

H 形 ガ ス タ ー ビ ン の 開 発

Development of H Series Gas Turbine

技 術 本 部 青 木 素 直^{*1}

高 砂 製 作 所 上 松 一 雄^{*2} 田 中 克 則^{*3}

大 矢 武 明^{*3} 廣 川 一 晴^{*3}

三菱事業用ガスタービンは D, F, G 形では豊富な経験がある。その基本構造を踏襲した上で、1・2 段動静翼をボトミングからの供給蒸気で冷却し再びボトミングに回収することで、プラント総合熱効率及び出力を向上した M 501 H ガスタービンを開発した。多様な要素試験による事前検証、コンバインドプラント実証試験設備での試運転（1999 年 5 月 220 MW 達成）を実施し、蒸気冷却ロータの安定性、蒸気冷却翼の冷却特性、各要素性能が満足できるものであることを確認した。小さい課題は残ったが対策は容易であり、次回試験ではすべて解決の上確認する予定である。

Mitsubishi Gas Turbine developed the M501H gas turbine to improve the efficiency and power of the G series using closed steam cooling of stage 1 and 2 blades and vanes following the firm's experience in the construction of the D, F, and G Series. Development included elementary tests for pre-verification and trial operation using a combined plant verification plant to reach 220 MW in May 1999 and to verify the stability of the steam cooling rotor, cooling properties of blades and vanes, and the efficiency of major components. The few remaining items can be easily taken care of. The next trial operation is planned to complete verification.

1. は じ め に

当社は、昭和 56 年に 1150℃ 級大容量ガスタービン M 701 D を開発し、東北電力(株)東新潟火力発電所 3 号系列に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。昭和 60 年には 1350℃ 級 F 形ガスタービン (M 501 F/M 701 F) の開発に着手し、平成元年には初号機の工場実負荷試験を実施した。現在 F 形ガスタービンは、国内外のコンバインドプラントの主機として既に 58 台の受注実績があり、うち 38 台が運転中と順調に運転実績を上げている。さらに、平成 5 年に 1500℃ 級 G 形ガスタービン (M 501 G/M 701 G) の開発⁽¹⁾に着手した。60 Hz 市場向け M 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コンバインドプラント実証設備（以下、T 地点と称す）にて試運転を開始し、同年 6 月から長期信頼性実証設備として実証運転を開始した。50 Hz 市場向け M 701 G 1 ガスタービンは東北電力(株)東新潟火力発電所 4 号系列にて、平成 10 年 10 月 15 日試運転開始し、平成 11 年 7 月から商業運転開始した。現在 G 形ガスタービンは、22 台の受注実績があり、うち 3 台が運転中である。

こうした D, F, G 形という事業用ガスタービンの豊富な経験を基に開発されたのが、H 形ガスタービンである。H 形は G 形と同じ 1500℃ 級ガスタービンであるが、D, F, G 形がタービン翼に空気冷却を使っているのに対し、蒸気冷却を使用した点が大きな特徴であり、これにより高いプラント総合熱効率を確保することができた。

本報では 1500℃ 級 H 形ガスタービンの特徴を述べるとともに、平成 11 年 5 月に実施した T 地点での 60 Hz 市場向け M 501 H ガスタービンの試運転結果について報告する。

