

高効率コンバインド サイクル プラントの開発と実用化

Development and Practical Application of High-Efficiency Combined-Cycle Power Plants

本間 友博
T. Honma

石井 潤治
J. Ishii

渋谷 幸生
S. Shibuya

エネルギー利用の高効率化、環境保全、経済性向上への対応として、当社では高効率コンバインド サイクル プラント^(注1)の開発・実用化を進めている。1,300℃級コンバインド サイクル プラントはすでに実用化され、現在の主流となっている。また、空気に比べ格段に冷却性能が良い蒸気を用いた蒸気冷却翼を採用した、1,500℃級ガスタービンの開発が進められている。このガスタービンを用いた1,500℃級コンバインド サイクル プラントは、1,300℃級プラントに比べ出力で1.5~1.7倍、効率で約8%以上(相対値)の性能向上が見込まれる。この1,500℃級コンバインド サイクル プラントは21世紀初頭には商用化が予定されている。

To meet the demands for higher efficiency in energy use, environmental preservation and improvement of economic performance, Toshiba is carrying forward the development of high-efficiency combined-cycle power plants and their practical application. The 1,300℃-class combined-cycle power plant is already in practical use and is the leading system at present.

We are also promoting the development of the 1,500℃-class gas turbine with steam-cooled buckets and nozzles, offering significantly better cooling efficiency compared with air. It is expected that the output of a plant equipped with this gas turbine will be 1.5 to 1.7 times higher than that of a 1,300℃-class plant, and that there will be an efficiency improvement of about 8% (relative value). It is planned that the 1,500℃-class combined-cycle power plant will be introduced on a commercial basis by the beginning of the 21st century.

1 まえがき

1970年代中ごろからの空気冷却翼の採用による、1,100℃級への高温化と空気流量の増大に伴い、単機出力が100MWを超えるガスタービンが実現された。このガスタービンは従来機に比べ排ガス温度も高く、この排熱回収により発生する蒸気を用いた蒸気タービンと組み合わせたコンバインド サイクル プラントが実現された。

90年代に入るとさらに高度化した冷却技術を駆使した1,300℃級ガスタービンが実用化され、このガスタービンを用いた高効率コンバインド サイクル プラントが現在の主流となっている。また、従来の空気に比べ格段に冷却特性の良い蒸気を冷却媒体とした回収式蒸気冷却翼を用いた1,500℃級ガスタービンの開発が鋭意進められており、今世紀末には実用化される見込みである。

ここでは、エネルギー利用の高効率化と環境保全、そして経済性向上を目指して推進されている高効率コンバインド サイクル プラントの開発と実用化について、すでに実用化されている最新の1,300℃級コンバインド サイクル プラントの状況と、現在進められている1,500℃級ガスタービンの開発およびそれを用いた高効率コンバインド サイクル プラントの計画について述べる。

(注1) ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた発電システム。

2 コンバインド サイクル プラント製作実績

図1に、当社が納入したコンバインド サイクル プラントの実績を示す。82年からGE社と技術提携し、1,100℃級そして1,300℃級ガスタービンの技術を導入し、コンバインド サイクル プラントを製作・納入してきた。1,100℃級プラントは東京電力(株)富津1号、中部電力(株)四日市4号向けに一軸型を、輸出プラントのマレーシアバカ発電所およびタイバンパコン発電所には多軸型を納入し、いずれも液化天然ガス(LNG)や天然ガスを燃料として順調に運転さ

