NEW PARAMETERS TO THE SLAVE COMPUTER
3980 PRINT@ 2;EXPNUMS,PLO,TLO
3990 *UCAM INITIALIZATION
4000 LOCATE 15,19:PRINT "測定に入る前にUCAMの初期化をします。"
4010 LOCATE 15,20
4020 PRINT "全ての圧力をゼロにセットしましたか(リターン)?";COLOR 7
4030 LOCATE 15,21
4040 INPUT "もし、初期化の必要がなければ N を入力。";YNS
4050 COLOR 7
4060 IF YNS="N" OR YNS="n" THEN CLS:GOTO *NOINIT
4070 CMD DELIM=0
4080 COLOR 4:GOSUB *INITIAL
4090 CLS:LOCATE 25,8:PRINT "UCAMの初期化終了";COLOR 7
4100 *NOINIT
4110 --- UCAM-10A AND 5B GPIB PARAMETERS RESETTING ---
4120 CMD DELIM=0
4130 PRINT@ 10;"CHR00014801X" 'SCANNING CH000 TO CH148,REPEAT=01
4140 PRINT@ 10;"MOD07X,DUP009X" 'PRES.TRANSMTER CH000 TO CH009
4150 PRINT@ 10;"MOD01X,DUP129X" 'CA THERM.COUPLE CH100 TO CH129
4160 PRINT@ 10;"MOD00X,DUP129X" 'CH SKIPPING CH128 TO CH129
4170 PRINT@ 10;"MOD08X,DUP133X" 'mV RANGE CH130 TO CH133
4180 PRINT@ 10;"MOD00X,DUP139X" 'CH SKIPPING CH134 TO CH139
4190 PRINT@ 10;"MOD08X,DUP148X" 'mV RANGE CH140 TO CH148
4200 PRINT@ 10;"MES" 'UCAM-10A MEASURE MODE
4210 PRINT@ 5;"MES" 'UCAM-5B MEASURE MODE
4220 --- TR2724 TEMPERATURE GPIB PARAMETERS SETTING
4230 CMD DELIM=2
4240 *PROGRAM INITIALIZE,TEMP INTERNAL,PRINTER REVERSE
4250 PRINT@ 27;"TS150S31"
4260 *GPIB ON,DELIMITER LF,SIMPLIFIED OUTPUT FORMAT,PRINTER OFF
4270 PRINT@ 27;"W3MID01W0"
4280 *SET SCANNING CHANNEL
4290 PRINT@ 27;"SC01,12"
4300 *SET MAXIMUM SCANNING TIMES
4310 PRINT@ 27;"CN00001"
4320 *CHANNEL RANGE TYPE PROGRAMMING
4330 PRINT@ 27;"CP01,12RG08" 'CA THERMO COUPLE
4340 *OPEN DATA FILES OF EXPNUMS FOR MONITOR AND MEASURE
4350 OPEN "A:\H2GTW\DATA\*EXPNUMS*" *MES" FOR OUTPUT AS #1
4360 WRITE #1,PROGVERS,EXPNUMS,SCN,PAHG,TAC:CLOSE #1
4370 OPEN "A:\H2GTW\DATA\*EXPNUMS*" *MON" FOR OUTPUT AS #2
4380 WRITE #2,PROGVERS,EXPNUMS,SCN,PAHG,TAC
4390
4400 *OPEN MONITOR DATA FILE IN RAMDISK FOR EXP. NUMBER=EXPNUMS
4410 *OPEN "D:\*EXPNUMS*" *MON" FOR OUTPUT AS #2
4420 *WRITE #2,PROGVERS,EXPNUMS,SCN,PAHG,TAC
4430
4440 ---TEMPORARY MEASUREMENT ROUTINE
4450
4460 *FUNCTION KEY SET FOR TEMPORARY MEASUREMENT
4470 FLAG=0:MNFLAG=1:MESFLAG=0:MCLFLAG=1:SWITCHS="CONT"
4480 ON KEY GOSUB *MFLAG1,*MFLAG2,*MFLAG3,*MFLAG4,*MFLAG5,*MFLAG6
4490 FOR I=1 TO 6:KEY (I) ON:NEXT I
4500
4510 GOSUB *TTILDISP
4520 PA=13.56:PAHG
4530 *TEMPORARY MEASUREMENT ROUTINE
4540 *MESINTRO
4550 GOSUB *SUBTIME 'MEASUREMENT STARTING TIME
4560 CMD DELIM=0
4570 PRINT@ 10;"STA" 'UCAM-10A START
4580 PRINT@ 5;"STA" 'UCAM-5B START
4590 CMD DELIM=2
4600 PRINT@ 27;"T1" 'TR2724 START
4610 GOSUB *SUBINPUT
4620 TPTIMES=TPTIMES
4630 IF RZERO=1 THEN EZERO=E(1)
4640 IF TORQ=1 THEN ETORQ=E(1) ELSE GOTO *MESROUTINE
4650 *LAST EXPERIMENT NUMBER RECORDED AGAIN
4660 OPEN "A:\H2GTW\LASTXN.DAT" FOR OUTPUT AS #1
4670 WRITE #1,PROGVERS,EXPNUMS,SCN,PAHG,TAC,PLO,TLO,EZERO,ETORQ:CLOSE #1
4680 *MESROUTINE
4690 TPTIMES=TIMES
4700 CMD DELIM=0
4710 PRINT@ 10;"STA" 'UCAM-10A START
4720 PRINT@ 5;"STA" 'UCAM-5B START
4730 CMD DELIM=2
4740 PRINT@ 27;"T1" 'TR2724 START
4750 GOSUB *MAINDISP
4760 *AIR FLOW RATE CALCULATIONS
4770 FOR IOR=0 TO 5

```



```

4780 IOR2=IOR*2:FOR=PR (IOR2)*10000:DPO=PR (IOR2+1)
4790 IF IOR=0 THEN TOR=T (0) ELSE TOR=T (5)
4800 GOSUB *FRATE
4810 WW (IOR) =W*RRE (IOR) =RE:AAL (IOR) =AL
4820 NEXT IOR
4830 GOSUB *SLAVE
4840 GOSUB *FLDISP
4850 IF MESFLAG=0 AND MNFLAG=1 THEN SCREEN 0,,1
4860 IF MESFLAG=0 AND MNFLAG=0 THEN SCREEN 0,,2
4870 IF MNFLAG=1 THEN GOSUB *MONHD
4880 IF FLAG=4 THEN FLAG=0:MESFLAG=1:IMES=0:GOSUB *MEANMES:GOTO *SCRPT
4890 IF MESFLAG=1 THEN GOSUB *MEANMES
4900 IF MESFLAG=2 THEN GOSUB *MEANCALC
4910 *SCRPT
4920 IF MESFLAG=1 AND MNFLAG=1 THEN SCREEN 0,,17
4930 IF MESFLAG=1 AND MNFLAG=0 THEN SCREEN 0,,18
