

中国市場における水車・発電機技術

Technologies for Hydraulic Turbines and Generators for Chinese Market

辻 正義 雷 貼錦 唐 鳳姣

■ TSUJI Masayoshi ■ LEI Tiejin ■ TANG Fengjiao

世界最大の水力市場である中国において、東芝は中国製造拠点である東芝水電設備（杭州）有限公司（以下、THPCと呼ぶ）を通じ、清水塘発電所の大口径バルブ水車発電機、大盈江発電所のスプリッターランナを適用した水車、深溪溝発電所、功果橋発電所、及び董箐発電所の大容量発電機などの発電設備を製造し、一部発電所は運転を開始している。

THPC工場では、大型機械加工機を導入し、現在では600 MW級の発電設備が製作できる。これに伴い、自動化を含めた大型ランナ製造技術の開発も実施している。

Toshiba has been supplying hydroelectric equipment to the Chinese market, the world's largest hydroelectric market, through Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd. (THPC) in China. Up to now we have been supplying the Qingshuitang Hydropower Station with large-scale bulb turbines and generators, the Dayingjiang Hydropower Station with hydraulic turbines using a splitter runner, and each of the Shenxiguo, Gongguoqiao, and Dongqing hydropower stations with large-capacity generators.

To meet the future requirements of the Chinese market, we have introduced large-scale manufacturing facilities for hydroelectric equipment of 600 MW-class capacity at the THPC factory, and have been developing a manufacturing technology incorporating an automation system for large-scale runners.

1 まえがき

水力発電所の建設は、世界的には新興国を中心として増加しており、なかでも中国がその半数以上を占めている。

東芝は、中国における製造拠点としてTHPCを2005年に設立し、中国ユーザーのニーズに合致した機器を提供している（図1）。ここでは、これらの発電機器とその特長について述べる。

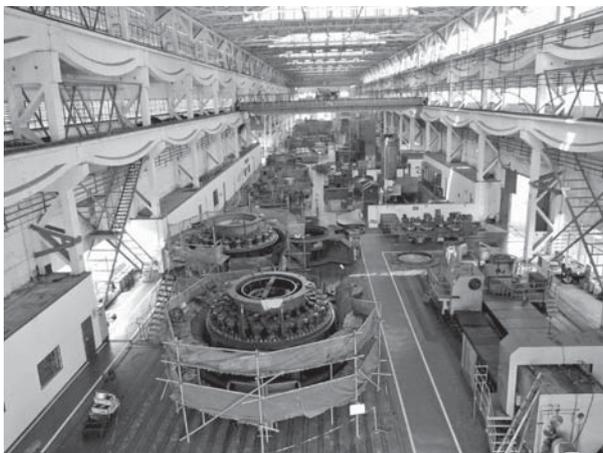


図1. THPC工場の製作現場 — 多数の水力発電機器を製作中である。
Manufacturing at THPC factory

2 大容量バルブ水車発電機

中国では低落差の発電所が多く、バルブ水車発電機が採用されるケースが多い。ここでは、当社が納めたバルブ水車発電機の中でも大口径機である、清水塘発電所の水車及び発電機に採用した技術について述べる。清水塘発電所の水車及び発電機の主な仕様を表1に示す。

2.1 水車

清水塘発電所の水車は、回転子及びランナの外径がそれぞれ7.75 m及び7.5 mと中国国内でもっとも大きいバルブ水車

表1. 清水塘発電所向け水車及び発電機の主な仕様

Specifications of hydraulic turbine and generator at Qingshuitang Hydropower Station

項目		仕様
水車	型式	横軸円筒可動羽根プロペラ水車（バルブ水車）
	出力	32.83 MW
	落差	9.5 m
	回転速度	62.5 min ⁻¹
	比速度	883 m-kW
発電機	型式	横軸回転磁気水冷熱交換器三相交流発電機
	容量	33.68 MVA
	電圧	10.5 kV
	力率	0.95
台数	4	
運転開始（年）	2008	