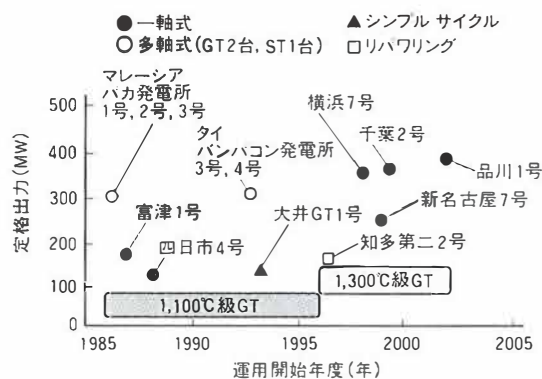


図1. コンバインド サイクル プラントの実績 当社が製作・納入した1,100℃級・1,300℃級コンバインド サイクル プラントの実績を示す。

Installed combined-cycle power plants

れている。また、1,300°C級プラントは、中部電力(株)知多第二リパワリング^(注2)と東京電力(株)横浜7号の一部が営業運転に入っている。さらに、中部電力(株)新名古屋7号、東京電力(株)千葉2号は建設中であり、東京電力(株)品川1号のプラント計画が現在進行している。

3 1,300°C級コンバインドサイクルプラント

表1に、50 Hz および 60 Hz 地区用 1,300°C級コンバインドサイクルプラントの基本仕様を示す。プラント出力は、一軸型で 250~380 MW、熱効率も 49% を超え、大容量・高効率化が図られている。これらのプラントは、1,100°C級での実績を基に計画したものであり、排熱回収ボイラのモジュール数削減や高低圧一体ロータと最新の長翼の採用による蒸気タービンの単車室化などによりプラントのコンパクト化を図っている。

表1. 1,300°C級コンバインドサイクルプラントの基本仕様
Specifications of 1,300°C-class combined-cycle power plant

項目	50 Hz 地区 プラント計画例	60 Hz 地区 プラント計画例
ガスタービン型式	9FA	7FA
タービン動翼入口温度(°C)	1,316	
HRSG 型式	3 圧式再熱自然循環型	
蒸気タービン型式	SCSF-42 インチ	SCSF-40 インチ
蒸気条件 (atg/°C/°C)	105/538/538	
発電機出力 (MW/軸)	380	257
発電端効率 (%) (HHV 基準)	49.0~50.0	
ガスタービン出口 NOx (ppmvd, @16% O ₂)	50	
HRSG 出口 NOx (ppmvd, @16% O ₂)	3.5~5.0	

HRSG: Heat Recovery Steam Generator (排熱回収蒸気発生器)
HHV: Higher Heating Value (高位発熱量)
vd: volume dry (ドライ状態の容積基準)

4 1,500°C級ガスタービン

昨今の電力事業を取り巻く環境のなかで、地球環境保全への要求、電力料金引下げの要求は一段と厳しくなっている。当社では、これらの要請に対しさらなる高温化・大容量化・環境適合化を図った 1,500°C級ガスタービンをを用いた次世代コンバインドサイクルプラントの計画を推進している。また、この 1,500°C級ガスタービンは、技術提携先である GE 社にて現在開発が鋭意進められている⁽¹⁾。その断面を図2に、また、表2にガスタービン仕様を示す。

図3に、1,500°Cガスタービンのねらいとこれを実現するための課題をまとめた。高効率化を旨とする第一のねらいは高温化であり、そのためにはタービン第1段・第2段に蒸気冷却翼を適用する必要がある。高度な冷却技術を駆使しても空気冷却翼の冷却性能は飽和傾向にあり、さらに高温化を図るために比熱や物性値の違いにより広い作動範囲で空気に比べ熱伝達率が 1.5 倍にもなる蒸気⁽²⁾を冷却媒体として採用する。これにより、タービン第1段動翼入口温度 1,430°C が実現され、1,300°C級ガスタービンに比べ 110°C 以上の高温化が図られる。また、回収式冷却構造であるた

表2. 1,500°C級ガスタービンの基本仕様
Specifications of 1,500°C-class gas turbine

ガスタービン型式		9H (50 Hz 機)	7H (60 Hz 機)
圧縮機	吸込空気量 (kg/s)	686.7	557.9
	段落数	18	18
	圧力比	23.2	23.2
燃焼器	缶数	14	12
	NOx 濃度 (ppmvd, @16% O ₂)	< 50	< 50
	ピタン I	タービン入口温度(°C) (1B 前)	1,430
	段落数	4	4

