

# コロンビア ソガモソ水力発電所の水車発電機

Hydro Generators of Sogamoso Hydroelectric Power Plant, Colombia

木下 賢太郎

石塚 博明

東條 裕宇

■ KINOSHITA Kentaro

■ ISHIZUKA Hiroaki

■ TOJO Hirotaka

南米のコロンビアは豊富な水資源に恵まれ、電源構成における水力発電の占める割合が高い。首都ボゴタから北に位置するイサヘン電力会社 ソガモソ水力発電所は、水車発電機3台を持ち、最大出力820 MWで、同国内電力需要の8.3%に相当する能力があり、2014年12月に営業運転を開始した。

東芝は、受注から約5年にわたるプロジェクトで日本、中国、北米、及びコロンビアの各拠点が連携し、同国最大となる水車発電機を完成させた。これにより、当社が同国に納入した水車発電機の総発電出力は同国内水力発電出力の約45%を担うことになり、同国が再生可能エネルギー発電として推進する水力発電所の開発に貢献している。

In Colombia, hydroelectric power generation accounts for a large proportion of overall power production due to the country's abundance of water resources. The Sogamoso Hydroelectric Power Plant of ISAGEN S.A. E.S.P., located north of Bogota, the capital, successfully started commercial operation in December 2014. The total output of the plant is 820 MW, which is equivalent to 8.3% of the total electricity demand in Colombia.

The Toshiba Group supplied three hydro generators with the largest capacity in Colombia as well as electrical balance of plant (BOP) facilities during the approximately 5-year term of this project, in conjunction with its bases for the hydroelectric power generation business in Japan, China, North America, and Colombia. We have now supplied hydro generators providing about 45% of the total hydroelectric power generated in Colombia, and are contributing to the country's use of renewable energy through the ongoing development of hydroelectric power plants.

## 1 まえがき

南米のコロンビアは、電源構成における水力発電の占める割合が70%近くになる水力資源の豊富な国で、クリーンで環境に優しく、持続的な再生可能エネルギー発電として、大型水力発電所の開発が進められている。

東芝は、その中の一つであるイサヘン電力会社 (ISAGEN S.A. E.S.P.) ソガモソ水力発電所に、324 MVA 発電機及び周辺機器 (BOP : Balance of Plant) を3セット納入した。

ソガモソ水力発電所は、コロンビアの中西部に位置するソガモソ川にロックフィル式のダムを建設し、その地下に位置する。納入した3台の水車発電機の合計最大出力は820 MWで、同国最大の水力発電所であり、同国内電力需要の8.3%に相当する発電能力を備えている。

受注から約5年にわたるプロジェクトは、主契約とBOP調達を北米のToshiba America Energy Systems Corporation (TAES) が、水車発電機設計を当社が、主要な水車発電機部品製造を中国の東芝水電設備 (杭州) 有限公司 (THPC) が、現地発電所への部品輸送及び現地工事をTAESコロンビア支店が、それぞれ担当し、東芝グループの総合力を結集して完成させた。2014年12月に発電所運転試験が完了し、3台の営業運転を開始している。

ここでは、水車発電機の設計、製作、現地組立、及び試験

における技術的特長と施策及び結果について述べる。

## 2 水車発電機

水車発電機の主な仕様を表1に、断面を図1に示す。

水車発電機の電気部品であるコイル、鉄心、磁極、及びリムは当社で製造し、それ以外の部品はTHPCで製造した。また、水車発電機は固定子の外径が約12 mにも及び、山間部に位置する発電所まで、一体で輸送することは難しいことから、固定子を4分割して輸送した。また回転子は、ロータスポーク、リム、及び磁極を個別に輸送し、現地で組み立てた。

