

中国市場向け 水力発電機器の大容量化技術

Technologies for Large-Scale Hydroelectric Generation Equipment for Chinese Market

向井 一馬 篠原 朗 陳 梁年

■ MUKAI Kazuma ■ SHINOHARA Akira ■ CHEN Liang Nian

地球温暖化対策に有効な再生可能エネルギー活用の一つの手段として、水力発電所の建設が増加している。最近の新設水力発電所の63%は中国で建設されており、特に流量が多い河川で大規模な発電所の建設が進められている。これらの発電所に設置される水車及び発電機は低落差・大容量の機器であり、構造面及び製造面で特有の技術が必要となる。

東芝は、中国における水力発電機器の製造拠点である東芝水電設備(杭州)有限公司(以下、THPCと略記)と協同で、ランナやロータースポークの新しい製造方法、リングゲート構造、高電圧・高品質コイルの製造技術など、水車及び発電機の大容量化技術の開発を進めるとともに、THPCにおける製造設備の強化を進めている。

Effective utilization of renewable energy as a measure against global warming has been driving the expansion of hydroelectric power generation. Recently, 63% of newly built hydroelectric power stations in the world have been constructed in China. In particular, large-scale hydroelectric plants are to be constructed on rivers with large volumes of water flow. These plants must therefore be equipped with many large-capacity and low-head turbines and generators.

To fulfill these requirements in the Chinese market, Toshiba, in cooperation with Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd. (THPC) in China, has been actively focusing on these Chinese projects with technologies especially for the development of large-capacity and low-head turbines and generators.

1 まえがき

水力発電所の建設が増加するなかで、最近では世界全体の半分以上が中国で建設されている。中国の水力発電所には大容量機が多く、また、そのほとんどは落差の低い河川に建設されるため、回転速度が低く直径の大きい水車ランナや発電機が必要になる。こうした機器では、輸送上の制限を解決するために現地でランナやロータースポークを溶接して組み立てる製造方法、入口弁を省略したリングゲート構造の採用、高電圧・高品質コイルの製造技術、大型機械の加工設備などが必要となる。

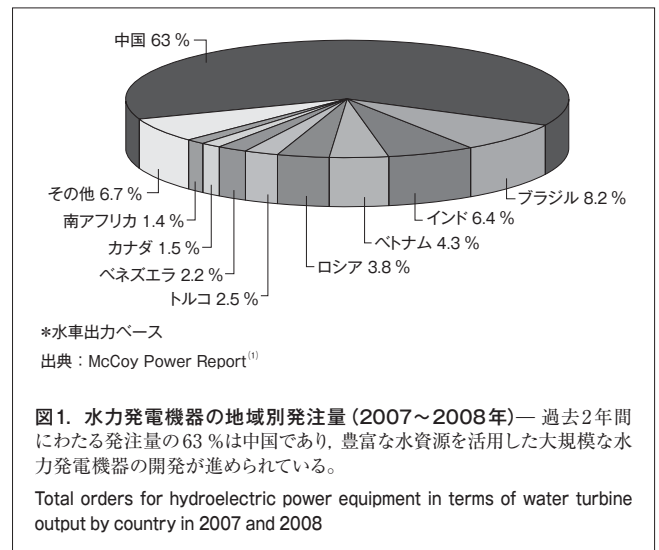
東芝は、これらを実現するための技術開発をTHPCと協同で進めている。ここでは、中国における水力発電機器の市場ニーズに応えるために必要な技術開発とその適用例、及び中国の製造拠点THPCにおける製造設備の強化について述べる。

