

日本初の内陸型大型 GTCC (ガスタービンコンバインドサイクル発電) プロジェクト — 発電機現地製作技術 —

First Inland GTCC Thermal Power Plant in Japan: Generator Onsite Manufacturing

谷藤 怜 TANIFUJI, Satoshi

中山 大樹 NAKAYAMA, Hiroki

水本 貴之 MIZUMOTO, Takayuki

富士電機は、日本初となる内陸型大型ガス火力発電設備である株式会社コベルコパワー真岡 真岡発電所に、コンバインドサイクル発電設備一式を一括請負工事として受注し、ガスタービン用発電機 2 台と蒸気タービン用発電機 2 台を納入した。内陸部への発電所の建設であるため、特に発電機は内陸輸送による道路の許容荷重や輸送寸法制限により、完成状態で輸送することができない。そこで、内陸輸送を可能とするために、固定子分割構造のような新構造の採用だけでなく、現地製作における製造技術を確立したことにより、内陸部への設置に対応可能な発電機の現地製作を可能にした。

Fuji Electric undertook an engineering, procurement and construction contract to deliver gas turbine combined cycle power generation facilities to the Moka Power Plant operated by Kobelco Power Moka Inc., the first large-scale inland gas thermal power plant in Japan. The facilities include two generators for the gas turbine and two generators for the steam turbine. Although the plant was constructed inland, we could not use inland transportation to deliver the main equipment especially the generators after completion due to the regulations such as the dimensions and the load capacity. Therefore, we adopted new structures, such as block stator structures, to use inland transportation and established onsite manufacturing technology, making it possible to locally manufacture generators for inland installation.

① まえがき

ガスタービンと蒸気タービンから構成されているコンバインドサイクル発電方式は、発電効率が高く、環境負荷が低いという利点があり、近年、広く採用されその重要性は高まっている⁽¹⁾⁽²⁾。コンバインドサイクル発電方式の大型火力発電所は、蒸気の冷却に海水などを用いる水冷式を採用しているため臨海部が立地に適している。しかし、臨海部では地震や津波に遭う危険が伴う。そのため、電力を安定供給するため、これら大型発電における自然災害への対策が国内での専らの課題となっている。これに対して内陸部は、地震に伴う津波被害に遭うことがない。そのため、内陸への大型火力発電設備の設置は、震災時においても電力を安定的に供給できる可能性が高くなり、臨海部で発電される電力への依存度が高い首都圏全体にとって分散立地により電力の安定供給に貢献し、貴重なバックアップ電源となることが期待される。

このたび富士電機が、日本初となる内陸型大型ガス火力発電設備である株式会社コベルコパワー真岡 真岡発電所に 2×624 MW コンバインドサイクル発電設備一式を一括請負工事 (EPC) として受注し、富士電機のガスタービン用発電機 2 台と蒸気タービン用発電機 2 台の合計 4 台の発電機を納入した。本プロジェクトは、地震や津波といった自然災害リスクが低く分散立地の大型電源としての意義があり、内閣官房と経済産業省により、国土やエネルギー基盤強靱 (きょうじん) 化に関する先導的な事例として選ばれた。

本プラントは、最新鋭の開放サイクル 1 軸形ガスタービンと、ガスタービンとは別の軸系列の蒸気タービンで構成されている。発電機は、ガスタービン発電に間接水素冷却発電機、蒸気タービン発電に間接空気冷却発電機を用い

ている。内陸となるため、復水器は空冷式で水を冷却循環する大型空冷復水器を採用している。

一方、内陸部への発電所の建設であるため、各種大型機器の現地製作が必要になる。特に発電機は、内陸輸送による道路の許容荷重や輸送寸法制限により完成状態で輸送することができない。その対策として、内陸設置を可能とした新構造および現地製作に適した発電機を開発した。ガスタービン発電機の主な仕様を表 1 に、断面図を図 1 に示す。