4940 GOSUB *SUBINPUT
4950 E (1) =E (1) -EZERO
4960 E (0) =E (0) -ETORQ
4970 '
4980 TPTIME$=TPTIMES
4990 IF FLAG=1 THEN SWITCH$="END":GOSUB *SLAVE
5000 IF FLAG=1 THEN CLOSE :SCREEN 0,,0 :GOTO *MEND
5010 GOTO *MESROUTINE
5020 *ERROR TRAPS
5030 *ERRTRP
5040 LOCATE 0,23
5050 IF ERR=131 AND ERL=3340 THEN PRINT "No.2 COMP. NOT READY"
5060 IF ERR=131 AND ERL=3340 THEN RESUME *MESSTART
5070 IF ERR=128 THEN *ERRTRP1 ELSE *ERRTRP2
5080 *ERRTRP1 *GPIB TIMEOUT ERROR
5090 CLOSE
5100 COLOR 5
5110 PRINT *GPIB TIME OVER --LINE$=:ERL;
5120 GOSUB *SUBBEEP
5130 COLOR 6:INPUT * 測定を中止します(リターン)*:OK$:COLOR 7:CLS 3
5140 RESUME *ERRTRP3
5150 *ERRTRP2
5160 COLOR 5:PRINT "ERROR CODE$=:ERR: LINE$=:ERL:
5170 COLOR 6:INPUT * 測定を中止します(リターン)*:OK$:COLOR 7:CLS 3
5180 ON ERROR GOTO 0
5190 *ERRTRP3
5200 FERRTRP1=1:GOTO *MEND
5210 '---ERRTRP ROUTINE END---
5220 '
5230 *MEND
5240 KEY OFF
5250 CLS
5260 LOCATE 20,5:COLOR 4:PRINT "測定を終りました。":COLOR 7
5270 LOCATE 20,11:INPUT "実験を継続しますか? (Y-CR/N)":YNS
5280 IF YNS="N" OR YNS="n" THEN *MEND3 ELSE GOTO *MESSTART
5290 IF FERRTRP1=1 THEN *ALEND
5300 *MEND3:CLS 3
5310 RETURN
5320 '---SUBROUTINE *MES END---
5330 *-----
5340 *-----GENERAL SUBROUTINES-----
5350 *-----
5360 '---SUBROUTINE OF TIME PRINTING
5370 *SUBTIME
5380 TPTIMES=TIMES:LOCATE 62,0:PRINT "測定時刻$=:TPTIMES:COLOR 7:RETURN
5390 '
5400 '---SUBROUTINE BEEP WARNING
5410 '
5420 *SUBBEEP
5430 FOR BI=1 TO 15:BEEP 1:FOR I=0 TO 50:NEXT:BEEP 0:FOR I=0 TO 20:NEXT:NEXT BI
5440 RETURN
5450 '
5460 '---SUBROUTINES FOR FUNCTION KEY FLAGS
5470 '
5480 *MFLAG1:FLAG=1:RETURN
5490 *MFLAG2:MNFLAG=1:FLAG=0:RETURN
5500 *MFLAG3:MNFLAG=0:FLAG=0:RETURN
5510 *MFLAG4:FLAG=4:RETURN
5520 *MFLAG5:CLS:GOSUB *TITLDISP:RETURN
5530 *MFLAG6:FLAG=6:RETURN
5540 *-----
5550 *-----SUBROUTINES FOR DATA I/O-----
5560 *-----
5570 *SUBROUTINE FOR DATA ACQUISITION
5580 *SUBINPUT
5590 '---DATA ACQUISITION---
5600 CMD DELIM=0
5610 FOR I=0 TO 19
5620 INPUT@ 5,CH,PR (I)
5630 NEXT I
5640 FOR I=0 TO 9
5650 INPUT@ 10,CH,PR (I)
5660 NEXT I
5670 FOR I=0 TO 29
5680 INPUT@ 10,CH,T (I)
5690 NEXT I
5700 FOR I=0 TO 3
5710 INPUT@ 10,CH,EV (I):EV (I) =EVC*EV (I)
5720 NEXT I
5730 FOR I=0 TO 8
5740 INPUT@ 10,CH,E (I)
5750 NEXT I
5760 FOR I=0 TO 19
5770 PR (I) =PRSTR (I) *PR (I)
5780 NEXT I
5790 FOR I=0 TO 8
5800 E (I) =EC (I) *E (I)
5810 NEXT I
5820 E (2) =E (2) -I21
5830 E (2) =E (2) *ECH2$ ((I+E (3) /1.033) /((I+T (12) /273.15)
5840 CMD DELIM=2
5850 INPUT@ 27,AS
5860 INPUT@ 27,AA,TSH (1)
5870 FOR I=2 TO 6
5875 INPUT@ 27,AA,TSH (I)
5880 NEXT I
5885 FOR I=1 TO 6
5890 INPUT@ 27,AA,TSHE (I)
5895 NEXT I
5900 RETURN
5910 '---MONITOR DATA FILING IN HARD DISK
5920 *MONHD
5930 WRITE #2,TPTIME$
5940 FOR I=0 TO 19 STEP 4:WRITE #2,PR (I),PR (I+1),PR (I+2),PR (I+3):NEXT I

```

```

5950 FOR I=0 TO 29 STEP 5:WRITE #2,T (I),T (I+1),T (I+2),T (I+3),T (I+4):NEXT I
5960 WRITE #2,TSH (1),TSH (2),TSH (3),TSH (4),TSH (5),TSH (6)
5965 WRITE #2,TSHE (1),TSHE (2),TSHE (3),TSHE (4),TSHE (5),TSHE (6)
5970 WRITE #2,E (0),E (1),E (2),E (3),E (4),E (5),E (6),E (7),E (8)
5980 WRITE #2,EV (0),EV (1),EV (2),EV (3)
5990 WRITE #2,WW (0),WW (1),WW (2),WW (3),WW (4),WW (5)
6000 RETURN
6010 '---SENDING DATA TO SLAVE CRT ADDRESS=2
6020 *SLAVE
6030 CMD DELIM=0
6040 PRINT@ 2:SWITCH$,TPTIME$
6050 PRINT@ 2:WW (0),PR (13),PR (14),MTREP,MTEX,E (0),E (1)
6060 PRINT@ 2:T (13),T (14),T (15),E (5),E (6),E (7),E (8)
6070 PRINT@ 2:EV (0),EV (1),EV (2),EV (3)
6080 PRINT@ 2:T (16),T (17),T (18),T (19),T (20),T (21),T (22),T (23)
6090 PRINT@ 2:T (24),T (25),T (26),T (27)
6095 PRINT@ 2:TSHE (1),TSHE (2),TSHE (3),TSHE (4),TSHE (5),TSHE (6)