2 中国における新設水力発電所の動向

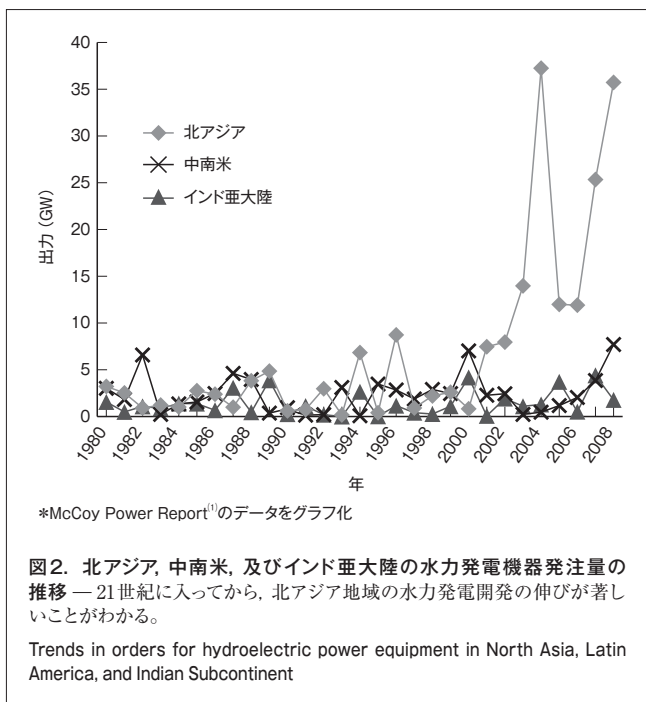
2.1 世界の水力発電の開発状況

世界の電力需要は今後も増加していくものと推測され、それに伴い水力による発電電力量も増加していくと予想されている。

過去2年間にわたる水力発電機器の地域別の発注量を図1に示す⁽¹⁾。発注量は水車出力ベースで年平均48.5GWであり、そのうちの63%を中国が占める。



発注量の上位3位までを含む各地域における水力発電機器の過去の発注量推移を図2に示す。21世紀に入ってから北アジア地域で著しく増加している。北アジア地域には中国のほか、日本や韓国などが含まれてはいるが、大半は中国であり、水力発電機器の新設市場として世界的にもっとも大きく、かつ増加している。電力設備の多くを石炭火力に依存する中国では、二酸化炭素(CO₂)排出量を抑制するため、高効率の大型火力発電や原子力発電に加え、水力発電についても、豊富な水資源を生かした多くの建設が今後も続くと考えられる。



2.2 中国市場の動向

中国の水資源のうち、理論上の利用可能な水力エネルギー量（包蔵水力）は694 GWと言われており、このうち技術的には542 GW、経済的には402 GWの発電所建設が可能とされる⁽²⁾。中国における建設済みの水力発電所容量は2008年末で171.5 GWと、技術的に発電所建設が可能な包蔵水力の約30%である。2020年には328 GW（同約60%）に達すると予測され、今後、平均13 GW/年のペースで水力発電所が建設されることになる。

また、2008年末に運転中の単機容量が500 MW以上の機器は、三峡発電所26台、龍灘発電所7台など合計39台で26.4 GWであり、水力発電機器の総据付け容量の15.4%となる。単機容量が500 MW以上の機器は、2020年末までに合計119台で79.4 GW建設される計画であり、水力発電の新設容量の約51%を占める。

地域としては、「西部大開発」、「西電東送」の方針のもとに金沙江や、雅砻江、瀾滄江などの流域で加速的に建設されている。発電所の据付けスペースの制約で機器の台数が限られることから、単機容量がこれまでのものより大きい機器の開発が必要となっている。特に、単機容量が700 MWである三峡発電所の建設は大容量機の開発を更に推し進め、現在計画中の烏東徳発電所と白鶴灘発電所では、1,000 MWの機器が研究されている。

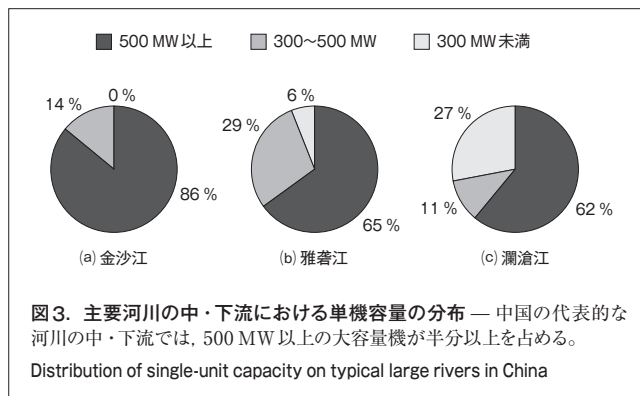
金沙江、雅砻江、及び瀾滄江流域の中・下流の水力発電量を表1に、その単機容量の分布を図3に示す。この三つの流域において、単機容量が500 MW以上の機器の総容量は、全体の60%を超える⁽²⁾。

