



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～

一般社団法人 日本電機工業会
新エネルギーシステム委員会 水力発電ワーキンググループ

主査 森 淳二^{◇1} 委員 震 明 克 眞^{◇2}
委員 中村 彰 吾^{◇3} 委員 増 子 利 健^{◇4}

1. はじめに

2020年10月、菅首相（当時）は所信表明演説において、2050年までに脱炭素社会を実現することを目指し、カーボンニュートラル（以下、CN）を目指すことを宣言した。さらに2021年11月のCOP26において、岸田首相は「2030年までを勝負の10年」と位置付け、2050年CNに向けた長期戦略の下、2030年度温室効果ガスを2013年度比で46%削減することを目指し、さらに50%の高みに向け挑戦していくことを宣言した。

2021年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画は、こうした政府の方針を踏まえた形で策定されており、2030年の新たなエネルギーミックスでは、再生可能エネルギー（以下、再エネ）の主力電源化に向けて、再エネ比率を36～38%にする野心的な目標が掲げられている。

水力発電は、古くから利用されている再エネであり、安定して出力できることが特長で、再エネの中でも最も

発電電力量が多い。揚水発電は、太陽光発電や風力発電など天候によって出力が変動する再エネ（以下、変動再エネ）の大量導入に不可欠な電力貯蔵設備や調整力として、今後、CNを実現するために、その機能はさらに重要性が高まると考えられる。

本稿では、揚水発電を含む水力発電が、CN社会に貢献するための取組みについて紹介する。

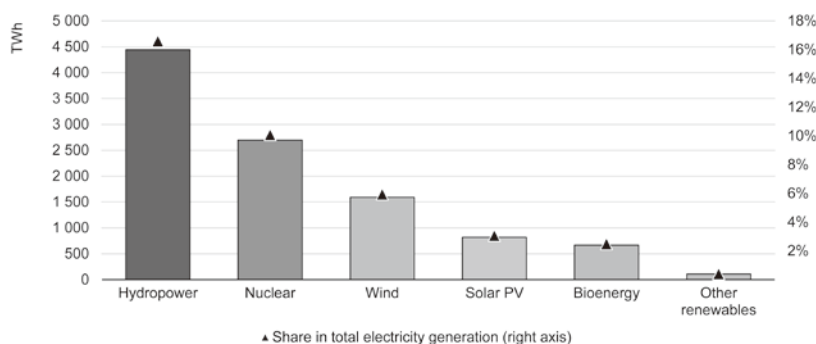
2. 水力発電の世界動向と日本における位置付け

2. 1 水力発電の世界動向

2021年は、水力発電に関して、世界的に注目すべきレポートの発行や会議が開催された。

その一つは、国際エネルギー機関（IEA）が、初めて水力市場のみに特化したレポートとして発行した“Hydropower Special Market Report”である^{（注1）}。同書において、水力発電は、現時点で最も活用されてい

Figure 1.1 Low-carbon electricity generation by technology and shares in global electricity supply, 2020



IEA. All rights reserved.

図 1 世界における CN 電源の発電電力量

◇1 東芝エネルギーシステムズ株式会社 パワーシステム事業部 シニアフェロー

◇2 日立三菱水力株式会社 水力技術部／主管技師

◇3 富士電機株式会社 発電プラント事業本部 発電事業部 水力プラント部／技師長

◇4 株式会社 明電舎 水力事業推進本部長

るCN電源（図1）で、今後も引き続き重要な設備と位置付けられており、新設のほか、近代化更新、発電未利用ダムへの発電設備の設置、小水力の開発などにより、設備容量を増やしていく必要性が示されている。また、揚水を含む貯水池式発電は、蓄電池と共に重要な電力貯蔵設備として位置付けられ、2030年までに、新設および一般水力の揚水化により設備容量を増やすことの必要性が示されている。

米国エネルギー省(DOE)と国際水力発電協会(IHA)が、世界の銀行、研究機関、NGO、企業や政府機関と共に開催した「揚水発電に関する国際フォーラム」では、頻繁な停電の回避とCN達成のために、揚水発電の設備容量を増やす必要があることを提言している^(注2)。

また、IHAが主催した「世界水力発電会議」では、「揚水発電に関する国際フォーラム」の提言も踏まえ、CNに向けた電力システムの安定性や柔軟性に貢献する持続可能な水力発電の推進と、それを達成するために制度設計の議論が行われた後に、サンホセ宣言を採択し、COP26に提出した^(注3)（図2）。



図2 水力持続可能性基準の協議会体制

2. 2 日本における水力発電の位置付け

日本は、世界第7位の水力発電設備容量を誇る水力大国の一つであるが、1990年代に入って以降、新設の開発案件は少なくなっていた。しかし、2012年に再エネの固定価格買取制度（FIT 制度）がスタートして以降、対象となる3万kW未満の中小水力発電所の新設や老朽化設備の一式更新が多数行われるようになった。その結果、中小水力発電の設備容量は、FIT 前の960万kWに対し、2021年6月時点の導入量で20万kW、FIT 認定量として40万kW増加した。

第6次エネルギー基本計画では、水力発電は優れた安定供給性や長期的に活用が可能な電源として引き続き重要と位置付けられ、2030年度のエネルギーミックスにおいては、設備容量は1040万kWに増加、発電電力量は至近10年の平均値に比べて、約160億kWh増加させる目標が示されている。

また、揚水発電は、変動再エネの大量導入に伴い、これまでの需要ピーク時を主体とした運用ではなく、変動再エネの出力制御を抑制する電力貯蔵能力や、火力が担っていた需給調整力や系統を安定させる慣性力などのアンシラリーサービス機能を担う設備として期待が高まっている。

これらの具体的な取組みについて以下に紹介する。

3. 一般水力の役割と取組み

3. 1 第6次エネルギー基本計画における水力発電に関する政策の方向性

第6次エネルギー基本計画において、水力発電は、運転コストが低く、ベースロード電源として重要な役割が期待されている。しかし、2030年までという時間軸で大量の新規開発は困難であることから、他目的で利用されているダムや導水等の未利用の水力エネルギーの有効利用、または高経年化した既存設備のリプレイスによる発電電力量の最適化・効率化が必要とされている。

3. 2 既存水力発電設備の出力アップ

水車の開発は、模型水車を製作し、性能を検証して実物にスケールアップするという手法がとられている。1980年以降は、コンピュータによる流れ解析（CFD）を行い、開発のスピードアップが図られてきたが、1990年以降コンピュータの性能が格段に向上したことに伴い、3次元CFDの精度が飛躍的に向上した。メーカーでは、この技術の水車性能の開発に適用し、ランナ更新時に①最高効率点の改善②部分負荷効率の改善③キャビテーション性能改善による運転範囲の拡大④部分負荷サージングの改善が可能となり、最大出力の増加だけでなく、発電電力量の大幅な改善を図っている。

図3～5は130MWのフランスランナへの適用例である^(注4)。①最高効率を改善②旧ランナの運転範囲を分析し、発電電力量を最大化する効率性能のランナ羽根を

設計③旧ランナのキャビテーション特性を改善し、運転範囲内のキャビテーションを抑制することで高性能ランナを実現させた。

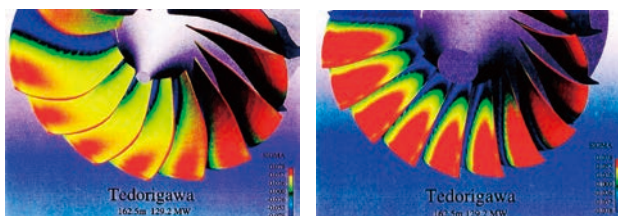


図3 ランナ出口形状の比較（左：新ランナ 右：旧ランナ）

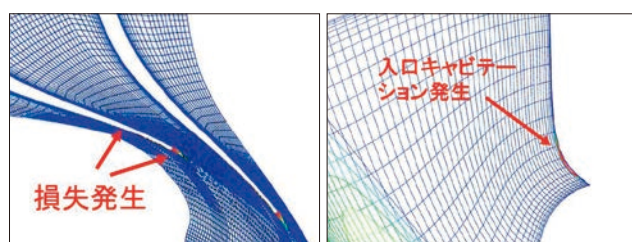


図4 旧ランナ羽根の
損失解析例

図5 旧ランナ羽根の
キャビテーション解析例

また、3次元CFD技術の向上により、既設設備における問題点の解析が可能となり、ランナ以外の構成要素も含めた更新に適用している。図6および図7は35MWのプロペラ水車への適用例^(注5)であるが、ランナだけではなく、ステーバーン、ガイドバーン、吸出し管の形状を変更することで、発電電力量を16%改善した。

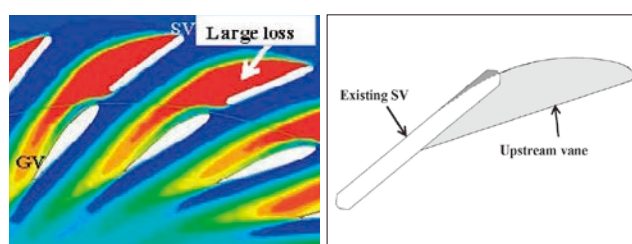


図6 ステーバーンの解析事例
（“Large Loss”部分に損失があり、ステーバーンの形状を改造）

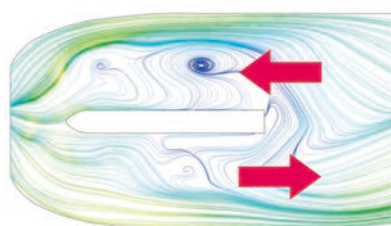


図7 吸出し管下流の解析例
（中央の流れがよんでいる。形状を変更し、流れを改善）

このような技術は、あらゆる規模の機器に適用できるが、容量の大きい設備の方が出力の増加、発生電力量増加の絶対値は大きくなるため、より効果的と考える。

また、水車のガイドバーンを制御する圧油装置の電動化やハイブリッド化、水潤滑軸受など、補機の削減、操作や潤滑用の油量を削減できる環境配慮型補機の適用は、日本独自の技術である。今後、SDGsへの配慮が高まっていく中で、日本が優位性を有する環境技術を国内外に展開していく。

3.3 未利用ダム、未利用水力の有効利用

国内には発電用以外にもダムが多数ある。一般財団法人 日本ダム協会の「2021年版ダム便覧」によれば、国内ダムの総数は2760カ所あり、そのうち発電に使われるダムは25%である。また、発電機が設置されているダムにおいても、発電に利用されずに放流される発電未利用水がある。

開発地点の小規模化・奥地化に伴い、発電未利用ダムに新たに発電所を設置して採算が確保できる地点は多くはないものの、確実に発生電力量の増大につなげることができる有望地点の新規開発は重要である。また、発電機が設置されているダムにおいても、その水の流れを複数の地点で発電利用できれば、発電電力量を増大させる可能性があるものと考えられる。

まずそのポテンシャルの把握は必要であるが、可能であることが分かれば、気象予報に基づく水運用高度化や、ダムのかさ上げ、堆砂対策などの策を講じ、治水との両立を図り発電への有効活用することが期待される。発電設備更新時に、機器の性能改善検討と併せて検討を行えば、発電設備の最適化も図ることができると考える。

4. 揚水発電の役割と取組み

4.1 日本の揚水発電システムの現状

日本には、42カ所、2750万kWの揚水発電設備がある。この設備容量は、中国に次ぎ世界第2位を誇る。1950年代から可逆式の揚水設備の建設が始まり、順次、大型の設備が建設されてきた。当初からピークシフト機能を担っていたが、1966年に商用原子力発電所が稼働してからは、需要の少ない夜間電力を蓄え、昼間に発電する機能を担ってきた。

近年、変動再エネの出力制御を削減する蓄電機能や、自然環境によって変動する出力に応じて需給調整をする機能等を保持しているため、揚水発電は最大限の活用が必要とされている。一方で、揚水時の損失があること、運用コストが高いことなどから、需要ピーク時などの利用に限られ、稼働率が低く、採算性の確保が難しいことが課題となっている。

また、古い設備が多く、2030年までに250万kW、2050年までには2000万kWが運転開始から60年を超えることになり、設備更新が必要な時期を迎える。政府においても、設備維持・機能向上を図るためには、採算性の向上が優先課題との認識の下、各種市場における収入機会の拡大、オペレーション費用削減のための運用高度化への支援、さらには新規開発の可能性調査への支援策等が検討され始めた。

4. 2 既設揚水発電所の可変速化改造

可変速揚水発電システムは、定速揚水発電システムにはない揚水運転時の下げ調整力を提供できること、発電効率が高く蓄エネルギー装置としてより効率的であるため、奥多々良木発電所1,2号303MW発電電動機において、既存の定速システムを2次励磁可変速システムに

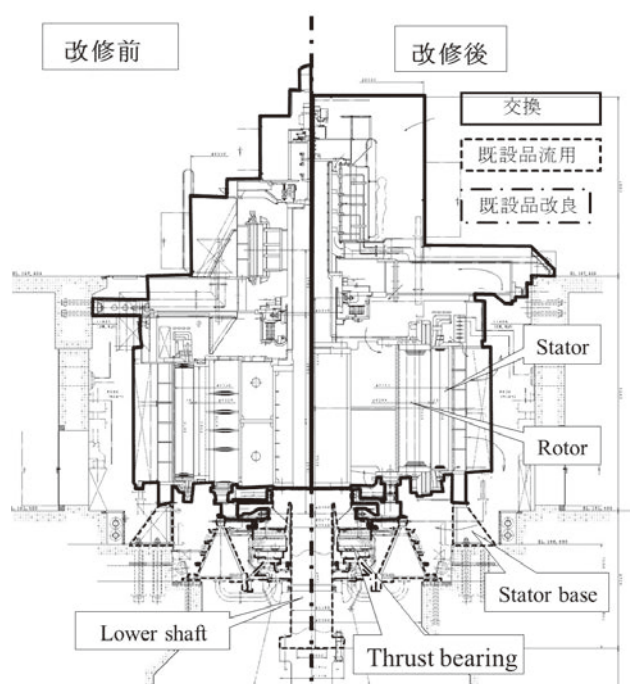
改良する工事が実施された^(注6)。この事例では、発電最大出力303MW、揚水最大入力320MWは不変のまま、水車部分の負荷効率を向上し、揚水方向は±45MWのシステム電力調整能力を新たに獲得している。

改良工事に当たり、以下の点を考慮した。

- ① 工事費削減のため、主要変圧器など他の主要機器は流用するので、それに合わせた可変速用ランナへの交換
- ② 既設発電所の限定されたスペースを考慮した、各種の機器寸法設計
- ③ 既設機器への影響を考慮した、励磁装置室を掘削する工法

ポンプ水車については、水車部分負荷特性に優れる中間羽根付ランナ（4+4枚）を採用した^(注7)。コンクリート埋設部は流用したが、性能向上のためランナ出口径（＝上部ドラフト径）は縮小した。励磁装置室の掘削は、他号機が運転中であることから振動値を監視し、機械掘削と導火管付き非電気式雷管を使用した発破掘削を使い分けながら、既存のトンネルの拡幅が行われた^(注8)。

発電電動機は、**図8**に示すように突極型から円筒型へ



出所：参考文献注6

図8 関西電力株式会社 奥多々良木発電所 発電電動機 改良前後比較

取り換えた。既設の天井クレーンを流用するため、はずみ車効果と回転子荷重の最適バランス化を図った。

可変速揚水発電システムは日本で開発された技術であり、近年は、変動再エネ導入のための蓄電および調整力用の設備として、世界でも注目を集め、導入されてきている。日本においては、1990年代に運転を開始した可変速揚水発電システムが、約30年を経過し、更新をされ始めている。

揚水発電は、将来にわたって、CNにおいて想定する再エネ導入量の達成と電力の安定供給の実現に貢献し、その役割を継続的に果たしていくと考えられる。

メーカーとしては、可変速揚水発電システムを中心に、揚水の採算性改善に向けて、効率の改善、運転範囲の拡大などの機能や性能の向上により、社会的便益を高めるよう技術開発を進めていく。

5. 運用・保守の高度化

5.1 水力発電に求められるデジタル化技術

第6次エネルギー基本計画において、エネルギーインフラの高経年化や技術者の高齢化などが進み、エネルギー供給を支える基盤が脆弱（ぜいじゃく）化していることが安定供給のリスクになっていることが指摘されている。一方で、AIやIoTなどの新たな技術による発電所運転の最適化やさらなる効率化などに取り組み、エネルギーコストを可能な限り低減することも不可欠とされている。

水力発電所は、高度成長期から1990年代にかけて建設された設備が多く、老朽化が進んでいる上、機器のデジタル化が遅れていること、山岳部や地下に設備があるため公共の電波が使いつらいことなどがIoT活用の障害になっている。

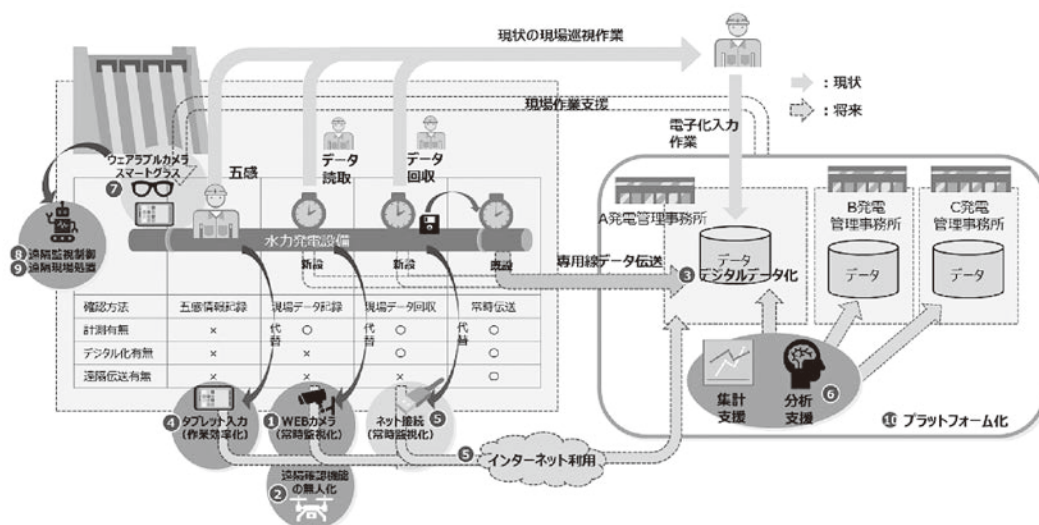
特に保守拠点から離れた地点では、移動時間の短縮や出向頻度を下げること重要な課題の一つとなっている。また、発電設備の詳細情報は、現地対応に頼らざるを得ないケースも多い。発電所の状況を遠隔で早く把握できれば、保守の負担を軽減することができる。

また、豪雨や台風でダムの運用が難しくなっていることから、ダム流入量の把握も課題として捉えられてきた。

このようなニーズの高まりもある中で、デジタル技術を活用したスマート保守や運用高度化の取り組みが始まっている。

5.2 スマート保安

経済産業省では、官民連携してスマート保安を推進すべく、「スマート保安官民協議会」を立ち上げ、2021年4月には、電力安全分野のスマート保安アクションプランを策定した。IoTやAI、ドローンなどの新たな技術を導入することで、電気設備の保安力と生産性の向上を両立させることを将来像とし、電気設備ごとに確実な技術実装を推進する道筋を示した。水力発電設備保安の将来像として、2025年を一つのターゲットイヤーに定め、以下の実現を目指している。



出所：『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』（2022年4月 経済産業省 産業保安グループ電力安全課）

図9 スマート化前後における水力発電設備の保安管理業務の例

- ・遠隔監視のさらなる高度化や、点検時間などの削減により、保安にかかるコスト合理化。また、有用であるが、現在確立していない技術開発の促進。

- ・スマート技術の活用を通じ、保安力の向上を図る。また、異常の予兆を的確に把握することにより、メンテナンスの計画的な実行、計画外停止の削減。

これを受け、水力発電所向けに、『水力発電設備における保安全管理業務のスマート化技術ガイドライン』が2022年4月に発行された。

このガイドラインは、以下を目的としたスマート化技術の導入支援と、実際に実証導入を行った事例が紹介されている(図9)。

- ・保安全管理業務において、五感やアナログ的に取得していた情報をデジタル化して蓄積。AIなどの分析技術を用いることで保安全管理レベルを向上。さらにデジタル化されたデータをネットワークでつなげたプラットフォームを整備することにより、監視作業を「いつでも・どこでも」可能にする「遠隔監視化・常時監視化(点検頻度の合理化)」へ発展。

- ・AI等による判断内容の客観化や高度化による設備老朽化診断を行う。デジタル化を通じて、現場作業内容の知識集約化による技術継承を行い、保安人材の減少対策とする。

5. 3 運用の高度化

ICT技術発展と汎用化に伴い、運用の高度化への適用も考えられている。

水力発電所の運用はダム水位や放水量などの制約の中で運転計画を作成する必要があり、現在は熟練の運転員の経験や判断に基づいて実施されている。それに対し、気象予報の精度が向上したことで、AI技術が高度化したことにより、ダムへの流入予測による運転計画支援システムの開発や検証が進められている。

今後、ダム流入量予測精度の向上や、制約の多い発電計画立案の負担軽減などに関して開発を進めることで、適用が促進されることが期待される。

6. おわりに

水力発電は、古くから利用されている発電方式であるとともに再エネの一つであり、水資源に恵まれたわが国においては、今後も重要な位置付けを担い続ける電源である。揚水発電は、変動再エネの導入拡大に欠かせない、蓄電池と同様の電力貯蔵や上げ／下げ調整力機能に加え、また、慣性力や電圧維持能力など回転機が有する系統安定化機能を併せ持つことから、一層重要性が増してくると考えられる。

JEMA水力発電ワーキンググループは、第6次エネルギー基本計画に掲げられている2050年CN達成に向け、水力発電および揚水発電の機能や性能向上と共に、デジタル技術も活用し、それぞれの設備の社会便益性を高めていくことに貢献していく所存である。

〈参考文献〉

- (注1) <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report> (2021/6)
- (注2) <https://pumped-storage-forum.hydropower.org/resources/publications>
- (注3) [https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/614ccf9eb51fe5dfbef667f2_San_Jos% C3% A9_ Declaration_Consultation_20210924_ENG.pdf](https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/614ccf9eb51fe5dfbef667f2_San_Jos%20C3%A9_Declaration_Consultation_20210924_ENG.pdf)
- (注4) 小池候朗、永崎敏見、塚本直史、吉川哲之、井筒研吾、「水車ランナ更新時におけるCFDの活用 ―手取川第一発電所―」、『ターボ機械』2002年11月号
- (注5) Ryoji Suzuki, Shogo Nakamura, Tadashi Tsukamoto, Large scale improvement of 45 years old propeller turbine, Hydro 2014.
- (注6) Koji INOUE, Shiro NAGASUE, Masayuki OKADA and Mikisuke HIGUCHI, "Renovating of Existing Pumped Storage Power Plant from Conventional System to Adjustable Speed System", XIX International Conference on Electrical Machines, Rome, September 6, 2010
- (注7) 阿黒克俊、村岡重則、「奥多良木発電所定速機可変速化に伴うポンプ水車ランナの設計」、『ターボ機械』、2016年3月
- (注8) 西中廣志、米津和哉、丹原秀大、「奥多々良木発電所 可変速化工事に伴う横坑拡幅工事の概要」、『電力土木』、Vol. 354、2011年7月