

# 1,500°C 級次世代コンバインドサイクル発電所の計画

Planning of Next-Generation 1,500°C-Class Combined-Cycle Power Plant

大久保 貴司  
OKUBO Takashi

渋谷 幸生  
SHIBUYA Sachio

1998年3月、当社はGE社と次世代コンバインドサイクル発電プラント用パワートレイン“Hシステム”の製造協業契約を締結し、その商用機の製造に着手した。中核を成す1,500°C級蒸気冷却ガスタービンは2機種で、初号機は98年5～6月に工場無負荷試験に成功し、2000年後半に実プラントで負荷試験を行う。蒸気タービンは高効率と省スペースを配慮した再熱式混圧タービンでサイト条件に合わせて6機種から選択できる。

発電機は水素冷却方式を開発して採用している。Hシステムを用いた次世代コンバインドサイクル発電所は、現在の1,300°C級に比べ1.5倍から1.7倍の出力と6%から8%の性能向上を、17%少ない敷地面積で実現できる。

Toshiba has entered a cooperation agreement with General Electric Company (GE) to manufacture the so-called “H system” power train for the next-generation 1,500°C-class combined-cycle power plant, and has started the manufacturing of commercial units. The lineup of the H system consists of two types of 1,500°C steam-cooled gas turbines. The steam turbine is a reheat type admission turbine, and can be selected from six types. The generator is a newly developed hydrogen-cooled type.

The next-generation combined-cycle power plant incorporating the H system has 1.5 to 1.7 times the output and a 6 to 8% improvement in efficiency with a 17% smaller plant area compared to the current 1,300°C class.

## 1 まえがき

近年、エネルギーの有効利用、環境保全、経済性向上の観点から、ガスタービンを使用したコンバインドサイクル発電プラントが増加傾向にある。現在、1,300°C級ガスタービンを使用した発電プラントが主流となりつつあるが、今後21世紀初頭には、より効率の高い1,500°C級コンバインドサイクル発電プラントの商用化が予定されている。

当社はそのニーズに対応するため、98年3月に米国GE社と“Hシステム”と呼ばれる1,500°C級コンバインドサイクル発電プラント用パワートレイン機器(ガスタービン、蒸気タービン、発電機)の製造協業契約を締結し、関連設備の設計・製造体制を整えるとともに、実用化に向けたプラント計画を実施中である。

ここでは、1,500°C級ガスタービンの実用化状況および1,500°C級コンバインドサイクル発電所の特長について述べる。

## 2 1,500°C級ガスタービンの実用化状況

コンバインドサイクル発電プラントのいっそうの高効率化、環境特性、経済性の改善のためには、ガスタービンの高温化・大容量化が有効である。

現在では、1,300°C級ガスタービンが実用化されているが、いっそうの高温化・大容量化のために1,500°C級蒸気

冷却ガスタービンの開発が21世紀初頭の実用化に向けGE社で鋭意進められている。

50 Hz機であるMS9001H(9H)は、その信頼性を検証するための各種要素試験実施後、98年5～6月に実機によるFSNL(Full Speed No Load)試験を行った(図1)。FSNL試験では、1,300点以上の計器を使用し、圧縮機圧力・流量特性、効率、振動特性などを評価し、なんら問題のないことを確認した。

