

電源の統合コスト低減に向けた電力システムの柔軟性確保・最適化
のための技術開発事業（日本版コネクト&マネージ2.0）

水力発電の柔軟性向上のための技術検討（FS）に係る成果詳細

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先 一般財団法人電力中央研究所

用語集

再エネ	再生可能エネルギー
変動再エネ	自然変動を伴う再生可能エネルギーで、本報告では太陽光発電と風力発電を意味する。
負荷変化率	定格出力に対する1分間当たりの出力変化率（%/分）
最低負荷	定格出力に対する最低出力（%）
柔軟な運用	変動性再エネの導入拡大時に、負荷変化率を高めることや、最低負荷を引き下げることで、需給バランスの維持等に貢献すること
柔軟性	負荷変化できること、最低負荷を下げた運用ができることなどを指す
設備利用率 暦日利用率	発電設備が1年間（365日）にわたって理論的に最大出力で運転した場合と比較して、実際にどの程度発電したかを示す指標（%）。 「実発電電力量 ÷（定格出力 × 365日 × 24時間）」で算出される。
需給調整市場	電力の需給バランスを保つため、発電電力量や需要を調整する力（調整力）を取引する市場。電力広域的運営推進機関（OCCTO）によって運用され、周波数制御や供給力調整に使用される。
GF ガバナ・フリー	ガバナ・フリー（Governor-Free）運転。給電指令所からの制御信号とは独立して発電機を単独で出力を調整運転する方式。ガバナ・フリー運転では系統の周波数変動時に発電機の出力調整・制御により周波数の安定維持に貢献する機能を有する。
LFC	負荷周波数調整運用（Load Frequency Control）。周波数偏差、連系線潮流の変動を検出して制御信号を発電所に伝送し、発電所出力を自動制御することにより、系統周波数を基準値に保持する制御。
EDC	経済負荷配分制御（Economic Load Dispatching Control）電力需要の変化に応じて効率の異なる各火力・水力発電機の経済的な出力配分を計算し、発電機出力を制御
DSS 運転	日間起動停止運転（Daily Start and Stop）
短絡容量	系統の電圧維持や事故時に必要な短絡電流を供給する容量
ファーム型接続	発電した電気を流すために必要となる系統の容量を、接続契約を申し込んだ順に確保する方式
ファーム型接続電源	ファーム型接続により系統接続する電源
ノンファーム型接続	送電設備の運用容量の空きがないときには出力制御されることを前提に系統連系を認める電源接続方式
ノンファーム型接続電源	ノンファーム型接続により系統接続する電源
ALR 制御	自動負荷調整制御（Auto Load Regulator）

AFC	自動周波数制御 (Automatic Frequency Control)
APC	自動出力制御 (Automatic Power Control)
BESS	バッテリーエネルギー貯蔵システム (Battery Energy Storage System)
CFD	数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics)。流体運動やキャビテーションなどの付随する現象の支配方程式を離散化して、初期条件と境界条件を定義して数値的に解く方法。
WLR 制御	水位調整制御 (Water Level Regulator)
SPPS	Smart Power Plant Supervisor。模型試験、数値シミュレーション、実機試験で得られたデータベースをもとに、多目的最適化制御や機器の状態推定・将来予測を行うデジタル技術の総称。
圧力脈動	本報告書では、非設計点で反動水車を動作させた場合に、吸出し管内部で渦が生じるとともに、渦芯にキャビテーションが生じた際に、渦の振れ回りやキャビテーションの不安定性に起因して生じる強い圧力変動のこと。
一次元解析	現象を一次元に簡素化して解析すること。本報告書では、水撃などの現象について、水車を含む水力発電設備内部の流れを種々のモデル化を行うことで解析する手法を指す。
応水制御	上流から流入する水量に応じた運転を行う制御。主機の運転は水槽水位で判断する。
壊食	キャビテーションが消滅する際に、流体が局所的に高圧・高温となることで金属の表面に損傷・欠損を与える現象。
過渡応答	水車の動作や弁、ゲートなどを急激に変化させた場合に、管路や水車に一時的に生じる圧力や流量の変化や、それに伴う水撃を含む非定常減少の総称。管路や水車に大きな荷重が作用する原因となる。
可変速機	回転数を変化させられる発電機、発電電動機
カプラン水車	有効落差 80m 以下の比較的低落差・大流量領域に適用される反動水車である。ケーシングは渦巻型で、ステイベーン、ガイドベーン、軸流式ランナ、吸出し管で構成される。ガイドベーン、ランナベーンは可動である。
キャビテーション	液体の流れの中の高速部分で圧力が飽和蒸気圧を下回ることで気泡 (キャビティ) を生じる現象のこと。
ケーシング	水車の外殻部分。水車へ流入した水をステイベーン、ガイドベーンへと流れを導く役割を持つ。形状によって円筒ケーシング、渦巻ケーシングなどに分類される。
衝動水車	ランナが水の運動エネルギーのみで駆動する水車。
水撃	長い管路で液体の流速を急激に変化させたときに、液体の慣性モーメントにより強い圧力変化が生じ、液体や管壁の弾性により決まる伝播速度で圧力波 (水撃波) が伝播する現象。

吸出し管	反動タービンのランナ下流に設けられた拡大管。断面積が上流から下流に向かって拡大することで、ランナ出口の圧力を水車出口の圧力よりも低くすることで流出速度を高める役割を持つ。
チューブラ水車	一般的に落差 25 m 以下の低落差で用いられる反動水車である。ケーシングが筒状で、軸流式または斜流式のガイドベーン、軸流式ランナ、吸出し管で構成される。ガイドベーン、ランナベーンは可動または固定のいずれかとなる。
定速機	一定の速度で回転させて用いる発電機、発電電動機
デリア水車	有効落差 20~120 m で比較的大流量領域に適用される反動水車である。ケーシングは渦巻型で、ステイベーン、ガイドベーン、斜流式ランナ、吸出し管で構成される。ガイドベーン、ランナベーンは可動である。
反動水車	ランナが水の運動エネルギーと圧力差の両方で駆動する水車
フランス水車	有効落差 10~600 m の広い落差帯に適用される反動水車の代表的な形式である。ケーシングは渦巻型で、ステイベーン、ガイドベーン、斜流式ランナ、吸出し管で構成される。翼はガイドベーンのみ可動である。
ペルトン水車	一般に 100 m 以上の高落差で低流量で用いられる衝動水車である。水流はノズルで加速されハウジング内に噴流となって流出し、回転するランナ外周に設けられたバケットに衝突することでランナを回転させる。ノズル出口には可動式のニードルが設けられており、流量を調節する。
ランナ	水車の羽根車。
ダム式	比較的高いダムにより河川をせき止めて池を造り、ダム直下の発電所との落差を利用して発電する方式。ダム貯水・調整池の調整容量が比較的大きい。運用による分類としては、主に貯水池式・調整池式に分類される。
ダム水路式	ダム式と水路式を組み合わせた発電方式で、両者の特性を兼ね備えた地点に適しており、各々単独の方式とした場合に比べて、より大きな落差を得ることが可能。ダム貯水・調整池の調整容量が比較的大きい。運用による分類としては、主に貯水池式・調整池式に分類される。
水路式	川の上流に堰や低いダムを造って水を取り入れ、長い水路により落差が得られるところまで水を導き発電する方式。調整池の調整容量が小さい。運用による分類としては、主に流れ込み式に分類される。
シリーズ発電	発電した水を河川に放流せず、上流発電所放水口と下流発電所取水口が連結している発電所群。電水比 (kW/m ³) で管理され、効率的な

	運用を指向する発電所が多い。
ダム	川の水をせき止めて水を貯める構造物。日本の河川法では高さ 15m 以上。
堰	川の水をせき止めて水を貯める構造物。日本の河川法では高さ 15m 未満。
取水口	河川・貯水池から水を導水するための工作物。除塵スクリーンや取水ゲートが設けられる。取水ゲートが自動制御できない地点も多い。
沈砂池	取水口を通過した土砂を沈降させるための水槽。流水断面積を大きくして流速を低下させる。沈澱した土砂は排砂門によって河川等外部に排出させる。
導水路	取水口から水槽まで水を導水するための工作物。トンネル、開渠、暗渠があるが、貯水池・調整池式では圧力トンネルが採用され、流れ込み式では無圧トンネルや開渠、暗渠が採用される。農業用水等へ利水補給している導水路や農業用水路からの分水で発電している場合もある。
サージタンク	圧力トンネルと水圧管路の間に設けられる水槽。発電所の負荷の急変に応じて使用水量が急変するとき、サージタンクの水位が変動することで、水撃作用が圧力トンネルに被害を及ぼさないようにする。
密閉式エアクッション サージチャンバー	機能としては開口型のサージタンクと同様であるが、水車の近傍に設けることにより、水圧鉄管の板厚減少と水圧鉄管からコンクリート管への材質変更により建設費の低減が期待できる。日本の事例はほとんどないが、ノルウェーやアメリカで 1970 年以降採用されている。
ヘッドタンク	無圧トンネルや開渠、暗渠と水圧管路の間に設けられる水槽。発電所の負荷の急変に応じて使用水量が急変するとき、ヘッドタンクに設けられた余水吐から越流することで、無圧トンネルや暗渠の被圧を防いだり、開渠からの溢水を防ぐ。
余水路	ヘッドタンクの余水吐から越流した余水を、水車下流に流下させるための水路。急勾配の開渠もしくは管渠が多い。高速射流が流下するため、末端の減勢工で流速を低下させたのち、河川もしくは放水路に放流されることが多い。長時間の使用を想定しておらず、歴史のある発電所では煉瓦積みや石積みの余水路もある。
余水路省略	土木設備のみ、もしくは、機械設備との併用により、余水放流設備を省略する設計。土木設備の対応としては、水路の補強やヘッドタンクの嵩上げ等がある。機械設備との併用では、フランス水車では水圧管下部への放流バルブの設置や取水口制水ゲートの段階閉操

	<p>作等があり、ペルトン水車ではデフレクタを用いた放流がある。フランス水車地点では落差 100 m 以上もしくは最大使用水量 3 m³/s 未満、ペルトン水車では全地点で建設費の低減が期待できる。</p>
--	--

目次

1. 調査の目的・概要	1
2. 水力発電の導入現状・技術動向等の調査.....	1
2.1 水車発電機の技術動向と国内水力の開発状況	1
2.1.1 水車機種の分類	1
2.1.2 水車の技術動向	2
2.1.3 発電機の技術動向と可変速揚水式水力発電.....	3
2.1.4 水車発電機開発の今後 10 年程度の見通し	4
2.1.5 国内水力発電の導入状況.....	4
2.2 水力発電の負荷調整運用の現状と開発状況.....	6
2.2.1 水力発電の負荷調整運用の現状.....	6
2.2.2 水力発電の柔軟性向上に向けた国内外の研究開発動向	10
2.2.3 水力発電の柔軟性向上に向けた研究開発事例調査.....	12
2.3 国外の調整市場事例の調査.....	19
2.3.1 米国のアンシラリーサービス市場	19
2.3.2 英国の市場制度	21
2.3.3 欧州の市場制度	21
3. 水力発電の柔軟性向上に向けた課題の抽出・整理	22
3.1 水車内の流体現象ならびに流体構造連成現象の課題の特定	22
3.1.1 水車内部及び周辺機器における物理現象と対策	22
3.1.2 柔軟性向上を阻害する現象（キャビテーション等）の監視・抑制	25
3.1.3 大型水車の調整力に関する課題.....	26
3.1.4 水力発電設備のサプライチェーン問題とイニシャルコストの問題	27
3.1.5 水車の標準化	28
3.1.6 設計、保守技術の支援.....	28
3.2 周辺環境を考慮した制約の特定と解決策.....	29
3.2.1 河川・水路設備の分類・整理.....	29
3.2.2 河川・水路設備における問題点・課題・対策の整理	30
3.2.3 余水放流設備	33
3.2.4 取水口ゲート	33
3.2.5 導水路（水圧管、シリーズ発電を含む）	34
3.2.6 洪水吐ゲート	34
3.2.7 下流河川環境	35
3.3 設計要件や運用方法の影響の特定.....	40
3.4 まとめ	43
4. 参考文献.....	49

1. 調査の目的・概要

一般水力発電は、従来、固定価格買取制度(FIT: Feed in Tariff)の適用電源として出力を調整するニーズが低かったことに加え、長期固定電源として、優先給電ルール上も出力制御(抑制)を受けることが実質的になかった。他方、今後はノンファーム型接続によって、系統混雑要因での出力制御を受ける可能性が生じている。すべての電源がノンファーム型接続となり、卒FITも見据える場合、ノンファーム型接続電源は最大受電電力(kW)での系統利用が保障されず、kWhに基づいた卸取引等となる。そのため、現状のように kWh で全量売電するのみならず、市場価格に応じた出力調整や、需給調整市場等での Δ kWの取引を行うことを含め、電源の設備利用率の高さが発電事業者にとっては重要となる。しかしながら、混雑発生時には、確実な制御を前提に、ノンファーム型接続電源として送電端電力を出力制御値(出力上限値)以下に制御、または送電端電力=0に制御することとなる。公平性の観点での全電源メリットオーダー・一律制御も見据えると、様々な要因で最低出力等が決まっている水力発電にとっては、系統連系の障壁となる可能性もある。そのため、当該電源を中心として出力調整機能を改善・柔軟性を向上させ、kWhの価値を提供しつつ一般送配電事業者の求めに応じることができれば、再生可能エネルギー(再エネ)の連系量及び発電電力量を増やせる可能性がある。

本調査では、出力変化率の向上や最低出力の引き下げ等の技術開発を行うことも見据えて、一般水力発電の柔軟性向上の限界とその要因を明らかにする。

2. 水力発電の導入現状・技術動向等の調査

本節では、国内外の水力発電の導入現状や技術的背景・動向、研究開発動向について、文献調査やメーカヒアリング調査の結果を整理する。

2.1 水車発電機の技術動向と国内水力の開発状況

2.1.1 水車機種の分類

現在、水力発電は、数kWの小規模から1,000MW級までの発電システムで電力供給を行っているが、1849年にJ.B.Francisによるアメリカでのフランシス水車の実用化(出力約170MW)が起点で大型化が始まり、1950~1970年代は戦後の経済復興で先進国の電力需要が急激に増加する中、当時の技術革新の波に乗って水車機種の開発と大型化が進んだ。水車の形式は発電所の落差、流量で適用できる機種が決まり、衝動水車であるペルトン水車は落差200m以上の高落差に適しており、反動水車の代表例であるフランシス水車は数十m~数百mの広い落差範囲で用いられ、軸流反動水車のカプラン水車やチューブラ水車は80m以下の落差に適している[1]。

カプラン水車及び、斜流式反動水車であるデリア水車は可動翼ランナであり、ランナボス内にランナ翼を駆動する機構を備えるため固定羽根のフランシス水車と比べると部品点数が多くなり、初期コストとメンテナンス時の期間やコストが増加する傾向がある。一方、ガイドベーン開閉による流量変化に合わせて適正なランナベーン開度に調整して運転されるため、部分負荷運転時や過負荷運転時において設計点効率に対する効率低下が小さく、広い運転範囲で効率が高くランナ出口旋回流に伴う振動が小さい運転が可能となる。

2.1.2 水車の技術動向

水車の総出力ベースで約 90%以上、総台数ベースで約 80%以上とされるフランシス水車に関して、世界的には大容量化が進み、中国では 800 MW クラスの大容量水車が開発されている[2]。一方で、国内では、開発地点が限られるため大容量水車の新規開発はみられないが、約 30~70 年以上運転してきた既存の発電所でのランナを主とした部分更新、ケーシングなどの埋設部を掘り起こしての全体更新が、30MW 以上の比較的大規模な水力発電所から 30MW 未満の中小の水力発電所まで多数の水力発電所で行われている。これらの水車更新において水力エネルギーを有効活用のための高効率化に加え、部分負荷運転の必要性に対応する特性改善が行われており、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics ,CFD) に基づく流れ解析を用いた流体設計を駆使した新型ランナが適用されている。

1970 年代より簡易的な CFD により水車内部流れの損失を評価し、より損失が少なくなるような形状設計が行われており、特に 1990 年代からは乱流解析が設計ツールとして使えるようになり、形状最適化に貢献している。当初は、ランナ、ガイドベーンなどの要素ごとの単体解析が主であったが、その後、ケーシング入口から吸出し管出口までの全体流路解析も行われている。さらに、最近では、CFD の学術的な研究の進展と、コンピュータ関連技術の飛躍的な発展により、キャビテーション発生状況を忠実に解く、非定常・気液二相流解析のような大規模解析が性能評価に用いられている。フランシス水車のランナは固定羽根であるため、設計流量に対して大流量側、小流量側のいずれにおいても、ランナ下流に発生するキャビテーションを伴うらせん渦の振れ回りやキャビテーションの体積変化による振動 (水圧脈動) が発生することがある。このような非定常現象も CFD 解析で再現可能となっており[3]、設計時に CFD で評価できるため、運転範囲の拡大、高効率化につながる形状開発が可能となっている。

最近では、「中間羽根ランナ」[4]、もしくは、「前進翼ランナ」[5]と呼ばれる新型ランナが用いられる。これらのランナは数十年以上前からアイデアはあったが、形状設計、実機製造が難しく、実機への適用は限定的であった。前述の CFD と、溶接構造でのランナ製作が一般的に行えるようになったことで標準的に適用が可能となっている。

中間羽根ランナは、主羽根とそれよりも長さの短い中間羽根を交互に配置し、特に低流量運転時にランナ内の流れを整流することで効率を向上させている。2005 年にランナ更新で中間羽根ランナを適用した 60MW フランシス水車の例の他、高落差機では中間羽根ランナが適用されるケースが多くなってきている。

前進翼ランナは、羽根入口においてバンド側がクラウン側よりも回転方向の前方にある (前進している) 形状となっている。これにより、ランナ回転の遠心力成分によるバンド側への流れの偏りを抑制し、水が羽根面を効果的に流れる羽根面の傾斜を実現している。一例として 2014 年にランナ更新した有効落差 128m、水車出力 89.5MW のフランシス水車でも前進翼ランナが適用されているように、概ね 150m 以下の有効落差の発電所で適用されている。電力需要変動に応じて出力調整することに優れている可動羽根水車は、ランナ可動部の構造が複雑で保守作業の費用が嵩む。最近のニーズに合わせ、前進翼ランナを適用し、固定羽根水車へ更新が検討されるケースが出始めている。1972 年に 42MW の斜流水車 (デリア水車) として運用開始した発電所において、フランシス水車への改造の例がみられる。

低落差大流量の水力発電所で適用される可動羽根水車の軸流水車（カプラン水車、バルブ水車等）に関しては、国内の更新も比較的多くみられており、ランナの翼形状設計において CFD 解析を適用し水車効率の改善が図られる場合が多い。

ペルトン水車に関しては高落差地点の多い欧州において製作実績が多く、近年はインド、ブータン、中国、ベトナムなどのアジア諸国においてもペルトン水車を使った水力発電所が出現しつつある。小流量から大流量まで安定かつ比較的高効率で運転可能なペルトン水車の特性は、脆弱なローカル系統における運転に適合していると言われている。国内のペルトン水車の更新においては、CFD 解析を適用することでケーシング、ノズル、バケットの各部の形状設計を最適化することで高効率化が進められている[6]。

2.1.3 発電機の技術動向と可変速揚水式水力発電

発電機及び水車発電電動機の容量推移は、水車及びポンプ水車の容量推移に呼応するものであり、1970年代から1980年代にかけて海外、国内で大容量化が進んだ。大容量水車発電機については、2000年代になると中国での製作が多くなる。発電電動機については、大容量高落差ポンプ水車の開発に伴って、国内において大容量の発電電動機が製造されている。また、突極形同期機に比べ複雑な構造の回転子を用いる可変速揚水式水力発電用電動機の高容量化も進んでいる。2007年に運開した揚水式水力発電は発電電動機（345MVA、600±24rpm）を達成しており定速機と遜色ないレベルになっている。

電動機の可変速化技術は19世紀後半から電動機の世界速度制御技術として様々な方法が開発されてきた。1960年代には静止型可変電圧可変周波数電源（VVVF）を用いた同期機や、かご形誘導機の速度制御技術が実用化され、1980年代には二次励磁制御の一種である静止セルビウス方式などを使用した数10 MW級の可変速ポンプ水車が実用化された。1980年代初めから単機容量300 MVA級の可変速揚水式水力発電の研究がすすめられ、二つの方式が考えられた。一つは同期発電機と周波数変換器を1対1で組み合わせた一次可変速方式であり、もう一つは巻線形誘導機のセルビウス方式による速度制御と原理的に同じ二次励磁可変速方式である。後者は、周波数変換器の容量を発電電動機の容量に比べかなり小さくできることから、経済的に優れるとして有力視され、国内では二次励磁制御による可変速揚水式水力発電に注力する方向となった。1987年実証プラントとして22MVAの可変速発電システムが運転開始し、1990年出力80MWの世界初の可変速揚水式水力発電が国内で運転開始している。

一方で、最近では自己消弧素子の大容量化に伴い、静止型周波数変換器の大容量化が進み、発電電動機と同じ容量の周波数変換器を用いた一次可変速システムの実用化も進んでいる。2013年にスイスで100MVAの周波数変換器を用いた一次可変速システムが運転開始した。2024年時点で可変速揚水式水力発電（二次励磁方式）は、日本では8発電所（計14台）、海外で5発電所が運用されており、また、海外で3発電所の建設が進行中である。

可変速技術は、現状では上記のように揚水式水力発電に用いられている。これは、揚水式水力発電運転時の負荷調整が柔軟に行えることが大きな利点となっているためである。しかし、発電運転時においても回転数を変化させることで出力制御を行うことで水車内部流れに起因する問題を抑制できるため、後述するような国外の調整市場が我が国でも導入されれば、一般水力におけ

る柔軟性向上のための解決策の候補の一つとなり得る。

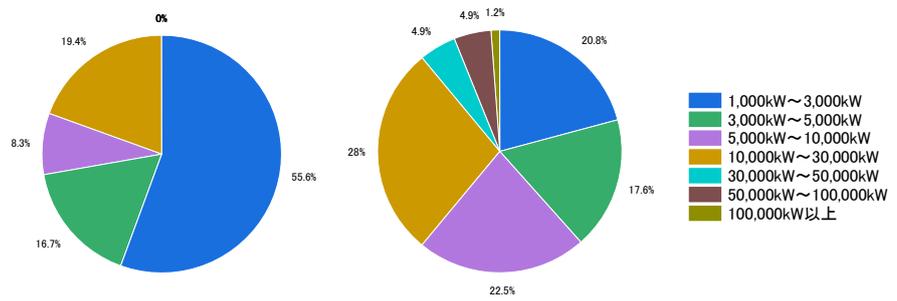
2.1.4 水車発電機開発の今後 10 年程度の見通し

FIT 制度や FIP 制度、長期脱炭素電源オークション制度の継続による後押し、また、第 7 次エネルギー基本計画において水力発電電力量の拡大見通しの数値が示されたこともあり、国内の中小容量水車においては CFD を用いた新設計ランナへの更新を伴う改良工事や新設工事が引き続き継続すると考える。また、運開後 50 年以上となる大容量水車の更新工事も見込まれる。また、変動再エネ増大に伴う調整力の必要性から、揚水式水力発電の改修、新設、可変速化などが進む可能性がある。普通水車においても、改修や技術開発による柔軟性向上によって調整力への寄与が増える可能性がある。

2.1.5 国内水力発電の導入状況

国内水力発電の導入状況として、ターボ機械協会・生産統計のデータ[7]、及び日本の水力エネルギー量[8]をもとに、至近 10 年の一般水力の出荷実績について整理した(対象は 1,000kW 以上)。出力区分別の新規水車の出荷台数の割合を図 2.1.1(1)に、同じく改修水車の出荷台数の割合を図 2.1.1(2)にそれぞれ示す。また、出力区分別の新規水車の総出力(設備容量)を図 2.1.2(1)に、同じく改修水車の総出力を図 2.1.2(2)にそれぞれ示す。

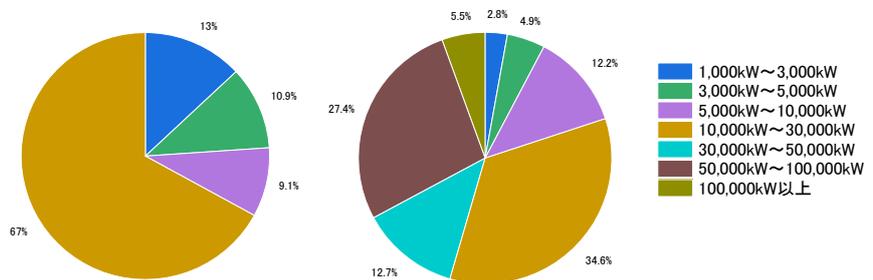
至近 10 年の新規水車の出荷は 36 台であり、台数ベースで見ると 1,000~3,000kW が総出荷台数の半数以上を占める一方、出力ベースで見ると 10,000~30,000kW が全体の 7 割程度を占めている。新規水車は全て 30,000kW 以下であるが、これは水力発電の FIT・FIP 対象が 30,000kW 以下であるためと考えられる。一方、改修水車の出荷は 346 台であり、日本の一般水力の地点数データ(1,000kW 以上 1362 地点数)と比較すると、100,000kW 以上の大型の改修水車の割合は少ないが、これらも経年化とともに今後改修が進む可能性がある。



(1) 新規水車(36 台)

(2) 改修水車(346 台)

図 2.1.1 至近 10 年の出力区分別の出荷実績（出荷台数の割合）



(1) 新規水車(36 台)

(2) 改修水車(346 台)

図 2.1.2 至近 10 年の出力区分別の出荷実績（総出力の割合）

次に、出荷先の発電所名等から運用別に水力発電の形式を分類した。形式別の新規水車の出荷台数の割合を図 2.1.3(1)に、同じく改修水車の出荷台数の割合を図 2.1.3(2)にそれぞれ示す。また、形式別の新規水車の総出力（設備容量）を図 2.1.4(1)に、同じく改修水車の総出力を図 2.1.4(2)にそれぞれ示す。図 2.1.3(3)及び図 2.1.4(3)は、1,000kW 未満含む日本の一般水力（1373 地点）の出荷実績推定値（地点数又は総出力の割合）を示し、流れ込み式と水路式が同じ方式とみなす。

新規水車については台数、総出力ともに水路式とダム式の比率が同程度（図 2.1.3(1)及び図 2.1.4(1)の比較より）であり、図 2.1.3(3)及び図 2.1.4(3)の参考に示す日本の一般水力（1373 地点）の分布とは異なる傾向を示す。改修水車については、出荷台数では水路式が日本の一般水力の流れ込み式と同様に 6 割程度を占める（図 2.1.3(2)及び図 2.1.3(3)の比較より）が、形式別の総出力では水路式が 4 割程度に減少する（図 2.1.4(2)）。

以上の検討より、今後想定される出力制御対象の拡大に対し、技術導入の費用対効果の観点から、出力規模の大きいダム式・ダム水路式（調整池式、貯水池式）を対象とした運用柔軟性の検討を行うことが有効と考えられる。

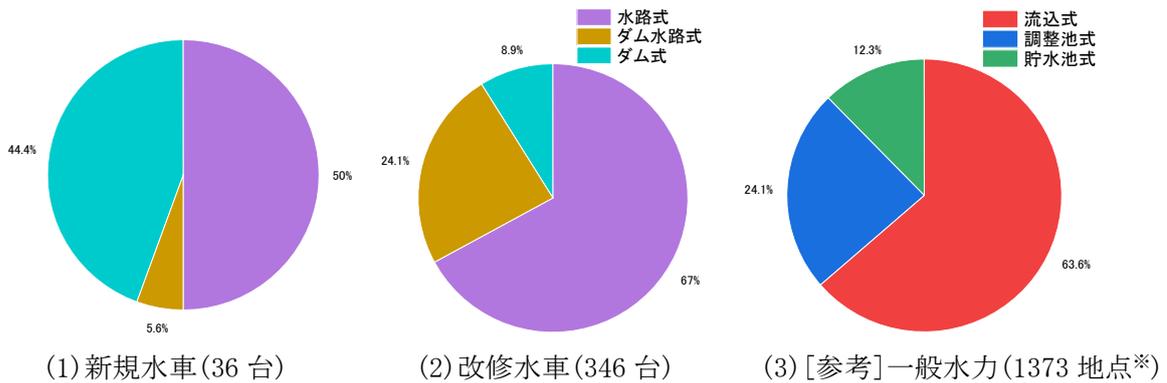


図 2.1.3 至近 10 年の形式別の出荷実績 (1) (2) : 台数の割合、(3) : 地点数の割合

※1,000kW 未満含む

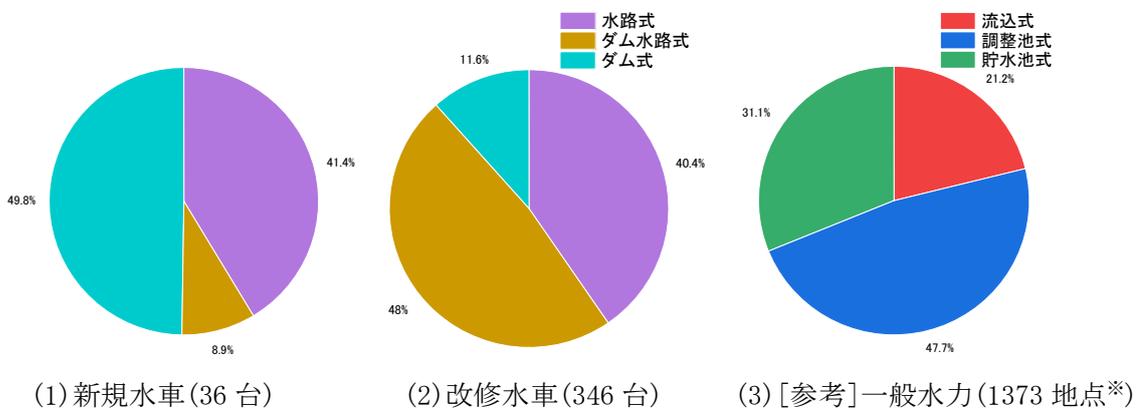


図 2.1.4 至近 10 年の形式別の出荷実績 (総出力の割合) ※1,000kW 未満含む

2.2 水力発電の負荷調整運用の現状と開発状況

2.2.1 水力発電の負荷調整運用の現状

エネルギーの有効活用を目的とした最適化設計による高効率化は重要なテーマの一つである。一方で、電力の需給バランス調整や河川流量の季節変動に応じて設計流量よりも低流量での運転（部分負荷運転）が求められるため、部分負荷運転に関連する研究、技術開発も古くから行われてきた。

一般的に、フランシス水車やカプラン水車は部分負荷あるいは過負荷になると、ランナ下流にキャビテーションを伴う強い旋回流（渦）が生じ、この渦芯が振れ回るドラフトホワールと呼ばれる現象が発生することがあり、それによるキャビテーション壊食が発生したり、振動が大きくなって機器の金属疲労を早めたりする影響がある。また、ランナ翼間渦の様に、局所的に壊食を発生させるような現象もある。水車の負荷調整機能を拡大させ、このような部分負荷あるいは過負荷で水車を長時間運転すると、これらの壊食や損耗や疲労累積被害は大きくなりはするが、基本的に、無負荷から 100%負荷まで、水車を運転することは可能と考えられる。ただし、個別の発電所の事情により、例えば、設備吸出し高さが浅い、落差変動範囲が広い、水路系あるいは電力系統との干渉が発生する、給気管のような構造物が流水中に存在する等の場合には、運転が可能

範囲に制約が生じることがある。なお、メーカーにより定められている、水車の効率保証範囲は、運転可能範囲とは別に、比較的効率の高い範囲に限られている。これは、保証は検証されるべきものと言う考えに基づくものである。実際、あまりにも低負荷あるいは過負荷側で運転すると、効率が出力あるいは流量に対して急激に変化するようになり、効率試験において、測定誤差を考慮した保証値との正しい比較が出来なくなる。

負荷調整運用の現状を整理するために、まず、これまでに公表されている論文等の文献調査を行った（表 2.2.1）。

表 2.2.1 フランシス水車・フランシスポンプ水車の最低出力[9]-[15]

最低出力	出典
一般水車(定速)・50%	Umar, B. M., et al, Appl. Sci. 14(17), (2024)
ポンプ水車(定速)・50%	大野泰照、ターボ機械第 20 巻第 10 号 (1992)
ポンプ水車(定速)・40%	戸田一典・他、東芝レビュー Vol.61 No.5 (2006)
ポンプ水車(定速)・48%	谷清人・他、日立評論、Vol.91 No.3 (2009)
ポンプ水車(定速)・40%	加藤真敏・他、東芝レビュー Vol.73 No.3 (2018)
ポンプ水車(可変速)・32.5% (葛野川)、0% (京極)	Fujita, T., et al., HYDRO 2015
ポンプ水車(可変速)・30%	Tilbury, B., HYDRO 2024

これらを比較すると一定速度で回転する水車やポンプ水車では最低出力が 40-50%との記載が多く、可変速ポンプ水車では 0%まで出力を下げられる機種もある。このような違いが生じる理由の 1 つは、定速機では部分負荷運転時にもランナの回転速度は一定で、流量のみが低下するため、ランナベーン（回転羽根）に対する水流の相対速度や相対流れが変化し、前述のドラフトホワールが生じ、圧力脈動やキャビテーションが発生し運転が阻害されるためである。これに対し可変速ポンプ水車では、回転数と流量の両方を変化させられるため、ランナ内部の流れは定格負荷運転時とほぼ相似を維持できるため、ドラフトホワールの発生を回避して流量範囲を広くすることができる。

上記は大型のポンプ水車に関する事例がほとんどであった。次に、今後ノンファーム型接続される水力発電の大部分を占めると想定される中小水力の負荷運用について調査を行った。はじめに、運用方法、調速機性能、出力調整制御について整理する。

○中小水力の運用方法

(i) 流込式

河川を流れる水を貯めることなく、そのまま発電に使用する方式。河川流量によって発電所出力が変化するため、システムの需要に応じた負荷調整はできない。

(ii) 調整池式

河川の流れをせき止めた規模の小さいダムに水を貯め込み、ピークに合わせた運用が可能。こ

の方式の発電所は1日または数日間という短期間の水量を調整する。但し、負荷変化にレスポンス良く追従できるものとそうでないものがある。圧力導水路は前者であり、無圧導水路は後者となる。

(iii) 貯水池式

調整池式より規模の大きいダムに水を貯め、ピークに合わせた運用が可能。この方式の発電所は年間を通じての水量を調節する（水量が豊富で電力の消費量が比較的少ない春・秋などに河川水を貯め込み、電力が多く消費される夏・冬に発電する）。

○調速機性能について

調速機は電気協同研究 第57巻第5号「一般水力発電所の制御・保護システム合理化」で4種類に分類され、性能や機能などが規定されている。性能選定に当たっては、原則として表2.2.2の基準により選定されるが、中小水力においては、Y級、Y'級が大半を占めている。

表 2.2.2 調速機の性能選定

級別	性能選定基準
X 級	<ul style="list-style-type: none"> 調速機フリー運転（調定率一定運転）または AFC 運転を行うことにより系統周波数の調整を行う主要発電所
Y 級	<ul style="list-style-type: none"> X 級を使用する発電所に準じ系統周波数の調整に協力する発電所 系統単独運転（直配負荷を含む）あるいは試送電を行うが、X 級に該当しない発電所
Y' 級	<ul style="list-style-type: none"> 不動時間、不動帯の規定を除外（但し、最大水圧値及び最大速度上昇率の保証値を満足することが条件） Y 級を使用する発電所に準じ系統周波数の調整に協力する発電所
Z 級	<ul style="list-style-type: none"> 周波数調整を必要としない発電所 誘導発電機を採用する発電所

○負荷調整制御

中小水力の負荷調整制御は運用方法により異なっている。流込式の場合は取水量に応じた運転が行われるため、運転停止を水槽水位で判断する制御を応水制御または水槽水位に応じて負荷調整する水位調整制御（WLR: Water Level Regulator）による負荷調整が一般的である。また、調整池式や貯水池式は自動負荷調整制御（ALR: Auto Load Regulator）による負荷調整が一般的である。

[水位調整制御（WLR）] 水槽水位で予め設定された水位調整範囲において、出力設定範囲（最低出力～最大出力）との間に垂下率特性をもたせ、水位に応じた出力設定値を定め発電機出力との偏差から負荷制限設定器を自動的に駆動して出力を調整する（図 2.2.1）。

[自動負荷調整制御（ALR）] 制御所などからテレコン等を介し送られてくる出力指令値を受信し、発電機出力との偏差から調速機の負荷制限設定器（77）や、負荷調整設定器（65P）を自動的に駆動して出力を調整する。尚、一般的な各設定器の変化率は表 2.2.3 の通り決まっているが、当該

設定器を制御する WLR や ALR の制御速度は、水路系等の影響を考慮して発電所ごとに異なっている。調整池式、貯水池式の場合、50%~100%/分程度という数値が公表されている[16]。

○ 国内中小水力の負荷調整機能の現状

国内のある水車メーカーの協力を得て、至近 10 年間の国内納入事例について、運用方法、调速機性能、出力調整制御、最低出力の 4 つのポイントで調査を実施した。具体的な数量は示さないが、このメーカーの事例については、表 2.2.4 に示すように、水車の最低出力は、WLR の最低出力設定や ALR の外部からの出力指令値により決まっている場合がほとんどであり、最低出力については、メーカーが推奨値を示す場合もあるが、多くは発電事業者が運用の中で、安全性など様々な要因を考慮してサイトごとに定めていることが多い。

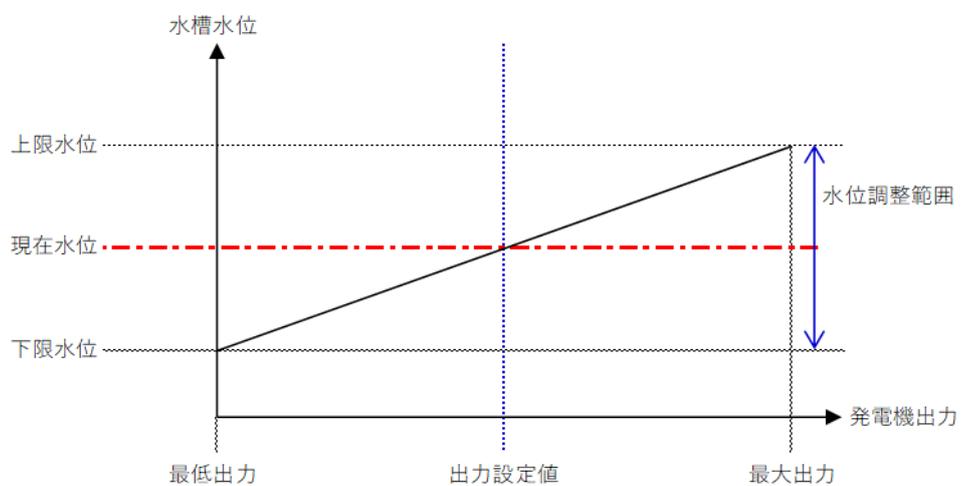


図 2.2.1 水位調整制御（垂下率特性）

表 2.2.3 : 各設定器の変化率

設定器名称	設定器変化率
負荷制限設定器 (77)	ガイドベーン開度 0-100%/分
負荷調整設定器 (65P)	出力 0-100%/分

表 2.2.4 現状の中小水力の出力調整機能のまとめ

運用方法 (サイト数の割合)	流込式 (49%)	調整池式 (39%)	貯水池式 (12%)
出力調整制御	応水制御・WLR 制御	ALR 制御あるいは APC 制御、まれに応水制御・WLR	AFC 制御/ALR 制御
出力調整方式	77	77、まれに 65P	65P
制御装置内の最低出力設定	無負荷開度	無負荷開度か起動開度、まれに 65P 下限ただし 65P 下限は無負荷開度に設定	65P 下限/無負荷開度ただし 65P 下限は無負荷開度に設定
调速機等級	Y 級、一部に Y' 級	Y 級と Y' 級、まれに X 級	X 級罫線

以上のように、既存の水車発電機について、出力調整幅自体はある程度広く確保されているものが多いと言える。しかし、最低出力は設備の健全性の維持の可否に基づいて決まるという事実と、揚水式水力発電を除く一般水力発電の出力調整は河川流量や、貯水量に依存した、比較的長時間スケールの大きな変化に対応するために行われている。太陽光発電や風力発電などの、気象条件の短時間の変化の影響により大きな負荷変動が生じる変動再エネが大量流入する近年の状況で、需給バランス維持や系統混雑時の出力調整のために、変化の幅が大きな負荷調整を高頻度かつ高速に行った場合、機器や設備の信頼性や耐久性、安全性に関わる問題の発生が懸念される。したがって、より慎重な検討が必要である。

2.2.2 水力発電の柔軟性向上に向けた国内外の研究開発動向

再エネ主電源化のための水力発電の柔軟な運用は世界各国の課題となっている。そこで、最近の国内外の研究開発動向を調査するために ReserchGate を用いて世界で報告されている論文検索調査を行った。概ね 2014 年～2024 年の期間とし、キーワードとして「hydraulic turbine」「part load」を使用し全 124 件の論文をピックアップした。

著者所属の国別（1 論文で複数国の著者がいる場合それぞれ 1 件でカウント）では表 2.2.5、図 2.2.2 及び図 2.2.3 となり、中国 52 件と、ヨーロッパ諸国（スイス 22 件、ヨーロッパ全数 59 件）がそれぞれ全体論文数の 1/3 程度を占めており、近年は中国、欧州を中心として研究が進められていることが示唆される。一方で、日本は 3%にとどまっており、表向きのデータによる判断ではあるが、近年は他国に比べて、水力発電に関する研究はあまり盛んに行われている状況ではないと考えられる。

表 2.2.5 論文著者の国別分類

① 中国 52 件	⑤ オーストリア 6 件
② スイス 22 件	⑥ ドイツ 5 件
③ カナダ 10 件	⑦ 日本、ブラジル 4 件
④ スウェーデン、スペイン 7 件	⑧ ノルウェー、イラン、ネパール、インド 3 件

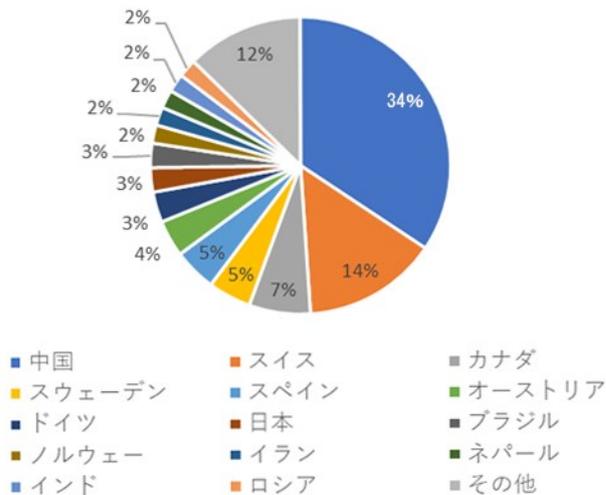


図 2.2.2 論文著者の国別分類

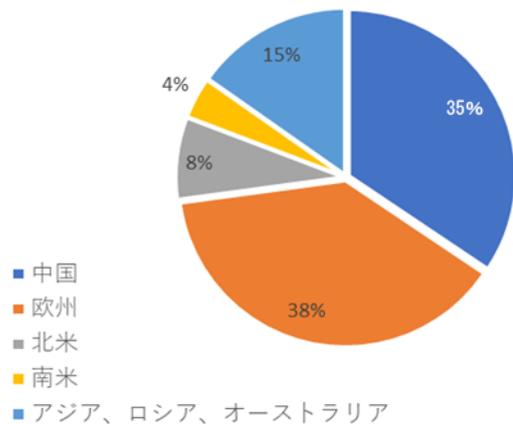


図 2.2.3 論文著者の地域別分類

ここで調査した多くの論文における水力発電所の位置づけと研究の目的、課題は以下のようにまとめられる。

【水力発電所の位置付け・役割】

- 電力システムにおける供給と需要のバランス調整において水力発電所は非常に重要な役割を担う。
- 太陽光や風力発電などの新しい再エネの普及に伴う電力の変動に対して水力発電所で従来以上の出力変動に対応した運用が求められる。

【柔軟性向上に向けた課題】

柔軟性向上のためには、従来と異なり以下のような運用が求められる。

- 部分負荷運転～過負荷運転（より広い運転範囲での運転、無負荷での運転）
- 頻繁な起動停止、急激な出力調整
- 頻繁な出力調整

これらの要求に応えるためには、水車及び周辺機器に対して以下のような技術課題が生じる。

- 水車、ポンプ水車の内部の非定常流体现象（キャビテーション含む）に起因する水圧変動
- 非定常流体现象に伴う機器への変動応力の作用や振動による各部の疲労、騒音の発生
- 水車、ポンプ水車、発電機の軸系回転に伴う振動、騒音
- 水車、ポンプ水車の運転に起因し水路系（鉄管、サージタンク、上下池）と連成した水圧変動、機器への応力変動、出力（負荷）変動【過渡応答】
- 水車、ポンプ水車、水路系、制御系、電力系統の相関した出力（負荷）変動【不安定現象】
- 水車、ポンプ水車機器のキャビテーションによる壊食
- 流体機器の応力変動、振動に伴う損耗、破損

2.2.3 水力発電の柔軟性向上に向けた研究開発事例調査

太陽光発電や風力発電など、出力変動が大きな再エネが大量流入に対する系統安定への寄与を目的とした水力発電の柔軟性向上に関する取り組みが欧州で先行している。そこで、EU加盟国にスイスを加えて実施されている、EUが主催するプロジェクトの取り組みと成果を中心に調査を行った。あわせて、米国における水力発電の研究開発等への支援状況について調査を行った。

【1】 HYPERBOLE (2013-2017) [17][18][19]

●概要

EUが資金を提供し、EPFL（スイス連邦工科大ローザンヌ校）が取り纏めたコンソーシアムでAndritz、Voith、GE-hydroなどが参加した。

EUで採択された2020年に向けた戦略的エネルギー(20-20-20)指針[20]は、風力発電、太陽光発電(PV)などの再生可能エネルギーの普及に基づくエネルギー産出の劇的な変化を想定しており、気候変動に関する2015年のパリ協定(UNFCCC COP21)では、EUのエネルギー消費のうち再生可能エネルギーの比率を2030年までに少なくとも27%以上にする目標が示された。

電力ネットワーク内で新再生可能エネルギー(NRE: New Renewable Energy)の無駄のない統合を達成するには、発電所が十分な貯蔵能力を持ち、発電と消費の間の均衡を迅速に確立できるような一次、二次、三次系統制御能力を備えていることが必要である。水力発電は、電力需要の大きな変動に対する急速な発電と周波数制御(アンシラリーサービス)能力があり系統調整の役割をはたす。さらに、揚水式水力発電は大電力の貯蔵が可能であり、サイクル効率は80%以上が可能であることを示した。

HYPERBOLEプロジェクトの課題の一つは、水力発電所の動的特性の予測、評価手法の開発である。水力発電所において正規運転範囲外での運転や過渡的条件では、不安定な流れ条件となり、水力機械の保全上のリスクになる。このため、最悪の場合、電力系統から切り離しが必要となる。この手法の開発には、流体・電気システムの1次元モデルの構築と、水車模型試験により確認される水力音響特性評価が必要となる。EPFLにより開発された数値シミュレーションツール「SIMSEN」により、電氣的、流体的1次元モデルを開発し計算実行された。

また、フランス水車とポンプ水車の縮小模型を用いて様々な試験が実施された。目的は開発された1次元モデルの検証と、流体不安定現象やシステムとの相互作用の理解を深めることであった。設計外の運転によって生じる非設計点の運転による非定常的な機器要素への負荷について、材料疲労や寿命短縮につながる可能性のある事象を取り上げた。最後に、開発手法による予測と、フランス水車による実測データによる検証が行われ、水力発電所設備の主要な動的特性が評価できることが示された。

● HYPERBOLEプロジェクトの科学技術的な目標

①動的流体不安定特性及び、流体-電気システムにおける相互作用の理解の深化

水車、ポンプ水車の運転域拡大のために不安定現象の根本原因を明らかにした。極低負荷(基準出力の30%以下)と過負荷(基準出力の110%)では高レベルの水圧脈動と出力変動がみられる。機械構造は、この非設計点の動的負荷変動の強度と不安定性にともない、製品寿命の減少や、場

合によっては、機能を失う場合がある。さらには、運転状態の不安定さにより系統から切り離される場合もある。これが、運転範囲として概ね基準出力の 60～100%に制限されることが多い理由である。さらに、正逆回転するポンプ水車に関しては、発電モードから揚水モードまでの 1 日のうちの大きな変動への対応が特徴となるが、機器は過渡的条件下での長時間の運転が行われるため、機器の保全に注意が必要である。プロジェクトのゴールとして、実験や、数値流体力学 (CFD) と有限要素法 (FEM) を含む数値解析により、複雑な不安定性の原因となる流体现象を明らかにした。

②水力発電所の非設計点運転時における包括的な多要素モデルの構築

既存水車の模型試験や実機試験により検証された水力発電所の多要素モデルの開発が 2 つ目の目的であった。水車の極低負荷運転、過負荷運転でみられる負荷変動の原因となる複雑な流体现象に関する新しい知見が得られ、これらのモデル化が可能となった。種々の運転条件に関するモデル化は、EPFL により開発された動的システムの数値シミュレーションツール SIMSEN の利用が可能である。SIMSEN は産業界の研究パートナーにより、水力機械とシステム、電機機械、パワーエレクトロニクス、制御システムを含めた水力発電所の動的特性のシミュレーションに広く用いられた。電機機械やパワーエレクトロニクスの新たなモデルが開発されており、水力発電所の包括的な多要素モデルの計算結果については、模型試験での検証、及びイギリス、コロンビア、カナダのフランシス水車の実発電所での検証試験が行われた。

③電力系統への NRE (再生可能エネルギー) の統合による利点の整理

NRE の安全な統合に関するデモレーションが 3 つめの目的である。フランシス水車やポンプ水車の運転域拡大は、慣性や 1 次、2 次調整力を提供することで新しい制御技術とともにエネルギーネットワークにおける NRE の増強に貢献可能と考えられる。新しい水力発電所の柔軟な調整運用は、1 次可変速や 2 次可変速制御方式による発電機の先進的な励磁装置やコンバーター (変換器) の技術開発により可能となる。人工的なネットワークシミュレーションモデルにより安定的に追加が可能な NRE 投入容量が評価された。流体モデルと関連パラメータは SIMSEN により詳細なモデルが提供され、水力発電所に関連する水路や水力機械、電気機械、制御が含まれている。詳細モデルと簡略化モデルの比較により、水力発電に適用される種々の技術のモデル化に関するレベルの指針も提供している。プロジェクトでは、NRE が高比率となる場合のエネルギーシステムの系統安定性や安全性の議論に加えて、揚水式水力発電の 2 次調整市場、3 次調整市場における役割に関するエネルギー戦略に対して最適化アルゴリズムの開発も目標とされた。

【2】XFLEX HYDRO (2020-2023) [20]

HYPERBOLE の後継プロジェクトとして、XFLEX HYDRO が実施された。「水力発電が系統安定化の唯一のキアセットであることを示すこと」を目的に、実証試験ベースで展開された。資金は EU が提供し、4 年間でおよそ 18,000,000 ユーロが拠出された。

主な成果は以下の 5 項目である。

① デジタル技術 : SPPS (Smart Power Plant Supervisor) の様々な活用

SPPS は、実機フィールドデータ、模型試験データ、数値シミュレーションデータを入力関数、性能や損傷などに関する目的関数群（メタモデル）を用いて水力発電ユニットを目的に応じて最適制御するためのシステム統合技術の総称である。一例として XFLEX の実証プラントである、Vogelgrun 発電所は、落差 12m、単機発電出力 35MW の 4 枚羽根カプラン水車発電機 4 台を擁する流れ込み式水力発電所であり、そこに SPPS を導入した。モデル特性を正確に表現するメタモデルを作成し、それを用いた発電出力のシミュレーションを実測値と比較することでメタモデルが正しいことが実証された。本モデルでは、出力はガイドベーン開度の増加と共に増加するように設定されている。データドリブンな手法がもてはやされる昨今、模型データと言う広い意味ではデジタル制御方法が、今後価値を持ってくる可能性がある。

- ② 水力発電・BESS (Battery Energy Storage System) のハイブリッド活用[21][22][23][24]
- 前述の Vogelgrun 発電所は、4MW の FCR (1 次調整力) を供給する能力を有しているが、良く知られているように、可動翼水車に調整力を供給させると、翼の回転軸を支持しているブッシュ等の摩耗が激しくなることが予想された。そこで、4 台のうちの 1 台の発電ユニットに、650kW、376kWh のバッテリーを併設した。バッテリーと水車のハイブリッド運転を行うことにより、FCR 幅 4MW の 25% の容量のバッテリーを用いたハイブリッド FCR 運転を行うことが試みられた。システム構成としては、水車発電機ユニットのコントローラーと、電池の管理システムの上位に、ハイブリッド制御装置を挟む形式を採用している。非ハイブリッドシステムの場合は、1MW の 30 秒以内での出力下げ要求に対して速度が不十分であったのに対して、ハイブリッドシステムでは BESS が不足分を埋め合わせ十分な速さで出力が変化できることが示された。また、ハイブリッドシステムを用いることで水車発電機分の出力変化は、非ハイブリッドシステムよりも遅くなる。つまり、ハイブリッド運転をした場合、細かい出力の変動はバッテリー側が負担するので、水車のガイドベーンやランナベーンの動きは、緩やかになる。また、その結果として、ガイドベーンブッシュとランナベーンブッシュの摩耗量は、それぞれ、62%と 32%減少することが確認された。

- ③ Hydraulic short circuit による揚水式水力発電の高速化
- 揚水式水力発電の運転における柔軟性は、ポンプ入力電力の不足によって制限されることがある。水車の出力は、部分負荷から全負荷まで変化させることができる。一方、定速機の揚水式水力ポンプの場合、入力電力は、揚水式水力発電に必要な揚程で決まり変更することはできない。したがって、必要な入力電力が送電網から供給される場合にのみ、ポンプ運転が可能となる。Hydraulic short circuit では、併設されたポンプと水車の両方が同時に運転される。ポンプは、揚水式水力発電に必要な揚程で決まる入力電力で作動する。水車出力は、水車の通常の運転範囲内で変化させることができる。したがって、送電網から供給される正味の消費電力は、ポンプ入力電力と水車出力電力の差となる。この運転中、ポンプの流れの一部は水車を通過し、一部は上部貯水池に流れることがある。Hydraulic short circuit 運転により、電力はある揚程で 100% のタービン出力と貯水ポンプ入力電力の間で変化する。

- ④ Doubly Fed Induction Machine (DFIM) (2 次励磁可変速方式) + 可変速揚水式水力発電
- 発電された交流電流の一部が、周波数コンバーターを介して非同期モータ発電機のロータに供給され、±10% 程度の回転速度変動が可能となる。また、周波数コンバーターで消費され

る電力はモータ発電機の実出力電力の約 10%になる

- ⑤ Full-Size Frequency Converter (FSFC) (1次可変速方式) +可変速揚水式水力発電
従来の同期発電機の固定子が、モータ発電機電力の 100%の容量を持つ周波数コンバーターを介して電力ネットワークに接続される。原理的にはユニットの回転速度範囲を自由に設定できる。

また、上記の技術を発電所に実装することで以下のような、実証試験を行った。

- Z ‘Mutt: 5MW の可逆ポンプ水車を備えた揚水式水力発電で、可変速技術を使用して柔軟性を向上させることを目指し、数値シミュレーションにより、機械の応答時間を改善する最適な運転シーケンスを選定した。
- Frades 2: 390MW の可逆ポンプ水車を 2 基備えた揚水式水力発電で、可変速ユニットとハイドロショートサーキット技術を導入することで、運転範囲の拡大を確認した。
- Grand ‘Maison: 150MW のユニットを 12 基備えた揚水式水力発電で、新しい水車ランナと高度な制御技術を使用して効率と柔軟性が向上した。
- Alqueva: 130MW の可逆ポンプ水車を 4 基備えた揚水式水力発電で、低コストで柔軟性を向上させるためのハイドロショートサーキットと高度な制御技術を実証した。
- Alto Lindoso: 317MW のフランス水車を 2 基備えた貯水池式水力発電で、運転範囲の拡大と電力の柔軟性の最適化を行った。
- Caniçada: 35MW のフランス水車を 2 基備えた貯水池式水力発電で、中規模プラントの柔軟性オプションを評価した。
- Vogelgrun: 39MW の Kaplan ユニットの 4 基備えた流れ込み式水力発電で、BESS をハイブリッド化し、柔軟性サービスとメンテナンスの最適化を図った。

【3】EU 圏で進行中のプロジェクト (2024 年現在)

上記のように EU 圏においては HYPERBOLE、XFLEX の実施により、再エネの電力系統への統合に必要な系統安定に、水力発電がキアセットとして貢献するために必要な基本的な要素技術は整備され、技術実証が成功し、社会実装やさらなる技術の高度化へとシフトしている。XFLEX が終了した 2024 年現在も EU 圏では多くの国際プロジェクトが進行している。ReHydro[25] (期間 2024-2028 年 予算: 約 12,000,000 ユーロ) では、既存発電所の柔軟性向上のための近代化改修に関する研究・実証などを目的として、7 か国・22 機関が参画している。主な目標は以下のとおりである。

- ① 水力発電所の修復と近代化: 既存の水力発電所を最新の技術でアップグレードし、持続可能性と効率性を向上。
- ② 生物多様性の保護: 新しいタービン設計を導入し、特にヨーロッパウナギなどの絶滅危惧種に配慮した魚に優しい技術を開発。
- ③ デジタル化ツールの導入: プラントの健康情報を活用して、メンテナンスのニーズを減らし、運転停止時間を短縮するためのデジタル化ツールを実証。
- ④ バッテリーとのハイブリッド化: バッテリーを備えたハイブリッド水力発電所の制御システム

ムを実装し、グリッドサービスを強化。

また、XFLEX では、1 か所の水力発電所や揚水式水力発電の柔軟性向上技術を主題としていたのに対し、ReHydro では、XFLEX 得られた知見やデジタル技術を駆使して、複数の発電所を統合的に制御してより大規模な柔軟性を実現する試みも行われている。また、EU では既存設備の改修技術に関してもう 1 つのプロジェクトとして SHERPA[26]（期間 2024 -2028 年 予算：約 3,800,000 ユーロ）も 4 か国・7 機関が参画して実施中である。主な目標は以下のとおりである。

- ① 金属パッチとコーティングの付加で損傷を最小限に抑え、キャビテーション耐性向上。
- ② 流量範囲に応じて回転速度を調整する新設計。
- ③ 水質と効率改善の為の高度な空気注入システム。
- ④ E Flow（河川の生態系維持に必要な流量）に適応したうえで性能向上のための新ランナ設計。
- ⑤ モデリング、シミュレーション及び監視ツールによりエネルギー出力、柔軟運用、費用対効果、生物多様性への影響観点から新ソリューション評価。

ReHydro 以外にも、状態監視、予測メンテナンス、デジタルツインなどをキーワードに、iAMP-HYDRO[27]（2023-2026 年 予算 4,500,000 ユーロ）、D-HYDRO FLEX[28]（2023-2026 年 予算 4,040,000 ユーロ）、Di-HYDRO[29]（2023-2026 年 予算 4,500,000 ユーロ）などの複数のデジタル技術の適用、高度化を目的とした国際プロジェクトが並行して進行中である。

これらのプロジェクトは進行中であるため、成果の全貌は不明であるが、デジタル技術による柔軟性向上や出力制御の下での高効率化に加えて、近年は設備の損傷対策がこれまで以上に重要な研究開発テーマとなっている。このことは、実証試験や社会実装の進展に伴い、後述するような柔軟性向上のための出力制御や運転制御に伴う副作用が、機器の信頼性やコストに対して大きな問題として認識されつつあることを示唆している。

【4】米国の支援制度

米国では、バッテリーと水力のハイブリッド水力収益性推定オンラインツールの開発に対して支援している。開発者は DOE 傘下のアイダホ国立研究所である。水力とバッテリーのハイブリッドを採用する際、メンテナンス費の削減、系統安定性向上、税額控除、炭素クレジット等の潜在的成本削減が見落とされがちである。これに対処するため、様々なバッテリーサイズに対して収益性推定するオンライン評価ツール「Hydro + Storage Sizing」を開発している[30]。

米国・エネルギー省（Department of Energy、DOE）が Hydropower Testing Network（HyTN）を形成し、その中で WPTO（Water Power Technologies Office）は、水力発電技術開発者と試験機能プロバイダーを結び付けるため、水力発電試験ネットワーク（HyTN）の第 1 フェーズを開始した。HyTN は 3 つのフェーズで計画されており、フェーズ 1 では、試験施設（バウチャープロバイダー）に選択され、技術開発者に選ばれてマッチングされた場合、試験施設はテストサービス提供の資金を受領できる。フェーズ 3 はプロジェクトの実行段階で、試験施設と技術開発者は作業範囲を決定、契約締結、作業開始する計画となっている。WPTO は、水力発電所のアップグレードのために新技術開発が必要で、HyTN において水力発電の革新技术準備を高めるに役立つ幅広い試験へのアクセス増を目指している。開発者と協力して技術を試験、商業化に向けて前進させるため、水

力発電技術をテストする既存の機能を備えた施設を求めており、学術機関、民間、国立、連邦の研究所にテスト施設(またはバウチャー提供者)となる申請を募集した。注目される技術テストは、機能は水力テスト、機械、材料、構造テスト、電気・電子テスト、生物・水生生物に関する試験等である[31] [32] [33] [34]。

農務省 (United States Department of Agriculture, USDA) は、エネルギー料金の引下げ、クリーンエネルギーへのアクセスの拡大、農家、牧場主、農業生産者の雇用創出を目的として、クリーンエネルギープロジェクトとして農村部との提携を発表した。プロジェクトの多くはインフレ抑制法によって資金が提供される。USDA はまた農村コミュニティがクリーンエネルギーに対する連邦資金を特定しやすくする為の農村エネルギーリソースガイドも発表している。USDA は Powering Affordable Clean Energy Program(PACE)と Rural Energy for America Program(REAP) を通じて合計 US\$375million 以上の資金を提供している。ケンタッキー州 (KY) の Lock 11 Hydro Partners LLC は、KY 川の Lock and Dam 11 の 3MW の新設流れ込み式水力発電所建設に約 US\$16.6million を受け取る企業を選定した。同 HPP では水力発電の環境への影響を抑え、KY 州住民に手頃な価格でクリーンエネルギーを確保している。その他の案件としては AK 州 46MW-BESS、45MW-BESS、AZ 州の 3 つの BESS (合計 35MW) 等が挙げられる [35] [36] [37] [38] [39]。

DOE は、電力システムの需要対応に対して水力発電能力を高める目的で、以下の 9 つの研究開発プロジェクトに約 US\$15million の投資を発表した。対象となるトピックスは、ハイブリッド水力発電デモ、柔軟性向上技術、運用柔軟性で各プロジェクトの概要は下記のとおりである [40] [41] [42]。

- (1) 水素技術と新しい運用戦略によって可能になった水力発電所の柔軟性の向上を活用した高度なグリッドサポート機能のデモンストレーション:
企業・団体機関等：テネシー州メンフィス拠点の DRG Technical Solutions
研究プロジェクト：CO 州マニトウスプリングスの既存水力発電所と水素エネルギー技術のハイブリッド化で得られる潜在的メリット実証目的。
パートナー研究所：コロラドスプリングスユータリティーズ、国立再生可能エネルギー研究所 (NREL)、カリフォルニア大学アーバイン校。
- (2) フォークスオブビュート共同設置型バッテリーエネルギー貯蔵システム:
企業・団体機関等：メリーランド州アナポリス Synergics Energy SService
研究プロジェクト：CA 州 Forks of Butte HPP に BESS 設置。貯蔵機能追加での収益増加、干ばつ発生可能性による財務的影響を回避。
パートナー研究所：Ventura Energy Services
- (3) 三元ハイブリッド化と最適化による水力発電の運用柔軟性の向上:
企業・団体機関等：メリーランド州ベセスダ Cube Yadkin Generation
研究プロジェクト：NC 州リッチフィールドの Tuckertown HPP エネルギー貯蔵ハイブリッド運用及び回復力プロジェクトに BESS 設置テスト。同施設には既に太陽光とのハイブリッド、BESS 追加でのトライブリッドをプロジェクト全体を通じ、施設信頼性とプラント運用効率・性能への影響分析。
パートナー研究所：General Electric

- (4) 発電所停止を殆ど必要とせず既存水力発電の柔軟性を迅速に向上させるポリマーベースのアドオン:
企業・団体機関等: NY州ニスカユナ GE Vernova Advanced Research
研究プロジェクト: 米国 HPP の約半数を占めるフランシス水車用のポリマーベースのアドオン開発。同アドオンは水車をより頻繁に、より長期間使用可能に水車(ランナ)形状変更、より幅広い条件下運用能力向上。
パートナー研究所: GE Vernova Hydro Power、パシフィック・ノースウェスト国立研究所(PNNL)、BOR
- (5) 水力発電の柔軟性を定量化し、進化する電力網にさらに貢献できるよう施設を運用する方法
通常・異常気象下での大規模カスケード水力発電システムから得られる経済的価値と信頼性の利点、及び揚水式水力発電の増分価値の特定:
企業・団体機関等: WA州スポケーン Avista Utilities
研究プロジェクト: WA州コロンビア川カスケード HPP 柔軟性を定量化、評価。これら HPP 間運用調整機会と期待経済的・その他利点特定。
パートナー研究所: PNNL と WA州立大学、水力発電所の所有者と運営者のアドバイザーも関与。
- (6) HydroFlex: 再エネの電力系統への統合と貯蔵ソリューションによる水力発電の柔軟性の向上:
企業・団体機関等: CA大学アーバイン校
研究プロジェクト: オープンソースの最適化ツール HydroFlex を開発、実証。同ツールは、水力発電リソース、特に古い施設や遠隔地の施設を太陽光、風力他、様々なエネルギー貯蔵と最適に統合、発電最大化に使用。
パートナー研究所: NREL (国立再エネ研究所)
- (7) 水力発電の柔軟性の特定、解放、及び採用:
企業・団体機関等: NC州リサーチ・トライアングル・パーク RTI International
研究プロジェクト: モデリング、分析、インフラ計画機能を開発、水力発電の柔軟性と柔軟な運用に関する理解を、単一の施設から複数の施設を含むシステム全体規模まで拡大。水力発電の運用変更によるオペレーターへの影響や従業員のトレーニングへの影響も評価。
パートナー研究所: コロラド大学ボルダー校の水と環境システムに関する高度意思決定支援センター、NREL、PNNL
- (8) グリッドの回復力と持続可能性を強化するための柔軟な水力発電運用の人工知能支援による最適化:
企業・団体機関等: NC州立大学
研究プロジェクト: 人工知能と機械学習技術を備えたツールを使用、水力発電所運用を最適化、柔軟性を高める。結果として得られる運用フレームワークは水力発電所全体に適用可能で適応性あり。

パートナー研究所：Duke Energy、NREL、NYPD、パデュー大学

- (9) 柔軟性を高めるための高度なモデリング、最適化、水管理を活用して水力発電市場への参加を強化：

企業・団体機関等：ミズーリ州ローラ ミズーリ科学技術大学

研究プロジェクト：人工知能活用、天気予報、市場価格予測、水と電気の制約、生産コスト考慮の水力発電運用へのアプローチ開発。これはオペレーターが状況をより正確に予測、それに応じてHPP運用を調整可能とすること目的。

パートナー研究所：NREL、南西部電力局、西部地域電力局

DOE は 33 州で 293 の水力発電改善プロジェクトを選定し、水力発電所アップグレードに最大 US\$430million のインセンティブ投資を発表した。水力発電は米国再エネ電力の約 27%を占めるが老朽化が進み、多くの施設で修理やアップグレードが必要である。このため、ダム安全性を高め、215 施設のグリッド回復力を改善し、水力発電所や請負業者、ベンダーの 6,000 の既存雇用を保護した。また、水力発電の主要 3 分野、①送電網回復力向上、②ダム安全性向上、③施設の環境・レクリエーション改善に関する改善を支援した。さらに 2 つの水力発電インセンティブによって事業を補助した。

- (1) 水力発電生産インセンティブ：

発電及び販売された電力に対して適格な水力発電所にインセンティブ支払提供

- (2) 水力発電効率改善インセンティブ：

国内既設水力発電設備からの発電量を増やすための支払提供

これらのインセンティブは、タービンと発電機の交換またはアップグレード、制御システムのアップグレード、ケーブルと変圧器のアップグレード、水圧管のアップグレード等が対象である。環境の水質改善プロジェクトとして、タービンを通った水が発電時に失われる酸素を減らすタービンの導入も支援している [43] [44] [45]。

2.3 国外の調整市場事例の調査

本項では、国外の調整市場事例調査として、米国や英国、欧州の市場制度や水力発電を対象とした支援制度について整理する。なお、欧州の支援制度については、前述の HYPERBOLE プロジェクトなどにおける支援と共通であるため割愛する。

2.3.1 米国のアンシラリーサービス市場

米国のアンシラリーサービス市場について、CAISO (California Independent System Operator、カリフォルニア州)、ERCOT (Electric Reliability Council of Texas、テキサス州の大部分 (独立系統))、ISO-NE (ISO New England、ニューイングランド 6 州)、MISO (Midcontinent Independent System Operator、中西部～南部の 15 州以上)、NYISO (New York Independent System Operator、ニューヨーク州)、PJM (PJM Interconnection、東海岸～中西部の 13 州以上)、SPP (Southwest Power Pool、アーカンソー州・カンザス州・オクラホマ州など) の電力システムの安定性・信頼性を維持するための商品を整理事る (表 2.3.1) [46]。

表 2.3.1 米国のアンシラリーサービス市場

	CAISO	ERCOT	ISO-NE	MISO	NYISO	PJM	NYISO	SPP
一次周波数制御								
商品名	-	応答予備力	-	-	-	-	-	-
調達方法	-	PPR: 必須 負荷: DAM	-	-	-	-	-	-
二次周波数制御 (連続)								
商品名※	調整	調整、高速 応答	調整	調整	調整	調整	調整	調整
個別上げ/下げ商品	有り	有り	無し	無し	無し	無し	無し	有り
調達方法	DAM/RTM	DAM	RTM	DAM/RTM	DAM/RTM	RTM	DAM/RTM	DAM/RTM
価格メカニズム	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP
二次周波数制御 (事象対応)								
商品名	運転予備力 非運転予備力	緊急予備力	同期予備力 (10分) 非同期予備力 (10分)	運転予備力 補足予備力	運転予備力 (10分) 非同期予備力 (10分)	同期予備力 非同期予備力	運転予備力 (10分) 非同期予備力 (10分)	運転予備力 補足予備力
調達方法	DAM/RTM	DAM	FA/RTM	DAM/RTM	DAM/RTM	RTM	DAM/RTM	DAM/RTM
価格メカニズム	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP
三次周波数制御 (事象対応)								
商品名	-	非運転予備力 (30分)	運転予備力 (30分)	-	運転予備力 (30分) 非運転予備力 (30分)	二次予備力	運転予備力 (30分) 非運転予備力 (30分)	-
調達方法	-	-	FA/RTM	-	DAM/RTM	-	DAM/RTM	-
価格メカニズム	-	-	MP	-	MP	-	MP	-
経済的ディスパッチ								
商品名	柔軟性ラン ピング	-	-	ランピング機 能	-	-	-	ランピング機 能
調達方法	FMM/RTM	-	-	DAM/RTM	-	-	-	DAM/RTM
価格メカニズム	MP	-	-	MP	-	-	-	MP

MP: 限界価格 (marginal pricing)、DAM: 前日市場 (day-ahead market)、RTM: リアルタイム市場 (real-time market)、FA: 前方オークション (Forward auction) ※調整: 周波数制御予備力 (Regulating Reserve)

一次周波数調整は無報酬の義務としているが、ERCOT では有償の一次周波数応答サービスを提供している。二次周波数調整は、CAISO、ERCOT、SPP では上げ方向と下げ方向を各々別の商品とし、

ISO-NE と NYISO では 10 分以内の利用可能な運転予備力（同期予備力）の商品として提供している。ERCOT、ISO-NE、NYISO、PJM では三次周波数調整の代替予備力として、30 分間の運転予備力あるいは非運転予備力の商品を提供している。

CAISO は、再エネに対する出力制御量を低減・回避するために、エネルギーインバランス市場（Energy Imbalance Market=EIM）を活用している。CAISO は CA 州を管轄エリアとする送電事業と電力需要調整事業を担うほか、前日市場と最終的な需給の差（インバランス）を調整するインバランス市場も運営している。米国西部諸州に拡大される再エネの電力系統への連系、系統の信頼性と発電コスト削減を促進するため、CAISO は、同州で運営するインバランス市場の運営エリアを拡張、2014 年に西部エネルギーインバランス市場（Western Energy Imbalance Market、WEIM）の運営を開始した。WEIM には 現在、カリフォルニア、オレゴン、ネバダ、ワシントン、アリゾナ、ユタ、コロラド、ワイオミングの 8 州に管轄エリアを持つ 22 の電力事業者が参加している。WEIM は、CAISO の外部の参加者がエネルギーを売買して需要と供給のバランスを改善できるリアルタイム市場である。2020 年、CAISO は、WEIM 内での取引により、従来なら出力を制御された発電電力量のうち、16%分の発電電力量の制御をこの市場の導入により回避した。また 2024 年第一四半期に US\$436million の利益を実現した。WEIM の成功を基に、ISO は西部の利害関係者と協力して拡張前日市場（EDAM）を開発している。これにより WEIM の参加組織は、翌日の需要を満たすために前日市場で最適化された効率的なユニットコミットメントの恩恵を受けること可能となる [47][48][49]。

2.3.2 英国の市場制度

英国政府は再エネ電源向け入札制度として、差額決済契約で政府が落札価格と電力市場価格差額を補填する制度を設けている。具体的には、事前設定基準価格（ストライクプライス）と市場価格差額の補填・支払、電気事業者と政府系企業間の長期間の固定価格の設定（CfD）を行い、効果として投資の予見性が高まることが期待されている。CfD と似た制度に固定価格買取制度（FIT）があるが、FIT では政府が電源種別ごとに買取価格を長期間固定で設定するのに対し、CfD は発電事業者と政府系企業間の契約で長期間固定価格を設定する [49]。英国では、系統安定化の為の慣性契約（NESO）として、ガスタービンと Cruachan 揚水式水力発電#4 号機において、6 年間の Stability 提供（英国初の安定契約）をしている [50] [51] [52]。

2.3.3 欧州の市場制度

欧州の需給調整市場は、基本的には日本と同じであるが、細かい条件は異なっている。ドイツの需給調整市場と比較すると、ドイツの需給調整市場のゲートクローズが前日に対し、日本は 1 週間前の火曜日である（表 2.3.2） [53]。ドイツと日本では気象状況や水運用が異なり、一概には言えないが、日本の週間予報の精度はそれほど高くなく、水系運用と協調しにくいと言える。

なお、欧州では、天気次第の太陽光発電の影響を大きく受ける卸電力市場の価格予測と、降水量によって影響を受ける出水量予測に基づいて、アービトラージ取引（Arbitrage、裁定取引）を行っている。その中で、大きな不確かさの要因となっているのはネガティブプライスの存在であり、前述の HYDROGRID の説明文において、欧州の電力システムの状態を VUCA-WORLD と形容してい

る[54]。

V : Volatility	変動性	太陽光発電の全量買い取り
U : Uncertainty	不確かさ	ネガティブプライスの存在
C : Complexity	複雑さ	需給調整市場、インバランス料金
A : Ambiguity	曖昧さ	電力価格、天気の予測の難しさ

表 2.3.2 ドイツと日本の需給調整市場の比較

商品	仕様	ドイツ	日本
FCR (1次)	応動時間 継続時間 ゲートクローズ	30秒以内 15分以上 前日8時	10秒以内 5分以上 前週火曜日15時
aFRR (2次)	応動時間 継続時間 ゲートクローズ	5分以内 5分以上 前日9時	5分以内 30分以上 前週火曜日15時
mFRR (2次)	応動時間 継続時間 ゲートクローズ	前日10時	
RR (3次)	応動時間 継続時間 ゲートクローズ	0～30分 15, 30, 60分 1日24フェーズ	① 15分以内 3時間以上 前週火曜日15時
			② 45分以内 3時間以上 前日15時

3. 水力発電の柔軟性向上に向けた課題の抽出・整理

3.1 水車内の流体现象ならびに流体構造連成現象の課題の特定

部分負荷運転や極低負荷運転において水車内で生じる流体现象ならびに流体構造連成振動に関する影響を調べ、課題を整理する。

3.1.1 水車内部及び周辺機器における物理現象と対策

【技術課題及び研究事例】

(1) 水車及びポンプ水車の部分負荷運転～過負荷運転時の事象の解明と解決策

・フランス水車やカプラン水車の部分負荷運転～過負荷運転時にはランナ出口やランナ羽根間から発生する旋回流やキャビテーションにより安定運転が阻害される。これらの問題は次のように分類されている。

Overload (過負荷) : 出口の渦芯に生じたキャビテーションの自励的な体積変動 (キャビテーションサージ)

Part-load (部分負荷) : ランナ出口のホワールの不安定現象

Deep-part-load (極低負荷) : ランナ翼間渦による不安定現象

本課題に対して、現在でも非常に多くの論文でテーマとして取り上げられ、流れ解析 (CFD) や模

型試験測定などにより現象解明のための研究が続けられている。欧州の活動としては、HYPERBOLE、XFLEX HYDRO、それに続く後継プロジェクトの活動に関連したものが大部分となる。

- ・実験的研究の代表的な論文は[55]、[56]で、スイス EPFL のグループによるドラフトチューブ内渦芯の可視化観察と水圧脈動計測により部分負荷時の現象を明らかにしている。過負荷時の水圧脈動の増加については、日本でも、模型試験の可視化観察と非定常 CFD 解析により現象を示している。フランス水車の他、カプラン水車の低負荷運転の運転も含めて、ヨーロッパの他中国でも多くの研究がされており、実験的な研究と非定常 CFD 解析により現象の解明を目指す多くの論文のテーマとなっている ([55]-[80])。

(2) 水車ドラフトチューブの渦芯の不安定現象を起因として、水圧鉄管を含む水路系の水圧脈動現象、振動現象の解析や模型試験、現地測定

- ・スイス EPFL のグループによる解析検討[69]の他、複数件みられる。([68], [69], [81]-[84])
- ・中国からの同様の課題に関する論文は、対象はポンプ水車が多いが、欧州と同様に、流体 CFD と構造解析 FEM を連成し、設計点以外の運転点での圧力変動や応力変動、スラスト力変動を予測評価する研究[18]が多い。

(3) 負荷遮断時や起動・停止など過渡運転時のポンプ水車機器で生じる圧力変動、振動等の不安定事象

- ・(1) の課題は一般水力発電所を想定した論文が多くみられるのに対して、本課題は揚水式水力発電のポンプ水車が研究対象となり、もう一つの大きなテーマとして中国からの論文も多くみられる。揚水式水力発電は大型ポンプ水車、高落差ポンプ水車等が多く、負荷遮断時や起動・停止など過渡運転時のポンプ水車機器で生じる圧力変動、振動等の不安定事象を対象とした実験的な研究、解析的な研究が盛んに実施されている。

- ・中国の論文の代表例として、文献[62]、[86]が挙げられる。文献[87]でもポンプ水車負荷遮断時の圧力脈動に基づく上カバーボルト応力に関して解析と実機計測により調査している。

- ・文献[88]は、水力発電所で見られる疲労破壊事象のレビュー論文で、部分負荷運転などの非設計点運転時の応力の傾向や疲労破壊の事例が紹介されている。

- ・揚水式水力発電の高速モード切替えに関連した過渡応答に関する研究は数多く行われており ([89]-[92])、管路の圧力波の伝播を考慮した上で水車内部流れやそれに伴う応力解析の評価が必要となっている。一般水力発電所においても揚水式水力発電のような出力変化率を求められる場合には、同様な検討が必要であると考えられる。

- ・ヨーロッパでは大型一般水力発電や揚水式水力発電を調整力の供給源として研究開発が行われている。一方、日本では、ノンファーム型接続される一般水力発電という括りで調整力を供給しようと検討を行っている。この違いにより浮上するのが、日本では水路式水力発電がノンファーム型接続対象発電所の多くの割合を占めることである。流れ込み式水力発電は取水口から発電所まで、数 km~十数 km に渡る水路でつながれており、開水路や無圧トンネルが用いられているため、周辺環境への影響や水路の強度の問題で高速な出力変化に対応できないと考えられる。このため、既設水路を用いた発電所で、従来よりも大きな調整力を持たせるためには、水路系を考

慮した設計、制御に関する技術開発を新たに検討する必要がある。

(4) その他のテーマ

水力発電所のネットワークの未利用エネルギーの回収のための水車の選定プログラム[93]の報告、センサーによる過負荷運転時の最適制御に関する報告[94]などもみられる。

【対策に関する研究事例】

部分負荷運転や、頻繁な起動・停止、出力調整に伴う非設計点での運転や、過渡状態での運転に対する解決策として、以下のステージによる分類が考えられる。

① 流体特性の予測、改善による解決

模型試験や数値シミュレーション (CFD)、実機フィールドテストにより流体现象に関する知見を集め、水圧脈動、キャビテーションの抑制を図る。水車ランナ形状の最適化、ドラフトチューブなど水車流水部形状の最適化による改善。例えば、前述の中間羽根ランナ (スプリッターベーンランナ) や前進羽根に関して、実機への適用が進められている。ランナ設計では、始めに翼面負荷分布を決めてから、次にランナ翼面形状を生成する「逆解法」による設計手法の水車への適用も報告されている[95]。

② 水車機器の強度評価、構造設計、材料設計による改善

前述の流れ解析と構造解析による複合的な予測、評価が一つの大きなテーマである。シミュレーション評価のほかに、水力発電所での実測データに基づき、機器のダメージ、寿命の予測研究がテーマとなっている (前述の文献[62]、[86]、[87]など)。材料特性からの研究の例として、文献[96]が挙げられる。

③ 水力発電所の水車運用による解決

負荷変動速度、最低負荷条件の最適化など個別水車の運用による解決、及び、複数の水車や発電所の運転制御による解決がある。欧州 HYPERBOLE プロジェクトの SIMSEN を利用した解析、実機検証などの取り組みが大きな流れである。

(2) 及び (3) の関連した解決策として、各発電所水車データによる「デジタル技術を用いた予知保全」のテーマがある。実機水車各部のセンサー計測値と水車運転状態の不安定性の相関を比較し、過負荷運転時の不安定性出現を制限するシステムの一例を提言している[94]。水車制御システムにおいて、従来の単一運転条件パラメータに対して、無負荷運転時などの運転動揺を考慮した多目的最適化制御に関する報告がある[97]。可変速ポンプ水車適用による運転領域拡大の検討も、(1) に対する取り組みの一つと考えられ中国からの報告がみられる[98]。実機水車センサーに関する特徴的な文献は調査範囲内ではみられないが、従来からキャビテーション検知法として AE センサーの利用があり国内から関連する報告がある[99]。

3.1.2 柔軟性向上を阻害する現象（キャピテーション等）の監視・抑制

柔軟性を阻害する現象の解決策として最近の注目される技術として、(1) SPPS (Smart Power Plant Supervisor) によるプラント制御技術、(2) 実機測定データに基づいたプラント制御、(3) バッテリーハイブリッド (BESS : Battery Energy Storage System) が挙げられる。

(1) SPPS によるプラント制御技術の構築

SPPS のアルゴリズムの概念は以下のとおりである[23]。模型試験、実機試験、数値シミュレーションのデータをメタモデルに入力することで得られる出力データに対して、発電所運用上の様々なニーズそれぞれとの間に Health Index と呼ばれる指標を生成しデータベースを構築する (モデル化)。個々の Health Index の線形結合の形で発電所全体の Health Index を計算し、発電所への指令値に対する最適化制御が行われる。SPPS は発電所の特性やニーズに応じて構築される最適化システムのアルゴリズム概念の総称であり、個々の発電所での事例は詳細には公開されていないが、AI が普及した現在では、それほど高級な手法ではないと思われ、わが国の実情に応じた制御方法の開発が望まれる。

(2) 実機測定データに基づいたプラント制御

多くのフランシス水車の過負荷運転の制約として、最大出力時の不安定特性があり、現状は不安定条件から十分な余裕をとった運転範囲で運用されている。しかし、安全なマージンをとりつつ、不安定限界により近い条件で運転するために、計測に基づく適切なパラメータによる高度な制御が必要となる。カナダのフランシス水車 (出力 444MW) において、10 種類 (80 点以上) の計測器による各部の測定と運転点のデータ収集が行われ、それに基づく予防システムが構成されている[94]。この水車は、過負荷時に水車出力変動を生じる不安定現象を有しており、出力の増加に対してある値を超えると急激に振幅が増加する傾向を示す。そこで、出力の不安定を検出するために、ドラフトチューブ振動、水車主軸受振動、発電機スラスト軸受振動、ドラフトチューブ圧力変動、ケーシング圧力変動、ランナ変位が計測された。出力の不安定現象検出の最適手法として、ヒルベルト変換 (包絡線評価) は高速 (本ケースでは 51.2kHz) のデータ収集が必要となりデータ処理の負荷が高くなることから、ケーシング・ドラフトチューブ水圧変動計測の FFT 評価 (ドラフト渦芯周波数) が選定されている。これらの測定に基づき、出力不安定現象の出現を抑制する予防システムが構築されている。大型水車の場合、このような実測値に基づく制御も価値があると思われる。

(3) BESS

前述の XFLEX プロジェクトでは Vogelgrun 発電所において BESS とカプラン水車とのハイブリッド制御の実証試験が行われている。ここで開発された制御技術は、水車ガバナーの周波数セットポイントに、周波数の偏差と、バッテリーの貯電力量 SOC を考慮した偏差を与える形式となっている。このような BESS の利用は系統内のレギュレータとして、また太陽光発電、風力発電の出力変動の緩和装置として水力発電以外の分野でも検討が行われている常套手段的な手法である。一方で、Vogelgrun 発電所における水車と BESS とのハイブリッドシステムは水車発電機の慣性に

加えてバッテリーの高速な応答を組み合わせているため、発電所の出力に比べて小出力のバッテリーで水車の損耗を軽減しつつ柔軟性の向上を実現している点が大きな特徴である。BESSは、そのものでは新たな電力を発電しない調整装置であるため、エネルギー的には損失要素であり、コスト負担を生み出す。また、バッテリー技術が急速に進歩しているとはいえ、化学反応を利用している限りにおいては、セルの寿命は有限である。Vogelgrun 発電所の事例が最良の方式かどうかについても結論は得られておらず、EU のプロジェクトの中でも様々な方式が継続的に検討されている。ヨーロッパでの知財の取得状況や、日本の状況も加味して、わが国独自の制御方法を開発していく必要がある。

また、この技術は、水力実験所レベルで検証することも事前に行われている[100]。通常の水力実験所は、水車の性能を測定するためにあるので、高精度の電気動力計が模型水車に直結されている。これを、実際の同期発電機に近い形の100kW回転機に接続し、grid emulator を介して、水力実験所内の400V配電網に接続している。1次可変速用のフルサイズコンバーターや、上述のバッテリーの制御装置は、それぞれ目的に応じて回路に接続できる試験環境が整備されている。

(4) キャビテーション発生把握技術の課題

キャビテーション壊食はランナベーンなどの損傷原因となり、柔軟性向上のために設計点外での運転が増加した場合には壊食のリスクが高まり、適正な発電コストを維持するためにはより精緻な壊食量予測手法に基づく運転範囲の設定が必要である。そのためにキャビテーションの検知技術や発生個所の特定技術、壊食性のキャビテーション等の特定手法の確立が必要となる。従来キャビテーションの発生についてはAE (Acoustic Emission) センサーを用いたものが主流である。基礎試験によりキャビテーションの形態(壊食性有無)を特定できている例もあり近年は音響や超音波、振動などの信号処理に機械学習やAI技術の応用が図られている[101][102][103]。また、研究段階ではあるが水車内部におけるキャビテーションパターンを可視化する超音波イメージング技術[104]も提案されている。

3.1.3 大型水車の調整力に関する課題

ヨーロッパでは調整能力が高い揚水式水力発電に研究開発の重点が置かれており、発電専用の一般水力発電についても大型機をターゲットとしている。大型機は出力が大きいため、当然、出力調整の割合が小さくても小型機に比べると大きな調整力を得られる。一方で、機器や流水の慣性が大きいため、調整速度を大きくするためには制御系や伝送系が対応可能な仕様でなければならない。システムの調整を主目的とする揚水式水力発電について、100MW以上の大型揚水式水力発電には、調整力に関する系統要件が課されている(表3.1.1)。しかし、一般水力発電機に関してはこのような要件はなく、系統要件を満たすことは求められてこなかったため、出力の調整速度は揚水式水力発電よりも劣るものが多いと考えられる。ノンファーム型接続される大型機については、改修に伴う増出力分が対象となるケースが大半を占めると想定されるが、出力調整速度を求めることになれば、制御系や伝送系の大がかりな改修が必要となり、大きなコストを要することに考慮する必要がある。

表 3.1.1 100MW 以上の大型揚水式水力発電の系統連系技術要件[105]

調整項目	仕様
GF 速度調定率	5%以下
GF 幅	最低～定格出力
GF 制御応答性	2 秒以内に出力変化開始、10 秒以内に変化を完了 (定格出力の 5%到達にて出力変化を完了とする)
LFC 幅	最低～定格出力
LFC 出力変化率	毎分 10%以上
LFC 制御応答性	10 秒以内に出力変化開始
EDC 出力変化率	毎分 10%以上
EDC 制御応答性	10 秒以内に出力変化開始
EDC+LFC 出力変化率	毎分 10%以上
周波数変動補償	要

3.1.4 水力発電設備のサプライチェーン問題とイニシャルコストの問題

近年は、再エネの利用拡大を目標に、中小水力には国の経済的支援が行われたため、水車の開発も盛んに行われてきた。このため、水力発電のサプライチェーンはひっ迫し、国内では水車の発注から納品まで年単位で時間がかかることもある。水車の設計開発は流量や落差に基づいて、発電所ごとに、つまり 1 つの注文に対してほぼ毎回設計が必要となり、ポンプのように商品をシリーズ化することが難しく、このことが水車メーカー特有の事情でもある。水力発電の水車発電機を供給するメーカーは国内に大小さまざま存在する。水車発電機も同様に 100MW を上回る大水力から、1MW 未満の小水力まで多岐にわたる。水車の規模とメーカーの規模にはある程度の相関があり、規模が大きなメーカーは中・大水力の水車を供給し、中小規模のメーカーは中小水力を供給することが多い。水車設計については、前述のように CFD による性能評価に加えて、最適化設計を組み合わせることで高効率な水車が開発できるが、高度な技術と専門の技術者や設備が必要となるため、このような手法を用いることができるのは比較的大規模なメーカーに限られる。また、大規模な水車は非設計点での圧力脈動や過渡応答による振動や過荷重が大きく、キャビテーション壊食も起こりやすいので、トラブル現象の防止や対策にも高度な技術と経験が求められる。一方で、小規模な水車では相対的に振動などの影響が小さいため、設計の難易度は下がる。また、以前は開発過程で模型試験がしばしば行われていたが、費用対効果により、高精度な解析技術を有するメーカーでは CFD 解析により代替されることが多い。しかし水車の規模が小さくなるほど低価格で利益も薄くなるため、開発コストの制約で詳細な解析が用いられないこともある。

特に中小水力メーカーについては、企業が持つ開発環境・体制に差があることは考慮しなければならない。水力発電の調整力拡大には、前述のように従来の経験を超える様々な問題減少への対策が求められる。このことは、大水力から小水力まで影響の程度の差はあれ、従来よりも厳しい運転環境となるため、機器の信頼性向上は必要不可欠である。このため、設計段階での新たな信頼性向上の検討が必要となるが、小規模の水車開発になると、解析を行う体制が整っていない虞

がある。このため、調整力拡大を求めると、水車の供給が不足する可能性がある。発電事業者の事業性についても考慮する必要がある。特に小規模な発電所では売り上げ・収益面でも規模が小さく、保守運用にかけられるコストも限られている。このため、初期費用が高騰すると回収コストが増え、長い水路、管路を伴う発電所においては、さらに過渡応答対策も含めた対策も必要となり、収益はより圧迫される可能性が高い。これらの影響は中小の水力発電において、事業撤退や開発を見送るケースが増加を引き起こす可能性もある。

3.1.5 水車の標準化

水車は発電所ごとに落差と流量に最適な設計が必要となる。これは、運転時のキャビテーションや振動問題の抑制にも有効である。近年は最適化設計により部分負荷運転時間が長い水車については、最大取水量ではなく、運転時間の長い部分負荷帯に最高効率点を設定するとともに、その周辺の幅広い流量体で効率低下量を抑える設計も行われている。前述のように最適化設計にはCFD解析を多数の条件で行うための大規模な計算機環境が必要で製品価格を押し上げるとともに、高い専門技術が必要となる。一方で、開発環境が大手に比べて充実していない企業に対して、落差や流量に応じてシリーズ化された水車設計、または、シリーズ化のための設計技術や設計ツールを供給することで、企業の体制や技術水準に応じた水車の商品開発・製造・供給が容易になる。また、標準化することで設置についてもマニュアル化が可能となり、特に地方で問題となりやすい、施工業者の新規参入や事業育成にも寄与できると考えられる。

日立三菱水力は水車標準化の検討を進めている。目的関数は、標準水車の最適水車からの偏差の合計値としている。もし、従来通り個別に最適設計をしていたら、この目的関数値は公称ゼロになるべきものである。一方、標準水車数を少なくし過ぎると、この目的関数は大きな値となって、世の中の中小水力が最適設計から大きく外れ、社会的にもマイナスの影響があり、顧客満足も得られなくなる。適切な標準水車のセットを求めて、最終的には世界の業界全体で合意する必要がある。この活動の中では試算も行われており、標準個体数が増えると、非現実的な標準データが出現するという結果となっている。実際には、フランシス水車、クロスフロー水車、軸流水車、ペルトン水車の少なくとも4種類は必要と考えられ、それらを組み合わせ、出来るだけ最小数の標準水車が出来ることが望ましく、今後の議論の拡大、様々なアプローチによる検討が望まれるところである。[106]

3.1.6 設計、保守技術の支援

ヨーロッパでの国際プロジェクトの事例からも明らかなように水力発電の柔軟性向上のためには水車の損傷や故障を防止するための保守に関連した技術開発が重要となる。デジタル技術を駆使した技術は各メーカーの競争分野であり、ますますの発展が望まれる。しかし、厳しい条件での運用を多用すると、大小さまざまなトラブルの増加につながることは確実である。トラブルが生じると原因究明と対策を求められ、メーカー、発電事業者に大きな負担となる。少子高齢化により人員不足が進んでいる中、地方の中小規模事業者は特に影響を受けており、中小水力拡大の足かせともなりかねない状況である。また、従来は中立機関としてメーカーや電力会社を後方支援する役割を果たしてきた大学においても関連分野の研究者の減少が進んでいる。実際に、科学研究費

助成事業データベース (<https://kaken.nii.ac.jp/ja/>) で調べても 2024 年度に交付された科研費のうち、水車運転の柔軟性向上に直接関連する研究はほとんど見られない状況に鑑みると、個別の企業や大学の産学連携は行われていても、業界・学会規模の連携は小規模にならざるを得ない。この結果 2.2.2 で述べたように、日本の論文数は欧米、中国に比べると、人口比率以上に少ない。逆にヨーロッパでは、産学術界の強固な連携が行われ、例えばスイス工科大学ローザンヌ校のように、試験や解析を行う環境が整備され、多くのメーカーが参画する国際プロジェクトの体制の軸となる大学・研究機関が複数存在する。これらの機関では、日常的に中立機関として各メーカーの模型試験や共同研究を実施して技術的な支援とともに専門的な人材も育成している。

日本では、水力発電の水車に関する研究のピークは 1980 年代に収束し、その後は産業界が牽引してきた。1990 年以降は CFD や最適化設計の技術が高度化し、特に高効率化、すなわち電気コストの削減につながる技術開発が中心であり、そのことが国民全体の利益であった。一方、現在取り組んでいる再エネの大量導入とそのための対応に関する取り組みは単なるエネルギー生産が目的ではなく、将来の地球環境保全が目的となっている。したがって、将来の地球環境に対する価値と保全のための対価ははっきりしない状況では、民間企業がそのための投資を行うことは非常に難しく、国が牽引していくことが望ましい。日本において今後、水力発電の開発促進と、高い専門性が必要な柔軟性向上技術の導入を両立するためには、諸外国と同様に、メーカー、発電事業者への技術的に支援につながる、大学や中立的な研究機関による研究体制の再構築への投資が必要不可欠である。

3.2 周辺環境を考慮した制約の特定と解決策

本項では、水力発電の柔軟性向上に伴う周辺環境における課題として、河川・水路設備の課題を特定し、整理する。

3.2.1 河川・水路設備の分類・整理

送配電事業者からの出力制御指令に従って発電機出力を制御する場合、水車の運転を抑制する必要が生じ、それに伴い水車を通過する流量を変化させる必要がある。水車流量の変化は河川・水路設備における水の挙動に密接に関係するが、その具体的な挙動は河川・水路設備の構造によって異なり、柔軟性向上に伴う課題もその構造によって異なる。このため、はじめに、河川・水路設備の構造を整理する。

河川・水路設備について落差を得る方法により分類すると、ダム式、ダム水路式、水路式に分類される(表 3.2.1、図 3.2.1)。ダム式、ダム水路式は、運用による分類では貯水池式もしくは調整池式と分類され、ダム貯水・調整池の調整容量が比較的大きいため需給調整が行いやすく、現在も需要の多い時間帯に発電し、少ない時間帯には発電停止する日運用や週間運用を行う地点が多い。水路式は、運用による分類では流れ込み式に分類され、調整池の調整容量が小さいため需給調整機能が乏しく、基本的には河川流量に応じて発電することが多い。



図 3.2.1 落差を得る方法による分類

表 3.2.1 落差を得る方法による分類と構造物の配列順序

ダム式	<p>比較的高いダムにより河川をせき止めて池を造り、ダム直下の発電所との落差を利用して発電する方式。ダム貯水・調整池の調整容量が比較的大さい。</p> <p><u>構造物の一般的な配列順序</u></p> <p>ダム⇒取水口⇒水圧管⇒発電所⇒放水路⇒放水口</p>
ダム水路式	<p>ダム式と水路式を組み合わせた発電方式。両者の特性を兼ね備えた地点に適しており、各々単独の方式とした場合に比べて、より大きな落差を得ることが可能。ダム貯水・調整池の調整容量が比較的大さい。</p> <p><u>構造物の一般的な配列順序</u></p> <p>ダム⇒取水口⇒導水路(圧力トンネル)⇒サージタンク⇒水圧管⇒発電所⇒放水路⇒放水口</p>
水路式	<p>川の上流に低い堰やダムを造って水を取り入れ、長い水路により落差が得られるところまで水を導き発電する方式。調整池の調整容量が小さい。</p> <p><u>構造物の一般的な配列順序</u></p> <p>取水ダム⇒取水口⇒沈砂池⇒導水路(無圧水路)⇒ヘッドタンク⇒水圧管路⇒発電所⇒放水路⇒放水口</p> <p>もしくは</p> <p>取水ダム⇒取水口⇒沈砂池⇒導水路(無圧水路)⇒調整池⇒圧力水路⇒サージタンク⇒水圧管路⇒発電所⇒放水路⇒放水口</p>

3.2.2 河川・水路設備における問題点・課題・対策の整理

次に、河川・水路設備の対象別に柔軟性向上に伴う問題点を特定し、技術課題、運用/社会的課題とその対策を整理する(表 3.2.2)。このうち影響が大きい問題としては、出力制御によって水車を通過することができなくなる水の処理の問題がある。その対策としては、主に二つの方法があり、ひとつは水車の運転を継続してその発電電力量を蓄電する方法、もうひとつは水車よりも上流の設備に貯留し必要に応じて放流する方法がある。前者については、3.1「水車内の流体現象ならびに流体構造連成現象の課題の特定」で抽出したエネルギーストレージの設置が考えられる。後者については、ダム式、ダム水路式、水路式で所有する設備が異なるので、水の処理の方法も各々特徴があるが、水路式は堰堤取水が基本となるために貯水容量が小さく、また、ヘッドタンクならびに余水放流設備を有するため、出力制御に伴う影響は特に大きい。

表 3.2.2 河川・水路設備の問題点・技術課題・運用/社会的課題・対策（その1）

対象	影響度	問題点	技術課題	運用/社会的課題	対策(◎技術開発が必要)
河川	大	出力制御によって河川放流が発生する場合、人工洪水によって河川水位が上昇し、(特に無降雨時の)入川者(漁業関係者、遊漁者、BBQ、ラフティング等)の安全の確保が難しくなる	入川者の安全確保が必要 下流河川の水位上昇を30分30cm以内に抑制する必要	地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要 河川水位上昇速度の基準の緩和について河川管理の法規改正が必要	自動警報装置や監視カメラ等の設置(電源、通信環境の整備を含む) 貯水槽等の設置
	—	出力制御に伴い発電水量が減少し、下流の農業用水頭首工や上水道取水口で所定流量を確保できない	出力制御に伴う流量変化の抑制が必要	余水路の運用変更について法規改正もしくは河川管理者との協議が必要 地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要	(安全性・健全性が確認された)余水路からの放流 ◎水圧管への放流バルブ付きバイパス水路の設置 ◎エネルギーストレージ等の設置
ダム・堰堤 洪水吐ゲート	—	日間で生じる流量変動(ハイドロピーキング)によって、河川生態系(魚類、底生動物)に正負両面の影響が生じる	河川・種によって応答が異なる可能性があるが、日本における研究事例がなく、状況変化と生態系影響の相関に関する研究が必要	—	—
	—	河川流況が変化し、稚魚の流出、魚類の産卵、産卵床の枯渇、水温の上昇などが生じ、漁場として価値の低下が懸念される。ラフティング等のレクリエーションへの影響も懸念される	出力制御に伴う流量変化の抑制が必要 (砂州等の浸透を含む)流況変化と生態系影響の相関に関する研究が必要	地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要	貯水槽等の設置
ダム・堰堤 洪水吐ゲート	大	出力制御によって貯水池水位が上昇し、溢水や氾濫の恐れがある場合、洪水吐ゲートから放流する必要がある。微小開度放流の場合、ゲート振動や騒音が発生し、家屋や旅館等への影響や風況被害の懸念が生じる	微小開度放流におけるゲート振動や騒音発生抑制が必要	洪水吐ゲートの運用変更について河川管理者との協議が必要 地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要	微小開度放流の流況改善 建具等の振動対策 減勢槽等の設置(放流音抑制)
	大	出力制御頻度の増加に伴い、ワイヤーケーブルや巻き揚げ機、ローラー等の使用頻度や荷重変化が増加し、劣化が促進する	経年劣化の抑制・延命化が必要	—	◎長寿命で信頼性の高い機器の開発 経年劣化速度評価技術の開発
取水口ゲート	大	ダム水路式や水路式では、取水口ゲートの閉鎖作後、水車に着水するまで遅れ時間が生じる	着水遅れ時間は地点毎に異なるため、出力制御指令に制約が生じる	脱炭素拡大の事業性低下が懸念されるため追加設備導入に補助が必要 手動ゲートの地点では要員の事前確保が必要	自動制御装置の設置(電源、通信環境の整備を含む) 着水遅れ時間を考慮した出力制御指令
	大	出力制御頻度の増加に伴い、ワイヤーケーブルや巻き揚げ機、ローラー等の使用頻度や荷重変化が増加し、劣化が促進する	経年劣化の抑制・延命化が必要	—	◎長寿命で信頼性の高い機器の開発 経年劣化速度評価技術の開発

表 3.2.2 河川・水路設備の問題点・技術課題・運用/社会的課題・対策（その2）

沈砂池	—	出力制御に伴い、沈砂池の排砂門等から放流する場合、ゲートの振動・騒音、ワイヤーケープルや巻き揚げ機、ローラー等の劣化等の問題が生じる	微小開度放流におけるゲート振動や騒音発生の抑制	排砂門等の運用変更について河川管理者との協議が必要	微小開度放流の流況改善・振動対策 経年劣化速度評価技術の開発
導水路	大	導水路から農業用水等へ利水補給している地点では、出力制御指令に伴う取水制御によって必要な流量を供給できなくなる	利水補給を続けるために流水を止めずに出力制御する必要	余水路の運用変更について法規改正もしくは河川管理者との協議が必要 地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要	(安全性・健全性が確認された)余水路からの放流 ◎水圧管への放流バルブ付きバイパス水路の設置 ◎エネルギーストレージ等の設置
余水路	大	余水路放水口からは通常は放流されていないため、(特に無降雨時の)入川者の安全の確保が難しくなる	入川者の安全確保が必要 下流河川の水位上昇を30分30cm以内に抑制する必要	地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要 河川水位上昇速度の基準緩和河川管理の法規改正が必要	自動警報装置や監視カメラ等の設置 (電源、通信環境の整備を含む) 減勢槽等の設置
	大	出力制御の頻度が多くなると、長時間の利用を想定していない余水放流設備(特に、煉瓦積み、石積み)の損傷が進行する	劣化の抑制・延命化が必要	余水路の運用変更について法規改正もしくは河川管理者との協議が必要	余水放流設備の改修 劣化速度評価技術の開発
水圧管路	大	出力制御に伴い、高速射流の余水放流が続くと、開渠や減勢工で振動・騒音が発生し、近隣の家屋や旅館等への影響や風況被害の懸念が生じる	高速射流に伴い発生する振動や騒音の抑制が必要	地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要	減勢槽等の流況改善 建具等の振動対策 減勢槽等の設置(放流音・振動抑制)
	大	高頻度な出力制御に伴い圧力脈動が頻繁に発生する	圧力脈動の抑制が必要	地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要	◎水圧管への密閉式エアクッション サージチャンバーの設置
下流発電所	大	発電した水を河川に放流せず、上流発電所放水口と下流発電所取水口が連結しているシリーズ発電所では、上流発電所で出力制御させると、発電制御対象発電所以外の下流発電所の出力も数時間単位で制限され、減電が生じる	下流への放流を続けるために流水を止めずに出力制御する必要	余水路の運用変更について法規改正もしくは河川管理者との協議が必要 地点によっては掘削等の膨大な費用が発生するため設備導入補助が必要	(安全性・健全性が確認された)余水路からの放流 ◎水圧管への放流バルブ付きバイパス水路の設置 ◎エネルギーストレージ等の設置
	—	複数の河川・貯水池から取水している発電所では、出力制御によって水温が変化し、農業利用で約束した水温を守れない懸念が生じる	水温変化の抑制が必要	水温変化が見込まれる場合、利水者との協議が必要	水温を考慮した制御方法の確立

3.2.3 余水放流設備

水圧管路上部のヘッドタンクでは、出力制御に伴う水車の流水制御によって水位が上昇し、越流堤天端以上の水位で余水吐からの溢水が生じる(図 3.2.2(1))。その余水は水圧管路と同程度の急勾配となる余水路(開渠もしくは蓋渠、管路)を高速射流で流下し、減勢槽を経て、放水口から河川に放流される(図 3.2.2(2))。通常運転時には放水口から放流されていないため、入川者の安全確保が必要となる。安全確保策としては、自動警報装置や監視カメラ等の設置が有効であるが、電源や通信環境が整っていない場合もある。また、溪流など河川規模が小さく、放流流量が相対的に大きい場合には人工洪水によって下流で水位が急激に上昇する場合もあり、河川水位上昇速度の目安となる 30 分 30cm 以上の場合は注意が必要である。歴史のある古くからの水力発電所では、余水路が煉瓦積み(図 3.2.2(3))や石積みの地点も残されており、長時間の使用を想定していないことから損傷のリスクが高く、設備の改修が必要となる場合もある。また、高速射流が流れる開渠や減勢槽では振動・騒音が発生することもあり、近隣に家屋や旅館等がある場合にはその対策が必要となるが、事業継続のためには地域住民の理解醸成を図りながら対策を講じる必要であると考えられる。なお、古くからの発電所では減勢槽を設けず、高速射流をそのまま河川に放流している地点も多かったが、近年そのような地点は少なくなり、余水路減勢工を発電所下流の放水路に直結している地点もある。また、余水放流設備は、系統事故や水車発電機の故障など緊急時の使用が原則であり、出力制御に伴う使用については、運用変更に関する河川管理者との協議が必要と考えられる。



(1) ヘッドタンクと余水吐 (2) 余水路出口と合流河川 (3) 煉瓦積み余水路と高速射流

図 3.2.2 余水放流設備の一例

3.2.4 取水口ゲート

水路式において余水放流設備から放流させない場合、もしくは、ダム水路式の場合、出力制御指令に対して水路系の上流端となる取水口ゲートで取水制御する必要がある。導水路が長い場合、取水口ゲートから水車に着水するまでに時間を要することから、着水遅れ時間を考慮した出力制御指令が必要となる。また、取水口ゲートが手動の地点もあり、要員の事前確保といった問題が発生し、頻繁な出力制御指令に対応できないことも想定される。対策案としては、自動制御装置の設置が考えられるが、電源や通信環境が整っていない場合もある。また、頻繁な出力制御指令に伴い、取水口ゲートのワイヤーケーブルや巻き揚げ機、ローラー等(図 3.2.3)の使用頻度や荷重変化が増加し、劣化が促進することも懸念され、その対策が必要となる。



図 3.2.3 取水口ゲートとケーブル、ローラーの一例

3.2.5 導水路（水圧管、シリーズ発電を含む）

導水路から農業用水等へ利水補給している地点では、取水口ゲートでの取水制御によって導水路の流量が減少し、必要な利水補給量を供給できなくなる場合もある。対策としては、利水補給を続けるために流水を止めずに出力制御する方法として、前述の安全性・健全性が確認された余水放流設備からの放流やエネルギーストレージの設置に加え、水圧管への放流バルブ付きバイパス水路の設置が考えられる。放流バルブ付きバイパス水路については、建設コスト低減のために1993年頃に余水路省略方式のひとつとして検討され、フランシス水車地点の落差100m以上もしくは最大使用水量 $3\text{m}^3/\text{s}$ 未満の地点が有望とされ、実証例もある[107]。当時は建設費低減が目的であったが、出力制御を目的とした新たな視点として、出力制御に伴う水車制御とバルブ制御を連携することで、水圧管に過大な圧力脈動を発生させずに運転できる可能性もある。同様の対策は、発電した水を河川に放流せず、上流発電所放水口と下流発電所取水口が連結し、発電制御対象発電所以外の下流発電所で出力が制限されるシリーズ発電所でも有効と考えられる。

3.2.6 洪水吐ゲート

出力制御指令に対して取水口ゲートで取水制御する場合、それに伴い貯水池・調整池の水位が上昇する。貯水容量が比較的大きいダム式、ダム水路式では余裕があるが、堰堤取水が基本となる水路式は貯水容量が小さく、溢水や氾濫を回避するために低水位運用もしくは洪水吐ゲート等からの放流が必要となる。前者については、出力制御しない時間帯の低水位運用によって減電が生じる。後者については、ゲート幅に比して出力制御相当の流量が少ない場合には微小開度放流（図3.2.4）となるが、ゲート振動や騒音が発生し、近隣の家屋や旅館等への影響や風況被害が懸念される。この対策として、微小開度放流の流況改善や家屋等の建具の振動対策、また、放流音や振動の抑制のための貯水槽等の設置が考えられる。また、取水口ゲートと同様、ワイヤーケーブルや巻き揚げ機、ローラー等の劣化対策も必要となる。なお、水路式の調整池はヘッドタンクよりも大きいいため、余水路出口よりも危険性は小さいものの、通常運転時とは異なる放流となるので、入川者の安全確保のための対策が必要となる。

なお、送配電事業者からの出力制御指令はインターネット回線による送受信が想定されているが、水力発電所の制御系は河川の安全にも係わるために専用回線となっており、出力制御指令においても同等のセキュリティの確保が必要と考えられる。また、水力発電事業者は、河川の流水を占有する水利権者として、その水利使用の対価を河川法に基づいて地方公共団体に支払っている点も配慮が必要と考えられる。



(1) SR 堰

(2) ローリングゲート

図 3.2.4 取水堰堤ゲートからの微小放流の一例

3.2.7 下流河川環境

水力発電の柔軟性を向上させた場合、下流環境における流況の変化が生じる可能性が高い。海外の研究では、発電に伴う急激な放水によって生じる流況の変化は、ハイドロピーキングと呼ばれ、河川の生物環境（魚類、底生動物、植生）や社会環境への影響などが報告されている。水力発電の柔軟性を向上させた場合、従来の運用と比較して流況の変動が激しくなる可能性が高い。ハイドロピーキングによって懸念される影響のうち、とりわけ多くの研究で取り上げられている魚類の座礁（Stranding）の概念を図 3.2.5 に示す（例えば、[107～109]）。これは、低水位時に砂州となる箇所に発電放水による高水位時に侵入した魚類が、出力制御や発電停止に伴う水位の低下のスピードが速い場合に、進入した砂州上に形成されたたまりに取り残される現象のことである。その後、たまりの水温上昇や乾燥によっては、次の発電による高水位を待つことができず、死に至ることが知られている [108]。

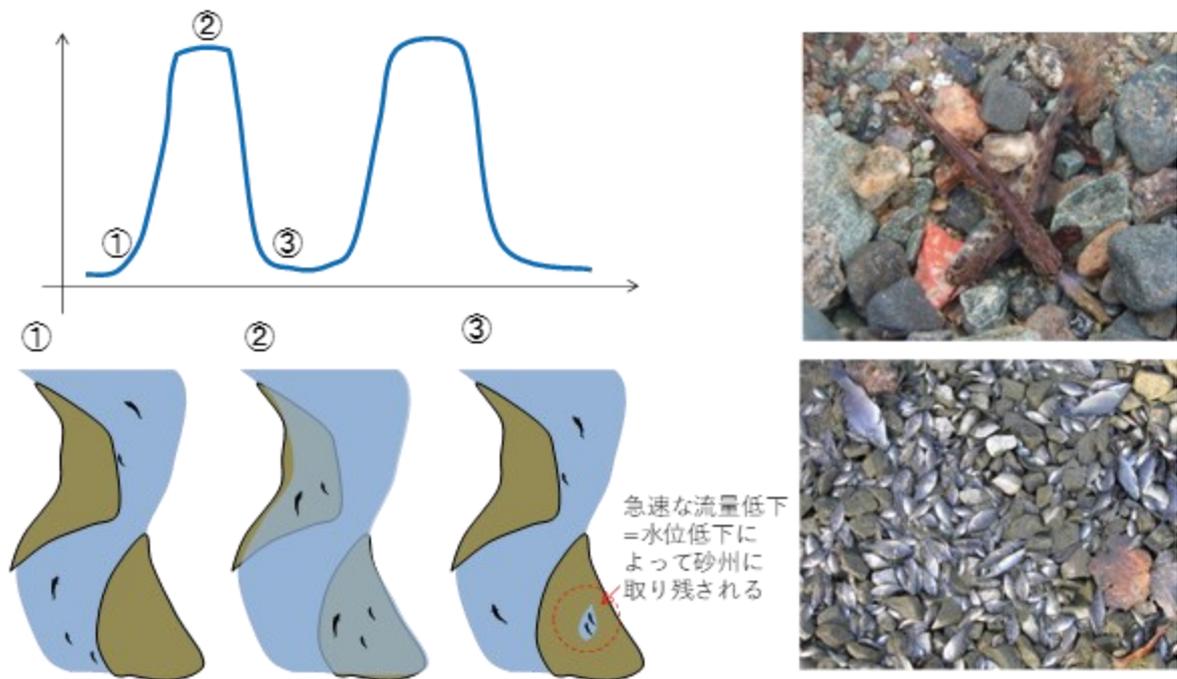


図 3.2.5 ハイドロピーキングによる魚の座礁のイメージ図
 (魚の座礁の写真は、Nagrodski et al. から引用[108])

例えば、Moreira et al. は、ハイドロピーキングが魚に与える影響について[110]、Gracey and Verones は、魚類やハビタットへの影響や水質、地形変化についてレビューしている[111]。また、Bipa et al. は、ハイドロピーキングによる生物影響や社会影響に関する既往の研究をレビューしている[107]。それらの研究をベースとして、ハイドロピーキングが与える影響のうち、生物環境（魚類及び底生動物）に対する影響を表 3.2.3 に、社会環境に対する影響を表 3.2.4 にまとめた。

ハイドロピーキングが河川生物に与える影響に関する既往の研究の多くは、魚類に対する影響についての検討であり、とりわけ世界的にも有用魚種であるサケ科の魚類に対する関心の高さがうかがえた。魚類への影響として、成長度合いや体長と言った生物個体に関する指標のほか、魚類の群集となる多様性や生息地(ハビタット)などについても研究されている。表 3.2.3 に示すように、多くの項目については、正負両面の影響が整理されている。顕著な負の影響としては、前述した魚類や底生動物の座礁 (Stranding) や産卵床の干出、稚魚などの遊泳能力が低い個体が本来の生息場からの流出 (Drift) されることが懸念されていることが示唆された。

一方、社会環境への影響としては、水質の変化やラフティング、フィッシングといったレクリエーションに与える影響が指摘されている。水質については、とりわけ水温に対する影響について多くの研究が報告されている。ハイドロピーキングによる水温の変化は、貯水池内の取水位によって変動し、発電に合わせて河川内の水温が大きく変化することが報告され

ている[169]。水温が変化することによって、水温を手掛かりにした生活を送る生物にとっては、その生活のリズムが崩れることにつながる可能性が指摘されている[107]。また、近年は、ハイドロピーキングによる水中のガス濃度が増加することが指摘されており、河川の生物への影響や人への影響について今後の研究の必要性を指摘している[174, 175]。

ここで、Bipa et al. (2024) [107]において、日本におけるハイドロピーキングによる影響を検討した研究は、報告されていないことが指摘されている。そのため、日本の魚種や底生動物に対する影響については、不明であることから、今後知見の収集が求められる可能性がある。

上述のように各方面への影響の可能性のあるハイドロピーキングに対する緩和策として、ソフト面及びハード面からの対策が提案されている(表 3.2.6)。ソフト面については、取り残された魚類などの水生生物を人為的に捕獲して河川に戻すこと、流量の制御により水位の低下スピードを緩やかにすること、河道掘削などの河道形状の改変、魚類に行動学習させるための Conditioning Flow を行うことなどが提案されている[108]。同様に、例えば、流量が大きいときに水位が低下した際に干上がる可能性がある箇所に産卵することを防ぐため、対象となる種の生活史を考慮して流量調整などが提案されている。

ハード面については、再調整池の設置(図 3.2.6 A)、発電機の横に発電機をバイパスする流路を作るバイパスバルブの設置(図 3.2.6 B)、バッテリーによる出力の調整をする Battery Energy Storage System (BESS)の併設(図 3.2.6 C)、発電機の放水路に直結した地下貯水池の圧力制御による貯留を可能とする Air Cushion Underground Reservoir (ACUR)の設置(図 3.2.6 D)などが考えられている。再調整池の設置は、発電所の放水口の先に再調整池を設置して、そこから流量を調整して放流する機構を有する。再調整池は、Aare River の上流域に位置する River Hasliaare の Innertkirchen I and II 発電所における先行事例[198]ほか、シミュレーションベースの検討で多くの研究が報告されている。また、バイパスバルブは、発電停止の際に発電機をバイパスする形で下流河川への放流を継続し、徐々にバルブを閉めることで、水位の低下速度を緩慢にする操作が可能となる装置である。BESS は、取水流量の増加時及び低下時における急激な変化を緩衝する際の短期的な需要要件を満たすために利用できるバッテリーを発電所に併設するものである。高頻度出力制御技術として提案されている BESS は、水力の運用の柔軟性を向上させるだけでなく下流河川への影響を低減させることもできるといえる。また、ACUR は、発電所の放水路の途中に、地下貯留槽を設けるものである。水の出し入れは、圧力制御によって行い、それによって下流環境の流量の制御を行うシステムである。現状は概念による検討が行われている段階であり、実際に建設した事例はない。

大きな開発を伴う再調整池や ACUR の設置は、開発の適地が少ないことや開発自体の別の生物環境・社会環境的に与える影響が高いこと、コストが高く、費用対効果が低い可能性がある。一方、BESS は、比較的小さなスペースで設置できる可能性があるものの、フランシス水車やペルトン水車の一部においての運転範囲が限られているために利用しにくいことや電池の寿命が土木構造物に比べて短いことなどの課題がある [198]。Höfkes et al. は、小さな調整池と BESS との組み合わせが、経済的な実現可能性が高い事を示しており [198]、緩和策についてもハイブリッドによる制御が適している可能性が示唆された。

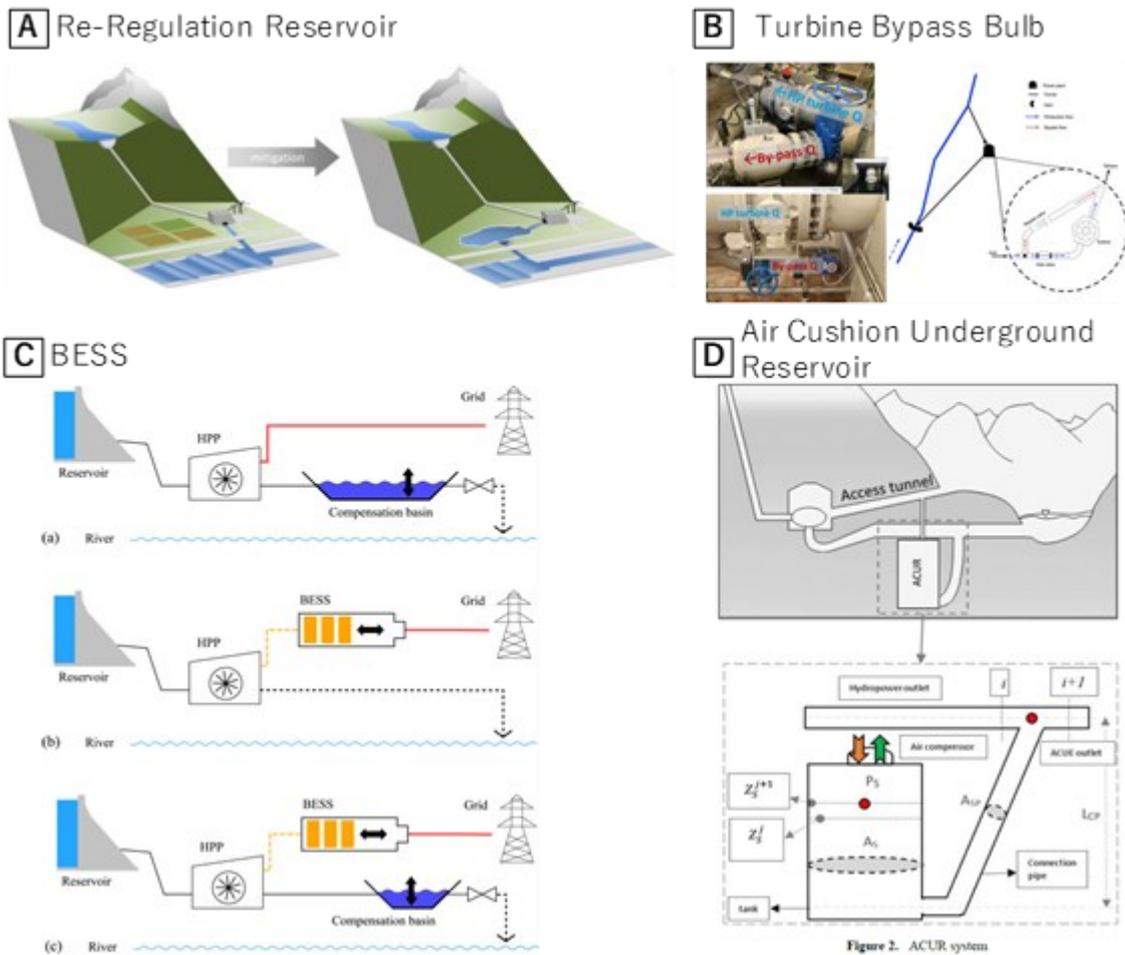


図 3.2.6 ハイドロピーキングによる影響の緩和策(ハード対策)

(A:Bruder et al. [193]から引用、B: Halleraker et al. [194]から引用、
C:Hofkes et al. [198]から引用、D:Saberi et al. [199]から引用)

表 3.2.3 ハイドロピーキングが魚類及び底生生物に与える主な影響

対象	項目	応答	参考文献
魚類	成長	Positive	例えば、Bond et al. (2016), Feng et al. (2018), Kelly et al. (2017a)
		Negative	例えば、Addo et al. (2022), Česonienė et al. (2021), Earley and Sammons (2018), Hajiesmaeili et al. (2023)
		No Impact	例えば、Addo et al. (2022), Enders et al. (2017), Flodmark et al. (2006), Oliveira et al. (2020)
	体長	Positive	例えば、Enders et al. (2017), Kelly et al. (2017b), Rocaspana et al. (2019)
		Negative	Puffer et al. (2017)
		No Impact	Alexandre et al. (2016), Puffer et al. (2015)
	バイオマス	Positive	Rocaspana et al. (2016a)
		Negative	例えば、Hayes et al. (2021), Puffer et al. (2017), Rocaspana et al. (2016a)
		No Impact	Addo et al. (2022), Puffer et al. (2015)
	多様性	Positive	Schmutz et al. (2015)
		Negative	例えば、Boavida et al. (2015), Enders et al. (2017), Kashiwagi and Miranda (2009), Vehanen et al. (2005)
	ハビタット	Positive	Pragana et al. (2017)
		Negative	例えば、Antonetti et al. (2022), Choi and Choi (2018), Costea et al. (2021), Jelovica et al. (2022)
	生存率	Negative	例えば、Hajiesmaeili et al. (2023), Hedger et al. (2018), Le Coarer et al. (2022)
		No Impact	例えば、Kelly et al. (2017a), Puffer et al. (2015), Puffer et al. (2017)
座礁 (Stranding)	Negative	例えば、Auer et al. (2022), Glowa et al. (2022), Le Coarer et al. (2022), Pander et al. (2022a)	
ドリフト	Negative	例えば、Auer et al. (2017), Auer et al. (2022), Rocaspana et al. (2016b)	
卵・仔魚・稚魚	Negative	例えば、Bakken et al. (2016), Bartoň et al. (2021), Pander et al. (2022b), Vollset et al. (2016)	
産卵床のエリア	Positive	Hauer et al. (2017)	
	Negative	Bartoň et al. (2022), Burman et al. (2021)	
底生動物	成長	Negative	Cérèghino et al. (1997)
	バイオマス	Positive	Lauters et al. (1996)
		Negative	Lauters et al. (1996), Leitner et al. (2017), Valentin et al. (1995)
		No Impact	Abernethy et al. (2021)
	多様性	Positive	Elgueta et al. (2021)
		Negative	例えば、Castro et al. (2013), Mihalicz et al. (2019), Ruhi et al. (2018)
	ハビタット	Positive	Schneider et al. (2017)
		No Impact	Vanzo et al. (2016)
	ドリフト	Negative	例えば、Bruno et al. (2010), Schülting et al. (2023), Timusk et al. (2016)
	座礁	Negative	Hauer et al. (2017), Tonolla et al. (2022)

表 3.2.4 ハイドロピーキングが社会環境に与える主な影響

対象	項目	応答	参考文献
水質変化	水温	取水位置によって水温が急激に変動する	例えば、Bakken et al. (2016), Casas-Mulet et al. (2016), Schülting et al. (2016)
	濁り	流量の増加による	Béjar et al. (2018), Vericat et al. (2020)
	塩水遡上	流量低下時に塩水が遡上	Trung et al. (2020)
	ガス濃度	水中のガス濃度が増加する	Calamita et al. (2021), Pulg et al. (2016)
生活環境	音圧	音圧が増加	Lumsdon et al. (2018)
社会	河川景観	河川の景観が変わり生態系サービスに影響	Grizzetti et al. (2016)
	フィッシング	流量の増加とともに逃げるのが難しくなる	Pisaturo et al. (2019)
	ラフティング	ピークフローにより晩夏までラフティングをサポートできる ホワイトウォーターラフティングの経済性と発電とのバランス	Carolli et al. (2017a) Caroli et al. (2017b)
	河川内流氷・氷上スキー	水温が低下しきらず、氷が形成されにくくなる	Ruokamo et al. (2024)

表 3.2.5 ハイドロピーキングへの緩和策

適応策	内容	参考文献
ソフト対策	たまりに取り残された生物を採捕して戻す	Greimel et al. (2018)
	維持流量・環境流量の増加	Greimel et al. (2018), Schillinger et al. (2018)
	流量の変化の幅を小さくする	Greimel et al. (2018), Greimel et al.(2023), Halleraker et al. (2022)
	流量の変化率を小さくする	Greimel et al. (2018), Greimel et al. (2023)
	河道幅の拡幅（別の負の影響の可能性あり）	Greimel et al. (2018)
	やすらぎ水路（Side Channel）の形成	Greimel et al. (2018)
	対象の生活史を考慮した流量制御	Casas-Mulet et al. (2016), Hayes et al. (2019), Jones and Petreman (2015)
	生物の保護区の作成	Simonov et al. (2019)
Conditioning Flowによる魚類への学習	Irvine et al. (2009)	
ハード対策	再調整池による流量制御	例えば、Bruder et al. (2016), Mchayk et al. (2024), Reindl et al. (2023)
	バイパスバルブによる流量低下時の給水	Halleraker et al. (2022), Halleraker et al. (2023)
	バッテリーの併用(BESS)による流量制御	Anindito et al. (2019), Höfkes et al. (2024)
	エアクッション地下貯水池(ACUR)による流量制御	Saberli et al. (2021)

3.3 設計要件や運用方法の影響の特定

本項では、最低負荷の引き下げに伴う効率曲線の変化に伴う発電電力量の影響の試検討を行う。

新井ら[201]は貯水池式水力発電所を対象に貯水池の運用水位（ルールカーブ）を最適化する研究を行ったが、水車効率は一定値として与えられていた。実際には、最大使用水量に対する取水量の割合に応じて水車効率は変化するため、効率カーブを設定すれば発生電力量の向上が期待できる。そこで、新井ら[201]と同一の仮想貯水池を用い、複数の水車効率特性を設定した場合の発生電力量を比較した。

対象貯水池の主要諸元は、常時満水位 90m、発電取水水位 40m、有効貯水容量 $1.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 、最大使用水量 $30 \text{m}^3/\text{s}$ 、最大出力 21,341kW である（詳細は新井ら[199]参照）。2010 年を助走計算期間、2011～2020 年の 10 年間を解析対象期間とした。運用ルールは以下のとおり設定した（図 3.3.1）。

- 運用上限水位 (L_{max}) 超過時：最大使用水量で取水し、超過分をゲート放流
- 運用上限水位 (L_{max})～運用目標水位 (L_{aim})：最大使用水量で取水
- 運用目標水位 (L_{aim})～運用下限水位 (L_{min})：ダム流入量の 50%を取水
- 運用下限水位 (L_{min})未満：取水停止

この運用ルールに従い計算した全解析対象期間における貯水位を図 3.3.2 に示した。

図 3.3.3 には、水車効率 η と取水率 (Q_r ；取水量/最大使用水量) の関係を示す。この関係式は以下の式で与えた。

$$\eta = 0.9 - 0.5(Q_r - Opt_r)^2 \quad (1)$$

ここで、 Opt_r ：最大効率となる取水率である。式(1)は水車効率 η の最大値が 0.9 であることを意味する。図 3.3.4 に示す通り、最大効率となる取水率 Opt_r を 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 とする 5 パターンを設定した。図 3.3.4 に各パターンの年間発生電力量を示す。また、図 3.3.5 に最大効率となる取水率 $Opt_r = 0.9$ を基準とした年間発生電力量の差分を示す。以上より、解析期間全体では $Opt_r = 0.7$ のケースが最も高い発生電力量を示した。

本研究により、水車効率特性の違いが発生電力量に与える影響を定量化できた。ただし、今回の結果は特定の運用戦略と仮想貯水池に基づくケーススタディであり、貯水容量や発電

規模等の諸元によって変わりうる。このため、実貯水池への適用には運用ルールや需要応答を含めたより実践的な条件設定が必要である。

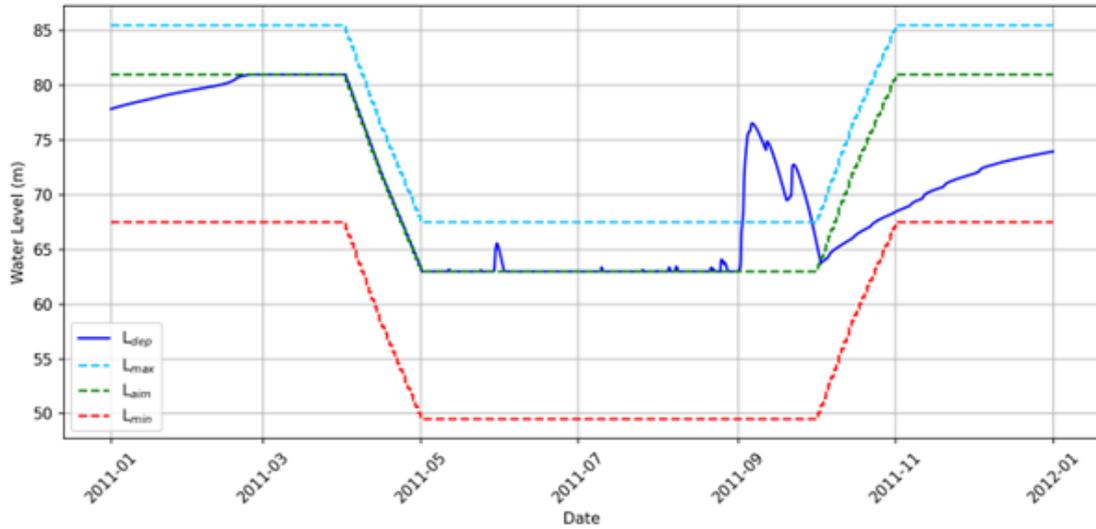


図 3.3.1 貯水位の計算結果の一例

Ldep : 貯水位, Lmax : 運用上限水位, Laim : 運用目標水位, Lmin : 運用下限水位

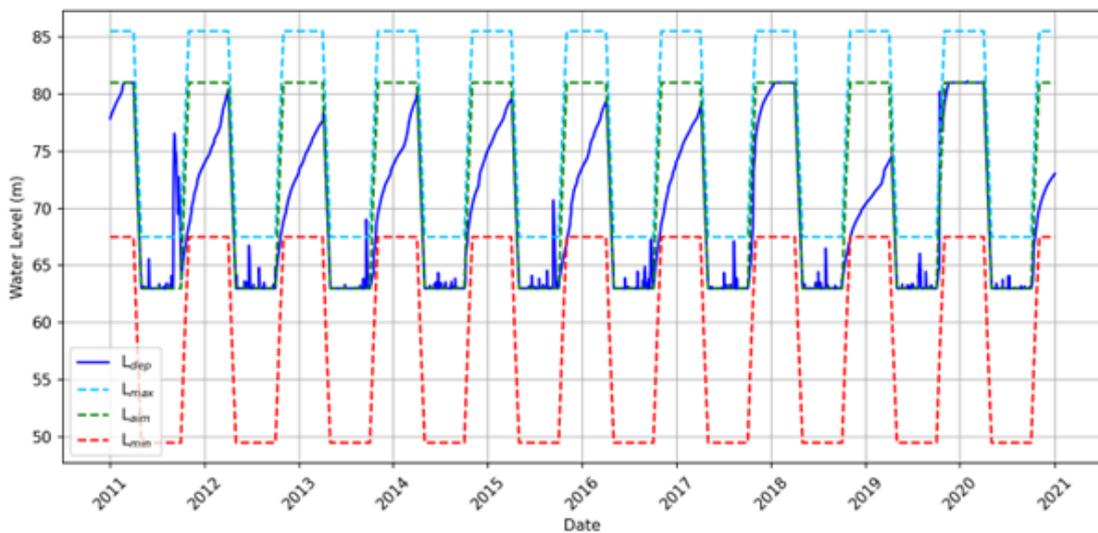


図 3.3.2 全解析期間の貯水位

Ldep : 貯水位, Lmax : 運用上限水位, Laim : 運用目標水位, Lmin : 運用下限水位

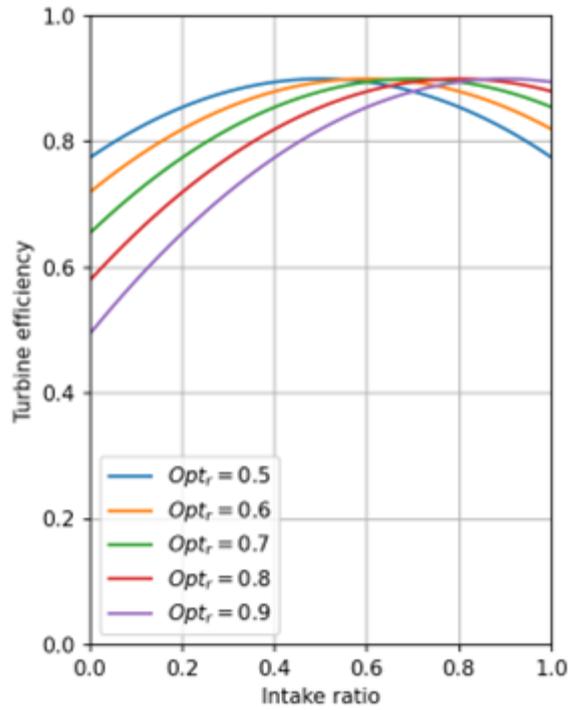


図 3.3.3 水車効率と取水率(取水量/最大使用水量)の関係
 Opt_r : 最大の水車効率となる取水率



図 3.3.4 5 パターンの水車効率に対する年間発生電力量
 Opt_r : 最大の水車効率となる取水率

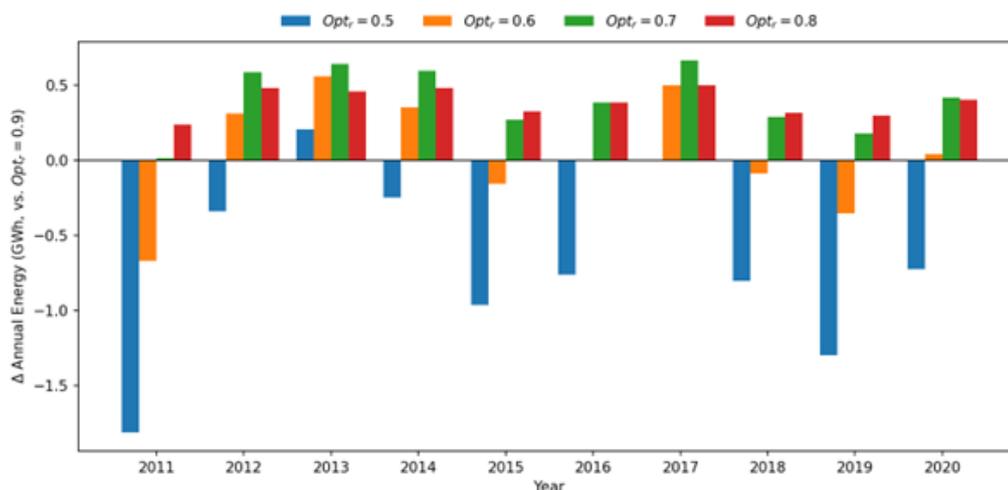


図 3.3.5 Opt_r = 0.9 を基準とした年間発生電力量の差分

例えば、Opt_r = 0.5 の結果は Opt_r = 0.5 の年間発生電力量から Opt_r = 0.9 の年間発生電力量を引いた値に対応している。 Opt_r : 最大の水車効率となる取水率

Ldep : 貯水位, Lmax : 運用上限水位, Laim : 運用目標水位, Lmin : 運用下限水位

3.4 まとめ

水力発電の柔軟性向上のためには、部分負荷運転を含む広い範囲での運転、頻繁な起動停止、急激な出力調整といった運用が求められる。これらの要求に応えるための技術課題として、水車内部のキャビテーションによる壊食、非定常流体现象に起因する水圧変動と各部の疲労・騒音、水路系と連成した過渡応答や不安定現象などが生じる。また、河川・水路設備では余剰となる水の処理への対処が必要となり、系統事故や水車発電機の故障など緊急時の使用が原則となる余水放流設備からの頻繁な放流と河川での人工洪水、取水ロケットでの頻繁な取水制御とそれに伴うゲート機器の劣化促進、導水路から農業用水等への利水補給の毀損、洪水吐きゲートからの頻繁な放流と微小開度放流に伴う振動・騒音などの課題が生じる。

一方、第7次エネルギー基本計画において、水力発電電力量は2023年度実績の770億kWhに対し、2040年度見通しは880~1,200億kWhへ拡大する数値が示された。これに対応するために新たに開発される水力発電は、ノンファーム型接続を踏まえた柔軟性の高い運転が必要となり、系統の稼働状況に応じて接続・切断、負荷調整することが必須となる。特に、現在我が国が保持する未開発包蔵水力は3,000kW以下の地点数が全体の6割程度を占め、このような中小規模の発電所の開発が2050年カーボンニュートラルの実現に必要と考えられるが、柔軟性向上に対処するためのコスト影響は特に大きいと考えられる。また、近年は、過去の水力開発低迷期に起因する水力技術者の要員不足と高齢化、保守費用の増加、水車発電機の供給力不足、海外製品との価格競争などの構造的な課題も顕在化している。このため、柔軟性向上に伴う水車発電機供給力の更なる悪化や価格上昇が、水力発電の新規開発意欲の低下や既存事業者の撤退をもたらし、第7次エネルギー基本計画や2050年カーボンニュートラルの実現に懸念が生じかねない。

よって、水力発電の柔軟性向上と水力発電電力量増大の両立のためには、前述の技術課題と水力発電業界の構造的な課題の両面での解決が必要であり、設計ならびに運用において以下の技術開発を推進する必要があると考えられる。すなわち、

- ① 設計による水車の低負荷時の高効率運用・ダメージ抑制技術
- ② 設計による高速・高頻度出力調整時の過渡応答抑制技術と水路式発電所特有の課題対策技術（余水処理、溢水、利水影響、下流発電影響等）
- ③ デジタル技術による高速・高頻度出力調整時の最適運用・制御・保守技術

の開発を進め、収益向上とコスト削減の両面で問題解決を図る必要があると考えられる。以下に、各技術開発項目について整理する。

① 設計による水車の低負荷時の高効率運用・ダメージ抑制技術

水車の設計は、落差と流量、立地条件に応じて特注設計が一般的であるが、我が国の中小を含む水車発電機メーカーにおいて前述の技術課題を解決しながら水車発電機の供給力を向上させるためには、水車の標準化・シリーズ化が必要と考えられる。これによって、地点特性を選択するだけで設計は不要となり、地元企業を含む多くの企業が水車を製造できるようになる。この参入障壁の低下の影響は大きいと考えられ、人材不足の解消、コストの削減、地元を中心としたトラブル対策体制の構築、地域経済の活性化、中小水力への投資意欲の増加が期待される。水車の標準化・シリーズ化を実現するためには、落差や流量に応じた設計技術の標準化とともに、水車の翼設計、強度解析、損失解析、振動解析等の水車設計用ソフトウェア群、ならびに、小型水車性能試験、キャビテーション試験、過渡応答試験、トラブル時の原因究明・対策検討が可能な模型試験プラットフォームを整備し、国内中小水力メーカーが活用できるようにする必要がある。

② 設計による高速・高頻度出力調整時の過渡応答抑制技術と水路式発電所特有の課題対策技術

柔軟性向上に対応した高速・高頻度な出力調整・起動停止に対し、水車発電機と水路系の過渡応答や不安定現象を抑制するとともに、溢水や利水影響、下流発電影響を防ぎながら、水を有効に活用して発電電力量の最大化を図る必要がある。あわせて、アナログ制御に比べて瞬時の遅れ時間等が短く、過度に反応しやすいデジタル制御に対する圧力脈動を事前に評価し、水路系の設計に反映させる必要がある。このため、BESS (Battery Energy Storage Systems) や可変速水車・発電機、放流バルブ付きバイパス水路、密閉式エアクッションサージチャンバーなどの柔軟性向上に対応するために設置する新たな設備がデジタル制御下で水路系の過渡応答に与える影響を設計段階で評価し、発電電力量の最大化と保守・運用費用の最小化を満たす必要がある。具体的には、模型試験に依らずに設計段階で運用レベルの評価を可能とするデジタルツイン技術の基盤モデルとして、キャビテーション影響を含めた水車完全特性や放流バルブ機能、密閉式エアクッションサージチャンバー機能、また、BESS と水車発電機のハイブリッド運転機能を考慮したうえで、負荷遮断や出力制御時の流動や圧力脈動等、さらに、水車各部の応力・振動を評価可能とする過渡応答シミュレータを開発、検

証する必要がある。

③ デジタル技術による高速・高頻度出力調整時の最適運用・制御・保守技術

柔軟性向上に対応した部分負荷運転や高速・高頻度な出力調整・起動停止の増加に対して、水車等の機器や設備の損傷を適切に評価し、それを最小化させる運転を行うことで、保全コストの抑制と発電電力量の増大を図る必要がある。このため、IoT センサー等によって実機のデジタルデータを取得し、AIなどを組み合わせた状態診断データベースに基づいて種々の対策を決定し、損傷最小化と利益最大化を両立させるよう水車発電機を制御する必要がある。例えば、EUのXFLEX HYDROでは、SPPS (Smart Power Plant Supervisor) が Kaplan 水車発電機 4 台を擁する流れ込み式水力発電所に導入され、実機フィールドデータ、模型試験データ、数値シミュレーションデータを入力値として性能や損傷などを目的関数とするメタモデルの妥当性が実証されている。しかしモデル特性の補間方法やビッグデータの制御系への活用の妥当性は十分に明らかにされておらず、適用された水車も限定的である。このため、我が国の水力発電特性を踏まえながら、「流量、落差、回転速度などの運転パラメータ」と「現地試験、縮小模型試験、数値シミュレーションなどのデータ (取得方法を含む)」、「エネルギー効率、キャピテーション、残存寿命、圧力変動、摩耗などの目的関数 (メタモデル)」、「既存の制御システムとの取り合い方法」などを標準化し、統一して使用できるシステムを構築する必要があると考えられる。

水力発電における負荷変化性能の現状値、課題、技術開発等により対応可能な範囲を表 3.4.1 に、水力発電の柔軟性向上に向けた課題と対策、及び対策実施のためのコスト増分を表 3.4.2 (その 1、その 2) に取りまとめる。水力発電は未開発な賦存量が多く、開発に意欲を示す事業者も多数存在し、今後第 7 次エネルギー基本計画の達成に向けて水力発電電力量を拡大させる必要があることから、調整能力が大きく同期発電機の価値を活かせる水力が果たす役割は大きくなると考えられる。また、ノンファーム型接続の水力発電は、系統混雑時には kWh としての価値が低下し、発電を停止することも考えられる。しかしながら、同期発電機を有する水力発電が発電を停止 (系統から解列) すると、系統の安定性を支える慣性、無効電力、短絡容量の確保が難しくなる。そのため、水力発電を電力系統に接続し続けることに価値があり、kWh としての価値が下がっても系統安定性のために発電を継続できるようなインセンティブ等が望まれる。

一方、一滴の水を、水力発電事業者だけでなく、農業・上水道・工業等の利水事業者と流域全体で有効に利用している水力発電の特性、ならびに、未開発賦存量の多い中小水力のメーカーが限られ水車の確保が水力開発のボトルネックになっている現状を踏まえると、柔軟性向上と水力発電電力量拡大の両立のための技術開発が必要と考えられる。すなわち、①水車の標準化・シリーズ化や②エネルギーストレージ、過渡応答シミュレータ、③デジタル技術・SPPS 等の技術開発を進め、費用低減と性能向上を満した水車等の製作促進を図る必要があると考えられる。

他方、地点によっては掘削等の膨大な費用等が発生することが懸念されるなど、追加の設

備導入に伴うコスト増ならびに出力制御に伴う発電電力量の減少に伴う採算悪化懸念により、新規開発意欲の低下が懸念される。このため、前述の技術開発と設備導入補助等の一体的な支援を行う必要があり、そして、これらの両立によって、水路・水槽・河川・貯水（調整）池を含めた水力発電の柔軟かつ安全な運用がなされるとともに、発生電力量の拡大が図られ、第7次エネルギー基本計画が達成されると考えられる。

表 3.4.1 水力発電における負荷変化性能の現状値、課題、技術開発等により対応可能な範囲

負荷変化性能	現状値	主な問題点と技術課題	技術開発等により対応可能な範囲
最低負荷	事業者、地点で異なるが、標準は50%前後 但し、事業者の責任で、振動等を勘案しながら10%前後まで下げた運用もある	水車: キャビテーション発生、翼面壊食、圧力脈動、旋回失速のリスク増、効率低下	低負荷でのキャビテーション発生や効率低下等を抑制した水車形状、エネルギーストレージ（BESS）、デジタル技術（SPPS）により、柔軟性向上に伴う水車の損傷リスクの増加を適切にコントロールし、0～100%運転を可能とする
負荷変化速度	50～100%/min程度（調整池式、貯水池式） （水路式は地点で異なる）	水車・圧力管路: 可動翼の軸や摺動部の摩耗、過渡応答、応力集中、キャビテーション発生、水撃波の発生・伝播、圧力脈動	BESS、SPPS、密閉式エアクッションサージチャンバー、過渡応答シミュレータにより、柔軟性向上に伴う水車や圧力管路の損傷リスクの増加を適切にコントロールし、高速制御を可能とする
DSS運転	運転可 （但し、制御指令⇒運転制御の時間に制約）	水車・発電機: 翼間・ランナ出口の圧力振動、ランナの疲労破壊 水路・河川: 無降雨時の水位上昇、農業用水等利水補給の毀損、振動・騒音、余水路や巻上機等の劣化促進、着水遅れ時間対応（要員確保or自動制御） その他: 発電制御以外の下流発電所の減電、溢水防止低水位運転による減電	水車・発電機 の課題については同上 水路・河川・その他 の課題については、バルブ付きバイパス管路やBESS等の設置により、柔軟性向上に伴う流水遮断や余水路放流、微小開度放流を抑制し諸問題の発生を回避する
GF	可能	100MW以上の大型揚水では系統用件が課されているが、一般水力には系統用件は課されておらず、出力調整速度は揚水よりも劣ると考えられる	地点ごとに異なるが、現状よりも厳しい系統用件となる場合には、制御系や伝送系の大掛かりな改修が必要で、大きなコストを要すると考えられる
LFC			
EDC			

表 3.4.2 水力発電の柔軟性向上に向けた課題と対策及び対策実施のためのコスト増分(その1)

影響の大きい問題	主な課題	主な対策	対策実施のためのコスト増分等
①部分負荷運転の頻度の増加により、キャビテーションや旋回流が発生する領域での運転が増え、翼面壊食や流体振動等による損傷リスクが増えるとともに水車効率が下がる	・部分負荷運転による水車の損傷リスクを低減させ、保全コストを抑制するとともに、発電電力量の減少を抑制する必要がある	・部分負荷運転や高速・高頻度制御でも損傷リスクが高まらない水車・発電機ならびに水路系の設計技術の汎用化を図る(密閉式エアクッションサージチャンバー等設置含む) ・水力発電所に小規模なエネルギーストレージ機能(BESS)を持たせ、高速・高頻度な水車の制御や起動停止を抑制する ・デジタル・AI技術(SPPS)を用いて副作用(設備損傷、溢水等)を最小化する	・部分負荷運転や高速・高頻度制御に対する最適化が十分でなく、技術開発と実機実証が必要 ・水車とBESSの最適運転について国内外に実績がほとんど無く、我が国の特性に合わせた技術開発と実機実証が必要 ・SPPSによる最適制御の国内実績が無く、我が国の特性に合わせた技術開発と実機実証が必要
②高頻度な出力調整や起動停止の増加により、水車の摺動部品の摩耗や疲労破壊、水撃波の発生や過渡応答による水車・水圧管等の損傷のリスクが増える	・高速・高頻度な出力調整や起動停止による水車・発電機や水圧鉄管等の損傷リスクを低減させ、保全コストを抑制する必要がある	・自動警報装置や監視カメラ等を設置する(電源、通信環境の整備を含む) ・バルブ付きバイパス管路等を設置し、水車を通過させずに放水路に水を流下させる ・水力発電所に小規模なエネルギーストレージ機能を持たせ、出力制御に伴う流量変化を抑制する	・出力制御直前の指令への対応が必要 ・地点によっては掘削等の膨大な費用が必要 ・水車とBESSの最適運転について国内外に実績がほとんど無く、我が国の特性に合わせた技術開発と実機実証が必要
③一般送配電事業者からの出力制御指令によって河川放流が発生する場合、人工洪水によって河川水位が上昇し、(特に無降雨時に)入川者の安全の確保が難しくなる	・入川者の安全確保を行う必要がある ・河川放流させないため、流水を止めずに出力制御する必要がある ・河川放流させないため、水車の運転を継続する必要がある	・バルブ付きバイパス管路等を設置し、水車を通過させずに放水路に水を流下させる ・水力発電所に小規模なエネルギーストレージ機能を持たせ、出力制御に伴う流量変化を抑制する	・技術開発は不要だが、追加の設備導入により脱炭素拡大の事業成立性の低下が懸念され、地点によっては掘削等の膨大な費用が必要 ・水車とBESSの最適運転について国内外に実績がほとんど無く、我が国の特性に合わせた技術開発と実機実証が必要
④水路を農業用水等の利水補給に利用している場合、出力制御指令に伴う取水制御によって利水補給できなくなる	・水位を下げず、利水補給や下流への放流を続けるため、流水を止めずに出力制御する必要がある	・水力発電所に小規模なエネルギーストレージ機能を持たせ、出力制御に伴う流量変化を抑制する	
⑤カスケード型のシリーズ発電所では、発電制御対象発電所以外の下流発電所で減電が生じる	・水位を下げず、利水補給や下流への放流を続けるため、水車の運転を継続する必要がある		
⑥高頻度な出力制御に対応するため、取水位を下げた運用する場合、出力制御しない時間帯で減電が生じる			
⑦出力制御に伴い、洪水吐ゲート等の微小開度放流や余水路放流が続くと、近隣の家屋や旅館等から騒音や振動の苦情(風況被害を含む)が寄せられる懸念が生じる	・微小開度放流や余水路放流をさせないため、流水を止めずに出力制御する必要がある ・微小開度放流や余水路放流をさせないため、水車の運用を継続する必要がある	・バルブ付きバイパス管路等を設置し、水車を通過させずに放水路に水を流下させる ・水力発電所に小規模なエネルギーストレージ機能を持たせ、出力制御に伴う微小開度放流や余水路放流を抑制する	・追加の設備導入により脱炭素拡大の事業成立性の低下が懸念され、地点によっては掘削等の膨大な費用が必要 ・水車とBESSの最適運転について国内外に実績がほとんど無く、我が国の特性に合わせた技術開発と実機実証が必要

表 3.4.2 水力発電の柔軟性向上に向けた課題と対策及び対策実施のためのコスト増分(その2)

影響の大きい問題	主な課題	主な対策	対策実施のためのコスト増分等
<p>⑧取水口から水車までの着水遅れ時間に対応するために取水口で取水制御する必要がある場合、取水口ゲートに自動制御装置を新たに設置する必要がある</p> <p>⑨出力制御の頻度が多くなると、(長時間の利用を想定していない)余水放流設備の損傷が進行したり、ゲートのワイヤーケーブルや巻上機の劣化速度が加速する</p>	遠隔制御できない取水口ゲートに遠隔制御機能を設置する必要がある	電源ならびに通信環境を整備したうえで、自動制御装置を新たに設置する	技術開発は不要だが、追加の設備導入により脱炭素拡大の事業成立性の低下が懸念
	インターネット回線で送受信されるノンファーム電源の制御系のセキュリティを、専用回線となっている水力発電所と同等に確保する必要がある	一般送配電事業者からの制御系に対して、専用回線で送受信されている水力発電所の制御系と同等のセキュリティを確保する	技術開発は不要だが、専用回線と同等のセキュリティを確保した制御系が必要
	ゲート設備や余水放流設備の劣化速度を抑制する必要がある	長寿命で信頼性の高い機器を採用する	技術開発は不要だが、損傷リスクの増加により脱炭素拡大の事業成立性の低下が懸念
	取水口制御や余水放流等をさせないため、水車運転を継続する必要がある	エネルギーストレージ機能を持たせ、取水口制御や余水放流等を抑制する	水車とBESSの最適運転について国内外に実績がほとんど無く、我が国の特性に合わせた技術開発と実機実証が必要

4. 参考文献

- [1] ターボ機械協会, ハイドロタービン新改訂版, 2007.
- [2] 電気学会電力技術委員会, 水力発電機器の設計技術の動向, 電気学会技術報告. 1338 号, 2015.
- [3] K.Shingai, N.Okamoto, Y.Tamura, K.Tani, Long - Period Pressure Pulsation Estimated in Numerical Simulation for Excessive Flow Rate Condition of Francis Turbine, J.of Fluid Eng. ASME , Vol.136, 2014.
- [4] 原野正美, 谷清人, 野本悟, 関西電力株式会社御岳・新黒部川第三発電所納め中間羽根付高性能ランナの実用化, 日立評論, 88-2, 2006.
- [5] 谷清人, 花田豊, 水車ランナの特性改善による水力エネルギーの有効活用, 日立評論 93-8, 2011.
- [6] T.Kumashiro, F.Avellan, K.Tani, S.Alimirzazadeh, Application of particle-based numerical analysis to tthe practical design of Pelton turbine, IAHR 2020, 2020.
- [7] ターボ機械協会・生産統計のデータ
- [8] 資源エネルギー庁、日本の水力エネルギー量、最終確認日 2025 年 5 月 26 日
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/databas/e/energy_japan006/
- [9] B. M. Umar, X. Huang, Z. Wang, Experimental Flow Performance Investigation of Francis Turbines from Model to Prototype, Appl. Sci. 14(17), 7461, 2024.
- [10] 大野 泰照, ポンプ水車における水車運転範囲の予測, ターボ機械, 20 巻, 10 号, 1992
- [11] 戸田一典, 黒川敏史, 近内忠, 世界最大容量・高落差の揚水発電用ポンプ水車 -東京電力(株) 神流川発電所納入, 東芝レビュー, Vol.61 No.5, 2006.
- [12] 谷清人, 奥村博司, 米国大型揚水発電所ポンプ水車の特性改善 -ニューヨーク州電力局ブレンハイム・ギルボア発電所 300 MW ポンプ水車, 日立評論, Vol. 91, NO. 3, 294-295, 2009.
- [13] 加藤真敏, 黒川敏史, 王慶, 陳泓宇, 高落差・大容量の揚水発電所で実証された低振動・高信頼性技術, 東芝レビュー, Vol. 73, No. 3 2018.
- [14] T. Fujita, 475MVA and 230MVA adjustable speed pumped storage system for Kazunogawa Unit 4 and Kyogoku Unit 1 and 2, Japan, HYDRO2015, 2015.
- [15] B. Tilbury, Emergent risks in the pumped hydropower sector and approaches for management, HYDRO2014, 2015.
- [16] 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部「低炭素電力供給システムにおける火力・水力発電等の役割と課題について」(平成 21 年 1 月 26 日)、最終確認日 2025 年 5 月 28 日
<https://www.itrco.jp/libraries/JSG4-5.pdf>
- [17] HYPERBOLE Consortium, HYPERBOLE Project Final report, HYPERBOLE CONFERENCE 2017, 2017.
- [18] HYPERBOLE Project. Hydropower stations perfomance and flexibile operation towards lean integration of new renewable enrgies . 出版地不明 : HYPERBOLE Project, 2017.
- [19] XFLEX HYDRO, Recommendations towards the deployment of hydropower flexibility

- technologies, 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
<https://www.xflexhydro.com/knowledge/recommendations-towards-industrial-deployment-of-hydropower-flexibility-technologies>
- [20] European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-achieves-20-20-20>, 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [21] D. Valentín, A. Presas, M. Egusquiza, C. Valero, Hybridization in Kaplan turbines. Wear and tear assessment, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 1079, 012108 2022.
- [22] S. Kadam, T.Eiper, Enhanced operational flexibility with Hybrid Battery Technology, Vienna Hydro 2024, 2024.
- [23] Fortum, Hydropower-battery hybridization. world hydropower congress 2021. San Jose, 2021
- [24] E Vagnoni, F Gerini, R Cherkaoui, M Paolone, Digitalization in hydropower generation: development and numerical validation of a modelbased Smart Power Plant Supervisor, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 774 012107, 2021
- [25] <https://www.rehydro.eu/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [26] <https://sherpahydro.eu/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [27] <https://www.iamp-hydro.eu/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [28] <https://d-hydroflex.eu/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [29] <https://dihydro-project.eu/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [30] <https://www.waterpowermagazine.com/news/utility-scale-batteries-could-boost-hydropower-plant-efficiency/?cf-view> <https://hydrohybrids.inl.gov/#/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [31] <https://www.energy.gov/eere/water/articles/water-power-technologies-office-seeks-test-facilities-join-new-hydropower> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [32] <https://www.energywerx.org/opportunities/voucher-opportunity-6-hydropower-testing-network-hytn-providers> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [33] <https://www.nrel.gov/news/program/2024/facilities-invited-to-join-new-hydropower-testing-network.html> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [34] <https://www.hydroreview.com/technology-and-equipment/research-and-development/doe-wpto-seeking-facilities-to-join-hydropower-testing-network/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [35] <https://www.rd.usda.gov/new-energy-deployment/pace-project-announcements> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [36] <https://sustainableagriculture.net/publications/grassrootsguide/renewable-energy/renewable-energy-energy-efficiency/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [37] <https://www.hydroreview.com/hydro-industry-news/small-hydro/usda-funding-to-support-small-hydropower-construction/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [38] <https://www.waterpowermagazine.com/news/usda-announces-hydropower-project-and->

- [clean-energy-initiatives-for-rural-america/?cf-view](#) 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [39] <https://www.hydroreview.com/news/nevada-and-kentucky-just-got-140m-for-clean-energy-projects-heres-where-its-going/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [40] <https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-invests-nearly-15-million-enhance-hydropowers-ability-support> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [41] <https://www.energy.gov/eere/water/articles/funding-notice-strategies-increase-hydropower-flexibility> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [42] <https://www.hydroreview.com/hydro-power/dams-civil-structures/doe-invests-almost-15m-for-hydro-grid-balancing-projects/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [43] <https://www.energy.gov/gdo/section-247-maintaining-and-enhancing-hydroelectricity-incentives> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [44] <https://www.waterpowermagazine.com/news/biden-harris-administration-allocates-430-million-for-hydropower-upgrades/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [45] <https://www.hydroreview.com/dams-and-civil-structures/dam-safety/doe-invests-430-million-for-u-s-hydropower-safety-and-upgrades/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [46] Luigi Viola a, Saeed Mohammadi, et al, “Ancillary services in power system transition toward a 100% non-fossil future: Market design challenges in the United States and Europe”, July 2024
- [47] <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/06097/?P=4> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [48] <https://www.hydroreview.com/business-finance/business/weim-participants-realize-436-million-in-first-quarter-benefits/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [49] <https://www.ferc.gov/media/caiso-extended-day-ahead-market> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [50] <https://www.jetro.go.jp/biznews/2024/09/6468d79c8b5f2403.html> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [51] <https://www.neso.energy/news/deeside-power-station-begins-world-first-power-system-stability-contract-national-grid-eso> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [52] https://www.drax.com/press_release/draxs-cruachan-pumped-storage-hydro-power-station-wins-six-year-contract-to-keep-electricity-system-stable/ 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [53] <https://www.hydroreview.com/business-finance/business/440-mw-cruachan-power-station-to-provide-power-system-stability-in-britain/> 最終確認日 2025 年 5 月 28 日
- [54] PantPrashant, HamacherThomas , PericSVerdan. Ancillary Services in Germany: Present, Future and the Role of Battery Energy Systems. 2024.
- [55] WEBINAR - Optimize & Automate Cascade Operations for Small and Medium Hydro. HYDROGRID, 2024.
- [56] C.Nicolet, A.Zobeiri, P.Maruzewski, F.Avellan, On the upper part load vortex rope in

- Francis turbine: experimental investigation, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 12, 2010.
- [57] A.Amini, E.Vagnoni, A.Favrel, K.Yamaishi, A. Muller, F. Avellan, Upper part-load instability in a reduced-scale Francis turbine: an experimental study, *Experiments in Fluids* 64:110, 2023.
- [58] K. Amiri, B. Mulu, M.J. Cervantes, M. Raisee, Effects of load variation on Kaplan turbine runner, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 9, No. 2, 2016.
- [59] C. Trivedi, P. J. Gogstad, O. G. Dahlhaug, Investigation of the unsteady pressure pulsations in the prototype Francis turbines during load variation and startup, *J. Renewable Sustainable Energy* 9, 064502, 2017.
- [60] S.Houde, M.S.Iliescu, R.Fraser, S. Lemay, Experimental and Numerical Analysis of the Cavitating Part Load Vortex Dynamics of Low-Head Hydraulic Turbines, ASME Paper, AJK2011-33006, pp. 171-182; 12 pages: <https://doi.org/10.1115/AJK2011-33006>
- [61] X. Zhou, C. Shi, K. Miyagawa, H. Wu, J. Yu, Z. Ma, Investigation of Pressure Fluctuation and Pulsating Hydraulic Axial Thrust in Francis Turbines, *Energies*, 13(7), 1734, 2020
- [62] C.Nicolet, A.Zobeiri, P.Maruzewski, F.Avellan, Experimental Investigations on Upper Part Load Vortex Rope Pressure Fluctuations in Francis Turbine Draft Tube, Vol. 4, No. 1, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 4, No. 1, 2011
- [63] M. Chen, G. Zhu, Z. Wang, Y. Li, Experimental research on pressure fluctuation characteristics of high-head Francis turbine under part load conditions, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 510 022009, 2020.
- [64] T.Faverel, Dynamics of the cavitation precessing vortex rope for Francis at part load operating conditions, Ph. D thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2016.
- [65] A. Favrel, C. Landry, A. Müller, K. Yamamoto, F. Avellan, Hydro-acoustic resonance behavior in presence of a precessing vortex rope: observation of a lock-in phenomenon at part load Francis turbine operation, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 22 032035, 2014.
- [66] J.Joy, M.Raisee, M.J.Cervantes, Hydraulic Performance of a Francis Turbine with a Variable Draft Tube Guide Vane System to Mitigate Pressure Pulsations, *Energies*, 15(18), 6542, 2022.
- [67] S.Bouajila, T.D.Colombel, P-Y. Lowys, T.Maitre, Hydraulic Phenomena Frequency Signature of Francis Turbines Operating in Part Load Conditions, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 49 082001, 2016.
- [68] J.Schiffer, H.Benigni, H.Jaberg, M. Ehrengruber, Reliable prediction of pressure pulsations in the draft tube of a Francis turbine at medium and deep part load: A validation of CFD-results with experimental data, *HYDRO 2018*, 2018.
- [69] S. Alligné, C. Nicolet, P. Allenbach, B. Kawkabani, J.-J. Simond, F. Avellan, Influence of the vortex rope location of a Francis Turbine on the hydraulic system stability, 24th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2009.

- [70] A.Favrel, C.Laundry, A. Muller, F.Avellan, Experimental Identification and Study of Hydraulic Resonance Test Rig with Francis Turbine operating at Part Load, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 15 062064, 2012.
- [71] M.V.Magnoli, M.Maiwald, Influence of Hydraulic Design on Stability and on Pressure Pulsations in Francis Turbines at Overload, Part Load and Deep Part load based on Numerical Simulations and Experimental Model Test Results, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **22** 032013, 2014.
- [72] Y.Wang, K. Jin, X. Huang, P. Lin, Z. Wang, W. Wang, L. Zhou, Influence of Radial Installation Deviation on Hydraulic Thrust Characteristics of a 1000 MW Francis Turbine, *Water*, 15(8), 2023.
- [73] M.H. Arabnejad, H.Nilsson, R.E.Bensow, Investigation of Flow-Induced Instabilities in Francis Turbine Operating in Non-Cavitating and Cavitating Part-Load Conditions, *Fluids*, 8(2), 2023.
- [74] L. K. Wang, J. L. Lu, W. L. Liao, Y. P. Zhao, Q. F. Ji, Numerical Analysis of the hydraulic force of pump turbine under partial load conditions in turbine mode, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 240 072041, 2019.
- [75] Z.Liu, A.Favrel, W.Takahashi, K.Miyagawa, Numerical simulation of the unsteady cavitating flow in a Francis turbine draft tube at Upper-Part-Load(UPL) conditions, *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science* 774, 2021.
- [76] S.Skripkin, Z.Zuo, M.Tsoy, P. Kuibin, S. Liu, Oscillation of Cavitating Vortices in Draft Tubes of a Simplified Model Turbine and a Model Pump-Turbine, *Energies*, 15(8), 2022.
- [77] J.Koutnik, K.Kruger, F.Pochyly, P. Rudolf, On Cavitating Vortex Rope Form Stability during Francis Turbine Part Load Operation, *IAHR Int.Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*, 2006.
- [78] K.Yamamoto, A.Muller, A.Favrel, C.Laundry, F.Avellan, Pressure measurements and high speed visualizations of the cavitation phenomena at deep part load condition in Francis turbine, *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science* 22, 2014.
- [79] B. Nennemann, M. Melot, C. Monette, M. Gauthier, S. Afara, J. Chamberland-Lauzon, T. Jurvansuu, Shear and vortex instabilities at deep part load of hydraulic turbines and their numerical prediction, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 774 012114, 2021.
- [80] T. Krappel, S. Riedelbauch, R. Jester-Zuerker, A. Jung, B. Flurl, F. Unger, Paul Galpin, Turbulence Resolving Flow Simulations of a Francis Turbine in Part Load using Highly Parallel CFD Simulations, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 49 062014, 2016.
- [81] K.Shingai, N.Okamoto, Y.Tamura, K.Tani, Long-Period Pressure Pulsation Estimated in Numerical Simulations for Excessive Flow Rate Condition of Francis Turbine, *J. Fluids Eng.* 136(7): 071105 (9 pages), 2014.
- [82] P. K. Dörfler, Analysis of the Francis turbine upper-part-load pulsation Part II – Mechanism of self-excitation, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 240 052023, 2019.

- [83] C.Nicolet, J.J.Herou, B.Greiveldinger F.Avellan, Methodology for Risk Assessment of Part Load Resonance in Francis Turbine Power Plant, IAHR Int. Meeting of Working Group on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, 2006.
- [84] A.Favrel, C.Laundry, A. Muller, F.Avellan, Experimental Identification and Study of Hydraulic Resonance Test Rig with Francis Turbine operating at Part Load, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 15 062064, 2012.
- [85] C.Landry, A.Favrel, C.Nicolet, F.Avellan, Local wave speed and bulk flow viscosity in Francis turbines at part load operation, Journal of Hydraulic Research, Vol. 54, , Issue 2, 2016.
- [86] L. Shang, J. Cao, L. Wang, S. Yu, S. Ding, Z. Wei, Z. Wang, X. Liu, Analysis of Flow and Runner Dynamic Response Characteristics under Pump Conditions of Variable-Speed Pump Turbine, Journal of Marine Science and Engineering, 11(8), 1493, 2023.
- [87] Z. Wang, J. Yang, W. Wang, J. Qu, X. Huang, W. Zhao, Research on the Flow-Induced Stress Characteristics of Head-Cover Bolts of a Pump-Turbine during Turbine Start-Up, Energies, 15(5), 1832, 2022.
- [88] X. Huang, L. Chen, Z. Wang, H. Li, S. Chen, K. Hu, C. Li, L. Qiu, Stress Characteristics Analysis of Pump-Turbine Head Cover bolts during Load Rejection Based on Measurement and Simulation, Energies, 15(24), 2022.
- [89] X. Liu, Y. Luo, Z. Wang, A review on fatigue damage mechanism in hydro turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 54, 1-14, 2016.
- [90] 向井一馬, 宇藤祐悦, 電力系統の品質向上に寄与する水力発電技術, 東芝レビュー, Vol.58, No. 7, 2003.
- [91] N. Ruchonnet, O. Braun, Reduced Scale Model Test of Pump-Turbine Transition, 6th IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, 2015.
- [92] C. Stens, S. Riedelbauch, CFD simulation of the flow through a pump turbine during a fast transition from pump to generating mode, 6th IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, 2015.
- [93] C. Stens, S. Riedelbauch, Investigation of a fast transition from pump mode to generating mode in a model scale reversible pump turbine, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 49 112001, 2016.
- [94] A. M. Rodoriguez-Perez, I. Pulido-Calvo, P. Caceres-Ramos, A Computer Program to Support the Selection of Turbines to Recover Unused Energy at Hydraulic Networks, Water, 13(4), 2021.
- [95] A. Presas, D. Valentin, M. Egusquiza, C. Valero, E. Egusquiza, Sensor-Based Optimized Control of the Full Load Instability in Large Hydraulic Turbines, Sensors, 18(4), 1038, 2018.

- [96] G.Zanetti, M.Siviero, G.Cavazzini, A.Santolin, Application of the 3D Inverse Design Method in Reversible Pump Turbine and Francis Turbines, *Wtaer*, 15(12), 2271, 2023.
- [97] 林義一郎, 半田充, 菅田淳, 超音波ショットピーニングによる水車ランナベーン溶接補修部の疲労強度の向上, *日本機械学会論文集*, Vol.81, No.821, 2015.
- [98] W.Fu, Q.Lu, Multiobjective Optimal Control of FOPID Controller for Hydraulic Turbine Governing Systems Based on Reinforced Multiobjective Harris Hawks Optimaization Coupling with Hybrid Strategies, *ComplexityVolume*, Vol2020, Issue 1, 9275980, 2020.
- [99] H.Wang, Z.Ma, Regulation Characteristics and Load Optimization of Pump-Turbine in Variable-Speed Operation, *Energies*, 14(24), 8484, 2021.
- [100] D.Thibault, A.Trudel, The IEC 63230: A new standard on the fatigue of hydraulic turbines to help the industry face the energy transition, 2023.
- [101] F. Gerini, E. Vagnoni, M. Seydoux, R. Cherkaoui M. Paolone, Experimental facility for reduced scale model testing of hydraulic machines hybridized with a battery energy storage system, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 774 012119, 2021.
- [102] O. Pacot, Monitoring and quantifying the cavitation level in hydro powerplant components, *HYDRO2024*, 2024.
- [103] B. Maheshwari, Developing an advanced machine learning framework for predictive maintenance in hydropower plants: Targeting mechanical equipment failures, *HYDRO2024*, 2024.
- [104] P. Gruber, M. Farhat, P. Odermatt, M. Etterlin, T. Lerch, M. Frei, The detection of cavitation in hydraulic machines by use of ultrasonic signal analysis, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 8(4), 2015.
- [105] C. Badina, Non-intrusive monitoring of erosive cavitation, *HYDRO2024*, 2024.
- [106] 資源エネルギー庁, 電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン, 令和6年12月1日, https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/summary/regulations/pdf/keito_renkei_20241201.pdf 最終確認日 2025年5月28日
- [107] 水車標準化のための活動イメージ(案). 日立三菱水力. 2024.
- [108] 中小水力発電の新技術の手引き, 第8章余水路省略とヘッドタンクの小規模化, pp.327-386, 新エネルギー財団, 1993年
- [109] Bipa, N.J., Stradiotti, G., Righetti, M., Pisaturo, G.R., Impacts of hydropeaking: A systematic review, *Science of The Total Environment*, 912, 2024, 169251.
- [110] Reis-Filho, J.A., Leduc, A.O.H.C., Balancing renewable energy and river conservation: effects of hydropeaking from small hydroelectric power plants on fish stranding in small Brazilian rivers. *Aquat Ecol* (2024).
- [111] Nagrodski, A., Raby, G.D., Hasler, C.T., Taylor, M.K., Cooke, S.J., Fish stranding in freshwater systems: Sources, consequences, and mitigation, *Journal of Environmental Management*, 103, 2012, pp.133-141.
- [112] Moreira, M., Hayes, D.S., Boavida, I., Schletterer, M., Schmutz, S., Pinheiro, A.,

- Ecologically-based criteria for hydropeaking mitigation: A review, *Science of The Total Environment*, 657, 2019, 1508-1522.
- [113] Gracey, E.O., Verones, F. Impacts from hydropower production on biodiversity in an LCA framework—review and recommendations. *Int J Life Cycle Assess* 21, 412–428 (2016).
- [114] Bond, M.J., Jones, N.E., Haxton, T.J. (2016) Growth and life history patterns of a small-bodied stream fish, *Cottus cognatus*, in hydropeaking and natural rivers of northern Ontario. *River Res. Appl.*, 32, pp.721-733.
- [115] Feng, M., Zolezzi, G., Pusch, M. (2018) Effects of thermopeaking on the thermal response of alpine river systems to heatwaves. *Sci. Total Environ.*, 612, pp. 1266-1275.
- [116] Kelly, B., Smokorowski, K.E. (2017a) Power, M., Growth, condition and survival of three forage fish species exposed to two different experimental hydropeaking regimes in a regulated river. *River Res. Appl.*, 33, pp.50-62.
- [117] Addo, L., Hajiesmaeili, M., Piccolo, J.J., Watz, J. (2022) Growth and mortality of sympatric Atlantic salmon and brown trout fry in fluctuating and stable flows, *Ecology of Freshwater Fish*, 32, 282–290. <https://doi.org/10.1111/eff.12685>
- [118] Česonienė, L., Dapkienė, M., Punys, P. (2021) Assessment of the Impact of Small Hydropower Plants on the Ecological Status Indicators of Water Bodies: A Case Study in Lithuania. *Water*, 13, 433.
- [119] Earley, L.A., Sammons, S.M. (2018) Effects of hydropeaking operations on the growth of Alabama bass *Micropterus henshalli* and redeye bass *Micropterus coosae* in the Tallapoosa River, Alabama, USA. *River Res. Appl.*, 34, pp. 918-926.
- [120] Hajiesmaeili, M., Addo, L., Watz, J., Railsback, S.F., Piccolo, J.J. (2023) Individual-based modelling of hydropeaking effects on brown trout and Atlantic salmon in a regulated river. *River Res. Appl.*, 39, pp. 522-537.
- [121] Enders, E.C., Watkinson, D.A., Ghamry, H., Mills, K.H., Franzin, W.G. (2017) Fish age and size distributions and species composition in a large, hydropeaking Prairie River. *River Res. Appl.*, 33, pp.1246-1256.
- [122] Flodmark, L.E.W., Forseth, T., L'Abée-Lund, J.H., Vøllestad, L.A. (2006) Behaviour and growth of juvenile brown trout exposed to fluctuating flow. *Ecol. Freshw. Fish*, 15, pp.57-65.
- [123] Oliveira, I.C., Alexandre, C.M., Quintella, B.R., Almeida, P.R. (202) Impact of flow regulation for hydroelectric production in the movement patterns, growth and condition of a potamodromous fish species. *Ecohydrology*. 13:e2250.
- [124] Kelly, B., Smokorowski, K.E., Power, M. (2017b) Impact of river regulation and hydropeaking on the growth, condition and field metabolism of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*). *Ecol. Freshw. Fish*, 26, pp.666-675.
- [125] Rocaspana, R., Aparicio, E., Palau-Ibars, A., Guillem, R., Alcaraz, C. (2019)

- Hydropeaking effects on movement patterns of brown trout (*Salmo trutta* L.). *River Res. Appl.*, 35, pp.646-655.
- [126] Puffer, M., Berg, O.K., Huusko, A., Vehanen, T., Einum, S. (2017) Effects of intra- and interspecific competition and hydropeaking on growth of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Ecol. Freshw. Fish*, 26, pp.99-107.
- [127] Alexandre, C.M., Almeida, P.R., Neves, T., Mateus, C.S., Costa, J.L., Quintella, B.R. (2016) Effects of flow regulation on the movement patterns and habitat use of a potamodromous cyprinid species. *Ecohydrology*, 9, pp.326-340.
- [128] Puffer, M., Berg, O.K., Huusko, A., Vehanen, T., Einum, S. (2015) Seasonal effects of hydropeaking on growth, energetics and movement of juvenile Atlantic Salmon (*Salmo Salar*). *River Res. Appl.*, 31, pp.1101-1108
- [129] Rocaspana, R., Aparicio, E., Vinyoles, D., Palau, A. (2016a) Effects of pulsed discharges from a hydropower station on summer diel feeding activity and diet of brown trout (*Salmo trutta* Linnaeus, 1758) in an Iberian stream. *J. Appl. Ichthyol.*, 32, pp.190-197.
- [130] Hayes, D.S., Lautsch, E., Unfer, G., Greimel, F., Zeiringer, B., Höller, N., Schmutz, S. Response of European grayling, *Thymallus thymallus*, to multiple stressors in hydropeaking rivers. *J. Environ. Manag.*, 292, 10.1016/j.jenvman.2021.112737.
- [131] Schmutz, S., Bakken, T.H., Friedrich, T., Greimel, F., Harby, A., Jungwirth, M., Melcher, A., Unfer, G., Zeiringer, B. (2015) Response of fish communities to hydrological and morphological alterations in hydropeaking rivers of Austria. *River Res. Appl.*, 31, pp.919-930.
- [132] Boavida, I., Santos, J.M., Ferreira, T. Pinheiro, A. (2015) Barbel habitat alterations due to hydropeaking. *J. Hydro Environ. Res.*, 9, pp.237-247. 10.1016/j.jher.2014.07.009.
- [133] Enders, E.C., Watkinson, D.A., Ghamry, H., Mills, K.H., Franzin, W.G. (2017) Fish age and size distributions and species composition in a large, hydropeaking Prairie River. *River Res. Appl.*, 33, pp.1246-1256.
- [134] Kashiwagi, M.T., Miranda, L.E. (2009) Influence of small impoundments on habitat and fish communities in headwater streams. *SPIE* (2009)
- [135] Vehanen, T., Jurvelius, J., Lahti, M. (2005) Habitat utilisation by fish community in a short-term regulated river reservoir. *Hydrobiologia*, 545, pp.257-270. 10.1007/s10750-005-3318-z
- [136] Pragana, I., Boavida, I., Cortes, R. Pinheiro, A. (2017) Hydropower plant operation scenarios to improve brown trout habitat. *River Res. Appl.*, 33, pp.364-376. 10.1002/rra.3102
- [137] Antonetti, M., Hoppler, L., Tonolla, D., Vanzo, D., Schmid, M., Doering, M. (2022) Integrating two-dimensional water temperature simulations into a fish habitat model to improve hydro- and thermopeaking impact assessment. *River Res. Appl.* 10.1002/rra.4043.

- [138] Choi, B., Choi, S.U. (2018) Impacts of hydropeaking and thermopeaking on the downstream habitat in the Dal River, Korea. *Ecol. Inform.*, 43, pp.1-11.
- [139] Costea, G., Pusch, M.T., Bănăduc, D., Cosmoiu, D., Curtean-Bănăduc, A. (2021) A review of hydropower plants in Romania: Distribution, current knowledge, and their effects on fish in headwater streams, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111003.
- [140] Jelovica, B. Marttila, H. Bin Ashraf, F. Kløve, B. Torabi Haghghi, A. A probability-based model to quantify the impact of hydropeaking on habitat suitability in rivers. *River Research and Applications*, John Wiley and Sons Ltd., 10.1002/rra.4050.
- [141] Hedger, R.D., Sauterleute, J., Sundt-Hansen, L.E., Forseth, T., Ugedal, O., Diserud, O.H., Bakken, T.H. (2018) Modelling the effect of hydropeaking-induced stranding mortality on Atlantic salmon population abundance. *Ecohydrology*, 11, 10.1002/eco.1960.
- [142] Le Coarer, Y., Lizée, M.H., Beche, L., Logez, M. (2022) Horizontal ramping rate framework to quantify hydropeaking stranding risk for fish. *River Research and Applications*, John Wiley and Sons Ltd., 10.1002/rra.4087.
- [143] Auer, S., Hayes, D.S., Führer, S., Zeiringer, B., Schmutz, S. (2022) Effects of cold and warm thermopeaking on drift and stranding of juvenile European grayling (*Thymallus thymallus*). *River Research and Applications*, John Wiley and Sons Ltd., 10.1002/rra.4077.
- [144] Glowa, S.E., Watkinson, D.A., Jardine, T.D., Enders, E.C. (2022) Evaluating the risk of fish stranding due to hydropeaking in a large continental river. *River Res. Appl.*, 10.1002/rra.4083.
- [145] Pander, J., Nagel, C., Geist, J. (2022a) Effects of a hydropower-related temporary stream dewatering on fish community composition and development: from ecology to policy. *Front. Environ. Sci.*, 10, 10.3389/fenvs.2022.929746.
- [146] Auer, S., Zeiringer, B., Führer, S., Tonolla, D., Schmutz, S. (2017) Effects of river bank heterogeneity and time of day on drift and stranding of juvenile European grayling (*Thymallus thymallus* L.) caused by hydropeaking. *Sci. Total Environ.*, 575, pp.1515-1521.
- [147] Rocaspana, R., Aparicio, E., Alcazar, J., Palau A. (2016b) Effects of hydropeaking flows on the mobility pattern of brown trout (*Salmo trutta*) related to the spawning season in a pyrenean stream. 11th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2016).
- [148] Bakken, T.H., King, T., Alfredsen, K. (2016) Simulation of river water temperatures during various hydro-peaking regimes. *J. Appl. Water Eng. Res.*, 4, pp.31-43. 10.1080/23249676.2016.1181578
- [149] Bartoň, D. Bretón, F., Blabolil, P., Souza, A.T., Vejřík, L., Sajdlová, Z., Kolařík, T., Kubečka, J., Šmejkal, M. (2021) Effects of hydropeaking on the attached eggs of a rheophilic cyprinid species. *Ecohydrology*, 14, 10.1002/eco.2280.
- [150] Pander, J., Casas-Mulet, R., Geist, J. (2022) Hydropeaking impairs upstream salmonid spawning habitats in a restored Danube tributary. *River Research and*

Applications, John Wiley and Sons Ltd., 10.1002/rra.3953.

- [151] Vollset, K.W., Skoglund, H., Wiers, T., Barlaup, B.T. (2016) Effects of hydropeaking on the spawning behaviour of Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*. *J. Fish Biol.*, 88, pp.2236-2250. 10.1111/jfb.12985
- [152] Hauer, C., Holzapfel, P., Leitner, P., Graf, W. (2017) Longitudinal assessment of hydropeaking impacts on various scales for an improved process understanding and the design of mitigation measures. *Sci. Total Environ.*, 575, pp.1503-1514. 10.1016/j.scitotenv.2016.10.031
- [153] Bartoň, D., Brabec, M., Sajdlová, Z., Souza, A.T., Duras, J., Kortan, D., Blabolil, P., Vejřík, L., Kubečka, J., Šmejkal, M. (2022) Hydropeaking causes spatial shifts in a reproducing rheophilic fish. *Sci. Total Environ.*, 806, 10.1016/j.scitotenv.2021.150649.
- [154] Burman, A.J., Hedger, R.D., Hellström, J.G.I., Andersson, A.G., Sundt-Hansen, L.E. (2021) Modelling the downstream longitudinal effects of frequent hydropeaking on the spawning potential and stranding susceptibility of salmonids. *Sci. Total Environ.*, 796, 10.1016/j.scitotenv.2021.148999.
- [155] Cérèghino, R., Boutet, T., Lavandier, P. (1997) Abundance, biomass, life history and growth of six Trichoptera species under natural and hydropeaking conditions with hypolimnetic releases in a Pyrenean stream. *Arch. Hydrobiol.*, 138, pp.307-328.
- [156] Lauters, F., Lavandier, P., Lim, P., Sabaton, C., Belaud, A. Influence of hydropeaking on invertebrates and their relationship with fish feeding habits in a Pyrenean River. *Regul. Rivers Res. Manag.*, 12, pp.563-573.
- [157] Leitner, P., Hauer, C., Graf, W. (2017) Habitat use and tolerance levels of macroinvertebrates concerning hydraulic stress in hydropeaking rivers – a case study at the Ziller River in Austria. *Sci. Total Environ.*, 575, pp. 112-118.
- [158] Valentin, S., Wasson, J.G., Philippe, M. (1995) Effects of hydropower peaking on epilithon and invertebrate community trophic structure. *Regul. Rivers Res. Manag.*, 10, pp. 105-119.
- [159] Abernethy, E.F., Muehlbauer, J.D., Kennedy, T.A., Tonkin, J.D., Van Driesche, R., Lytle, D.A. (2021) Hydropeaking intensity and dam proximity limit aquatic invertebrate diversity in the Colorado River Basin. *Ecosphere*, 12(6):e03559.
- [160] Elgueta, A., Górski, K., Thoms, M., Fierro, P., Toledo, B., Manosalva, A., Habit, E. (2021) Interplay of geomorphology and hydrology drives macroinvertebrate assemblage responses to hydropeaking *Sci. Total Environ.*, 768, 10.1016/j.scitotenv.2020.144262.
- [161] Castro, D.M.P., Hughes, R.M., Callisto, M. (2013) Effects of flow fluctuations on the daily and seasonal drift of invertebrates in a tropical river. *Ann. Limnol.*, 49, pp. 169-177, 10.1051/limn/2013051.
- [162] Mihalicz, J.E., Jardine, T.D., Baulch, H.M., Phillips, I.D. (2019) Seasonal effects of a hydropeaking dam on a downstream benthic macroinvertebrate community, *River Res.*

- Appl., 35, pp.714-724. 10.1002/rra.3434.
- [163] Ruhi, A., Dong, X., McDaniel, C.H., Batzer, D.P., Sabo, J.L. Detrimental effects of a novel flow regime on the functional trajectory of an aquatic invertebrate metacommunity. *Glob. Chang. Biol.*, 24, pp.3749-3765. 10.1111/gcb.14133
- [164] Schneider, M., Kopecki, I., Tuhtan, J., Sauterleute, J.F., Zinke, P., Bakken, T.H., Zakowski, T., Merigoux, S. (2017) A fuzzy rule-based model for the assessment of macrobenthic habitats under hydropeaking impact *River Res. Appl.*, 33, pp.377-387.
- [165] Vanzo, D., Zolezzi, G., Siviglia, A. (2016) Eco-hydraulic modelling of the interactions between hydropeaking and river morphology. *Ecohydrology*, 9, pp. 421-437.
- [166] Bruno, M.C., Maiolini, B., Carolli, M., Silveri, L. (2010) Short time-scale impacts of hydropeaking on benthic invertebrates in an Alpine stream (Trentino, Italy). *Limnologica*, 40, pp. 281-290. 10.1016/j.limno.2009.11.012
- [167] Schülting, L., Dossi, F., Graf, W., Tonolla, D. Flow amplitude or up-ramping rate? Quantifying single and combined effects on macroinvertebrate drift during hydropeaking simulations, considering sensitive traits. *River Res. Appl.*, 39, pp. 412-426.
- [168] Timusk, E.R., Smokorowski, K.E., Jones, N.E. (2016) An experimental test of sub-hourly changes in macroinvertebrate drift density associated with hydropeaking in a regulated river. *J. Freshw. Ecol.*, 31, pp.555-570.
- [169] Tonolla, D., Dossi, F., Kastenhofer, O., Doering, M., Hauer, C., Graf, W., Schülting, L. (2022) Effects of hydropeaking on drift, stranding and community composition of macroinvertebrates: a field experimental approach in three regulated Swiss rivers, *River Research and Applications*, 39(3), 427–443.
- [170] Bakken, T.H., King, T., Alfredsen, K. (2016) Simulation of river water temperatures during various hydro-peaking regimes, *J. Appl. Water Eng. Res.*, 4, pp.31-43.
- [171] Casas-Mulet, R., Saltveit, S.J., Alfredsen, K.T. (2016) Hydrological and thermal effects of hydropeaking on early life stages of salmonids: A modelling approach for implementing mitigation strategies. *Sci Total Environ.* 573, pp.1660-1672.
- [172] Schülting, L., Feld, C.K., Graf, W. (2016) Effects of hydro- and thermopeaking on benthic macroinvertebrate drift. *Sci Total Environ.* 573, pp.1472-1480. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.022.
- [173] Béjar, M., Vericat, D., Batalla, R.J., Gibbins, C.N. (2018) Variation in flow and suspended sediment transport in a montane river affected by hydropeaking and instream mining, *Geomorphology*, 310, pp.69-83.
- [174] Vericat, D., Ville, F., Palau-Ibars, A., Batalla, R.J. (2020) Effects of Hydropeaking on Bed Mobility: Evidence from a Pyrenean River. *Water*, 12, 178. <https://doi.org/10.3390/w12010178>
- [175] Trung, L.D., Duc, N.A., Nguyen, L.T., Thai, T.H., Khan, A., Rautenstrauch, K., Schmidt, C.(2018) Assessing cumulative impacts of the proposed lower Mekong Basin

- hydropower cascade on the Mekong River floodplains and Delta – overview of integrated modeling methods and results, *J. Hydrol. (Amst.)*, 581, 10.1016/j.jhydrol.2018.01.029.
- [176] Calamita, E., Siviglia, A., Gettel, G.M., Franca, M.J., Winton, R.S., Teodoru, C.R., Schmid, M., Wehrli, B. (2021) Unaccounted CO₂ leaks downstream of a large tropical hydroelectric reservoir. *Proc Natl Acad Sci USA*, 118, e2026004118.
- [177] Pulg, U., Vollset, K.W., Velle, G., Stranzl, S. (2016) First observations of saturopeaking: characteristics and implications. *Sci. Total Environ.*, 573, pp.1615-1621. 10.1016/j.scitotenv.2016.09.143
- [178] Lumsdon, A.E., Artamonov, I., Bruno, M.C., Righetti, M., Tockner, K., Tonolla, D., Zarfl, C. (2018) Soundpeaking – hydropeaking induced changes in river soundscapes. *River Res. Appl.*, 34, pp. 3-12. 10.1002/rra.3229"
- [179] Grizzetti, B., Lanzaova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., Cardoso, A.C. (2016) Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environ Sci Pol*, 61, pp. 194-203.
- [180] Pisaturo, G.R., Righetti, M., Castellana, C., Larcher, M., Menapace, A., Premstaller, G. (2019) A procedure for human safety assessment during hydropeaking events. *Sci. Total Environ.*, 661, pp. 294-305.
- [181] Carolli, M., Zolezzi, G., Geneletti, D., Siviglia, A., Carolli, F., Cainelli, O. (2017a) Modelling white-water rafting suitability in a hydropower regulated Alpine. *River Sci. Total Environ.*, 579, pp.1035-1049. 10.1016/j.scitotenv.2016.11.049
- [182] Carolli, M., Geneletti, D., Zolezzi, G. (2017b) Assessing the impacts of water abstractions on river ecosystem services: an eco-hydraulic modelling approach, *Environmental Impact Assessment Review*, 63, pp.136-146.
- [183] Ruokamo, E., Juutinen, A., Ashraf, F.B., Haghghi, A.T., Hellsten, S., Huuki, H., Karhinen, S., Kopsakangas-Savolainen, M., Marttila, H., Pongracz, E., Romakkaniemi, A., Vermaat, J.E. (2024) Estimating the economic value of hydropeaking externalities in regulated rivers, *Applied Energy*, 353, Part A, 122055.
- [184] Greimel, F. et al. (2018). Hydropeaking Impacts and Mitigation. In: Schmutz, S., Sendzimir, J. (eds) *Riverine Ecosystem Management. Aquatic Ecology Series*, 8. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_5
- [185] Schillinger, M., Weigt, H., Hirsch, P. E. (2020) Environmental flows or economic woes- Hydropower under global energy market changes. *PLoS One*, 15(8), e0236730. doi: 10.1371/journal.pone.0236730.
- [186] Greimel, F., Grün, B., Hayes, D. S., Höller, N., Haider, J., Zeiringer, B., Holzapfel, P., Hauer, C., Schmutz, S. (2023) PeakTrace: Routing of hydropeaking waves using multiple hydrographs—A novel approach. *River Research and Applications*, 39(3), 326–339.
- [187] Halleraker, J. H., Kenawi, M. S., L'Abée-Lund, J. H., Bakken, T. H., Alfredsen, K. (2022) Assessment of flow ramping in water bodies impacted by hydropower operation in

- Norway - Is hydropower with environmental restrictions more sustainable? *Sci Total Environ.* 832:154776. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154776.
- [188] Hayes, D., Moreira, M., Boavida, I., Haslauer, M., Unfer, G., Zeiringer, B., Greimel, F., Auer, S., Ferreira, T., Schmutz, S. (2019) Establishing seasonal flow rules to mitigate adverse hydropeaking impacts on salmonid fish, *Geophysical Research Abstracts*. 21, EGU2019-19155.
- [189] Jones, N. E., Petreman, I. C. (2015) Environmental Influences on Fish Migration in a Hydropeaking River. *River Res. Applic.*, 31: 1109–1118. doi: 10.1002/rra.2810.
- [190] Casas-Mulet, R., Saltveit, S.J., Alfredsen, K.T. (2016) Hydrological and thermal effects of hydropeaking on early life stages of salmonids: a modelling approach for implementing mitigation strategies. *Sci. Total Environ.*, 573, pp.1660-1672. 10.1016/j.scitotenv.2016.09.208
- [191] Simonov, E.A., Nikitina, O.I., Egidarev, E.G. (2019) Freshwater Ecosystems versus Hydropower Development: Environmental Assessments and Conservation Measures in the Transboundary Amur River Basin. *Water*. 11, 1570. <https://doi.org/10.3390/w11081570>
- [192] Irvine, R.L., Oussoren, T., Baxter, J.S., Schmidt, D.C. (2009) The effects of flow reduction rates on fish stranding in British Columbia, Canada. *River Research and Application*, 25, pp. 405-415.
- [193] Reindl, R., Neuner, J., Schletterer, M. (2023) Increased hydropower production and hydropeaking mitigation along the Upper Inn River (Tyrol, Austria) with a combination of buffer reservoirs, diversion hydropower plants and retention basins. *River Research and Applications*, 39(3), 602–609. <https://doi.org/10.1002/rra.4052>
- [194] Mchayk, A., Marttila, H., Klöve, B., Haghighi, T. A. (2024). Hydropeaking mitigation with re-regulation reservoirs. *River Research and Applications*, 40(7), 1286–1295. <https://doi.org/10.1002/rra.4290>
- [195] Bruder, A., Tonolla, D., Schweizer, S.P., Vollenweider, S., Langhans, S.D., Wüest, A., A conceptual framework for hydropeaking mitigation, *Science of The Total Environment*, 568, 2016, pp.1204-1212.
- [196] Halleraker, J. H., Natvik, E. V., Vaskinn, K., L'Abée-Lund, J. H., Alfredsen, K. (2023) By-pass valves in hydropower plants: An ecologically important measure to mitigate stranding in rivers due to emergency turbine flow shutdown. *River Research and Applications*, 39(3), 588–601.
- [197] Anindito, Y., Haas, J., Olivares, M., Nowak, W., Kern, J. (2019) A new solution to mitigate hydropeaking? Batteries versus re-regulation reservoirs, *Journal of Cleaner Production*, 210, pp.477-489.
- [198] Höfkes, G.F., Evers, F.M., Hohermuth, B., Boes, R.M. (2024) Hybrid hydropeaking mitigation at storage hydropower plants combining compensation basins with battery energy storage systems (BESS), *Journal of Energy Storage*, 86, Part B, 111247.

- [199] Saberi, O., Storli P.S., Alfredsen, K. (2021) New Technology to Increase Hydropower Plant Operational Flexibility, *International Journal of Hydraulic Engineering*, 10(1): 1-7.
- [200] Tonolla, D., Bruder, A., Schweizer, S. (2017) Evaluation of mitigation measures to reduce hydropeaking impacts on river ecosystems – a case study from the Swiss Alps, *Science of The Total Environment*, 574, pp.594-604,
- [201] 新井涼允, 佐藤隆宏, 今村正裕, 豊田康嗣: 発電と治水を考慮した貯水池式水力発電の最適運用, *土木学会論文集* 79 (27), 23-27027, 2023.