

1 350℃ 級高効率ガスタービンコンバインド プラントの設計と試運転実績

—関西電力(株)姫路第一発電所第5号機の建設—

Design and Operation Experience of Combined Cycle Plant
Using Gas Turbine with Turbine Inlet Temperature of 1 350℃
—No.5 Unit of Himeji No.1 Power Station of The Kansai Electric Power Co., Inc.—

原動機事業本部 森 信 男*¹ 松田 秀 雄*²
高砂製作所 石 井 義 久*³
長崎造船所 緑 美 樹 生*⁴

ガスタービンの目覚ましい発展とともに、ガスタービンコンバインドプラントが国内外で数多く建設されてきているが、このたび、最新鋭・高効率の1 350℃級大容量ガスタービン 501 F形を使用し、コンバインドプラントの最大の狙いである高効率をさらに追求した国内初の再熱式の総出力 670 MW のコンバインドプラントを関西電力(株)姫路第一発電所第5号機として建設した。平成7年4月に営業運転が開始され、計画を上回る期待どおりの高効率と信頼性をもって順調に運転が続けられている。

With the remarkable improvements in gas turbine technology, many combined cycle power plants have been constructed both in domestic utilities and overseas. Against this back ground, and in pursuit of further improvements in plant efficiency, which is the greatest merit of the combined cycle power plant, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. have constructed a multishaft, re-heat type 670 MW combined cycle power plant as No.5 Unit at the Himeji No.1 power station of The Kansai Electric Power Co., Inc. The gas turbines used for this plant are the 501 F type which are the latest, high efficiency, large capacity machines having a turbine inlet temperature of 1 350℃. In April 1995, the plant started commercial operation and has provided excellent performance together with high reliability.

1. ま え が き

関西電力(株)姫路第一発電所第5号機は、ガスタービン3台、排熱回収ボイラ3台、蒸気タービン1台を組合せた、総出力 670 MW (大気温度 22℃) の多軸再熱型コンバインドプラントである。プラント全景を図1に示す。

本プラントに採用されたガスタービンは、九州電力(株)新大分発電所第2号系列ですでに実績のある1 350℃級大容量の501 F形であり、このガスタービンからの高温排気を最も効果的に利用できる多軸形再熱式の蒸気サイクルを国内で初めて採用した。

平成6年8月のガスタービン初号機の初点火以来、約8か月の試運転調整を経て平成7年4月に予定どおり営業運転を開始した。プラント熱効率は世界最高水準の49%台(発電機端、高位発熱量基準)を達成しており、また環境保全の面、運転性の面でも計画条件を満足するものであることを確認している。本報では、このコンバインドプラントの計画概要と運転実績について紹介する。

2. プラント計画概要

2.1 主な特徴

(1) 高いプラント熱効率

1 350℃級 501 F型ガスタービンの採用とともに蒸気サイクルには、三重圧再熱システムを採用したことにより従来の1 150℃級ガスタービンを採用したコンバインドプラントに比べ10%以上の効率向上(相対値)が図られており、世界的にトップレベルの49%台(高位発熱量基準)のプラント効率が実測されている。



図1 プラント全景写真 手前が5号機。
Perspective view

(2) 環境保全

ガスタービン入口温度を1 350℃級に上昇させることに伴うNO_x発生量の増加を抑えるために、一段と改良を加えた予混合式低NO_x燃焼器を採用し、さらに乾式脱硝装置を組込むことにより十分環境規制値を満足させている。

(3) 優れた運用特性

中間負荷火力として頻繁な起動・停止に対応できるよう設計製作されている。また、運転台数を負荷変化に応じて変更することにより総合的に低負荷時のプラント熱効率の向上が図られている。