6100 RETURN
6110 *-----
6120 ***** SUBROUTINE FOR DISPLAY *****
6130 *-----
6140 '---TITLE DISPLAY
6150 *TITLDISP
6160 CLS:COLOR 4
6170 LOCATE 25,1:PRINT "測定結果 実験番号$=:EXPNUMS
6180 COLOR 7
6190 LOCATE 62,0:PRINT "測定時刻$=:TPTIME$
6200 LOCATE 5,2:COLOR 5:PRINT "タービン性能$=:COLOR 7
6210 AS$="出力 (PS) "+SPACES (5)+"回転数 (RPM) "+SPACES (5)+"トルク (kg-m) "
6220 AS$=AS$+SPACES (5)+"主空気 "LPTS (1)+"冷空 1-"
6230 LOCATE 0,3:PRINT AS
6240 AS$="入口温度℃ "+SPACES (3)+"出口温度℃ "+SPACES (6)+"入口圧力 kg/c m2 "
6250 AS$=AS$+SPACES (3)+"出口圧力 kg/c m2 "
6260 LOCATE 0,5:PRINT AS
6270 ILF=14
6280 LOCATE 5,ILF:COLOR 5:PRINT "流量関係データ$=:COLOR 7
6290 AS$="系統名 "+SPACES (3)+"流量 kg/sec "+SPACES (4)+"前圧 atg "+SPACES (4)
6300 AS$=AS$+SPACES (4)+"差圧 mmHg "+SPACES (4)+"温度℃ "+SPACES (4)+"GT 供給圧 "
6310 AS$=AS$+SPACES (4)+"GT 供給値 "
6320 LPTS (0) ="主空気 "LPTS (1)+"冷空 1-"
6330 LPTS (2) ="冷空 1-2 "LPTS (3) ="冷空 2-"
6340 LPTS (4) ="冷空 3 "LPTS (5) ="冷空 4 "LPTS (6) ="冷空 1/2 "
6350 LOCATE 0,ILF+1:PRINT AS
6360 FOR ILL=2 TO 8 :LOCATE 0,ILF+ILL:PRINT LPTS (ILL-2):NEXT ILL
6370 ILH=11
6380 LOCATE 5,ILH:COLOR 5:PRINT "水素ガス$=:COLOR 7
6390 LOCATE 5,ILH:COLOR 7
6400 AS$="流量 N/m3 "+SPACES (5)+"圧力 kg/c m2 "+SPACES (5)+"温度℃ "
6410 AS$=AS$+SPACES (2)+"供給圧 atg "+SPACES (3)+"供給圧 温度 "
6420 LOCATE 0,ILH+1:PRINT AS
6430 ILC=7:ILC1=ILC-1:ILC2=ILC-2:ILC3=ILC-3
6440 LOCATE 5,ILC:COLOR 5:PRINT "燃焼関係データ$=:COLOR 7
6450 AS$="入口温度℃ "+SPACES (11)+" 入口圧力 (" +SPACES (6) +") "
6460 LOCATE 0,ILC:PRINT AS
6470 AS$="出口温度西 "+"出口温度南 "+"出口温度SE "
6480 AS$=AS$+"出口温度東 "+"出口温度NE "+"出口温度NW "+"平均温度 "
6490 LOCATE 0,ILC2:PRINT AS
6500 RETURN
6510 '---MAIN DATA DISPLAY
6520 *MAINDISP
6530 PS=E (0) *E (1) /716.2
6540 MTREP=0
6550 FOR II=2 TO 4:MTREP=MTREP+T (II):NEXT II
6560 MTREP=MTREP+T (7)+T (28)+T (29)
6570 MTREP=MTREP/6
6580 MTEX=0
6590 FOR II=1 TO 12:MTEX=MTEX+T (II+15):NEXT II
6600 MTEX=MTEX/12
6610 MNTSH=0
6620 FOR II=1 TO 6:MNTSH=MNTSH+TSH (II):NEXT II
6630 MNTSH=MNTSH/6
6640 LOCATE 71,0:PRINT TPTIME$
6650 LOCATE 3,4:PRINT USING "###.#":PS
6660 LOCATE 3,4:PRINT USING "###.#":E (1)
6670 LOCATE 33,4:PRINT USING "###.#":E (0)
6680 LOCATE 4,6:PRINT USING "###.#":MTREP
6690 LOCATE 17,6:PRINT USING "###.#":MTEX
6700 LOCATE 34,6:PRINT USING "###.#":PR (13)
6710 LOCATE 50,6:PRINT USING "###.#":PR (14)
6720 FOR I=0 TO 5:LI=I+ILF+2:IP=I+2:IPD=IP+1
6730 IF I>1 THEN LI=I+ILF+3
6740 LOCATE 24,LI:PRINT USING "###.#":PR (IP)
6750 LOCATE 36,LI:PRINT USING "###.#":PR (IPD)
6760 IF I=0 THEN IT=0 ELSE IT=5
6770 LOCATE 48,LI:PRINT USING "###.#":T (IT)
6780 IF I=1 THEN *LCNEXT1 ELSE *LCNEXT2
6790 *LCNEXT1
6800 LOCATE 58,LI:PRINT USING "###.#":PR (15)
6810 LOCATE 72,LI:PRINT USING "###.#":T (6)
6820 LOCATE 58,LI+1:PRINT USING "###.#":PR (16)
6830 LOCATE 72,LI+1:PRINT USING "###.#":T (7)
6840 *LCNEXT2
6850 IF I<2 OR I=5 THEN *LCNEXT3
6860 LOCATE 58,LI:PRINT USING "###.#":PR (15+1)
6870 LOCATE 72,LI:PRINT USING "###.#":T (6+1)
6880 *LCNEXT3
6890 NEXT I
6900 ILH2=ILH+2
6910 LOCATE 3,ILH2:PRINT USING "###.#":E (2)
6920 LOCATE 19,ILH2:PRINT USING "###.#":E (3)
6930 LOCATE 30,ILH2:PRINT USING "###.#":T (12)
6940 LOCATE 45,ILH2:PRINT USING "###.#":E (4)
6950 LOCATE 60,ILH2:PRINT USING "###.#":T (11)
6960 '
6970 LOCATE 16,ILC1:PRINT USING "###.#":T (1)
6980 LOCATE 35,ILC1:PRINT USING "###.#":PR (12)
6990 LOCATE 0,ILC3
7000 PRINT USING "###.#":T (2),T (7),T (3),T (28),T (4),T (29);
7010 PRINT USING "###.#":MTREP
7020 LOCATE 0,ILC3+1
7030 PRINT USING "###.#":TSH (1),TSH (2),TSH (3),TSH (4),TSH (5),TSH (6);
7040 PRINT USING "###.#":MNTSH
7050 RETURN
7060 '---FLOW RATE DISPLAY
7070 *FLDISP
7080 LOCATE 51,4:PRINT USING "###.#":WW (0)
