

水力発電をめぐる市場動向と東芝の取組み

Trends in Hydroelectric Power Generation and Toshiba's Approach

戸田 一典 森 淳二

■ TODA Kazunori

■ MORI Junji

水力発電は、現在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る。出力変動を伴う風力や太陽光などの再生可能エネルギーによる発電が増えてきているなか電力系統の電力変動を抑制する役割と、電力のベースロード電源としての役割から、世界的にその価値が見直されつつあり、今後、発電設備におけるその比率が増加していくことが予測される。

このような背景の下、東芝は、水力発電機器の性能や付加価値を向上させる技術開発を進め、それらを国内だけでなく世界の各地に提供している。

Hydroelectric power generation, which accounts for the largest share of renewable energy sources, is being reevaluated in terms of its role in maintaining stable power supplies by compensating for power fluctuations resulting from the increasing use of renewable energy sources such as wind and photovoltaic systems that are affected by weather conditions, in addition to its role as a baseload power supply. The ratio of hydroelectric power generation among all types of power generation facilities is expected to continue to increase globally in the future.

As a leading company in the hydroelectric power generation field, Toshiba is responding to these circumstances by further advancing related technologies and promoting the expansion of their application worldwide.

国内の市場動向

経済産業省が2014年4月に策定した「エネルギー基本計画」⁽¹⁾では、一般水力(流れ込み式)はベースロード電源として、揚水式水力はピーク電源として、引き続き重要な役割を担う電源と位置づけられている。その一方で、国内の大規模水力資源の開発は既にほぼ完了しており、今後は、発電に利用されていない既存ダムへ新たな発電設備を設置したり、既に利用されているダムの発電設備をリプレースすることで出力を増強したり、更には、地域の分散型エネルギー需要構造の基盤を担うエネルギー源として中小水力の活用を拡大していくことがうたわれている。また、2012年7月にスタートした再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT)により、その普及が後押しされている。

これにより、自家発電事業者や公営発電事業者を中心に既設発電設備のリプレースや増設をする計画が増えてきている。また、国内の水力発電設備の大部分を占める事業用発電所は、原子力

発電所が停止していることの影響で、電力供給能力を確保するために改修計画が繰り延べされているものもあるが、建設から50年以上が経過している設備も多く、水資源の有効活用や電力の安定供給の観点から、今後も改修やリプレースが計画的に進められていくと考えられる。

世界の市場動向

世界に目を転じると、世界の再生可能エネルギーによる発電量の約80%は水力発電であり、風力や太陽光などの他の再生可能エネルギーの導入が大きく報道されている現在も、水力発電が再生可能エネルギーによる電源シェアの中で最大である。国際エネルギー機関(IEA)が2012年にまとめた「技術ロードマップ」⁽²⁾では、水力発電は負荷変動への追従性に優れていることから、電源の需要と供給の変化に対する電力系統の安定化に役だつため、風力や太陽光のように天候などで短時間に出力変動を伴う再生可能エネルギーによる発電技術の発展に

欠かせないものと位置づけられている。更に未開発の包蔵水力エネルギーは、特にアフリカ、アジア、及びラテンアメリカでは相当量が残っていると見込まれており、水力発電設備容量が2050年までに現状の2倍の2,000 GWに、揚水発電の設備容量は現状の3~5倍の400~700 GWになると予測されている。

水力発電は古くから利用されてきている発電方式ながら、過去には他の発電方式の増加率に比べて水力発電の増加率は相対的に低かったが、温室効果ガスの排出量をめぐる議論を経てこの傾向は変曲点を迎え、今後は他の発電方式を超える増加率を維持していくこととなり、世界的に水力発電への期待が高まっている。

この水力発電設備の増加は、中国をはじめインドなどのアジア、ブラジルを主とする中南米、アフリカといった新興国や発展途上国での新規開発が多くを占めている。一方、先進国では、再開発あるいは既存発電所のリプレースや性能向上により、設備容量増加を図る傾向にある。

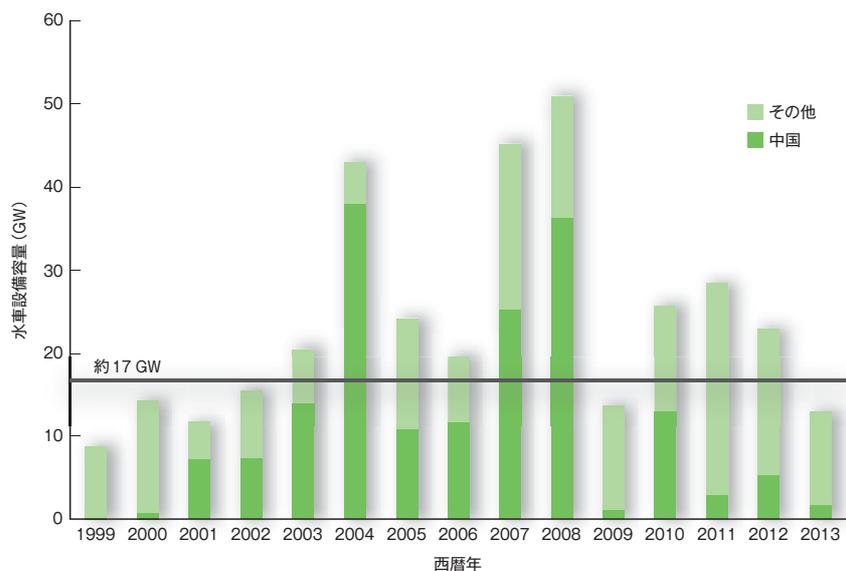


図1. 世界の水力発電設備発注量 — 水力発電設備は、中国の発注量が突出した2004年から2008年を除き、約17 GW/年の開発が続けられている。
Trends in orders for global hydroelectric power facilities from 1999 to 2013

近年の建設状況を見ると、一時期は世界の半分以上を占めていた中国での建設規模は平準化されたが、依然として世界最大の市場であることに変わりはなく、単機出力1,000 MWの水力発電設備や揚水発電所の建設が計画されている。ベトナムやラオスなどのアジア地域やアフリカでの開発も活況を呈しており、新規建設規模は17 GW/年程度を保っている(図1)。

水力発電設備のメーカーは大規模な市場地域を中心に存在するものの、主要メーカーとなると、欧州に本拠を構えて中国や、インド、ブラジル、北米といった世界の主要市場に製造拠点を備えている欧州3社があり、その他は自国市場内での活動あるいは自国の製造拠点から輸出する活動をしている。

技術開発の取組み

東芝の水力事業は、1894年にわが国初の事業用水力発電所として京都市にある蹴上発電所に60 kWの二相交流発電機を製造してから120年の歴史があり、日本国内だけでなく、多くの国々に設備を納入してきた。

ここでは、近年に取り組んでいる性能開発や付加価値向上技術について、その一端を述べる。

■水力発電設備の効率向上

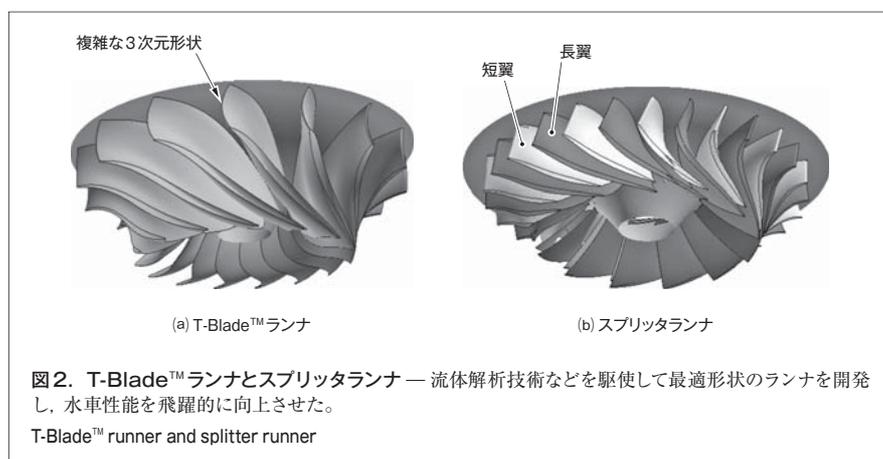
エネルギーを有効活用するための設備効率について述べる。水力発電所は、水の位置エネルギーを電気に変換する発電システムであり、落差 H (m)と流量 Q (m^3/s)と効率 η で発電出力 P (kW)が決まる。

$$P \propto \eta H Q \quad (1)$$

落差と流量は建設地点の環境によ

て決まるため、発電出力を増やすためには効率を高める必要がある。落差や流量は、流れ込み式であれば季節や気候によって、ダム式であれば運用によって変化するため、発電電力量 W (kWh)を増やすためには、最大出力時の効率が良いことだけが求められるわけではなく、落差や流量が変化したときの効率も重要となる。

その目的で開発されたのがスプリッターランナやT-Blade™ランナである(図2)。これらの技術を適用することで、部分負荷時の効率を飛躍的に改善させることができ、リプレース時の発電量アップに貢



献している（この特集のp.24-27参照）。

■揚水発電システム

揚水発電所に求められる機能や価値も変化してきている。

電力はそのまま蓄えておくことができないが、電力需要の少ない夜間に水を汲（く）み上げることにより、電力を水の位置エネルギーとして蓄える役割を担うのが揚水発電所である。

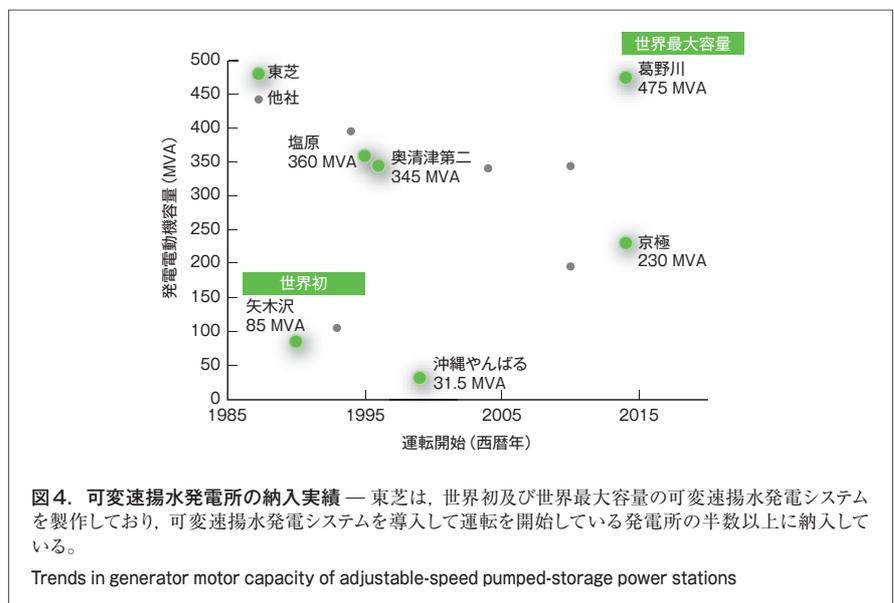
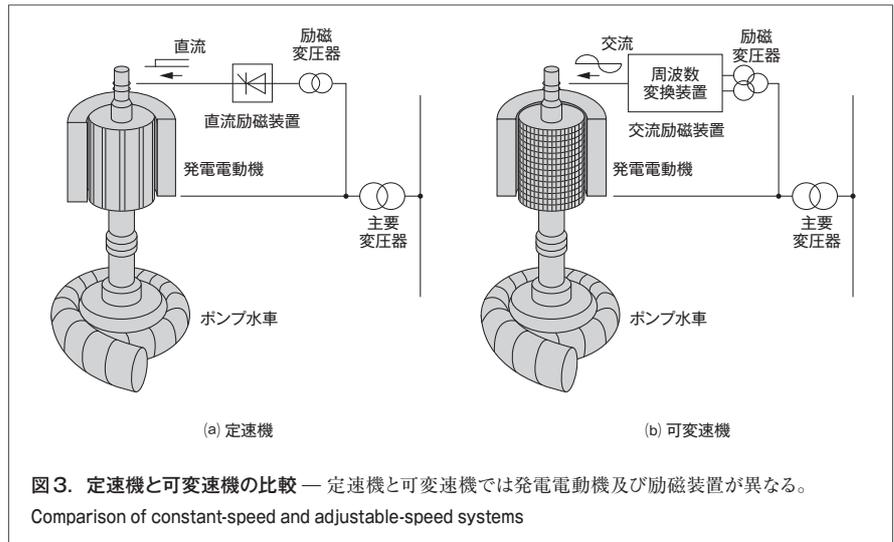
近年、欧州や北米など先進国を中心に、風力発電や太陽光発電など、出力変動を伴う再生可能エネルギーによる発電が増えてきており、これらによる電力系統の電力変動を抑制する効果も期待されるようになってきている。この際に必要とされる機能は、昼夜の需給バランスの調整だけではなく、瞬時に出力や入力を変化させられることと、その変化幅が大きいことである。その観点で近年注目を集めているのが、可変速揚水発電技術である。

可変速揚水発電システムとは、一定速度運転ではポンプの特性から揚水運転中の入力を変化させられないため、速度を変える機能を付加することで入力を変えられるようにしたシステムで（図3）、当社が1990年に世界で初めて東京電力（株）矢木沢発電所に納入したわが国発祥の技術である⁽³⁾。

この可変速揚水発電システムは、発電運転時に、同期速度より低い運転をすることで効率よく運転を行うことができ、キャピテーション^(注1)や振動の発生を抑制できるので、小さな出力まで運転できる効果もある。

2014年6月に運転を開始した東京電力（株）葛野川発電所の例では、一定速度で運転する1、2号機に比べて可変速運転できる4号機は、発電運転時の出力調整幅が約2倍にできた（同p.7-10参照）。

(注1) 水車内部で、水流中の低圧部が飽和蒸気圧以下となると気泡が発生する現象。この気泡が圧力回復により崩壊するときに騒音やランナ表面の損傷が生じる。



2014年10月に運転を開始した北海道電力（株）京極発電所の例では、可変速幅が広いこともあり、ほぼゼロ出力に近い領域まで運転をしている（同p.11-15参照）。

可変速揚水発電システムは、これまでに世界で11プラントが運転を開始しているが、このうち6プラントは当社が納入したものである（図4）。

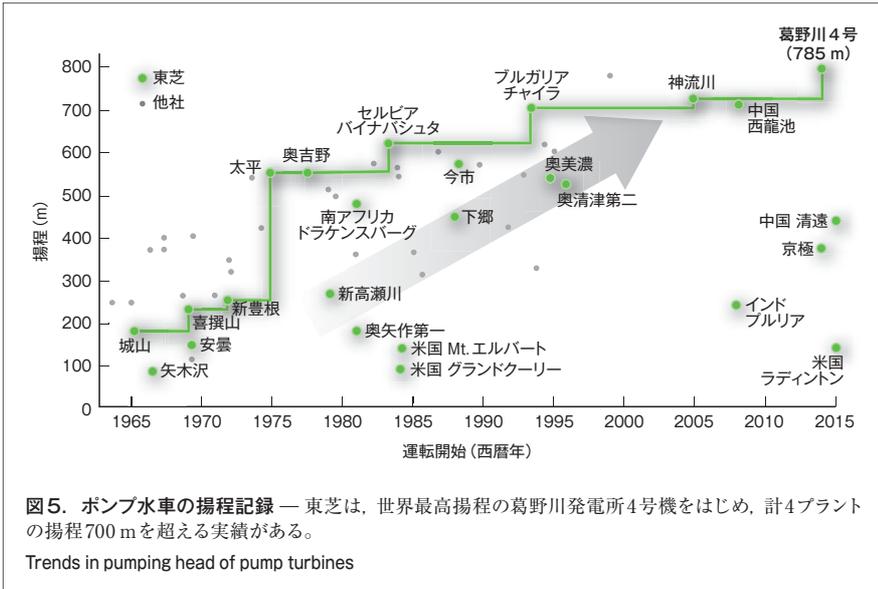
揚水発電所は、建設経済性の観点から使用水量を相対的に減らすことで土木費用を低減することを目標に、高落差・高揚程化が図られてきた。この場合、ポンプ水車は高い水圧で過酷な運転条件となるが、当社では早くから実落

差・実揚程模型試験装置などを活用して、高落差・高揚程ポンプ水車を開発してきた。

当社は、ブルガリアのチャイラ発電所で1994年に単段ポンプ水車として世界で初めて700 m級の揚程を実現して以降、計4プラントで揚程が700 mを超える実績を持っており、2014年12月現在では葛野川発電所4号機の785 mが世界最高である（図5）。

■可変速小水力発電システム

可変速技術の応用として、落差の変化幅が大きくて従来の発電設備では対応が



困難であった既設ダムにも発電設備を設けられるように、可変速小水力発電システムも開発した(図み記事参照)。このシステムは、関西電力(株)出し平発電所に適用予定である(同 p.20 - 23 参照)。

■要素技術

当社は、要素技術の開発にも力を注いでいる。

発電機固定子コイルには、独自に開発したVPR(真空液圧レジニリッチ)絶縁を使用している。真空処理時にレジンの充填が不要なため、廃棄するレジンの量がほとんどない環境に優しい技術で、IEEE(電気電子技術者協会)の厳しい規定にも合致するコイルを製作し、米国の改修プロジェクトに納入している。

樹脂軸受は国内で一般に広まってきたが、当社は摩擦係数の小さい四フッ化エチレン樹脂(PTFE)材を使用し、台金との接合には2層のパンチングメタルを設けて接合強度を高めるなど、水車発電機用に独自に開発しており⁽⁴⁾、揚水発電所の葛野川発電所や京極発電所のスラスト軸受にも適用されるまでになった。ホワイトメタル(WJ2)に比べて高面圧化できるので軸受をコンパクトにでき、軸受損失の低減に寄与する。

また、水車軸受に適用する水潤滑軸受も、やはり摩擦係数の小さいPTFE材を使用して独自に開発している。水潤滑軸受は、潤滑剤を油から水にすることで、環境負荷低減にも寄与する⁽⁵⁾。

潤滑油や制御油を少なくすることで油の河川への流出を抑える技術は、これまでわが国で利用されてきたが、今後は海外でも適用されてくると考えられる。また、米国では、Fish-Friendlyと呼ばれる、魚が生息しやすい環境とする水車技術の要求もあり、環境に配慮する技術は、更に重要になってくると考えている。

可変速小水力発電システム

維持放流は、ダムの水位変動がそのまま落差の変化幅となるため、流れ込み式の発電所と比較して落差の変化幅が大きくなる。また、維持流量と観光放流などの増量流量の2パターンの運用がある場合もある。

このように落差や流量の変化幅が大きい発電所にフランス水車を適用する場合、高落差でのキャビテーションと、低落差や低流量時の振動の両方を回避するよう設

計すると、発電に使用できる落差と流量が限定されてしまい、発電できる時間が短くなるため、年間発生電力量が少なく、発電所の設置が経済的に見合わない場合があった。

そこで東芝は、発電機の電力系統側にコンパクトな周波数変換器を設けてフルコンバータ方式の可変速システムとすることで、回転速度を±20%程度変化させることに

より、広い落差範囲や流量範囲でもキャビテーションや振動を回避でき、かつ高効率で運用できる可変速小水力発電システムを開発した。発電機には構造がシンプルでメンテナンスが容易なご形誘導機を適用し、電力系統に対しては、周波数変換器により力率調整が可能である。

可変速小水力発電システムの構成

可変速小水力発電システムの運転範囲拡大

■高付加価値の創出

今後、太陽光や風力など、天候により出力が変動する再生可能エネルギーによる発電はよりいっそう増えていくことが想定される。そのようななかで水力発電には、電力系統の電力変動を抑制する役割と電力のベースロードとしての役割が求められてくる。

当社は、この水力発電に求められている機能を強化するための取組みとして、水車及び発電機の性能開発や、当社が得意とする揚水発電技術及び可変速技術の高度化、環境性能を高める技術など、付加価値の高い製品を提供できるよう研究開発を進めている。

グローバル企業に向けて

戦後復興期、水力発電が主役の水主火従の電源構成の中、水力発電所の建設が盛んに行われた。高度成長期～バブル期には、火主水従の電源構成に移行していったものの揚水発電の需要の高まりがあった。1990年代半ば以降、バブル崩壊により国内の電力需要は伸び悩み、新規の建設が激減した。一方、わが国には世界第5位の水力設備容量があり、それらの設備を維持するための改修市場の規模も大きい。しかし、同様の状況にある米国では、水力発電の設備容量が第2位にも関わらず、米国起源の水力発電機器メーカーは残っていない。そのようななか、当社は海外にも積極的に事業展開し、事業規模の維持拡大を図ってきた。

■中国

中国では、東芝水電設備（杭州）有限公司（THPC）を立ち上げ、中国の豊富な需要を取り込むことに成功した。現在、広東省の清遠揚水発電所のポンプ水車及び発電電動機や、雲南省の観音岩発電所の単機容量666MVAの発電機を製造している（同 p.28 - 31 参照）。

THPCは、中国国内だけでなく、わが

国や第三国への製品輸出も行っている。2014年5月に2号機が運転を開始し、現在1号機を据付中の中部電力（株）徳山発電所の水車と発電機は、ほぼ全てTHPCが製作したものである。

品質要求の厳しい米国のラディントン揚水発電所でも、THPCが揚水機用として世界最大^(注2)となるランナの製作を行い、直接米国に出荷している。

また、アフリカや、ベトナム、ラオスなどにも、THPCが直接輸出を始めている。

■米国その他

米国では、東芝インターナショナル米国社デンバー事務所を拠点に営業・技術活動を行っているが、米国の工事会社を傘下に加え、米国市場の特徴である工事込みの改修工事に対応できるようにした。現在、ラディントン揚水発電所など、大型改修工事を受注しており、工事を遂行している（同 p.16 - 19 参照）。

この他、インドやコロンビアにも拠点を設け、それぞれの地域の特徴に合わせた活動を行っている。

■真のグローバル企業へ

欧州の3大メーカーに肩を並べられるような、真のグローバル企業への道はまだ半ばではあるが、海外での事業が順調に伸びてきており、今では海外の売上比率は50%を超えるまでになっている。これによって水力事業の維持、拡大ができ、更に新しい研究開発にも積極的に取り組むことができ、真のグローバル企業へと歩を進めている。

今後に向けて

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発電であり、また増加する風力や太陽光など出力変動を伴う再生可能エネルギーによる発電に起因する電力変動を抑制でき、今後も発展が期待できる技術分野である。

(注2) 2014年12月現在、揚水機用として、当社調べ。

水力に求められる機能や性能は時代とともに変わってきている。当社は、これからも時代のニーズを的確に捉え、変化していくニーズに応えられるよう研究開発を行い、わが国に起源を持つ水力発電機器メーカーとして、わが国の技術を国内だけでなく世界の各地に提供し続けていく。

文 献

- (1) 経済産業省. エネルギー基本計画. <http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf>. (参照 2014-12-19).
- (2) 国際エネルギー機関 (IEA). 技術ロードマップ 水力発電. 新エネルギー財団訳. <<http://www.nef.or.jp/ieahydro/contents/pdf/info/info201402.pdf>>. (参照 2014-12-19).
- (3) 森 淳二 他. 水力発電機器製造120年の歴史と今後の展望. 東芝レビュー. 69, 2, 2014, p.25 - 28.
- (4) タン トロン ロン. 樹脂系複合材料軸受の水力発電機への適用. 東芝レビュー. 61, 5, 2006, p.66 - 67.
- (5) タン トロン ロン 他. 水力発電用車水の水潤滑樹脂軸受. 東芝レビュー. 67, 4, 2012, p.48 - 51.



戸田 一典
TODA Kazunori

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部長。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.



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.