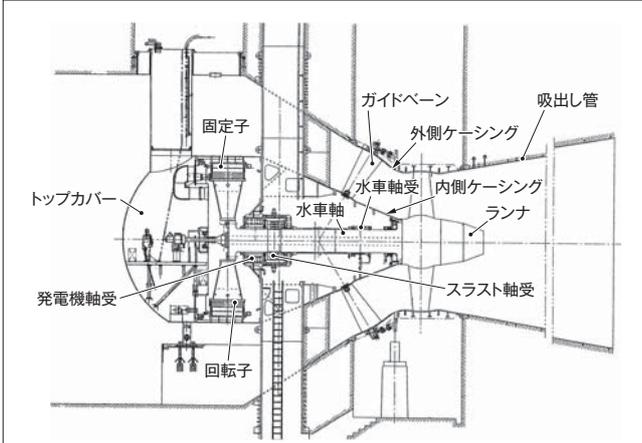


図2. 清水塘バルブ水車発電機の断面図 — この水車発電機は、回転子外径7.75 m及びランナ外径7.5 mの大直径機である。
Cross-sectional view of bulb generator at Qingshuitang Hydropower Station

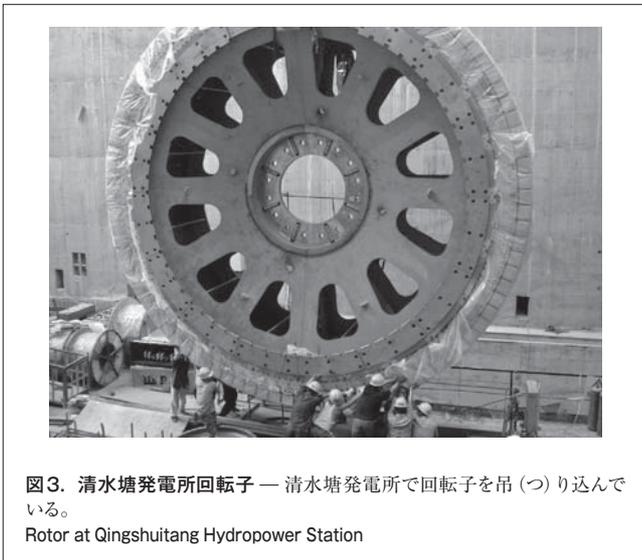


図3. 清水塘発電所回転子 — 清水塘発電所で回転子を吊(つり)り込んでいる。
Rotor at Qingshuitang Hydropower Station

の一つである(図2, 図3)。軸系には2点支持(水車ガイド軸受と発電機ガイド軸受)の発電機回転子オーバークラック構造を採用している。また、このクラスのバルブ水車ガイド軸受は大荷重を受けることから、四フッ化エチレン樹脂(PTFE)軸受のセグメントパッドを適用している。更に、水車軸の上下の動きに追従できるよう、軸受台はキーによって無拘束支持^(注1)としている。

2.2 発電機¹⁾

2.2.1 大容量, 低回転速度の発電機電気設計 バルブ水車発電機は、流路の制約から、立軸発電機と比較して直径が20～30%小さく、固定子鉄心長さが30～40%長い。電気設計では、固定子と回転子のエアギャップ、固定子スロット

(注1) 水車ガイド軸受を、キーをガイドとして軸受支持台に固定及び拘束することなく支持すること。

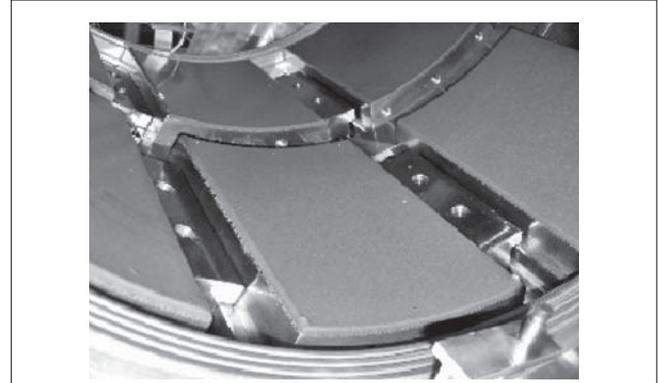


図4. セグメントパッドガイド軸受 — PTFE軸受を用いることで、単位荷重耐力の増大と静止摩擦係数の低減を図ることができる。
Segment type guide bearing