7090 FOR I=0 TO 5
7100 LI=I+ILF+2:IF I>1 THEN LI=I+ILF+3
7110 LOCATE 14,LI:PRINT USING "###.#":WW (I)
7120 NEXT I

```

```

7130 RETURN
7140 *****
7150 *****MEAN MEASUREMENT*****
7160 *MEANMES
7170 IMES=IMES+1
7180 IF IMES=1 THEN OPEN "A:WH2GTWDATA\*"+EXPNUMS+"MES" FOR APPEND AS #1
7190 IF IMES=1 THEN WRITE #1,SCN:TPTIME1$-TPTIMEOS
7200 WRITE #1,TPTIMEOS
7210 FOR I=0 TO 19 STEP 4:WRITE #1,PR (I),PR (I+1),PR (I+2),PR (I+3),NEXT I
7220 FOR I=0 TO 29 STEP 5:WRITE #1,T (1),T (I+1),T (I+2),T (I+3),T (I+4),NEXT I
7230 WRITE #1,TSH (1),TSH (2),TSH (3),TSH (4),TSH (5),TSH (6)
7235 WRITE #1,TSHE (1),TSHE (2),TSHE (3),TSHE (4),TSHE (5),TSHE (6)
7240 WRITE #1,E (0),E (1),E (2),E (3),E (4),E (5),E (6),E (7),E (8)
7250 WRITE #1,EV (0),EV (1),EV (2),EV (3)
7260 WRITE #1,WW (0),WW (1),WW (2),WW (3),WW (4),WW (5)
7270 '
7280 IF IMES=1 THEN *MZERO ELSE *MSUM
7290 *MZERO
7300 FOR I=0 TO 19: MPR (I)=0: NEXT I
7310 FOR I=0 TO 29: MT (I)=0: NEXT I
7320 FOR I=1 TO 6: MTSH (I)=0: NEXT I
7325 FOR I=1 TO 6: MTSHE (I)=0: NEXT I
7330 FOR I=0 TO 8: ME (I)=0: NEXT I
7340 FOR I=0 TO 3: MEV (I)=0: NEXT I
7350 *MSUM
7360 FOR I=0 TO 19: MPR (I)=MPR (I)+PR (I): NEXT I
7370 FOR I=0 TO 29: MT (I)=MT (I)+T (I): NEXT I
7380 FOR I=1 TO 6: MTSH (I)=MTSH (I)+TSH (I): NEXT I
7385 FOR I=1 TO 6: MTSHE (I)=MTSHE (I)+TSHE (I): NEXT I
7390 FOR I=0 TO 8: ME (I)=ME (I)+E (I): NEXT I
7400 FOR I=0 TO 3: MEV (I)=MEV (I)+EV (I): NEXT I
7410 IF IMES=SCN THEN *MEAN
7420 MESFLAG=1: RETURN
7430
7440 *MEAN
7450 TPTIME1$=TPTIMEOS
7460 FOR I=0 TO 19: MPR (I)=MPR (I)/SCN: NEXT I
7470 FOR I=0 TO 29: MT (I)=MT (I)/SCN: NEXT I
7480 FOR I=1 TO 6: MTSH (I)=MTSH (I)/SCN: NEXT I
7485 FOR I=1 TO 6: MTSHE (I)=MTSHE (I)/SCN: NEXT I
7490 FOR I=0 TO 8: ME (I)=ME (I)/SCN: NEXT I
7500 FOR I=0 TO 3: MEV (I)=MEV (I)/SCN: NEXT I
7510 WRITE #1,TPTIME1$+TPTIME1$
7520 FOR I=0 TO 19 STEP 4:WRITE #1,MPR (I),MPR (I+1),MPR (I+2),MPR (I+3),NEXT I
7530 FOR I=0 TO 29 STEP 5:WRITE #1,MT (I),MT (I+1),MT (I+2),MT (I+3),MT (I+4),NEXT I
7540 WRITE #1,MTSH (1),MTSH (2),MTSH (3),MTSH (4),MTSH (5),MTSH (6)
7545 WRITE #1,MTSHE (1),MTSHE (2),MTSHE (3),MTSHE (4),MTSHE (5),MTSHE (6)
7550 WRITE #1,ME (0),ME (1),ME (2),ME (3),ME (4),ME (5),ME (6),ME (7),ME (8)
7560 WRITE #1,MEV (0),MEV (1),MEV (2),MEV (3)
7570 CLOSE #1
7580 MESFLAG=2
7590 RETURN
7600 *MEAN PERFORMANCE CALCULATION AND OUTPUT FOR LPRINTER
7610 *MEANCALC
7620 ON MCFLAG GOTO *MC1,*MC2
7630 *MC1
7640 MPS=ME (0)*ME (1)/716.2
7650 MAIN AIR FLOW RATE
7660 FOR IOR=0 TO 5
7670 IF IOR=0 THEN TOR=MT (0) ELSE TOR=MT (5)
7680 IOR2=IOR*2:POR=MPR (IOR2)*10000:DPO=MPR (IOR2+1)
7690 GOSUB *F.RATE
7700 MW (IOR)=W:MRE (IOR)=RE:MAL (IOR)=AL
7710 NEXT IOR
7720
7730 MMTREP=(MT (2)+MT (3)+MT (4)+MT (7)+MT (28)+MT (29))/6
7740 MMTX=0
7750 FOR IIT=1 TO 12
7760 MMTX=MMTX+MT (I+1+IIT)
7770 NEXT IIT
7780 MMTX=MMTX/12
7790 MMTSH=0
7795 FOR IIT=1 TO 6
7800 MMTSH=MMTSH+MTSH (IIT)
7810 NEXT IIT
7815 MMTSH=MMTSH/6
7820 FOR IIT=1 TO 6
7825 MMTSHE=MMTSHE+MTSHE (IIT)
7830 NEXT IIT
7835 MMTSHE=MMTSHE/6
7840 MCFLAG=2
7850 RETURN
7860 '
7870 *MC2
7880 LPRINT:LPRINT "EXPNUM = ",EXPNUM$
7890 LPRINT "測定時間 = ",TPTIME1$,"-",TPTIME1$
7900 LPRINT STRINGS (29,"")LPRINT
7910 LPRINT "タービン性能"
7920 LPRINT "出力 (PS):",トルク," 入口温度:"
7930 LPRINT " 出口温度:", 入口圧力," 出口圧力:", 空気流量"
7940 LPRINT USING "#####",MPS;
7950 LPRINT USING "#####",ME (1);
7960 LPRINT USING "#####",ME (0);
7970 LPRINT USING "#####",MMTREP;MMTX;
7980 LPRINT USING "#####",MPR (13);MPR (14);
7990 LPRINT USING "#####",MW (0)
8000 LPRINT:LPRINT "燃器関係データ"
8010 LPRINT " 入口温度:" 入口圧力"
8020 LPRINT USING "#####",MT (1);