さらに、99年5～6月に出荷前試験を実施し、その後GE社グリーンビル工場から出荷、2000年後半に実負荷試験、

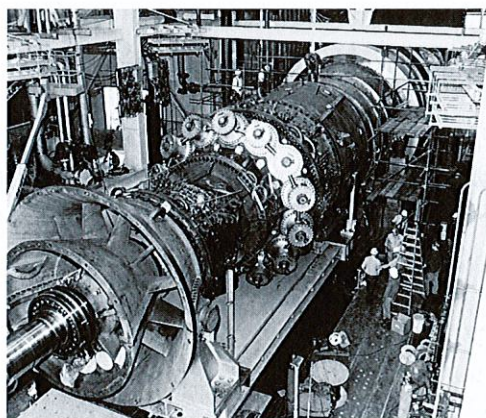


図1. MS9001H FSNL試験設備<sup>1)</sup> GE社グリーンビル工場の無負荷試験設備およびそこに設置した9Hガスタービンを示す。

9 H full-speed no-load (FSNL) test facility

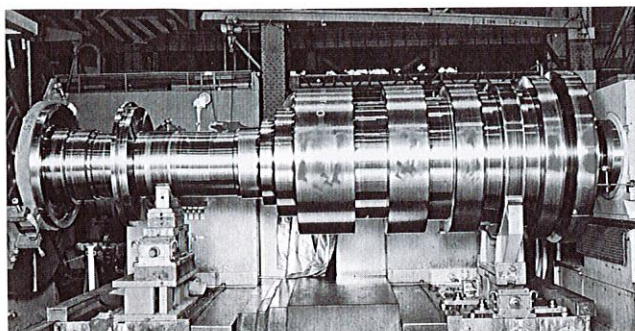


図2. 当社で製造中の7H圧縮機ロータ 当社京浜事業所で加工中の7Hガスタービン初号機用の圧縮機前部シャフト。

7H compressor rotor under machining at Toshiba Keihin Product Operations

2001年初頭に初号機運転開始を予定している。

一方、60 Hz機であるMS7001H(7H)は、現在初号機を当社京浜事業所およびGE社グリーンビル工場で製造中(図2)で、99年12月にFSNL試験、2001年後半に実負荷試験を予定している。

### 3 プラント計画

#### 3.1 蒸気サイクル・蒸気条件の選定

表1に、当社計画の1,500℃級一軸型コンバインドサイクル発電プラントの基本仕様を示す。蒸気サイクルは、1,300℃級コンバインドサイクル発電プラントと同様に高い蒸気サイクル効率を得られる再熱3圧サイクルを採用する。蒸気条件は、蒸気サイクルの効率向上のために高温・高圧力化し12.5~15 MPag/550~560℃とする。プラント出力は50Hz用と60Hz用でそれぞれ490 MW, 394 MW, 効率は53%以上となり、1,300℃級プラントに比べて出力

表1. 1,500℃級一軸型コンバインドサイクル発電プラントの基本仕様

Basic specifications of 1,500℃-class combined-cycle power plant

ガスタービン型式	MS9001H(50 Hz)	MS7001H(60 Hz)	MS7001FA(60 Hz)
プラント発電端出力(MW)	490	394	238
プラント発電端熱効率(HHV基準)(%)	53	53	49
蒸気サイクル	再熱3圧サイクル		
蒸気条件	主蒸気圧力/温度 12.5~15 MPag/550~560℃ 10.4 MPa/537℃		
	再熱蒸気圧力/温度 2.5 MPa/550~560℃ 2.2 MPa/534℃		
プラント出口 NOx 濃度	4 ppmvd(16% O <sub>2</sub> )以下		

