

トレンド

水力発電を取り巻く市場動向と 東芝エネルギーシステムズ(株)の取り組み

Trends in Hydroelectric Power Generation and Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation's Approach

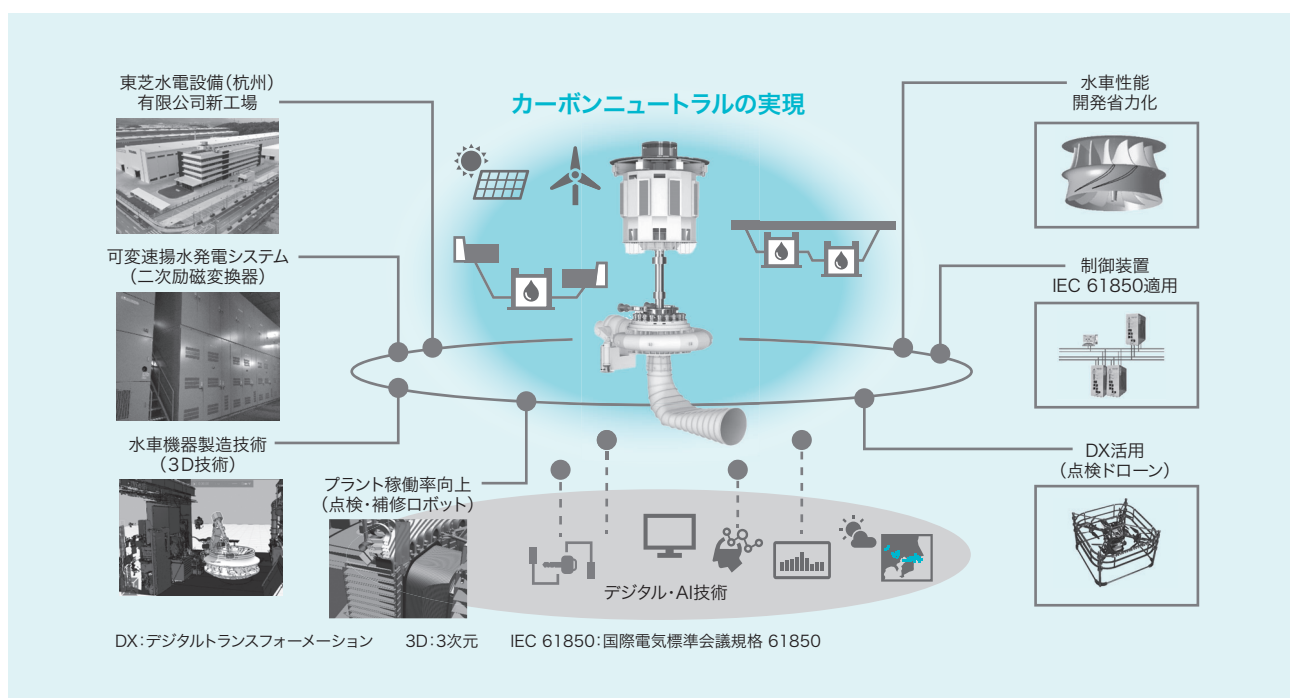
森 淳二 MORI Junji 宮崎 保幸 MIYAZAKI Yasuyuki 長田 大 OSADA Oki

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、世界のエネルギー動向は急速に変化している。近年は、デジタル化に伴うAIの活用やデータセンターの設置により、電力需要の大幅増加が見込まれるなど、需要側の変化も著しい。水力発電は、安定に電力供給できる電源として、古くから世界で最も使われてきた再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）であり、今後も増加が予測されている。揚水発電は、エネルギー貯蔵や調整力などの機能を持っており、持続可能な社会に向けて重要性が高まっている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、デジタルやAIの技術を駆使して水車や発電機の性能・機能向上を図るとともに、IoT (Internet of Things) や最適化技術を活用して、電力システムの安定化にも貢献する水力発電システムの開発に取り組んでいる。