8030 LPRINT USING "#####",MPR (12)
8040 AS=" 出口温度西"," 出口温度南"," 出口温度SE"
8050 AS=AS+" 出口温度東"," 出口温度NE"," 出口温度NW"," 平均温"
8060 LPRINT AS
8070 LPRINT USING "#####",MT (2);MT (3);MT (28);MT (4);MT (29);
8080 LPRINT USING "#####",MMTREP
8090 LPRINT " シェル付熱電対"
8100 FOR I=1 TO 6:LPRINT USING "#####",MTSH (I);NEXT I
8110 LPRINT USING "#####",MMTSH
8120 LPRINT:LPRINT "水素ガス関係データ"
8130 LPRINT " 流量 Nl/m:" 供給圧力," 流量計圧力;"
8140 LPRINT " 供給圧力温度," 流量計温度 C"
8150 LPRINT USING "#####",ME (2);
8160 LPRINT USING "#####",ME (3);
8170 LPRINT USING "#####",MT (11);MT (12)
8180 LPRINT:LPRINT "空気流量関係データ"
8190 LPRINT "系統名"," 流量 kg/s"," 前圧 atg"," 差圧 mmaq;"
8200 LPRINT " 度"," 流量係数"," R 数"," GT 供給温," GT 供給圧"
8210 FOR LI=0 TO 5:LI2=LI*2:LI12=LI2+1
8220 IF LI=0 THEN MTT=MT (0) ELSE MTT=MT (5)
8230 IF LI>1 THEN LI1P=LI+1 ELSE LI1P=LI
8240 LPRINT LPT$ (LI1P):LPRINT USING "#####",MW (LI);MPR (LI2);
8250 LPRINT USING "#####",MPR (LI12);MTT;
8260 LPRINT USING "#####",MAL (LI);
8270 LPRINT USING "#####",MRE (LI);
8280 IF LI=0 THEN LPRINT " ".GOTO *LNEXT3
8290 IF LI=1 THEN *LNEXT1 ELSE *LNEXT2
8300 *LNEXT1
8310 LPRINT USING "#####",MT (6);
8320 LPRINT USING "#####",MPR (15)
8330 LPRINT LPT$ (LI+1);
8340 LPRINT TAB (70):LPRINT USING "#####",MPR (16):GOTO *LNEXT3
8350 *LNEXT2:IF LI=5 THEN *LNEXT3
8360 LPRINT USING "#####",MT (6+LI);
8370 LPRINT USING "#####",MPR (15+LI)
8380 *LNEXT3:NEXT LI
8390 LPRINT:LPRINT:LPRINT "潤滑油関係データ"
8400 LPRINT " ター出口温:", 前部軸受温," 後部軸受温;"
8410 LPRINT " ター入口圧:", 前部軸受圧," 後部軸受圧"
8420 LPRINT USING "#####",MT (15);MT (13);MT (14);
8430 LPRINT USING "#####",ME (5);ME (6);ME (7)
8440 LPRINT:LPRINT "振動データ (μ m)"
8450 LPRINT " 前部上下"," 前部左右"," 後部上下"," 後部左右"
8460 LPRINT USING "#####",MEV (0);MEV (1);MEV (2);MEV (3)
8470 LPRINT:LPRINT "軸受温度 (°C)":LPRINT USING "###",ME (8)
8480 LPRINT:LPRINT "タービン出口温度 (°C)"
8490 LPRINT " ステット:", 北," 上," 南;"
8500 LPRINT " 下"
8505 LPRINT " 外側;"
8510 LPRINT USING "#####",MT (19);MT (16);MT (27);MT (24)
8515 LPRINT " 中央;"
8520 LPRINT USING "#####",MT (20);MT (17);MT (26);MT (23)
8525 LPRINT " 内側;"
8530 LPRINT USING "#####",MT (21);MT (18);MT (25);MT (22)
8535 LPRINT " シェルド付熱電対"
8540 LPRINT " 北下," 北中," 北上,"
8545 LPRINT " 南下," 南中," 南下," 平均"
8550 FOR I=1 TO 6:LPRINT USING "#####",MTSHE (I);NEXT I
8555 LPRINT USING "#####",MMTSHE
8570 LPRINT CHR$(12)
8580 MCFLAG=1:MESFLAG=0
8590 RETURN
8600 *****
8610 *****SUBROUTINE OF FLOW RATE CALCULATION*****
8620 *****
8630 *F.RATE
8640 IALP=IOR+1
8650 IF DPO<0 THEN DPO=0
8660 IF POR<0 THEN POR=0
8670 IF DPO<>0 GOTO *FRCALC
8680 W=0:RE=0:AL=0:RETURN
8690 *FRCALC
8700 POR=PA+POR
8710 RAIR=1.293*POR/10330/(1+.00367*TOR)
8720 I=FNMUE (TOR)/RAIR*G
8730 EP=1-(.3707+3184*BD4 (IOR))* (1-(DPO/POR)*RKA)^.935
8740 WEP=EP*AOR (IOR)*SQR (2*G*RAIR*DPO)
8750 RE=IE+06
8760 FOR IRE=1 TO 3
8770 GOSUB *ALPHRE
8780 W=AL*WEP
8790 V=W/RAIR/AP (IOR)
8800 RE=V*DIP (IOR)/U
8810 NEXT IRE
8820 RETURN
8830 '
8840 SUBROUTINE FOR RE AND ALPH
8850 '
8860 *ALPHRE
8870 ON IALP GOTO *ALP0,*ALP1,*ALP2,*ALP3,*ALP4,*ALP5
8880 *ALP0
8890 IF RE<DRE (1) THEN AL=ALPH0 (1) ELSE GOTO *ALP01
8900 RETURN
8910 *ALP1
8920 FOR I=2 TO 7:IF RE<DRE (I) GOTO *ALP02
8930 NEXT I
8940 AL=ALPH0 (7):RETURN
8950 *ALP2
8960 DAL=ALPH0 (I-1)-ALPH0 (I)
8970 DLRE=LRE (I)-LRE (I-1)
8980 DLREC=LRE (I)-LOG (RE)
8990 AL=ALPH0 (I)+DAL*DLREC/DLRE
9000 RETURN
9010 '
9020 *ALP1
9030 IF RE<DRE (0) THEN AL=ALPH1 (0) ELSE GOTO *ALP11
9040 RETURN
9050 *ALP11
9060 FOR I=1 TO 7:IF RE<DRE (I) GOTO *ALP12
9070 NEXT I
9080 AL=ALPH1 (7):RETURN
9090 *ALP12
9100 DAL=ALPH1 (I-1)-ALPH1 (I)
9110 DLRE=LRE (I)-LRE (I-1)
9120 DLREC=LRE (I)-LOG (RE)
