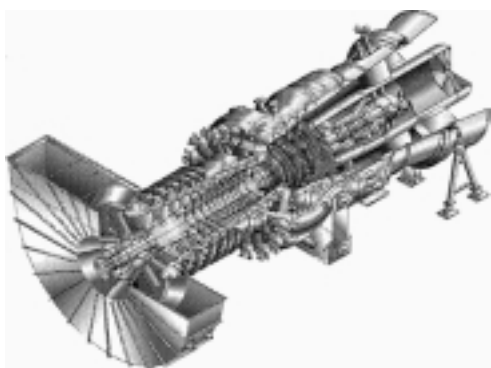


1500 級 M 501 H 形ガスタービン の実負荷試運転結果

1500 °C Class M501H Gas Turbine



塚 越 敬 三 前 川 篤 伊 藤 栄 作
百 武 慎 徳 川 田 裕

H形ガスタービンは、同じ体格のG形ガスタービンに比べてプラント総合熱効率が絶対値で約2%高く、出力は約10%大きい高効率・高出力ガスタービンである。このH形ガスタービンで高効率・高出力が達成できるのは、高温のガスタービン翼を従来の空気に代わりボトミング側から供給される蒸気で冷却することで、圧縮機からの抽気冷却空気量が削減できるためである。当社では、高砂製作所内実証発電設備において1999年に実施したM501H形ガスタービンの第1次試運転に引き続き、2001年に第2次試運転を実施・成功させたことにより、H形ガスタービンのプロトタイプ機としての開発を終了したので報告する。

1. は じ め に

当社では、1981年にタービン入口温度1150 級大容量ガスタービンM701D形を開発し、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。1985年にはタービン入口温度1350 級F形ガスタービン(M501F/M701F)の開発に着手し、1989年に初号機の工場実負荷試験を実施した。さらに1993年にはタービン入口温度1500 級G形ガスタービンの開発に着手し、1997年より当社高砂製作所内のガスタービン複合プラント実証設備(以下、T地点と称す)にて60 Hz市場向けM501G形ガスタービンをういた試運転を開始し、同年6月に長期実証運転を開始した。一方50 Hz市場向けM701G形ガスタービンは東北電力(株)東新潟火力発電所4号系列向けに、1999年7月に商業運転を開始した。

これらのD・F・G形という大容量、高効率ガスタービンは、機器としての信頼性を維持しながらタービン入口温度を上昇させ、プラント出力及び効率の向上を図ってきたガスタービンであり、その豊富な経験を基に更なる大容量・高効率化を推し進めるために開発されたものがH形ガスタービンである。

H形ガスタービンの開発については、三菱重工技報 Vol.37 No.1 (2000-1) にて第1次試運転の概要につき報告しているため、本報では、ガスタービン定格負荷に到達しその健全性・信頼性などが確認された第2次試運転(2001年に実施)の概要を中心に報告する。

2. H 形ガスタービンの概要

2.1 開発スケジュール

H形ガスタービンの開発経緯を表1に示す。1996年に開発設計を開始し、各要素試験による検証を行いながら、1999

表1 開発スケジュール

	1996	1997	1998	1999	2000	2001
T地点 M501H		設計	本体製作	第1次試運転	改良設計	第2次試運転 製作
要素テスト		シール要素試験	高温回転検証試験	改良シール要素試験		
		静翼蒸気冷却試験	高温翼列試験			
		モデルロータ試験	モデル圧縮機試験			
			実圧燃焼試験			
					高温高速回転試験	

年2月にT地点にて第1次試運転を、その後更なる改良設計を行い2000年12月～2001年3月にかけて第2次試運転を行いプロトタイプ機としての開発を終了した。

2.2 特 徴

H形ガスタービンのタービン入口温度はG形と同じ1500 級であるが、G形までのガスタービンがタービン翼に空気冷却を採用しているのに対し、H形ガスタービンでは蒸気冷却を採用している点が大きな特徴である。すなわちH形ガスタービンではタービン1段及び2段の動静翼に蒸気冷却方式を採用している。図1に試運転を行ったT地点の系統図を示すが、低温再熱蒸気(高圧蒸気タービン出口蒸気)を蒸気冷却翼に送気して冷却に使用し、翼冷却後の蒸気は中圧

大気温度 : 15
 ガスタービン出力 : 225 MW
 蒸気タービン出力 : 105 MW
 プラント出力 : 330 MW (認可出力)
 温排水 : α 空冷式復水器)
 使用燃料 : 都市ガス 13A

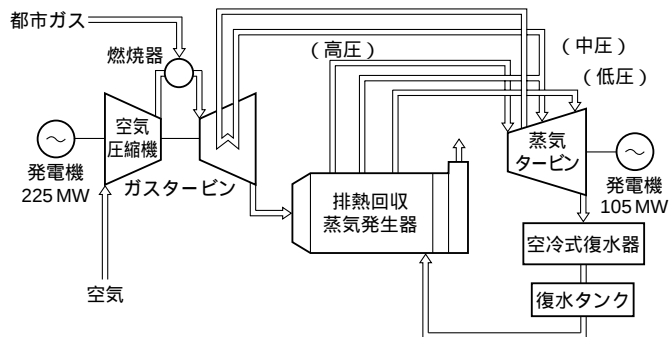


図1 H形試運転系統図 H形ガスタービンの試運転系統図を示す。

蒸気タービン入口に回収する。

H形ガスタービンの利点は、タービン翼を蒸気冷却することで冷却空気量が削減できるため、タービン1段静翼前後の冷却の影響によるガスの温度低下を空気冷却式と比較して約半分に抑えることができ、1段動翼入口温度を高くできること、冷却空気の混合ロスを低減することができることにある。また、ボトムリングサイクルから供給されるタービン翼冷却用蒸気は、タービン翼で熱交換した後に再びボトムリングサイクルへ回収されエネルギーとして取り出されるためコンバインドサイクル熱効率を一層高めることができる。また、燃焼ガス量は、冷却空気量を削減しただけ増加し、タービンでの仕事が増加するため出力も大きくなる。この結果、H形ガスタービンは、同じ体格のG形ガスタービンに比べてプラント総合熱効率が絶対値で約2%高く、出力は約10%大きくなる高効率・高出力ガスタービンである。

H形ガスタービンに関する主な特徴を下記に示す。

- (1) 動翼の冷却蒸気はタービン側の軸端から回転体内部へ供給され、同じ軸端より回収される。軸内の対称な蒸気通路の設計と高性能シール機構の適用により、動翼への蒸気供給用の軸において回転体内部の温度アンバランスによる非対称熱変形を極力小さくし、軸の曲がりによる軸振動の発生を防止した。
- (2) タービン側の中空ジャーナル軸の内側を高温の蒸気能够通过することにより、メタル温度が高くなる懸念があるが、ジャーナル軸受ホワイトメタルは第2次試運転後の開放点検結果においても健全であることを確認した。
- (3) タービン翼の冷却空気量が、従来の空気冷却式ガスタービンに比べて大幅に削減されるため、同じ圧力比ではタービン排ガス温度が高くなる。このためH形ガスタービンでは、圧力比をG形の20から25へ上昇させて排ガス温度を従来並みとした。圧縮機は三次元多段粘性解析コードを用いて設計された三次元スクュー翼を採用し、従来よりもワイドコード・低アスペクト比で段数を減少させた高効率圧縮機を新規に開発した。前方段はMCA (Multiple

Circular Arc) 翼であり、遷音速域での衝撃波の発生を抑制する設計とし、中間及び後方段にはCDA (Controlled Diffusion Airfoil) 翼を用いて境界層の流れをコントロールしている。この新型圧縮機の採用に当たっては、0.29スケール圧縮機にて事前に徹底して検証を行った。