\*15℃ ベース負荷時 HHV: 高位発熱量

で1.4~1.7倍、効率で約6~8%(相対値)向上する。排出NOxは、プラント出口で4 ppmvd以下と1,300℃級と同程度となる。

#### 3.2 システム系統

図3は、1,500℃級コンバインド発電システム(以下、Hシステムと略記)の概略系統を示す。ガスタービン翼に対する蒸気冷却は、従来の3圧力再熱方式のコールドレヒー

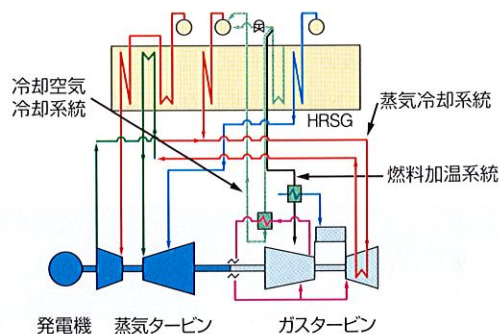


図3. 1,500℃級コンバインド発電システムの概略系統 Hシステムのシステム構成および主要系統を示す。

System flow schematic of 1,500℃-class combined-cycle power plant

軸起動方式	サイリスタ起動方式	蒸気タービン起動方式
システム構成	<p>* 必要電気設備が多い</p>	<p>* 補助蒸気系統設備が増加する。</p>
起動時間(多数軸連続起動時)	短い	長い
起動損出	小	大
運用性	自軸起動時に他軸の運転に影響を及ぼさない。	他軸からの補助蒸気にて自軸を起動するため、他軸の運転に大きな影響(出力低下、トリップ)を及ぼす。
経済性	コスト高	コスト低

表2. 軸起動方式の比較  
Stage start-up alternatives

ト蒸気(高圧蒸気タービンの排気蒸気)の一部と中圧主蒸気の全量により行われ、ガスタービン冷却後の過熱された蒸気は再熱器で再び過熱後、中圧タービンへ導かれ、蒸気タービン出力の増加に寄与する。燃料加温システムは燃料を高温水により加温し燃焼器に供給するシステムで、これによりプラント効率は0.6~0.8%(相対値)向上する。また、冷却空気冷却システムは、ガスタービン圧縮機の高圧力比化に伴い温度上昇した圧縮機吐出空気を給水で冷却するもので、冷却空気を冷却した給水は加熱され蒸気となり排熱回収ボイラ(HRSG)のドラムに回収される。

### 3.3 軸起動方式

1,500℃級ガスタービンを使用したパワートレインの起動方式としては、制御性が良く実績の豊富なサイリスタ起動方式が標準であるが、蒸気タービン起動の採用も可能である。両方式には一長一短があり、それぞれのプラントにおける運用性と経済性の評価により決められる(表2)。

## 4 主要機器の特長

### 4.1 1,500℃級ガスタービン設備

1,500℃級ガスタービンの断面を図4に、基本仕様を表3に示す。1,300℃級ガスタービンに比べエネルギー利用の高効率化、プラント経済性向上のために大幅な高温化・

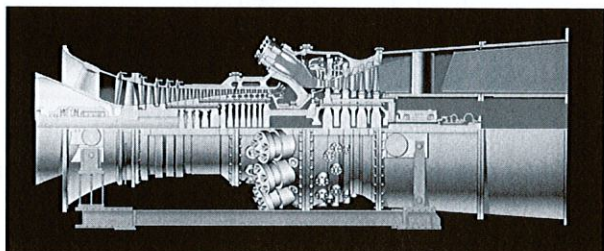


図4. 1,500℃級ガスタービンの断面 タービン動静翼に蒸気冷却を適用した高効率・大容量ガスタービン。

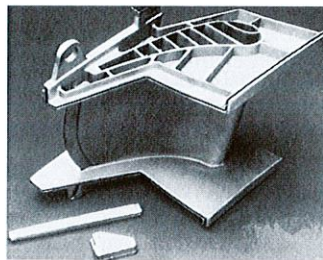
Cross section of H system gas turbine

表3. 1,500℃級ガスタービンの基本仕様

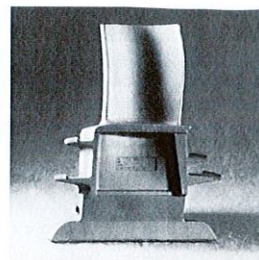
Specifications of H system gas turbines

ガスタービン型式		1,500℃級		1,300℃級
		9 H	7 H	7 FA
諸元	出力(MW)	328.4	265.8	152.6
	効率(%)(LHV基準)	39.5	39.5	34.5
圧縮機	吸込空気量(Kg/s)	686.7	557.9	417.6
	段落数	18	18	18
	圧力比	23.2	23.2	15.0
燃焼器	缶数	14	12	14
	NOx濃度(ppmvd, @16% O <sub>2</sub> )	<40	<40	<40
タービン	タービン入口温度(℃)(1B前)	1,439	1,439	1,288
	段落数	4	4	3