9130 AL=ALPH1 (I)+DAL*DLREC/DLRE
9140 RETURN
9150 '
9160 *ALP2
9170 IF RE<DRE (1) THEN AL=ALPH2 (1) ELSE GOTO *ALP21
9180 RETURN
9190 *ALP21
9200 FOR I=2 TO 7:IF RE<DRE (I) GOTO *ALP22
9210 NEXT I
9220 AL=ALPH2 (7):RETURN
9230 *ALP22
9240 DAL=ALPH2 (I-1)-ALPH2 (I)
9250 DLRE=LRE (I)-LRE (I-1)
9260 DLREC=LRE (I)-LOG (RE)
9270 AL=ALPH2 (I)+DAL*DLREC/DLRE
9280 RETURN
9290 '
9300 *ALP3
9310 IF RE<DRE (1) THEN AL=ALPH3 (1) ELSE GOTO *ALP31
9320 RETURN
9330 *ALP31
9340 FOR I=2 TO 7:IF RE<DRE (I) GOTO *ALP32
9350 NEXT I
9360 AL=ALPH3 (7):RETURN
9370 *ALP32

```

```

9380 DAL=ALPH3 (I-1) -ALPH3 (I)
9390 DLRE=LRE (I) -LRE (I-1)
9400 DLREC=LRE (I) -LOG (RE)
9410 AL=ALPH3 (I) +DAL*DLREC/DLRE
9420 RETURN
9430 *
9440 *ALP4
9450 IF RE<DRE (2) THEN AL=ALPH4 (2) ELSE GOTO *ALP41
9460 RETURN
9470 *ALP41
9480 FOR I=3 TO 7:IF RE<DRE (I) GOTO *ALP42
9490 NEXT I
9500 AL=ALPH4 (7) :RETURN
9510 *ALP42
9520 DAL=ALPH4 (I-1) -ALPH4 (I)
9530 DLRE=LRE (I) -LRE (I-1)
9540 DLREC=LRE (I) -LOG (RE)
9550 AL=ALPH4 (I) +DAL*DLREC/DLRE
9560 RETURN
9570 *
9580 *ALP5
9590 IF RE<DRE (0) THEN AL=ALPH5 (0) ELSE GOTO *ALP51
9600 RETURN
9610 *ALP51
9620 FOR I=1 TO 7:IF RE<DRE (I) GOTO *ALP52
9630 NEXT I
9640 AL=ALPH5 (7) :RETURN
9650 *ALP52
9660 DAL=ALPH5 (I-1) -ALPH5 (I)
9670 DLRE=LRE (I) -LRE (I-1)
9680 DLREC=LRE (I) -LOG (RE)
9690 AL=ALPH5 (I) +DAL*DLREC/DLRE
9700 RETURN

```

```

10 '水素燃焼再熱G T実験用プログラム (SLAVE) 用
20 SL80.BAS 93/8/26 SL50.BAS を変更
25 'シート付きカービン出口温度 6点表示を追加 93/8/26
30 タービン出口温度 1 2点, 軸受け温度 1点表示
40 '振動データ 4点表示
50 'BEEP機能を停止
90 'SL20.BASを振動データ 4個表示に変更-> SL40.BAS 90/8/4
100 ON ERROR GOTO *ERRORTRAP
110 CMD TIMEOUT=7
120 CMD DELIM=0
130 CONSOLE 0,34,1,1,COLOR 7:WIDTH LPRINT 80
220 DIM PR (19),T (31),E (10),EV (3),TSHE (6)
230 DIM MSG$ (6)
240 'COLOR SCREENS FOR FUNCTION KEY AND WARNING
250 SCREEN 0,0,0,LINE (31,191)-(79,199),2,BF
260 LYW=18:LXW=10
270 SCREEN 0,,1,0
280 LINE (8*LXW-4,8*LYW-2)-(500,8*(LYW+3)+2),7,B
290 SCREEN 0,,2,0
300 LINE (8*LXW-4,8*LYW-2)-(500,8*(LYW+3)+2),7,B
310 LINE (31,191)-(79,199),2,BF
320 'CONSTANTS
330 PLO=2! 'LOW LIMIT OF LUBE OIL PRESSURE
340 TLO=90! 'HIGH LIMIT OF LUBE TEMPERATURE
350 VIB=23 'HIGH LIMIT OF VIBRATION
360 '
370 MSG$ (1)="=カップリング";MSG$ (2)="=前部軸受";MSG$ (3)="=後部軸受"
380 MSG$ (6)="=クーラ出口";MSG$ (4)="=前部軸受";MSG$ (5)="=後部軸受"
390 'KEY DEFINITION
400 FOR I=1 TO 10:KEY I,"":NEXT I
410 'KEY 1,"beep";KEY 2,"newdp";KEY 3,"PRINTER";KEY 4,"FEED"
415 'KEY 1,"beep";KEY 2,"newdp"
420 'ON KEY GOSUB *KFLAG1,*KFLAG2,*KFLAG3,*KFLAG4
425 'ON KEY GOSUB *KFLAG1,*KFLAG2
430 'FOR I=1 TO 4:KEY (I) ON:NEXT I
435 'FOR I=1 TO 2:KEY (I) ON:NEXT I
440 '
450 'NO.1 COMPUTER START CHECK
460 *START
470 CLS:SCREEN 0,,0:LOCATE 25,10
480 PRINT "ホスト計算機の開始指示待ちです"
490 INPUT@:YNS
500 IF YNS="SLAVE" THEN *START1
510 LOCATE 25,12:PRINT "データが異なります。計算を中止します。".END
520 *START1
530 LOCATE 25,12:PRINT "新実験番号のデータ待ちです。"
540 INPUT@:EXPNUMS,PLO,TLO
550 BFLAG=1:PFLAG=0:FFD=2
560 'TITLE DISPLAY
570 *TITLE
580 FLAG=0
590 GOSUB *TITLDISP
600 'INPUT DATA FROM MASTER
610 *MSDATA
615 INPUT@:SWITCHS,TPTIMES
620 INPUT@:W0,PR (13),PR (14),MTREP,MTEX,E (0),E (1)
625 INPUT@:T (13),T (14),T (15),E (5),E (6),E (7),E (8)
630 INPUT@:EV (0),EV (1),EV (2),EV (3)
635 INPUT@:T (16),T (17),T (18),T (19),T (20),T (21),T (22),T (23)
640 INPUT@:T (24),T (25),T (26),T (27)
645 INPUT@:TSHE (1),TSHE (2),TSHE (3),TSHE (4),TSHE (5),TSHE (6)
650 MTSHE=0
655 FOR IIT=1 TO 6
660 MTSHE=MTSHE+TSHE (IIT)
665 NEXT IIT
670 MTSHE=MTSHE/6
700 'DISPLAY
710 IF BFLAG=0 THEN SCREEN 0,,1 ELSE SCREEN 0,,0
720 GOSUB *SLDISP
730 'LPRINTER
740 IF PFLAG=1 THEN GOSUB *SUBPRINTER
750 IF FLAG=2 THEN *TITLE