本稿では、内陸設置に対応したガスタービン用水素冷却発電機の特徴と適用技術について述べる。

表 1 プラント仕様

項目	仕様
出力	470 MVA
電圧	22 kV
力率	0.9
周波数	50 Hz
冷却方式	○固定子：間接水素 ○回転子：直接水素
水素ガス圧	0.5 MPaG
回転数	3,000 min ⁻¹
励磁方式	サイリスタ直接
全長	13.9 m
質量	456 t

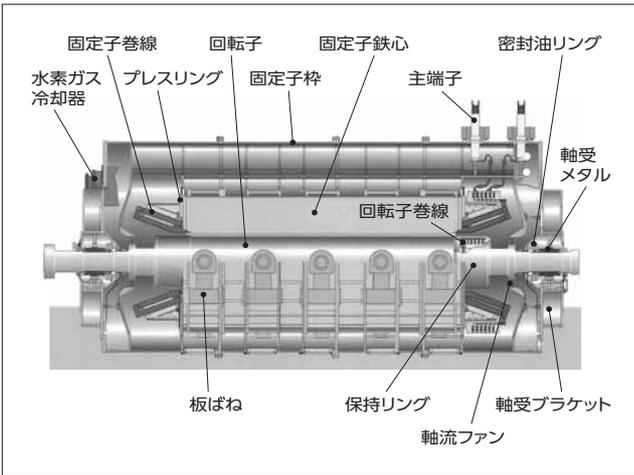


図1 ガスタービン発電機断面図

2 内陸設置に対する発電機の課題

発電機の内陸輸送は特殊なケースなため、輸送部門で輸送経路の計画策定と、道幅や経路周辺物の高さなどの実態調査を行い、道路管理者や警察と協議を行った。その結果、輸送対象物には、長さ 26 m、幅 3.5 m、高さ 4.68 m、質量 164 t 以下という制限があった。この制限があるため、発電機の固定部（固定子枠と固定子の総称）は完成状態で輸送ができない。そのため、分割して輸送した後に現地で製作・組立を行う必要があった。ここで、固定部の通常の製作工程を図 2 に示す。製作工程は、固定子枠製作、中子（なかご）製作（鉄心積みおよびコイル入れ）、固定子枠と中子の組立作業からなり、各作業は大型の専用設備を用いる。そのため、このような現地製作・組立を行うためには、輸送制限に対応する新構造の開発だけでなく新たな専用設備の導入も必要である。さらに、作業場所の確保や作業設備の整備を行い、環境面での対策を講じた製作方法を確立することが必須である。これら、現地製作に関する課題を表 2 に示す。