- (4) 1500級G形ガスタービンですでに採用している蒸気冷却式低NO_x燃焼器をH形でも採用した。この燃焼器は1997年以降T地点にて商用運転の実績がある。
- (5) 最新の三次元設計による4段軸流式タービンを開発した。前方2段は蒸気冷却式、第3段は空気冷却式、第4段は無冷却である。設計及び解析には三次元多段粘性解析コードを使用し、プロファイル損失を最小限とする設計とした。さらに多段翼列解析を実施して各段の速度三角形のマッチングを最適化し、非定常流れ解析により動翼に働く加振力を評価した。
- (6) タービン翼は当社で開発した材料（静翼材はMGA2400、動翼材はMGA1400）であり、第1段動翼及び静翼は一方向凝固翼である。
- (7) タービンディスク材は、当社で新規開発した10%Cr鋼（MGA10）を採用した。従来材に比べて高温強度に優れた材料を使用することで動翼から回収した蒸気温度を高く設定することができた。
- (8) 高温高压の蒸気をシールする技術は、主要な蒸気冷却技術の一つであり、H形開発当初より多くの要素試験や実機検証試験を重点的に実施した。高温高压部では、シール部分の熱変形や摩耗によってシール性能が劣化するため、これらを考慮した最適シール構造を新たに開発し適用した。蒸気漏れ量はプラントの総合熱効率やプラント運用性に影響があるため、これを最小に抑えることは非常に重要である。
- (9) 静翼の冷却蒸気は、静翼を支持するタービン翼環内部に設けられたマニホールドを介して各静翼へ均等に分配される。翼環内部に蒸気通路を設けたことにより、翼環のメタル温度を蒸気温度で変化させてタービン動翼のチップクリアランスを制御することが可能となった。

3. H形ガスタービン（第2次）試運転結果

3.1 試運転概要

当社高砂製作所内に設置されたガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備（T地点、図2）において、M501H形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形ガスタービンの長期信頼性実証のために運用されているが、M501H形の試運転のために一時的に換装し、試運転を行った。

3.2 試運転結果

第2次試運転では、2000点を超える特殊計測を行い、ガスタービンの性能・燃焼・機械特性及び信頼性を検証した。この中には蒸気系統の状態量も含まれている。例えば、蒸気タービンの出口蒸気温度・圧力や流量は、ガスタービンの冷却蒸気条件を決めるものであり、ガスタービンの蒸気冷却システムにとって重要なパラメータである。また、蒸気冷却の



図2 ガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備（T地点） H形ガスタービン試運転を行った高砂製作所内実証発電設備。

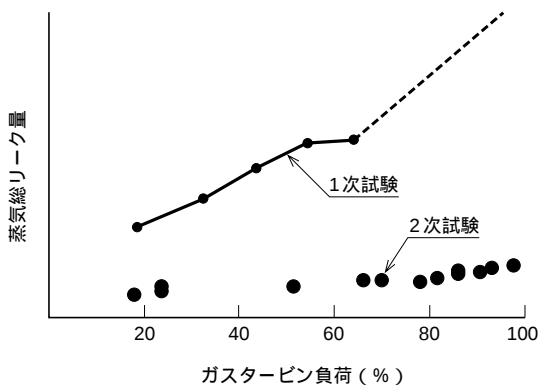


図3 負荷と蒸気漏れ量の関係 第2次試運転での負荷と蒸気漏れ量の関係。

燃焼器やタービン翼はプラント系統の中ではHRSGの再熱器と同じ役目を負うものであり、冷却後の蒸気温度・圧力は中圧蒸気タービンの入口蒸気条件となるため、蒸気タービンの作動条件や信頼性を決定するパラメータとなる。このように、プラント系統の状態量を監視し、制御することは蒸気冷却式ガスタービンをを用いたコンバインドサイクル発電設備において非常に重要である。

第2次試運転は2000年12月から2001年3月にかけて実施した。第2次試運転では、蒸気冷却部の暖機試験、起動昇速試験、無負荷定格速度運転、冷却蒸気切替え試験、併列・負荷変化試験を行った後、T地点プラント認可出力であるガスタービン225 MW、蒸気タービン105 MW、計330 MWでの長時間ヒートランに成功した。また、ヒートラン終了後に負荷遮断テストに成功し、プラントの動特性データを取得し、過渡特性にも問題ないことを確認した。

下記に第2次試運転における主な成果を示す。

(1) 蒸気漏れ量

各部の蒸気シール構造の改良により第1次試運転時と比較して大幅な改善効果が得られ、商用化に対して問題ないレベルであることを確認した（図3）。

(2) 圧縮機及びタービン要素効率

M501H形ガスタービンが高い総合熱効率を達成するた

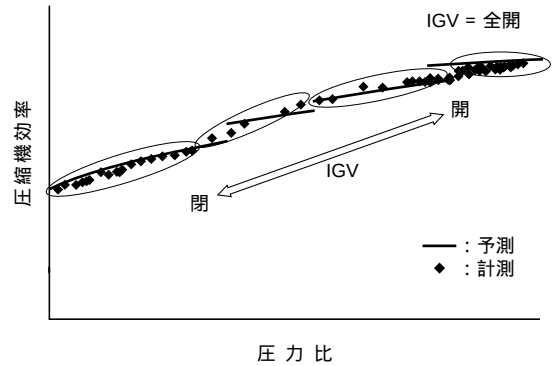


図4 圧力比と圧縮機効率の関係 第2次試運転での圧力比と圧縮機効率の関係。

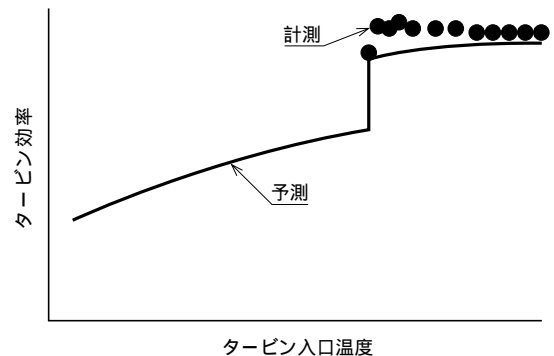


図5 タービン入口温度とタービン効率の関係 第2次試運転でのタービン入口温度とタービン効率の関係。

めには圧縮機及びタービンの要素効率が目標値を達成する必要がある。圧縮機効率は、IGV開度ごとに計測され、いずれの開度においても計画性能を達成していることを確認した。また、サージマージン、吸気流量、段負荷、代表段の半径方向及び周方向の全圧・全温分布、翼振動、旋回失速発生時の前方段圧力変動などを計測し、信頼性を確認した（図4、図5）。

なお、図5においてタービン入口温度一定でタービン効率が上昇している箇所は、圧縮機入口可変静翼（IGV）操作による変化である。

一方、タービン性能についても各段の圧力・温度を計測し、ガスタービン排ガス温度とともに予測どおりであることを確認した（図6）。

(3) 蒸気冷却タービン翼メタル温度

蒸気冷却翼は400点以上の特殊計測を実施し、計測結果と予測値は良く一致し、高い予測精度とともに翼の信頼性を確認した。また冷却翼のメタル温度から熱応力分布を計算し、計画どおりの疲労寿命を有することをあわせて確認した（図7、図8）。

(4) その他

タービン側のジャーナル軸受メタル温度を計測し、長時間ヒートラン時にも十分冷却されており問題がないことを確認した。

また、軸振動データも詳細に解析し、第1次試運転時と同様に十分安定していることを確認した。

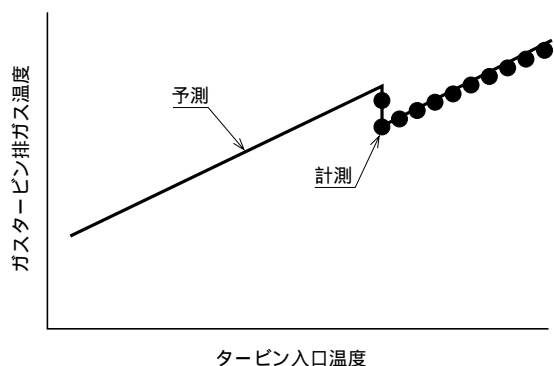


図6 ガスタービン入口温度と排ガス温度の関係
第2次試運転でのガスタービン入口温度と排ガス温度の関係。

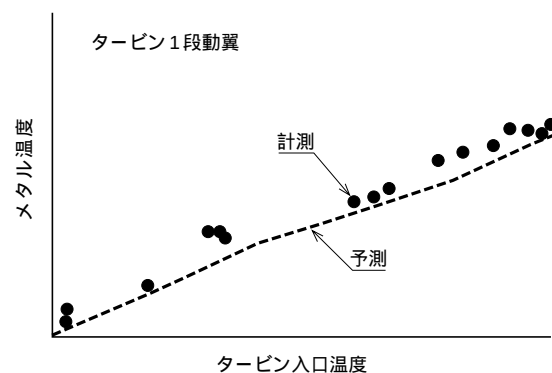


図8 タービン入口温度とタービン1段動翼メタル温度
第2次試運転でのタービン入口温度とタービン1段動翼メタル温度の関係。

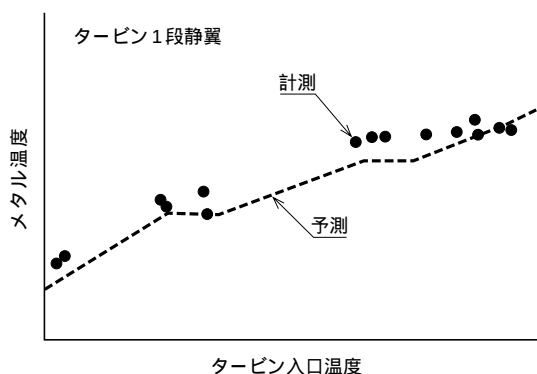


図7 タービン入口温度とタービン1段静翼メタル温度
第2次試運転でのタービン入口温度とタービン1段静翼メタル温度の関係。

4. 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、タービン翼をボトムリングからの蒸気で冷却する特徴を有する。これにより、同じ体格であるG形ガスタービンと比較してプラント総合熱効率・出力ともに大幅に向上する。ガスタービンの構造は従来のガスタービンで実証された信頼性のある構造を踏襲し、新規要素技術については多くの要素試験を事前に実施して確認した。その結果、開発スタートからわずか30ヶ月という短期間で設計・製作を行い、第1次試運転では220 MWのプラント出力を達成して第1ステップの検証を成功裏に完了することができた。さらに、第1次試運転終了後の約半年間で蒸気シールなどの改良を行い、再度要素試験や事前の確認試験を実施し、第2次試運転ではT地点実証設備のプラント認可出力である330 MWでヒートランを実施した。

2度の試運転により、蒸気冷却ロータの安定運転の確認、蒸気冷却動静翼の冷却特性の確認を行い、またH形ガスタ

ービン実用化のポイントとなる冷却蒸気の漏れ量、圧縮機及びタービン要素効率についてそれぞれ目標値を達成、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を実証した。

LNG 焚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、欧米ほかにおいて急速に普及しつつある。こうした中、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、地球温暖化対策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 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)
- (2) A. Maekawa, et al, 2001, "Development of H series gas turbine", ASME 2001 - GT - 500, International Gas Turbine & Aero-engine Congress & Exhibition, New Orleans, U.S.A.
- (3) 塚越, 前川ほか, 最新の大容量高効率ガスタービンについて, ガスタービンセミナー第30回資料集 (2002-1)



塚越敬三
原動機事業本部
タービン技術部
技監・主幹



前川 篤
高砂製作所
タービン技術部長



伊藤栄作
技術本部
高砂研究所
ターボ機械研究推進室



百武慎徳
高砂製作所
タービン技術部
ガスタービン計画課



川田 裕
技術本部
高砂研究所
技監・主幹