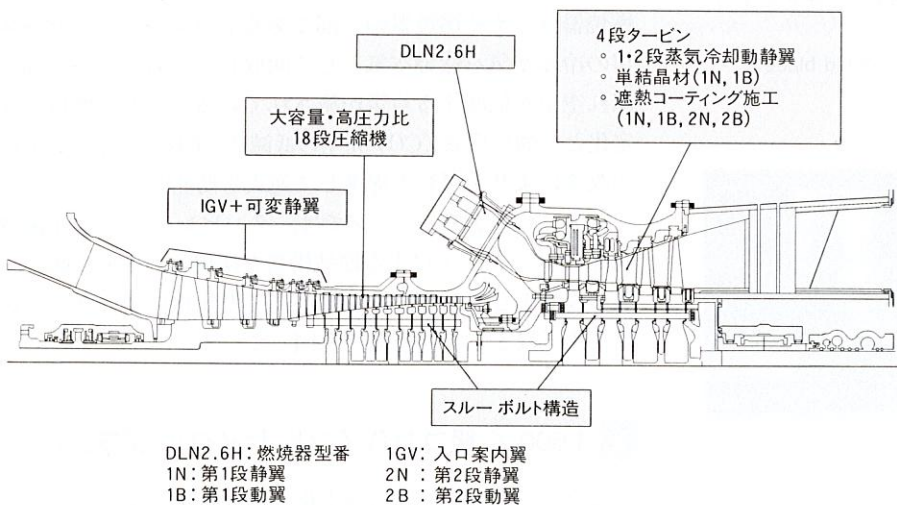


図2. 1,500°C級 (H型) ガスタービンの断面
タービン動静翼に蒸気冷却翼を用いた大容量・高効率ガスタービンである。

Cross section of 1,500°C-class "H" type gas turbine

(注2) 発電設備を改造して出力の増加を図ること。

め、冷却蒸気は蒸気タービンに還流され動力回収されるとともに、冷却媒体のガス通路部への吹出しによる主流ガスの温度低下が避けられ、同じタービン動翼入口温度に対し低い燃焼温度が実現されるため、NO_x 低減が図られる。

一方、蒸気冷却の採用により、図4に示すように翼基材内の温度勾配が大きくなり熱応力とひずみが増大する。しかし、もっとも過酷な使用条件となる第1段階静翼(図5)に高温強度の高い単結晶材を適用し、従来の空気冷却翼と変わらぬ設計寿命を実現している。

また、高温ガスから翼基材を保護する遮熱コーティング

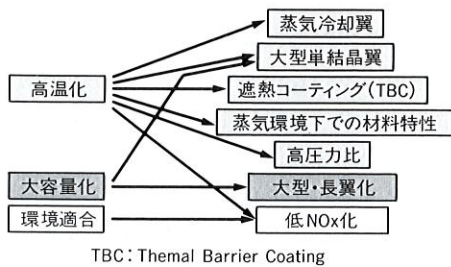


図3. 1,500°C級ガスタービンのねらいと課題 高温化・大容量化・環境適合を達成するための課題とその関連を示す。

Design objectives and issues related to 1,500°C-class gas turbine

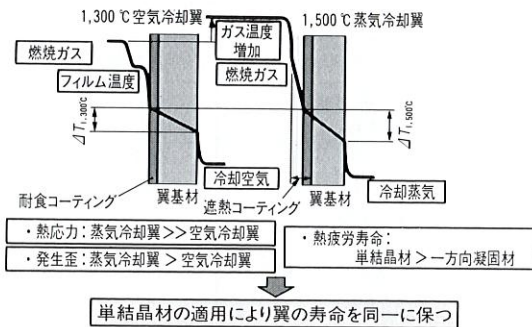


図4. 蒸気冷却翼への単結晶材の適用 蒸気冷却翼では発生する熱応力は大きくなるが、単結晶材を用いることで翼寿命を従来と同一に保つ。

Application of single crystal material to steam-cooled blade

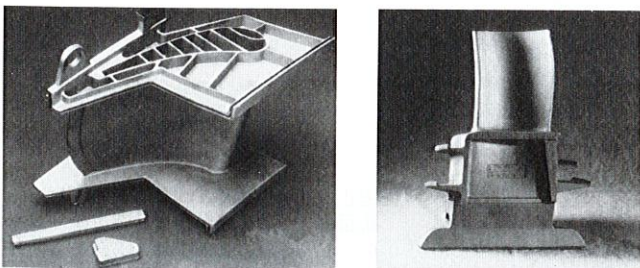
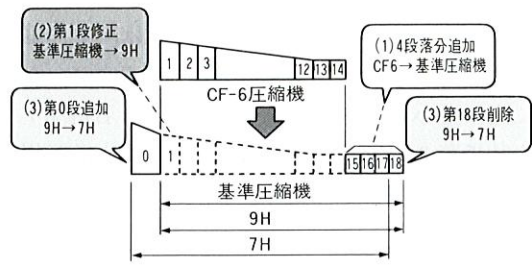


図5. 蒸気冷却第1段階静翼 1,500°C級ガスタービンに用いられる回収式蒸気冷却第1段階静翼(単結晶材)である。

Steam-cooled 1st-stage bucket and nozzle



圧縮機通路部比較

H: 米国GE社のガスタービン仕様記号

CF-6: 米国GE社のジェットエンジンの商品名

図6. 圧縮機開発フロー 1,500°C級ガスタービン用圧縮機の開発経緯を示す。

Diagram showing compressor development

や三次元設計翼などが適用されるが、これまでの豊富な実績により培われた従来技術を基に、新技術に対する検証を各段階で実施しながら、開発設計を進めている。

第二のねらいは容量の増大で、そのためには圧縮機の流量増加が重要な課題となり、さらに高温化に伴い高圧力比化も必要となる。図6の圧縮機開発フローに示すように、多数の実績のある航空エンジンCF-6の圧縮機を基に開発されている。圧力比23.2を満たすために後段に4段落を追加した基準圧縮機を設計製作し、その検証試験結果を基に、スケール設計により9H型(50Hz機)用圧縮機が設計され、スケールモデル機による検証試験が実施された。また、7H型(60Hz機)用にはスケール設計を行うとともに要求吸込空気量を満たすために第0段落を追加され、一方、圧力比を合わせるために第18段落を削除している。

そして、第三のねらいの環境適合に対しては、ガス温度の上昇に伴い新しいドライ低NO_x燃焼器(DLN-2.6H)が開発されている。従来型のDLN-2の実績を反映させ、燃焼前に燃料と空気を混合して均一な混合空気を作る100%予混合燃焼により、さらに低NO_x化を図っている。そのために燃焼器ライナや燃焼器の一部であるトランジションピース用の冷却空気を燃焼空気として回収し、さらにシール部の漏れ空気を低減する対策が施されている。また、燃焼の安定化と一酸化炭素(CO)発生の低減化を図るとともに、流れの改善により予混合を促進して逆火を防止している。

1,500°C級ガスタービンでは、タービンロータは圧縮機同様スルーボルトによる締結構造を採用し、十分に剛性の高い設計としており、さらに、高圧力比化に伴いタービン段落を4段として性能向上を図っている。

5 1,500°C級コンバインドサイクルプラント

社会ニーズとしての高効率化・大容量化・環境への適合に対しては、上述の1,500°C級ガスタービンを採用したブ

ラント新システムの構築で対応する。

図7は、1,500℃級プラント新システムの概略系統である。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リヒート蒸気(高压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過熱された蒸気と合流し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0.3~0.4%向上する。また、冷却空気冷却システムは、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ドラムに回収される。

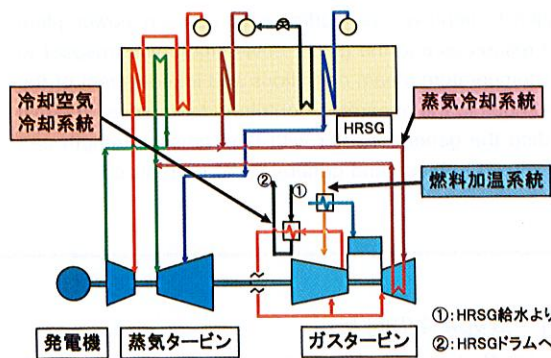


図7. 1,500℃級プラントシステム 1,500℃級蒸気冷却ガスタービンを用いたコンバインドサイクルプラントの系統である。
Schematic of 1,500°C-class combined-cycle power plant

表3に一軸型コンバインドサイクルプラントに9H型、7H型の1,500℃級ガスタービンを適用した場合の仕様の一例を示す。プラント出力は50Hz用と60Hz用でそれぞれ520MW、410MW、効率は約53%となり、1,300℃級プラ

表3. 1,500℃級コンバインドサイクルプラントの基本仕様
Specifications of 1,500°C-class combined-cycle power plant

項目	仕様	
ガスタービン型式	9H (50 Hz)	7H (60 Hz)
タービン動翼入口温度(℃)	1,430	
HRSG型式	3圧式再熱自然循環型	
蒸気タービン型式	TCDF-33.5インチ	SCSF-45インチ
発電機出力(MW/軸)	520	410
発電端効率(%) (HHV基準)	53	53
ガスタービン出口NOx (ppmvd, @16% O ₂)	< 50	
HRSG出口NOx (ppmvd, @16% O ₂)	< 5.0	

ントに比べ出力で1.5~1.7倍、効率で約8%(相対値)向上する。なお、NOx値は排熱回収ボイラ出口で5ppmvd以下と1,300℃級プラントと同程度となる。

60Hz地区を対象に1,500MW級のプラントを1,500℃級と1,300℃級で比較すると、プラント構成は、1,300℃級ガスタービンでは6台、一方、1,500℃級では4台となる。また、プラント出力および熱効率は、1,300℃級では1,458MW/49%であるのに対し、1,500℃級は1,640MW/53%となる。出力で12%、効率で約8%(共に相対値)向上するのに対して、設置面積は約17%縮小する。

このように、1,500℃級蒸気冷却ガスタービンを採用することにより、さらに大容量・高効率でコンパクト、かつ、環境に適合する発電プラントが実現できる。

6 あとがき

すでに実用化されている1,300℃級コンバインドサイクルプラントと現在開発が進められている1,500℃級ガスタービンおよびそれを用いたコンバインドサイクルプラントについて紹介した。1,500℃級ガスタービンは信頼性検証を行いながら開発が進められており、今世紀末までには無負荷定格回転数試験および実負荷試験が行われる。そして、1,500℃級コンバインドサイクルプラントは、21世紀初頭には商用化が予定されており、現在当社は従来プラントでの各種豊富な経験を生かし、プラント計画を推進している。種々の要求を多角的にとらえ、21世紀の最適プラントの実現を旨としていく所存である。

文献

- 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)
- 岡村隆成: ガスタービンの蒸気冷却技術, 日本ガスタービンセミナー第21回資料集, pp.71-78 (1993)



本間 友博 Tomohiro Honma

京浜事業所 技監。発電用ガスタービンプラントの設計に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会、火力原子力協会、ターボ機械協会会員。
Keihin Product Operations



石井 潤治 Junji Ishii, D.Eng.

京浜事業所 コンバインドサイクル機器部参事、工博。ガスタービンの開発設計に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会、ターボ機械協会会員。
Keihin Product Operations



渋谷 幸生 Sachio Shibuya

火力事業部 火力プラント技術部主務。コンバインドサイクル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 Plant Div.