*1 原動機技術センター火力プロジェクト部主務

*2 原動機技術センター火力プロジェクト部プラント技術二課

*3 プラント技術部コンバインドプラント設計課主務

*4 火力プラント設計部プラント設計一課主務

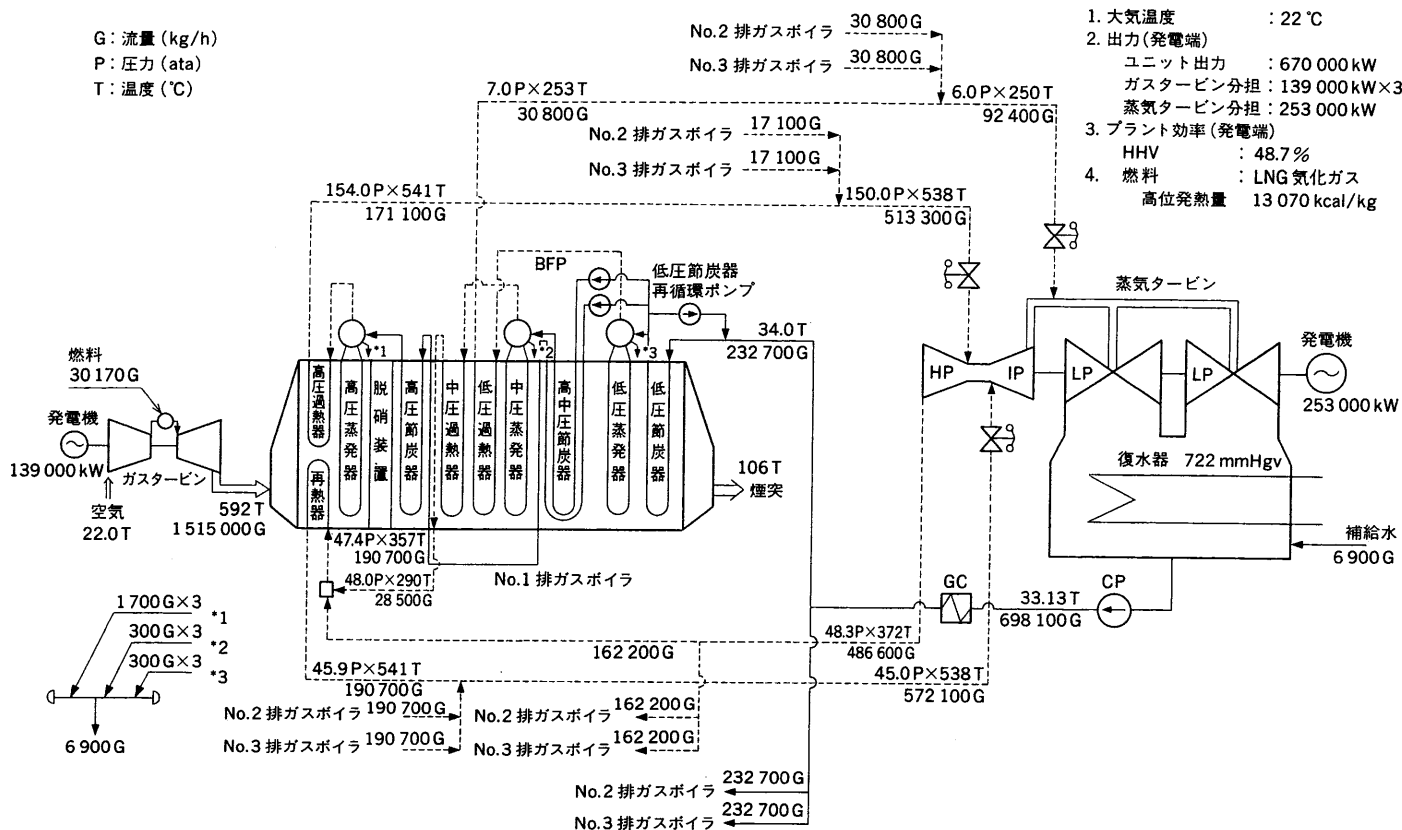


図2 プラント定格ヒートバランス ガスタービン3台ベース出力において、大気温度22℃以下は670 MWを上限とした運用を行う。
Heat balance diagram (at design condition)

(4) 多軸再熱システムの採用

本プラントの計画に当たっては、軸構成及び蒸気サイクルについて性能面、運用面、配置、経済性について種々の検討がなされた。その結果、軸構成については、大容量蒸気タービンが採用でき、定格負荷時の性能に優れた多軸型が、また蒸気サイクルについてはガスタービンからの高温排ガスを最も効果的に熱吸収できる3重圧再熱式が採用された。

多軸形再熱式コンバインドプラントは、国内初のものである。

2.2 プラント計画性能と機器仕様

(1) プラント定格性能

姫路第一発電所第5号機は、大気温度22℃で総出力670 MWを満足するプラントとして設計された。計画プラント熱効率は、48.7% (発電端、高位発熱量基準) であり従来型の汽力発電プラントに比べ20%以上 (相対値) 優れた熱効率である。図2にプラント定格時のヒートバランスを示す。なお、ガスタービン及び蒸気タービン単機認可出力は大気温度4℃にてそれぞれ157 MW及び258.6 MWとなっている。

(2) 出力大気温度特性

ガスタービンは吸気温度が低くなるほど、高い出力が得られる特性を持つため、コンバインドプラントも同じような出力特性を持つことになる。本プラントの出力特性を図3に示す。本プラントは大気温度22℃以下でも、670 MWを上限とした運用となるため、大気温度22℃以下では、ガスタービンの吸気流量を制御することにより670 MWを出すようにしている。

(3) 機器仕様

各機器については、コンバインドプラントの出力特性を踏まえながら、運転制御性を考慮して支障なく運転できる仕様で計画されている。主要機器の諸元を表1に示す。

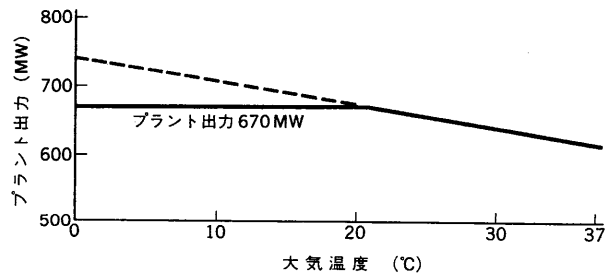


図3 プラント出力特性
Power output characteristic curve

2.3 ガスタービン

1350℃級501 Fガスタービンは、平成元年8月に実機による工場実負荷試験が実施され、性能、冷却特性及び機械特性が良好であることが実証されている。十分な検証及び信頼性が評価され、初号機は米国フロリダ電力に納入されている⁽¹⁾。

ガスタービン軸断面図を図4に示す。

(1) 大容量化

圧縮機の設計は、実績のあるMW 501 D (1150℃級ガスタービン60 Hz機)の設計をベースに新設計された16段の軸流形である。

圧縮機通路は、MW 501 Dの圧縮機から平均半径を15%増加させ、吸気流量を増大させて大容量化を図っている。構造は、ロータディスクを従来の焼ばめ式から組立て式に変更することにより、圧縮機の高速度を実現し、段数低減と高効率化を図っている。