Global energy trends have continued to change rapidly in recent years to keep pace with the goal of achieving carbon neutrality by 2050. On the other hand, power consumption demands have grown along with digitalization due to increasing use of artificial intelligence (AI) and high-capacity data centers. This has resulted in growing attention on hydroelectric power generation, the most widely used renewable energy source for ensuring a stable supply of power, leading to a further increase in hydroelectric power plants in many countries. Pumped-storage power generation, which can store energy and adjust power fluctuations, has become ever more important to realizing a sustainable society.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is committed to developing and delivering hydroelectric power generation systems that contribute to providing major power sources, stabilizing electric power systems via the Internet of Things (IoT) and optimization technologies, and to improving hydraulic turbine and generator performance and functionality by making full use of digital and AI technologies.



特集の概要図。デジタル技術の活用によりカーボンニュートラル社会に一層貢献する水力発電

Hydroelectric power generation systems playing key role in achieving carbon neutrality utilizing digital technologies

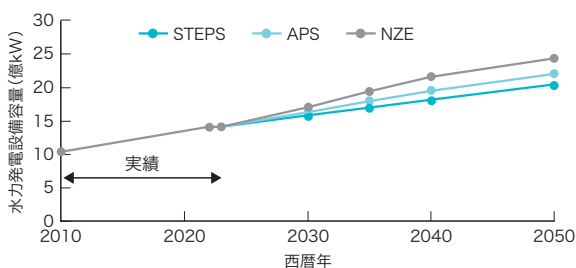
1. はじめに

水力発電は、再エネの中でも古くから利用されてきた技術である。安定した電力供給が可能で、発電時に二酸化炭素(CO₂)を排出しないため、環境に優しいエネルギー源として注目されている。世界の水力発電設備容量は2023年時点で14億kWであり、世界全体の電力供給の約15%、再エネによる発電電力量の約50%を占める世界で最も利用されている再エネである⁽¹⁾。

揚水発電は、電力の余剰時に水をくみ上げることでエネルギーを貯蔵し、電力需要のピーク時に迅速に発電できるため、電力供給の安定化に寄与する。また、エネルギー貯蔵の主要な手段として、近年では、気候による発電量変動が大きい風力や太陽光などの再エネ(以下、変動再エネと略記)の補完に重要な役割を果たしている。

パリ協定に基づく長期的な目標の達成に向けて、水力発電は、温室効果ガス排出を削減して気候変動を抑制するための重要な手段である。カーボンニュートラルの達成に向けた、国際エネルギー機関(IEA)のシナリオ⁽²⁾では、2050年までにネットゼロを達成するためには、現在の水力発電の設備容量を1.7倍程度に増やす必要があるとされている(図1)。

IEAの水力発電市場に特化したレポート「Hydropower Special Market Report」⁽³⁾では、既存の設備を維持しながら成長を加速するための推奨事項として、新設のほか、近代化更新や、発電未利用ダムへの発電設備の設置、デジタル技術や新しい運用方法の導入による水力発電の運用効率の向上、迅速な発電量の調整による電力システムの柔軟



*IEA, 「World Energy Outlook 2024」⁽²⁾を基に作成

図1. 世界の水力発電設備容量の推移

IEAの年次報告書 World Energy Outlook 2024⁽²⁾で示された、現在の政策設定を反映させた公表政策シナリオ(STEPS)、各国がエネルギーと気候に関する公約を期限内に完全に履行すると想定した発表誓約シナリオ(APS)、及び2050年CO₂排出量正味ゼロ達成を目指したネットゼロエミッションシナリオ(NZE)では、2050年に必要な水力発電設備容量は、2023年の実績の1.4~1.7倍と推定されている。

Global trends in installed hydropower capacity

性や安定性向上への貢献などが挙げられている。

2. 市場動向

2.1 世界市場

水力発電は、地域ごとに異なる特性と発展状況を持ち、その動向はそれぞれの地理的条件や、政策、経済状況などに大きく依存する。2014年からの10年間で水力発電設備は約2億kW増加しており、発電設備が減少した地域はない。発電設備の増加が著しい地域はアジアであり、特に中国とインドが大きい。欧州や北米では、既存の水力発電設備の近代化や発電未利用ダムの活用に加え、近年は揚水発電の新設計画も増え始め、開発許可、補助金投与を経て、建設が始まったところもある。

水力発電の技術革新と持続可能なエネルギー供給の確保に向けた取り組みとして、欧州連合(EU)の資金提供を受けたXFLEX Hydroプロジェクトがある⁽⁴⁾。発電事業者や、大学、研究機関、メーカーなどの19組織が参画する体制で、2019年から4年間行われた。水力発電所や揚水発電所の機能を最小限の対策で向上させ、効率的な電力供給に加えて電力システムの品質と信頼性向上に寄与する、柔軟性のある複数技術を開発し、スイス、フランス、スペイン、及びポルトガルの発電設備で実証した。

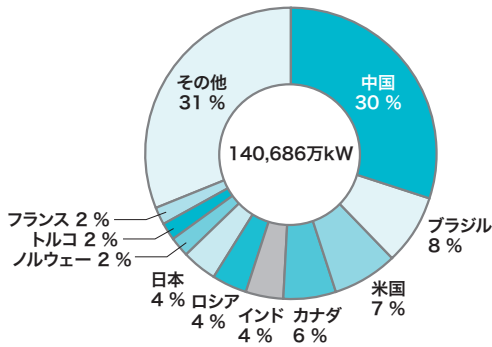
2.2 国内市場

我が国の水力発電の設備容量(揚水を含む)は、2023年時点で5,003万kWと世界第7位(4%)であり(図2(a))、近年の年間発電電力量は800~900億kWhと、国内の総発電電力量の8%程度となっている。

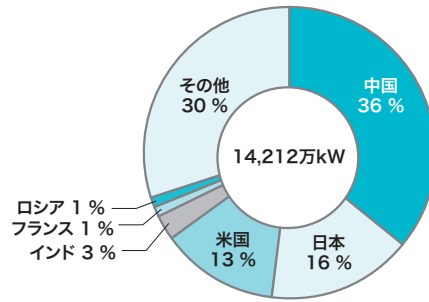
純揚水発電は、約2,200万kWと世界第2位(16%)の設備容量があり(図2(b))、国内の蓄電設備容量の95%以上を占める。第6次エネルギー基本計画⁽⁵⁾では、2030年までに再エネの比率を、総発電電力量の36~38%に引き上げ、そのうち11%程度を水力発電で賄う計画である。

揚水発電を除いた一般水力は、固定価格買取(FIT)制度及びフィードインプレミアム(FIP)制度により、中小水力発電の導入が進んでいる。2023年12月末時点の中小水力発電の設備容量は990万kWであり、直近の約4年間で20万kW増加した。2030年の目標である1,040万kWに対し、今後約6年間で50万kWの導入が求められている⁽⁶⁾。しかし、建設適地は減少しており、開発地点の奥地化による開発期間の長期化やコスト増大といった問題がある。

揚水発電は、変動再エネの出力変動や余剰電力を補完する調整力の機能が活用され、調整電源としての重要性が増加している(図3)。しかし、古い設備が多く、2030年までに250万kW、2050年までには2,000万kWが運転開始



(a) 水力発電(揚水発電を含む)の設備容量



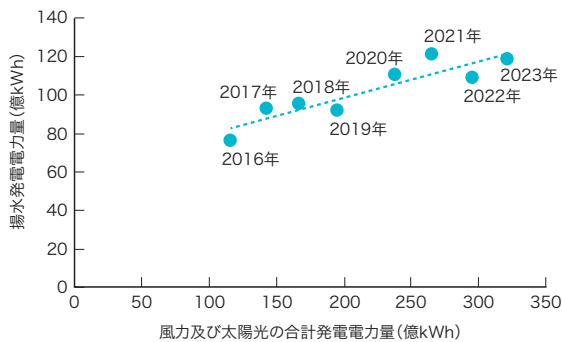
(b) 純揚水発電の設備容量

*IRENA, 「Renewable Energy Statistics 2024」¹⁾を基に作成

図2. 世界の国別水力発電設備容量(2023年)

2023年の水力発電設備容量の上位10か国のうち、我が国は世界第7位、純揚水発電に限定すると世界第2位である。他国に比べて揚水設備容量の比率が高いことが特徴である。

Installed hydropower capacity by country in 2023



*経済産業省資源エネルギー庁、「電力調査統計」を基に作成

図3. 国内の風力及び太陽光の合計発電電力量と揚水発電電力量の実績

変動再エネである風力及び太陽光の合計発電電力量は年々増加している。これに従い、揚水発電電力量も増加傾向にある。

Comparison of actual electricity generated by both wind and photovoltaic (PV) systems and pumped-storage systems in Japan

から60年を超えて、設備更新が必要な時期を迎える⁷⁾。

設備の維持・機能向上や、設備容量増加に向けて、2023年度に開設された長期脱炭素電源オークション制度の活用や、内閣府の「流域総合水管理」の考え方にに基づき、揚水発電所の更新や追加設置の検討が始まっている。

3. 技術開発の取り組み

東芝エネルギーシステムズ(株)は、1894年に水力発電機を製造して以降、40か国以上に設備を納入してきた。また、中国の水力事業拠点として2005年に設立した東芝水電設備(杭州)有限公司は、2024年に新工場を設立した。

3章では、再エネとしての水力の発生電力量を増やすため

の水車・発電機の性能向上や、変動再エネの導入量拡大に寄与する電力システムの柔軟性向上、デジタル技術を活用した効率化・スマート化など、当社の技術開発について述べる(特集の概要図)。

3.1 水車・発電機での取り組み

水力発電設備に求められる様々なニーズに応えるための技術開発に取り組んでいる。

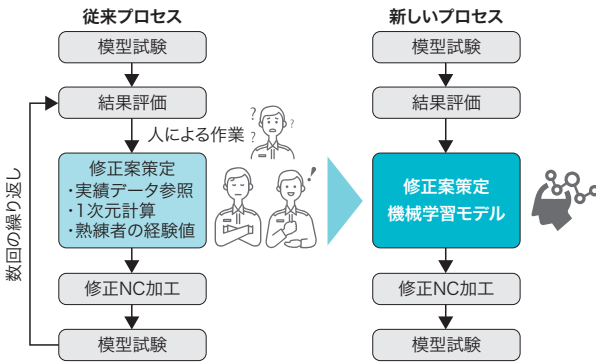
3.1.1 設計・性能開発ツール技術

水車の性能開発では、模型試験とともに流れ解析(CFD)をベースとした最適化技術を駆使しており、これまでも最適化技術の一部にAIを組み込んできた。近年は、性能開発の期間短縮や省力化の観点でAI技術を活用し、CFDと同等の予測精度を持つサロゲートモデルの構築や、模型試験において従来は人が行ってきた形状修正案の策定を機械学習で代用する模型ランナのチューニングプロセスの構築などに取り組んでいる(図4)。

発電機では、モデル試験と3D(3次元)電磁解析・CFDにより、各種損失の低減を目指している。風損は、モデル試験を実施し、評価式の見直しを図っている。また、軸受損は、モデル試験を行い、軸受面圧を増加させて軸受をコンパクトにすることにより、損失の低減を図っている。これらの損失低減技術のほかに、発電機全体を性能・製造コスト面で最適化するためのプログラムを開発し、短時間で多数の設計案を生成して、その中から顧客ニーズに合った設計を選択できる取り組みも行っている⁸⁾。水車発電機の自動解析フローの例を、図5に示す。

3.1.2 電力システムの柔軟性向上に寄与する技術

電力調整幅の増大や、季節ごとの落差・流量変化に応じ



NC: 数値制御

図4. AIを組み込んだ模型ランナのチューニングプロセス

模型ランナのチューニングプロセスにおいて、従来は人が行っていた修正案作成に、機械学習モデルを組み込むことで、繰り返し回数の削減、又は繰り返しなしを実現できる。

New model runner tuning process using AI

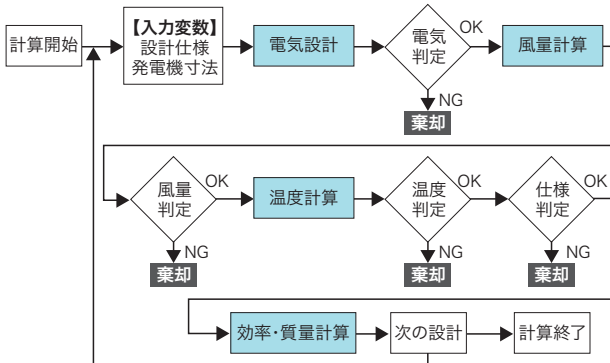


図5. 水車発電機の自動解析フロー

電気設計と機械設計を連成させた設計フローを構築することで、効率や質量を目的関数とした、多数の設計案を策定可能とした。

Autonomous coupled analysis process of hydro generator

て、発生電力量を増加させるために、水車効率は最高効率点だけでなく部分負荷でも向上が求められている。当社は、部分負荷効率向上に大きな効果があるスプリッターランナや T-Blade™ランナを開発してきた実績を基に、更に変落差特性・変流量特性に優れた水車の開発を継続している。特に最近、極低負荷 (Deep Part Load) での運用が注目されており、運転の安定性という観点からの開発も進めている。

水力発電は、ほかの発電設備に比べて起動停止が容易で、停止から最大出力を発生させるまでに要する時間が非常に短いという利点がある。近年は、起動停止が以前にも増して頻繁に行われる傾向にあり、揚水発電でも揚水運転から発電運転といった運転モードの切り替えの高速化が求められている。このような運用は機器の健全性に対して厳し

い要求となるが、起動過程で発生するランナの応力状態を正確に把握して機器の損傷リスクを回避する手法の確立や、起動停止時に繰り返し発生する固定子コイルへの熱サイクルに対応した絶縁技術の開発により、頻繁な起動停止や短時間でのモード切り替えを可能にした。

電力システムの柔軟性向上のニーズから、可変速揚水発電システム (以下、可変速機と略記) の需要が増加しており、海外では新設の可変速揚水発電所の建設が進み、国内では定速揚水機の可変速機への改修も行われている。

揚水運転時の入力調整幅を拡大するには、ポンプ水車のキャビテーション特性と逆流限界の改善が課題となる。これらは定速揚水機でも開発のポイントであるが、調整力拡大を目的とした可変速機ではその効果に直接影響を与えるため、一層重要である。

発電電動機は、可変速機の回転子の組立をサイトで実施することが多く、構造が複雑なため、多くの時間と熟練した技量を要する。これらを解決するための開発も進めている。

3.1.3 設備の稼働率向上に寄与する技術

発生電力量増加のために、点検・オーバーホールの際の停止期間の短縮や、プラントの停止を必要としない機器の状態把握技術が求められている。

発電機の固定子コイルの劣化状態を、プラントを停止させることなく把握するための、“オンラインPDモニタリングシステム”を開発し、従来品に比べ設置期間も大幅に短縮した。また、発電機の点検を大規模な分解を伴わず、短期間でを行うための点検ロボット、更に一部の部品の補修機能を備えた楔 (くさび) 補修ロボットの開発を進めている。

3.1.4 保守省力化・環境負荷低減技術

電動化や使用油量の削減により、保守省力化や環境負荷低減を実現する技術を開発している。

水車のガイドベーン制御では、双方向可変速ポンプで油圧シリンダーを直接加圧するハイブリッドサーボ技術を開発し、現在は中小容量機向けに標準的に採用されている。また、水車のガイド軸受に、潤滑油の代わりに水を使用する水潤滑軸受を開発し、ポンプ水車と横軸機を除く多くの水車に適用実績がある。

可変速機のコレクターブラシは、定速揚水機に比べて個数が多く、摩耗量が多い。従来品と材料構成比の異なる低摩耗ブラシを開発し、検証試験を経て実機での使用を開始した。摩耗量を従来品に比べて1/2以下に減らし、保守省力化に貢献している。

3.2 スマート化の取り組み

経済産業省から「水力発電設備における保安管理業務のスマート化技術導入ガイドライン」が指針として示され、水

力発電所のスマート化の検討が進められている。当社も、最新のデジタル技術やIoT技術を駆使した技術開発に取り組んでいる。

遠隔での監視はもちろんのこと、巡視点検支援システムや、環境センサー・五感センサー、ドローンの高度運行管理など、保守支援技術の開発を進めている。また、気象予測技術とAI技術を活用したダム流入量予測、更には最適化技術を加味して運用計画を支援するシステムを開発している。加えて、3Dデータの活用が汎用化してきており、設計から製造、組立、現地据付までの全ての局面に展開することで、精度を維持しながら省力化を図る取り組みも進めている。

4. 今後の展望

各国政府が誓約しているコミットメントを期間内に達成したことを想定して作成されたAPS (Announced Pledges Scenario) では、2050年カーボンニュートラルの達成には至らないことが見込まれており、今後、COP (締約国会議) などでは、NZE (Net Zero Emissions Scenario) に向けて、更にチャレンジングな目標を掲げることが予想される。

2024年度に策定中の第7次エネルギー基本計画でも、原子力発電を含む非化石電源の拡大が重要視されることが考えられる。水力発電は、古くから利用されてきた再エネとして、安定電源としての機能に加え、更に調整力としての機能も求められることが想定される。揚水発電でも、変動再エネの大量導入に加え、常に一定運転を行う原子力発電が増加することによって、蓄電機能とともに、調整力としての機能がより重要性を増してくることが想定される。

水力発電の発電電力量増大のためには、中大容量機の出力量アップや、運用の効率化、系統柔軟性を高める機能向上が必要になる。また、デジタル技術を活用した保守の高度化により、担い手を維持・確保することも重要なテーマである。

揚水発電では、揚水時の調整力確保、及び調整力拡大のための可変速化を含め、系統柔軟性を高める機能向上が必要になると考えられる。

当社は、これらの時代のニーズを的確に捉え、技術開発を進めていく。

文献

- (1) International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Statistics 2024. IRENA, 2024, 299p.
- (2) International Energy Agency. World Energy Outlook 2024. IEA, 2024, 398p.
- (3) International Energy Agency. Hydropower Special Market Report. IEA, 2023, 126p.
- (4) XFLEX HYDRO. "Making Flexible Hydropower a Reality". <<https://www.xflexhydro.com/>>, (accessed 2024-11-06).
- (5) 経済産業省. 第6次エネルギー基本計画. 経済産業省, 2021, 129p.
- (6) 資源エネルギー庁. 今後の再生可能エネルギー政策について. 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 (第62回) 資料1, 2024, 92p.
- (7) 森 淳二, ほか. 2050年カーボンニュートラルに向けた水力発電の貢献: JEMA水力発電ワーキンググループの取組み. 電機. 2022, 828, p.9-14.
- (8) 廣瀬孝明, ほか. 水車発電機の高効率化を実現する最新技術. 東芝レビュー. 2019, 74, 5, p.59-62.<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2019/05/74_05pdf/f04.pdf>, (参照 2024-11-06).



森 淳二 MORI Junji
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



宮崎 保幸 MIYAZAKI Yasuyuki
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



長田 大 OSADA Oki
東芝エネルギーシステムズ(株)
京浜事業所
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.