

2.1.6 水力発電・海洋発電

(1) 研究開発領域の定義

再生可能エネルギー発電のうち、以下を対象とした領域である。

(1) 水力発電：水の位置エネルギーを利用した発電及び揚水。ダム式、水路式、中小水力など。

(2) 海洋発電：海流、波、潮汐、塩分濃度、海水の温度差による再生可能な運動エネルギーを利用した発電方式を対象とする。波力発電・潮流発電・海流発電・潮汐発電・海洋温度差発電・塩分濃度差発電など。

(2) キーワード

■水力発電

水力発電、中小水力、再生可能エネルギー、固定価格買取制度（FIT）、FIP制度、需給調整市場、設備更新、揚水式水力発電（揚水発電）、流入量予測

■海洋発電

海洋エネルギー利用、波力発電、潮汐発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電、塩分濃度差発電

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■水力発電

第6次エネルギー基本計画¹⁻¹⁾によれば、水力発電は天候に左右されにくく長期的に優れた安定供給性を持つエネルギー源のため、エネルギーセキュリティに貢献する貴重な純国産の電源と位置付けられている。そこで、気候変動対策を進めながら、日本のエネルギー需給構造が抱える課題の克服に向け、安全性の確保を前提に、安定供給の確保やエネルギーコストの低減に向けた取組を示す方針が掲げられた。この目標を達成するためには、十分な供給力、調整力および慣性力を維持しつつ、変動性再生可能エネルギーが拡大した系統における電力貯蔵機能の拡充が求められる背景のもと、揚水に対する期待が高まっている¹⁻²⁾。

水力発電のうち、揚水については運転コストが安く、ベースロード電源として再生可能エネルギーの導入拡大に当たって必要な調整電源として重要な役割が期待される。また、2030年の水力発電による発電電力量を過去10年（2010～2019年度）の平均81.9 TWhに対して16.5 TWh増加させる指針が示されている¹⁻³⁾。

大規模水力は、2030年までの短期間での新規開発は困難であり、他目的で利用されているダム・導水等の未利用の水力エネルギーの新規開発、デジタル技術を活用した既存発電の有効利用や高経年化した既存設備のリプレースによる発電電力量の最適化・高効率化などを進めていくことが必要である。一方、中小水力発電は、30MW未満の未開発地点は未だ約2700地点存在する。中小水力発電は、電力、環境、社会貢献の価値があり、この価値から見た水力発電の特徴は、①ライフサイクルを通じた低いCO₂排出量（中規模ダム水路式で太陽光の1/3、風力の1/2）、②エネルギー自給率の向上への寄与、③長期安定的な発電所の運用が可能、④出力変動の少ない安定的な発電が可能、⑤高い負荷追従性、⑥地域の活性化・防災・雇用創出に対する貢献などである。この特徴を考慮した支援制度と拡大のための研究開発が実施されている^{1-3)～1-7)}。

国内のみならず海外でもカーボンニュートラル「ネットゼロ」の実現に向けて、未利用水を用いた水力発電の拡大の研究や、米国の水力市場調査報告の発行等急速に発展する電力システムにおける信頼性、強靱性、再エネ他の統合に対する水力発電の貢献を目的に、これからの水力発電に対する指針を発表している。また、水力プロジェクトの持続可能性を認証するための包括的でエビデンスベースの透明性の高い方法論としての水力持続可能性基準（Hydropower Sustainability Standard）が発行された^{1-8)～1-11)}。

■海洋発電

わが国の広大な領海・排他的経済水域内に存在する海洋エネルギーを商業ベースで運用することができれば、地政学リスクに影響されない国産資源・エネルギーの確保、エネルギー自給率の向上、ひいては経済安全保障の強化につながる。海洋に存在する波浪、潮汐、潮流・海流、海洋熱、塩分濃度差等の持つ海洋エネルギーは、再生可能エネルギーの一つとして、膨大な資源量を有する。これらのエネルギーは波力発電、潮汐発電、潮流発電、海流発電、海洋温度差発電、塩分濃度差発電等として利用可能なため、次世代のエネルギー源として認識されている。現在、欧米諸外国を中心にその利用技術の開発が精力的になされ、新しい海洋エネルギー産業が勃興しつつある。日本では第3期海洋基本計画（2018～2022年度）において、波力・潮流・海流等の海洋エネルギーについて実証研究に取り組むと同時に、離島振興策と連携を図ることを推奨している。現在、海洋エネルギー利用技術に関する国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）や環境省等の大型研究プロジェクトが実施されている。

[研究開発の動向]

■水力発電

水力発電所の旺盛な更新需要に伴い最新のシミュレーションを活用した効率向上、運転範囲の拡大なども同時に実施され電力量の増加に寄与している。また、老朽化した発電所の一式更新では、運用実績を踏まえた台数の統合や水車型式の変更など全面的な機器構成の見直しも実施され、発生電力量の最大化やメンテナンス性の向上、環境リスクの低減などを目的に発電所の近代化が図られている。

◇国内

2021年の国内での水車及びポンプ水車の単機水車出力1 MW以上の新設およびランナー更新を伴う既設発電所の変更・改修向け全出荷台数は例年とほぼ同じだったが、全容量は減少して各々41台、405 MWであった。2020年に対し、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）の対象となる30 MW未満の国内改修案件の占める割合が増加した。既存発電所の変更/改修においては、FITの影響による水車一式更新が大半を占めており、流れ解析による効率、性能改善による水資源の有効利用とともに、油レスや補機レスの採用によってメンテナンス性の向上、環境リスクの低減が図られている。

展開されている需給調整市場において、水力発電、揚水発電は、高い調整能力を有する設備として研究開発が継続されている。特に揚水発電に関しては、電力系統の経済運用を主目的として、可変速揚水発電システムにより、①揚水自動周波数調整機能、②有効電力制御、③系統擾乱への応答の機能が期待され、系統安定度向上や急峻な変動負荷への対応のための開発が行われている¹⁻¹²⁾。

また、再エネ大量導入時の電力系統における揚水発電の役割を再定義しようという研究もなされており、Capacity expansion modelを用いた可変速揚水の効用¹⁻¹³⁾や、Production cost modelを用いた長時間にわたる揚水の貯蔵効果が示されている¹⁻¹⁴⁾。一方、電蓄システムとしての揚水水力発電のポテンシャルに注目し、下池として既存の多目的ダムを活用した小規模の分散した安価な新揚水発電の研究も実施されている¹⁻¹⁵⁾。既設の揚水発電所の多くは揚水入力調整のできない定速の同期電動機であるが、新規の可変速発電所建設に比べて、大規模更新に合わせて可変速化改修を行うことにより、建設費用低減、工事期間の短縮が期待できる。さらに、ダム建設に転圧コンクリート（RCC）を用いるための施工方法の研究も行われ、世界に向けて発信されている¹⁻¹⁶⁾。

◇国外

海外ではカーボンニュートラル「ネットゼロ」の実現に向けて国際エネルギー機関（IEA）や米国エネルギー省（DOE）、国際水力発電協会（IHA）、国際大ダム会議（ICOLD）、欧州エネルギー貯蔵協会（EASE）、欧州再生可能エネルギー連盟（EREF）、欧州再生可能エネルギー研究センター協会（EUREC）などがこれからの水力発電に対する考え方を発表している。中国は「第14次エネルギー開発5カ年計画（2021-2025年）」で、2060年までにカーボンニュートラルを達成することを宣言している。

IEAの報告によると、世界の既存の一般水力発電所の貯水池を合わせると1サイクル当たり1,500TWhの電気エネルギーを蓄えることができ、これは世界で稼働している揚水発電所の電力貯蔵量の約170倍、電気自動車を含むすべての蓄電池容量の約2,200倍に相当し、重要な柔軟性電源であるとしている。また、老朽化した水力発電の近代化が電力供給の信頼性と柔軟性を維持するために必要であると述べている。

DOEは、その水力技術オフィス (WTPO)¹⁻⁸⁾ において、柔軟で信頼性の高い電力系統のための次世代水力発電および揚水発電システムを推進するための新技術の研究や開発、試験を可能にする活動を行っている。特にその中に設置された「HydroWIRE Initiative」¹⁻⁹⁾ においては、急速に発展する米国の電力システムにおける信頼性、強靱性、再エネ統合を可能にする活動が行われている。2022年8月にはバイデン政権より28百万ドルの研究予算が与えられ、今後ますます活動が活発になるものと思われる。

IHAは2021年9月の世界水力発電会議において、水力開発の指針となる新たな基本原則「コスタリカ宣言」を採択した。クリーンエネルギーシステムにおいては持続可能な水力発電が提供する柔軟性と調整力が不可欠であること、持続可能な水力発電とは地域社会と環境、生活、気候に継続的な利益をもたらすべきものであり地域社会に便益をもたらしていないダムや、安全性に懸念のあるダム、環境影響の有効な改善が困難なダムは撤去の可能性を検討すべきであるとまで述べている。併せて、水力持続可能性基準「Hydropower Sustainability Standard」¹⁻¹⁰⁾ が発行されている。

一次エネルギーのほとんどを水力発電でまかなっている北欧諸国やスイス、カナダのほか、西部地区で包蔵水力を期待することができる中国で研究開発が盛んである。日本では中小水力向けの研究開発が実施されており、IAHR (国際水力環境工学研究協会) やターボ機械協会、日本機械学会などの学会での個別の開発事例に加え以下の技術トピックスが発表されている。