表1. 主要河川の水力発電量の概要

Outline of development plans and generating capacities for typical large rivers in China

河川	発電所数*	総容量* (①) (GW)	500 MW以上の容量* (②) (GW)	比率 (②/①) (%)
金沙江中・下流	12	65.2	56.3	86
雅砻江中・下流	11	26.3	17.1	65
瀾滄江中・下流	8	16.3	10.1	62

*発電所数と容量は、建設済みと計画の合計



このような単機容量の増大により、発電所建屋のコンパクト化に加え、土木建設及び機器のコスト低減、工期の短縮、運転保守及び点検補修費用の低減など、経済的な利益も生じている。

3 低落差・大容量の水車技術

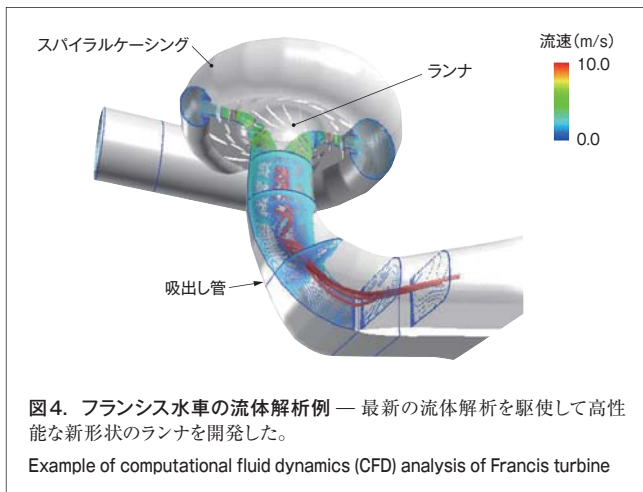
3.1 水車性能の動向

落差が比較的低く、大容量の機器を備えた水力発電所の計画が多い中国では、水車の機種ごとに以下のような需要がある。

- (1) フランシス水車 単機容量が200 MW以上の大容量で、かつ落差が100 m未満と低落差のもの
- (2) カブラン水車 単機容量が100 MW以上と、この機種としては比較的大容量のもの
- (3) バルブ水車 落差が20 mを超す、この機種としては高落差のもの

当社は各機種の水車ラインアップを充実するよう開発を続けている。いずれの機種においても、効率の向上だけでなく、水圧脈動特性やキャビテーション性能の改善など水車の安定運転を重視した開発を行っており、流体解析を用いて水車静止部を含む流路全体を最適化し、模型検証試験を行っている⁽³⁾。

例えば、フランシス水車のランナ設計では、流体解析を用いたランナ設計パラメータの最適化を実施して以下をはじめとする技術的目標を達成し、従来の形状よりも高性能な新形状のランナを開発した（図4）。



- (1) 設計点でのランナ内部での偏り流れの抑制と、それに伴うランナ出口での流速分布の一様化
- (2) 部分負荷運転点における羽根入口付近での流れの離れ抑制

3.2 現地溶接組立てランナの採用⁴⁾

低落差・大容量の発電所に適用するフランシス水車の大型ランナの場合、輸送可能な大きさが制限されるため、機器を据え付ける発電所の近くにランナ製造工場を建設して、溶接で組み立てることがある。ここでは、こうした目的で建設した工場（以下、現地工場と呼ぶ）でランナを製造する功果橋発電所の例を述べる。

功果橋発電所は、単機出力230 MW、落差66 mのフランシス水車4台を備える大型発電所で、ランナは外径が約7 m、質量が約150 tで、材料には13クロム高ニッケルのマルテンサイト系ステンレス鋳鋼が採用されている。発電所は雲南省西部にあり、輸送の制約からランナを構成するクラウン、バンド、及び羽根をそれぞれ単品で製造し、個別に現地工場に輸送している。

現地工場は、ランナ羽根組立て、溶接、熱処理、機械加工、及びバランス試験を含む検査を実施するのに必要なすべての設備を備えている。各設備は功果橋発電所の仕様に合わせて選定したもので、クレーンは工場建屋へ加わる荷重を抑えるためにガントリー式とし、熱処理炉と機械加工設備は組立て式で、特に機械加工設備は加工部位に合わせて組み合わせる方式としている。また、2台のランナを同時に製造できる設備配置としている。なお、大型のランナを現地で溶接組立てするための製造技術として、溶接条件の検証試験や溶接時の変形挙動解析を事前に行い、設計及び製造に反映した。

3.3 リングゲートの開発

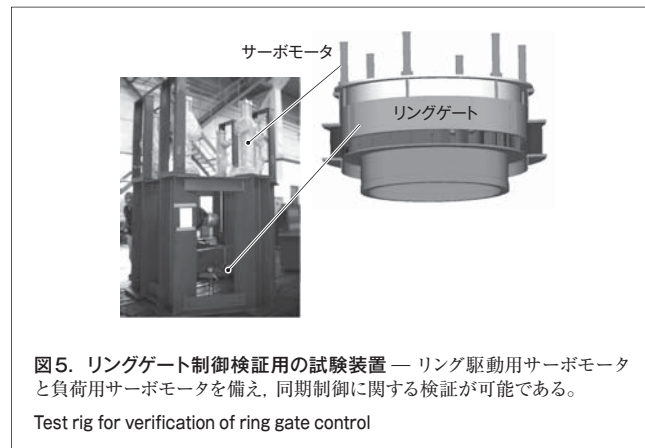
一般に、落差が70～130 m程度のフランシス水車において、通常の入口弁に代わりリングゲート（円筒型の流路遮断リング）をステーバーンとガイドバーン間に設置し、このリングゲート

を上下させて流水及び封水する構造が適用されることがある。リングゲートは、大型のものでは直径が10 m近くになる重量構造物であるが、通常の入口弁と比較して、土砂による摩耗が発生しにくい、入口弁の設置スペースが省略できるなどのメリットから、中国で採用されることが多い。このようなニーズに対応できるリングゲートを開発した。

リングゲートを円滑に制御するポイントは、そのリング本体を複数のサーボモータで上下させるときの同期制御方法にある。従来は各サーボモータをチェーンなどを用いて機械的に連結して同期制御を行っていたが、当社は、各サーボモータのストロークを電気的に検出してフィードバックし、制御装置により個別にサーボモータを制御する電気油圧制御方式を開発し、採用した。

制御方式の検証のため、図5に示す簡易的な試験装置を製作し、制御のロジック、非同期時の対応などの制御機能を十分に検証した。

また、水車性能検証用の水車模型試験装置を用いて、流水遮断相当時にリングゲートに加わる流体力も測定し、実機の設計に反映させた。



4 低速・大容量発電機の技術

4.1 現地溶接ロータスポークの開発

落差の低い発電所に設置される水車発電機は回転速度が低いためにポール数が多くなり、大容量機では、ロータの直径が15 mを超え、円板形状のロータスポークも直径10 mを超えるような大型の発電機となる。工場でこれを一体に組み立てて出荷することは、輸送上の制限から困難である。中国では、ロータスポークの分割片を現地で溶接して一体化し、焼鈍を行わないで組み立てる構造を要求されることが多く、このようなニーズに対応した現地溶接ロータスポークを開発した（図6）。