水車発電機の通風冷却はラジアル通風方式<sup>(注1)</sup>を採用し、補機の削減を図るとともに、通風経路を最適化して風損を低減した。

また軸受は、上部ガイド軸受及び下部ガイド軸受とも大型で損失が大きいため、機外に油冷却器を設け、電動ポンプで油を循環させる方式を採用した。

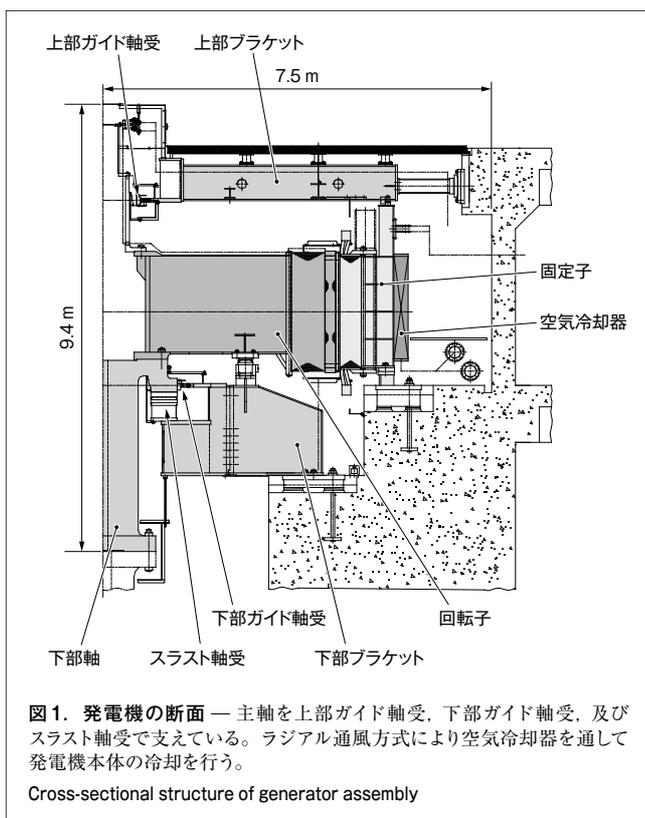
### 2.1 固定子

**2.1.1 固定子コイルの単体性能** コイルは当社独自の液圧レジンリッチ絶縁システムを適用している。これは、主絶縁材料にレジンリッチマイカテープを採用し、タンク内で真空

(注1) 回転子に径方向の通風ダクトを備え、冷媒を循環させる通風方式。

表 1. 水車発電機の仕様  
Specifications of hydro generator

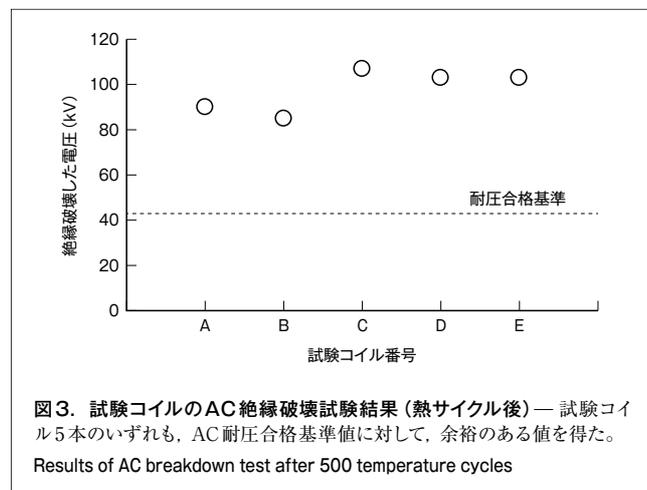
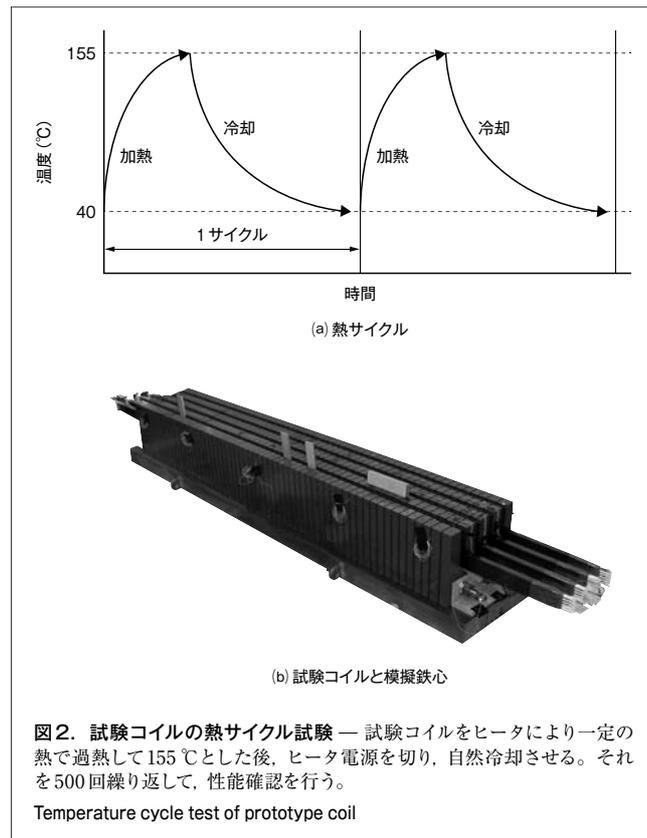
項目	仕様
発電機の形式	立軸回転界磁水冷熱交換器形三相交流同期発電機
発電機定格容量	324 MVA
発電機定格電圧	16.5 kV
発電機回転速度	163.63 min <sup>-1</sup>
周波数	60 Hz
定格力率	0.9 (遅れ)
励磁方式	サイリスタ励磁方式



加圧処理をした後, 加熱加圧媒体による硬化を行う方式である<sup>(1)</sup>。真空加圧処理により絶縁層中の微小欠陥を抑制できる他, レジンをマイカテープに染み込ませて使用するため, 廃棄するレジンの量を極少化でき環境面にも寄与する。

固定子の本製作をする前に, 仕様書で要求されている熱サイクル後のコイル単体性能試験を実施した。5本の試験コイルを製作し, 図2に示すように熱変化を500回繰り返す, その後, 性能確認を行うものである<sup>(2)</sup>。更に, 誘導正接試験などのコイル単体試験を行い, 最後にAC (交流) 絶縁破壊試験を実施し, コイル性能が十分であることを確認した (図3)。

**2.1.2 固定子の工場仮組立** 固定子は工場では仮組立をするように仕様書で要求されている。そのため, THPCで製作した固定子枠を当社の京浜事業所に持ち込み, 円環状に



組み合わせて鉄心を積層した後, 固定子コイルを挿入して仮組立を実施した。

コロンビアでは, 日本人の渡航が制限される場合があり, 日本人技術指導員の派遣を最小限とするため, 工場での発電機仮組立時には, コロンビア人技術者を招へいし, 組立ての教育と訓練を行った。

また, この仮組立の状態では耐電圧試験やコアループ試験を行い, 固定子の健全性を確認した。耐電圧試験前の固定子を図4に示す。

その後, 輸送のため, 4片 (1片当たりの質量約84 t) に分割

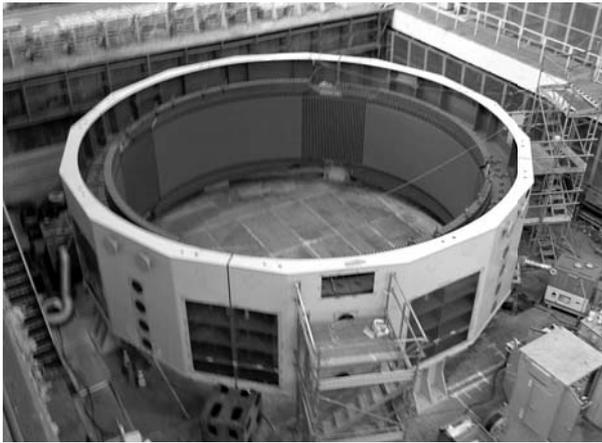


図4. 工場製作時の固定子 — 4分割輸送となるため、工場では接続部の固定子コイルを挿入せずに現地で挿入し組み立てた。

Stator at workshop

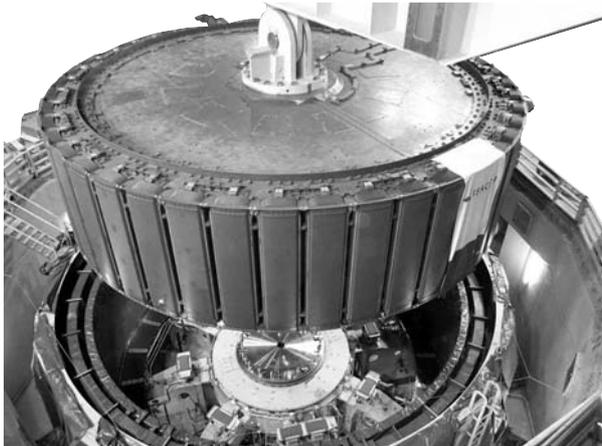


図5. 回転子つり込み — 回転子とつり工具を合わせて614 tになる。クレーンつり上げ能力は1丁当たり330 tで、2丁でつり上げを行っている。

Installation of rotor at site

して梱包（こんぼう）し、現地へ向けて出荷した。現地搬入後は、4分割片を組み立てて一体とし完成させることで、現地で全てを組み立てるのに対して据付工程を短縮した。

## 2.2 回転子

回転子の外径は約9.8 mを超え、また、主軸を除いた質量は560 tを超える。そのため、回転子を一体で輸送することはできず、製作した各部品を現地に輸送し、現地で組立てを行った。完成した回転子を図5に示す。

このプロジェクトでは、水車は他社からの供給であったが、主軸カップリング部品やテンプレートは当社が製造し供給した。

水車軸の製作スケジュールや寸法公差管理値を事前に確認し、調整を行うことで、現地施工の円滑化を図った。現地組立時に横から見たときのカップリング面を図6に示す。

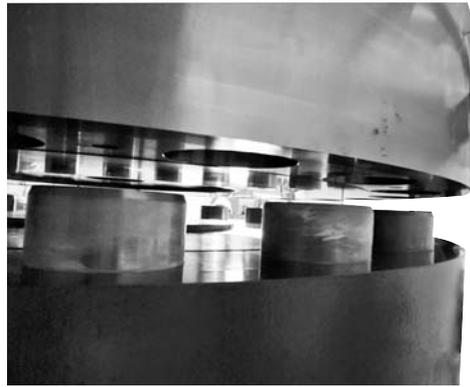


図6. 発電機下部軸と水車軸の現地カップリング — 水車軸と発電機軸のカップリングを行った後、主軸の振れ見測定を行い、良好な結果を得た。

Assembly of generator lower shaft and turbine shaft at site

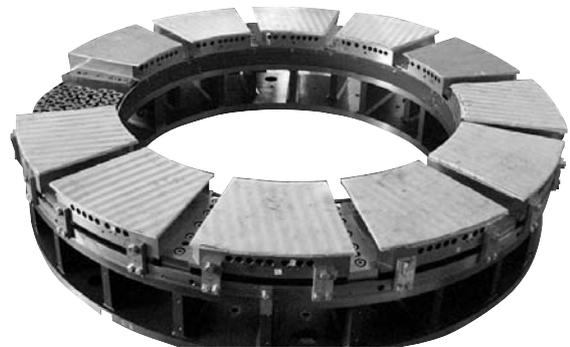


図7. スラスト軸受 — スラスト軸受の部品組立はTHPCの工場で行い、組立性の確認を行った後、出荷した。

Generator thrust bearing

## 2.3 軸受

水車発電機は準傘型であり、水スラストと回転部質量の全荷重を受けるスラスト軸受は、回転子の下に位置する。静止板は12セクタで、表面にはホワイトメタルを採用し、スプリングによる多点支持構造としている。回転板を省略し、軸受をコンパクト化することで、軸受損失の低減を図った。

またTHPCの工場では、スラストテーブルやベースとの組合せを行い、あらかじめスプリングの配置などを決めて組立性の確認を行っておくことで、現地作業の短縮を図った（図7）。

## 2.4 水車発電機の補機と制御

上下軸受油冷却は、別置き冷却器を設置し、油循環ポンプとともに二重化している。また、発電機本体に取り付けている測定器及び補機は、発電機補機制御盤を経由して、IEC 60870-5-104（国際電気標準会議規格60870-5-104）に準拠した伝送プロトコルを用いてプラント監視制御装置と接続している。

励磁制御装置も同じ方式でプラント監視制御装置と接続し

て、ケーブル本数の削減を図っている。

### 3 プロジェクトにおける協業

水車発電機の設計及び製造は当社とTHPCで行ったが、プロジェクト全体のエンジニアリング業務は海外拠点であるTAESが担当した。

固定子は当社工場で仮組立を実施しており、現地組立時は分割輸送した接続分のコイル挿入や現地耐圧試験などにして、作業を最小化した。回転子は、スポーク、リム、及び磁極を部品単位で現地搬入し、組立てを実施した。これら現地組立の工事会社への指導は、当社で工場訓練をしたコロンビア人技術者が実施し、日本人技術者の派遣は、最終的な組立チェックに限定することで最小化を図った。

また、このプロジェクトの現地工事は顧客の所掌であるが、工事管理は当社の所掌で、所長及び現地スタッフはTAESコロンビア支店が担当しコロンビア人技術者を派遣した。日本人の派遣期間は、必要工数の1/8程度と短期間であったが、現地事務所と当社をはじめ各社が連携を密にし、顧客を含めた連絡会を実施することで工事を順調に終了させた。

### 4 現地試験

現地試験は、ダム湛水（たんすい）の遅れから、当初計画より開始が遅れたが、先行機の有水試験と並行して、次号機の無水試験を実施し、発電所全体の運転開始日を変更しないようにした。このため、試験技術者は当初の計画以上に必要となったが、コロンビア人技術者を活用し、日本人技術者は増やすことなく、6か月の計画工程を約2か月で終了させることができた。

各種の特性試験に合格した後、現地効率試験はカロリー法を用いて行った。定格容量で力率1.0での運転時に測定した結果、発電機規約効率は99%を超え、全運転範囲でも保証値を満足し、顧客から高い評価を得ることができた。

## 5 あとがき

ソガモソ水力発電所は2015年1月にはコロンビア大統領も出席して開所式典が行われた。その後、順調な運転を続けており、コロンビア経済の発展におおいに寄与している。

ソガモソ水力発電所の営業運転開始により、コロンビアにおける当社供給の水車発電機は38台、総発電出力は4,907 MWに達した。これは、同国水力発電所出力の約45%を担うものである。

今回のプロジェクトを通して同国の技術者の育成も図っており、今後も同国で継続的に計画されている水車発電機の新設や改修に対し、積極的に取り組んでいく。

## 文献

- (1) 久保 徹 他. 環境負荷の低減に貢献する高性能・高機能水車発電機技術. 東芝レビュー. 65, 6, 2010, p.15-18.
- (2) 武田 克. 北米における既設水力発電所の大規模改修への取り組み. 東芝レビュー. 70, 1, 2015, p.16-19.



木下 賢太郎 KINOSHITA Kentaro

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主務。  
水力発電システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会  
会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



石塚 博明 ISHIZUKA Hiroaki

電力システム社 京浜事業所 発電機部参事。  
水車発電機の設計・開発に従事。電気学会会員。  
Keihin Product Operations



東條 裕宇 TOJO Hiroataka

電力システム社 京浜事業所 発電機部主務。  
水車発電機の設計・開発に従事。  
Keihin Product Operations