2. H 形ガスタービンの特徴

H 形ガスタービンは、タービン入口温度 1500℃ の高性能ガスタービンである。図 1 に H 形ガスタービン構造を示す。H 形は従来

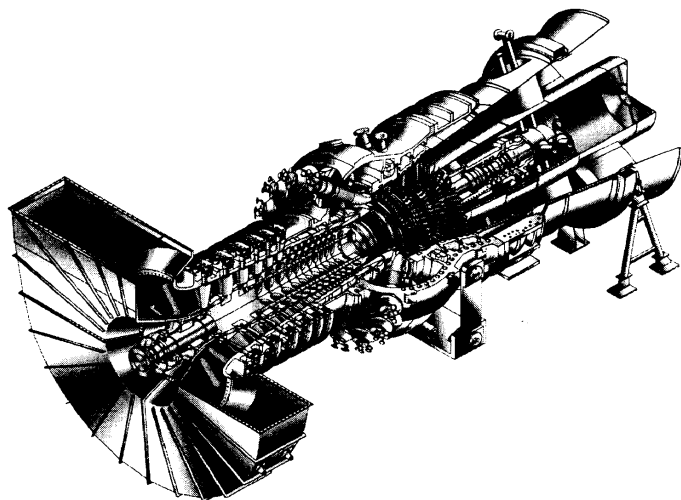


図 1 H 形ガスタービン構造
H series gas turbine longitudinal

のガスタービンに比べプラント総合熱効率が絶対値で約 2 % 高く、出力が約 20 % 近く大きい。

2.1 全体構造

H 形ガスタービンの基本構造は F 形、G 形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 軸受構造である。
- (2) 発電機との接続は、熱伸び等の熱的影響が小さく、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) 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

*1 高砂研究所次長

*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

ストラットに支持された構造である。

- (5) 圧縮機のロータは、トルクピンを挟込んだ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して、いずれもトルクを確実に伝える構造である。

2.2 翼蒸気冷却構造

H 形ガスタービンの特徴は、これまでのガスタービンが圧縮機で圧縮した高圧空気で冷却していた 1・2 段動静翼を、ボトミングで発生した蒸気で冷却するようにした点である。これにより冷却空気量が約半分に削減でき、冷却空気の混合損失も低減してプラント総合熱効率が向上するとともに、削減した空気分、燃焼ガス主流が増加しタービンでの仕事も増加するため出力も増加する。

また、低温の冷却空気の燃焼ガス主流への混入量が減少した分、同じ圧力比であれば排ガス温度が上昇する。このため、圧力比を上昇させて排ガス温度を従来並みとした。圧縮機は最新翼型を採用し、従来より圧力比を高くかつ段数を減少させた高効率圧縮機を新規に開発し、0.29 スケール圧縮機にて事前に徹底検証した上で採用した。

3. H 形ガスタービン開発状況

H 形ガスタービンの開発は表 1 に示すとおり、1996 年に開発設計をスタートし、1999 年 2 月には試運転をスタートした。こうした短期開発を支えたのは、並行して実施した下記に示す各種要素試験による堅実な検証であり、必要な改良は時期を失することなく逐一設計に反映した。

(1) 蒸気シール特性確認試験

蒸気冷却翼への供給・回収通路の各結合部のシールには、これまでのガスタービンでは使用しなかった特殊なシールを使用した。H 形ガスタービンは蒸気を冷却に使用するが、従来の冷却空気並みに漏れを許容すると大量に蒸気が漏れることになる。蒸気漏れはプラント総合熱効率の低下につながり、またボトミングの補給水量を増加させる課題を発生させる。したがって、このシールは大変重要なものである。

こうした課題を事前に解決するために、選定したシール構造

について順次要素試験を行い確認した。まずは、静止系に備えるものも、回転系に備えるものも、静的状態でのシール要素試験を実施して最良の構造・寸法を選定した。次に、こうして選定されたものの中から回転系に備えるものについて、回転状態を実現できる図 2 に示すモデルロータ試験を行い、シール性が計画どおり保てることを確認した。

(2) 蒸気冷却翼確認試験

当社横浜製作所に設置した M 701 F ガスタービン (K 地点) の 1 段静翼数枚を蒸気冷却翼に改造して、実際の運転で蒸気を供給して翼冷却し、冷却特性のデータを取得し計画どおりであることを確認した。

また、H 形試運転に先立ち、実機の 1 段蒸気冷却動翼を使って蒸気を冷却媒体とした実機模擬の高温翼列試験を実施し、事前に冷却特性のデータを取得し計画どおりであることを確認した。

(3) 圧縮機確認試験

H 形圧縮機の 0.29 スケール圧縮機 (図 3 参照) を製作した。これを、2 軸ガスタービン M 252 で駆動し、圧縮機出口には圧力を上げられるように調整弁を備えて、各種運転条件を模擬したモデル圧縮機試験を実施した。圧力・回転数を自由に選択することで、様々な起動特性データ、圧縮機性能データを取得し、圧縮機が計画どおりの特性・性能を有していることを事前に確

表 1 H 形開発工程
Schedule of H series gas turbine development

	1996	1997	1998	1999
T 地点 M501H		← 初号機製作 →		■ 試運転
	← 設計 →			
要素 試験		■ シール要素試験 ■ K 地点での蒸気冷却 静翼試験	■ 高温回転検証試験 ■ モデルロータ試験 ■ モデル圧縮機試験	■ 高温翼列試験 ■ 実圧燃焼試験

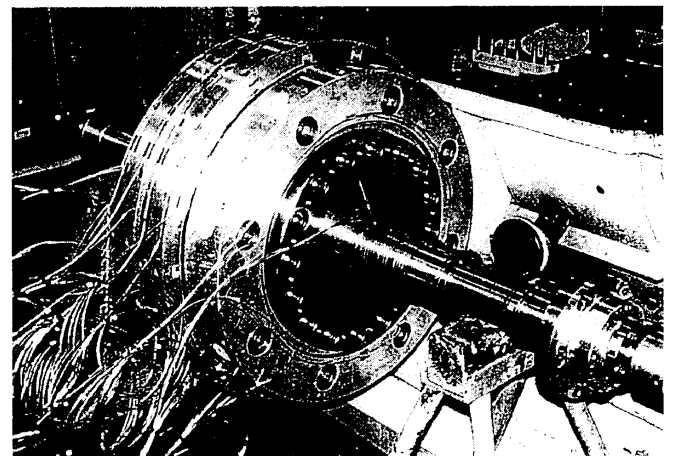


図 2 モデルロータ
Model rotor test

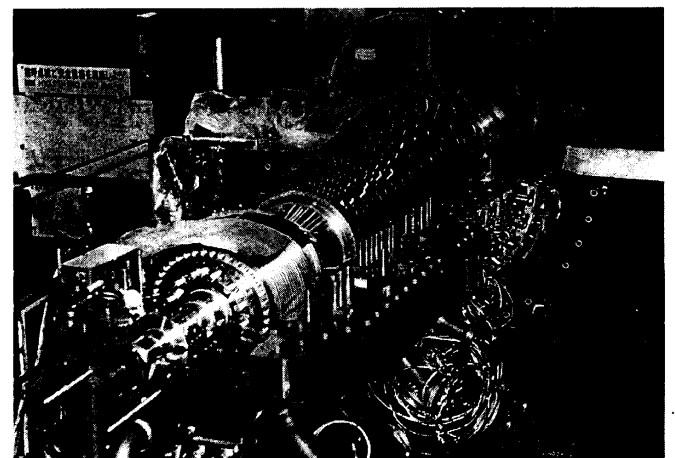


図 3 0.29 スケール圧縮機
0.29 scale compressor

認した。

(4) 実圧燃焼試験

前記モデル圧縮機の下流側に実圧燃焼試験設備を設置し実圧燃焼試験を実施した。

(5) 高温回転検証試験

高温回転検証試験設備を図4に示す。この設備は燃焼器を備え、この燃焼器へは前記圧縮機から高压空気を供給するとともにパイプラインから天然ガスを供給し燃焼させ、燃焼後の1500℃の高温ガスを0.6スケールの単段タービンに送って回転させる。回転負荷を動力計で吸収制御し6000rpmの一定回転数に保つ。

今回、このG形スケール設計動翼の6枚を蒸気冷却構造とし、翼を植えたロータに蒸気通路を構成し、軸端から蒸気供給・回収できる構造に新製した。

H形と同様、軸端からロータに蒸気を供給し、蒸気冷却動翼を冷却した後、再びロータを通して軸端から蒸気を回収した状態で運転を実施した。運転中に翼の冷却特性データ、ロータ各部の温度データ、各部振動データを取得し、計画どおりであることを確認した。

4. H形ガスタービン試運転結果

4.1 試運転概要

図5に示す当社高砂製作所に設置されたコンバインドプラント実証設備を用いて、M501Hガスタービンの試運転を実施した。通常このプラントはM501Gガスタービンの長期信頼性実証のため

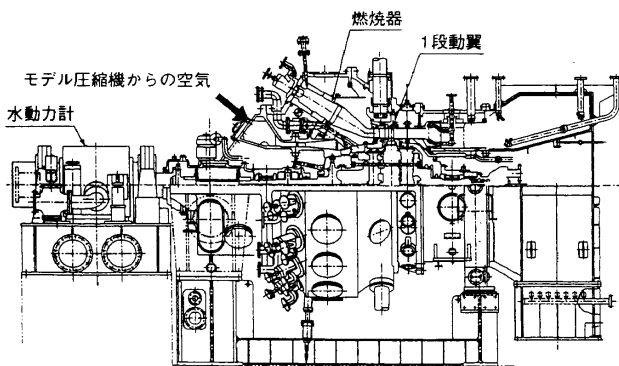


図4 高温回転検証試験
High temperature rotating test

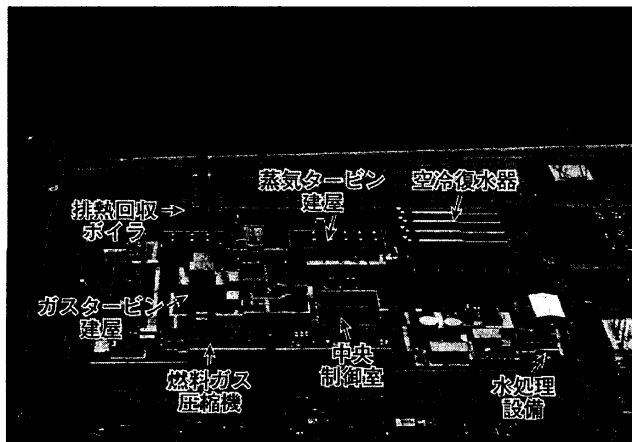


図5 実証複合発電設備
Gas turbine combined cycle verification plant

めに運用されているが、今回の試運転のために一時的にM501Hへ換装した。図6に示すとおり、排熱回収蒸気発生器で発生した高压蒸気を高压蒸気タービンに送り、この出口蒸気を蒸気冷却翼に送気して冷却に使用した。冷却後の蒸気は中圧蒸気タービン入口に回収した。

4.2 試運転結果

試運転は1999年2月8日に開始し、各種作動確認を順次実施した上で、同年5月6日に図7に示す220MW(GT160MW, ST60MW)の出力を達成し、高压圧縮機特性及び蒸気システム(蒸気冷却翼冷却特性)の検証を目的とした第1ステップの運転を成功裏に完了した。

次ステップでは1500℃までの運転検証を実施する計画である。

図8に試運転後のガスタービンロータ及び下半ケーシングを、図9に同じく試運転後のタービン翼環及び静翼を示す。計測結果から冷却蒸気がタービンロータ及び動翼、翼環及び静翼を通り計画どおりの冷却性能を発揮したことが確認できた。また、試験後の状態も良好であった。

4.3 試運転成果

今回の試運転では、計測点数1500点の特殊計測を実施した。成果を以下に示す。

(1) 蒸気冷却ロータの安定運転の確認

ロータ軸端から蒸気を供給し、ロータ内部を通して蒸気冷却動翼に至り、再びロータ内部を通してロータ軸端に回収する。

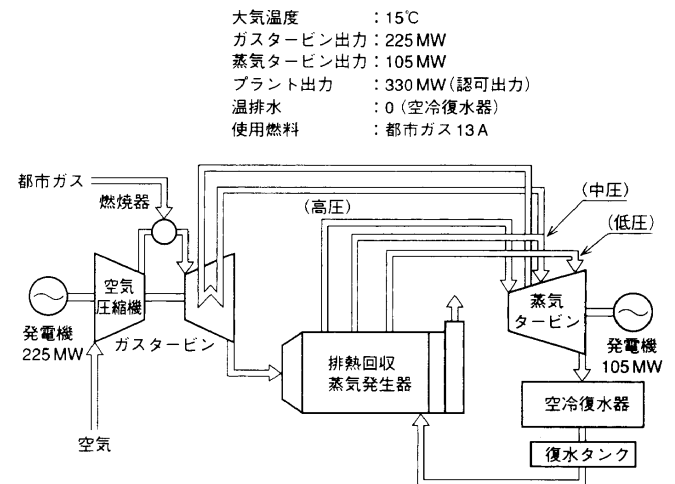


図6 H形試運転系統図
Main line of H series test

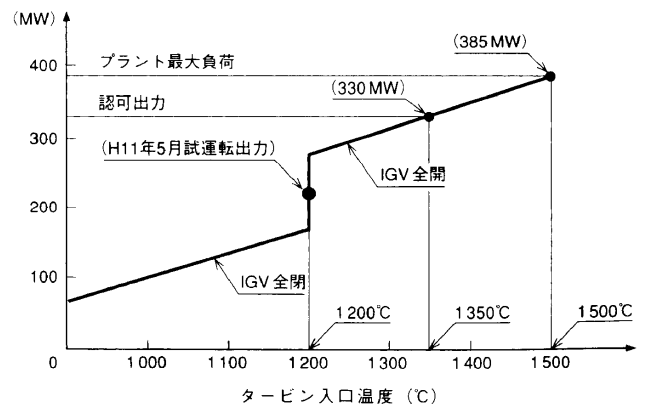


図7 負荷運転カーブ
Load test curve

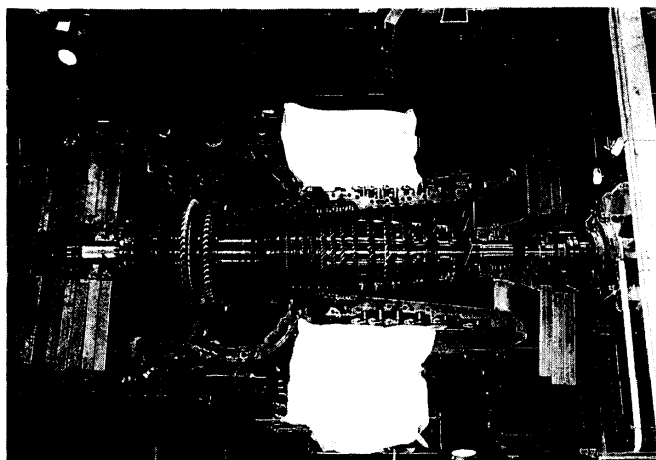


図8 試験終了後のガスタービンロータ及び下半ケーシング
Lower casing and gas turbine rotor after hot operation

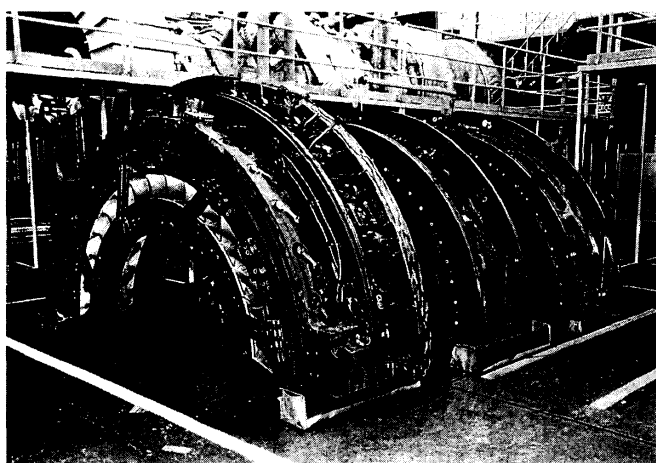


図9 試運転終了後の翼環及び静翼
Blade ring after hot operation

図10に示すとおり、今回の運転では安定した振動特性を得た。なお、今回は初めてのH形試運転であったため、操作方法の臨機応変の変更に対応できるように原則手動で実施した。今後、今回の成果を生かして弁切替えの自動化を行い、迅速な操作が可能とする。

(2) 蒸気冷却静翼・動翼の冷却特性の確認

蒸気冷却翼の冷却特性は3章(2)項に示すとおり事前に確認してきた。試運転結果でも、予想どおりの冷却特性を得ることができた。今回の運転は図6に示すとおり、220 MW/タービン入口温度1200°Cまでであったが、計測データを理論的に385 MW/タービン入口温度1500°Cまで外挿し、メタル温度が許容値内に入ることを検証した。

(3) 圧縮機・タービン性能の確認

圧縮機も3章(3)項に示す0.29スケール圧縮機による性能試験で、事前に起動特性データ、圧縮機性能データを取得して確認していたが、試運転結果でも全く同じ特性を示した。したが

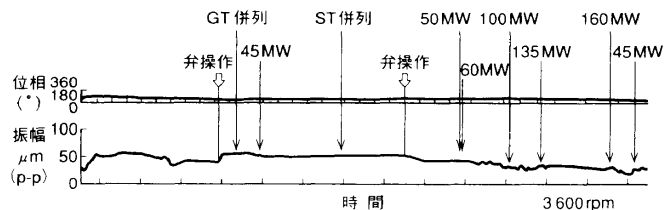


図10 蒸気冷却ロータの安定
Stability of steam cooling rotor

って、予定どおりの起動特性、圧縮機断熱効率を確認された。

タービン空力効率は、蒸気漏れを補正し、算出した結果、計画効率の達成が確認された。なお、プラント総合熱効率は、ほぼ計画値を満足することを確認した。

5. ま と め

H形ガスタービンは、従来のガスタービンと異なり、タービン翼をボトミングからの蒸気で冷却するものである。これにより、同じ体格のガスタービンで、プラント総合熱効率・出力共に向上する。

こうした新規開発要素について多くの要素試験を事前に実施して確認した。

また、ベースの構造は従来のガスタービンの信頼性を重視した構造を踏襲した。

以上、開発スタートからわずか30箇月の短期間で試運転を実施し、220 MWの出力を達成し、第1ステップの運転を成功裏に完了した。

今回の試運転により、蒸気冷却ロータの安定運転の確認、蒸気冷却静翼・動翼の冷却特性の確認、圧縮機・タービン性能の確認を無事終了した。

以上のように、H形ガスタービンは従来のガスタービンを上回るプラント総合熱効率を達成することが可能で、今回の運転でその点が実際に検証できた。

この種のLNGだきのコンバインドプラント発電設備はCO₂の発生が少なく、地球温暖化対策の切札として世界的に注目され、欧米他において急速に普及しつつある。

国内及びアジア圏では最近の景気後退を受けて電力需要の伸び悩みから普及は鈍化しているが、景気回復に合せ普及は進むものと見られる。

こうした中、本報で紹介したより高効率を実現できるH形ガスタービンは、今後省エネルギー、地球温暖化防止の旗手として普及し、グローバルな環境問題の解決に貢献できると期待している。

参 考 文 献

- (1) 梅村ほか、最新鋭1500°C級ガスタービンの開発・運転状況、三菱重工技報 Vol.35 No.1 (1998-1)