760 IF SWITCHS="CONT" THEN *MSDATA
770 IF SWITCHS="END" THEN LOCATE 10,22
780 LOCATE 10,22:INPUT "実験を継続しますか(Y-CR/N):"YNS
790 IF YNS="N" OR YNS="n" THEN *ALLEND ELSE *START
800 *ERRORTRAP
810 LOCATE 10,22
820 IF ERR=128 AND ERL=490 THEN RESUME *START
830 IF ERR=128 AND ERL=540 THEN RESUME *START1
840 IF ERR=128 THEN PRINT "ホストからのデータまち";ERL:RESUME *MSDATA
850 IF ERR=129 THEN LOCATE 10,23:PRINT "IFC ERROR in";ERL:RESUME
860 'IF ERR=131 THEN PRINT "ERR131 in";ERL:RESUME
870 PRINT "ERROR!!";ERR;" in";ERL
880 ON ERROR GOTO 0
890 *ALLEND
900 KEY OFF:CLS
910 SCREEN 0,0,0,CLS 3:SCREEN 0,,1,0,CLS 3:SCREEN 0,,2,0,CLS 3
920 GOSUB *KEYDEF
930 END
940 '*****SUBROUTINE BEEP WARNING*****
950 '
960 *SUBBEEP
970 FOR BI=1 TO 15:BEEP 1
980 FOR BI=0 TO 50:IF BFLAG=0 THEN *BEEPEND:NEXT BI:BEEP 0
990 FOR BI=0 TO 20:IF BFLAG=0 THEN *BEEPEND:NEXT BI
1000 NEXT BI
1010 *BEEPEND:BEEP 0
1020 RETURN
1030 '
1040 'KEY FLAGS
1050 *KFLAG1:BFLAG=(BFLAG+1) MOD 2:RETURN
1060 *KFLAG2:FLAG=2:RETURN
1070 *KFLAG3:PFLAG=(PFLAG+1) MOD 2:RETURN
1080 *KFLAG4:FFD=1:RETURN
1090 '*****
1100 '*****SUBROUTINES OF DISPLAY FOR THE SLAVE MACHINE
1110 *TITLDISP
1120 CLS:SCREEN 0,,0
1130 COLOR 4:LOCATE 25,0
1140 PRINT "測定結果 (その2)".COLOR 7
1150 LOCATE 62,0:PRINT "測定時刻="
1160 COLOR 5:LOCATE 0,2:PRINT "潤滑油データ"
1170 LOCATE 17,2:PRINT "圧力 (kg/cm2)";
1180 PRINT TAB (45);"温度 (°C)";COLOR 7
1190 LOCATE 17,3:PRINT "カップリング=";PRINT TAB (45);"クーラ出口 ="
1200 LOCATE 17,4:PRINT "前部軸受=";PRINT TAB (45);"前部軸受="
1210 LOCATE 17,5:PRINT "後部軸受=";PRINT TAB (45);"後部軸受="
1220 ILV=6:COLOR 5:LOCATE 0,ILV:PRINT "振動変位(μm)"
1225 ILV1=ILV+1:ILV2=ILV+2

```

```

1230 LOCATE 15,ILV:PRINT "前上下方向";PRINT TAB (30);"前左右方向"
1235 LOCATE 45,ILV:PRINT "後上下方向";PRINT TAB (60);"後左右方向"
1240 '
1245 ILT=9:COLOR 5:LOCATE 0,ILT:PRINT "タービン出口温度(°C)";
1250 PRINT "スタート";"北";"北";"上";"南";
1260 PRINT "下";COLOR 7
1270 PRINT TAB (26);PRINT "外側"
1280 PRINT TAB (26);PRINT "中央"
1290 PRINT TAB (26);PRINT "内側"
1300 COLOR 5:PRINT "送風付温度";
1310 PRINT "北下";"北中";"北上";
1320 PRINT "南上";"南中";"南下";"平均"
1340 PRINT:PRINT "軸受温度°C=";COLOR 7;
1350 RETURN
1360 '----
1370 *SLDISP
1375 COLOR 7:LOCATE 71,0:PRINT TPTIMES
1380 FOR IL=3 TO 5:LOCATE 30,IL:PRINT USING "###";E (IL+2):NEXT IL
1385 LOCATE 57,3:PRINT USING "###";T (15)
1390 FOR IL=4 TO 5:LOCATE 57,IL:PRINT USING "###";T (9+IL):NEXT IL
1395 FOR IV=0 TO 3:LX=19+IV*15
1400 LOCATE LX,ILV1:PRINT USING "#####";EV (IV)
1405 NEXT IV
1410 LOCATE 30,ILT+1:PRINT USING "#####";T (19);T (16);T (27);T (24)
1415 LOCATE 30,ILT+2:PRINT USING "#####";T (20);T (17);T (26);T (23)
1420 LOCATE 30,ILT+3:PRINT USING "#####";T (21);T (18);T (25);T (22)
1425 LOCATE 14,ILT+5
1430 PRINT USING "#####";TSHE (2);TSHE (3);
1435 PRINT USING "#####";TSHE (4);TSHE (5);TSHE (6);MTSHE
1440 LOCATE 11,ILT+6:PRINT USING "###";E (8)
1490 FOR II=0 TO 2:LY=ILT+II+1
1495 'FOR II=0 TO 3:LX=34+10*II:IN=II+3*II+16:T (IN)=IN
1500 'LOCATE LX,LY:PRINT USING "###";T (IN)
1510 'NEXT II:NEXT II
1520 'WARNING ROUTINE
1530 WLOPS="";WLOTS="";WBEEP1=0:WBEEP2=0:WBEEP3=0
1540 FOR I=1 TO 3
1550 IF E (I+4) < PLO THEN WLOPS=WLOPS+MSG$ (1):WBEEP1=1
1560 NEXT I
1570 FOR I=4 TO 6
1580 IF T (I+9) > TLO THEN WLOTS=WLOTS+MSG$ (1):WBEEP2=1
1590 NEXT I
1600 IF (EV (0) > VIB) + (EV (1) > VIB) + (EV (2) > VIB) + (EV (3) > VIB) THEN WBEEP3=1
1610 IF WBEEP1=0 THEN *WNEXT1
1620 LOCATE LXW,LYW:COLOR 2
1630 IF BFLAG=1 THEN SCREEN 0,,2 ELSE SCREEN 0,,17
1640 PRINT "警報-潤滑油圧力低下=";COLOR 6:PRINT WLOPS:COLOR 7
1650 *WNEXT1
1660 IF WBEEP2=0 THEN *WNEXT2
1670 LOCATE LXW,LYW+1:COLOR 2
1680 IF BFLAG=1 THEN SCREEN 0,,2 ELSE SCREEN 0,,17