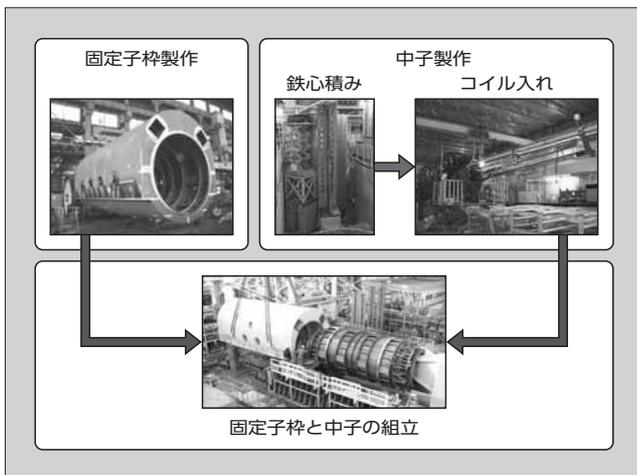


図2 発電機の製作工程

表 2 現地製作における課題

問題	課題
輸送制限 ○固定子枠が輸送制限を超過する。 ○固定子鉄心が輸送制限を超過する。 	現地輸送を可能とする施策の立案 <設計アイテム> ○輸送可能な固定子枠構造の開発： 固定子枠の分割構造化 固定子鉄心の現地製作を可能とする 施策の立案 <設計アイテム> ○固定子鉄心締付強度向上の技術 開発
現地製作 <設備> ○専用設備が無い。 ○天井クレーンの能力・容量が不足している。 	現地製作を可能とする施策の立案 <現地製作アイテム> ○固定子枠：新構造に対する現地 組立技術の確立 ○鉄心積み作業：現地用専用設備 の開発 ○固定子巻線組立：現地用専用設 備の開発 ○固定子組立：固定子枠と中子組 立作業方法の確立
<環境> ○建屋が建設途中となるため作業 環境が悪い。 	<現地製作アイテム> ○鉄心積み作業：雨水対策、粉じ ん対策、防さび対策 ○固定子巻線組立：雨水対策、粉 じん対策、防さび対策

3 内陸設置型間接水素冷却発電機に適用した技術

3.1 固定子分割構造

固定子枠は中子を覆うための大型部品（長さ約 10 m、幅約 5 m、高さ約 5 m、質量約 85 t）であり、冷媒である昇圧した水素ガスを保持するとともに、冷却経路を形成するために内部構造が複雑となっている。水素ガスは冷却性能に優れる一方、酸素と混合すると爆発しやすい性質を持っている。そのため、固定子枠は、水素ガスに対する完全な気密性と爆発圧力に対して十分な強度が求められる。

固定子枠の製作は製缶（溶接）、機械加工、組立の三つの作業工程からなる。現地にて工場と同様の作業が行うことができれば、製品品質の問題はない。しかし、製品の計画段階では、現地の作業環境が不明確な中、製品品質の低下や、問題が生じたときの現地工程のリカバリーの難しさといったことが大きなリスクとなることが予想された。そこで、製品品質を確保するため、現地作業を必要最小限に抑えることが、製品設計の上で最も重要であり、図 3 に示す固定子枠の分割構造を開発した。本構造は、長手方向に 4 分割した固定子枠をボルト締結により一体化するものである。現地では固定子枠の組立てと、固定子枠内部にある一部部品の溶接だけで製作できる構造にして、現地作業を極力削減している。

3.2 固定子鉄心端部ブロック固め構造

固定子鉄心は、0.5 mm 厚の電磁鋼板を扇状に打ち抜き、

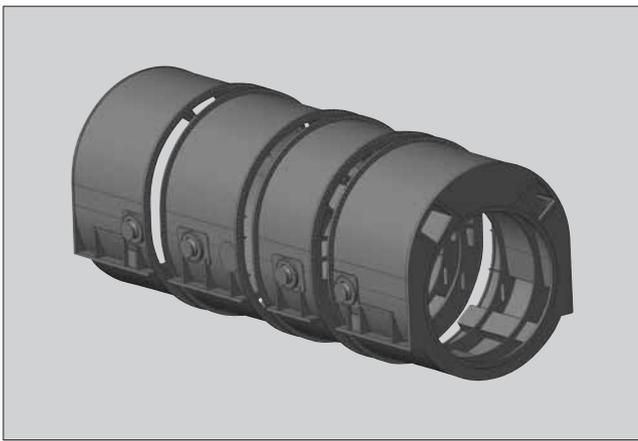


図3 分割固定子枠

絶縁ワニス塗布して、数十 mm のブロックに積層する。積層方向のブロック (図4⑥) ごとにダクトピース (図4⑦) を配置することで冷却のための通風経路を形成する。これらを積み上げていくことで固定子鉄心は全長で約 6 m となる。これら数万枚に及ぶ電磁鋼板の積層物は、鉄心の両端に配置しているプレスリングと周上に配置する締付スタッドおよび鉄心取付梁 (はり) により締め付け、さらに外周側からサポートリングで固定する (図4)。

通常、固定子鉄心を工場で作製する場合、積層した固定子鉄心と固定子巻線を一体で絶縁樹脂を含浸する全含浸絶縁システムを採用している。全含浸は鉄心、巻線とくさびの間に樹脂を充填し、強力で固着することでゆるみを防止している。

しかし今回、現地には全含浸設備がない。そこで、図5に示すように鉄心の両端部の数ブロックを工場にて積層して、真空含浸するドーナツ状のブロック固め鉄心を開発した。本構造は、通常採用している全含浸絶縁システムと同等の樹脂固めの効果を得ることができる。これにより、経年的な鉄心のゆるみを防止し、漏れ磁束による鉄心端部にかかる電磁力に耐えうる構造を実現した。また、これらドーナツ状のブロック固め鉄心を工場で作製した後で現地に納入することで、現地鉄心積み製作工期を短縮し、納期の制約にも対応できた。

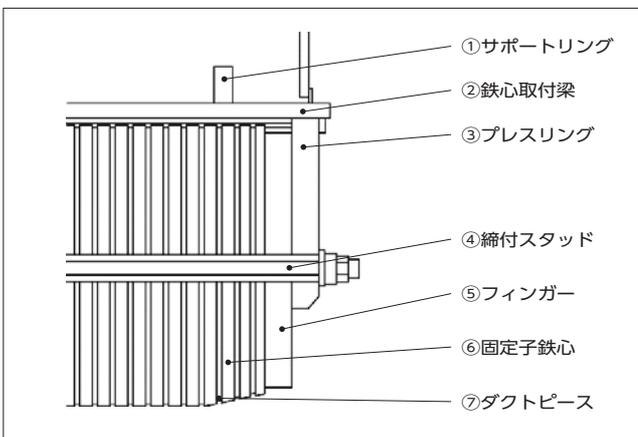


図4 固定子鉄心エンドの構造

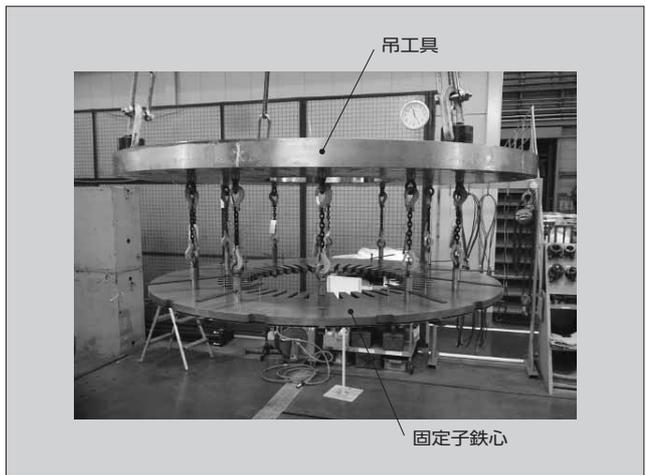


図5 固定子鉄心ブロック固め

3.3 現地製作における製造技術

現地製作では、品質、コスト、納期に加え、作業環境と安全を工場と同等以上に作り上げることが重要である。今回、発電機の現地製作を行うに当たり、工期を短縮するため、固定子枠本体の準備と、現地製作用の設備の準備を同時並行で作業を始めなければならなかった。土木建築側と現地の作業区画の調整を行い、発電機固定子の専用設備を搬入した。搬入に備えて、現地での温度湿度や粉じん量などの作業環境を詳細に洗い出し、管理する対象項目とした。また、安全を考慮することも重要だった。

(1) 現地への専用設備の設置と搬入

発電機固定子の製作に必要な大型の専用設備の設置と搬入のため、まず土木建築側やプラント全体の施工計画との調整により発電機製作の作業区画を確保した。次に、作業区画に対する最大荷重を算出し、各作業区画に耐荷重要求を行い、土木建築側と調整した。

(2) 現地作業時の粉じん対策

発電機固定子の製作時に、絶縁材料への異物の混入を防ぐため、粉じん対策が重要である。そこで、鉄心積みと固定子巻線 (コイル) 組立のおおのこの作業で養生ハウスを設置した。特に鉄心積み作業は、10 m に及び高所作業となるため耐震強度を考慮した大型の養生ハウスを設置した。養生ハウスは、部品搬入出のため上部や側面の開閉構造を設けた構造とし作業性を良好にしている。養生ハウスには空調設備を設け、日々の温湿度管理により結露対策を行った。また、粉じん測定を作業前点検として定期的に行い、工場の環境レベルを順守することで現地の品質管理を図った。

(3) 品質管理

現地での戻り工程の撲滅には、検討段階でのリスクの低減や現地での品質管理の確立が重要である。リスク低減については、現地の作業環境を考慮した作業手順書を作成し、想定されるリスクをつぶし込み、必要により設計計画において現地製作を考慮した構造とすることで対策を講じた。また、可能な限り工場で作品を作り込むようにした。さら

に、工場での組立確認を行うことで事前に問題点を洗い出し、それらの対策を行った。一方、品質管理については、現地での顧客に対するレビューや製品監査の担当者と手順を整え、各作業開始前には関係者がレビューを行って工場と同等以上の管理体制を整えた。また、顧客とは立合いだけでなく、細かい作業ステップごとに品質を確認する顧客モニタリングの機会を設定して品質確認の仕組みを構築した。これらの対策に加え、現地と工場の担当者同士が情報の交換を密にするため、IT 機器を用いてリアルタイムで製品状態に関する情報を共有するとともに、Web 会議により進捗状況や品質を確認した。

4 発電機の現地製作

(1) 固定子枠組立

工場での固定子枠組立は、横に倒したまま行っているが、今回の現地作業では、作業スペースが制限されているため、縦積みで行った。各分割固定子枠の位置合わせは、精度良く行わなければならない。精度を出すためには、建屋床の水平度の管理だけでなく、各分割固定子枠の上下左右位置やそれぞれの周方向位置の緻密な調整が必要である。そこで、各種調整治具の開発や安全対策を講じた機内外の足場を製作し、本作業を完遂した。分割固定子枠組立後は、一体となった固定子枠の横転作業を行う。通常、工場での横転作業は天井クレーン 2 基を用いるが、現地の既存の建屋クレーンの能力が不足していた。そこで、屋外での横転作業を計画し、油圧クレーン 2 基を用いた横転を物流会社と共同で行った。そのときの横転作業の実際の様子を図 6 に示す。

(2) 固定子鉄心積み

鉄心積み作業時の様子を図 7 に示す。定盤の水平度調整や垂直型の定盤の位置調整を行うため、微動装置を開発した。その結果、調整は工場管理値を十分に満足するとともに、調整作業の簡素化につながった。

(3) 固定子巻線組立

固定子巻線組立作業時の様子を図 8 に示す。本作業は、現地の既存建屋の天井クレーンの可動範囲外となり使用で



図 7 固定子鉄心の組立

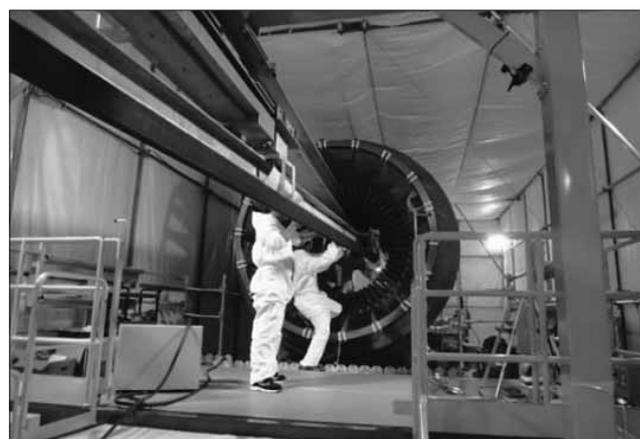


図 8 固定子コイル組立

きななかったため、移動式の設備組立用治具や部品の移送治具を開発して作業を完遂した。安全面については、本プラントサイズに合わせた昇降足場の導入や手すり付きスライド足場の設置などにより安全強化を図った。また、養生ハウス内での溶剤塗布作業時は、養生ハウス内にさらに簡易ハウスを設置して作業環境を整備し、さらに排気装置の導入やエアラインマスクによる安全に配慮した対策を行った。

(4) 固定子枠と中子の組立

発電機の固定子は円筒形の固定子中子に固定子枠を挿入する作業によって完成となる。通常は天井クレーンを用いるが、固定子完成後の質量が、現地の既存建屋クレーンの容量を超過していた。そこで、天井クレーンに代わるパワージャッキシステム (PJS) を導入した。PJS は、大型のジャッキを門型に配置してレール上を動かすことで大物品をつり上げ、走行方向に限定して移動させる装置であるが、横行方向に対して細かな精度で動かすことができない。今回、PJS での横行方向の調整ができないことを克服するため、仮置き治具や固定子中子を微動調整するための装置を開発し、組立作業時の位置調整を図った。そのときの PJS での組立作業写真を図 9 に示す。中子の周方向の位置調整については PJS の片側ジャッキアップ量を変化させることで中子を周方向に回し、調整を行った。また、固定子中子に固定子枠を挿入する作業においては、PJS の片側



図 6 分割固定子枠の横転

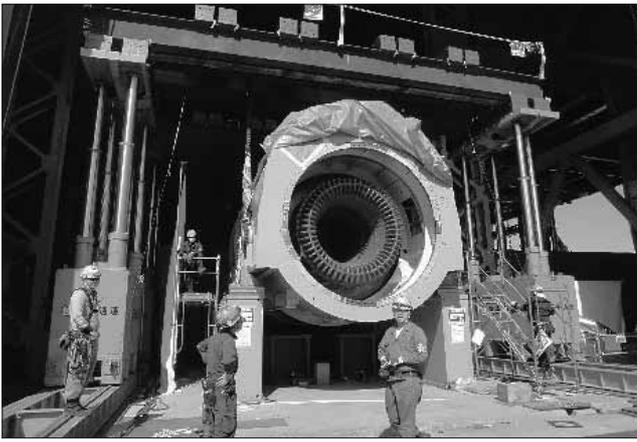


図9 固定子中子と分割固定子枠の組立作業

の進行方向の速度を変化させることで中子と固定子枠の互いの平行度を調整した。これら微動調整治具やPJSでの微調整により組立作業を完遂した。

5 あとがき

日本初の内陸型大型 GTCC (ガスタービンコンバインドサイクル発電) プロジェクトにおける発電機現地製作技術について述べた。設計開発では、輸送制限に対する固定子枠の分割方式を開発し、また、鉄心積みに関する端部の技術向上例を述べた。現地製作の製造技術では、各種導入設備例や作業環境対策について述べた。これらにより富士電機は、内陸設置に対する発電機の導入を可能にする技術を確認して、現地工程を順守し、発電機の引渡しを完了した。

今後もお客様のニーズに合わせた製品を供給するために必要な技術を開発し、社会に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 池田忠司ほか. コンバインドサイクル発電設備. 富士時報.

2005, vol.78, no.2, p.116-120.

- (2) 山崎勝ほか. 一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.2, p.113-117.
- (3) 内閣官房. 電カインフラの強靱化に資する日本初の本格的な(120万kW級)内陸型火力発電所の建設. 国土強靱化民間の取組事例集, 2015, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoudjinka/minkan_torikumi/, (参照 2020-07-08).
- (4) 中山大樹ほか. 内陸火力発電所に適した発電機の納入事例. 日本ガスタービン学会誌. vol.48, no.1, p.26.



谷藤 怜

大型回転機的设计・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部課長補佐。



中山 大樹

大型回転機の製造技術に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部課長補佐。



水本 貴之

大型回転機的设计・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部。電気学会会員。





*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。