

# 環境調和型 Hシステム コンバインドサイクル発電所

Japan's First Environmentally Conscious H System™ Combined-Cycle Thermal Power Plant

松下 丈彦

江上 法秀

高嶋 路晴

■ MATSUSHITA Takehiko

■ EGAMI Norihide

■ TAKASHIMA Michiharu

1,500℃級ガスタービンを用いた“H System™<sup>(注1)</sup>(Hシステム)”コンバインドサイクル発電プラント(以下、CCと略記)は、高効率、高出力、及び低窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)排出を特長とする最新鋭の環境調和型発電プラントであり、次世代の火力発電プラントの主力として期待されている。

東芝は、米国General Electric (GE)社とHシステムの製造協業契約を締結しており、GE社とともに、国内初のHシステムCCとなる東京電力(株)富津火力発電所の4号系列発電プラントの設計、製造、据付け、及び試運転調整に取り組んでいる。4号系列の初号機となる4-1軸は、2007年10月に真空上昇、総合試運転を開始し、同年11月のガスタービン初点火を経て、2008年2月に定格出力の507 MWに到達し、同年7月に営業運転を開始した。

The H System™ combined-cycle power plant utilizing a 1,500 °C-class gas turbine is expected to be the main environmentally conscious thermal power plant for the next generation, offering high efficiency and high power with low nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emissions.

Toshiba has concluded an H System™ manufacturing partnership agreement with General Electric Company (GE), and has been working with GE on design, manufacturing, installation, and commissioning for Futtsu Thermal Power Station Group 4 of The Tokyo Electric Power Company, Inc. (TEPCO), which is the first H System™ combined-cycle power station in Japan. The first vacuum up of the Unit 4-1 condenser was carried out in October 2007, and the first firing of the Unit 4-1 gas turbine was executed in November 2007. Unit 4-1 reached the rated output of 507 MW in February 2008, and started commercial operation in July 2008.

## 1 まえがき

東京電力(株)富津火力発電所の4号系列において、国内初となるHシステムCCが建設されている。4号系列は3軸で構成されており、東芝は主契約者のGE社のもとで、4-1～3軸の蒸気タービン(ST)及び発電機の設計・製造と、ガスタービン(GT)空気圧縮機の製造を、また、4-1、2軸の主要補機の設計・製造、据付け、及び試運転調整を担当している。

4号系列は、2004年12月に先行工事を開始して以来、発電プラントの据付け工事が行われ、初号機である4-1軸は2007年11月にGT初点火、同年12月の初並列を経て、2008年2月に定格出力の507 MWに到達し、同年7月に営業運転を開始した。

ここでは、HシステムCCの特長と、富津火力発電所4号系列のプラント概要、及び建設実績について述べる。

## 2 HシステムCCの特長

液化天然ガス(LNG)を燃料とする火力発電プラントは、エネルギーの有効活用や環境保全の観点から、GTを使用して

(注1) H Systemは、米国GE社の商標。

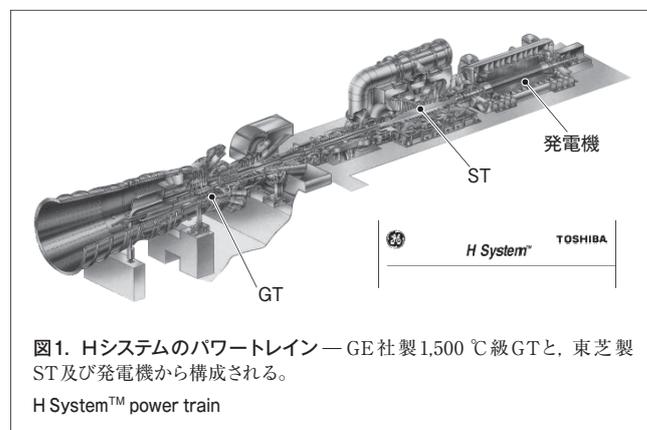


図1. Hシステムのパワートレイン—GE社製1,500℃級GTと、東芝製ST及び発電機から構成される。

H System™ power train

熱効率を高めたCCが主流となっている。当社のCC事業は、1980年代には1,100℃級GTによるCCを、1990年代には1,300℃級GTによるCCを国内外に数多く納入してきた。そして、1998年に次世代高効率CCとなるHシステムの製造協業契約をGE社と締結し、それ以降、実用化に向けてプラント計画を進めてきた。

HシステムのパワートレインはGE社製1,500℃級GTと、当社製のST及び発電機から構成される(図1)。HシステムCCと従来の一軸型CCの仕様比較を表1に示すが、HシステムCCは従来型CCを更に高効率・大容量化するとともに、高い

表1. 一軸型CCにおける仕様比較

Comparison of single-shaft combined-cycle power plant specifications

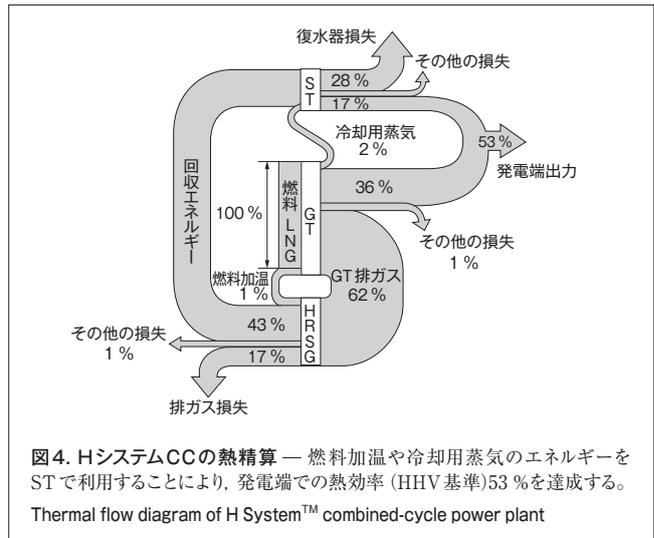
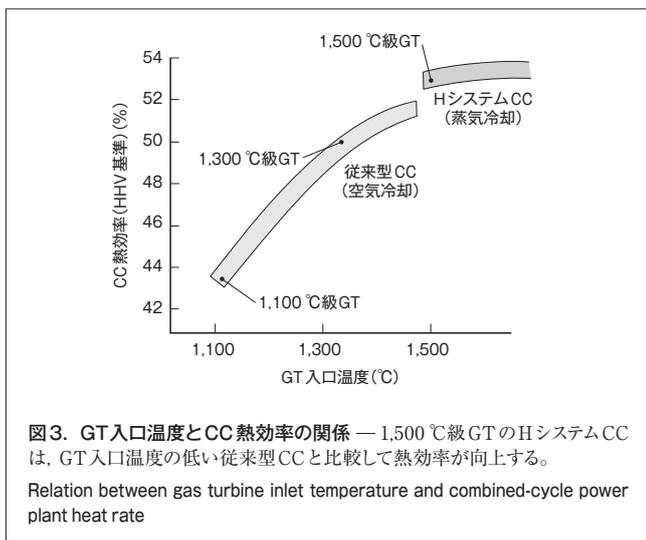
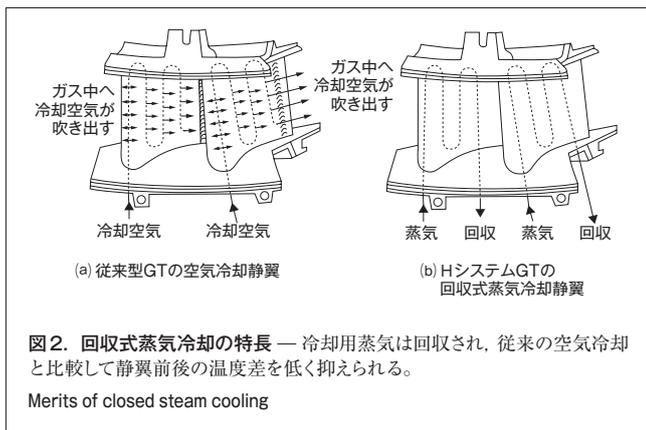
項目	HシステムCC	従来型CC (1,300℃級)	
ガスタービン型式	MS9001H	MS9001FA	
プラント発電端出力 (MW)	507	380	
プラント発電端熱効率 (HHV基準) (%)	53	50	
蒸気サイクル	3圧再熱サイクル	3圧再熱サイクル	
蒸気条件	主蒸気圧力・温度	12.63 MPa/558℃	10.53 MPa/532℃
	再熱蒸気圧力・温度	2.45 MPa/558℃	2.29 MPa/532℃
プラント出口NO <sub>x</sub> 濃度 (16% O <sub>2</sub> 濃度換算) (ppm)	5以下	5以下	

O<sub>2</sub>: 酸素

機動力も兼ね備えた環境調和型火力発電プラントを実現できるシステムである。

HシステムCCでは高効率化のため、GTは高温・大容量化が図られており、第1, 2段動静翼を蒸気で冷却し、冷却後の蒸気を回収する方式が新たに採用されている。

従来の第1, 2段動静翼の空気冷却方式では、図2(a)に示すように、通路部へ冷却空気が吹き出すために動翼入口温度が

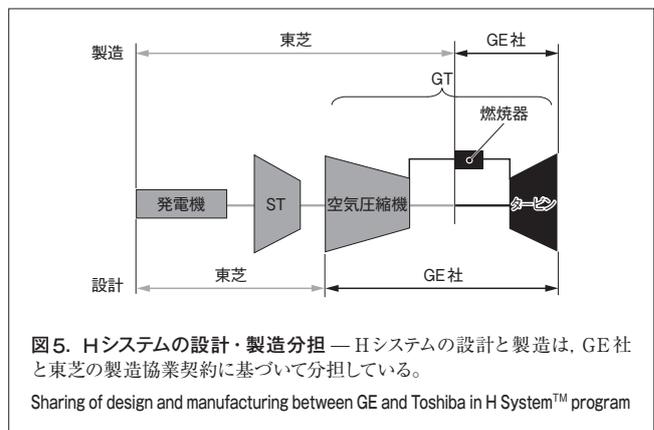


大幅に低下していたが、新たに図2(b)に示す回収式蒸気冷却構造の採用で、従来と燃焼温度を変えずに、高い動翼入口温度を実現することができた。これによりHシステムでは、53% (HHV (Higher Heating Value) 基準) の高い熱効率 (図3, 図4) と大容量化を達成するとともに、排出NO<sub>x</sub>濃度がプラント出口で従来の1,300℃級CCと同程度の5 ppm以下となる。

このようにHシステムCCは、熱効率向上によるエネルギー資源の有効活用と二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出の低減、更に、従来型CCと同程度の低NO<sub>x</sub>排出を実現した環境調和型CCと言える。

### 3 東京電力(株) 富津火力発電所4号系列のプラント構成

東京電力(株) 富津火力発電所は、1, 2号系列が1,100℃級CCを、3号系列が1,300℃級CCをそれぞれ導入しており、これらに引き続き、4号系列では国内初の1,500℃級GTを用いたHシステムCCの建設が行われている。



GE社は、主機契約者としてGT, ST, 及び発電機から成るパワートレインとその関連補機を担当し、当社は、GE社とのHシステム製造協業契約に基づき、空気圧縮機などGTの一部製造と、ST及び発電機的设计・製造を担当している(図5)。当社はそのほかに、排熱回収ボイラ(HRSG)、復水器、水ポンプ類、配管、弁などの供給と、GE社からの供給機器を含めた発電プラントの据付けと試運転調整を担当している。

### 3.1 主な仕様

4号系列のプラントの主な仕様を表2に示す。

**表2. プラントの主な仕様**  
Plant specifications of Futtsu Thermal Power Station Group 4

項目	仕様
軸数(一軸型)	3
軸出力 (MW)	507
系列出力 (MW)	1,520
熱効率(HHV基準) (%)	53

### 3.2 パワートレイン

GE社製1,500℃級GTと、当社製ST及び発電機で構成された一軸型CCである。各装置の概要を、以下に述べる。

**3.2.1 GT** HシステムCCの高効率・大容量化を実現する、GE社製の1,500℃級GT MS9001Hである(表3)。当社は、GT空気圧縮機の製造を担当しており、製造に先立ち基本設計段階からGE社のデザインレビューに参画し、GE社とともに製品品質の向上を図っている。

**表3. GTの主な仕様**  
Specifications of gas turbine for Futtsu Thermal Power Station Group 4

項目	仕様
種類	開放単純サイクル一軸形
出力 (kW)	336,000
入口圧力 (MPa)	2.19
出口圧力 (MPa)	0.0079
入口温度 (℃)	1,499
出口温度 (℃)	618

**3.2.2 ST** 再熱式混圧タービンで、CC用として高効率でコンパクトなタービンを採用している(表4)。低圧タービンは複流排気型で、最終段翼長は33.5インチを採用している。GTの蒸気冷却採用で、STとGTのサイクル性能最適化が図られ、軸系設計では振動や、スラスト、クリアランスなどについてGTと協調を図っている。

**3.2.3 発電機** 異断面固定子コイルを採用し、回転子コイル及び鉄心の冷却構造を最適化することで、効率99%以上を実現している(表5)。CC向け発電機の要求事項として、

**表4. STの主な仕様**

Specifications of steam turbine for Futtsu Thermal Power Station Group 4

項目	仕様	
種類	3圧再熱複流排気復水式	
出力 (kW)	171,000	
気筒数	2	
蒸気条件 (高圧/中圧/低圧)	圧力 (MPa)	12.63/2.45/0.71
	温度 (℃)	558/558/360

**表5. 発電機の主な仕様**

Specifications of generator for Futtsu Thermal Power Station Group 4

項目	仕様	
定格容量 (MVA)	566	
定格電圧 (kV)	19	
定格周波数 (Hz)	50	
定格力率 (pf)	0.9	
冷却方式	固定子コイル	水冷却
	回転子コイル	水素ガス間接冷却
水素ガス圧 (kPag)	410	
励磁方式	サイリスタ励磁方式	

GTを起動するために発電機を起動用電動機として使用する。その起動装置となるサイリスタ起動装置から発生する電流に含まれる高調波成分により回転子表面が加熱されてしまうため、その対策として、耐熱性の高い回転子構造を採用して信頼性を確保している。

### 3.3 HRSG

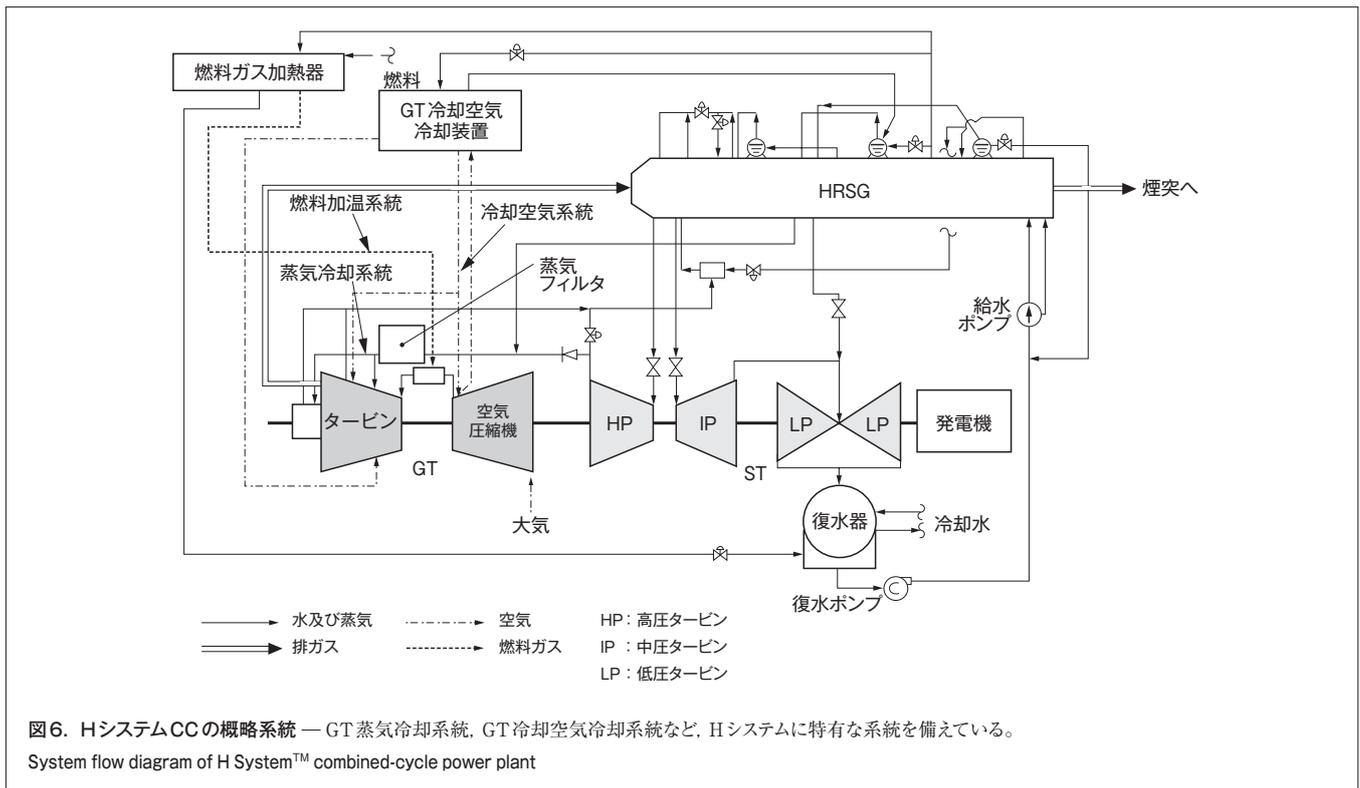
実績のある横型自然循環三圧再熱式を採用し、GT排気と水や蒸気の温度をベストマッチさせる伝熱パネルの配置により、熱エネルギーをむだなく回収している。プラント出力の増大に伴いHRSGも大容量化しているが、本体の長尺化などで設置面積は従来の1,300℃級並みに抑えている。また、工場で配管や電気計装品まで施工して、ほぼ完成状態で現地に納入するモジュール化工法を採用することで、現地での工期短縮及び高品質化を図っている。

### 3.4 Hシステム特有の系統及び機器

Hシステムにおける1,500℃級GTは、高温・高効率化を実現するため、Hシステムに特有な系統を備えている(図6)。

**3.4.1 GT蒸気冷却系統** ST高圧排気蒸気の一部とHRSG中圧主蒸気の全量を、GT第1, 2段動静翼の冷却用に供給している。冷却蒸気は、GTの熱を回収し、GTからHRSGの再熱器へと送られ中圧タービンへ供給されることで、STの出力増加に寄与している。

蒸気冷却系統の設計は、GE社における先行機(Hシステム初号機)の系統及び配管計画を基にして当社が詳細設計を進め、GE社とのデザインレビューを繰り返し実施し、決定している。特に、GTへ直接接続される蒸気冷却配管の設計では、ケーシング

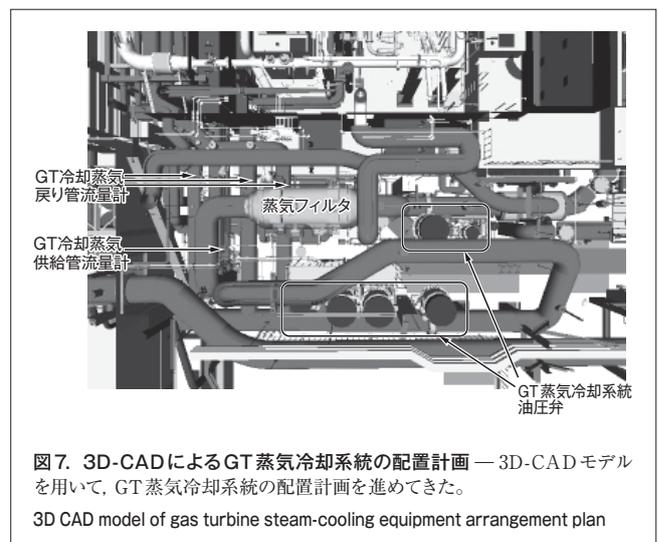


グに作用する力をGT側要求値以下にするために、様々な運転状態における熱応力解析を実施し、検証を行っている。また、耐腐食性が高く、熱応力を考慮した強度の高い配管材料を採用している。

GT冷却蒸気の温度・流量調節のために、Hシステム特有のGT冷却蒸気温度・流量調節弁が設置されている。また、圧力・温度条件が異なる蒸気を混合するため、熱応力を緩和する特殊な混合器を開発し、採用している。GT蒸気冷却系統には起動過程において、HRSGから冷却に使用できる蒸気が発生するまでの間は冷却空気が流れるため、ST及び復水器に冷却空気が流入しないよう設計している。

GT蒸気冷却系統の配置計画にあたっては、系統側からの要求を満足しつつ、4号系列の建屋内配置の最適化と保守性向上も同時に実現するため、図7に示すように3D (3次元)-CADを有効に活用して計画を進めている。

**3.4.2 GT冷却空気冷却系統** GT空気圧縮機からの吐出空気は、GT第2段静翼後縁、GT空気圧縮機の手軸、及びGT燃料ガスパージ空気の冷却に使用される。GT空気圧縮機からの吐出空気は、GT冷却空気冷却装置で冷却され、この冷却装置をバイパスした温度の高い吐出空気と混合することによって温度調節された後、各部へ供給される。GT冷却空気冷却装置の冷却水にはHRSGの中圧節炭器からの抽水が使用され、GT空気圧縮機からの吐出空気の熱を回収して蒸気となり、HRSGの中圧蒸気ドラムへ回収される。系外への熱排出を抑制し、効率向上に寄与している。



**3.4.3 GTクリアランスコントロール装置** 循環圧縮機、冷却器、及び加熱器から構成される。GT起動・停止時はケーシングを加温してGT空気圧縮機とGT動翼のクリアランスを確保、維持し、負荷運転時は逆にケーシングを冷却して最適クリアランスにまで狭めることで、GT性能を向上させる。ケーシングの加温と冷却には空気を使用する。

**3.4.4 燃料ガス加熱器** 燃料ガスは、HRSGの中圧節炭器からの抽水により200℃以上に加温されGTへ供給される。この熱回収により熱効率の向上を図っている。燃料ガス加熱器周りはGE社のレビューのもと、当社が装置設計と配管・系

統設計を進めた。

### 3.5 GT吸気加湿冷却システム

大気温度が高い気象条件でHシステムCCの特長である大容量・高効率を損なわないように、GT吸気加湿冷却システムを備えている。高圧水をGT吸気ダクト内に設置した噴射ノズルから噴霧して気化させ、GT吸気温度を下げることで出力の増加を実現する。

### 3.6 排煙脱硝設備

GT排ガス中のNO<sub>x</sub>を除去し環境負荷を低減するため、HRSG内部にアンモニア接触還元式の脱硝装置を備えている。脱硝装置は90%の除去効率を持ち、プラントから排出されるNO<sub>x</sub>を計画点で5ppm(16%O<sub>2</sub>(酸素)濃度換算)以下と極小化を実現している。

### 3.7 パワートレイン起動方式

パワートレインを起動するためにサイリスタ起動装置を備えている。起動時には発電機を起動用電動機としてパワートレインを自立速度まで加速する。

### 3.8 制御装置

発電プラントを中央操作室で監視し、操作するヒューマンマシンインタフェースをはじめ、制御用計算機や制御装置には、当社最新の発電プラント向け分散型監視制御システムであるTOSMAP-DS<sup>TM</sup>を採用している。発電プラントの起動・停止操作を全自動で行うなど高度な機能はそのままに、汎用化技術の採用で省スペース及び省電力を実現している。また、TOSMAP-DS<sup>TM</sup>を、パワートレインの制御を行うGE社製制御装置Mark<sup>TM</sup> VIと双方向ゲートウェイで接続し、高機能な監視制御を提供している。

### 3.9 機器配置

環境調和を考慮しながら経済性を向上させるため、発電プラントを収める建屋が大型化するのを抑制する機器配置を、東京電力(株)と協調して検討してきた。

発電プラントの大容量化に伴い機器も大型化し、また、Hシステム特有の系統が従来の発電プラントに追加されている。これらを、圧力損失、こう配、及び熱伸びなどの系統の要求を満足しつつ、限られたスペースに配置するために、3D-CADによる配置検証を重ねて最適となる機器配置を計画した。更に、施工性やメンテナンス性の検証、設計や製造への反映、配管熱応力解析、及び仮設物などの現地工事の事前検討も3D-CADを用いて実施した。

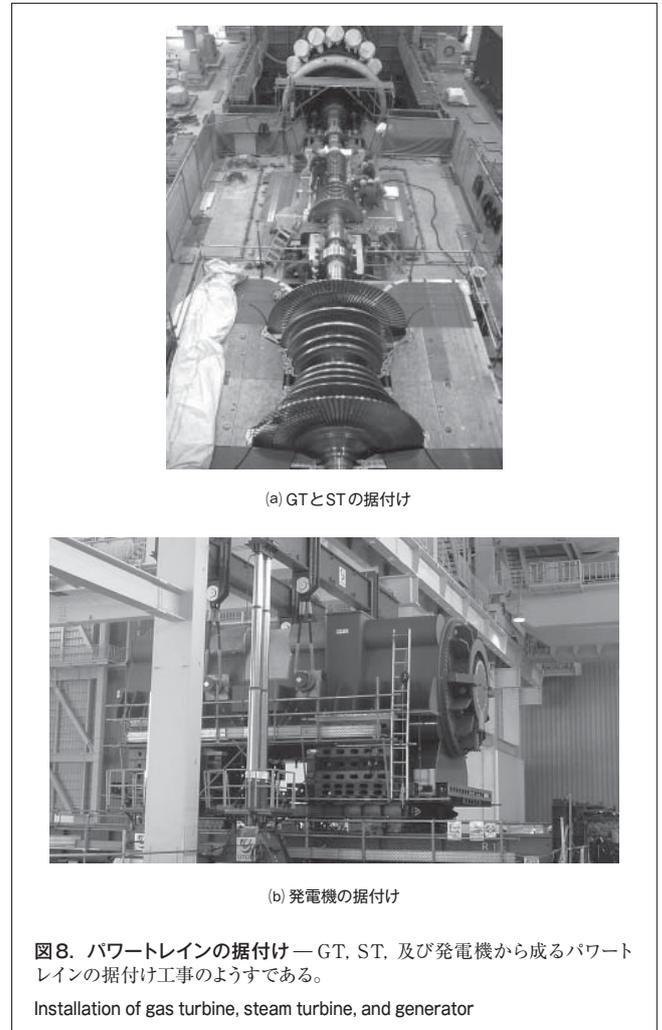
## 4 東京電力(株) 富津火力発電所4号系列の建設工事

4号系列の4-1軸建設工事は、2004年12月から先行工事を開始し、GTオンベース、HRSGオンベース、真空上昇、GT初点火、初並列を経て、2008年2月に定格出力の507MWに到達し、同年7月に営業運転を開始した。以下に、主な建設

工事の概要を述べる。

### 4.1 主機の据付け

STで長年培った当社の据付け技術を生かし、GE社先行機で経験を積んだ当社の据付け指導員がGE社と協調を図り、国内初のHシステムGTの据付けと調整を行い、Hシステムのパワートレイン据付け技術を確立した(図8)。



### 4.2 配管工事

HシステムCCは、従来と比較してGT蒸気冷却配管などGT周りの配管が多く、据付け工事の中では工程的にもっともクリティカルな工事となった。

GT蒸気冷却配管は、限られた施工スペースの中での設置作業のため、配管施工順序に合わせた工場での製作工程の計画や、管割りの最適化検証が重要になった。また、分解できるようにフランジを持つ弁などの取合いを考慮するとともに、ドレイン排出が適切になるようにこう配を考慮した配管を設計したため、現地では溶接時の配管合わせが施工の要となった。

このように、Hシステム特有の配管施工には高い施工技術が必要である。

### 4.3 蒸気配管フラッシング

GT蒸気冷却配管は、GT動静翼の冷却孔に接続されるため異物流入を完全に防止する必要があり、水フラッシングを実施した。高圧水ポンプと高性能フィルタを組み合わせたフラッシングスキッドを持ち込み、GTに要求される配管内清浄度を満足することができた。清浄度判定にはNAS (National Aerospace Standard: 米国航空宇宙局規格) 等級を適用した。

GT蒸気冷却配管以外の蒸気配管には、従来のCCでも実績のある建設期間中のエアブローイングアウトを実施した。Hシステムの主蒸気系統は系統構成が複雑であり、ブロー実施系統も従来より複雑となったが、GE社先行機で採用された当社独自のブロー計画の経験を生かした効果的なブローを実施し、高い清浄度を実現した。

### 4.4 試運転

HシステムCCの総合試運転のなかで従来型CCと異なるのは、Hシステム特有のGT蒸気冷却系統、GTクリアランスコントロール、及びGT冷却空気冷却系統の調整の3点である。

GT蒸気冷却系統については、起動時の空気冷却運転、空気冷却から起動用蒸気冷却への切替え、及び起動用蒸気冷却から通常蒸気冷却への切替えが計画どおり行われることを確認した。



(a) タービン建屋内



(b) 屋外設備 (HRSG, 煙道)

図9. 東京電力(株)富津火力発電所4号系列4-1軸 — 完成した4-1軸発電プラントのようすである。

Futtsu Thermal Power Station Group 4 Unit 4-1

GTクリアランスコントロールについては、起動前及び負荷運転時にクリアランスの状態値を確認し、調整を行った。

GT冷却空気冷却系統については、GT冷却空気冷却装置の冷却性能に問題がなく、また、冷却器バイパス系統による温度調節が計画どおり行われ、GT各部への冷却空気供給機能にも問題がないことを確認した。

4-1軸(図9)は、2007年10月の真空中昇後、総合試運転を実施し、同年11月にGT初点火、2008年2月には定格出力の507 MWに到達し、同年7月に営業運転を開始した。

## 5 あとがき

富津火力発電所4号系列4-1軸におけるHシステムCCの完成は、東京電力(株)の高い発電プラント建設技術、GE社及び当社の高い製品技術、及び当社の高い発電プラント据付け・調整技術により実現できた。

大容量の火力発電プラントにとって、燃料消費の低減やCO<sub>2</sub>排出量の削減など環境負荷低減がもっとも大きな課題である。HシステムCCは高効率・大容量化を実現し、エネルギー資源の有効活用とCO<sub>2</sub>排出の低減を実現するとともに、低NO<sub>x</sub>濃度を実現する発電プラントである。4号系列4-1軸の完成により、HシステムCCが大容量火力発電プラントにおける環境負荷低減という課題のソリューションになると考えられる。

HシステムCCが今後の火力発電プラントの主力となるよう、今回の実績を活用して当社のCC事業を推進していく。



松下 文彦 MATSUSHITA Takehiko

電力システム社 火力プラント統括部 国内火力プロジェクト部参事。火力発電所機械システムのエンジニアリング業務に従事。

Thermal Power Plant Engineering Div.



江上 法秀 EGAMI Norihide

電力システム社 火力プラント統括部 国内火力プロジェクト部主務。火力発電所機械システムのエンジニアリング業務に従事。

Thermal Power Plant Engineering Div.



高嶋 路晴 TAKASHIMA Michiharu

電力システム社 火力プラント統括部 国内火力プロジェクト部主務。火力発電所情報制御システムのエンジニアリング業務に従事。

Thermal Power Plant Engineering Div.