1690 PRINT "警報-潤滑油温度上昇=";COLOR 6:PRINT WLOTS:COLOR 7
1700 *WNEXT2
1710 IF WBEEP3=0 THEN *WNEXT3
1720 LOCATE LXW,LYW+2:COLOR 2
1730 IF BFLAG=1 THEN SCREEN 0,,2 ELSE SCREEN 0,,17
1740 PRINT "警報-過大振動";COLOR 7
1750 *WNEXT3
1760 IF BFLAG=0 THEN *SLDEND
1770 IF WBEEP1+WBEEP2+WBEEP3 > 0 THEN *SLDBEEP ELSE *SLDEND
1780 *SLDBEEP
1790 'GOSUB *SUBBEEP
1800 IF BFLAG=0 THEN *SLDEND ELSE *SLDBEEP
1810 *SLDEND
1820 RETURN
1830 '*****
1840 '*****SUBROUTINE LPRINTER*****
1850 '
1860 *SUBPRINTER
1870 ON FFD GOTO *PRINT1,*PRINT2,*PRINT3
1880 *PRINT1
1890 LPRINT CHR$ (12)
1900 *PRINT2
1910 LPRINT "EXP NUM=";EXPNUMS
1920 LPRINT "測定時間="; 回転数;" トルク="; 入口温度;"
1930 LPRINT "出口温度="; 入口圧力;" 出口圧力;" 空気流量"
1940 LPN=0:FFD=3
1950 *PRINT3
1960 LPRINT TPTIMES;
1970 LPRINT USING "#####";E (1);
1980 LPRINT USING "#####";E (0);
1990 LPRINT USING "#####";MTREP,MTEX;
2000 LPRINT USING "#####";PR (13);PR (14);
2010 LPRINT USING "#####";W0
2020 LPN=LPN+1
2030 IF LPN=58 THEN FFD=1
2040 RETURN
2050
2060 '
2070 '*****SUBROUTINE--KEY REDEFINITION
2080 *KEYDEF
2090 KEY 1,"load "+CHR$ (&H22):KEY 6,"save "+CHR$ (&H22)
2100 KEY 2,"auto";KEY 7,"key "
2110 KEY 3,"go to";KEY 8,"print"
2120 KEY 4,"list";KEY 9,"edit "+CHR$ (&HD)
2130 KEY 5,"run"+CHR$ (&HD):KEY 10,"cont"+CHR$ (&HD)
2140 RETURN

```

付録3 タービン出力計算方法

再熱によるタービン出力増加の計算には、作動ガスを空気とし、以下に示す1次元計算に依った。付図1にタービン要素と主流ガス状態の関係を示す計算位置番号と記号を示す。

再熱によるタービン出力増加は再熱時のタービン出力の計算結果と非再熱時のそれとの差とし、主空気の流量と入口温度、タービン入口圧力と温度、再熱水素の温度、冷却空気の流量と温度は実験値を使用した。流出角は膨張比が設計値より小さいことを考慮して設計値より2°小さく設定した。主空気流量配分は、主燃焼器へR₁=0.83、ノズル翼前へR₂=0.11、ロータ翼前へR₃=0.06とした。

以下にタービン出力計算の概略を記す。

記号

P：全圧 (MPa)、T：全温 (K)、H：全エンタルピー (J/kg)、p：静圧 (MPa)、t：静温 (K)、h：静エンタルピー (J/kg)、k：比熱比、ρ：密度 (kg/m³)、m：主空気流量 (kg/s)、V：絶対速度 (m/s)、W：相対速度 (m/s)、U：ロータ翼平均半径周速度 (m/s)、R：主空気流量流入割合、S：流路断面積 (m²)、γ_N：ノズル効率 (0.95)、α₃：ノズル翼流出角度、(63°)、β₅：ロータ翼流出角度 (56.2°)、Hu：水素発熱量 (120MJ/kg)、L：タービン出力 (kW)

添字

a：軸流方向、u：周方向、s：等エントロピー変化、r：ロータ翼相対値、c：冷却空気、H：水素

1) ノズル翼入口2の状態

ノズル翼入口2に流入する主流ガスは、燃焼器からの主流ガス（タービン入口圧力TIP、温度TIT）とノズル翼上流で主流ガスに漏れ込む空気との混合ガスであり、その流量m₂とエンタルピーH₂は次式で与えられる。なお温度TにおけるエンタルピーHは温度Tの多項式から計算する。また、エンタルピーHの温度Tも同じ式を用いて計算する。

$$m_2 = (R_1 + R_2) m_0$$

$$H_2 = (R_1 H_1 + R_2 H_0) / (R_1 + R_2)$$

2) ノズル翼出口3の状態

ノズル翼流出角α₃を与え、流量m₂を保存するように出口圧力p₃、流出速度V₃を以下の繰り返し計算により計算する。

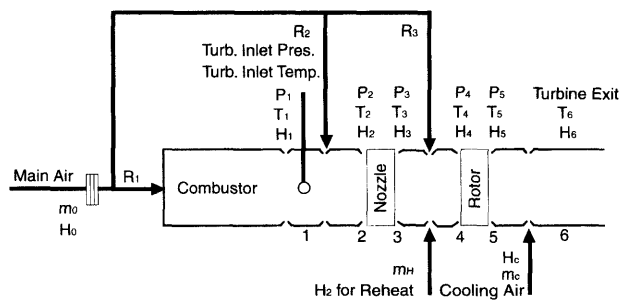
$$t_{3s} = T_2 (p_3/P_2)^{(k-1)/k}$$

$$h_3 = H_2 - \gamma_N (H_2 - h_{3s})$$

$$V_3 = (2 (H_2 - h_3))^{1/2}$$

$$m_2 = \rho_3 V_3 S_3 \cos \alpha_3$$

3) ロータ入口4の状態



付図1 タービン要素と位置番号

ノズル翼出口とロータ入口までの再熱部においては損失を無視し、軸方向運動量および角運動量が保存されるものとしてp₄、t₄、V₄を以下の繰り返し計算で求める。

$$m_4 = m_2 + R_3 m_0 + m_H$$

$$\rho_4 = 3484 p_4 / t_4$$

$$V_{4a} = m_4 / \rho_4 / S_4$$

$$V_{4u} = \rho_3 V_{3a} V_{3u} / \rho_4 V_{4a}$$

$$V_4 = (V_{4a}^2 + V_{4u}^2)^{1/2}$$

$$H_4 = (m_2 H_3 + R_3 m_0 H_0 + m_H H_u) / m_4$$

$$h_4 = H_4 - V_4^2 / 2$$

$$p_4 = p_3 + \rho_3 V_{3a} - \rho_4 V_{4a}$$

4) ロータ翼に対する相対値

ロータ翼入口における相対的な全エンタルピーH_{4r}と全圧P_{4r}を以下により計算する。

$$W_{4u} = V_{4u} - U$$

$$\beta_4 = \tan^{-1} (W_{4u} / V_{4a})$$

$$W_4 = V_{4a} / \cos \beta_4$$

$$H_{4r} = h_4 + W_4^2 / 2$$

$$P_{4r} = p_4 (T_{4r} / t_4)^{k / (k-1)}$$

流出角β₅を与え、流量m₄を保存するように出口圧力p₅、流出速度W₅を以下の繰り返し計算により求める。

$$t_{5s} = T_{4r} (p_5 / P_{4r})^{(k-1)/k}$$

$$h_5 = H_{4r} - \gamma_N (H_{4r} - h_{5s})$$

$$W_5 = (2 (H_{4r} - h_5))^{1/2}$$

$$m_4 = \rho_5 S_5 W_5 \cos \beta_5$$

5) タービン出力

$$L = m_4 U (W_{4u} + W_{5u}) / 1000$$

6) ロータ翼出口5の状態

$$V_{5u} = W_{5u} - U$$

$$V_{5a} = W_5 \cos \beta_5$$

$$V_5 = (V_{5a}^2 + V_{5u}^2)^{1/2}$$

$$H_5 = h_5 + V_5^2 / 2$$

7) タービン出口6の状態

タービン出口6の温度は主流ガスと冷却空気の混合ガスのエンタルピーH₆は次式で与えられる。

$$H_6 = (m_4 H_5 + m_c H_c) / (m_4 + m_c)$$