LHV: 低位発熱量



静翼



動翼

図5. 第1段蒸気冷却動静翼(単結晶材使用) 1,500℃級ガスタービンに用いる回収型蒸気冷却翼。

Steam-cooled nozzle and bucket solidified with single crystal

大容量化が図られている。

タービン入口温度の高温化にあたっては、タービン翼の信頼性を確保するための冷却が重要なポイントとなる。H型ガスタービンではその冷却手段として、タービン第1段、第2段に蒸気冷却を適用する。従来の冷却媒体である空気を使用した空気冷却の冷却性能はすでに飽和に達しているため、空気に比べ比熱が大きく、その熱伝達率が空気の1.5倍となる優れた冷却特性をもった蒸気を使用する。これにより、タービン第1段動入口温度を1,430℃以上にすることができ、1,300℃級ガスタービンに比べ110℃以上の高温化が図られる。一方、蒸気冷却の採用により翼基材内の温度勾配が大きくなり熱応力と歪(ひず)みが増大する。これに対応し、翼の寿命を従来の空気冷却翼と同等にするために、使用条件の厳しい第1段動静翼に高温強度の優れた単結晶材を使用する(図5)<sup>2)</sup>。また、高温ガスから翼基材を保護するための遮熱コーティングをタービン第1段、第2段動静翼に適用する。

大容量化のためには、吸込空気流量を増加させた新型高性能圧縮機の開発が課題となる。圧縮機の開発は、GE社の航空エンジンとして豊富な実績をもつCF6-80C2(ジェットエンジンの型式名)の圧縮機をベースに実施された。開発の過程においては、実機の1/3のサイズのスケールモデル機により、流量・圧力特性、効率、振動特性、ディスク温度分布などを十分に評価し実機の設計に反映した<sup>3)</sup>。また、環境適合性に対しては、ガス温度上昇に伴い新しいドライ低NOx燃焼器(DLN2.6H)の開発を実施している。

図6に、ガスタービン着火から定格負荷までの燃焼状態の変化を示す。着火から30%負荷までは、拡散燃料ノズルだけを使用して拡散燃焼を行い、30%から45%負荷では予混合ノズルも利用し、拡散火炎の周りに予混合火炎を形成する。45%負荷以上では拡散燃料をカットし100%予混合燃焼にして、40 ppmvd程度まで排出NOxを低減し安定な燃焼を維持する。全運転域において6個の燃料ノズルに均等に燃料が配分されて燃焼するため、部分的な高温部がない良好な燃焼状態が得られる。

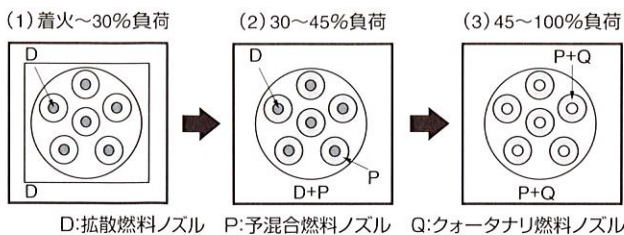


図6. ガスタービン着火から定格負荷までの燃焼状態の変化  
DLN2.6Hの着火から定格負荷までの負荷上昇に伴う燃焼状態の変化を示す。

DLN2.6H combustion modes

#### 4.2 蒸気タービン設備

Hシステム用の蒸気タービンは再熱式混圧タービンで、コンバインドサイクル発電プラント用として高い内部効率とコンパクト設計が重視される。Hシステムに適用する標準ラインアップを表4に示す。計画真空度が1.5インチ-Hgaのときは、TCDF(2車室2流排気)-33.5が定格点で排気損失が最小となり、プラント熱効率が最大となるため、ベース負荷運用のプラントに対しては最適な選択となる。しかし、部分負荷効率が重視されるプラントではTCDF-30を選択することもある。

さらに60Hzでは、タービン建屋およびメンテナンスの合理化が重視される場合には蒸気タービンを単車室化し、SCSF(単車室単流排気)-45とすることも可能である。

#### 4.3 発電機設備

Hシステム用発電機として、9H/7Hのおおの1機種ずつ標準のタービン発電機を適用していく。発電機の冷却方式は、Hシステムの容量に由来から適用されてきた水冷却発電機よりシンプルな構成となる水素冷却発電機を標準的に採用する。この水素冷却発電機は、当社で新規に開発し適用範囲を拡大したものである。ただし、ユーザーの意向に応じて水冷却発電機を適用することも可能である。

### 5 配置計画

1,500 MW 級プラントの機器配置を1,500°C 級プラント

表4. 蒸気タービンの標準ラインアップ  
Standard lineup of H system gas turbines

復水器真空度(インチ Hga)			1.0	1.5	2.0	2.5
ガ ス タ ー ビ ン 型 式	9H	TCSF-42				
		TCDF-33.5				
		TCDF-42				
ガ ス タ ー ビ ン 型 式	7H	TCSF-40				
		TCDF-33.5				
		TCDF-40				

TCSF: 2車室単流排気

と1,300°C 級プラントにて比較する。60 Hz 地区を対象にすると、機器構成は1,300°C 級ではパワートレイン6軸、一方、1,500°C 級では4軸となり、機器設置必要面積は約17%減少する(図7)。

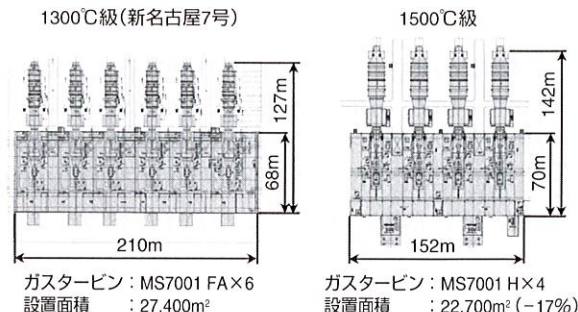


図7. 1,500 MW 級プラント機器の配置比較 1軸当りの出力増加により機器設置面積を削減できる。

Comparison of plant layouts

### 6 あとがき

1,500°C 級ガスタービンの実用化状況および1,500°C 級コンバインドサイクル発電所の特長について述べた。当社は、1,500°C 級ガスタービンに関連する技術をGE社より導入するとともに、従来の汽力プラントおよびコンバインドサイクル発電プラントで培った豊富なシステムエンジニアリング経験を生かし1,500°C 級コンバインドサイクル発電プラントに最適な系統計画、配置計画、環境保全計画を進めている。

今後ともユーザーのニーズに対応するために、高効率で環境特性・経済性に優れたコンバインドサイクル発電プラントの実用化を目ざす所存である。

### 文献

- (1) 大久保貴司. "1500°C 級ガスタービンの開発と実用化". 平成10年度火力原子力発電大会. 火力原子力発電技術協会編. 四国, 1998-10, 火力原子力発電技術協会. 東京, 1998.
- (2) J.C. Corman and T.C. Paul. Power Systems for the 21st Century "H" Gas Turbine Combined Cycles, GER-3935A. GE Industrial and Power Systems, 1996
- (3) Charles S. Cook, et al. "Overview of General Electric's Advanced Turbine System Program". ATS annual program review, DOE, Nov. 2-4, 1998.



大久保 貴司 OKUBO Takashi

電力システム社 火力事業部 火力プラント技術部参事。コンバインドサイクル発電設備の基本計画に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会、火力原子力発電協会会員。  
Thermal Power Systems Div.



渋谷 幸生 SHIBUYA Sachio

電力システム社 火力事業部 火力プラント技術部主務。コンバインド発電設備の基本計画業務に従事。日本ガスタービン学会会員。  
Thermal Power Systems Div.