

# 高効率コンバインド発電プラント

— 熱効率50%を目指して —

High-Efficiency Combined Power Plants

— Challenge to the Thermal Efficiency of 50% —

武田泰司\* *Yasushi Takeda*

保泉真一\* *Shin'ichi Hoizumi*

橋本継男\* *Tsuguo Hashimoto*

杉田成久\*\* *Shigehisa Sugita*



中国電力株式会社納め柳井発電所1号系列700 MWの全容



九州電力株式会社納め新大分発電所1号系列690 MWの全容

電力需要の伸びと世界規模での環境問題、およびエネルギー資源の節約の観点から高効率発電プラントのニーズが高まる中で、高効率・大容量ガスタービンを用いたコンバインド発電プラントである中国電力株式会社柳井発電所1-1号系列(350 MW)が平成2年11月に、九州電力株式会社新大分発電所1号系列(690 MW)が平成3年6月に完成した。両プラントとも営業運転開始以来DSS(毎日起動・停止)運用を中心として順調な運転を続けており、特に発電端熱効率の実績は約44%と従来形火力発電プラントに比べて約10%(相対値)以上の高い熱効率を記録し

ており、世界的な環境課題であるCO<sub>2</sub>低減にも大きく貢献している。

日立製作所は、これらのプラントを含めた数多くのコンバインド発電プラントを設計・製作・納入してきた実績をもとに、現在すでに実用化を開始している燃焼温度1,300℃級の高温ガスタービンによるアドバンスドコンバインド発電プラントの建設計画を顧客とともに鋭意進めている。これは近い将来の熱効率が50%を超える発電プラントの実現につながる技術と位置づけられるものである。

\* 日立製作所 日立工場 \*\* 日立製作所 機械研究所

## 1 はじめに

近年、世界規模での環境問題およびエネルギー資源の節約の観点から、特に火力発電プラントの高効率化に対するニーズが高まっている。日立製作所は、わが国初の排熱回収形コンバインド発電プラントである東日本旅客鉄道株式会社川崎火力発電所1号機(141 MW)を昭和56年に完成させた実績をもとに、その後東京電力株式会社富津火力2号系列の建設に参画した。また、基本計画から設計・製作・据付け・試運転までを一貫して担当した中国電力株式会社柳井発電所1-1号系列(350 MW)[以下、柳井1-1号系列と言う。]を平成2年に、九州電力株式会社新大分発電所1号系列(690 MW)[以下、新大分1号系列と言う。]を平成3年にそれぞれ無事完成させている。

現在では、平成年代に入って実用化された1,300℃級の高温ガスタービンを採用するアドバンスドコンバインド発電プラントの計画が本格的に開始されている。日立製作所はこれまでの豊富な経験を生かして、高効率でかつ高い信頼性のあるプラントの実現を目指し、鋭意技術開発を進めている。ここでは、コンバインド発電プラントの運転実績を紹介するとともに、現在計画中的の新発電プラントの特徴について述べる。

## 2 コンバインド発電プラントの運転実績<sup>1)~4)</sup>

コンバインド発電プラントは、その高い熱効率、中間負荷運用特性、環境対応といった点で、従来の火力発電プラントに比した優位性を社会的に評価され、近年、プラントの建設や新規計画が促進されている。

この章では日立製作所が計画から建設、試運転まで携

表1 コンバインド発電プラントの主要設備 柳井1-1号系列および新大分火力1号系列の主要設備を示す。

電力会社	中国電力株式会社	九州電力株式会社
プラント名	柳井1-1号系列	新大分1号系列
運開年	平成2年11月	平成3年6月
プラント出力	350 MW (125 MW×3)	690 MW (115 MW×6)
ガスタービン形式 (ガスタービン動翼入口温度)	F7EA (1,104℃)	F7E (1,085℃)
排熱回収ボイラ形式	自然循環形 非再熱複圧	自然循環形 非再熱複圧
蒸気タービン形式	SF-26 非再熱混圧形	SF-26 非再熱混圧形
備考	乾式低NOx燃焼器	乾式低NOx燃焼器

わり、平成2,3年に営業運転を開始した柳井1-1号系列および新大分1号系列の運転実績について述べる。両プラントとも、1,100℃級大容量ガスタービンをを用いたコンバインド発電プラントである。このプラント主要設備を表1に示す。主機構成は、ガスタービン、発電機および蒸気タービンを同一軸に連結した一軸形が採用された。一軸形によるプラント構成では、部分負荷で台数の切り替えを行うことにより、プラントの定格負荷と同等の高い熱効率が維持できること、起動・停止特性や負荷変動の追従性がよくDSS(毎日起動・停止)運用に適していること、さらに点検軸が他軸の運転に影響しないなどの保守性に優れていることなどの特徴があげられる。

### (1) 熱効率の実績

1,100℃級ガスタービンをを用いた一軸形のコンバインド発電プラントは、プラントの定格負荷で約43%の計画熱効率を持っており、最新の超臨界圧火力発電プラントに比べて、約8%(相対値)の熱効率向上が図れる。計画熱効率に対する新大分1号系列の熱効率試験結果を図1に示す。試験結果は、定格負荷で計画熱効率に対して約2%(相対値)以上高い熱効率が得られ、部分負荷も含めて良好な結果となっている。同様の結果は柳井1-1号系列でも得られている。

### (2) 起動時間特性

起動時間の短縮は、DSS運用を主体とするコンバインド発電プラントにとって重要な課題である。柳井1-1号系列の8時間停止後の起動時間特性(ホットスタート)を図2に示す。ガスタービン起動から起動完了までの計画所要時間50分に対し、48分で達成することができた。新大分1号系列の起動時間実績も同様の結果となり、計画値を満足するものである。

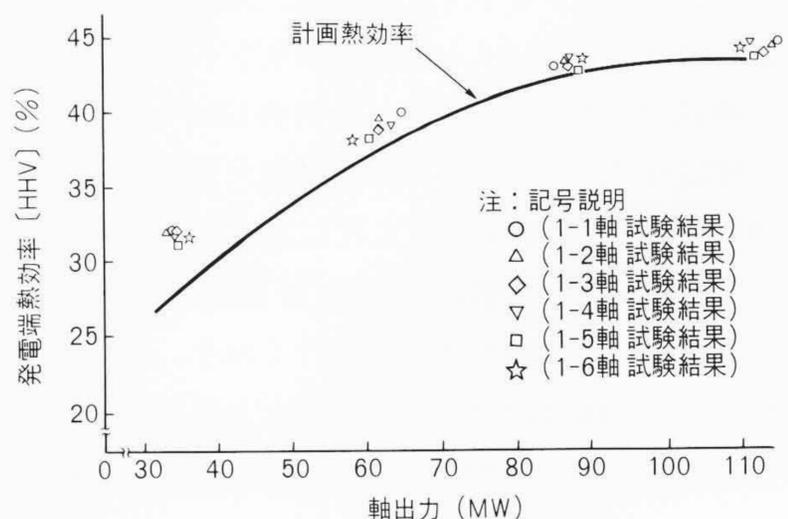


図1 新大分発電所1号系列の熱効率実績 熱効率は、計画値を上回る良好な結果を得ている。

(3) NO<sub>x</sub>特性

ガスタービンの燃料に使用するLNG(液化天然ガス)は、メタンやエタンを主成分とするクリーン燃料で、硫化物やばいじんなどをほとんど含まないが、ガスタービン燃焼器での高温燃焼時にNO<sub>x</sub>(窒素酸化物)が発生する。燃焼器の低NO<sub>x</sub>化は、従来、湿式法による手段を用

いてきたが、多量の水または蒸気を消費し、またプラントの熱効率の低下を招くことから、日立製作所は乾式法での低NO<sub>x</sub>燃焼器を開発し、ユーティリティ消費の節約およびプラントの高効率化を図っている。さらに排煙脱硝装置は、触媒還元反応温度が最適となるように排熱回収ボイラの高圧蒸発器を2分割し、その間に組み込んでいる。NO<sub>x</sub>値は、以上の環境対策技術によってガスタービン出口で62.5 ppm、煙突出口で12.5 ppm(どちらも16% O<sub>2</sub>換算値)以下を実現した。

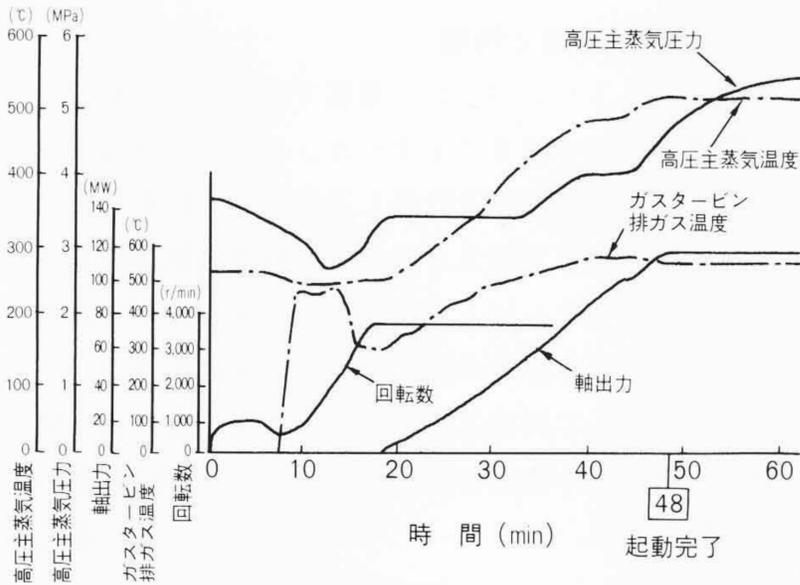


図2 柳井発電所1-1号系列の起動時間特性 ホットスタートの起動特性を示す。ガスタービン起動から起動完了まで48分の短時間起動を達成した。

3 コンバインド発電プラントの発展

3.1 高効率ガスタービンの実用化

現在運転中のコンバインド発電プラントに採用しているガスタービンは、タービン入口温度が1,100℃級のものである。ガスタービン入口温度の高温化によってコンバインド発電プラントの大幅な熱効率向上と単機容量の増加が可能となるため、近年、国内外でガスタービンの開発が積極的に進められている。

日立-GE形ガスタービンは、1,100℃級の多数の実績をもとに、1,300℃級のF7F形を開発し、昭和63年にGE社での工場試験を終え、平成2年6月に米国バージニア

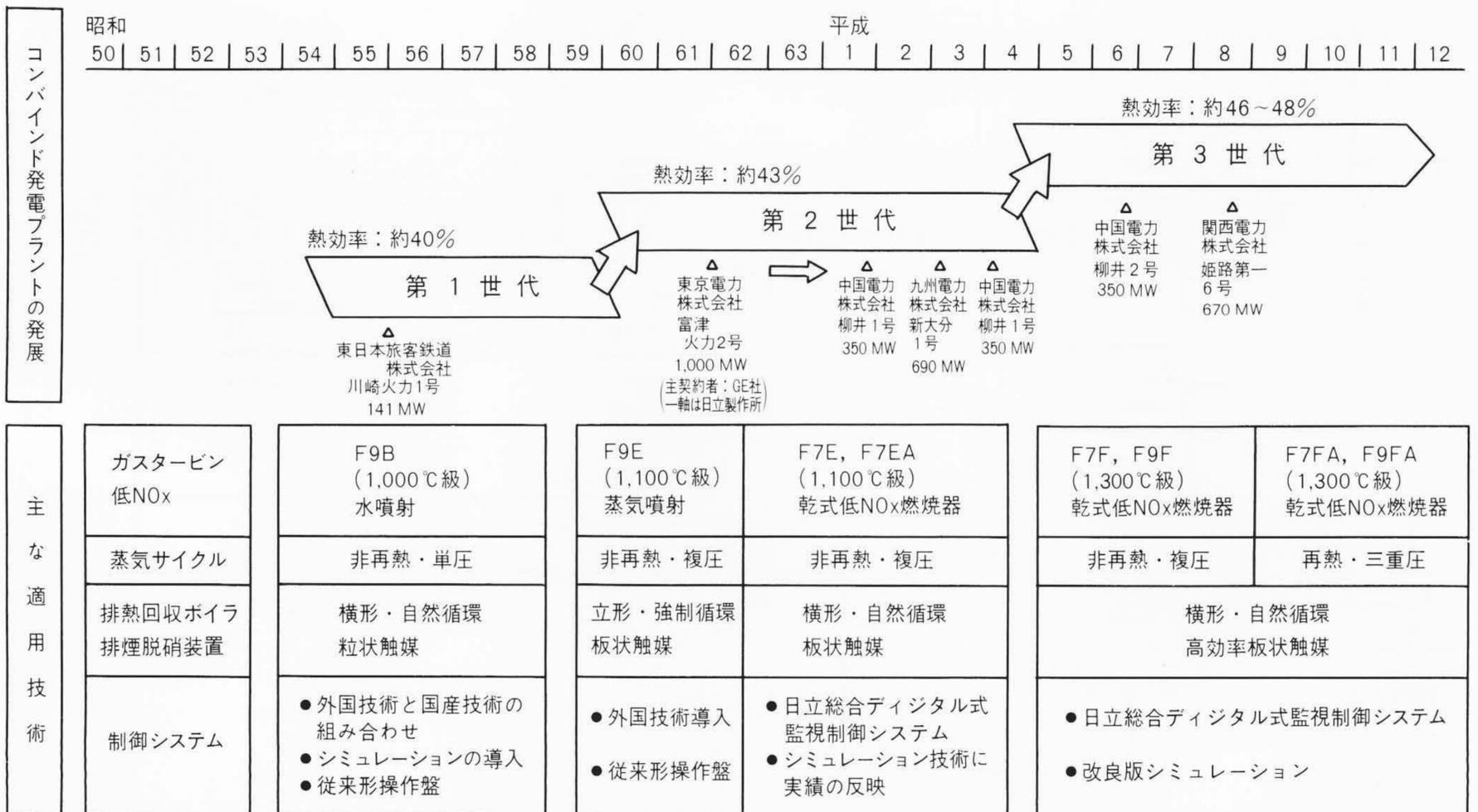


図3 コンバインド発電プラントの発展 日立製作所のコンバインド発電プラントは、豊富な実績と多くの技術開発とともに発展を続けている。

電力で営業運転を開始している。

1,300℃級の高効率ガスタービンは、実績のある1,100℃級ガスタービンのスケールアップで設計されている。特にタービン動・静翼への適用材料、および冷却方式の改良により、ガスタービン入口温度の高温化を実現するとともに、1,100℃級の約2倍の出力を可能にしている。

### 3.2 蒸気サイクル技術の推移

ガスタービン入口温度の高温化に伴い、ガスタービン単体の高効率・大容量化が図れる一方で、ガスタービンの排ガス温度も上昇傾向となり、1,300℃級ガスタービンの排ガス温度は、約600℃に達する。1,300℃級ガスタービンを採用したコンバインド発電プラント(以下、アドバンストコンバインド発電プラントと言う。)の計画では、ガスタービン排ガス温度の上昇に伴って、蒸気サイクルでの熱回収量の増大が可能となり、蒸気サイクルの高効率化を図ることができる。

日立製作所のコンバインド発電プラントは、豊富な実

績と多くの技術開発とともに図3に示すような発展を続けている。特に、アドバンストコンバインド発電プラントの蒸気サイクルでは、1,300℃級ガスタービンからの排ガス温度の上昇に伴う排熱回収量の増大により、再熱三重圧システムを選定することができる。

## 4 アドバンストコンバインド発電プラントの構成と特徴

### 4.1 システム構成と特徴

アドバンストコンバインド発電プラントの一軸形システム構成の一例を図4に示す。コンバインド発電プラントとして最適な機器配置計画と省スペース化を考慮し、ガスタービンは下方吸気方式および軸流排気方式を採用している。ガスタービンから排出される600℃の排ガス熱量を約100℃まで熱回収する排熱回収ボイラは、高効率化を目的として再熱三重圧システムが選定され、排熱回収ボイラからの蒸気で再熱式蒸気タービンを駆動する。

日立製作所は、ガスタービンと蒸気タービンを一軸に直

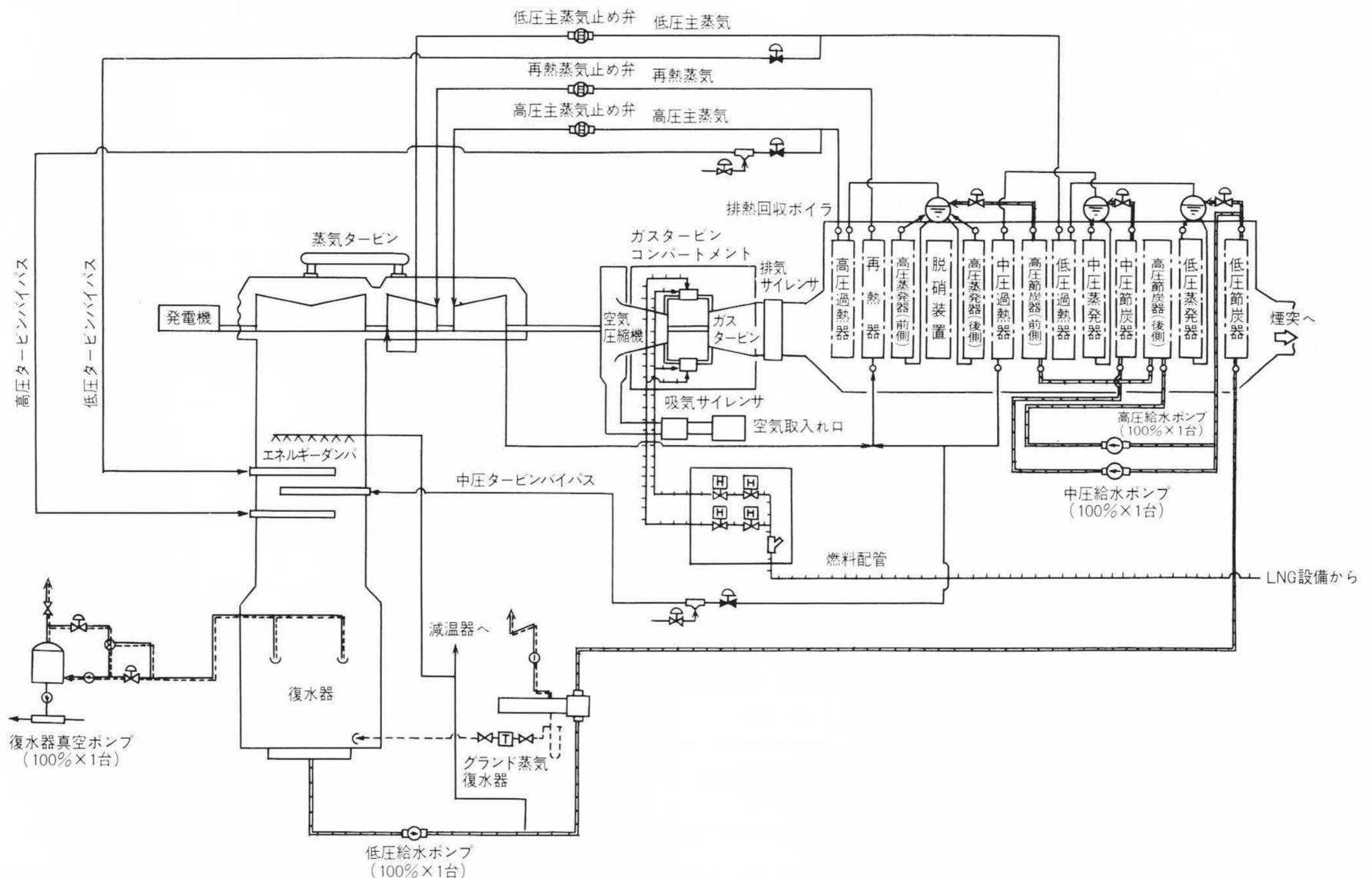


図4 アドバンストコンバインド発電プラントの一軸形システム構成 最適な機器配置計画と省スペース化を考慮して、ガスタービンは下方吸気と軸流排気方式を採用している。

結した一軸形のほかに、複数台のガスタービンで1台の蒸気タービンを駆動し、ガスタービンと蒸気タービンを個別に発電させる多軸形のアドバンスドコンバインド発電プラントの実現に向けても現在詳細設計を進めている。

4.2 構成機器の特徴

図4のシステム構成でのプラントの主要設備仕様の一例を表2に示す。一軸当たりの出力は60 Hz機では235 MW、50 Hz機では337 MWとなるが、これらを複数軸設置することによってプラントの大容量化に対応することになる。

(1) ガスタービン

開放サイクル一軸形で、ガスタービン入口温度1,288℃の高効率ガスタービンである。1,100℃級ガスタービンに比べて、タービン翼への高温材料と高性能冷却方式の採用で高温化を図っている。また圧縮機は、遷音速初段翼を追加して段数を17段から18段に増加し、圧縮比を11.5から15に高めて大容量化を図っている。燃焼

器は空気量の増大に対応して個数を増加させる一方、NOx値を従来レベル以下に維持するための低NOx化技術の研究開発を続けている。

(2) 排熱回収ボイラ

増大するガスタービンの排ガス熱量の有効利用のため、排熱回収ボイラには再熱式三重圧システムを採用している。低温域までの熱回収を効率よく行うために、伝熱管にはフィンチューブを採用するが、日立製作所ではさらに熱伝達を向上させる技術として、セレイテッド(のこぎり歯状)フィンチューブを開発済みであり、今後のプラントへも採用を計画中である。

(3) 蒸気タービン

再熱式混圧タービンであり、排熱回収ボイラからの蒸発量の増加に伴い、低圧タービンは複流形を選定している。蒸気タービンの定格入口温度は、ガスタービンの排ガス温度の上昇に伴い、従来の火力発電プラントで実績の多い538℃を採用して高効率化を図っている。

表2 アドバンスドコンバインド発電プラントの主要設備仕様 1,300℃級ガスタービンを用いたコンバインド発電プラントの主要設備仕様を示す。

項目	60 Hz	50 Hz
コンバインド発電プラント ● プラント形式 ● 出力 ● 熱効率(HHV) ● 使用燃料	一軸形排熱回収方式 235 MW(気温15℃) 48%以上 LNG	一軸形排熱回収方式 337 MW(気温15℃) 48%以上 LNG
ガスタービン ● 形式 ● 出力 ● タービン入口温度 ● 圧縮比 ● 段数 ● 強制冷却翼 ● 燃焼器	開放サイクル一軸形 151 MW(気温15℃) 1,288℃ 15 圧縮機18段, タービン3段 第1, 2段動静翼, 第3段静翼 スロット冷却 マルチノズル形	開放サイクル一軸形 215 MW(気温15℃) 1,288℃ 15 圧縮機18段, タービン3段 第1, 2段動静翼, 第3段静翼 スロット冷却 マルチノズル形
排熱回収ボイラ ● 形式 ● 蒸発量	再熱式三重圧自然循環形 (脱硝装置内蔵) 高圧 180 t/h 再熱 200 t/h 低圧 27 t/h	再熱式三重圧自然循環形 (脱硝装置内蔵) 高圧 257 t/h 再熱 290 t/h 低圧 36 t/h
蒸気タービン ● 形式 ● 出力 ● 入口圧力・入口温度	再熱式混圧複流排気形 84 MW(気温15℃) 高圧 10 MPa/538℃ 再熱 2.2 MPa/538℃ 低圧 0.3 MPa/250℃	再熱式混圧複流排気形 122 MW(気温15℃) 高圧 10 MPa/538℃ 再熱 2.2 MPa/538℃ 低圧 0.4 MPa/250℃
発電機 ● 形式 ● 容量	横置円筒回転界磁形 270 MVA(力率0.9)	横置円筒回転界磁形 390 MVA(力率0.9)

注：略語説明 LNG(液化天然ガス)

4.3 制御システム

多様なシステム構成が可能なコンバインド発電プラントに、柔軟に対応できる制御システムの構成と機能について述べる。

4.3.1 制御システム構成

制御システムはコンバインド発電プラントの高効率、高負荷変化率などのプラント運用が十分に発揮でき、かつ主機構成に対応した機能分散階層構成としている(図5参照)。また、デジタル制御装置の採用により、信頼性、制御性、経済性および保守性の優れたものとし、CRTオペレーションなどの最新のヒューマンインタフェースを用いて最適化とコンパクト化を図っている。

4.3.2 制御システムの機能

プラントの高効率・高負荷変化率運用、および複数軸の起動・停止運用の全自動化ならびに集中監視制御方式を採用することにより、少人数運転が可能となる制御システム機能が不可欠と言える。

(1) 自動化機能

プラント起動から停止までの全自動化および最適負荷制御(運転台数切り替えを含む。)

(2) 監視制御機能

CRTオペレーションと大形スクリーン採用による一括集中監視制御

(3) 保護機能

プラント保護トリップ、負荷ランバックおよび所内単独運転ほかインタロック

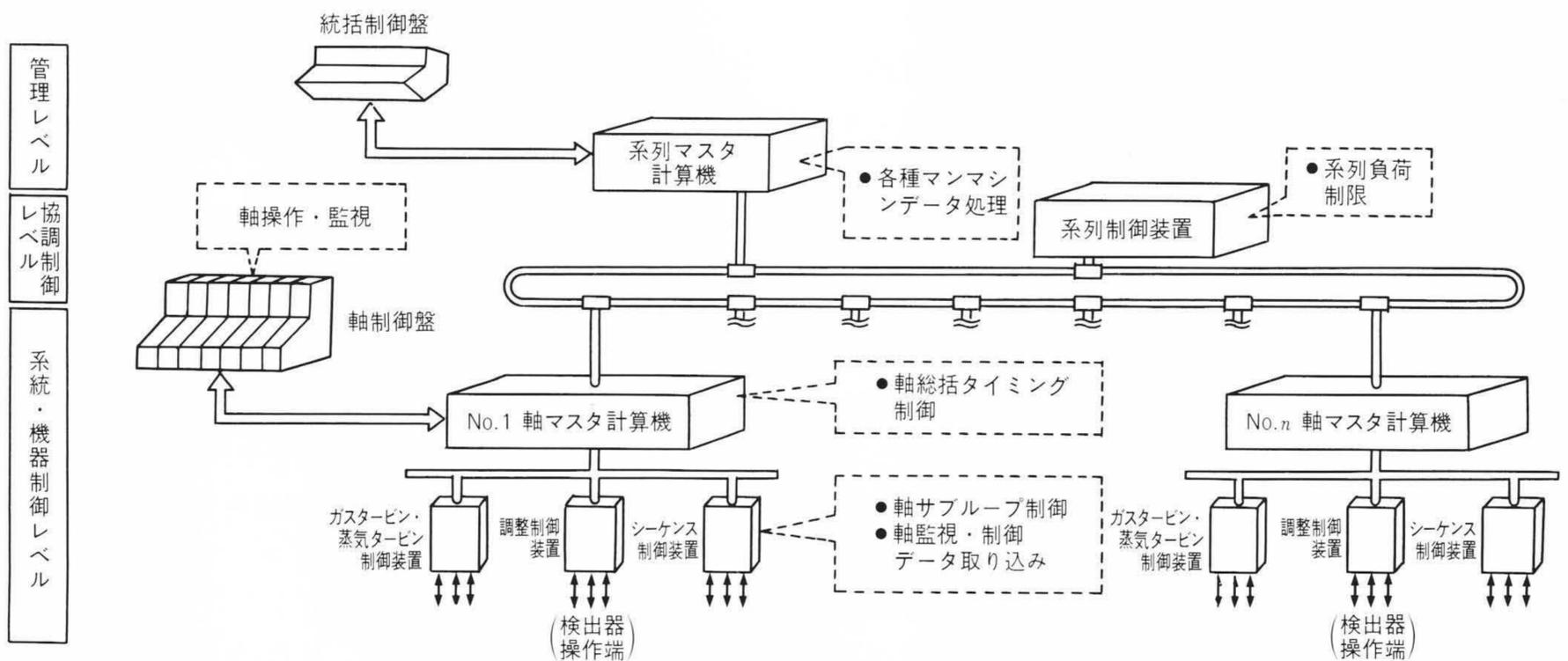


図5 コンバインド発電プラントの制御システム構成 プラント運用が十分に発揮でき、かつ主機構成に対応した機能分散階層構成としている。

## 5 将来の展望

コンバインド発電プラントは、構成機器の中心であるガスタービンの技術進歩とともに大きな発展を続けている。特に、従来の火力発電プラントに比べて飛躍的に高い熱効率は、ガスタービンの高温化技術の開発によって実現されるといっても過言ではない。現在は1,100℃級ガスタービンの多くの運転実績をもとに1,300℃級ガスタービンがすでに実用化段階に入り、これを用いたアドバンストコンバインド発電プラントにより、48%を超える熱効率が計画されている。

さらに内外各社では、21世紀の主要発電方式の一つとして期待されているコンバインド発電プラントのいっそうの高効率化を図るための技術開発を鋭意進めている。特に、高効率化の主役となるガスタービンについては1,500℃級の燃焼温度を実現するため、単結晶材を含めた新形材料による動翼の開発や高効率冷却技術の適用研究などを行っている。このようなガスタービンの技術開

発に加えて排熱回収ボイラ、蒸気タービンなどのボトムリングサイクルのシステム最適化により、近い将来には熱効率が50%を超えるコンバインド発電プラントの実現が期待されている。さらに、燃料多様化への対応としての石炭ガス化コンバインド発電プラントへの発展技術としても注目を集めている。

## 6 おわりに

コンバインド発電プラントは、クリーンな燃料であるLNGを主燃料とすること、またその高い熱効率や優れた運用性能などが社会的に評価され、現在すでに7プラントが営業運転に入っている。日立製作所は、このうち4プラントの計画から設計・建設・試運転に携わってきた。今後はさらに多くのコンバインド発電プラントの建設が予想されており、これまでに蓄積した実プラントでの豊富な経験をもとに、社会のニーズに合った新発電プラントの実現に向けて積極的に取り組んでいきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 白倉, 外: 柳井発電所1号系列の建設・試運転, 火力原子力発電, 42-4, 48~63(1991-4)
- 2) 石井, 外: 新大分発電所1号系列の特徴と運転状況, 火力原子力発電, 43-4, 32~42(1992-4)
- 3) S. Shirakura, et al.: Design and Trial Operations of 700 MW Combined Cycle Power Generation Plant, 91-YOKOHAMA-IGTC-69
- 4) S. Nogami, et al.: Trial Operations of Unit No.1 Group 690 MW Combined Cycle Power Plant of Shin-Oita Power Station, ASME Paper No.92-GT-354