の深さ、幅及び磁極鉄心のチップ、ボディーの形状寸法などを総合的に考慮し、合理的な電気負荷とリアクタンスを決定した。

2.2.2 通風冷却技術 バルブ水車発電機は回転速度が低く、また、直径が立軸発電機と比較して小さいため、冷却通風ダクトが狭く、風損抵抗が大きい。このことから、回転子ラジアル通風だけでは発電機の冷却に必要な風量、風圧を満足することが難しく、外部設置の電動ファン強制通風冷却方式を用いた結果、冷却風量と風圧を確保することができた。

2.2.3 発電機軸受構造 発電機軸受は、ブラケット、ガイド軸受、スラスト軸受などで構成され、水車の内筒に設置される軸受ブラケットで支持される。軸受ブラケットは円盤式の溶接構造であり、ガイド軸受を回転子に近づけ、ガイド軸受への荷重と主軸のたわみを減少させた。順方向と逆方向のスラスト軸受はそれぞれ12枚のセグメントパッドであり、順方向スラスト軸受はスラスト軸受台と板バネ支持体で構成した。

2.2.4 ガイド軸受構造 ガイド軸受にはPTFE軸受を用い、セグメントパッドは軸方向に2列で配置し合計10枚で構成した(図4)。表面の静止摩擦係数が小さい樹脂軸受パッドにより、始動と停止の際のオイルリフト運転を不要にした。

3 スプリッターランナ水車

中国では安定性に優れた水車が望まれている。特に高落差の水車では、スプリッターランナが従来ランナより高い性能を備えており、効率の向上及び水圧脈動が低減できる。ここでは、大盈江発電所や江辺発電所の水車(表2)に適用したスプリッターランナについて述べる。

スプリッターランナは、図5に示すように通常の羽根の間に短い中間羽根を配置したランナで、羽根一枚当りの翼負荷の軽減と通常羽根の間の流れを整流する効果によって、部分負荷効率の向上と変落差特性の改善を図ることができる。

フランス水車の部分負荷運転では、ランナの翼作用に対

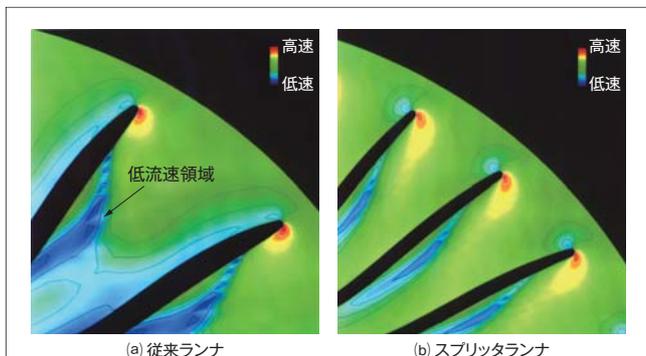
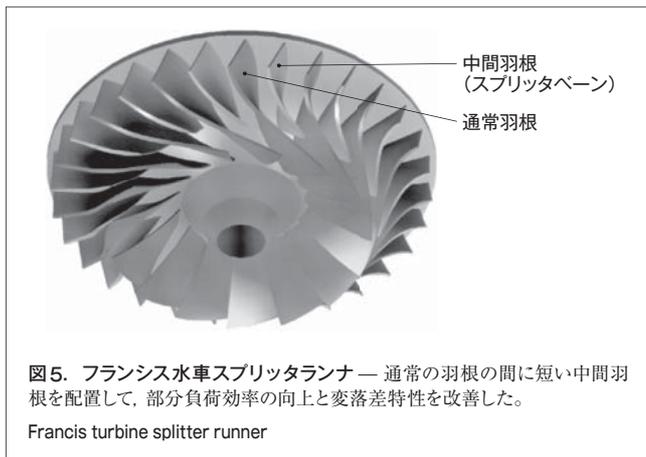
表2. 大盈江発電所及び江辺発電所の水車の主な仕様

Specifications of hydraulic turbines at Dayingjiang and Jiangbian hydro-power stations

項目	仕様	
	大盈江	江 辺
水車型式	立軸単流渦巻フランシス水車	
出力 (MW)	175	112.5
有効落差 (m)	289	272
回転速度 (min ⁻¹)	300	333.3
比速度 (m-kW)	105.3	101.2
台数	4	3
運転開始 (年)	2009	2011 (予定)

