

水力発電機器製造 120年の歴史と今後の展望

Toshiba's 120-Year History of Manufacturing Hydroelectric Power Generation Facilities and Future Approaches

森 淳二 久保 徹 手塚 光太郎

■ MORI Junji ■ KUBO Toru ■ TEZUKA Kotaro

東芝の水力事業は、1894年にわが国初の事業用水力発電所に水車発電機を納入してから120年の歴史がある。1940年に水豊発電所に納入した水車及び水車発電機は当時の世界最大容量機で、その後、水力発電所及び揚水発電所が大規模化していくなかで、当社は記録的な水力発電機器を製造してきた。当社は、可変速揚水発電システムを1990年に世界で初めて実用化し、現在は世界最大容量となる可変速揚水発電システムを建設中である。水力発電は、もっとも利用されている再生可能エネルギーによる発電であり、また発電電力が天候などにより変化する風力や太陽光など他の再生可能エネルギーによる発電と組み合わせることで、電力システムの安定化にも寄与するため、今後もいっそうの発展が期待される発電システムである。

Hydroelectric power generation is expected to further expand not only as the most widely used renewable energy source, but also due to its high responsiveness in maintaining stable power supply by compensating for power fluctuations resulting from the use of other renewable energy sources such as wind and photovoltaic systems that are affected by weather conditions.

Toshiba has been engaged in the hydroelectric power business for 120 years since Shibaura Engineering Works Co., Ltd. (now Toshiba Corporation) manufactured Japan's first utility hydraulic generator for Japan's first commercial hydroelectric power station in 1894. In 1940, we supplied the world's largest capacity hydraulic turbine generators for the Suiho Power Station in Korea. Since then, with the increase in larger scale hydroelectric and pumped-storage power stations, we have manufactured and supplied record-breaking numbers of hydroelectric power generation facilities. Furthermore, we have realized the practical application of an adjustable-speed pumped-storage system for the first time, contributing to the stabilization of power systems connected with other renewable energy sources, and are now constructing the world's largest capacity system of this type.

1 まえがき

わが国最初の事業用水力発電所である京都水利事業所蹴上発電所の発電機器は、ほとんどが米国や欧州から輸入されたものであった。(株)芝浦製作所(現東芝)が唯一の国産発電機として1894年に製造した60kW二相交流発電機は、翌年6月に同発電所の15号機として8台目に据え付けられた。これが、国産初の事業用水力発電機器である。水車製造は1900年に開始され、1901年に信濃電気(株)米子発電所へ当社1号機を納入した。

当社の水力事業は、約120年続いており、数ある事業の中でも歴史のある事業の一つに数えられている。1940年に、東芝レビューの前身である芝浦レビュー(第19巻第9号)で当時世界最大を誇った鴨緑江水力発電(株)水豊発電所納入100,000kVA水車発電機の完成を紹介している⁽¹⁾。ここでは、その水車発電機の定格諸元と構造をレビューするとともに、その後の水力発電技術の発展の歴史と今後の動向について述べる。

2 100,000 kVA 水車発電機

水豊発電所の1台目の水車発電機は、1940年6月に工場で作成した。この水車発電機は、当時では世界最大容量であ

り、その製造には研究、開発、及び検証を重ね、当時最新の技術を投入するとともに、新工場を建設して1号機を組み立て、回転試験を実施して最終検証まで行っている。水車は、当時の(株)電業社原動機製造所(1955年に水車部門が当社に吸収合併)が納入している。

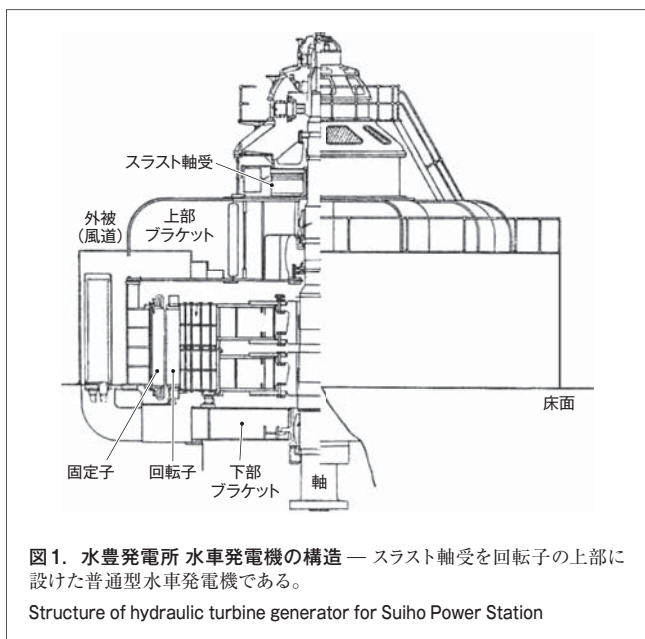
水車発電機の定格諸元を表1、構造を図1に示す。今から70年以上も前に設計し製造した水車発電機であるが、基本的な構造と部品構成は、現在のものとあまり変わらない。しかし、一つひとつの部品を見ていくと、やはり現在の技術の進歩がよくわかる。それを如実に表しているのが、機器重量である。

現在で言う普通型の水車発電機で、回転子の上部に、水車を含む回転部の重量を支えるスラスト軸受を設けており、その

表1. 水豊発電所 水車発電機の定格諸元
Ratings of hydraulic turbine generator for Suiho Power Station

| 項目 | 仕様 |
|--------|---------------------------|
| 極数 | 48極 |
| 定格容量 | 100,000 kVA |
| 定格電圧 | 16.5 kV |
| 定格回転数* | 125/150 min ⁻¹ |
| 定格周波数* | 50/60 Hz |
| 定格力率 | 0.9 |

* 50 Hz専用機、60 Hz専用機と50 Hzと60 Hzの両用機がある。



荷重は1,190 tにもなる。総重量も1,110 tと、現在の水車発電機と比べると格段に重い。単純に比較することはできないが、この値は、現在では500,000 kVA級の揚水機と同等のレベルである。これは、当時に比べて材質が向上するとともに、電磁解析や強度解析など設計ツールの成熟により、設計の最適化が図られて、軽量化が達成されたためである。

3 水力発電技術の発展

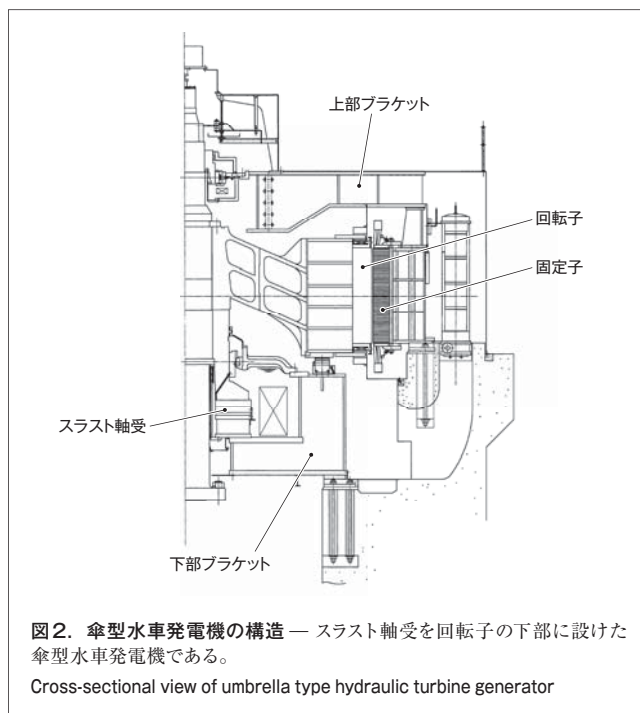
3.1 高落差・大容量化

第2次世界大戦後の「電源開発5ヵ年計画」を受けて、1950年代以降、記録的な大容量水力発電所が建設された。そのなかで当社は、1960年に電源開発(株)奥只見発電所(発電機容量133,000 kVA)など国内最大容量機の製造に関わり、戦後の経済復興に貢献した。

この頃から、大容量の発電機には回転子の下にスラスト軸受を設ける傘型構造が採用されるようになった⁽²⁾。傘型水車発電機の構造例を図2に示す。

大容量化は、国内だけのニーズではなく、海外でも進められ、特に米州で大規模発電所が盛んに建設された。米国 グランドクーリー第三発電所(水車出力620,000 kW)の水車は、1968年に米国メーカーと協同で受注し、ランナ羽根の3次元加工に世界で初めてNC(数値制御)加工を適用した。1978年に完成したベネズエラ グリII発電所(発電機容量805,000 kVA)の水車発電機⁽³⁾は、空気冷却方式の世界最大容量機として、長い間記録を保持していた。

一定の出力で運転するほうが効率的な大容量火力発電所や原子力発電所が建設されるようになると、負荷調整用の電源として揚水発電所が建設されるようになった。発電用と揚



水用で設備を分けることもあるが、簡素化のため、水車とポンプを、発電機と電動機をそれぞれ1台で担う可逆式揚水機が主流となった。当社の可逆式揚水機1号機は1965年に運転を開始した神奈川県企業局城山発電所(発電電動機容量70,000 kVA)である。

その後、揚水機も大容量化が求められるようになり、1970年に当時世界最大容量となる関西電力(株)喜撰山発電所(発電電動機容量250,000 kVA)や、1979年に東京電力(株)新高瀬川発電所(発電電動機容量367,000 kVA)など、世界屈指の大容量揚水機の製造を担った。

河川の流入水を期待せず、揚水した水だけで発電を行う純揚水が主流となるにつれて、大容量化とともに高落差化が求められるようになった。当社は、1975年に当時世界最高揚程となる九州電力(株)大平発電所(揚程545 m, 水車出力256,000 kW)、1978年に関西電力(株)奥吉野発電所(揚程539 m, 水車出力207,000 kW)をあいついで納入した。

500 mを超える高落差機では、動静翼干渉によってランナが大きく加振され、疲労破壊に至る問題が懸念されるが、当社は、実落差模型試験装置を用いて詳細な研究を行い、ランナ振動に関する技術を確立した。この成果を反映し、1982年に旧ユーゴスラビア(現セルビア)バイナバシュタ発電所(揚程621.3 m, 水車出力315,000 kW)、1993年にブルガリア チャイラ発電所(揚程701 m, 水車出力216,000 kW)を完成させ、世界での単段ポンプ水車の高落差記録を次々と更新した(図3)。

現在、現地試験中の東京電力(株)葛野川発電所は、782 mと世界最高揚程となる発電所で、2014年5月に運転開始を予定している。

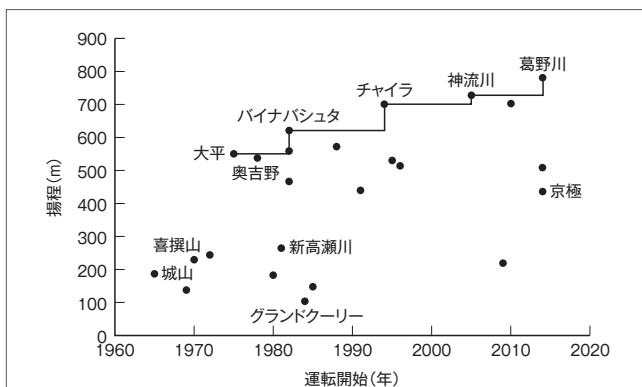


図3. 高落差ポンプ水車の変遷 — ポンプ水車は、時代とともに高落差化が図られ、東芝は常にその技術をリードしてきた。

Trends in pumping head of high-head pump turbines

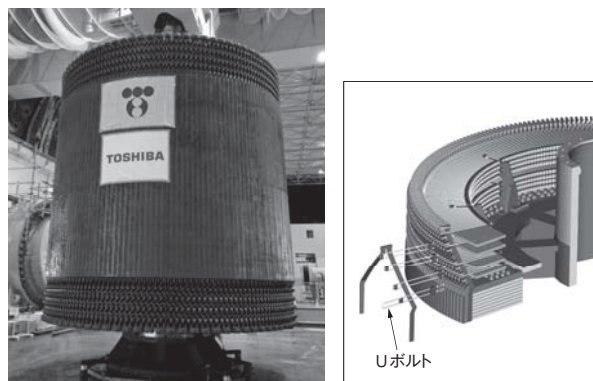


図4. 可変速発電電動機とUボルト支持方式 — 可変速発電電動機のコイルエンド支持方式として、独自のUボルト支持方式を採用している。

Adjustable-speed generator motor and U-bolt supporting system

3.2 可変速揚水発電システムの出現

原子力発電や大規模火力発電など一定の出力で運転をしたほうがよい発電システムの比率が高まると、夜間や休日など需要が少ない時間帯の周波数調整を、揚水運転で行うことが求められるようになった。そのニーズに応えるため生まれたのが可変速揚水発電システムである。

従来の揚水発電システムでは、発電電動機に同期機を適用しており、回転速度が一定のため、ポンプ水車の特性から揚程に応じた一定入力での運転を行っている。一方、可変速揚水発電システムは、発電電動機の回転子に低周波三相交流電流を流して回転磁界を発生させ、回転速度と同期速度の差分を補うことで、同期速度と異なる回転速度での運転を可能にした。

当社は、1990年に矢木沢発電所2号機に世界で初めて可変速揚水発電システムを適用した⁽⁴⁾。

可変速発電電動機の回転子は、低周波三相交流を流すため、固定子と同様の三相巻線を施す必要がある。そのため、通常の水車発電機と異なる円筒型回転子に固定子コイルと同様のワンターンコイルを用いており、そのコイルエンドを支持する構造が必要となる。一般には誘導機で使用されているバインド線を巻く方式が用いられるが、当社は、独自に開発したUボルト支持方式を適用した(図4)。主な効果として、コイルエンド部の冷却性能の向上とともに、バインド線巻機などの特殊工具が省略でき、工期の短縮を図ることができる⁽⁵⁾。

2014年1月現在、当社は、東京電力(株)葛野川発電所(発電電動機容量475,000 kVA)と北海道電力(株)京極発電所(発電電動機容量230,000 kVA)を建設中で、これらを含めて6発電所の可変速揚水発電システムを納入しており、世界最多の実績を持っている(図5)。

可変速揚水発電システムに期待される機能は、開発当初から変わりつつある。開発当初は、夜間や休日など需要が少ない時間帯の負荷変動を吸収する役割を期待され、主に国内で建設された。最近では、天候などで発電電力が変化する風力

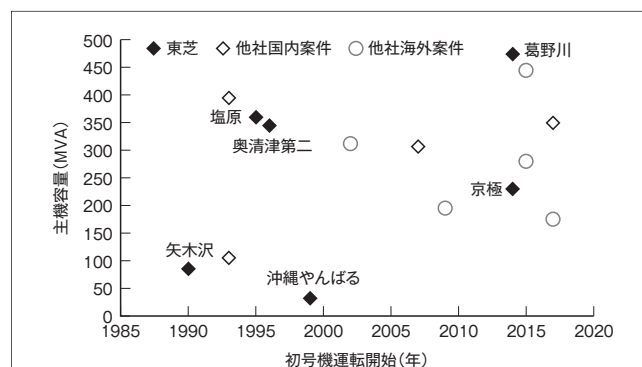


図5. 可変速揚水発電所の実績と計画 — 可変速揚水発電所は、再生可能エネルギーによる発電システムの増加に伴い、近年計画が増加している。

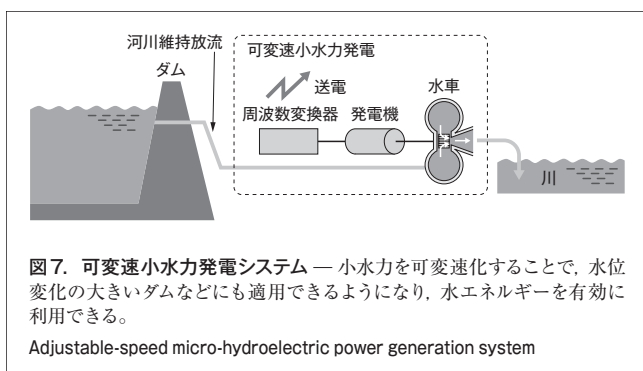
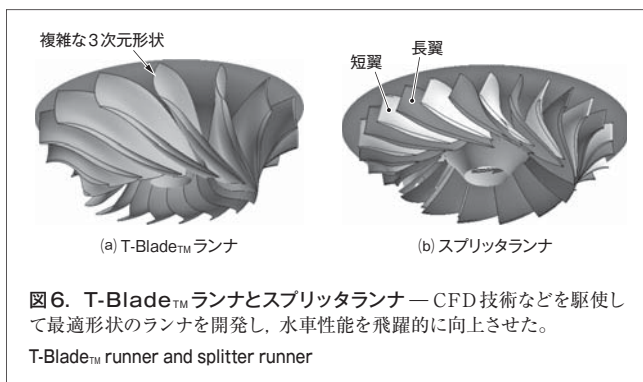
Start of operation of adjustable-speed pumped-storage systems

や太陽光などの再生可能エネルギーによる発電システムが増えたことにより、それらと組み合わせることによって電力システムを安定化させる機能に期待が集まるようになり、海外でも建設が進められている。今後もこの傾向は続くと考えられる。

3.3 エネルギーの有効利用

風力や太陽光と同様、水力もまた再生可能エネルギーの一つであり、その中でも世界でもっとも利用されている資源である。当社は、そのような水力を、より有効に利用するための技術開発を進めている。

水車の効率向上や運転範囲の拡大には、キャビテーション特性や水圧脈動の改善が必要である。これらの開発プロセスの中で、模型試験と並び重要な位置を占めているのが流体解析(CFD)技術である。近年のCFD技術の高度化により、流況や運転範囲を考慮して最適形状とすることで、水車性能を飛躍的に向上させ、発電電力量を大幅に増やすことが可能になる。当社はこれらの技術を駆使し、新構造ランナとして、長翼と短翼を交互に配置したスプリッターランナや羽根形状を複雑な3次元形状で形成するT-Blade™ランナを開発している



(図6)。最近では、CFD技術を用いて既設発電所水車ランナを更新することにより、増出力を図る例が増えている。

国内では、原子力発電が稼働停止している状況と、小水力発電の固定価格買取制度が制定されたことなどにより、徐々にではあるが未利用水力を活用して発電する設備も増えてきている。当社は、そのようなニーズに応えるための設備として、インライン型で20～200kW程度の出力帯をカバーするHydro-eKIDS™と開放型で1～2kW程度のΣFlow™⁽⁶⁾をラインアップしている。

また、これまで発電に利用されていなかった水位変化の大きいダムの維持放流に可変速システムを適用して運転効率を向上させる取組みも進めている(図7)。これら設備の導入により、未利用水力の有効活用が促進されることが期待される。

4 今後の展望

2013年2月に東京で開催された国際エネルギー機関(IEA)主催の水力ワークショップでは、世界の水力発電設備は2050年に現在のほぼ倍増となり、全エネルギーに占める水力発電の割合も現在より増えるとの予測が示されており⁽⁷⁾、再生可能エネルギーが増える今後のエネルギー需要の中でも、水力発電への期待が大きいことがわかる。

特に揚水発電は、風力や太陽光など自然現象で出力が変化する発電システムの増加に対し、電力システムを安定化させる機能が見直され、現在の3～5倍に増えると予想されており、可

変速など付加価値をつけたシステムの適用が促進されるものと考えられる。

開発が進む地域としては、一番にアジアが挙げられている。最近中国での建設が鈍化しているものの、今後も大容量発電所や揚水発電所の建設は計画されており、その周辺地域やインド圏などでも開発が進むものと考えられる。

5 あとがき

水力発電は120年の歴史があり、基本技術は既に確立されているが、時代とともに求められる性能や機能が変わるため、日々新たな技術を開発し続けている。

当社は、世界最大や世界最高となる記録機から、Hydro-eKIDS™やΣFlow™などの小水力まで、様々なニーズに応える製品をラインアップしているが、今後も、先を見据えた研究開発に取り組んでいく。

文献

- 橋口信夫. 100 000 kVA 水車発電機. 芝浦レビュー. 19, 9, 1940, p.339-348.
- 渡辺達郎. 傘型水車発電機. 東芝レビュー. 8, 2, 1953, p.23-27.
- 阿南恒俊 他. 世界最大容量805 MVA 水車発電機. 東芝レビュー. 34, 1, 1979, p.5-9.
- 向井一馬 他. 可変速システムの電力分野への適用拡大. 東芝レビュー. 51, 12, 1996, p.59-64.
- Kubo, T. et al. "Recent Technologies for Hydro Generators and Generator-Motors". Proceeding of CIGRE Colloquium on New Developments of Rotating Electrical Machines. Beijing, China, 2011-09, Chinese National Committee of CIGRE and CIGRE Study Committee A1. 2011, p.61-68.
- 中原裕輔 他. 小水力発電システムの最新技術. 東芝レビュー. 68, 6, 2013, p.32-35.
- IEA. Technology Roadmap: Hydropower. 2012-10-29. <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name.32864,en.html>>, (accessed 2014-01-20).
- 佐々木俊雄 他. 水力発電設備の技術開発の歩みと今後の展望. 電気評論. 92, 9, 2007, p.12-21.



森 淳二 MORI Junji

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部グループ長。水力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



久保 徹 KUBO Toru

電力システム社 京浜事業所 発電機部グループ長。発電機の開発・設計に従事。日本機械学会会員。
Keihin Product Operations



手塚 光太郎 TEZUKA Kotaro

電力システム社 京浜事業所 水力機器部グループ長。水車、ポンプ水車の開発・設計に従事。日本機械学会、ターボ機械協会会員。
Keihin Product Operations