このために必要な主な技術は、次のとおりである。

- (1) 現地溶接時に、熱ひずみによる変形量を最小にするため、変形量を測定しながら行うバランス溶接

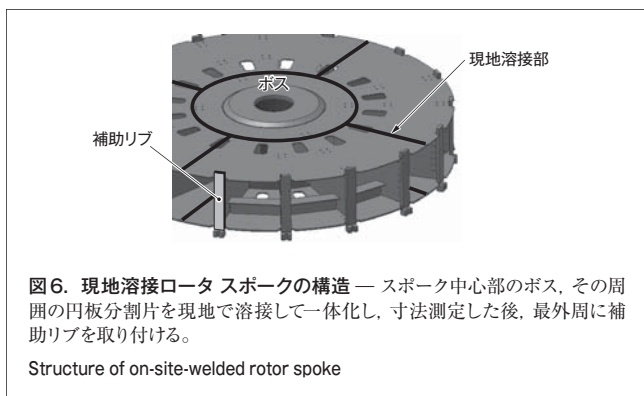


図6. 現地溶接ロータースポークの構造 — スポーク中心部のボス、その周囲の円板分割片を現地で溶接して一体化し、寸法測定した後、最外周に補助リブを取り付ける。

Structure of on-site-welded rotor spoke

(2) スポーク円板を溶接後、変形量を寸法測定し、外周側に補助リブを加工して取り付けるための構造と取付け方法
これらの技術により、ロータースポークは、下部軸に接続する中心部分のボスを工場ですべてに製造し、その外周側の円板部分は扇形の分割片として製造することとした。ボスと分割片を工場ですべて組み立てて機械加工後、再度分割して出荷する。この開発を通じて、工場製作要領、現地製作要領、現地溶接要領、及び寸法管理方法を確立し、実機へこれらを適用した。

また、ロータリム組立て方式として、当社はリムを焼ばめしないフローティングリム構造を標準としているが、中国では定格速度以上でもリムがスポークから遊離しない焼ばめ方式を要求されることが多い。これに対しては、スポークの半径方向の縦骨を斜めに配置し、リムの焼ばめによる圧縮力を吸収する構造を開発し採用した。

4.2 ステータ鉄心通しボルト締めつけ構造の開発

ステータ鉄心を強固に締めつける方式として、中国では鉄心にボルトを通して締めつける方式が要求されることが多いことから、この通しボルト締めつけ方式を開発した。

磁束が通る鉄心にボルトの貫通穴を開けた構造では、鉄心内部の磁束分布が変わり鉄損や界磁電流が増加するため、図7に示すような3次元(3D)電磁界解析による定量評価を

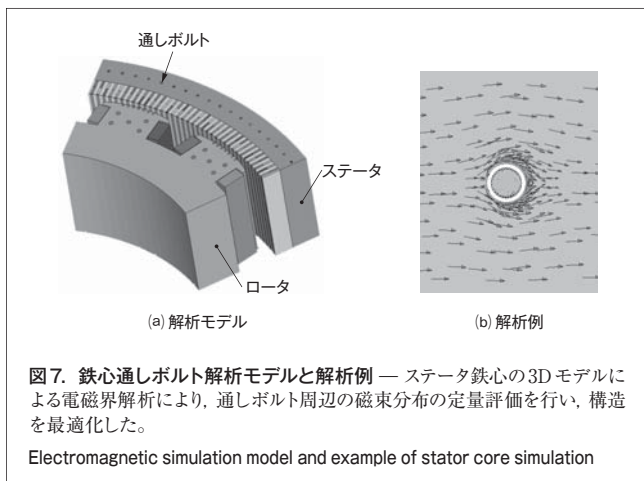


図7. 鉄心通しボルト解析モデルと解析例 — ステータ鉄心の3Dモデルによる電磁界解析により、通しボルト周辺の磁束分布の定量評価を行い、構造を最適化した。

Electromagnetic simulation model and example of stator core simulation

行った結果を基に最適な構造を決定した。

4.3 高電圧・高品質ステータコイルの開発

大容量発電機には高電圧のステータコイルが要求されることがある。当社は、コイルの製造方法として、レジンリッチマイカテープを真空タンク内で加熱して液圧硬化させるVPR(真空、液圧硬化、レジンリッチ絶縁)製造技術を持っている。この技術を適用して製造した定格27kVの発電機を中国へ納入した実績を基に、THPCにもテーピングマシンやVPRコイル製造用の真空タンク設備(図8)など当社と同じ製造システムを導入した。これにより、中国国内で調達する材料を適用して、当社と同様な性能を持つ15.75kV級コイルの製造技術を確認した。更に現在、20kV級コイルの製造技術の確立に向けて、絶縁破壊電圧の向上や表面電位制御方法の開発を進めている。



