

1,500 C級コンバインドサイクルシステム

1,500 C-Class Combined Cycle System

飯田 義亮
IIDA Yoshisuke

渋谷 幸生
SHIBUYA Sachio

当社は、1998年3月に米国のGeneral Electric(GE)社と次世代コンバインドサイクル発電プラント(以下、CCと略記)用パワートレイン“ H SystemTM注1(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(以下、GTと略記)は2機種で、初号機は2000年12月にGE社グリーンビル工場から出荷され、2002年後半に商業プラントとして営業運転開始(以下、運開と略記)予定である。蒸気タービン(以下、STと略記)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TCDF-33.5”(インチ)を標準機種としている。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CC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 concluded a cooperation agreement with General Electric Company to manufacture the so-called H SystemTM power train for next-generation combined cycle power plants, and has started the manufacturing of commercial units. The H SystemTM lineup consists of two types of 1,500 C-class steam-cooled gas turbines. First, the 9H gas turbine will enter commercial operation in the latter half of 2002. The steam turbine is a reheat type admission turbine, and the generator is a newly developed hydrogen-cooled type.

The next-generation combined cycle plant incorporating H SystemTM has 1.5 to 1.7 times the output and an efficiency improvement of 6 to 8% while occupying a 17% smaller plant area compared with the current 1,300 C-class plant.

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、液化天然ガス(LNG)燃料を使用した火力発電プラントの大半がGTを使用したCCとなる傾向にある。現在では、1,300 C級GTを使用したCCが主流となっているが、今後数年の間には、より効率の高い1,500 C級CC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、米国GE社とHシステムと呼ばれる1,500 C級CC用パワートレイン機器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CCの計画、主要構成機器の特徴、1,500 C級H型GTの実用化状況について述べる。

2 Hシステムの製造協業契約

上述のとおり、当社では、98年3月に米国GE社との間に、1,500 C級H型GTを中核としたHシステムと呼ばれる1,500 C級CC用パワートレイン機器(GT、ST、発電機)に関する新たな製造協業契約を締結した(図1)。

これは、従来の製造協業契約とは根本的に異なり、GE社と当社の2社による包括的な提携である。すなわち、次の

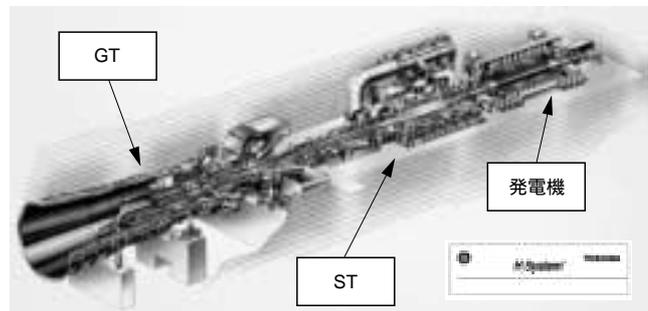


図1. Hシステムの全体像 パワートレイン機器(GT、ST、発電機)の構成を示す。

H SystemTM power train

内容を取り決めている。

- (1) 世界市場を対象として開発、製造、営業の各分野でリスクと収入を分けあうRSP(Risk & Revenue Sharing Partnership)契約であり、両者が協力して事業を展開する。
- (2) 世界市場で販売されるすべてのHシステムに対して、GE社はGTの設計と製造を、当社はSTと発電機の設計・製造及びGT圧縮機の製造を担当する。

(注1) H Systemは、米国GE社の商標。

3 1,500℃級CCの計画

3.1 プラント基本仕様

当社計画の1,500℃級一軸型CCの基本仕様を表1に示す。蒸気サイクルは、1,300℃級CCと同様に高い蒸気サイクル効率が得られる、再熱3圧サイクルを採用する。蒸気条件は、ボトムグ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50 Hz用と60 Hz用でそれぞれ490 MW、394 MW、効率は53%以上となり、1,300℃級CCに比べ出力で1.4～1.7倍、効率で約6～8%（相対値）向上する（図2）。排出窒素酸化物（NO_x）は、プラント出口で5 ppmvd（volume dry：ドライ状態での体積濃度）以下と1,300℃級と同程度となる。

表1 1,500℃級一軸型CCの基本仕様
Basic specifications of 1,500℃-class combined cycle plant

ガスタービン型式	MS9001H (50 Hz)	MS7001H (60 Hz)	MS7001FA (60 Hz) (参考)
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	12.5～15 MPag /550～560℃		10.3 MPag /537℃
	2.5 MPa /550～560℃		2.2 MPa /534℃
プラント出口NO _x 濃度 (ppmvd, 16%O ₂)	5以下		

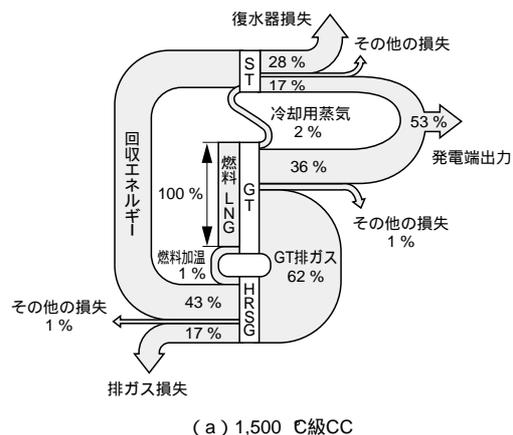
HHV：High Heating Value(高位発熱量)

3.2 システム構成

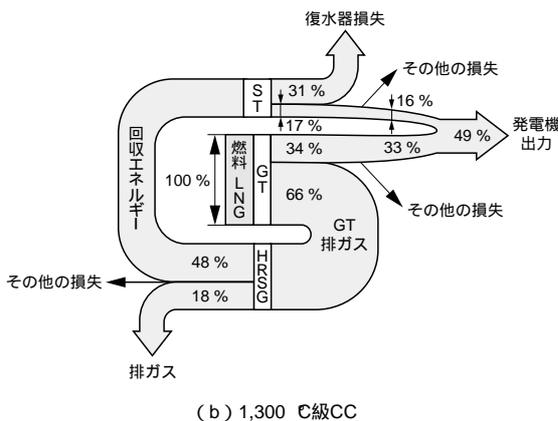
Hシステムの概略システムを図3に示す。1,500℃級GTのタービン翼は、冷却特性の優れた蒸気で冷却される。そのための冷却蒸気は、従来の3圧力再熱方式のコールドレヒート蒸気(高圧STの排気蒸気)の一部と中圧主蒸気の全量により供給し、GT冷却後の蒸気は再熱器で再び過熱された後中圧タービンへ導き、ST出力の増加に寄与する。燃料加熱システムは、燃料を高圧給水の一部により180℃以上に加熱し燃焼器に供給するシステムで、これによりプラント効率は0.3～0.4%向上する。また、冷却空気冷却システムは、高圧力比化に伴い温度上昇した圧縮機吐出空気を給水で冷却するもので、冷却空気を冷却した給水は加熱され蒸気となりドラムに回収される。

3.3 機器配置

配置計画例を図4に示す。1,500 MW級の60 Hz地区CCへの適用例では、そのプラント構成は1,300℃級GTの7FA型では6台であるが、1,500℃級GTの7H型では4台となる。また、プラント出力/熱効率は、1,300℃級CCが1,458 MW



(a) 1,500℃級CC



(b) 1,300℃級CC

HRSG：Heat Recovery System Generator（排熱回収ボイラ）

図2 熱精算図 1,500℃級CCと1,300℃級CCの熱の流れの比較を示す。

Thermal flow diagram of 1,500℃-class combined cycle power plant compared with 1,300℃-class plant

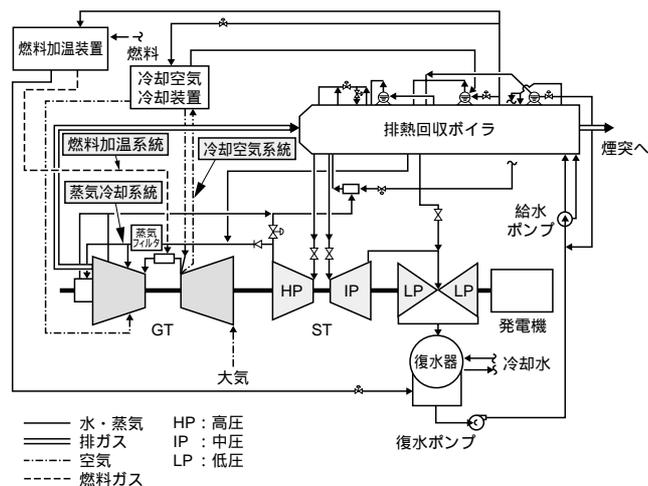


図3 1,500℃級CC概略システム Hシステムのシステム構成及び主要システムを示す。

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

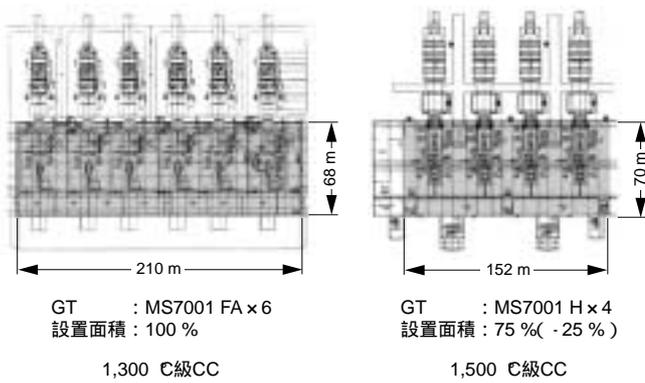


図4 . 1,500 MW級プラント機器の配置比較 1軸当りの出力増加により機器設置面積を削減できる。
Plant layout comparison

/48.6 %であるのに対して、1,500 C級CCでは、1,640 MW/53.0 %となる。出力で12 %、効率で9 % (共に相対値) 向上するのに対して、建屋面積は約25 %縮小することができる。

このように、1,500 C級蒸気冷却GTを採用することにより、より大容量・高効率でコンパクトな環境調和型発電プラントを実現できる。

4 主要構成機器の特徴

4.1 1,500 C級GT設備

1,500 C級GTの断面を図5に、基本仕様を表2に示す。1,300 C級GTに比べ、プラント経済性向上のために大幅な高温・大容量化が図られている。また、GT出口NO_xの低減にも十分な配慮がなされている。

GTの高効率化のためには高温化が必要となり、高温化にあたってはタービン翼の寿命を確保するための冷却が重要なポイントとなる。冷却性能を極限まで改善した現在の空気冷却方式は、既に限界に達しており、更なる高温化を図るために、空気に比べ熱伝達率が1.5倍にもなる蒸気を冷却媒体として採用している。その結果、タービン第1段動翼入口温度が1,430 Cとなり、1,300 C級GTに比べ、110 C以上の高温化が可能となる。また、回収式冷却構造を採用することにより、タービン翼の冷却媒体をガス通路部へ吹出すために生ずる主流ガスの温度低下が避けられる。その結果、同じタービン動翼入口温度に対し燃焼ガス温度は低くなり、発生NO_x量は低減する(図6)。更に、冷却蒸気を蒸気タービンに還流し、動力回収を行う。一方、高温化に伴う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)は増大するが、第1段動静翼に高温強度の高い単結晶材を適用して、従来の空冷翼と変わらぬ設計寿命とした(図7)。また、遮熱コーティングを翼表面に適用し高温ガスから翼基材を保護する。コーティング寿命は、実機フ

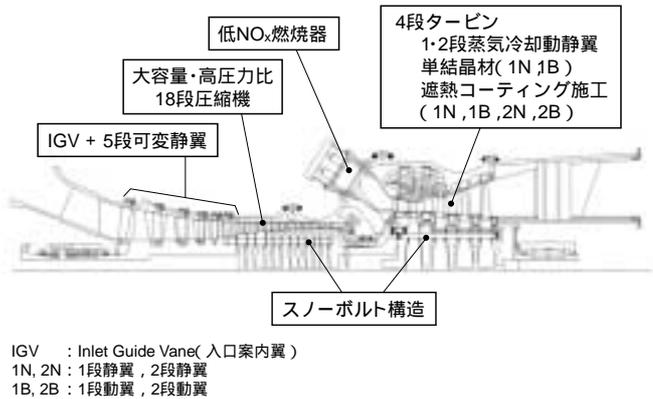


図5 . 1,500 C級GTの断面 タービン動静翼に蒸気冷却を適用した高効率・大容量GTである。
Cross section of H gas turbine

表2 . 1,500 C級GT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)	7FA(60 Hz機) (参考)
圧縮機	吸込空気量(kg/s)	686	558	418
	段落数	18	18	18
	圧力比	23.2	23.2	15.0
燃焼器	缶数	14	12	14
	NO _x 濃度 (ppmvd, 16 %O ₂)	< 50	< 50	< 50
タービン	タービン入口温度(C) (1B前)	1,430	1,430	1,288
	段落数	4	4	3

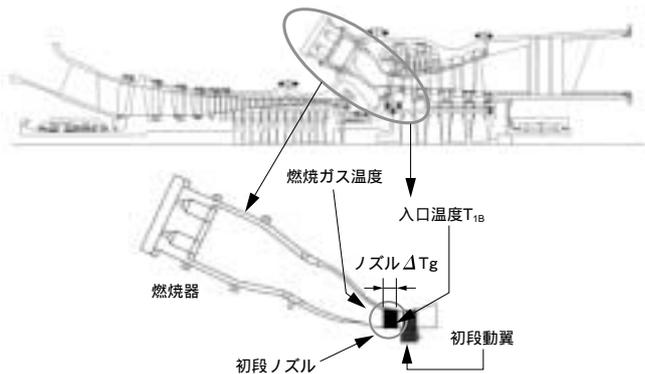
ールド試験にて検証した(図8)。

GT容量増大のためには圧縮機の流量増加が重要となる。また、高温化に伴い高圧力比化も必要となる。新型の1,500 C級GTの圧縮機は、多数の実績のある航空エンジン(CF6-80C2)の圧縮機をベースに開発されている。

図9に示すように、圧力比23.2を満たすためにCF6-80C2高圧圧縮機の後段に4段落を追加した基準圧縮機を設計製作し、検証試験が実施された。その結果を基に、スケール設計により9H型(50Hz機)用圧縮機を設計した。一方、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段落を追加し、圧力比を合わせるために最終段(第18段落)を削除している。開発過程においては、実機の1/3サイズのスケールモデル機により検証試験が実施され、効率、流量・圧力特性、振動特性、ディスク温度分布などを十分検証し実機設計に反映した。

GT排ガス中のNO_x濃度低減のため、ガス温度の上昇及び燃焼ガス流量増加に対応し、新しいドライ低NO_x燃焼器(DLN-2.5H)が開発された。1,300 C級の従来型燃焼器DLN-2の実績を反映し、100 %予混合燃焼により低NO_x化

【 燃焼ガス温度と初段動翼入口温度との関係 】



プラント効率向上 ⇒ 初段動翼入口温度を高くする
 低NO_x化 ⇒ 燃焼ガス温度を低くする

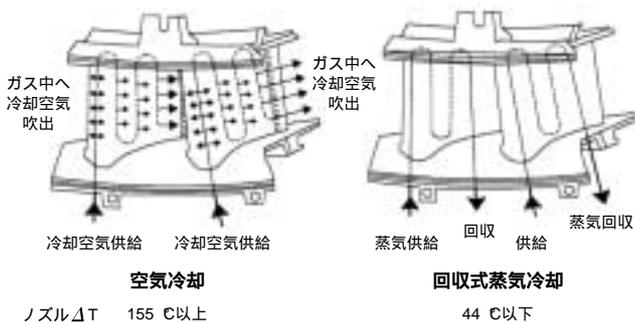


図6 . 回収式蒸気冷却の効果 回収式蒸気冷却の採用により,プラント効率向上と低NO_x化が同時に達成可能となる。
 Effect of closed steam cooling

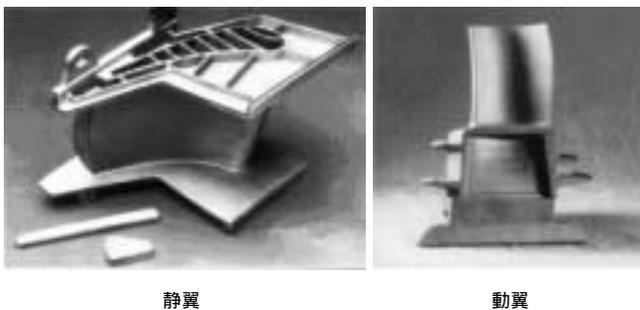


図7 . 第1段蒸気冷却動静翼(単結晶材使用) 1,500℃級GTに用いる回収型蒸気冷却翼である。
 Steam-cooled nozzle and bucket solidified with single crystal

を図っている(図10)。

1,500℃級低NO_x燃焼器では,ライナーやトランジションピース用冷却空気を燃焼空気として回収して100%予混合による稀薄燃焼を可能とし,燃焼器ライナーの中心部に燃料ノズルを追加して合計5個とし,燃焼の安定化と一酸化炭素(CO)発生の低減化を促進した。更に,予混合ダクト内の流れの改善による予混合の促進により逆火を防止している。

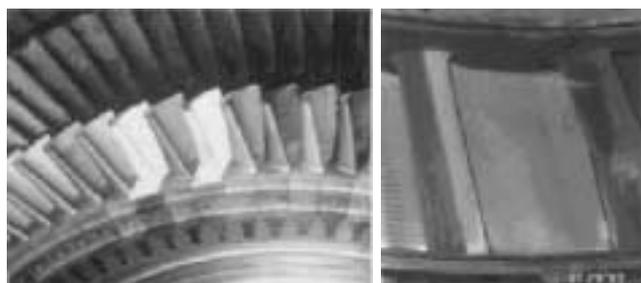


図8 . 遮熱コーティング 1,500℃級GTのタービン翼基材表面温度低減のために用いる遮熱コーティングである。
 Thermal barrier coating applied to turbine bucket and nozzle to lower metal temperature

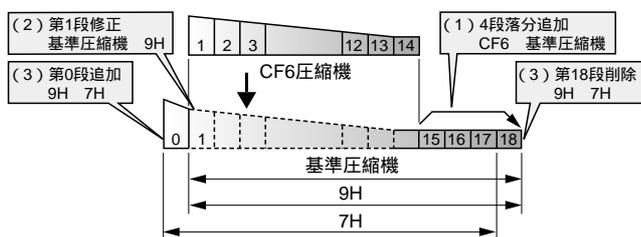


図9 . 圧縮機開発フロー 1,500℃級GT用圧縮機開発の流れを示す。
 Flow of compressor development

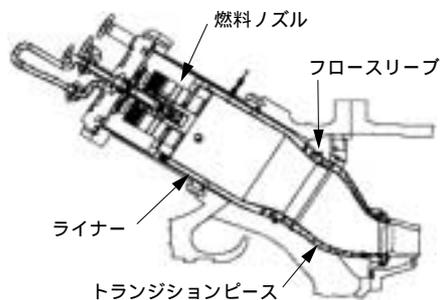


図10 . 1,500℃級低NO_x燃焼器の断面 1,500℃級H型GT用のドライ低NO_x燃焼器の断面を示す。
 Cross section of 1,500℃-class combustion system

また,燃焼モードの簡素化により燃焼火炎を均一化するとともに,高温強度の高いニッケル(Ni)基耐熱超合金材料を使用し,燃焼器の耐久性向上を図っている。

低NO_x化と火炎の安定を維持するためには,ガスタービン着火から定格負荷までの燃焼状態を変化させる。着火から回転上昇中は,拡散燃料ノズルだけを使用して拡散燃焼を行う。併入後の低負荷時は,火炎の安定と低NO_x化を両立するため,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。燃焼温度が上がり火炎の安定する高負

荷時には拡散燃料をカットし100%予混合燃焼にして、40ppmvd程度まで排出NO_xを低減し安定な燃焼を維持する。全運転域において、5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。

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、CC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3に示す。計画真空度が1.5 inch-Hga(水銀絶対圧)のときは、TCDF-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。

更に、60 Hzでは、タービン建屋及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 (Single Casing Single Flow)-45"とすることも可能である。

表3 蒸気タービン標準ラインアップ
Standard lineup of H System™ steam turbines

タービン型式		復水器真空度(インチ Hga)			
		1.0	1.5	2.0	2.5
9H型用	TCSF-42"				
	TCDF-33.5"				
	TCDF-42"				
7H型用	TCSF-40"				
	TCDF-33.5"				
	TCDF-40"				

TCSF : Tandem Compound Single Flow
TCDF : Tandem Compound Double Flow

4.3 発電機設備

1,500 ㉼級CC用の発電機には、水素冷却発電機を標準的に採用する。従来この容量クラスでは、水冷却発電機を適用していたが構造もシンプルで運転が容易な水素冷却発電機の適用範囲を拡大して使用する。また、起動方式は制御性がよく実績も豊富なサイリスタ起動方式を標準とする。

5 1,500 ㉼級GTの実用化状況

1,500 ㉼級H型GTの開発は、数年後の商用運転開始に向けGE社にて順調に進められている。圧縮機・タービン・燃焼器に関連する要素技術を検証するための各種試験は既に完了した。次のステップである7H型/9H型の初号機はGE社グリーンビル工場にてFSNL(Full Speed No Load)

試験を実施し、圧縮機を中心とした機器信頼性の確認を行い良好な結果が得られている。

50 Hz機である9H型初号機に関しては、2000年12月にグリーンビル工場からイギリスバグランベイサイトに出荷され、現地サイトにて2002年前半に実負荷試験を行い2002年後半に商業プラントとして運用を予定している(図11)。一方、60 Hz機である7H型初号機に関しては、2004年の運用を予定している。

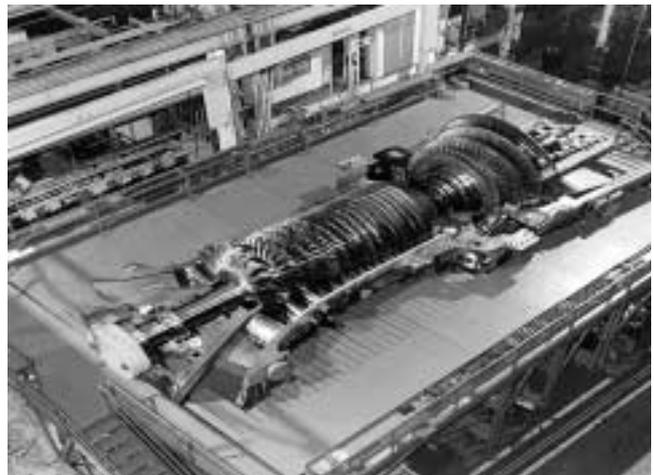


図11 9H初号機 組立中の9H初号機である。
9H gas turbine product

6 あとがき

1,500 ㉼級CCの計画、主要構成機器の特徴、1,500 ㉼級H型GTの実用化状況について述べた。今後は、GE社の1,500 ㉼GT技術と、1,100 ㉼級、1,300 ㉼級CCで培った当社のシステムエンジニアリング技術との融合により、1,500 ㉼級CCの計画をいっそう推進していく所存である。



飯田 義亮 IIDA Yoshisuke

電力システム社 火力事業部技監。
火力発電設備の計画・設計業務に従事。ASME、日本機械学会、日本ガスタービン学会会員。
Thermal Power Systems & Services 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 & Services Div.