(2) タービンの高効率化設計

タービン入口温度の上昇に伴いタービン部の負荷が増加する

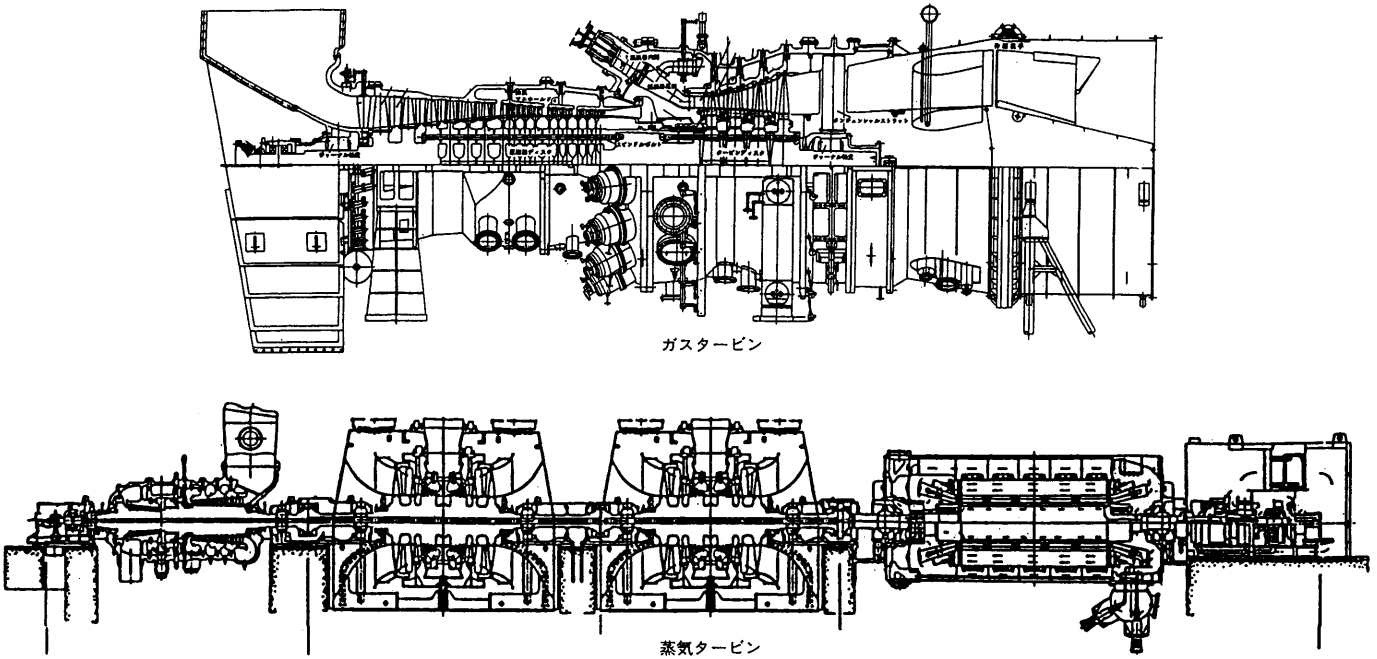


図4 軸断面図
Longitudinal sectional drawing

表1 主要機器の諸元
Specification of main component

(1) ガスタービン		
数量	3台	
型式	一軸開放サイクル型 (501 F)	
燃料	LNG 気化ガス	
出力	157 000 kW (大気温度 4℃時)	
入口圧力	14.0 kgf/cm ² G	
入口温度	1 350℃	
回転数	3 600 rpm	
(2) 排熱回収ボイラ		
数量	3台	
型式	排熱回収三重圧自然循環形	
蒸発量 (高圧)	193 t/h	
(中圧)	36.0 t/h	
(低圧)	36.7 t/h	
出口圧力 (高圧)	155.9 kgf/cm ² G	
(中圧)	48.7 kgf/cm ² G	
(低圧)	6.4 kgf/cm ² G	
出口温度 (高圧)	541℃	
(中圧)	310℃	
(低圧)	265℃	
(3) 蒸気タービン		
数量	1台	
型式	くし型反動4分流排気式再熱混圧復水形 (TC 4 F-29.5)	
出力	258 600 kW (大気温度 4℃時分組出力)	
入口圧力 (高圧)	151.8 kgf/cm ² G	
(再熱)	45.6 kgf/cm ² G	
(低圧)	5.3 kgf/cm ² G	
入口温度 (高圧)	538℃	
(再熱)	538℃	
(低圧)	262℃	
回転数	3 600 rpm	
(4) 発電機		
数量	GT : 3台 ST : 1台	
型式	水素冷却三相交流同期型	
容量	GT : 175 000 kVA ST : 290 000 kVA	
電圧	15 kV	
相数	3相	
周波数	60 Hz	
回転数	3 600 rpm	

が、周速の上昇とぞん新な三次元設計により、高負荷・高効率タービンを開発している。

(3) 高温化設計

高温ガスタービンの開発において、タービンの冷却空気系及び空冷翼の設計が重要なポイントとなる。静翼の冷却系統において、1段静翼は圧縮機吐出空気で冷却し、2, 3段静翼は、各々13段、10段、6段抽気により冷却している。一方、動翼の冷却は、吐出空気を外部クーラで冷却した空気冷却している。

501 Fのタービン空冷翼は、タービン入口温度の上昇にもかかわらず、メタル温度は従来機種と同レベルを保つように設計されている。タービン静翼は、1段から3段まで空冷翼を採用しており、1段静翼は、従来機より更に冷却を強化した構造となっている。タービン動翼も、1段から3段まで空冷翼を採用している。一段動翼の冷却構造にはシャワーヘッド冷却、翼面フィルム冷却及びピンフィン冷却の各種冷却技術が適用されている。

(4) 低 NOx 燃焼器

世界に先駆けて開発し、MW 701 D (1 150℃級 50 Hz 機) で成功した予混合式低 NOx 燃焼器をベースに、1 350℃への温度上昇による NOx 量の増加及び壁温上昇を抑えるために、従来の予混合燃焼器をさらに改良している。

2.4 蒸気タービン

本プラントでは、高温ガスタービンの排ガス条件に合った蒸気条件として、従来汽力並みの 538℃の高温蒸気条件が選定され、コンバインドプラント性能の向上が図られている。

蒸気タービンには、従来汽力で十分実績のある3車室タービンを採用した。なお、本プラントは、高効率を目指したプラントであり、蒸気タービンには、調速段なし全周噴射の採用、完全三次元設計翼の採用並びに 29.5 インチ ISB 最終翼群の採用などの高効率化技術が導入されている。

蒸気タービン軸断面を図4に示す。

表2 実測性能
Comparison of performance

	計画値	実測値
(1) プラント出力 (大気温度 22℃)	670 MW	698.2 MW
(2) プラント熱効率 (大気温度 22℃)	48.7%	49.39%

表3 ガスタービン出口 NOx 特性 (実測)
GT NOx emission level (Measured data)

		1 GT	2 GT	3 GT
発電機出力	MW	157.3	157.5	157.2
GT 出口 NOx 濃度 (O ₂ : 16% 乾き)	ppm	29.7	26.9	27.8
脱硝出口 NOx 濃度 (O ₂ : 16% 乾き)	ppm	3.4	3.4	3.6

2.5 排熱回収ボイラ

排熱回収ボイラは、高温ガスタービンの採用によるボイラ入口ガス温度の上昇に伴い、従来汽力レベルである 541℃ の高温蒸気を発生することが可能となっている。また多軸再熱システムの採用に伴い、高圧蒸気圧力の高圧化 (154 kgf/cm²abs) 及び圧力段数の三重圧化を行い、高効率化を図っている。

なお高圧ドラム、中圧ドラム、低圧ドラムを有するこの排熱回収ボイラは、プラント全体の経済性も考慮しながら伝熱面積が計画されており、ピンチポイント温度差は 15℃、アプローチポイント温度差は 5℃ にて設計されている。排熱回収ボイラは、高温部及び低温部の各モジュールに分割され、大型モジュール工法による輸送据付が採用されており、品質管理の向上及び現地据付工程の短縮が図られている。

3. 試運転実績

試運転過程で、プラント性能、環境特性及び運転特性について確認され、いずれも計画値を満足する良好な結果が得られている。

3.1 プラント性能

プラント実測性能を表2に示す。

定格出力 670 MW は、大気温度 22℃ 以上でも確保できることが確認され、プラント熱効率は計画値 48.7% に対し 49% 以上が実測されている。部分負荷におけるプラント熱効率も図5に示すように計画値を上回る結果が得られている。

3.2 環境特性

本プラントの環境保全対策として重点が置かれたのは、NOx 対策である。ガスタービンからの NOx 排出は、表3に示すように計画値 64.3 ppm (O₂ 16% 換算) に対し、30~60 ppm 以下と十分に低い結果が得られ、脱硝装置出口 (煙突入口) では 9.7 ppm の計画値を下回る NOx 特性となっている。

温排水、騒音についても十分に満足できる結果が得られた。

3.3 プラント運用特性

試運転期間中に、自動プラント起動停止機能試験、ガスタービン

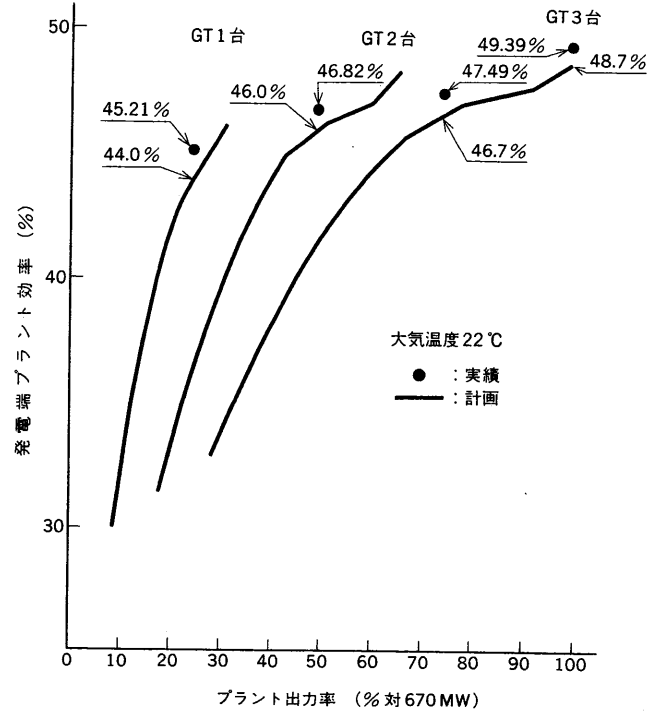


図5 プラント効率特性 (実測) プラント部分出力においても計画効率を上回る結果を得た。
Thermal efficiency characteristic (Measured data)

追加起動停止試験、自動プラント出力制御機能試験、補機停止ランバック機能試験、負荷追従性試験、所内単独試験等プラント運用特性に関する多くの試験が実施されたが、結果は計画を満足しており、従来の非再熱あるいは一軸システムと比べ、そんな操作性、制御性を有していることが確認された。

4. む す び

関西電力(株)姫路第一発電所第5号機は最新の技術を導入し、高い信頼性も確保したコンバインドプラントとして建設され、期待どおりの成果が発揮されている。技術革新によるプラントの高性能化及び環境適応には注目すべきものがあり、とりわけ、ガスタービンの技術開発には目を見張るものがある。また、蒸気サイクルを含むプラントシステムについても新たな開発が進められており、時代の要求に合ったプラントが開発されている。

本プラントで得られた貴重な成果は、今後の大容量・高効率プラント計画に大いに役立つものと考えられ、この姫路第一発電所第5号機コンバインドプラントが、信頼性のある安定電力確保に大いに寄与するものと信じている。

参 考 文 献

- (1) 三賢憲治ほか、150 MW 級大容量高温ガスタービン 501 F の開発、三菱重工技報 Vol.27 No.1 (1990) p.29
- (5) 岸本 勝ほか、コンバインドサイクルプラント用蒸気タービンの設計、三菱重工技報 Vol.28 No.1 (1991) p.7