- ・水力発電機に関して、2022年の国際大電力システム会議 (CIGRE) パリ大会では、系統の同期化力の不足に関連して、休止火力発電機による調相運転と、水力発電機のような立軸突極機の調相運転とで比較された。後者が回転子単体で慣性を持っている点と、単体始動が可能な点で優れているという指摘がなされた¹⁻¹⁷⁾。
- ・2022年グラナダで開催されたIAHR世界大会では、「From Snow to Sea」というスローガンのもと、広範囲な問題が議論された。本大会では日本の手がけたナムニエップ第一発電所の建設経緯が紹介された¹⁻¹⁸⁾。
- ・原動機に関しては、IAHR水力機械シンポジウム (2022年ノルウェー) 等で報告が行われている。ポンプ水車および専用機の負荷遮断などの過渡時での挙動解明や予測のために、模型試験装置での再現やWater to wireの運転スケールモデルを含むプラットフォーム開発が進められている。武漢大学やシュトゥットガルト大学では模型試験設備を導入している。
- ・解析や試験により非設計点での流れの安定性やランナー応力の評価が実施されており、特に確率論的なランダムな現象を伴う超部分負荷運転での評価が精力的に進められている。始動パターンや高速起動によるランナーに作用する応力の評価や、ランナーに作用する応力挙動を静止部側のセンサで予測する取り組みも進められている。
- ・運転とメンテナンスの適正化のためのデジタルツールを活用したスマート発電所支援に関する研究も近年進められている。発電量に関する予測に加え、将来的には摩耗や損耗状況も反映できるような取り組みもなされている。
- ・吸出し管をボリュートタイプとしたものや、フランシス水車ランナーの出口に軸流ランナーを設置して非設計点での旋回流れを制御するような新しい構造の水車の開発・提案されている。
- ・長い歴史のある水力発電では、従来からの研究テーマも継続・深化されている。河川環境保護の一環であるフィッシュフレンドリーに関して、主に軸流水車で魚に与える影響 (圧力、衝突、せん断、乱れなど) が実験と解析で評価されている。また、キャビテーション泡の挙動や壊食メカニズムに関する基礎的な研究や、土砂摩耗に関する実機での追跡調査が継続されている。

■海洋発電^{2-1)~2-12)}

1970年代のオイルショックを機に世界的に始まった波力発電や潮流・海流発電、潮汐発電、海洋温度差発電、塩分濃度差発電等の海洋エネルギーを利用した発電技術の開発は、2000年代からの石油価格の高騰や地球温暖化への懸念に関連して、近年世界的に盛行盛況となり、欧米各国を中心に大きな研究開発費が投じられている。現在、最も商用化が進んでいる発電方式は潮汐発電（導入量：521.5 MW）であり、導入されている海洋エネルギー利用装置のほとんどを占める。他の発電方式については賦存量が大きいことから大きな期待が寄せられているが、研究開発段階の装置が多く、商用化された発電装置は少ない。現在、多くの研究開発が実施されているのは潮流発電と波力発電である。これらの開発に積極的な欧州において、欧州委員会が潮流発電と波力発電の合計導入目標を2025年まで100 MW、2030年までに1 GW、2050年までに40 GWとしている。発電装置の開発に当たっては、実際の海での装置の性能検証も必要なことから、世界各地に実証試験海域も建設されている。これら発電装置の世界的な導入量は、新型コロナウイルス感染症の影響で2020年は大きく落ち込んだが、2021年からは回復傾向にある。

日本では、過去の海洋エネルギーに関する研究開発は波力発電に関するものがほとんどであったが、近年の世界的な海洋エネルギー利用技術開発の活発化に伴い、波力発電と潮流発電、海流発電、海洋温度差発電を対象とした大型の研究開発が実施されてきている。NEDOによる2つの大型プロジェクト（第1期：2011～2017年度、第2期：2018～2020年度）では、第1期において、事業化時に発電コスト40 円/kWh以下のシステム開発を目指した実証研究（9事業、うち4事業が最終ステージゲートを通過）と、事業化時に発電コスト20 円/kWhに資するコンポーネント等の要素技術開発（8事業）が行われた。続いて実施された第2期においては、第1期のステージゲートを通過したプロジェクトを対象に、離島での実海域長期実証研究（1事業）が実施された。また、環境省の大型プロジェクトも実施されている。

◇波力発電

波力発電は風で生じた波のエネルギーを利用して発電するため、その開発は偏西風の存在で波パワーが大きい中緯度で大陸の西側に海域を持つ欧州等が積極的である。波力発電の世界全体の導入量は2020年で700 kW、2021年で1,385 kWである。2010年から2021年までの波力発電装置の累積導入量は、24.7 MW（欧州：12.7 MW、欧州以外：12 MW）であるが、欧州の累積導入量12.7 MWの内、11.3 MWは実海域実験を伴う研究開発プロジェクトの終了後に撤去され、1.4 MWのみが稼働中とされている²⁻⁷⁾。

現在、世界で200以上の様々な形式の装置が開発中とされている。これまでに提案された波力発電装置は、①波エネルギーを空気エネルギーに変換して空気タービンを回して発電する「振動水柱型」、②波浪中で運動する物体の運動エネルギーを油圧エネルギーに変換して油圧モーター等を回転させる「可動物体型」、③波を貯水池等に越波させ、この貯水池の落差により生じた水流を用いてタービンを回転させる「越波型」の3形式に大別され、1つの形式に収斂していない。技術開発のレベルを9段階の技術成熟度レベル（TRL）を用いて表すと、現在の波力発電の技術レベルは、全体としてTRL1（装置のコンセプトの確認段階）～TRL7（単一実機スケールの実海域実験段階）とされているが、僅かながら商用化された装置も現れている。

海外で商用化された装置としては、防波堤に振動水柱型装置を組み込んだスペインのMutriku波力発電装置（296 kW：高さ3.2 m、幅4 mの空気室が16室、18.5 kWのWellsタービンを16基、2011年に完成）や、米国のOcean Power Technologies社が海洋構造物の監視用センサーの電源としての使用を目的に開発した2つのブイの鉛直相対運動を利用して発電する3 kW装置（PowerBuoy）がある。実海域実験終了後も継続して稼働している装置として、韓国のチェジュ島の沿岸固定式装置（500 kW、2017年に完成）などがある。

近年、実海域で発電実験を行った海外の装置としては、Wave Swell Energy社（オーストラリア）が、タスマニア州のキング島周辺海域で実験を行った固定式の振動水柱型装置Uniwave（200 kW）や、Welloy Oy社（スペイン）が、スペインの実海域実験施設BiMECで行った浮体式の可動物体型装置Penguin 2（600 kW、浮体内部の偏心質量を波浪で生じる船体運動により回転させ、回転軸に連結されたダイレクトドライブ

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

方式の発電機で発電)がある。また、広州エネルギー変換研究所(中国)では、ダック形状の浮体を波浪中で振り子運動させ油圧システムを用いて発電する可動物体型装置を開発し、500 kW波力発電装置 Changshanの実海域実験を萬山群島で実施した。

日本では東京大学他が、環境省の「平成30年度CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業(平成30年度～令和2年度)」として、固定式の振り子式波力発電装置(出力45 kW)の高性能化や構造物の低コスト化等を目的とした実証実験を神奈川県平塚漁港で実施した。また、東京大学他は、環境省の「令和2年度CO₂削減対策強化誘導型技術開発・実証事業(令和2年度～令和4年度)」において、防波堤に組み込んだ固定式振動水柱型波力発電装置(出力40 kW)の高効率化等を目指した実用化研究を実施中である。

◇潮流発電・海流発電・潮汐発電

潮汐発電は、上げ潮で貯水池に海水を満たし、下げ潮で貯水池の海水を海に落とす際の落差を利用するなど潮位差を利用してタービンを回して発電する。フランスのランス発電所(10 MW×24台、総出力240 MW、1967年完成)、韓国のSihawa発電所(25.4 MW×10台、総出力254 MW、2011年完成)等が継続稼働中で、技術的には商用化レベルにある。現在導入されている海洋エネルギー利用装置の出力のほとんどを占めるが、その建設には大規模な建設費が必要なことから新規建設の意欲は乏しい。

潮流発電は海峡等の潮流の早い流れを利用して発電する方式であり、水平軸プロペラ方式、鉛直軸ダリウス方式、振動翼方式、水中風方式等がある。大型装置は水平軸プロペラ方式に収斂しつつあり、この方式の技術レベルは、TRL8(実海域での複数基による初期ファーム形成段階)で商用機も現れている。潮流発電の世界全体の導入量は、2020年で865 kW、2021年で3,120 kWである。2010年から2021年までの潮流発電装置の累積導入量は、39.67 MW(欧州:30.2 MW、欧州以外:9.4 MW)であるが、欧州の累積導入量30.2 MWの内18.7 MWは実海域実験を伴う研究開発プロジェクトの終了後に撤去され、現在11.5 MWのみが稼働中とされている²⁻⁷⁾。このように、潮流発電の導入量は波力発電に比べて多いものの潮汐発電に比べると非常に少ない。

海外で商用化された装置では、英国の第1期MeyGenプロジェクトが世界最大であり、スコットランドの北海岸とストローマ島の間の海域に、1.5 MWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基(合計6 MW、2017年完成)が稼働中である。英国のNova Innovationプロジェクトでは、100 kWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基(合計400 kW、2016年完成)がShetland島海域で稼働中である。オランダでは、Eastan Scheldtにある防潮堤に250 kWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置5基(合計1.25 MW、2015年完成)が稼働中である。また、Afsluitdijk防潮堤に100 kWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置3基(合計300 kW)が建設され現在稼働中である。中国の秀山島海域に設置されたLHD Technology社の潮流発電装置(鉛直軸タービン2基:2015年に設置、水平軸型プロペラ2基:2018年に設置、合計1.7 MW)も稼働中である。

現在開発中の主な装置としては、Orbital Marine Power社(英国)の2 MW装置O2(浮体型の装置で、水平軸を持つ2枚翼システム(出力1 MW)2基(総出力2 MW)で構成)の発電実験が英国の欧州海洋エネルギーセンター(EMEC)で行われた。また、Minesto社(スウェーデン)の100 kW装置G100(潮流中で1点係留された水中風をハノ字運動させ、装置に設置されたプロペラを回転させて発電する)はデンマーク領のフェロー諸島で実験が実施され、系統にグリッドに接続された。Sustainable Marine Energy社(英国)は、水平軸3枚翼プロペラを6基備えた浮体式の420kW潮流発電装置の実海域実験をカナダ・ノバスコシア州で行った。HydroQuest社(フランス)は、海底固定式の鉛直軸型の1MW潮流発電装置(三枚翼のHタイプ2重反転型タービンを使用)の実海域実験を行った。

日本の潮流発電プロジェクトに関して、IHIは、NEDOの「海洋エネルギー発電実証等研究開発」プロジェクトにおいて水中浮遊式海流発電システム(水平軸型プロペラ方式、出力100 kW:50 kW×2基)の実海域での発電能力、設備の耐久性や経済性に関する検証を目的として、鹿児島県十島村口之島海域で実証実験を実施した。九電みらいエナジーは、環境省の「潮流発電技術実用化推進事業」として、SIMEC Atlantis

Energy社の500 kW潮流発電装置を長崎県五島市の奈留瀬戸に設置して実用化実証実験を行った。また長崎大学はタービンに大型のディフューザーを装着した浮沈式潮流発電装置を開発し、長崎県五島市の奈留瀬戸で5kW装置の実証実験を行った。

海流発電は、海流の流れを利用して発電するもので、これまで、実海域での大型装置の実験例はなかった。IHIは、NEDOの「海洋エネルギー発電実証等研究開発」プロジェクトにおいて、水中浮遊式海流発電システム（水平軸型プロペラ方式、出力100 kW：50 kW×2基）を開発し、黒潮中での発電能力、設備の耐久性や経済性に関する検証を目的として、鹿児島県十島村口之島海域で世界初の100 kW級装置の実証実験を実施した。

◇海洋温度差発電

佐賀大学は1970年代から研究開発を継続しており、数十kW級の実証研究で世界トップレベルにある。現在は、沖縄県と共に沖縄県久米島の100 kW海洋温度差発電実証試験装置を用いて2段ランキンサイクルに関する研究の他にも、マレーシア工科大学他と海洋温度差発電と海水淡水化のハイブリッドシステムの研究や、海洋温度差発電と海水淡水化のハイブリッドシステムの研究を継続実施するとともに、商船三井他が行っているモーリシャスにおける海洋温度差発電の実証要件適合性調査NEDO事業にも参画している。また、2023年3月、商船三井、ゼネシス、佐賀大学と共同で取り組む、沖縄県久米島での海洋深層水を活用した海洋温度差発電の商用化に向けた実証事業が、環境省の令和4年度「地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業」に採択された。当該事業では、200kW発電相当分の大型・並列式チタン熱交換器の製造と性能検証等を実施し、大規模熱回収技術の確立を目指す。

米国、韓国、オランダ、フランス、中国なども、近年、研究開発を再開している。発電装置の設置方法として陸上設置型と洋上浮体型がある。現在稼働中の沖縄県久米島やハワイ（105 kW）の装置は、100 kW級の陸上設置型である。世界各所で1 MW級の洋上浮体型装置の建設計画が発表されている。韓国は太平洋のキリバス共和国に設置予定の1 MW海洋温度差プラントの予備実験を韓国近海で実施済みである。沖縄県久米島のように海洋温度差発電の早期商用展開を考え、海洋温度差発電による電力の単独利用ではなく、汲み上げた大規模海洋深層水を利用した海水淡水化と水産養殖、水素製造、リチウム等の有用金属回収を含めた複合利用（久米島モデル）が推進されている。

◇塩分濃度差発電

淡水の河川水と塩分のある海水の塩分濃度差を利用して発電を行う塩分濃度差発電には、2種類の溶液の化学ポテンシャルにおける差を利用する逆電気透析法と、化学ポテンシャルを圧力として活用する浸透圧法の2種類がある。実海域での例としては、2014年にREDstack社がオランダのAfsluitdijkに建設した、「逆電気浸透法に基づく50 kW塩分濃度差発電」のパイロットプラントが現在稼働中である。

■論文数・特許出願状況

本研究開発領域の論文動向および特許動向について「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」の「3.1.E1.6.1 水力発電・海洋発電」にて報告している。分析結果のポイントを以下に述べる。

◇水力発電

- ・論文、特許ともに増加傾向にあった。水力発電は天候に左右されにくく長期的に優れた安定供給性を持つエネルギー源であり、エネルギー安全保障面からも重要視されている事が理由の一つであると考えられる。
- ・論文数の国別推移、シェアは中国、米国が高かった。韓国、ブラジルが論文数を伸ばしており、特にインドの伸びが顕著であった。
- ・論文の国別企業共著率はフランスが首位で中国、日本が続いた。
- ・日本との論文共著率が最も高い国は米国、中国であった。

- ・総論文数、およびTop論文数は中国の大学が多く強い存在感を示した。水力発電が盛んなノルウェー、フランスの研究機関が上位に位置した。
- ・特許動向に関しては、緩やかな増加傾向から2020年を起点に急激に特許件数を増えた。国別では中国の特許件数が多く、特許価値指標であるPatent Asset Indexも高い水準にあった。

◇海洋発電

- ・論文、特許ともに増加傾向にあった。エネルギー源の多様化を目指す動きが強まるなか、膨大な潜在能力を秘めた海洋エネルギーへの関心が高まっている事が理由の一つであると考えられる。
- ・論文数の国別推移、シェアは中国、米国、英国が高かった。インドの論文数の伸びが著しく、過去3年ではオーストラリア、ドイツ、韓国の増加が際立っていた。
- ・論文の国別企業共著率は日本が首位でドイツ、フランスと続いた。
- ・日本との論文共著率が最も高い国は米国であった。
- ・総論文数、およびTop論文数は欧米の公的研究機関、大学が多かった。
- ・特許動向に関して、日本はかつて米国と共に高いレベルにあったが、2014年頃から中国の特許件数シェアが日本を上回っており、特許価値指標であるPatent Asset Indexも高い水準にあった。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■水力発電

◇既存設備の活用・改修

政府主催の既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議（2019年）では、「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針」が取りまとめられた。この中で、発電用ダムを含む利水ダムの緊急時の治水活用の方針が示された。ダムの防災操作を適切に実施するための降雨と流入量予測に関する研究も進められており、AIも活用されている¹⁻¹⁹⁾。また、多目的ダムの洪水調整容量を活かした発電量の増大など既存ダムの有効活用に関する研究も進められている¹⁻²⁰⁾。これらを受けて、国交省よりハイブリッドダム（仮称）に関するサウンディング（官民対話）が提起され、ダムを活用した「治水機能の確保・向上」「カーボンニュートラル」「地域振興」の3つの政策目標の実現が図られようとしている¹⁻²¹⁾。GX（グリーントランスフォーメーション）を通じて脱炭素、エネルギー安定供給、経済成長の3つを同時に実現するべく、日本政府は2022年12月に「GX実現に向けた基本方針」を示した。この中で、官民連携の新たな枠組みによる水力発電量の増加と地域振興を図るための制度設計（（運用高度化、資金負担ルールの検討、地域の取組と一体となった事業推進の仕組みの構築等））を推進するとしている¹⁻²²⁾。

◇実物水車の性能換算

模型水車と実物水車のレイノルズ数の違いに起因する摩擦損失の相違のため、模型試験結果から実物水車性能を求める際に性能換算式が必要となる。国内では1989年以来改訂されていなかった、JIS B 8103「水車及びポンプ水車の模型試験方法」が主に使用されてきた。その間、JSME S008-1999、IEC 60193: 1999、IEC 62097: 2009、JSME S008-2018、IEC 60193: 2019、IEC 62097: 2019など種々の規格が発行改訂されており、JIS B 8103も改訂作業が行われ、2023年に発行される見込みである。今回の改訂では、世界的な標準となっているIEC 60193: 2019を基礎としつつ、日本機械学会基準JSME S008-2018「水車及びポンプ水車の性能換算法」の換算理論に基づく性能換算法を追加することとなった。JSME S008-2018は、物理現象に立脚した理論的な厳密性を追求したことで計算手順が煩雑な側面もある。JISに採用するにあたり、実物流路の標準的な表面粗さの実物流路の影響を考慮して手順を簡略化し、実用的な性能換算法を追加した¹⁻²³⁾。

◇排砂発電

ダムへの土砂の堆積は、貯水容量の減少によるダム機能の低下を来し、貯水池式の運用が困難となり、

流れ込み式に近い運用を強いられるようになる。このため、国内外を問わず土砂堆積の著しいダムにおいては、定期的な浚渫や排砂ゲートによる排砂、バイパス流路による排砂などによって貯水容量の回復に努めている。しかし、浚渫には多大な費用を要し排砂ゲートではゲート付近の土砂しか排出できない、バイパス流路は発電利用できる水量を減少させてしまうなど、それぞれに難点がある。

近年ヨーロッパでは、発電用の水車を通して土砂を排出する可能性についての研究が始まっている。土砂水の流入による水車各部の摩耗度合いの調査、摩耗軽減のための水車設計改良の可能性検討などが課題となる。土砂を発電所の取水口へ導く方法や、土砂流入量の制御法にはいくつかの方法が考えられる。国内でも排砂発電に対する関心が高まり始めている。

■海洋発電

◇IECにおける海洋エネルギー関連の国際基準の作成²⁻¹³⁾

現在、海洋エネルギー利用の商用化装置は少ないが、将来の産業化を見据え、海洋エネルギー利用装置に関する標準化・規格化作業が、国際電気標準会議（IEC）の規格運用評議会の下でのTC114専門委員会で行われている（2007年）。IECの規格は国際規格（IS）、技術仕様書（TS）、技術報告（TR）に分類されるが、海洋エネルギー関連産業が現在立ち上がりつつあることを考慮して現在策定中の規格はTSである。波力発電、潮流発電、海洋温度差発電、河川流を利用した発電等に関連して、現資源量の評価、装置の実海域性能評価、水槽実験法、装置の設計法、電力の品質、環境評価（水中騒音）等に関する16のTSが発行され、その見直し作業が行われている。

◇洋上風力発電と波力発電や潮流発電のハイブリッド型施設

将来の大規模電源として、世界的に普及が進んでいる洋上風力発電の非常用電源として波力発電や潮流発電を用いる方法が注目され、これらの発電装置と洋上風力発電を組合せたハイブリッド装置の研究開発が進んでいる。具体的には、モノパイル形式の着床式洋上風力発電装置の水中構造部に潮流発電用の水平軸タービンを取り付けた風力・潮流ハイブリッド発電システムや、セミサブ型浮体形式の洋上風力発電装置の水中中部構造に多数の可動物体型波力発電装置を設置した風力・波力ハイブリッド発電システムなどが提案されている。波力発電装置には様々な形式が用いられている。商船三井は、英国の波力発電メーカーのBombora Wave Power社と共に、セミサブ型の浮体式洋上風力発電装置の水中中部構造に取り付けた多数のゴム膜構造体を連結し、波浪による膜の往復運動によって生じるゴム膜内の空気流によって空気タービンを回して発電する風力・波力ハイブリッド発電システムを提案している。

◇海洋エネルギー実証試験海域の整備²⁻¹⁴⁾

海洋エネルギー利用装置の開発は、以下のようにステージ3からステージ5の順に、進められる。次のステージに進むためにはステージゲートをクリアする必要がある。

- a) ステージ1：提案した構想の検証（小型模型を用いた水槽実験）
- b) ステージ2：設計評価（実機の1/25～1/10スケールの中型模型を用いた水槽実験）
- c) ステージ3：実機の1/10～1/2スケールの大型模型を用いた実海域試験
- d) ステージ4：原寸プロトタイプ（1/1スケール）の単機実海域試験
- e) ステージ5：原寸プロトタイプ（1/1スケール）の複数機配列に関する実海域試験

海洋エネルギー利用装置の商用化には上記ステージ4からステージ5に対応して、実海域試験による発電性能や構造などの安全性を確認すると共に、国際市場をリードする海洋エネルギー機器とシステム開発の拠点施設機能、研究と事業化のブリッジ機能とデモ機能、国際基準に基づいた装置の認証機能、地域開発推進のための「支援・インキュベータ施設」機能等を有する「実証試験海域」が必要である。このため、各国はそれぞれ独自の実証試験海域を保有しており、世界で57か所の実証試験海域が利用されている。このうち、英国のEMECは世界最大で波力発電と潮流発電に関する4つの試験海域（2つの試験海域は、ステージ3対応の小波高、低流速の海域）を持ち、世界中から多くの装置の実験を受け入れ、海洋エネルギー装置の認

証取得のための試験センターとしてIECから唯一認定されている。カナダのFORCEは潮流発電装置の実証試験海域で、世界中から多くの潮流発電装置の実験を行っている。日本においては、国が認定した6県7海域の実証試験海域がある。実証フィールドとしては未整備で、全ての施設が系統に連結されていないが、IHIが黒潮下での海流発電の実験を行った鹿児島県口之島沖海域、九電みらいエネジーが潮流発電実験を行った長崎県五島市久賀島沖の海域、佐賀大学他が海洋温度差発電の実験を行っている沖縄県久米島海域の3つの実証フィールドで実機スケールの実験が行われている。

◇海に蓄積された太陽熱エネルギーを電力に変換する海洋温度差発電プラットフォーム²⁻¹⁵⁾

英国Global OTEC社は、2023年11月にオーストリアで開催されたInternational Vienna Energy and Climate Forum (IVECF) で、同社が開発した商業規模の次世代海洋温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion: OTEC) プラットフォーム「Dominique」について発表した。OTECは、表層海水と深層水の両方の温度差を利用して、クリーンで持続可能なエネルギーを生成する再生可能エネルギー技術である。熱帯地方では、海面の温度は25℃前後で保持される一方、水深800m付近では、極地から流れ込む海流によって水温は4℃と20℃以上の温度差が生じる。この広大な未開拓のエネルギー源を利用することで、小島嶼開発途上国 (SIDS) や沿岸諸国が石燃料への依存を大幅に削減し、より環境に優しく持続可能な未来への道を開く可能性があるという。国連公認の国際組織SIDS DOCKに参加している32の国と地域で、今後10年間で交換が必要な設置済みディーゼル容量10GWを脱炭素化する可能性がある」と指摘している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■水力発電

・新エネルギー財団補助事業

水力発電導入促進のための各種補助制度が2016年度より開始され、2022年度以降は、①水力発電事業性評価事業、②地域共生支援事業、③調査事業、④既存設備有効活用支援事業、により水力発電の導入加速が図られている。

・HYDROPOWER-EUROPE プロジェクト¹⁻²⁴⁾ (2018年11月～2022年2月)

水力発電分野のメーカー、ユーザーなどが集まるフォーラムでの公開討論から、水力分野の研究とイノベーションのテーマ (RIA) と、産業界の戦略的なロードマップ (SIR) を作成した。RIAについては優先順位が高い5領域18テーマを掲げており、これらは、①柔軟性を増大させる水力コンセプト (分散型揚水、流れ込み揚水等)、②運用・保守の最適化、③機器や土木設備の強靱化、④新しいコンセプト (多目的ダム揚水、海水揚水等)、⑤環境への適合性を図るための解決策とされている。SIRとしては5領域13項目が挙げられており、同じく、①社会的受容性、②環境負荷軽減、③経済性確保、④規制のエネルギー転換への適合、⑤許認可の簡素化、となっている。また、水力を取り巻く諸因子 (エネルギー政策、電力市場、環境・社会、R&D、法規制、気候変動) の関係を図解した最終報告書が2022年4月に発行された。

・XFLEXHYDRO¹⁻²⁵⁾ (2019年9月～2023年8月)

XFLEXHYDROは、スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) が主導し、水力発電技術によりEUの2030年の二酸化炭素削減目標をターゲットに、安全でフレキシブルな電力システムの技術を構築する斬新なエネルギー革新プロジェクトである。スマートコントロール、革新的な可変速および定速揚水発電システム、バッテリーと水車のハイブリッドなどの新しい水力発電技術を実証する。中間報告では、3カ所のサイトでの循環水路式発電 (Hydraulic Short Circuit) の実施とそのプロセスが報告された。また、水力と電池のハイブリッド発電やスマートコントロールも、順調に試験が進行している。注目されていた5MWの一次可変速揚水発電システムは2022年の冬まで運開が延期された。また、可変速幅を無制限に拡大することができるフルサイズ周波数コンバータの適用が紹介された。運用範囲拡大に加えて機器ダメージの大幅な低減が期待でき、運用方法の自由度が向上する。

• Hydroflex¹⁻²⁶⁾（2018年5月～2022年4月）

Hydroflexはノルウェー科学技術大学が主導し水力発電の非常に高いフレキシブルな特性を活かした科学のおよび技術的ブレークスルーを目指したプロジェクトである。北欧ネットワークの主に北部において、今後の風力の増加により水力の柔軟性が求められること、また系統安定性に関しては3発電所・1500 MWの脱落事故に対しても現状の周波数制御予備力（FCR）機能により周波数低下が抑えられることが示されている。

• DOE HydroWIREs Initiative¹⁻⁹⁾

HydroWIREs Initiativeは揚水発電所の経済的効果に関して、米国で経済性の見込める揚水発電所立地点の調査、揚水発電所のバリュエーション・ハンドブックの発行、揚水に関するCapacity expansion modelの研究を行っている。技術革新としてGeomechanical pumped storageの概念や、Obermeyer Hydro社のSubmerged pump-turbineの概念を紹介している。

• 中国第14次5カ年計画

中国の「第14次エネルギー開発5カ年計画（2021～2025年）」期間中、グリーンエネルギーへの移行を加速させることが重要なテーマとして揚水を含む水力発電の基地建設を積極的に推進し、金沙江上流、亜龍江中流、黄河上流の水力発電プロジェクトを開発するとしている。

• 揚水発電所の建設計画

2022年6月に発表された「第14次5カ年計画-再生可能エネルギーの発展計画」によれば、揚水発電所は現在の68地点（建設中含む）から今後5年間で200地点を着工する計画となっている。この目標はこれまで発表された計画をはるかに上回るもので、各省（区、市）の揚水発電所のニーズを展開し全国的な揚水発電中長期計画を編成する。現在建設中の発電所を予定通りに運転開始し、さらに中長期計画に組み込まれたプロジェクトを加速させるとしている。

• 大エチオピア・ルネッサンスダムの開発

エチオピアは、スーダンとの国境に近い青ナイル川に大エチオピア・ルネッサンスダム（GERD）を建設し、2020年7月に貯水を始め2022年2月に初号機が発電運転を開始した。13台の水車・発電機が完成すると総発電量は5,150 MWに達し、アフリカ最大規模の水力発電所となる見込みである。エチオピア国内では、経済成長に伴う電力不足の解消に寄与することが期待されている。ダムの建設に対しては、計画当初から特にエジプトがナイル川下流の流量減少を懸念して強硬に反対しておりスーダンを含めた3国間での合意形成に向け、アメリカ、アフリカ連合などが仲裁を試みたものの、現在に至るまで合意には至っていない。このような状況下での一方的な発電開始に、エジプトなどは反発を強めており対立が激化する可能性がある。

■海洋発電

• 世界初の海流発電装置「かいりゅう」²⁻¹⁶⁾

IHIは、NEDOの3期に渡るプロジェクト（第1期：2011～2014年、次世代要素技術開発、第2期：2015～2017年、実証実験研究、第3期：2018～2021年、離島での実海域長期実証研究）において水中浮遊式海流発電システムを開発し、鹿児島県口之島沖の黒潮海域で100 kW規模の海流発電としては世界初となる水中浮遊式海流発電システムの実証機「かいりゅう」（全長約20 m、直径11 m、50 kWタービン2基搭載）の実海域実験を行った。1.5 m/sの曳航実験において100 kWの出力を黒潮下では最大30 kWの出力を確認した。また、発電性能だけでなく、海流特性や設置・撤去工事手法の精査等を含め、今後の実用化に向けて必要な実海域での試験データを取得している。

• 日本初の商用スケールの潮流発電装置「なるミライ」

九電みらいエナジーは、長崎県海洋産業クラスター形成推進協議会と共に環境省の潮流発電技術実用化推進事業（2019年6月～2022年3月）として、500 kW潮流発電装置「なるミライ」の実用化のための実証実験を長崎県五島市の奈留瀬戸で実施した。タービンには英国のMeyGenプロジェクトで実績のあるSIMEC Atlantis Energy社の500 kW発電機が用いられており、実証実験において500 kWの定格出力を確認

認した。得られた電力は系統連系せず陸上の負荷装置を用いて発電量を評価している。発電設備の設置工事へ自動船位保持 (DP) 船や遠隔操作型水中ロボットが活用されると共に、装置の建設・運用に関する法令も整備された。

・浮体式の潮流発電装置 O2

Orbital Marine Power 社 (英国) は、水面に浮かんだ浮体式の 2 MW 潮流発電装置 O2 を開発した。浮体の長さは 73 m で左右に張り出した水平翼にそれぞれ直径 20 m の水平軸タービン (出力 1 MW) を備えている。この装置は英国の EMEC (グリッドに接続済み) において、2021 年 7 月から発電実験を開始し、今後 15 年間で英国の約 2,000 世帯の年間電力需要を満たすものと期待されている。

(5) 科学技術的課題

■水力発電

カーボンニュートラルの実現には水力発電の大量導入や需給調整が必要であり、そのための課題を示す。

- ・ 中小水力を含む再生可能エネルギーの大量導入のボトルネックの一つは既存グリッドへの接続制限であり、地産地消の電力ネットワークを構築することが必要である。また、土木、機械の高い初期コストが課題であり、個別設計が必要な水力発電機器の標準化、シリーズ化や新しい土木施工、製造方法の構築も重要である。
- ・ ダム設備と水資源の有効活用や洪水対策については、より高度な気象予測、流入量予測が求められる。また、運転開始から 40 年以上の老朽既存設備が増えているが、これらを効率的に長寿命化し、機能を維持するためのさらなる ICT 技術や工法の発展が不可欠である。IoT、AI などのデジタル技術を活用し、機器寿命の推定や発電電力量増大、省力化を可能とする技術開発が進められている。
- ・ 運転コストパフォーマンスの向上に関しては、最新のシミュレーションなどを活用した効率向上、運転範囲拡大の研究が必要である。老朽化した発電所の一式更新では、運用実績を踏まえて台数の統合や水車型式の変更など全面的な機器構成の見直しも検討が必要である。
- ・ EU では持続可能な水力発電の高性能かつコスト競争力の維持のために、既設プラントの継続的な改修を実施する。環境負荷の小さい低落差水力発電は、有望であり研究が進められている。
- ・ 再生可能エネルギーの大量導入に伴い必要性が高まる需給調整力・再エネ電力制御への対応に関して、さらなる水力発電・揚水発電の即応性や調整力向上が必要となる¹⁻²⁷⁾。水車機器にダメージが蓄積されることからロバスト性の高い機器が望まれる。
- ・ 可変速機器の高機能化も付加価値向上に重要であり疑似慣性機能やブラックスタート機能の追加が望まれる。
- ・ 先端シミュレーションや AI を用いた水力発電技術の革新的なコンセプト・製品が望まれる。AI を用いた異常診断システムの開発も多く進められている。
- ・ 自然環境保護として魚類にやさしい Fish-friendly turbine、水中生物、特に魚類に対する水車の影響に注目した研究開発がアメリカを中心に進められている。

■海洋発電

海洋エネルギーはエネルギー密度が低く、その利用技術は他の再生可能エネルギーと比べて技術成熟度が低いため、海洋エネルギー利用装置に関して発電効率の向上、発電コストの低減、単機装置の大型化や多数の装置を配置したファーム形成によるシステムの大規模化、実海域での長期運転による耐久性や信頼性の向上 (防水、生物付着、錆等への対策)、海洋環境に及ぼす影響把握が重要な課題である。以下に各発電方式別の科学技術的課題を示す。

- ・ 波力発電については、実証実験時に大波浪が原因で装置が損傷を負うことから、装置の安全性確保が第一優先課題である。また、高効率・低コストの装置開発、多数基システム設計技術の確立などがある。

- ・潮流発電については、高効率・低コストの装置開発、多数基システム設計技術の確立、潮流の早い海域における施工法の開発、浮体型装置では、台風等の荒天時における装置の安全性の確保などがある。
- ・海流発電については、発電装置の係留技術、姿勢・水深の制御技術、陸から離れた海域での効果的な施工・メンテナンス方法の確立などがある。
- ・海洋温度差発電については、施工法を含めた深層水取水管の低コスト化、大規模発電には取水管の大口径化とその長期耐久性の確保、動揺する浮体と取水管の接続方法等が課題である。また、大規模化した場合、排出する“表層水より低温でかつ栄養分の多い深層水”の環境影響に対する考慮が必要である。
- ・塩分濃度差発電については、逆電気透析法の低膜抵抗で低製造コストのイオン交換膜の提案や河川水側の膜間隔低減、浸透圧法は浸透圧を高めるための膜の透過性能の向上や発電機の効率向上が課題である。
- ・日本周辺海域の水温は、欧州海域の水温に比べ高いため潮流発電装置のプロペラ等には多くの生物が付着して機能不全となる可能性が高い。海洋エネルギー利用装置への生物付着対策として、装置表面の塗装法等、新技術の開発が必要である。
- ・海洋エネルギー利用装置に共通する基礎的で、大学等で行う研究開発課題としては、①システムとして大幅にコスト低減が可能な海洋エネルギー変換装置の革新的システムの提案、②大電力直流送電、③沿岸・海洋を考えた場合のエネルギー貯蔵（沿岸廃坑や海底高圧タンクの利用等）、④エネルギー輸送媒体の変換効率の飛躍的向上（海上で水素を製造する等）、⑤装置を多数配置したファーム用革新的係留システムと新材料の開発（海上工事とメンテナンスコストの軽減を目的）、などがある²⁻¹⁷⁾。

（6）その他の課題

■水力発電

◇国内の揚水発電を取り巻く環境

揚水発電は再生可能エネルギーの大量導入に伴い必要性が高まる需給調整力・再エネ電力制御への対応にあたって最大限の活用が必要とされているが、揚水時の損失があることや運用コストが高いことなどの理由で稼働率が2021年で4.6%と低く、採算性が悪いことが課題となっている。また古い設備が多く、2030年までに250万kW、2050年までには2,000万kWが運転開始から60年を超えることになり、設備更新が必要な時期を迎える。設備維持・機能向上を図るためには、採算性の向上が優先課題とされており、収入拡大のための市場整備や費用削減のための運用高度化、更に新規開発の可能性の検討等を含めた支援策が検討されている^{1-15), 1-16)}。

◇国内の中小水力導入

- ・中小水力の社会的価値としては、地域が主体となった水力利用の取り組みを通じて地域社会に様々な貢献をすることができ、地域経済の活性化、地域インフラの整備、地域へのエネルギー供給、地域環境の保全・改善、地域社会の活性化、地域への定着があげられる。水力発電を単なる電源の一つとして捉えるのではなく、ヨーロッパのように総合的な地域政策の一環として水力利用を捉える考え方が水力の持つ多くの価値を多面的に生かしていくことに繋がる。
- ・初期投資が大きいという課題に対しては、助成金、補助金の継続的な利用体制の整備が必要である。
- ・水力発電を一般河川で実施する場合、煩雑な河川法、森林法、事前公園法の協議、系統連系の手続に時間がかかるため簡素化が必要である。
- ・昨今の製造技術に関する産業構造から製造の課題として、大型で一品物の鑄造産業と、これと連動した大型の3次元機械加工事業者が国内では存続しにくい環境にあり、新しい事業の形態を模索する必要がある。小型水車の部品も、現在のアディティブ・マニファクチャリングで製造可能な領域より少し大きいこと、性能、信頼性の観点から研究開発が更に必要な状況であり、技術的なブレークスルーが必要である。

◇環境に調和し地域に永続的に貢献する水力利用の技術と制度の構築¹⁻⁷⁾

水力発電は、地域の共有財産である河川水と公共空間、インフラなどを利用するため、地域の特色を生かした地域主導の水力開発事業モデルが必要である。このためには社会・環境・資源を活用するための人材の育成と活用、技術支援・財政支援の仕組みなどを含めた総合的な水力開発の事業スキームを確立する必要がある。また、水力の価値を生かすための分野横断型の協力・連携・支援も必要であり省庁や市町村等の連携による調査検討の活動資金の予算化、研究者、専門家、関係組織などが協力して課題の解決に取り組む体制の構築が重要である。

- ・ 水力の価値と開発の可能性の明確化、および国全体での共有化。
- ・ 自治体、住民、専門家、企業等が協働する事業モデル、および自治体、専門家による事業の評価や支援の体制構築。
- ・ 総合的な水力開発事業に対する低利融資、減税等の財政支援の制度、事業価値の適切な評価など民間資金の活用策の確立。
- ・ 水力利用の環境適合と信頼性を高めコストを低減するための技術開発。
- ・ 水力発電の系統の利用、既存ダム等のインフラの活用、規制の弾力運用などの制度整備。

■海洋発電

◇実証試験海域の整備

日本では現在までに、波力発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電に関する6県7海域を実証試験海域として選定済みであるが、試験海域に必須の系統連系用のケーブル敷設等のインフラはほとんど整備されていない。今後は、中心となる実証試験海域のインフラ整備を国が行い、試験筐体はベンチャーキャピタルからの資金で賄うことで、装置の開発が行われるとみられる。実用化に至る高性能な装置を早期に実現するために、国が中心となり実証試験海域のインフラ整備を速やかに進めることが重要である。

◇開発ステージにおけるリスク管理²⁻¹⁸⁾

リスク管理に関しては、技術的な面においては、①それぞれの開発ステージでの試験方法の標準化、②ステージゲートでの正しいチェック項目の選定が必要である。技術仕様書に基づいた実海域プロジェクトの評価は海外では実施されつつあるが、日本では実海域プロジェクトが少なく今後の課題である。

原寸プロトタイプの実海域試験を行うステージ4、5においては、海洋エネルギー利用技術が新しい技術であるため、実海域での大規模装置の試験や複数機配列試験や維持管理の面での不確実性が存在する。そのため、海洋エネルギー保険および保証基金を設立し、リスク（設置、運用における故障）の一部をカバーする等の方策が必要である。

社会的リスクとして対象海域を利用する漁業者の他に、将来の他の海洋利用者との衝突を防ぎ、海洋環境への影響を最小限に抑えるために関係者のコミュニケーションプロセスを整備する仕組みを設ける必要がある。漁業者への補償という考えでなく、地産地消を追及して海洋エネルギーを漁業者や地域住民にとっても役立つ「漁業協調型システム」として構築し、海域総合利用における新しい漁業展開、地域振興、生活向上の一つの要素とすることがあげられる。

(7) 国際比較

■水力発電

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	学協会が中心となり大規模シミュレーションによる水車不安定流動、キャビテーション性能の予測を実施中。電力調整市場に向けた需給予測、機器開発。 ●大規模流動解析による水車不安定流動の予測と対策。 ●最適化手法を用いた性能向上手法。 ●キャビテーションによる励振力予測、壊食量予測。 ●系統シミュレーションによる広域の電力需給予測。
	応用研究・開発	△	→	長野県飯田市、遠山川水力発電所（水路式）着工：（発電出力11,400kW、年間発電電力量は約6,100万kWh） 活発な設備更新に伴い流動解析などのシミュレーション技術を用いた性能、信頼性向上に関わる研究の実施。 ●設備更新（機種、再設計）による性能改善。 ●揚水発電所ポンプ水車の可変速化。 ●新コンセプト水車による運転範囲の拡大。
米国	基礎研究	△	→	DOEは、水力技術オフィス（WTPO） ¹⁻⁸⁾ において、柔軟で信頼性の高い電力システムのための次世代水力発電および揚水発電システムを推進するための新技術の研究開発、試験を可能にする活動を行っている。特にその中に設置された「HydroWIRES Initiative」 ¹⁻⁹⁾ においては、急速に発展する米国の電力システムにおける信頼性、強靱性、再エネ統合を可能にする活動が行われている。
	応用研究・開発	△	→	米国で経済性の見込める揚水発電所立地点の調査、揚水発電所のバリュエーション・ハンドブックの発行、揚水に関するCapacity expansion modelの研究を行っている。
欧州	基礎研究	○	↗	【EU】水力発電適用可能性の実証、環境負荷の低減を目的としたプロジェクトに注力。既設改修は既存のプラントを効率的に改造し、水力発電の持続可能性を改善。ヨーロッパ規模の資金調達プログラムHorizon 2020と、各国の状況に応じた国の資金調達機会を通じて支援。EU委員会は、前述の水力発電の可能性に焦点を当てたプロジェクト研究とイノベーションを開始した。
	応用研究・開発	○	↗	【EU】低落差プラント（15 m未満）と既設改修が開発の目玉。主な研究は、水力発電所の柔軟な運用を可能にする新技術の開発、水力発電ユニットのデジタル化、スマート制御で強化された可変速および固定速度タービンシステム、ならびにバッテリータービンハイブリッドの開発。研究トピックは次のとおり。 ●反動型タービンの流れの不安定性を緩和するための制御方法の開発。 ●小型およびマイクロ水力タービンアプリケーションの開発。 ●水中および地下の水力貯蔵のコンセプト構築。 ●小規模で魚に優しい設置による水力発電の環境フットプリントの最小化。 【スカンジナビア】 2019年に小規模プロジェクトによりノルウェーの水力発電容量は134 MW増加。スウェーデンの国営電力会社は、水力発電で200 GWhを達成、2023年までに600 MWを追加する予定。 【イギリス】揚水発電所の改修が進行中。昨年、再生可能エネルギーの取引を可能にするためにノルウェーを英国とドイツにそれぞれ相互接続するプロジェクトであるノースシーリンクとノードリンクの建設が進められている。 【フランス】新しい240 MWのペルトン水車が揚水発電所に設置され、既設改修により、サイトの容量が20%増加。 【スイス・オーストリア】国境を越えて、900 MWのナントデダンス揚水発電所で最初の水充填を達成。オーストリアを含む中央ヨーロッパ、さらに東のバルト三国などで揚水発電を拡大する計画。 【チェコ】現在、水力発電所の近代化が主な焦点となっており、国内の水力発電の約60%を開発中。隣国のスロバキアも同様。 【南東ヨーロッパ】北マケドニアでは333 MWの水力発電プロジェクトが開始。ブルガリアの240 MW プロジェクト、セルビアの1,056 MWおよび96 MW（計画125 MW）などの近代化プログラムも進行中。

				【トルコ】 水力発電容量が145 MW増加し、2019年末には国全体の容量の31%を達成。1,200 MWの水力発電所も国内4番目の規模で建設中。 【オーストリア】 排砂発電の実証実験が始まろうとしている。
中国	基礎研究	○	↗	今後30年間、「西から東への送電」戦略を推進。2017年の本戦略の規模は8,452万 kW、2020年には1億1,792万 kWに達する。水力発電政策は以下。 ●水力発電設備の運転範囲拡大とインテリジェント化。 ●複雑な地質条件下での超高圧水力発電装置の開発。
	応用研究・開発	◎	↗	2020年時点で、中国の水力発電容量は1億3500万 kWh、設備容量は3億7000万 kW、発電設備容量全体の17%である。揚水発電所の設備容量で世界第1位。2021年12月末現在、揚水発電所の設備容量は3,639万 kW、建設中の発電所は3,429万 kWに達する。中国のエネルギー貯蔵設置容量の86.3%を占めている。今後5ヵ年で200地点、2.7億 kWの着工を目標としている。以下大規模水力と揚水発電技術（高落差ポンプ水車）の開発に注力。 ●可変速揚水発電、海水揚水発電。 ●老朽化した水力発電装置の容量アップと効率化。 ●白鶴灘水力発電所（四川省・雲南省）、世界最大の水力発電プロジェクト、総設備容量は1,600万 kW（100万 kW16基）で2021年7月運用。 ●田湾河水力発電所（四川省）中国産ランナー（最大出力150MW級大型衝動水車ランナー）採用の水力発電機が稼働。 ●揚水発電所の性能、信頼性などの主要技術、運転条件転換に関する研究。 ●デジタル技術についても積極的に実機適用を進めている。 ●可変速機、高揚程大容量機などの開発・製造の国内比率増加。 ●揚水発電の展開と、風力発電と太陽光発電の統合の推進。 ●インテリジェントな水力発電所の開発・管理。 ●水力発電の計画・開発・管理プロセス全体を通じた、持続可能な開発と生態系優先の原則を堅持し、生態系、魚類個体数増加、河川生態系の安定性改善。
韓国	基礎研究	△	→	従来の海外依存技術の脱却のため政府主導で開発を推進。韓国エネルギー公団、韓国エネルギー技術評価院、国土交通科学技術振興院などが中大容量、小水力水車の開発、揚水発電所の活用を進めている。
	応用研究・開発	○	↗	政府主導プロジェクトを韓国流体機械学会が受け皿となり、小水力発電用水車と中・大水力発電用水車の基礎、実用化研究および模型水車性能試験を実施。19年6月、KHNPは第8次電力需給基本計画に従って、2031年までに2 GWまでの新規揚水発電所建設が推進される予定。
カナダ	基礎研究	△	→	●ダムや貯水池が不要な低落差水力タービンの開発が進められている。 ●Canada Energy Regulator（CER）によると、水力発電は2017年から2040年にかけて14%増加する予定。2040年までに、カナダの再生可能エネルギーと原子力エネルギーのシェアは81%から83%に増加する。
	応用研究・開発	△	→	カナダでの研究開発は、流れ込み式水力発電所向けに注力されている。

■海洋発電

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	●第3期（2018年度から5年間）の海洋基本計画において、波力・潮流・海流等の海洋エネルギーに関しては、実証研究に取り組みつつ、離島振興策と連携を図ることが謳われている。 ●海洋温度差発電：佐賀大学は、1973年から現在まで、発電システムや熱交換器に関する世界トップレベルの研究を継続実施し、マレーシアと海洋温度差発電と海水淡水化のハイブリッドシステムに関する基礎的な研究も継続実施中。 ●波力発電：佐賀大学、日本大学で固定式、浮体式振動水柱型装置の研究や世界をリードしている空気タービンの開発を継続実施中。佐賀大学・松江高専は、谷口商会と共に、セイルウイング型の空気タービンを搭載した新型のスパーク型浮体式振動水柱型波力発電装置を開発中である。 ●潮流・海流発電：長崎大学は、タービンに大型のディフューザーを装着した浮沈式潮流発電装置を開発し、長崎県五島市の奈留瀬戸で5 kW装置の実証実験を実施した。
	応用研究・開発	◎	→	●海洋温度差発電：佐賀大学を中心に、沖縄県久米島の100 kWプラントを用いて、2段ランキンサイクルシステムの実証試験を継続実施中。このプロジェクトに商船三井が新規参加した。 ●波力発電：東京大学が神奈川県平塚市で、固定型の45 kW振り子式装置の実証実験を実施した。東京大学他が、防波堤に組み込んだ固定式振動水柱型波力発電装置（出力40 kW）の実用化研究を実施中である。 ●潮流・海流発電：NEDOプロジェクトで、IHIが、鹿児島県口之島沖の海域において、水中浮体式海流発電100 kW装置の実証実験を実施した。九電みらいエナジーが長崎県五島市の奈留瀬戸で500 kW潮流発電装置の実証実験を行った。 ●塩分濃度差発電：福岡市東区の海水淡水化センターで、海水と淡水の塩分濃度の差を利用して発電する「浸透圧発電」の導入を発表。年間発電量は約88万 kWh で一般家庭約300戸分の使用量に相当。実用化できれば全国初となる見通し。 ●政府は、海洋再生エネルギー利用装置の実海域性能を評価するための実証フィールド7海域を選定した。系統連携は未接続。
米国	基礎研究	◎	↗	●25大学と6国立研究所が、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電等の海洋エネルギー利用に関する研究を実施しており、約40の実験施設がある。研究分野は、装置の性能評価に関する実験や数値解析、power take-offシステム、制御システム等である。特に、National Renewable Energy Laboratory (NREL) と Sandia National Laboratories (SNL) は波力発電の性能解析のための作成した計算コードを公開している。
	応用研究・開発	◎	↗	●波力発電、潮流発電、海洋温度差発電に関する13の実証実験サイトがあり、各種実験を実施中である。Verdant Power社は直径3 mプロペラを持つ潮流発電装置3基の実験をニューヨークのイースト川で継続して実施中である。Ocean Energy社は500 kW浮体式振動水柱型波力発電装置の実験をハワイ沖で準備中。CalWave Power Technologies社は可動物体型波力発電装置 CalWave x1の実験をサンディエゴ沖で実施中である。OPT社は、海域のモニタリングを目的とした3 kWの可動物体型波力発電装置を製品化している。 ●ハワイ州立自然エネルギー研究所の105 kW海洋温度差発電プラントは、継続稼働中である。

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

欧州	基礎研究	◎	↗	【EU】 ●欧州委員会では、海洋エネルギー分野でリーダーシップをとることを目的に、政策を策定済み。海洋エネルギー関係で、2025年までに100 MW、2030年までに1 GW、2050年までに40 GWの導入を目指している。このために、基礎研究に関する公的研究ファンドを加盟国に配分している。 【ドイツ】 ●2030年までに、20 GWの洋上風力発電の導入目標としているが、海洋エネルギーの導入目標は無い。 ●約15の大学や研究所が波力発電や潮流発電の研究を行っている。 【フランス】 ●2050年までに、海洋エネルギー関係で3 GWの導入を目標としている。 ●潮流発電を中心に研究開発を実施中。EEL Energy社は、弾性振動板を利用した新形式潮流発電装置（1 MW）を開発中である。SMB Offshore社は、電気活性ポリマーを多数連結した波力発電装置を開発中である。 ●インド洋にあるフランス領Reunion島で海洋温度差発電に関する基礎研究を継続して実施中。 【英国】 ●英国は欧州の中でも波浪・潮流のエネルギー資源量が豊富なため、海洋エネルギー利用に積極的である。特に、スコットランド政府は、波力発電、潮流発電に関する世界のリーダーを目指し、大きな研究開発費を投じている。 ●英国クイーンズ大学やエディンバラ大学では、波力発電に関する基礎研究が盛んであり、各種の振動水柱型装置、可動物体型装置（ダック型、海底ヒンジ支持の振り子型等）を提案している。 【ポルトガル】 ●波力発電を中心とした研究開発を実施している。リスボン大学は、振動水柱型装置を中心に、ウェルズタービンや衝動タービンのような空気タービンの研究で世界をリードしている。 ●浮体式の洋上風力発電と波力発電のハイブリッド型装置に関する多くの研究プロジェクトを実施している。 【スペイン】 ●欧州委員会の公的ファンドHorizon2020等を利用して、国立の研究機関や大学で波力発電を中心とした基礎研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 ●欧州委員会では、海洋再生エネルギーの研究・開発に関する公的ファンド（Horizon2020）を加盟国に配分している（2020年：3件、2021年：3件）。波力エネルギーの大規模な商業化を目指す「WEDUSEA」プロジェクトが開始。同プロジェクトには、イギリス、アイルランド、フランス、ドイツ、スペインから、産学横断で14のパートナーが参画。資金面ではEUのHorizon Europeプログラム、英国のInnovate UKといったイノベーション支援機関の協力を受ける²⁻¹⁹⁾。 【ドイツ】 ●Schottel Hydro社は、潮流発電用のタービンメーカーで、浮体式潮流発電装置PLAT-I（280 kW）等に応用している。SKF社はドライブレインの専門メーカーで、浮体式潮流発電装置O2に1 MW装置2機を提供している。 ●可動物体型波力発電に関するNEMOSプロジェクト（200 kW）の実験を行っている。 【フランス】 ●240 MWのランス潮汐発電所は、1967年から継続して稼働中である。 ●Sabella潮流発電装置（1 MW）は2015年から1年間グリッド接続の実績があるが、現在、新規プロジェクトが進行中である。OceanQuest社は実海域実験用の1 MWの鉛直軸型潮流発電装置の実海域実験を行った。 ●波力発電と洋上風力発電の実証実験サイトとして、SEM-REVを保有。潮流発電の実証実験サイトとして2か所（SEENEOHとPaimpol-Brehat）、波力発電の実験サイトとして1か所（Sainte-Anne du Portzic）を保有。

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

				【英国】 ●英国は波力発電と潮流発電に関する世界のリーダー役を担っている。 ●第1期 MeyGen プロジェクトで完成済みの1.5 MWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基（合計6 MW）を8 MWに拡張予定。Nova Innovationは、100 kWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置3基（合計300 kW）を設置済み。OrbitalMarine Power社は2 MWの浮体式潮流発電装置の実証実験を実施中。 ●波力発電と潮流発電に関する世界的な実証実験サイトEMEC（4つの実験サイトを保有）をオークリー諸島に保有して、世界各国からの装置の実証実験を実施中で、海洋エネルギー装置の認証取得のための試験センターとして、IECから唯一認定されている。この他に、Wave Hub等の4つの実証実験サイトを保有。 【ポルトガル】 ●AW-Energy社は、500 kWの海底ヒンジ型振り子式波力発電装置 WaveRollerの実海域実験を実施した。 【スペイン】 ●防波堤に振動水柱型装置を組み込んだ世界初のMutriku波力発電装置（296 kW、2011年完成）が商用運転を継続している。 ●波力発電に関する実海域実験場 BiMECを保有している。フィンランドのWELLOY OY社は、BiMECで可動物体型波力発電装置 Penguin2（500 kW）の実験を実施した。
中国	基礎研究	○	→	●浮体式振動水柱型波力発電や可動物体型波力発電に関する基礎研究が大学や国立の研究所で重点的に行われている。 ●浙江大学では、長年、水平軸型プロペラ式潮流発電装置の開発を実施、650 kWの装置を開発し、研究開発を継続中である。
	応用研究・開発	◎	→	●LHD Technology社の1.7 MW潮流発電装置が秀山島海域で、2015年から継続稼働中で、今後の出力増大が計画中である。 ●広州変換エネルギー研究所は、ダック型波力発電装置 Changshan（500 kW）の実海域実験を萬山群島で実施した。 ●MW級浮体式波力発電装置「南鯤」号が2023年6月に広東省珠海市で試験運転を開始した。 ●2023年9月、中国初の浮体式海洋温度差発電装置が試運転に成功（南海の水深1900メートルの海域）。試験発電の総時間は4時間超で最大発電出力は16.4kWを記録した。
韓国	基礎研究	○	→	●政府は、2030年までに、1.5 GWの海洋エネルギー関連施設の建設目標を公表。国立の研究所である KRISOを中心に、波力発電、潮流発電の研究開発を実施中である。 ●KRISOが30 kWの振動水柱型波力発電と電力貯蔵を組合せたシステムの実証実験を実施した。波力発電と潮流発電の実証フィールド建設を建設中。
	応用研究・開発	◎	↗	●世界最大のSihawa潮汐発電所（254 MW、2011年の建設）が継続稼働中である。 ●KRISOはJeju島に波力発電の実証フィールドを建設し、500 kW 振動水柱型波力発電装置を継続稼働させている。 ●政府がUldolmokに建設した1 MW潮流発電装置が継続稼働中である。 ●KRISOが、Kiribatiに設置予定の1 MW海洋温度差発電プラントの実験を韓国近海で実施した。
カナダ	基礎研究	○	→	●ヴィクトリア大学、マニトバ大学など9の大学と2つの国立研究機関他で、潮流発電を中心に研究開発を実施中である。
	応用研究・開発	◎	↗	●英国のEMECと並ぶ世界的な潮流発電実証フィールドFORCEをファンディ湾に建設して、国内外の多数の実機スケール装置の実験を実施中である。 ●カナダ政府は潮流発電他の研究開発に、大規模な公的資金を投入している。カナダ・ノバスコシア州において、3件のプロジェクトが進行中である。Sustainable Marine社は浮体式の420 kW潮流発電装置 Plat-Iの実証実験を実施中である。Nova Inovation社は1.5 MW潮流発電プロジェクトを実施中である。DP Energy社は、日本の中部電力、川崎汽船と共同で、4.5 MW潮流発電プロジェクトを実施中である。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている

○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

■水力発電

- 1-1) 経済産業省 資源エネルギー庁「第6次エネルギー基本計画（令和3年10月）」https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-2) 産業競争力懇談会(COCN)「カーボンニュートラル実現に向けた水力発電システム(令和5年2月9日)」<http://www.cocn.jp/report/ce620bdd0297866152bbef9c4e5685e8786c34b7.pdf>, (2023年10月25日アクセス)
- 1-3) 一般財団法人新エネルギー財団, 新エネルギー産業会議「水力発電の開発促進と既設水力の有効活用に向けた提言」一般財団法人新エネルギー財団, https://www.nef.or.jp/introduction/teigen/pdf/te_h30/suiryoku.pdf, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-4) 経済産業省 資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）」<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/>, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-5) 宮川和芳「脱炭素社会にむけた水力発電システムの役割」『エネルギー・資源』42 巻 4 号 (2021) : 239-243.
- 1-6) 飯尾昭一郎, 宮川和芳「小水力・マイクロ水力発電の最新技術」『エネルギー・資源』42 巻 4 号 (2021) : 264-269.
- 1-7) 井上素行「水力発電の未来」『電気現場』61 巻 723 号 (2022) : 24-35.
- 1-8) U.S. Department of Energy, “Water Power Technologies Office,” <https://www.energy.gov/eere/water/water-power-technologies-office>, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-9) U.S. Department of Energy, “Hydro WIRES Initiative,” <https://www.energy.gov/eere/water/hydrowires-initiative>, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-10) Hydropower Sustainability Secretariat, “Hydropower Sustainability Council,” <https://www.hydrosustainability.org/>, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-11) ターボ機械協会「〔生産統計〕2019年のターボ機械の動向と主な製作品」『ターボ機械』46 巻 8 号 (2020) : 449-467.
- 1-12) 名倉理他「地球温暖化防止に貢献する可変速揚水発電システム」『日立評論』92 巻 4 号 (2010) : 57-61.
- 1-13) 村井雅彦他「最適電源構成モデルを用いた揚水発電の活用評価」『電気学会全国大会講演論文集』(東京: 電気学会2022), ROMBUNNO.6-122.
- 1-14) 東仁他「11-3 電力貯蔵の複数日運用効果の解析・評価」第41回エネルギー・資源学会研究発表会 (2022年8月8-9日), https://www.jsr.gr.jp/events/41kenkyu_program/, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-15) 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「LCS-FY2021-PP-04 日本におけ

2.1

電力の
ゼロエミ
・
安定化

る蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.4) – 気候変動に対応した提案 – (令和4年3月)」国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST), <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2021-pp-04.pdf>, (2023年1月15日アクセス)。

- 1-16) 青坂優志他「ラオス国ナムニアップ1水力発電プロジェクトにおけるRCCダムコンクリートの水密性確保と堤内排水孔の配孔について」『ダム工学』29 巻 3 号 (2019) : 191-203., <https://doi.org/10.11315/jsde.29.191>.
- 1-17) International Council on Large Electric Systems (CIGRE), “2022 Paris Session, Discussion Meeting Summary, Study Committee A1 (Rotating Electrical Machines),” https://www.cigre.org/userfiles/files/Livre%20SCOPE_OF_WORK_2022-FINAL-DIGITAL-pages.pdf, (2024年10月アクセス)
- 1-18) Fujita H, et al., “Construction Technology and Management Practices for Nam Ngiep 1 Hydropower Plant in Lao PDR,” in *Proceeding of the 39th IAHR World Congress (Granada, 2022)*, ed. Ortega-Sánchez M (International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2022), 143-149.
- 1-19) 田村和則他「ダム流入量長時間予測への深層学習の適用：ダム防災操作の効率化を目指して」『土木学会論文集B1 (水工学)』74 巻 5 号 (2018) : I_1327-I_1332., https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5_I_1327.
- 1-20) 竹内寛幸他「多目的ダムの洪水調整容量の有効活用による発電量の増大方策について」『大ダム』63 巻 251 号 (2020) : 31-41.
- 1-21) 国土交通省 水管理・国土保全局「ハイブリッドダム (仮称) の取組に関するサウンディング (官民対話) に参加する民間事業者等を募集します～最新の技術等を用い、官民連携によりダムを活用した治水・カーボンニュートラル・地域振興の実現を目指します～」国土交通省, https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_001128.html, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-22) 経済産業省「GX実現に向けた基本方針参考資料」経済産業省, https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_3.pdf, (2023年11月15日アクセス)。
- 1-23) 中西裕二他「水車及びポンプ水車の簡略化した新しい性能換算法」『ターボ機械』49 巻 4 号 (2021) : 229-240.
- 1-24) European Commission, “HYDROPOWER-EUROPE,” CORDIS, <https://cordis.europa.eu/project/id/826010>, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-25) The Hydropower Extending Power System Flexibility (XFLEX HYDRO) project, <https://www.xflexhydro.com>, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-26) Increasing the value of Hydropower through increased Flexibility (HydroFlex) project, <https://www.h2020hydroflex.eu/>, (2023年1月15日アクセス)。
- 1-27) 東京電力パワーグリッド「再生可能エネルギー：再生可能エネルギー導入拡大に向けた課題」<https://www4.tepco.co.jp/pg/technology/renewable.html>, (2023年1月15日アクセス)。

■海洋発電

- 2-1) Ocean Energy Systems (OES), “Annual Report 2021,” <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-annual-reports/document/oes-annual-report-2021/>, (2023年1月16日アクセス)。
- 2-2) Ocean Energy Systems (OES), “Annual Report 2020,” <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-annual-reports/document/oes-annual-report-2020/>, (2023年1月16日アクセス)。

- 2-3) Ocean Energy Systems (OES), “Wave Energy Developments Highlights,” <https://www.etipocean.eu/wp-content/uploads/2023/06/oes-2023-wave-energy-spreads-1.pdf>, (2024年10月アクセス)
- 2-4) Ocean Energy Systems (OES), “Tidal Current Energy Developments Highlights,” <https://tethys-engineering.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Tidal-Current-Energy-Highlights.pdf>, (2024年10月10日アクセス)
- 2-5) Tethys, “OES-Environmental Metadata,” <https://tethys.pnnl.gov/oes-environmental-metadata>, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-6) The Portal and Repository for Information on Marine Renewable Energy (PRIMRE), “Marine Energy Projects,” https://openei.org/wiki/PRIMRE/Databases/Projects_Database/Projects, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-7) Ocean Energy Europe, “Ocean Energy: Key trends and statistics 2021,” https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2022/03/OEE_Stats_2021_web.pdf, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-8) Ocean Energy Europe, “Ocean Energy: Key trends and statistics 2020,” <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2021/05/OEE-Stats-Trends-2020-3.pdf>, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-9) International Electrotechnical Commission (IEC), “Presentation of latest status on wave, tidal and other water current converters,” IEC/TC114, Virtual meeting, 2022.
- 2-10) International Electrotechnical Commission (IEC), “Presentation of latest status on wave, tidal and other water current converters,” IEC/TC114, Virtual meeting, 2021.
- 2-11) Joint Research Centre, “Ocean Energy Technology Development Report 2020,” European Commission, https://setis.ec.europa.eu/ocean-energy-technology-development-report-2020_en, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-12) International Renewable Energy Agency (IRENA), “Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies,” <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Innovation-Outlook-Ocean-Energy-Technologies>, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-13) International Electrotechnical Commission (IEC), “TC114: Marine energy - Wave, tidal and other water current converters,” https://iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:513787566023960::: FSP_ORG_ID:1316, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-14) 財団法人エンジニアリング振興協会「平成21年度 海洋資源・エネルギー産業事業化の実証フィールド整備に関する調査研究」公益財団法人JKA, https://hojo.keirin-autorace.or.jp/seikabutu/seika/22nx/_bhu/_zp/_22-101koho-03.pdf, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-15) GLOBAL OTEC, “GLOBAL OTEC UNVEILS ADVANCED CONCEPTS FOR THE FIRST COMMERCIAL-SCALE OTEC PLATFORM AT THE IVECF23,” <https://globalotec.co/global-otec-unveils-advanced-concepts-for-the-first-commercial-scale-otec-platform-at-the-ivecf23/>, (2024年10月31日アクセス) .
- 2-16) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「「2021年度NEDO新エネルギー成果報告会」発表資料」https://www.nedo.go.jp/events/report/ZZFF_100021.html, (2023年1月16日アクセス) .
- 2-17) 木下健「海洋エネエネルギー利用推進の課題」文部科学省, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu5/siryo/_icsFiles/afieldfile/2012/05/16/1321071_01.pdf, (2023年1月16日アクセス) .

- 2-18) Carbon Trust, *Future Marine Energy: Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy* (London: Carbon Trust, 2006).
- 2-19) Ocean Energy, “Ambitious project will create step change for wave energy industry” <https://oceanenergy.ie/ambitious-project-will-create-step-change-for-wave-energy-industry/>, (2023年11月24日アクセス) .

2.1

電力のゼロエミ化・ 安定化