して遠心力作用が相対的に増加し、ランナ出口部に向かってバンド側に偏った流れが生じやすくなる。

これらの流れは、ランナ内の流れの乱れによる損失(2次流れ損失)と吸出し管の損失を増加させる要因となる。スプリッターランナは、この偏った流れを改善できるため、部分負荷の効率を改善することができる。流れ解析を用い部分負荷時



におけるスプリッターランナ羽根入口部の流れを、従来ランナの場合と比較した結果を図6に示す。羽根の整流効果によって羽根の偏り流れが大幅に改善されることがわかる。

4 立軸大容量発電機

中国では低落差で大容量の発電所が多く、発電機は低回転速度・大直径機となる。当社は、表3に示すような大容量発電機を製作し納入している。一例として、董箐発電所に納めた発電機の回転子を図7に示す。ここでは、これらの発電機に適用した技術について述べる。

4.1 現地溶接回転子スポークと回転子リム

低落差・大容量発電機の回転子スポークは大直径となり、輸送上の制約から、工場で一体に組立てて出荷できないことが多い。このような場合中国では、回転子スポークの分割片を現地で溶接して一体化する構造を要求されることが多い。これに対応するため、現地溶接回転子スポークを開発した(図8)。

回転子スポークの組立て方式として、当社はフローティングリム方式を標準にしているが、中国では、定格回転速度以上でもリムがスポークから遊離しないよう焼嵌(やきば)めりム方

表3. 大容量発電機の主な仕様

Specifications of large-capacity generator

項目	仕様			
	深溪溝	功果橋	亭子口	董 箐
発電機型式	立軸回転界磁水冷熱交換器三相交流発電機			
容量 (MVA)	183.34	250	305.6	244.4
電圧 (kV)	15.75	15.75	15.75	15.75
力率	0.9	0.9	0.9	0.9
回転速度 (min ⁻¹)	90.9	93.8	100	166.7
台数	4	4	4	4
運転開始 (年)	2010	(2011)	(2014)	2009

* () は予定



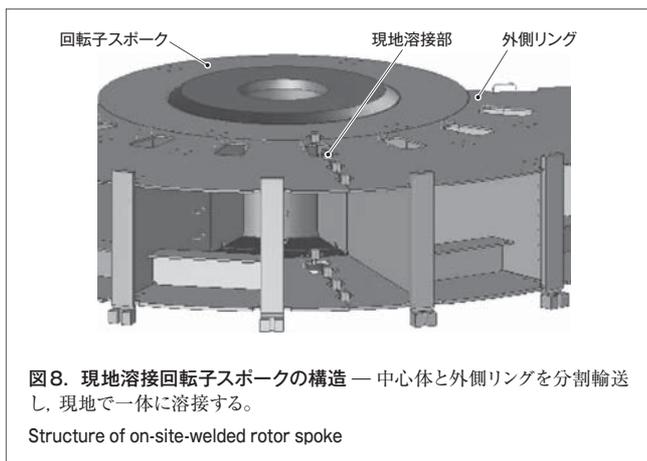


図8. 現地溶接回転子スポークの構造 — 中心体と外側リングを分割輸送し、現地で一体に溶接する。

Structure of on-site-welded rotor spoke

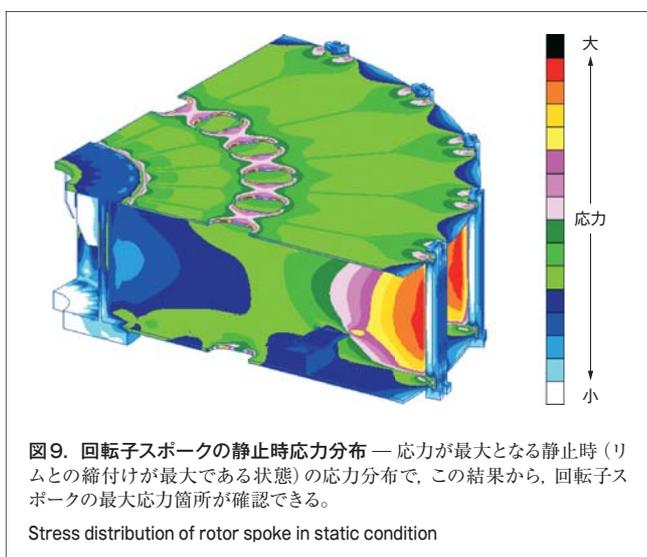


図9. 回転子スポークの静止時応力分布 — 応力が最大となる静止時（リムとの締付けが最大である状態）の応力分布で、この結果から、回転子スポークの最大応力箇所が確認できる。

Stress distribution of rotor spoke in static condition

式を要求されることが多い。このため、スポークの半径方向の縦骨を斜めに配置し、リムの焼嵌めによる圧縮力を吸収する構造を開発した。回転子静止時でのスポークの応力分布をFEM解析した結果を図9に示す。これにより回転子スポークの最大応力箇所が確認でき、最適な構造設計ができる。

これらの現地溶接回転子スポーク技術と焼嵌めリム方式構造は、深溪溝発電所、功果橋発電所、及び亭子口発電所へ納入する発電機に適用した。

4.2 固定子鉄心締付け技術

中国では、固定子鉄心を強固に締め付ける方法として、鉄心にボルトを通して締め付ける方法を要求されることが多い。このため当社は、ダブルダブルテールキーによる固定子鉄心の位置決め技術、及び固定子鉄心押え板と通しボルトによる鉄心締付け技術を確立した。この固定子鉄心締付け構造は功果橋発電所と亭子口発電所に適用した。

4.3 固定子高電圧コイル製造技術

当社の固定子コイルには、レジンリッチテープを真空タンク内で加熱して液圧硬化させる真空液圧硬化レジンリッチ絶縁

方式を採用している。THPCにおいてもテーピングマシンや真空タンク設備を導入し、わが国で製造するのと同等の性能を持つ15.75 kV級のコイルを、中国国内で調達する材料を用いて製造できるようにした。一方、大容量機では20 kV級コイルの要求もあり、絶縁破壊電圧の向上や表面電位制御方法の開発を行って20 kV級コイルの実用化開発を完了した。

4.4 スラスト軸受用スプリング

当社のスラスト軸受はスプリングで支持している。スラスト軸受は水車発電機の重要な部位の一つであり、スプリングに要求される寸法精度や機械強度の仕様は厳しい。当社は中国メーカーと協力し、十分な寸法精度と機械強度を持つスプリングを開発し、中国国内で製造できるようにした。

5 あとがき

当社はこれまでに、中国市場で最大300 MW級の水力発電設備を受注し、現在、設計及び製作を進めている。THPCにおいては、大形機械加工機を導入し、現在では600 MW級の発電設備を製作できる。これに伴ない、自動化を含めた大型ランナの製造技術の開発も実施している。また、水車模型試験所を新たに建設し稼働を始めた。

今後も中国での水力発電所の建設は増えていくものと予想され、それらユーザーのニーズに合致するよう、いっそうの技術開発を推し進め、信頼性が高く高性能な発電設備を提供していく。

文 献

- (1) 呉 金水, ほか. “低回転速度大容量バルブ水車発電機電気設計”. 第十七回中国水電設備學術検討会論文集. 杭州, 2009-10, 中国水力発電工程学会水力機械専門委員会及び中国電機工程学会水電設備専門委員会. 中国水利水電出版社, 2009, p.247-250.
- (2) 佐藤晋作. 中国水力プロジェクトの取組み. 電気評論. 93, 12, 2008, p.40-45.
- (3) 向井一馬, ほか. 中国市場向け水力発電機器の大容量化技術. 東芝レビュー. 64, 9, 2009, p.57-61.



辻 正義 TSUJI Masayoshi

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主査。水車発電プラントのエンジニアリング業務に従事。日本機械学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



雷 貼錦 LEI Tiejin

東芝水電設備（杭州）有限公司 水機部 水車構造設計主査。水車の構造設計に従事。中国浙江省水力発電工程学会会員。Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd.



唐 鳳姣 TANG Fengjiao

東芝水電設備（杭州）有限公司 電機部 発電機構造設計主幹。水車発電機的设计に従事。

Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd.