

1 500℃ 級 501G 形 ガス ター ビ ンの 開 発

Development of 1 500℃ Class 501G Gas turbine

技 術 本 部 梅 村 直^{*1}

高 砂 製 作 所 佃 嘉 章^{*2} 秋 田 栄 司^{*3}

赤 城 弘 一^{*4} 岩 崎 洋 一^{*4}

熱効率の高さから脚光を浴びているコンバインドプラントでは、主機であるガスタービンの高温・高性能化によりプラント総合熱効率の大幅な改善が可能である。当社ではガスタービン開発の豊富な経験を基に、タービン入り口温度 1 500℃ 級 G 形ガスタービンの開発に成功した。圧縮機・燃焼器・タービンに適用した新技術について、各種要素試験において詳細に検証した 60 Hz 機 501 G 形ガスタービンは、当社高砂製作所のコンバインドプラント実証設備にて、平成 9 年 6 月の運開に向け 2 月から試運転を開始した。試運転時には 1 800 点にも及ぶ温度、圧力、応力等の内部計測を行い、その性能、冷却特性及び信頼性を検証した。

The next generation of large, heavy-duty, single-shaft gas turbines, 501G, with a turbine inlet temperature in the 1 500 °C range has been developed by Mitsubishi Heavy Industries, Ltd (MHI). Many advanced component technologies (a high efficiency compressor, a steam cooled combustor, a high temperature turbines, etc.) are employed in this turbine and achieve an excellent combined cycle performance. Various component tests have been conducted over the past 3 years. From February, 1997, a trial operation of the 501G for 60 Hz utilities was performed at the verification test combined cycle plant at MHI. Takasago plant in Japan to verify its high performance, reliability and maintainability. Also, during the trial operation at this plant, more than 1 800 instrumentation systems were installed in the engine. The flow path characteristics, metal temperatures, pressures, strains, sound pressure levels, exhaust emissions, etc. were measured over the full range of operating conditions. All important characteristics, including the cooling characteristics, and components reliability were verified.

1. は じ め に

火力発電の分野において、ガスタービン排ガスの熱回収によって得られた蒸気をタービンの駆動源とするコンバインドサイクルプラントが、その総合熱効率の良さから脚光を浴びている。

コンバインドサイクルプラントでは、主機であるガスタービンの高温・高性能化により、プラント総合熱効率の大幅な改善が期待される。

当社では昭和 56 年に 1 150℃ 級大容量ガスタービン MW 701 D を開発し、天然ガスだきコンバインドサイクルプラントである東北電力(株)東新潟火力発電所において、高いプラント総合熱効率と信頼性及び低公害性を実証した。その後、更なるガスタービンの高温化を図り、昭和 60 年に 1 350℃ 級 501 F/701 F ガスタービンの開発に着手した。501 F/701 F ガスタービンは、高度な冷却技術が適用されており、現在国内外のコンバインドプラントの主機として既に 43 台の受注実績があり、その優れた性能を発揮し順調に運転実績を上げている。

火力発電プラントの更なる総合熱効率向上への社会的ニーズと、当社のガスタービン開発の豊富な経験を背景に、平成 5 年、タービン入口温度 1 500℃ 級 G 形ガスタービン (501 G/701 G) の開発に着手した。60 Hz 市場向け 501 G ガスタービンは、平成 9 年 2 月から当社高砂製作所の長期信頼性実証設備 (T 地点実証設備) にて試運転を開始し、4 月には全負荷に到達した。

図 1 にその断面を示す 501 G ガスタービンは、運転実績を順調に上げている 501 F/701 F ガスタービンの基本構造を踏襲するとともに、圧縮機・燃焼器・タービンには各種要素試験で検証された新開発要素、新技術を適用したものである。

501 G ガスタービンの開発に当っては、基本設計の段階で要素試験を実施し、各種設計データを取得して、その結果を詳細設計に

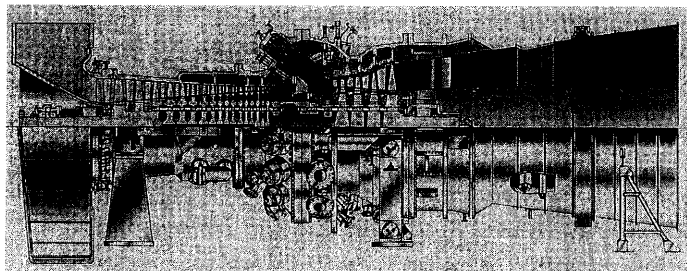


図 1 501 G ガスタービン断面図 平成 9 年 2 月から当社高砂製作所の実証設備で試運転中の 1 500℃ 級高温ガスタービンの断面を示す。
501 G gas turbine longitudinal section

反映した。実ロータを使用しての回転振動試験では、圧縮機及びタービン動翼の固有振動数を実遠心力場で確認した。

さらに T 地点実証設備での試運転時には、ガスタービン本体に 1 800 点に及ぶ特殊計測機器を組み込み、種々の計測技術を駆使することにより、流体圧力、温度、流量、メタル温度、振動応力、騒音、排ガス性状等を計測し、その性能、冷却特性及び信頼性を検証することができた。

2. 501 G ガスタービンの特徴

501 G ガスタービンは、タービン入口温度 1 500℃ の高性能ガスタービンであり、501 G ガスタービンの計画性能は、表 1 に示すように現在順調に運転中である 501 F⁽¹⁾ を更に上回るものである。

2. 1 全体構造

501 G ガスタービンの基本的構造は、従来の三菱ガスタービンの設計思想を踏襲した 501 F/701 F ガスタービンをベースに設計されており、次の実績ある特徴を継承している。

(1) ロータは、圧縮機側軸受とタービン側軸受に支えられた 2 軸受支持構造である。

*1 高砂研究所主管

*2 タービン技術部ガスタービン設計課主査

*3 タービン技術部ガスタービン設計課長

*4 タービン技術部ガスタービン設計課

表1 501 G ガスタービンの性能

Performance of 501 G gas turbine

項 目	501 G	501 F
タービン入口温度 (°C)	1 500	1 350
出 力 (MW)	230	159
熱効率 (%)	38.5	36
圧力比	19	15

- (2) 発電機軸との接続は、熱的影響が小さく、フレキシブルカップリング等が不要な、圧縮機軸端駆動方式である。
- (3) 排気方式は、コンバインドサイクル発電設備の配置に最適な軸流排気方式である。
- (4) ロータ冷却空気系統に対して外部冷却器及び外部フィルタを適用し、動翼及びロータのメタル温度の低減とごみ詰りの防止を図っている。
- (5) 圧縮機側軸受は8本のラジアルストラット、タービン側軸受は、軸心を保ちつつ熱伸び差の吸収が容易なタンゼンシャルストラットに支持された構造である。
- (6) 定期点検の容易な水平二分割構造の車室である。
- (7) 圧縮機ロータは、スピゴットを持つディスクをボルトで結合し、タービン側ロータは、カービックカップリングを持つディスクをボルトで結合する構造である。

2.2 圧縮機的设计

大風量、高圧力比化、高効率化を達成するために、501 G ガスタービンにはMCA (Multiple Circular Arc) 翼及びCDA (Controlled Diffusion Airfoil) を採用し、17 段の新型軸流圧縮機を新設計した。これらの最新型翼列の空力性能は、翼列試験及びモデル圧縮機試験にて検証された。また、501 G の1/2 スケールの圧縮機を搭載したMF 221 ガスタービンでもその空力性能は実証されている。

抽気は6 段、11 段、14 段にて行われる。入口案内翼は可変翼とし、コンバインドサイクルにおける部分負荷性能の改善を図っている。

2.3 燃焼器的设计

図2に、501 G ガスタービンで採用している蒸気冷却燃焼器燃焼筒を示す。1500°C 級ガスタービンにおいて予混合方式で501 F/701 F 並みのNOx を達成するためには燃焼用空気を増加する必要があり、燃焼器冷却用空気が制限される⁽²⁾。そこで、当社では初の回収型蒸気冷却方式を採用することとした。大気圧燃焼試験、高圧燃焼試験にて、その性能及び信頼性については検証済みであり、高圧燃焼試験結果では、実機換算で501 F/701 F と同レベルのNOx 25 ppm 以下であることが確認された。

2.4 タービンの設計

タービンは、タービン入口ガス温度の上昇に伴う負荷増加に対応できる軸流形4 段の高負荷・高性能タービンである。翼形を半径方向に曲線的に重ね合せた完全三次元翼を採用し、翼壁面近傍で発生する二次損失の低減を図った。

第1～3 段動静翼には空冷翼を採用した。1500°C のタービン入口温度を達成するため、501 G ガスタービンには最新冷却技術（全面膜冷却、シェイプトフィルム冷却斜めタービュレータ等）及び全面遮熱コーティング（TBC）等を採用し、メタル温度が従来機並みを保つようにしている。

静翼の材料は、溶接性が改善された当社の新開発 Ni 基合金（MGA 2400）で、第1 段静翼は単独翼、第2～4 段はセグメント翼である。動翼は、クリープ特性がF 形で採用された従来材より

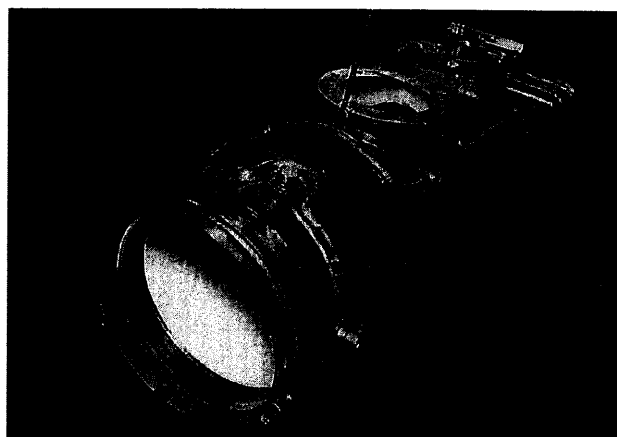


図2 501 G ガスタービン蒸気冷却燃焼器燃焼筒 タービン入口温度1500°C で低NOx を達成するため、回収型蒸気冷却方式を採用した新型燃焼筒を示す。

Steam cooled combustor of 501 G gas turbine

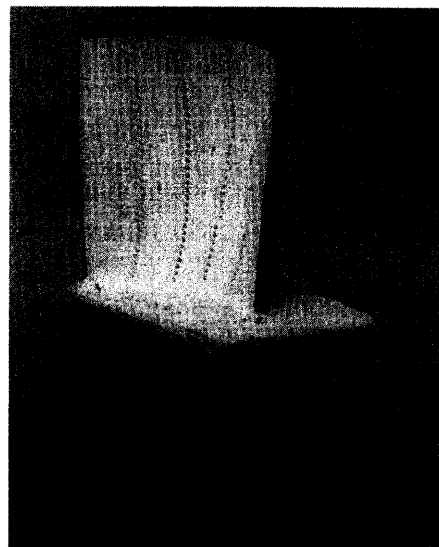


図3 501 G ガスタービン1 段動翼 全面膜冷却（シェイプトフィルム穴）、全面TBC、一方固定翼等最新技術を適用した501 G タービン1 段動翼を示す。

Turbine row 1 blade of 501 G gas turbine

優れている当社の新開発 Ni 基合金（MGA 1400）製である。図3にタービン第1 段動翼を示す。第1、2 段動翼はフリースタANDING翼であるが、第3、4 段動翼はF 形ガスタービン同様、Z 形シュラウド付きの翼を採用し、構造ダンピングを増加させることにより翼振動強度の改善を図った。

2.5 冷却空気系統

タービン動静翼は圧縮機の途中段から抽気した空気により冷却する。抽気段数は、ガスタービン性能に与える損失を極力減らすよう圧力バランスを考慮して決定された。第1 段静翼は圧縮機吐出空気、第2、3 段静翼は圧縮機14 段及び11 段抽気空気によりそれぞれ冷却する。第4 段静翼へは、6 段抽気空気を供給し、静翼下部のキャビティ部を冷却する。動翼及びロータ部の冷却は、圧縮機吐出空気を外部クーラで冷却して使用する。

3. 検 証 試 験

3.1 要素検証試験

501 G ガスタービンの圧縮機・燃焼器・タービンに適用された新開発要素、新技術については、基本設計の段階で各種要素試験を

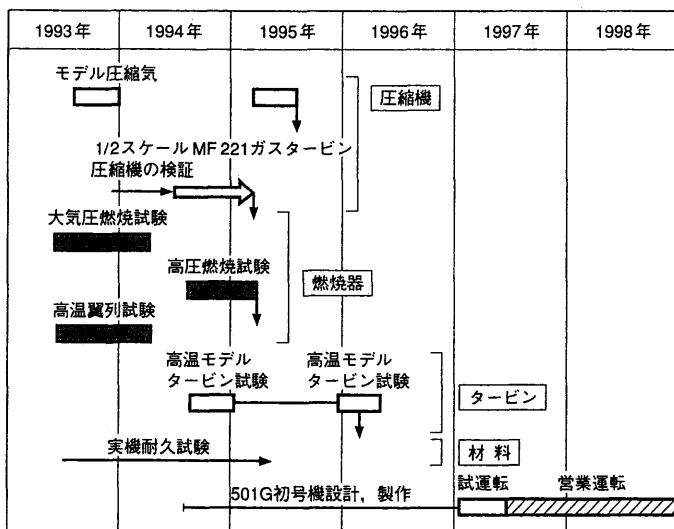


図4 要素検証試験及び製作スケジュール 501Gに適用された新技術の検証試験を行い、その結果を詳細設計に反映し、初号機を製作した。
Schedule of component verification test and manufacturing for 501G

行い、その性能、信頼性を確認した後、詳細設計に反映した。

図4に検証試験スケジュールを示す。

(1) 圧縮機モデル試験

既に述べたように501Gガスタービンの圧縮機は、従来のF形に比べて大風量、高圧力比化、高効率化をねらった高性能圧縮機である。高マッハ数、高効率化を達成するため、MCA翼、CDA翼といった最新翼列を採用している。

基本設計の段階で501Gの0.28スケールのモデル翼を搭載したモデル圧縮機試験を行い、その性能を検証した。

図5にモデル圧縮機の試験結果を示す。風量、効率共に計画値を上回ることが確認された。

(2) 燃焼器試験

タービン入口温度1500℃で予混合方式で25ppmのNOxレ

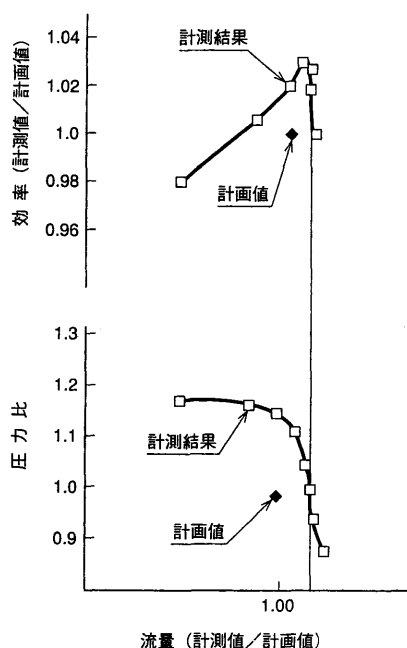


図5 モデル圧縮機試験結果 501Gの0.28スケールのモデル翼による性能検証試験を行い、流量及び効率が計画値を上回ることが確認された。
Results of 501G compressor model test

ベルを達成するには、燃焼器に与えられた空気の一部を燃焼用空気として用いる必要がある。そのため当社は蒸気冷却燃焼器を開発した。高圧燃焼試験を実施し、その結果を設計に反映し最終形状を検証した。最終的に実機の燃焼器にて高圧燃焼試験を行い、タービン入口温度1500℃でNOx 25ppm以下となることを確認した。

(3) タービン冷却翼

タービン入口温度1500℃を達成するため、タービン第1段階静翼には全面膜冷却(シェイプトフィルム穴)斜めタービュレータ、全面TBCといった最新冷却技術が適用されている⁽³⁾。

これら最新技術を適用したタービン1段階動静翼については、実機翼を供試体とした高温翼列試験及び実機の0.6スケールのモデル翼を用いた、高温回転モデルタービンで高い冷却性能が確認された。

(4) 新耐熱合金の開発

タービン入口温度の1500℃化に伴いタービン翼のクリープ強度を高めるため、当社は静翼材としてIN939Ni基合金の溶接性を更に高めた新耐熱合金MGA2400を開発しタービン静翼に適用した⁽²⁾。

動翼材についても、従来よりクリープ強度を高くした、当社で開発したMGA1400新耐熱合金を採用した。さらに1、2段階動翼については更にクリープ強度の高い方向凝固材を採用した。

図6に、クリープ強度を従来用いられてきた動翼材と比較して示す。

従来のIN738LC材に比べてクリープ強度はメタル温度換算で30℃優れている。また1、2段階動翼については一方向凝固材を採用したことにより、更にメタル温度換算で20℃クリープ強度が上がっていることが分かる。

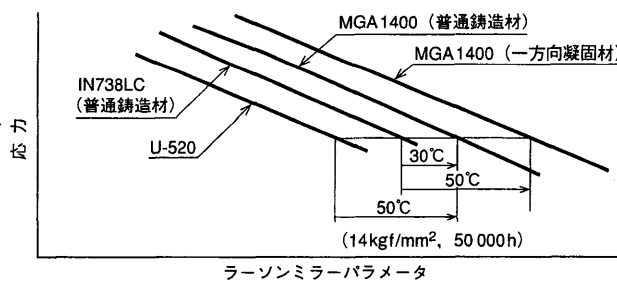


図6 タービン動翼材クリープ強度 当社で新開発した新耐熱合金MGA1400は、従来材に比べてクリープ強度が優れている。
Creep strength of turbine blade material

3.2 回転振動試験

圧縮機及びタービン動翼の振動特性を事前に把握するため、実翼、実ロータを使用した回転振動試験を実施した。圧縮機第1段、2段、3段、4段、7段動翼とタービン第1～4段動翼について固有振動数及び振動減衰特性を計測した。実ロータを、高真空の高速バランス装置で、電動モータにより定格回転数の110%速度まで加速し計測した。圧縮機動翼については、光ファイバを利用した非接触計測方法により計測した。タービン動翼の振動応力は、ひずみゲージをそれぞれの翼に張付け、回転体からの信号をテレメータを利用して送信する方式で計測した。

計測したデータを解析した結果、振動特性は良好で、タービン第3、4段動翼のシュラウドの減衰効果が十分あることが検証できた。

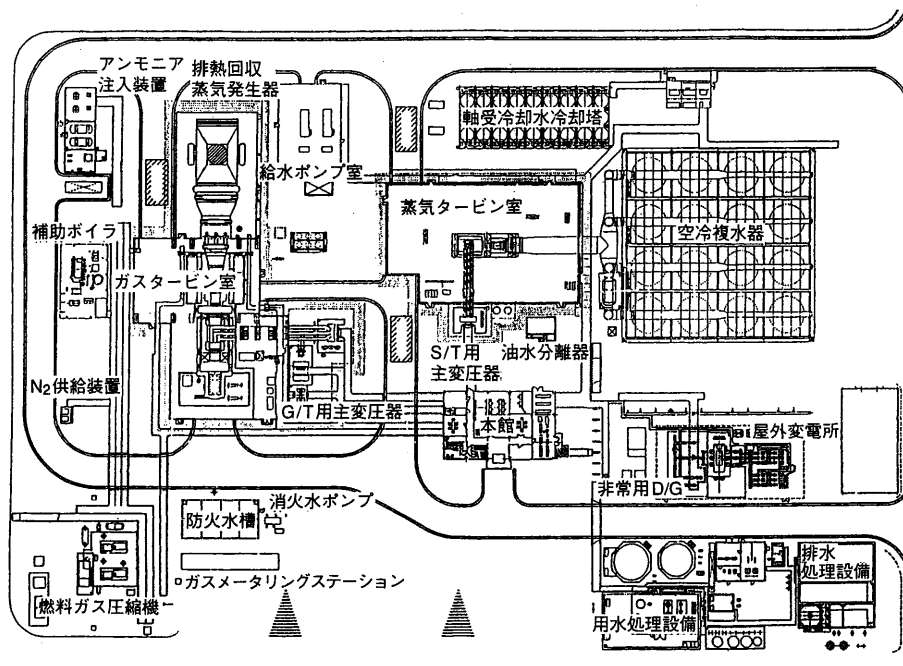


図7 当社高砂製作所コンバインドサイクル実証設備配置
バインドサイクル実証設備の配置を示す。
Plant layout of combined cycle verification plant

1997年2月から試運転を開始したコン

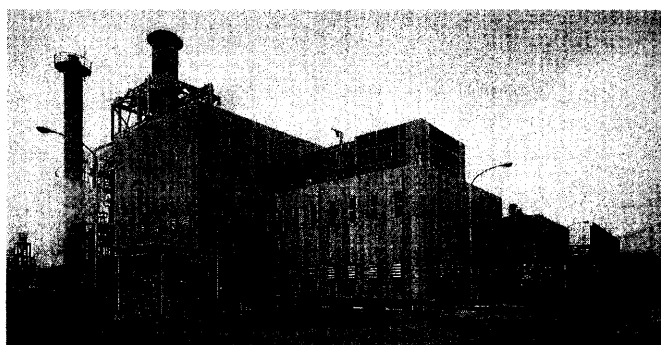


図8 当社高砂製作所コンバインドサイクル実証設備外観 平成9年
2月から試運転を開始したコンバインドサイクル実証設備の外観を示す。
Combined cycle verification plant at Mitsubishi Takasago
Machinery Works

表2 501 G ガスタービン試運転時特殊計測項目
Special measurement items

	性能	メタル温度	圧力/振動	その他
計測項目	吸気流量	燃焼筒	圧縮機動翼	冷却空気流量・圧力・温度
	吸気温度・圧力	タービン	圧縮機静翼	スラスト力
	排気温度・圧力	第1～4段動翼	燃焼筒	排ガス性状
	燃料流量	タービン	タービン動翼	ロータ・車室熱伸び
	発電機出力	第1～4段静翼	ロータ軸振動	騒音
	圧縮機要素性能	軸受	車室振動	潤滑油温度
	タービン要素性能	車室	ロータねじり振動	
		翼環		
		排気ディフューザ		

5. あとがき

ガスタービンの高温・高効率化により火力発電用コンバインドサイクルプラントの総合熱効率の大幅な改善が期待される。当社は、タービン温度1500℃級高温・高効率ガスタービン501Gを開発した。その初号機は既に製作を完了し、平成9年2月から試運転を開始し、4月には全負荷に到達しその性能及び信頼性検証試験は完了した。試運転時に実施した特殊計測結果から、機械的信頼性及び性能面で、十分満足できる成果が得られている。

この試運転終了後、501Gガスタービンは長時間の運転に入る。この長時間の運転により性能及び信頼性の多くの面が確認され、今後、501Gガスタービンは高効率コンバインドサイクルプラントの主機として、社会に大きく貢献するものと期待される。

参考文献

- (1) 高橋, 150 MW 級高温ガスタービンの工場全負荷試験, 三菱重工技報 Vol.28 No.1 (1991) p.31
- (2) Fukue, I., A New Generation of Advanced Gas Turbine, 95-YOKOHAMA-IGTC-146
- (3) Southall, et al., New 200 MW 501 G Combustion Turbine, ASME Paper No.95-GT-215 (1995)

4. 長期信頼性検証設備での検証試験

501Gガスタービンは新たに建設された当社高砂製作所の長期信頼性実証設備に設置され、平成9年6月運開に向け、2月から試運転を開始した。実証設備はガスタービン出力225000kW、蒸気タービン出力105000kWの計330000kWの世界に類を見ない多軸型コンバインドプラント実証試験設備である。図7に配置図、図8に外観を示す。

プラントの起動はサイリスタ起動方式を採用し、発電機を同期電動機として使用してガスタービンを自立速度まで加速する。ロータ及びタービン第2～4段静翼冷却空気流量は、外部配管内に設置されたオリフィスで計測する。制御室には、全デジタル化された制御装置及びタッチオペレーション機能、アラーム一覧機能、トレンド機能、マルチウィンドウ機能を採用した高機能運転監視システムが設置されている。また、501Gガスタービンの試運転期間中は、表2に示すように通常監視項目以外の各部の温度、圧力、振動応力が常時監視された。このために必要な特殊計測機器は1800点以上に及んだ。