図8. VPRコイル製造用真空タンク設備 — 真空タンク内でレジンリッチ絶縁コイルを加熱、液圧硬化させ、信頼性の高いステータコイルを製造する。
Vacuum tank facility for manufacturing high-quality resin-rich insulated coils

5 製造拠点の強化

中国市場の増大や市場ニーズに対応して、当社では製造拠点であるTHPCの工場設備を強化している。

5.1 大規模な新電気工場の建設

発電機の大容量化や市場の増大に対応するため、発電機のコイルや鉄心を製造する電気工場の面積を従来の2.5倍に拡張し、2008年11月から運用を開始した(図9)。

新電気工場の建屋面積は約9,000m²で、コイル製造用のテーピングマシン、真空タンク設備、リム板やポール製造用のレーザカッター、プレス装置など最新の製造設備を導入した。

5.2 大型機械設備の導入

低落差・大容量機は大型の機械となり、その製造に対応するために必要な設備を計画的に導入している。第1段階として2006年に、既存の大型機械組立工場を約50m延長し、新たに10m立て旋盤及び12m横旋盤を導入した。次いで2009年



図9. THPCの新電気工場 — 建屋面積を従来の2.5倍に拡張して最新製造設備を設置し、大容量発電機用電気品の製造を可能にした。

New electric parts shop of THPC factory

前半に、この工場を更に約140 m延長し、250 tクレーンを設置した。最終的には、20 m及び12.5 mの立て旋盤、14 m横旋盤、大型横中ぐり盤2台を導入し、工場の設備強化を完了する予定である。

6 あとがき

中国の大規模な水力発電所に設置する水車及び発電機の特徴である低落差で大容量の機器に対応するため、当社とTHPCは必要なすべての技術開発を実施し、また、製造設備の増強も行っている。更に、従来当社で実施してきた水車性能を検証する模型試験の対応力を増強するために、THPC内に模型試験設備を建設中である。

今後とも、東芝グループの総力を結集して、中国の市場ニーズに合致する大容量機の開発を進めていく。

文献

- (1) McCoy, Jr., R. W. "McCoy Power Reports, Hydro Turbines & Generators. 2008". <<http://www.mccoypower.net/index.htm>>, (accessed 2009-07-01).
- (2) 梁維燕, "中国大型水電機組製造工業的成就与展望". 第二届水力発電技術国際会議論文集. 北京, 2009-04, 中国水力発電工程学会, 中国三峡工程開発総公司 (連合主催). 中国電力出版社, 2009, p.2-5.
- (3) Nakamura, K. Kurosawa, S. Design Optimization of a High Specific Speed Francis Turbine Using Multi-Objective Genetic Algorithm. International Journal of Fluid Machinery and Systems. 2, 2, 2009. <<http://www.jstage.jst.go.jp>>, (accessed 2009-07-01).
- (4) 佐藤晋作. 中国水力プロジェクトの取り組み. 電気評論. 93, 12, 2008, p.40-45.



向井 一馬 MUKAI Kazuma

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主幹。揚水発電プラントのシステムエンジニアリング業務に従事。電気学会, CIGRE会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



篠原 朗 SHINOHARA Akira

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

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



陳 梁年 CHEN Liang Nian

東芝水電設備(杭州)有限公司 総工師 教授高級工師。水力機械の設計・製造技術の開発に従事。中国水車標準化技術委員会委員, 中国電力建設専門家。

Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd.