

# 火力・地熱発電所のプラント技術

Power Plant Technologies for Thermal and Geothermal Power Plants

尾上 健志 ONOE Kenji

山形 通史 YAMAGATA Naofumi

上野 康夫 UENO Yasuo

火力・地熱発電所の建設では、多くの要素技術が関わりを持っている。近年、建設を終えたプラントで、その主要な技術を説明する。吉の浦火力発電所は、沖縄電力株式会社が燃料に初めてLNGを採用した一軸式コンバインドサイクル火力発電所で、沖縄本島の最大容量機を持つ。ガスタービンと蒸気タービンにガバナフリー制御を導入して、応答性能を向上させた。ウルブル地熱発電所は、インドネシア政府の第二次電源開発計画の下に開発された最初の地熱発電所であり、モデルプラントとして注目された。ガス抽出設備のハイブリッド化や主要機器の配置の全体最適化などを行った。

In construction of thermal and geothermal power plants, many kinds of elemental technologies are concerned. This paper describes about main technologies in plants completed in recent years. Yoshinoura thermal power plant is Okinawa Electric Power Company's (OEP) first LNG-fueled single-shaft combined-cycle thermal power plant, and has the largest capacity generator in Okinawa Island. Governor-free control system is adopted both for gas turbine and steam turbine to enhance response to variation of frequency. The Ulubelu geothermal power plant is the first geothermal power plant developed under the Second phase of Indonesian government's electricity crash program, and has received attention as a model case. Hybrid gas-extractor facilities and overall optimization in arrangement of major equipment have been achieved.

## 1 まえがき

沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所（1号機）とウルブル地熱発電所が、2012年度に運転を開始した。いずれも富士電機の納入する発電設備がその地域の電力系統における主力設備となるため、顧客をはじめとするステークホルダーから着目される中で遂行されたプロジェクトである。

吉の浦火力発電所の1号機は、富士電機にとって一括請負工事（EPC）としてまとめたガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）の最大容量機であるとともに、沖縄本島における最大容量機でもある。ウルブル地熱発電所は、電力系統の脆弱（ぜいじゃく）なインドネシア・スマトラ島の、しかも高地に建設された地熱発電所であり、同島の中でも大規模容量の発電所である。

これらの発電所を例にして、火力・地熱大型プロジェクトにおけるプラント技術について述べる。

## 2 沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所

### 2.1 プラント概要

富士電機とシーメンス社は、沖縄電力株式会社 吉の浦火力発電所に一軸式コンバインドサイクル発電設備を納入した。図1に吉の浦火力発電所の全景を示す。本発電所は、地球温暖化対策として石炭火力に比べて高効率で、CO<sub>2</sub>排出量が約半分となる液化天然ガス（LNG）コンバインドサイクル火力発電所である。1号機、2号機の発電出力はともに251 MWで、沖縄本島の最大容量機となり県内の約20%を賄う設備となる。

ガスタービンはシーメンス社製の1,400℃級のSGT6-4000F形（Fクラス）を使用し、ガスタービン-発電機-クラッチ-蒸気タービンで構成した一軸式コンバインドサ



図1 吉の浦火力発電所の全景

イクル発電方式を採用した。発電機には起動用電動機に静止型周波数変換装置を採用し、起動時はクラッチで蒸気タービンを切り離して起動損失の低減を図っている。1号機は2012年11月に営業運転を開始し、2号機は2013年5月に営業運転を開始する予定である。

### 2.2 配置設計および建設に関わるプラント技術

発電設備は、2011年3月から1号機排熱回収ボイラの据付けを、5月から1号機ガスタービン・発電機・蒸気タービンの据付けを開始した。これらの大型機器は、発電所内に新設された物揚げ栈橋から荷揚げし、低床トレーラーで構内に搬入し、パワージャッキ方式でタービン建屋内の基礎の上に据付けを行った。

従来、1号機ガスタービン・発電機・蒸気タービンからなる主機はタービン建屋の3階に配置されるため建屋の高さは25m以上が必要であったが、本発電所では主機の軸芯をFL（1階床高さ）+5.5mにすることでタービン建屋の高さを約20mと従来よりも低くすることができ、経済性を考慮した建屋計画としている。建屋内は、機器・配

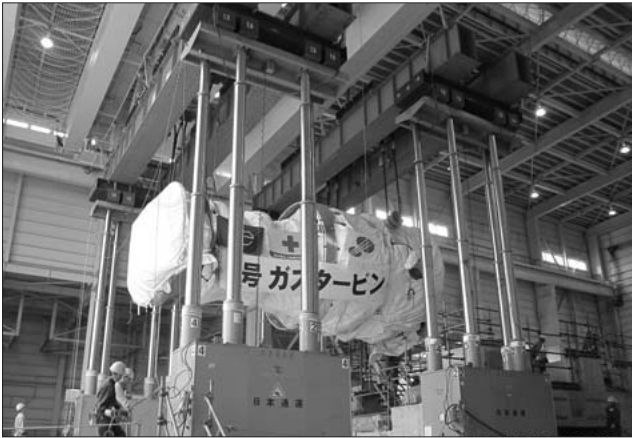


図2 ガスタービンの基礎上への据付け

管・電気設備が上下左右にコンパクトに配置されているため、各種の据付け作業が混み合うことが予想されたが、工程・作業調整を行い、無事故無災害で1号機の据付け工事を完了した。図2に、ガスタービンの基礎上への据付けを示す。

機器の搬送においては、沖縄地域特有の気象条件である台風の度重なる襲来を想定した。船舶の欠航を考慮し、強風による屋外作業の中止や被害の復旧などによる工程の遅れが生じないように、日々台風の発生状況や予想進路を見据え、作業工程の入替えや負荷残処理などを実施した。これにより、据付け工程への影響を最小限に抑え、2012年5月の試験開始につなげることができた。

### 2.3 制御技術およびプラント技術

2012年5月に、1号機の試運転における最初のイベントとして、ガスタービンの初点火を実施した。これに続き、ガスタービン無負荷運転・燃焼調整を行うとともに、排熱回収ボイラの温水洗浄ならびに蒸気配管のブローイングアウト運転を行った。2012年6月には6MWで系統への初併入<sup>(注1)</sup>を行い、プラントの総合試運転を開始した。6か月間にわたる総合負荷運転では、負荷遮断試験までは各機器の静特性確認を、負荷遮断試験以降は各機器の動特性確認を沖縄電力株式会社の協力の下、着実に進めた。

沖縄本島の電力系統は、他の電力会社の電力系統から独立している。発電容量が電力系統の20%に相当する本発電設備を系統につないだ状態で、試験中に不具合が生じると、沖縄本島の電力に大きな影響を及ぼす可能性が危惧された。そのため、特に100%負荷遮断試験は緊迫した状況での実施となった(図3)。

沖縄電力株式会社では、試験実施時の電力供給量の変動が電力系統に与える影響を抑制するため、すなわち電力系統における需給バランスを維持するために、電力系統に接続されている他の発電所と連携した供給体制が綿密に計画された。設備側では負荷遮断後、蒸気タービンをクラッチ〔タービンと発電機の上に位置し、切り離しが可能な嵌合(かんごう)設備〕で離脱・停止し、ガスタービン無負荷単独運転に移行する確認が行われた。



図3 負荷遮断試験時の中央操作室

本発電設備の容量が電力系統の容量の20%に相当することから、電力系統の周波数を維持するための本発電設備の役割は大きい。短時間で推移する電力需要に速やかに対応できる負荷変化機能と、周波数応答機能を発電設備に持たせることが重要になる。本発電設備には、最小負荷から最大負荷までの範囲の通常運用に対して、EDC(経済負荷配分制御)、AFC(自動周波数制御)およびGF(ガバナフリー<sup>(注2)</sup>)制御を組み合わせることが可能な運用機能を持たせた。特徴的な機能として、一軸でつながるガスタービンのガバナフリー制御を持たせるだけでなく、高圧蒸気ドラムの蓄熱を有効に利用するために蒸気タービンにもガバナフリー制御を持たせた。これにより、燃料制御系に起因するガスタービン出力制御のわずかな遅れを蒸気タービンでカバーし、応答性試験では応答性能および負荷応答幅を調整することで要求を満足する結果が得られた。

10月に実施したプラント性能試験では、国内に導入された1,400℃級ガスタービン(Fクラス)の最高効率レベルである51%(HHV基準)以上の出力が可能であることを確認した。通常運用の負荷範囲において低NO<sub>x</sub>排出濃度を実現するために採用した2段式燃焼器と脱硝装置の組合せにより、NO<sub>x</sub>排出濃度5ppm(16%酸素換算)を十分下回ることを確認した。

2012年11月26日から27日にかけて使用前自主検査の最後の試験となるヒートラン試験を行い、11月27日に無事営業運転が開始された。

### 2.4 今後の展開

本プロジェクトでは、国内大型事業用コンバインドサイクル発電設備に初めてシーメンス社製ガスタービンを採用した。世界の100MW以上のガスタービンの納入実績において、シーメンス社製ガスタービンは台数ベースでシェア40%以上を維持している。豊富な納入実績を持つFクラスガスタービンに加えて、Hクラスガスタービン

〈注1〉 併入：発電機を送電系統に連系して電力の送電を開始すること

〈注2〉 GF(ガバナフリー)制御：系統周波数変動に呼応して負荷を変動させる機能

(SGTx-8000H) の受注が活発になっている。

富士電機は、吉の浦火力発電所の納入実績を基にして、国内にコンバインドサイクル火力発電所を納入することに注力していく。

### 3 ウルブル地熱発電所

#### 3.1 ウルブル地熱発電所プロジェクトの概要

本プロジェクトは住友商事株式会社（以下、住友商事）が主契約者として、2×55 MW の地熱発電設備（Portion-A）、変電設備（Portion-B）、送電線（Portion-C）のEPC契約で2010年2月にインドネシアの国有電力会社であるPT. PLN（以下、PERSERO）から受注した。富士電機と現地のエンジニアリング会社であるPT. ReKayasa Industri（以下、レカヤサ社）が住友商事から請け負った。富士電機の主要役務は、テクニカルリーダー、蒸気タービンをはじめとする主要設備の設計、製作、調達および試運転であった。レカヤサ社は、BOP（プラント付帯設備）の設計・調達および土建・据付け工事を担当した。

インドネシア政府は、国内の電力不足を解消するために第2次電源開発計画を推進している。2010～2014年で約9,500 MW の電源開発を行い、そのうちの約4,000 MW が地熱発電である。本発電所はこの計画における最初の地熱発電所であることから、モデルプラントとして注目された。

現地は、スマトラ島南部の地方都市バンダルランブーンから西に約100 km、標高780 m の山中に位置し、車で約3時間の所要時間である（図4）。

プロジェクトの契約から引渡しまでの期間は、1号機が28か月、2号機が32か月である。

ウルブル地熱発電所は、地熱発電では一般的なシングルフラッシュ発電を適用している。主体が液体である熱水卓越型の地熱資源は、生産基地に設置された汽水分離器によって蒸気と熱水に分離される。蒸気は発電所へ送られ、熱水は還元井に戻される。蒸気は、発電所との取合い点の近傍に設けられたベント設備で一定圧に制御され、発電所側に設けられたデミスターによって最終の湿分除去が行われ、蒸気タービンに導かれ発電を行う。発電所の主系統を図5に示す。

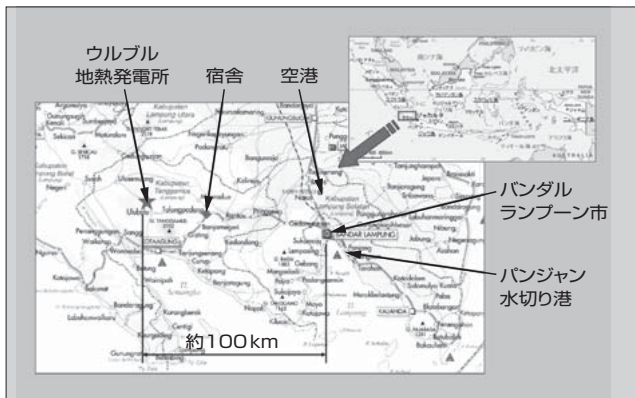


図4 ウルブル地熱発電所の建設地点

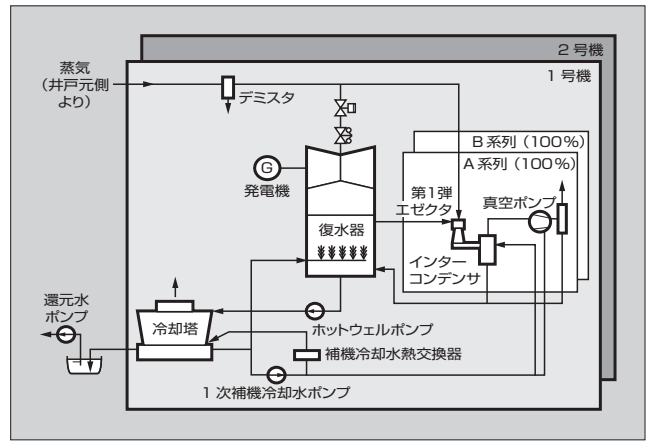


図5 ウルブル地熱発電所の主系統

発電設備の主要機器である蒸気タービンや発電機、復水器は富士電機製である。冷却塔をはじめ、不凝縮ガス抽出設備、ホットウェルポンプ、配管、バルブなどは日本国内および第3国から調達し、電気設備、FRP管、ケーブル類などをインドネシア国内から調達した。

発電所外の地熱資源供給・還元設備については、別途PT. Pertamina Geothermal Energy（以下、PGE）が担い、PERSERO との間で蒸気売買契約を結んでおり、蒸気および還元水は発電所の敷地の近傍で取り合っている。

#### 3.2 設計・建設時のプラント技術

蒸気タービンは、富士電機の地熱向け蒸気タービン「GKシリーズ」を適用した（図6）。単気筒、複流、反動型、復水式である。最終段低圧翼のサイズは地熱発電向けで実績のある21.8インチ翼を採用した。タービン入口における蒸気条件は0.76 MPa/168℃で定格出力55 MW（最大出力57.75 MW）である。

発電機は、定格容量68.75 MVAであり、地熱（腐食）雰囲気における使用となるので、硫化水素ガス除去フィルタの設置など実績のある地熱対策を施した2極全閉空気冷却式を適用している。

復水・冷却設備は、復水器、ホットウェルポンプ、冷却

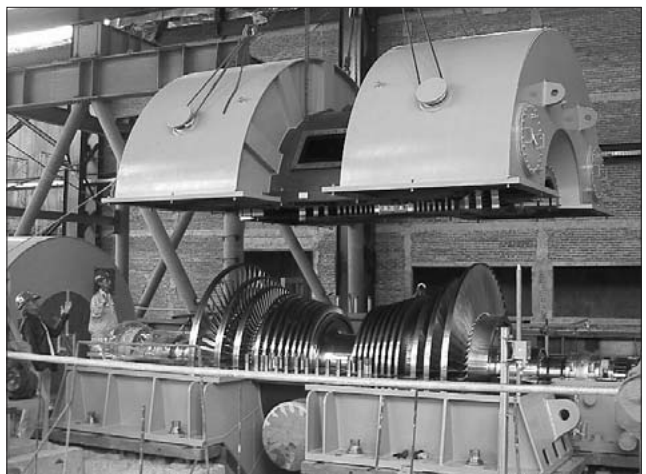


図6 据付け中の蒸気タービン

塔および循環水配管で構成される。総合的なシステムとして設備容量の最適点を検討し、設計定格真空 0.01 MPa を最適点として各設備の設計を行った。復水器は、地熱発電向けに実績があり、効率の良い直接接触式を採用している。

地熱発電の特徴である多量の不凝縮ガスを抽出するガス抽出設備は、蒸気エゼクタと真空ポンプのハイブリッド式を適用し、エゼクタと真空ポンプ容量の最適な組合せ設計を行うことで、効率の良い設備構成としている。

上述の主要機器を中心に、配置の全体最適化を行った。同時に、主蒸気配管や循環水配管などの大口径配管のサイズとルート最適化を行った。これにより、配管圧力損失の減少によるプラント効率の改善に加え、配管の物量を減らすことができた。

また、1号機と2号機の工事が一時期、並行して行われるプロジェクトであることを考慮し、共通部分や互いに干渉する部分などの工事手順をレカヤサ社とあらかじめ協議し、必要な機器や材料がタイムリーに現地に納入できるように分割納入も考慮した納期設定を行った。特に重要なアイテムについては、進捗確認などの納期管理を確実にを行った。

工事期間中は、乾季（4～9月）においても雨が比較的多く、雨が降ると重機が動けなくなるような土地であったため、工事進捗は少なからず天候の影響を受けた。これに加え、工事がスマトラ島の山中であったため、作業者の確保・増員が難しく、限られたマンパワーでの工事となった。富士電機からもアドバイザーを現地に派遣し、効率的な作業工程の提案や工程管理に努めた。

今後、建設される地熱発電所は、さらにアクセスの悪いところが多くなることが予想される。単にアクセスの面だけでなく、マンパワーの確保についてもあらかじめ十分な検討が必要と考える。

### 3.3 試験時のプラント技術

南スマトラ地域では、富士電機が蒸気タービン発電機設備を納入したタラハン火力発電所（2×100 MW）が最大であり、電力系統が脆弱であるため、受電以降も発電所外の電力系統のトラブルによって試運転に影響を受けることが多かった。

1号機の初併入以降は、系統トラブル時には発電所を系統から切り離して安定した運転を継続した。その際に、PGE が運用を行う地熱資源供給設備とも、所内単独運転へ移行させる信号など、必要な信号授受を行うことで連携を取り、急激な負荷変化などにも協調して追従する運用ができることを確認した。2012年10月、契約納期の1週間前にプラントを引き渡した。ウルブル地熱発電所の営業運



図7 ウルブル地熱発電所の全景

転によって、南スマトラの安定電力供給に大きく貢献することができた（図7）。

## 4 あとがき

火力・地熱発電所のプラント技術について述べた。ガスタービンコンバインドサイクル発電および地熱発電は、CO<sub>2</sub>排出量が少なく、環境にやさしい発電方式であり、今後も世界各国で技術改良、改善活動が実施されていく。

ガスタービンコンバインドサイクル発電では、世界の最新技術を国内マーケットに導入する役割を担っていき、地熱発電では、最新・最適化技術を世界に展開していく所存である。



### 尾上 健志

火力・地熱発電プラントの技術取りまとめに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部課長。



### 山形 通史

コンバインドサイクル発電設備のプラントエンジニアリングプラント業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部主任。日本ガスタービン学会会員。



### 上野 康夫

火力・地熱発電プラントの技術取りまとめに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部長。



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。