

インド共和国プルリア揚水発電所の運用開始

Purulia Pumped Storage Power Station in Commercial Operation

池田 親正 手塚 光太郎 坂本 茂

■ IKEDA Chikamasa

■ TEZUKA Kotaro

■ SAKAMOTO Shigeru

インド共和国（以下、インドと略記）の Kolkata（旧カルカッタ）から北西300 kmに位置する西ベンガル州プルリア地区に建設を進めてきたプルリア揚水発電所が、2008年1月に商業運転入りをした。この発電所は、ピーク電力を賄うこと、及び電力系統を安定化させ効果的に運用することを目的に計画された揚水発電所であり、1998年に行われた国際競争入札の結果、東芝が受注した案件である。当社はポンプ水車、発電電動機、制御装置、始動装置ほか、所内電気品など発電所主要機器を供給した。プルリア揚水発電所は、今後西ベンガル州の電力系統安定に寄与することが期待されている。

The Purulia Pumped Storage Power Station has been constructed in Purulia district, located 300 km northwest of Kolkata in the state of West Bengal, India. All units had successfully entered commercial operation as of January 2008. This project was implemented to overcome shortages of peak power, so as to stabilize and achieve effective operation of the power grid.

Toshiba received an order for this project as a result of an international competitive bidding process called in 1998. We designed, manufactured, and delivered major equipment such as pump-turbines, generator-motors, the supervisory control and data acquisition (SCADA) system, static frequency converters, and electrical equipment for the power station. The Purulia Pumped Storage Power Station is expected to contribute to improved power grid stability in West Bengal.

1 まえがき

インドは、人口11億人と世界第二の人口を擁し、昨今の年率10%程度の急速な経済成長との相乗効果により電力不足が深刻化しつつあり、特に電力需要ピーク時の電力不足は総発電量の14%に達している。インドは、電力不足を解消するため2001年から2012年までに150 GWの発電設備増強を計画し、発電所の建設を推進している。

インドの電力需要は84%が火力発電で賄われており、今後増強される発電設備も67%が火力発電所の予定である。火力発電は電力需要のピーク対応が難しいため、ピーク平準化あるいは電力系統の効果的な活用などのニーズから揚水発電所の需要が大きい。プルリア揚水発電所は国際競争入札であったが、東芝の持つ高い揚水発電技術と豊富な実績に対し顧客から高い評価を受け、2000年8月に受注に至った。今回、商業運転に入ったので、その特徴を述べる。

2 発電所の概要

プルリア揚水発電所は、インド共和国西ベンガル州の州都 Kolkataより北西300 kmに位置する、プルリア地区に所在する純揚水発電所である。上・下ダムはロックフィルダム^(注1)で

(注1) 岩石や土砂を積み上げて建設する型式のダム。



図1. 発電所内の風景 — 制御室から発電機フロアを望む。

Appearance of generator floor

あり、発電所建屋は完全地下式である。建設地の関係からこの発電所の基準有効落差は177 mと低いため、比速度の高いポンプ水車を適用する必要がある、この発電所の技術的特徴となっている。当社は発電所主要機器として、ポンプ水車、発電電動機、制御装置、始動装置、所内電気品などを担当し、納入、据付け、及び試験調整を行った(図1)。

3 ポンプ水車

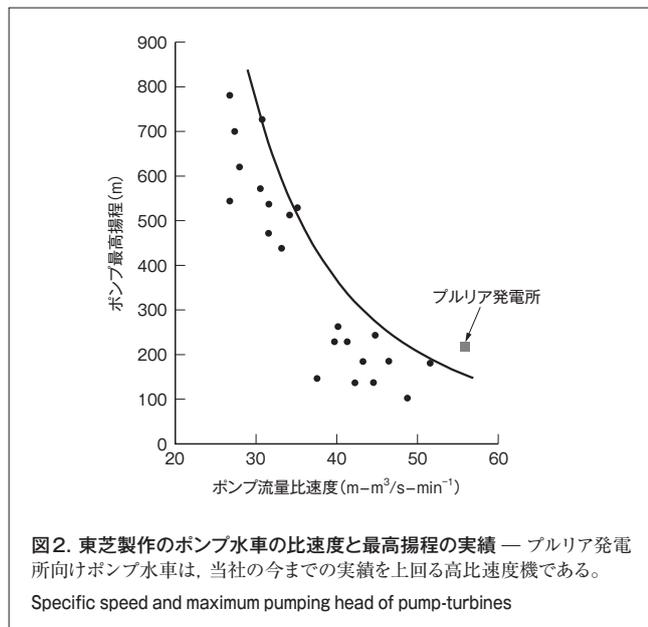
ポンプ水車の主な仕様は、次のとおりである。

- (1) 型式 立軸単輪単流渦巻きフランシス形ポンプ水車
- (2) 水車仕様
 - (a) 有効落差 最高214.5 m, 基準177.0 m, 最低149.4 m
 - (b) 水車出力 定格230 MW, 最大260 MW
 - (c) 最大流量 150 m³/s
 - (d) 定格回転速度 250 min⁻¹
 - (e) 水車比速度 140.6 m - kW - min⁻¹
- (3) ポンプ仕様
 - (a) 全揚程 最高218.9 m, 最低159.1 m
 - (b) 最大軸入力 240.4 MW
 - (c) 最大揚水量 141.0 m³/s
 - (d) 定格回転速度 250 min⁻¹
 - (e) ポンプ比速度 56.0 m - m³/s - min⁻¹

3.1 ポンプ水車水力設計と模型試験

ポンプ水車は、当社の従来実績を超える高比速度機である(図2)。このような高比速度機では相対的に高回転で大流量となり、ポンプ運転時の、吸込み側逆流特性、キャビテーション特性^(注2)、及び締切り運転振動特性と水車運転時の水圧脈動特性が水力設計上の留意項目である。また、調相運転における制御配管方式として、配管の信頼性向上のため、ランナとガイドベーンの間から排水する従来の方式ではなく、ケーシング入口の上端部から漏水を排水する方式を採用したが、この排水方式の採用実績は多くなく、その機能を詳細に検証する必要があった。

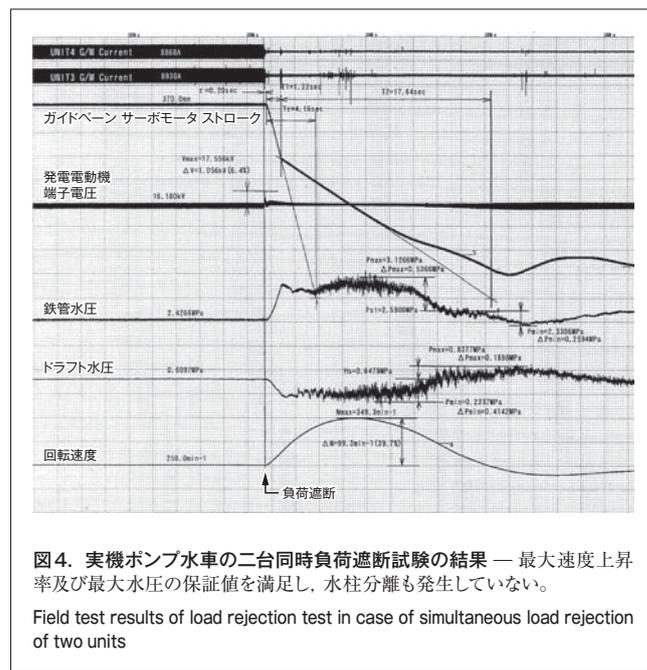
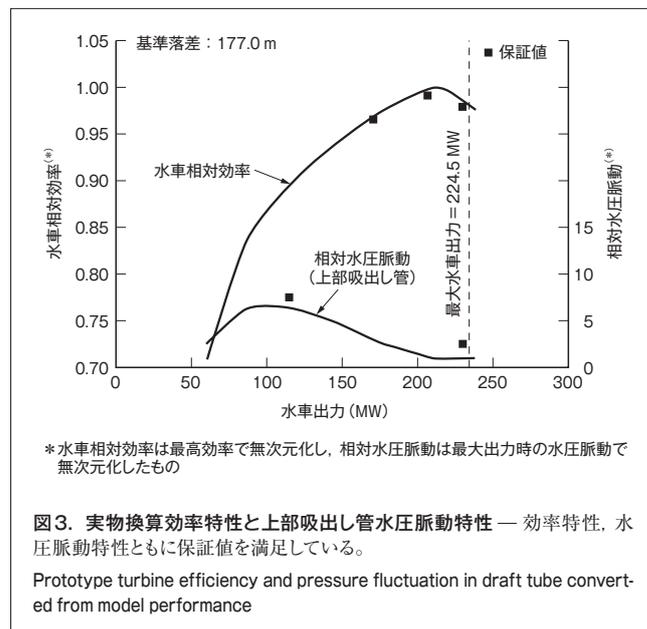
上記課題に留意した設計を進めるにあたり、実機ポンプ水車と完全相似の模型ポンプ水車による水力特性模型試験と調



(注2) 液体の流れの中で圧力が局所的に飽和蒸気圧以下となって、沸騰により気泡が発生する現象をキャビテーションと呼び、この気泡がつぶれる際に衝撃的な圧力が発生して機器を壊すことがある。キャビテーションの起こりにくさをキャビテーション特性と言う。

相試験を実施した。

水力特性試験は、水力性能の検証が最終的な目的であるが、そこに至るまでの過程である流路形状のチューニングによる最適化模型の開発がもう一つの重要な役割となる。この模型ポンプ水車でも、数度にわたるランナ形状のチューニングを経て最終的な形状を決定し、効率、流量、入出力、水圧脈動、及び無拘束速度ほか、すべての項目で保証値を満足することを検証した(図3)。また、吸込み側逆流限界に対するマージンも十分確保でき、更に運転範囲全域でキャビテーションを発生せずに運転できることも確認され、良好な特性を持ったポンプ水車を開発した。水力特性試験に引き続き、同一の模



型ポンプ水車を用いて調相運転試験を実施した。この試験では、慣性力の重力に対する比率を表すフルード数を実機と同一とすることで、押し下げ水面の動揺を含めて、ランナ空転時のポンプ水車内部の流動状況をシミュレーションできる。その結果、空転時入力が保証値以下となり、かつ放水路側への漏気量を低減できる適正な押し下げ水面位置を決定するとともに、今回の漏水排水方式の有効性を確認した。

これら模型試験により検証された事項は、実機ポンプ水車の現地有水試験でも実証され、模型試験の有効性及び実機の運転信頼性を確認した。なお、この発電所は放水路が長く、かつ土木建設コスト低減を目的に放水路サージタンクを省略したため、負荷遮断時の放水路水柱分離が懸念されたが、負荷遮断時のランナ出口の局部圧力降下に基づく適正なマージン⁽¹⁾を考慮したガイドベーン閉鎖モードの選定により、最大速度変動率及び最大水圧の保証値を満たし、水柱分離発生の危険がない信頼性のある運転制御方法とした(図4)。

3.2 ポンプ水車の実機設計

模型試験で最適化された模型ポンプ水車の流路形状をベースに、実物ポンプ水車の設計を行った。ランナはクラウン、羽根、及びバンドを溶接で組み立てる構造としFEM (Finite Element Method: 有限要素法) 計算を行って十分な強度が確保されることを確認した(図5)。

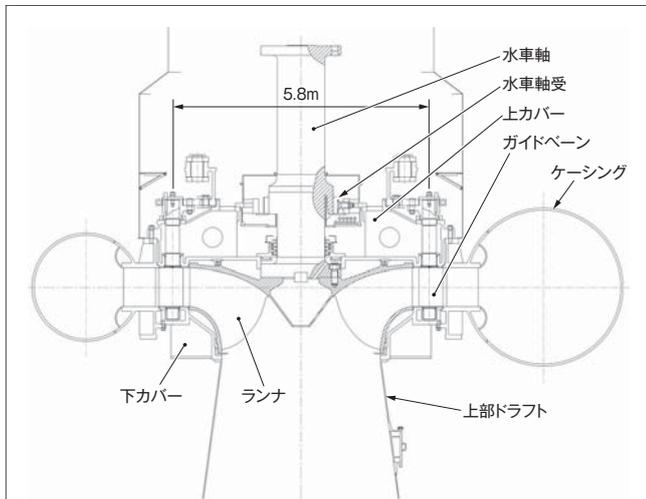


図5. プルリア発電所向けポンプ水車の組立断面図 — 高比速度機であるため、径方向寸法に対して流路高さが大きくなるという特徴がある。

Cross-sectional outline of pump-turbine for Purulia Pumped Storage Power Station

4 発電電動機

大容量の可逆回転発電電動機であり、設計、製作にあたっては当社の多数の納入実績の経験を活用した。

発電電動機的主要仕様は、次のとおりである。

- (1) 型式 立軸回転界磁全閉空気冷却器付三相交流同期発電電動機
- (2) 定格容量(発電機/電動機) 250 MVA / 255 MW
- (3) 定格電圧 16.5 kV
- (4) 周波数 50 Hz
- (5) 力率 0.9 / 0.95
- (6) 回転速度 250 min⁻¹
- (7) 極数 24

通風冷却は、信頼性が高く通風効率が高いセクタリムタイプのラジアル通風方式を発電電動機として初めて採用している。セクタリムタイプのラジアル通風とは回転子リムのセクタリム板間のダクトによる自己通風方式を言う。また、特に通風により発生する損失を低減するため磁極間に通風バリアを設け、通風により発生する二次流れを防止している。また、従来通風路を仕切るために固定子の上部と下部に設けていたコイルエンドカバーに代わり、回転子の上下にコンパクトな通風カバーを設けて通風路を特定し、従来発生していたコイルエンドカバー内の通風損失を低減し、効率向上を図っている(図6)。

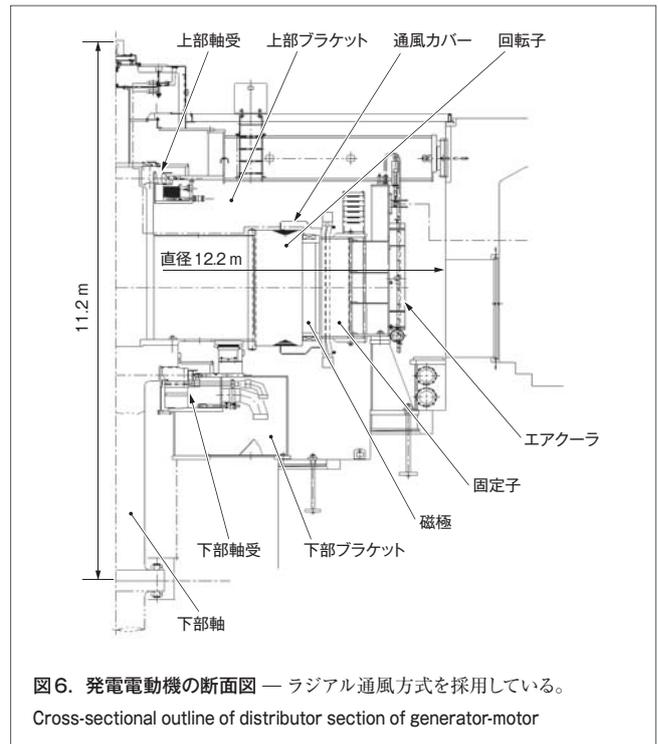
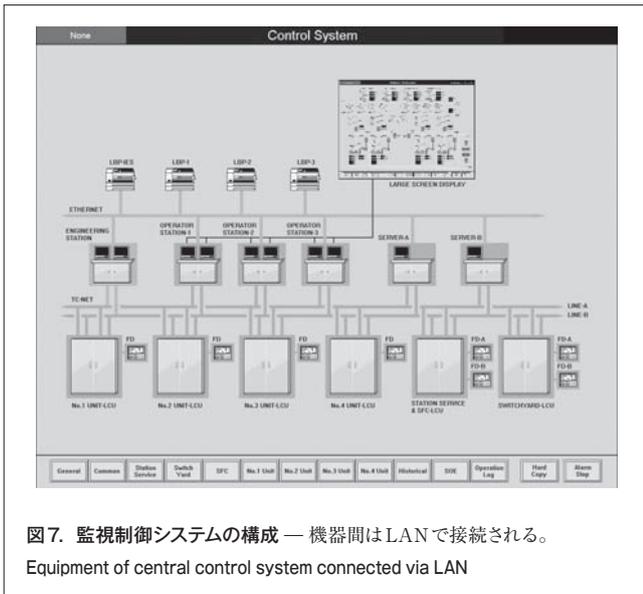


図6. 発電電動機の断面図 — ラジアル通風方式を採用している。

Cross-sectional outline of distributor section of generator-motor

5 制御装置

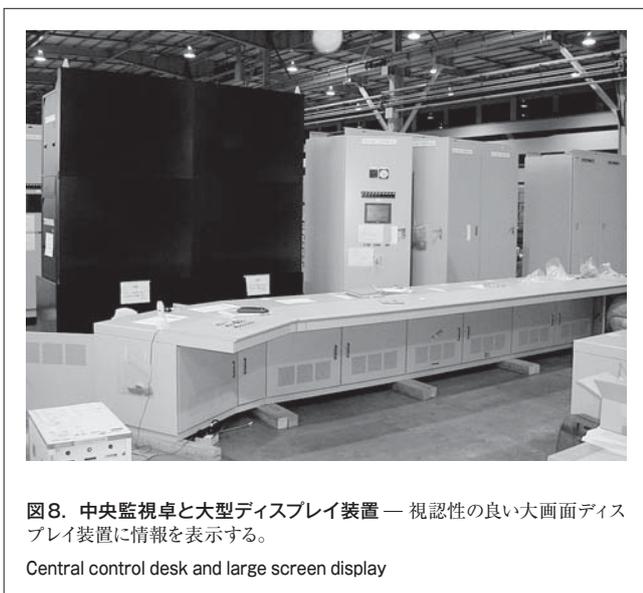
監視制御システムは、信頼性が高く拡張性を持たせたSCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) システムであり、データサーバ、主機コントローラ、所内・共通コントローラ、開閉設備用コントローラなどを二重化するとともに、各機器間をLANで接続した構成としている(図7)。主機コン



トローラには、統合コントローラV3000を揚水機向けとして初適用した。また、制御室には大型ディスプレイを備え、監視制御情報を一括表示し、視認性にも配慮した(図8)。

この監視制御システムの特長は、次のとおりである。

- (1) 監視操作性向上 オペレータステーションには視認範囲拡大のため2台のVDU (Video Display Unit) を接続し、一つのマウスで操作可能とした。また、1セットからの一括対応、複数セットからの分割対応が制御権切替により任意に選択可能とした。
- (2) 運転モード切替対応 運転状態の把握を容易にするため状態遷移図の画面を表示し、主機運転状態に適したモード切替操作を容易にした。
- (3) SOE対応 GPS (Global Positioning System) ユニットとSOE (Sequence of Event) ユニットの設け、1 msの分



解能で画面上に項目表示を行い、イベント発生を正確に記録するとともに、監視制御が容易に行えるようにした。

- (4) 保守サポート機能 運転モードごとの主機及び補機の運転時間と回数を記録し、帳票へ出力できる。
- (5) FDによる直接制御対応 直接運転モード時の監視操作をFD (Flat Display) 画面で実施可能とし省スペース化、高機能化を実現した。

6 始動装置

揚水起動用のサイリスタ始動装置は、入力側と出力側に各々変圧器を設けることで、低い定格電圧のサイリスタ変換器を採用し、コストダウンを実現している。

始動装置の主な仕様は、次のとおりである。

- (1) 入力側変圧器 22.2 MVA - 16.5 kV / 7.5 kV
- (2) サイリスタ変換装置 16 MW - 8.3 kV (直流)
- (3) 出力側変圧器 21.3 MVA - 7.2 kV / 16.5 kV

7 あとがき

主要機器の設計を2002年より開始し、2004年12月の4号機主機据付け開始を経て、2008年1月に全台商業運転開始となったものであり、海外向け揚水発電所の主要機器を一括して納入する機会に恵まれたことは貴重な経験となった。

地球温暖化対策や世界各地での電力不足などから、今後とも世界的に水力発電所に対する需要は継続していくと考えられ、当社はブルリア揚水発電所で得た経験を生かして、更に顧客満足度の高いプラント建設業務を取り進めていく。

文献

- (1) Sugishita, K., et al. "Experimental study to eliminate a surge chamber from long tailrace tunnels of high head pumped storage power plants". Proc. Hydro2000, Berne, 2000-10, Aqua-Media International, 2000, p.555 - 564.



池田 親正 IKEDA Chikamasa

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部課長。
水力発電所のプラントエンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



手塚 光太郎 TEZUKA Kotaro

電力システム社 京浜事業所 水力機器部主務。
水車・ポンプ水車の水力設計・ランナ設計に従事。
日本機械学会、ターボ機械協会会員。
Keihin Product Operations



坂本 茂 SAKAMOTO Shigeru

電力システム社 府中事業所 発電制御システム部主務。
水力発電所の制御機器設計に従事。
Fuchu Complex