

## 2.1.7 その他の再生可能エネルギー発電（水力、海洋、地熱、太陽熱）

### (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・潮力発電・海流発電・海洋温度差発電・塩分濃度差発電など。
- (3) 地熱発電：地熱資源特性把握と掘削技術、ドライスチーム・フラッシュサイクル・バイナリーサイクル各方式、高温岩体発電などを対象とする。
- (4) 太陽熱発電：太陽熱発電システムとしての低コスト化、効率向上、用途開発などの動向を対象とする。

### (2) キーワード

#### ■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、需給調整市場、設備更新、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

#### ■地熱発電

地熱貯留層、坑井掘削、資源探査、モデリング、EGS、涵養注水、超臨界地熱、スケール対策、バイナリー発電

#### ■太陽熱発電

太陽集光、熱輸送媒体、蓄熱システム、ソーラー燃料製造

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

#### ■水力発電

2018年7月に決定された第5次エネルギー基本計画では、長期エネルギー需給見通しの実現に向けた施策の強化が示された。このうち、水力発電はCO<sub>2</sub>排出量の少ないクリーンな純国産エネルギーとして、天候に左右されない安定な、かつ安価な発電手段として、我が国の電力供給のベースロード電源の役割を担い、発展に大きく寄与してきたが今後も積極的な導入拡大が求められている。

2030年度の電力需給構造において、再生可能エネルギーは22～24%の導入拡大が見込まれているが、水力発電の導入見込みとしては、大規模で67万～79万kW、中小規模で130万～201万kW（合計197万～280万kW）の目標が示されている。これは総発電電力量に対して8.8～9.2%の割合となる。しかしながら、この見通しの達成には、経済性があり、自然・社会環境上の障害が解決される必要がある。気候変化により増加している水害に対しても、水力発電に用いられるダムを事前放流するなど、治水の助けにもなっている。

水力発電の特徴は、①ライフサイクルを通じた低いCO<sub>2</sub>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高い負荷追随性、⑥地域の活性化・防災・雇用創出に対する貢献などであり、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<sup>1-1)</sup>・<sup>1-2)</sup>。現在、包蔵水力のうち出力お

よび電力量ベースで7割弱、地点数で約4割が開発済みである。未開発地点は未だ約2700地点存在するが、奥地が多く、出力も小規模な3万kW未満の地点がほとんどである。

風力や太陽光発電など出力が気象条件や時間帯、季節により左右される再生可能エネルギーの大量導入に備え、安定な電圧・周波数の電力供給のために水力発電の即応性や調整力が期待されている。また、需要と供給の変動に対する調整に対しても、出力調整が可能な水力発電は、同様な機能を有する火力発電と比較すると、起動・停止に必要な時間が数分程度と短く、出力の変化速度も大きいため、数秒から十数分の短中周期需要変動に対する調整力としての役割を果たしている。特に、揚水発電は、従来、負荷調整のできない原子力発電の需給調整として昼間は発電、夜間は揚水として高落差化、大容量化が進められてきたが、近年では、太陽光発電の増加による昼間の電力供給量増加、太陽光、風力発電などの変動の大きな再生可能エネルギーの負荷調整など、昼間の揚水、夜間の発電の利用により他の再生可能エネルギーを補完する役割も果たしている。日本では、既存の揚水発電所の蓄電容量は130 GWh、設備利用率も3%程度であるが将来の負荷調整設備としての期待も多く、合計1,000 GWhの蓄電容量に対する経済試算もされている<sup>1-3)</sup>。経済性向上の観点から、負荷調整能力の拡大のために可変速化等の対応も実施され、更なる柔軟なエネルギー需給調整能力の向上が求められている。特に、2021年4月から予定されている需給調整市場において、水力発電、揚水発電は調整力として期待されている。

## ■海洋発電

海洋に存在するエネルギーは、再生可能エネルギーの一つとして、膨大な資源量を有し、波力発電、潮流発電、潮流発電、海流発電、海洋温度差発電、塩分濃度差発電等の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。わが国においても、第二期（2013年度～2017年度）及び第三期（2018年度～2022年度）海洋基本計画において、海洋エネルギー利用技術開発の必要性が謳われ、現在、海洋エネルギー利用技術に関する、NEDOや環境省等の大型研究プロジェクトが継続実施されている。

## ■地熱発電

地熱発電は、地熱という純国産資源を活用した発電であり、運転に際して二酸化炭素の発生が火力発電に比して圧倒的に少なく、燃料の枯渇や価格高騰などへの心配もないほか、太陽光や風力といった他の再生可能エネルギーによる発電と異なり、天候、季節、昼夜によらず安定した発電量が得られる特長がある。資源量も多く相対的にエネルギー密度も高いことから、特に日本のような火山国においては大きな潜在力を有する。地球温暖化への対策手法となることやエネルギー安全保障の観点から各国で利用拡大が図られている。

我が国は世界の活火山の約8%を擁する屈指の地熱資源大国の一つであるが、1970年代のオイルショック以降に地熱発電所の建設が進んだ後は、2003年から東日本大震災後までの約10年間は政策的に地熱研究開発が停止されていた<sup>3-1)</sup>。しかし、再び環境適合性に優れた長期安定電源の可能性の一つとして見直され、現在、各種の調査・研究開発が進められている。地熱は本来我が国の得意分野であり、世界シェア約70%<sup>3-2)</sup>を誇る地熱蒸気タービンをはじめ、発電設備、各種センサ、電磁気学や地震学的手法による地下探査技術、高温掘削技術、資源評価や貯留層モデリング技術など、要素技術は高いレベルにある。10年間の停滞期には公的支援の不足や技術継承及び人的資源面等での問題もあり、世界の趨勢に対して後れを取ったものの、今後は、地域の自然および社会環境に調和する在来型地熱資源の開発をはじめ、EGS（地熱増産システム）技術の適用、超臨界地熱資源の開発、各種調査・開発技術の高度化などで再び世界をリードすると

ともに、未来の安定的エネルギー源としての世界的な定着にも貢献する必要がある。

## ■太陽熱発電

太陽熱発電 (Concentrating Solar Power : CSP) は安価な蓄熱システムを組み込むことにより、夜間において太陽光発電 (Photovoltaics : PV) にバッテリーを導入するよりも安価にソーラー発電が行える。PVとのハイブリッドが注目され、発電コストの競合はバッテリーやガス発電との競争に移行しつつある。CSPはスケールメリットが大きいいため、国内よりも直達日射量が多く大型化が可能なサンベルトで有効だが、これらの地域は発展途上国が多い。部品製造やメンテナンス等に就業機会があり、雇用改善にも役立つため、世界銀行が後押ししている。また、日本が得意とするタービン等の熱発電プラント技術を活用できる。

### [研究開発の動向]

#### ■水力発電

##### ◇国内

2019年の国内での1000 kW以上の大型水力及び揚水水力の全容量は若干増加して各々47台、886 MWであった。全容量の増加は30 MW以上の大きな国内一般水力発電所での設備更新案件数の増加および、再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT制度) の対象となる30 MW未満の国内改修案件も水車一式更新案件の割合が全体の6割弱を占め依然として件数が多かったことによる<sup>1-4)</sup>。

2012年に導入された再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT制度) により、買取価格が上昇し、従来活用されてこなかった水資源を用いた小水力発電の開発が活発に行われるようになった。これに伴い、既設ダムの有効活用、新規水力の利用のための様々な取り組みがなされているとともに先進的な工法も開発されている<sup>1-5)</sup>。しかしながら、位置的成約から系統連系増強費用の負担が太陽光発電などに比べて重く、送電設備の増強をすることなく既存設備の有効利用を図るコスト低減の取り組みについて国と電力広域的運営推進機関の間で「日本版コネクト&マネージ」として①想定潮流の合理化、②N-1電制 (系統1回線故障時接続電源制限)、③ノンファーム型接続などが議論されている。また、未開発水力の90%以上の地点がトンネル導水路を伴う流れ込み式発電所であり、トンネル導水路製作の支援技術も求められている<sup>1-1)</sup>。

水力発電所の活発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、運用実績を踏まえて台数の統合や水車型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。

今後展開され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AFC機能：周波数調整AFC (Automatic Frequency Control)、入力変化幅 (AFC容量)、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<sup>1-6)</sup>。既設の揚水発電所では、大多数が揚水入力調整のできない定速の同期電動機であるが30年以上経過した揚水発電所の大規模更新に合わせて可変速化改修を行うことにより、新規の可変速発電所建設に比べて、建設費用低減、工事期間の短縮が期待できる<sup>1-7)</sup>。

##### ◇海外

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やカナダ、スイスなどや、まだ西部地区で開発が期待できる中国で研究開発が盛んである。ヨーロッパの水力発電可能な地域ではすでに多くの開発が

なされており（2019年に設置された水力発電容量：251 GW）、予想される将来の成長は年間総発電量の470TWhから610TWh（2019年には653 TWh）と限られている。ヨーロッパで残っている最大水力エネルギー活用の可能性として、低落差（15メートル未満）の利用と既存の施設の改修による発生電力量増大などが挙げられる。過去5年間で、水力発電は大陸全体で約10 GW（5%）増加した。電力の需給をまかなう揚水発電所は、既存のサイトの近代化や拡張と同様に、新規建設も重点分野となっている<sup>1-8)</sup>。中国も大規模水力の開発を政策で実施しようとしており、単機容量1000MWの水力タービンの開発プロジェクトも進んでいる。官民一体で、水力エネルギーの活用のための技術開発を実施している。

### ■海洋発電<sup>2-1) ~2-9)</sup>

波力発電、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する発電技術の開発は、1970年代のオイルショックを機に、わが国を含め、世界的に開始されたが、その後の石油価格の下落によるエネルギー危機の緩和や装置の経済的な面での克服ができない等の理由から、各国の研究開発費は削減され、研究開発は低調となった。しかしながら、2000年代からの石油価格の高騰、地球の温暖化懸念に関連して、海洋エネルギーを利用した発電技術は、再び脚光を浴び、現在、その発電技術の開発は世界的なブームとなり、欧米各国を中心に、大きな研究開発費が投じられている。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が建設されている。

我が国においては、海洋エネルギーに関する過去の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、NEDOが中心となって大型の研究開発プロジェクト（第1期：2011年度～2017年度）が実施した。このプログラムでは、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「海洋エネルギー発電システム実証研究（9事業）」と、事業化時に発電コスト20円/kWh以下のシステムの要素技術開発を目指した「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発（8事業）」の2つが実施した。現在、これらに続くNEDO事業として、離島での実海域長期実証研究プロジェクト（第2期：2018年度～2020年度、1事業）が実施している。

### ◇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、偏西風の存在で波力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開発に積極的である。これまで、世界で、波力発電に関する3000以上の特許が出願され、現在、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波力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つに大別される。

技術開発のレベルを、近年、多用される9段階の技術成熟度レベル（Technology readiness levels：TRL、TRL1～TRL9）を用いて表すと、現在の波力発電の技術レベルは、商用化装置が少ないこともあり、全体としては、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。海外プロジェクトで、振動水柱型で商用化された装置としては、防波堤に組み込んだスペインのMutriku波力発電装置（300 kW、2011年に完成）、韓国のチェジュ島の沿岸固定式装置（500 kW、2017年に完成）がある。開発中の浮体型の振動水柱型装置としては、アイルランドのOceanEnergy社が、ハワイ沖での実海域実験を予定している後ろ曲げダクトブイ型500 kW装置などがある。可動物体型で商用化

された装置としては、スウェーデンのSeabased社の装置がある。これは、単一浮体の鉛直運動を利用してリニア発電機を用いて発電するもので、スウェーデンのStotenasに、36基から構成される合計出力1 MWのWavefarmが2015年に建設され、継続して運転中である。アメリカのOcean Power Technologies社は、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、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）を商品化している。現在、開発中の可動物体型装置として、フィンランドのAW-Energy社は、海底ヒンジの振り子型装置Waverollerを開発して、ポルトガル沖で350 kW装置の実海域実験を開始した。フィンランドのWello Oy社はジャイロ式波力発電装置（Penguin）を、また、イギリスのSeatricity社は単一浮体の鉛直運動を利用してポンプを駆動して海水を陸上へ送りタービンを回転させ発電する162 kW装置を開発中である。

我が国においては、近年実施されたNEDOプロジェクトで、エム・エムブリッジ（株）他は、山形県酒田市の既存防波堤に振動水柱型装置を追加設置して、15 kW固定ユニット式多重共振型装置の実証実験を、また、三井造船他は、神津島沖で“2つのブイの鉛直相対運動を利用して発電するシステム（PB-MES）”に関する実証実験を行った。東京大学他は、環境省プロジェクトとして、神奈川県平塚漁港で、固定式振り子式波力発電43 kW装置の実海域実験を行っている。

#### ◇潮流発電・海流発電・潮汐発電

潮流発電装置には、水平軸プロペラ方式、鉛直軸ダリウス方式等があるが、水平軸プロペラ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）に達しているとされている。海外のプロジェクトに関しては、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）が2017年から稼働中である。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3基（合計300 kW）がShetland島海域で稼働中である。オランダでは、Eastan Scheldtにある防潮堤にて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）が2015年から稼働中である。また、オランダでは、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2015年に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）が現在稼働中である。Sustainable Marine Energy社は、水平軸型プロペラ4基（出力280 kW）を搭載した浮体式の潮流発電装置を2017年にカナダのノバスコシア州に設置して、現在稼働中である。また、この他、様々な実海域実験レベルの研究開発が、イギリスにある世界最大の実海域実験施設European Marine Energy Centre（EMEC）で行われている。Orbital Marine Power Ltdは、2 MWの浮体式潮流発電装置の実験をEMECで行っている。

我が国の潮流発電プロジェクトに関しては、1980年代に日本大学が来島海峡で世界で始めて潮流発電に成功した後、2002年に海上保安庁が明石海峡に浮灯標電源用の小型潮流発電装置を設置したが、その後、電力供給用システムの実用化を目指した実証実験は行われていなかった。その後のNEDO第1期プロジェクト（海洋エネルギー技術研究開発「海洋エネルギー発電システム実証研究」）において、潮流発電と海流発電に関する8事業が実施された。この内、主なものとして、九州工業大学、（株）協和コンサルタンツ他は、相反転プロペラ式潮流発電技術を開発し、長崎湾沖で実施した、実用機（プロペラ直径7 m、流速4 m/sの場合、定格500 kW）の1/7スケールモデルを用いた曳航試験で、設計発電効率を上回る43.1%の発電効率を確認した。（株）IHIは、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実験を行い、最大30 kWの発電出力を確認した。これらに続く、NEDO

第2期プロジェクト（海洋エネルギー発電実証等研究開発「海洋エネルギー発電長期実証研究」）で、(株)IHIは、同じ海域で、装置の長期実証実験を実施予定である。

潮汐発電に関しては、フランスのランス発電所（240 kW）、韓国のSihawa発電所（254 MW）等の商用化設備が稼働中で、技術的には商用化レベルにある。

#### ◇海洋温度差発電

1970年代のオイルショック以降、各国で海洋温度差に関する研究開発が進められたが、その後のエネルギー緩和に伴い、多くの研究機関は研究開発を中止した。そのような中で、佐賀大学は研究開発を継続しており、現在、数十kW級の実証研究では世界トップレベルにあり、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を実施するとともに、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に関する研究を行っている。

近年、米国、韓国、オランダ、フランス、中国なども、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が、現在稼働中の沖縄県久米島やハワイ（105 kW）の装置は、100 kW級の装置で、陸上設置型である。近年、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、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行っている。今日では、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なく、汲み上げた大規模海洋深層水を利用して、海水淡水化と漁場造成、水素製造、リチウム等の有用金属回収を含めた複合利用が推進されている。

#### ◇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、現在稼働中の“逆電気浸透析法に基づく50 kW塩分濃度差発電”のパイロットプラントがある。

### ■地熱発電

地熱発電技術は、1913年にイタリアのラルデレロで初めて地熱発電所の運転が開始され、第二次世界大戦終戦後にアメリカのガイザーズ地熱地域、ニュージーランドのワイラケイ地域などで開発が着手された。日本では1966年に岩手県の松川地熱発電所が運転を開始した。その後1974年のオイルショックを機に、石油代替エネルギーとしての地熱開発が世界の主要火山国で進められるようになり、資源探査技術、掘削技術、貯留層管理技術、生産技術（発電技術やスケール対策など）が急速に進展した。特に資源探査技術や掘削技術は、石油・天然ガスで培われてきた技術を高温環境に適用する形で発展してきた。

1980年代になると新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）において、民間が着手していない有望地点の先導的な調査を国がリスクを取って行うことで民間企業の開発を促進しようという「地熱開発促進調査（1980～2010年度）」が開始され、国内60地域以上での開発可能性調査が行われた。そのうち特に有望であった地域には、90年代以降に地熱発電所が建設されている（柳津西山、八丈島など）。また、資源調査や技術開発が様々な視点で行われ、「全国地熱資源総合調査（1980～1992年度）」に始まり、地熱貯留層を構成する断裂系の調査・解析手法を開発する「断裂型貯留層探査法開発（1988～1996年度）」および後継の「貯留層変動探査法開発（1997～2002年度）」、既存の地熱貯留層より深い深度での開発可能性を岩手県葛根田地熱地域で調査した「深部地熱資源調査（1992～2000年度）」、国産バイナリー発電機の開発や炭酸カルシウムなどのスケール対策、掘削技術の開発を中心とした「深部地熱資源採取技術（1992～

2001年度)、そして、山形県肘折での「高温岩体発電技術(要素技術)(1992~2002年度)」において実証試験が行われた。2000年までに、日本の地熱発電は国内18地点、設備容量約540 MWe(全発電量に占める割合は0.2%)に達したが、2002年度をもって国による技術開発は終了するとともに調査予算も大幅に縮小した。また、地熱資源の80%が国立公園内にあり東日本大震災後の規制緩和の前には調査が不可能だったことや、温泉事業者の地熱の調査開発への懸念も地熱開発が停滞する原因になった。

2000年前後から10年間程度日本の地熱開発が停滞している間に、アメリカ、フィリピン、インドネシア、ニュージーランド、メキシコ、イタリア、アイスランド、ケニア、トルコなどでは着実に地熱発電量を増大させており、世界の設置済み設備容量の合計で見ると、2000年の7,973 MWeから2015年には12,284 MWeに、さらに2020年初頭には15,950 MWeまで増大している<sup>3-3)</sup>。この世界の地熱発電の増加に対して、日本は地熱発電用のタービンや発電所プラントの配管技術等で大きな貢献をしている。地熱発電タービンの世界シェアの約70%(うち、フラッシュサイクル発電用のタービンでは82%<sup>3-4)</sup>におよぶ)を日本の東芝、富士電機、三菱パワーの3社が占めている。さらに地熱の井戸の坑口装置でも世界の50%ほどのシェアがある。その一方、バイナリー発電技術や坑内探査技術、掘削技術などでは海外が強い状況で、バイナリー発電用機器では74%がイスラエルの企業によって占められており、最近ではイタリア企業のシェアも増加している<sup>3-4)</sup>。

地球温暖化対策としてCO<sub>2</sub>排出削減に貢献できることから、日本の地熱の調査・開発には2000年代後半には復活の動きが見え始め、2008年頃には過去の調査での有望地を対象に、比較的大きな規模の開発を目指す動きが徐々に再開してきた。また、環境省も地熱プロジェクトを立ちあげ、「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」、「温泉発電システムの開発と実証」、「高傾斜泥水制御技術の開発」といった温泉や公園の問題の解決に向けたプロジェクトが開始された。そして、2011年3月の東日本大震災以後はエネルギー政策が大幅に見直され、地熱の技術開発・調査が本格的に行われるようになった。過去調査の有望地域での調査・開発が実り、2019年1月には約7,499 MWeの松尾八幡平地熱発電所が、2019年5月には約46.2 MWeの山葵沢地熱発電所が運転を開始している。さらに、岩手県や秋田県ではそれぞれ15 MWe前後の新たな地熱発電所の操業を目指して、調査・開発を継続中である。後述するFIT制度の恩恵もあり、1 MWe以下の小規模発電所は45地点6,941 MWe(2017年度末)に増加し<sup>3-5)</sup>、新規運開分を含めた全体の設備容量は約550 MWeとなっている<sup>3-6)</sup>。

政府の取り組みでは、経済産業省の地熱実務を行う組織として、従来から地下資源の探査・開発を行っている独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)に2012年度から地熱部(現・地熱統括部)を設置した。そこでは、地下探査・掘削といった開発企業の負担を軽減するための地熱資源調査・環境調和支援として、日本企業が国内で地熱資源調査を行う場合に調査費の一部(地質調査・物理探査・地化学調査等に関する経費や坑井掘削調査等に関する経費)を助成金として交付する制度を設けた。さらに、地熱資源開発を行うプロジェクト会社に、地熱資源の探査に必要な資金を最大50%出資という形で供給する制度、生産井・還元井の掘削、配管や発電設備の設置に係る費用を金融機関から融資を受ける場合に債務保証による支援を行う制度も併せて導入している。2002年度以前に地熱の調査・研究を担当していたNEDOにおいても、2013年度から「地熱発電技術研究開発」が開始され、おもに地上設備関連や比較的に長い視点の研究開発を担っている。2018年度からは、「超臨界地熱発電技術研究開発」もNEDOの事業として実施されている。

2012年にFIT制度が導入され、地熱の場合は15 MWe以上の設備の場合には1 kWhあたり26円+税、15 MWe未満の場合には40円+税の調達価格で15年間の調達期間が設定されており、さらに現在では設備の更新についてもそれぞれの状況に応じた価格設定でFIT制度の対象となっており、支援が強化されている。

環境対応としては、国立公園等での地熱開発について2012年以降、徐々に規制緩和が行われている。国

立公園は規制が厳しい順に、特別保護地区、特別地域の第1種、第2種、第3種そして普通地域と分類される。従来は、特別保護地区、特別地域はすべて調査のため立ち入りが禁止され、普通地域でも開発不可能であったが、2015年10月以降、特別地域の第2種、第3種や普通地域において開発行為が小規模で風致景観等への影響が小さい場合などは、温泉や自然保護などの地域関係者との合意形成を前提として地熱開発が許可されるようになった。さらに「自然環境の保全と地熱開発の調和が十分に図られる優良事例」の形成を前提とできる場合には、第1種特別地域に対する域外からの傾斜ボーリング掘削による調査開発行為も認められるようになっている。また、優良事例と判断されかつ風致景観との調和が十分に図られる場合には、第2種、第3種特別地域内では建築物の高さ13 mという規制も緩和されることになった。このような規制緩和の流れも受けて、例えば、福島県土湯温泉地域の温泉バイナリー発電機 (0.4 MWe) は国立公園内に設置されている。

### ■太陽熱発電

太陽熱発電 (CSP) は2019年に中国、イスラエル、南アフリカ、クエートで計600 MWの新規導入があり、34%増であった。また、中国は2020年まで5 GWの導入を計画しており、今後も中東、アフリカ、南米等のサンベルトを持つ発展途上国を中心に大型導入が期待される。発電コストは、PVと比較すると高いが、安価な蓄熱を組み込むことにより電力需要曲線に合わせた低コストの電力供給が可能であることから、PV導入によるダックカーブの解消や夜間のソーラー発電として再評価されている。蓄熱システム付きCSPによる24時間発電のコストは0.07～0.15€/kWhであるが、日中の発電コストが安いPVと組み合わせれば平均0.04～0.06€/kWhで24時間のソーラー発電が可能と試算されている。UAE、豪州、モロッコでCSP/PVハイブリッドプラントが建設中 (あるいは建設計画中) であり<sup>4-1)～4-3)</sup>、ベースロード電源をソーラー電力とする実用例として動向が注目されている。研究開発の大きな流れは、蓄熱システムの低コスト化と、発電システム全体の高温化による高効率化である。現在、主流の蓄熱付きCSPは、タワー型集光システム (点集光) と、硝酸塩系溶融塩を熱輸送・顕熱蓄熱媒体とする2タンクシステムを利用し、水蒸気タービンにより565°Cで発電を行っているが、サーモクラインによる1タンクシステム<sup>4-4)</sup> や、蓄熱密度がより大きい潜熱、化学蓄熱 (あるいはこれらの組み合わせ) によって低コスト化・高温化しようとする研究が活発である<sup>4-5)～4-8)</sup>。現在の発電効率 (太陽光→電力) は年平均で約16～20%であるが、水蒸気タービンから高温系のコンバインドサイクル、超臨界CO<sub>2</sub>タービンへ移行すれば効率を向上できる。例えば、現行の水蒸気タービンの効率は42～43%であるが750°Cの超臨界CO<sub>2</sub>タービンでは50%以上が見込まれる。現行の硝酸塩系溶融塩は約600°Cで熱分解するため、硝酸塩系以外の溶融塩、空気、溶融金属、固体粒子などの利用が検討されている<sup>4-2), 4-5), 4-9), 4-10)</sup>。さらに、長期的な次世代開発技術として太陽集熱の燃料転換が注目されており、水、CO<sub>2</sub>を熱化学サイクルで分解し、水素、COを製造する反応器は5～6%の転換効率 (太陽光→燃料) をラボスケールで達成している。実用規模への大型化によって約20%が見込まれる。現在、50～700 kWthのプラントで実証試験されている段階である<sup>4-11), 4-12)</sup>。

## (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<sup>1-9)</sup>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の活用も行われている<sup>1-10)</sup>。また、多目的ダムの洪水調整容量を活用した発電量の増加など、既存ダムの有効活用に関する研究も進められている<sup>1-11)</sup>。

水車の開発、設備更新において、最新の解析技術の適用により効率向上、運転範囲の拡大、出力増大が図られている。特に、非設計点での流動不安定の予測と対策、発電機各種損失の低減、最適化設計に解析技術が適用され、性能向上に寄与している<sup>1-12) ~ 1-15)</sup>。再生可能エネルギーの負荷変動に追従するために大きな落差幅、流量幅に対応する水車の開発が新エネルギー財団の補助事業で実施されている。運転制限要因である流動不安定を低減し、部分負荷効率を改善可能であり、今後大容量向け水車にも対応可能である<sup>1-16)</sup>。水力発電所に関わる健全性、経年劣化のモニタリング技術も導入され、大規模地震に対する水圧鉄管の振動特性の推定、AIを活用した水力発電機器の状態診断、非接触音響探査法によるコンクリート欠陥検出技術の開発なども実用化されている<sup>1-17) ~ 1-19)</sup>。

#### ◇環境負荷の低減

環境保全対策、メンテナンスフリー技術は、昨今の重要なトピックスである。水力発電所の油レス化では軸受の水潤滑化が有効である。従来の水車用水潤滑軸受は給水装置、ろ過装置を必要であったが、油軸受と同様のセグメント型により給水が不要な動圧型の軸受が開発された。従来、操作系の油レス化対策として20 MW以下の水車に電動サーボが適用されてきたが、最大操作力の増大と複数サーボの同期制御技術の構築により50 MWの水車までに適用が可能となった。また、油量低減が可能な環境配慮型サーボ(ハイブリッドサーボ)も実用化され、従来 of 圧油ユニットに比べ、電動サーボとの併用で約1割の油量で操作可能とした<sup>1-20)</sup>。

#### ◇電力供給の調整市場への対応

電力供給区域の周波数制御、需給バランス調整を行うための調整力を調達するにあたっては、特定電源への優遇や過大なコスト負担を回避しつつ、実運用に必要な調整力を確保することが重要となる。このような観点から、2016年度からのエリア内での調整力公募調達に加え、2021年4月より更なる効率的な需給運用の実現を目指すためエリアを超えた広域的な調整力の調達を行う需給調整市場が開設される<sup>1-21), 1-22)</sup>。この需給調整において水力発電、揚水発電の活用が有効である。

国内に多数建設された可変速揚水発電所では、フレキシブル運用が可能な大容量電力貯蔵装置および系統安定化への貢献が期待されている。現状の可変速揚水は有効電力制御により、系統の擾乱に対し、可変速揚水発電システム自体の安定を優先させているが、同期化力や慣性モーメントの系統への効果を模した運用も可能である。調整力の検討に、水力発電所のグリッドコードへの適合性をシミュレーションによって評価するヨーロッパのプロジェクトも実施され、今後この分野での技術開発が期待される。ヨーロッパでは一次(Primary)調整力のガバナフリー、二次(Secondary)調整力のLFC/AFC、三次(Tertiary)調整力のDPC(Dispatching Power Control)と分類されているが、日本の調整力公募では、可変速揚水の持つエネルギー貯蔵機能、電力の高速応答機能により、調整力市場における評価が高まることを期待したい。

### ■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<sup>2-8)</sup>

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、IEC(International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議)の規格運用評議会の下に設置された専門委員会 TC114で行われている(2006年~現在)。IECの規格は、

IS (International Standard:国際規格)、TS (Technical Specification:技術仕様書)、TR (Technical Report:技術報告) 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、現在、資源量の評価、装置の実海域性能評価、水槽実験法、装置の設計法等に関する12のTSが発行されている。

#### • 多数の波力発電や潮流発電に関する装置を設置したファームに関する研究開発

多数の装置を用いた大規模発電に関する研究開発が盛んになっている。潮流発電に関する英国の「MeyGenプロジェクト（現在の1.5 MW装置4基から将来の57基への増設予定、合計86 MW）」や波力発電に関するスウェーデンのWavefarm（可動物体型装置36基、合計出力1 MW）等のように、既に商用化された例もある。このような装置の多数基配置において重要な設計項目は、それぞれの装置の配置間隔で、波力発電に関しては波浪中での多数基装置の流体干渉に関する水槽実験や新たな数値計算法の開発が行われている。潮流発電装置に関しては、上流側装置の下流側装置への流体影響等に関する研究等が行われている。

#### • 海洋エネルギー実証試験海域の整備

波力発電、潮流発電・海流発電、海洋温度差発電装置の商用化のためには、実機レベルで、発電性能や大波浪作用下での装置の安全性の確認が必要である。このためには、実機レベルのスケールでの試験海域が必要なため、各国はそれぞれ独自に実証試験海域を保有しており、現在、世界中で、57か所の実証試験海域がある。この内、英国のEMECが、世界最大の実証実験センターである。波力発電と潮流発電に関する4つの試験海域を持ち、世界中の装置の試験を実施して、装置の認証データ取得のための試験センターとなっている。我が国でも、国が認定した6県8海域の実証実験海域があるが、実証フィールドとしては未整備で、すべての施設が系統に連結されていない。現在、利用されているのは、(株) IHI 他が黒潮下での海流発電の実験を行っている鹿児島県口之島沖海域と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である。

### ■地熱発電

経済産業省の長期エネルギー需給見通では、2030年までに地熱発電の設備容量を約1,400~1,550 MWe（電源構成における割合では1.0~1.1%）にまで増加させる目標が掲げられている。その達成には、今後1,000 MW程度の発電所の建設と現在58%程度である地熱発電の設備利用率を83%まで向上させる必要がある。

石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）では、新規地点開拓のための「地熱発電の資源量調査事業費助成金交付事業」として、2019年度には24件（うち新規7件）を採択している。また、独自調査事業として、2019年度までに「空中物理探査」を国内17地域で実施し、見いだされたアノマリー地域において温度構造や地質構造把握のための「ヒートホール調査」を実施している。2020年度から、高いポテンシャルが期待される一方で開発難易度が高い地点において有望な地熱貯留層を把握するために、地熱流体確認のための構造ボーリングとその前段の地表調査から成る「先導的資源量調査」が新設される予定である<sup>3-7)</sup>。

JOGMECでは、リードタイムやコスト高、不安定出力など地熱特有の探査や操業のリスク低減を目的とする「地熱発電技術研究開発事業」として、①地熱貯留層探査技術開発、②地熱貯留層評価・管理技術開発、③地熱貯留層掘削技術開発の3項目を実施している。①では、貯留層の空間的位置を可視化するための弾性波探査の適用と他の探査データとの統合解析手法の開発が行われ、鹿児島県山川地域などでの適用の結果、断裂・断層の可視化への有効性や開発有望領域の抽出法としての可能性が示されている。また、地下断裂を高精度捕捉して掘削成功率を高めるための、耐熱300℃の光ファイバ弾性波受信システムを用いる

坑井近傍探査技術の実証試験や、未利用の酸性流体資源の活用拡大に向けた酸性流体発生機構解明技術の検討も始められている。②では、熱水・蒸気の流れの評価精度向上と熱源部への水補給の最適化のために福島県柳津西山地域で涵養試験を実施しており、2019年度には暫定評価ながら産出蒸気量の増大傾向を確認している。坑井周りの透水性改善技術として、2018年度に北海道鉛川地域において低流量の坑井刺激試験が実施されている。③では、工期短縮とコスト抑制のため、ドリルパイプ先端に付ける削孔用具であるPDC (Polycrystalline Diamond Compact) ビットの開発を行っている。実証試験により従来に比べて2倍以上の掘削能率と7倍以上の耐久性が報告され、実用化に向けたフォローアップを行っている。他に、山間部での調査・開発のコストダウンにも資する小型ハイパワーリグの開発や、掘削障害への対策として水中不分離材を用いる逸泥対策技術の開発も開始している。

JOGMECのその他の取り組みとして、将来の地熱資源開発の担い手となる技術者の育成に繋げる地熱開発研修と、地熱調査の急拡大で深刻化している掘削技術者不足に対応する地熱掘削技術者向け研修を2016年度から行っている。さらに、ニュージーランドGNS ScienceとのMOUに基づく地熱資源開発研修上級コースや共同ワークショップを実施し、地熱エンジニアリングの高度な見識の習得や、双方が抱える技術課題および社会的受容性 (温泉・間欠泉、観光、環境関連) 等に関する情報交換を行っている。また、国内各地で定期的な地熱シンポジウムの開催や各種イベントへの出展など、地熱の理解促進に向けた取り組みも行っている。

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では、「地熱発電技術研究開発」として、①環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発、②低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発、③発電所の環境保全対策技術開発、④地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発、の4項目を推進中であり、さらに「超臨界地熱発電技術研究開発」も実施している<sup>3-8)</sup>。「地熱発電技術研究開発」には2019年度は10テーマがあり、数多くの研究開発が行われている<sup>3-9)</sup>。

①では、自然公園内での開発をふまえた環境配慮型の、熱効率を20%以上に向上させるフラッシュ発電とバイナリー発電を組み合わせた複合サイクルによる高機能地熱発電システムの機器開発を検討している。②では、発電機周りのスケール対策や高性能低沸点媒体、温泉と蒸気のハイブリッド型など、小型バイナリー発電システムに係る広範な研究開発が行われている。③では、温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発を行い、国内温泉地における実証試験を通じて、ほぼそのままで実用可能なモデルの製作を達成している。また、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発・ケーススタディを実施し、支援アプリやマニュアルを作成して実案件で活用可能なツールとしてまとめている。④では、未利用の強酸性熱水をエネルギー源として活用するための化学処理や材料開発、耐酸性・耐腐食技術の研究開発、スケール対策技術、強酸性環境下で使用可能な井戸の坑口装置の開発など、種々の検討を行っている。地熱発電所の運転管理に対してIoT-AI技術を適用し、トラブル回避や早期解決を実現するO&M最適化を図るなど、地熱発電所の利用率の向上のための研究開発も進められている。

「超臨界地熱発電技術研究開発」では、2020年代に超臨界領域での具体的なボーリング掘削調査を実現することを目標に、超臨界地熱資源の評価や調査井仕様および必要資材の開発などを進めている。さらに透水性不十分な場合も想定し、水圧破碎等により改質することを念頭にいた超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法の開発も行っている。資源量評価では、過去調査で250℃以上を示した18地域で超臨界貯留層を仮定してモンテカルロ法を用いた評価を行った結果、50%の確率で5,969 MWeの資源量の可能性が示されている。また、北海道、東北、九州地域において、地表調査、MT法探査を実施し、暫定モデルに基づいて抽熱シミュレーションを行って各地域の資源量評価を行い、1地域あたり100 MWe規模の発電能力があることが推定されている。

NEDOの技術戦略研究センターでは、長期的な地熱発電量の増大を目指して、特に導入量の飛躍的な増大には、非従来型地熱発電（EGS）技術の適用がブレイクスルーとなりうることから、EGS技術の世界各地の導入状況、タイプ分け、そして従来型を含めた開発への課題をまとめ、2016年7月に技術レポート『TSC Foresight』Vol.12地熱発電分野として公表している<sup>3-10)</sup>。

国際協力機構（JICA）では、開発途上国を対象にした研修事業やODAに基づく技術・資金の協力を行っている。地熱研修コースでは九州大学などの大学・研究機関や地熱関連企業を受け入れ先として2016年以降100人以上が履修しており、円借款では1977年以降累積で約3,970億円を供与し、1,230 MWeの発電所建設に貢献している。

## ■太陽熱発電

世界で導入が開始された商業用CSP/PVハイブリッドプラントの24時間の発電コストの動向が注目されている<sup>4-1)~4-3)</sup>。既にUAEでは現プラントで0.07USD/kWh台が達成されているが、新規建設中のUAEのプラントでは、日中は800 MWのPVで0.03USD/kWh(年2300時間)、夜間は700 MWのCSPで0.073USD/kWh(年5500時間)で、平均0.595USD/kWhで24時間発電を行う計画である<sup>4-1)</sup>。

米DOEのGen3 CSPでは約8千万ドルの予算で、700°C以上で作動するCSP開発を支援している。ベースロード電源としてCSPコストを0.02USD/kWh削減することを目指している。熱輸送・蓄熱媒体として新規熔融塩<sup>4-9)</sup>や、固体粒子（金属酸化物等）を用いるシステムの開発が進んでいる。特にタワー型集光系を用いた粒子レシーバの開発は世界的に一大トレンドとなっており<sup>4-10)</sup>、800°C以上の粒子加熱の成功例が報告されている。豪州では低密度・高熱伝導率のNaを使用して565°Cの水蒸気タービンによる1 MWプラントの実証に成功したが<sup>4-2)</sup>、700°C以上での利用も期待されている。

EUのHorizon 2020のSun-to-Liquidプロジェクトにおいて、熱化学サイクルによって水・CO<sub>2</sub>を共熱分解して合成ガスを製造、さらにジェット燃料に転換するソーラー実証試験が50 kWthの小規模ながら成功した。原料のCO<sub>2</sub>は空気中から回収するコンセプトである。この技術により製造したジェット燃料をスイス国際空港で使用する試験が開始される<sup>4-13)</sup>。

## [注目すべき国内外のプロジェクト]

### ■水力発電

#### 【国内】

#### • 需給調整市場の開設<sup>1-22)</sup>

2021年4月より広域的な調整力の調達を行う。需給調整市場の商品としては応動時間の遅い三次調整力から導入を行い、応動時間の速い調整力へ拡大していく予定。

三次調整力①（2021年4月～）： FIT特例制度を利用している再生可能エネルギーの予測誤差に対応する調整力。応動時間は45分以内、継続時間は商品ブロック時間（3時間）。

三次調整力②（2022年4月～）： ゲートクローズ以降に生じる需要予測誤差および再生可能エネルギーの出力予測誤差や、電源が予期せぬトラブル等で停止する電源脱落により生じた需要と供給の差について対応する調整力。応動時間は15分以内、継続時間は商品ブロック時間（3時間）。

#### • 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、水力発電事業性評価等支援事業、②地域理解促進等関連事業、③水力発電設備更新等事業、④水力発電実証モデル事業により、約67500 kW、

約4.3億kWh（補助事業対象発電所が全て運開を仮定）となるが、エネルギー基本計画目標値達成のために、更なる補助制度の継続、拡充が必要である。

### 【ヨーロッパ】

#### • HYDROPOWER-EUROPE プロジェクト

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により、技術的に透明性のある公開討論結果に基づき、水力セクターの研究とイノベーションのトピックスと技術ロードマップを達成するというプロジェクト。コンソーシアムは、ICOLD（大型ダムに関する国際委員会）、EASE（欧州エネルギー貯蔵協会）、EREF（欧州再生可能エネルギー連盟）、EUREC（欧州再生可能エネルギー研究センター協会）、IHA（国際水力発電会議）、SAMUI（Samui France SARL）、VGB（VGB PowerTech e.V.）、Zabalaベルギーにより構成される。

#### • XFLEXHYDRO、2019-2023：

スイスローザンヌ工科大学（EPFL）が主導し、水力発電技術により低炭素で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。EUの2030年のCO<sub>2</sub>削減目標を目標とし、1800万ユーロのプロジェクトにより、太陽光や風力発電などの再生可能エネルギーに投資する国が必要とする電力網の柔軟なサービスを現代の水力発電所がどのように提供できるかを示す。この4年間のプロジェクトには、欧州委員会のイノベーション&ネットワークスエグゼクティブエージェンシー（INEA）に、19の主要な公益事業、機器メーカー、大学、研究センター、コンサルタント会社が参加。スマートコントロール、革新的な可変速および固定速タービンシステム、バッテリーとタービンのハイブリッドなどの新しい水力発電技術を実証する。プロジェクト期間中にこれらの技術は既存のヨーロッパの水力発電所の7つのデモンストレーションサイトで試用される。ヨーロッパの水力発電所全体に適用するロードマップおよび、政府、規制当局、業界の市場と政策の課題を概説する影響評価を提供して終了する。

#### • Hydroflex、2018-2022：

ノルウェー科学技術大学が主導し、主要な公益事業、機器メーカー、大学、研究センター、コンサルタント会社を代表する16の組織で構成されている。本プロジェクトは、水力発電が非常に高い柔軟性を有し、全電力とストレージ機能を利用できるようにするための科学的および技術的ブレークスルーを目指し、将来の産業開発を成功させるための環境的、社会的、技術的基盤を構築する。研究およびイノベーション活動は①将来の電力システムで水力発電所が直面する需要を予測、②運転寿命と効率に大きな影響を与えることなく、1日あたり30回のスタートストップに対応する可変速フランシス水車の開発、③柔軟性の向上と強力な電源グリッドサポートのための新しい発電所の電気レイアウト、発電機のローターと磁化システム、およびパワーエレクトロニクスコンバーター制御の開発、④社会的受容性を評価し、社会的および環境的影響を軽減するための革新的な方法の試用を実施する。

### 【中国】

#### • 大規模水力発電所の開発（Motou発電所6000万kW級FS、100万kW水カタービンの開発）

### ■ 海洋発電

#### • 海流発電装置「かいりゅう」

（株）IHIは、第1期NEDOプロジェクトにおいて、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、100kW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」の実海域実験を2017年に行い、最大30kWの発電出力を確認した。装置の全長は約20mで、直径11mの50kWタービン2基（合計100kW）を搭載している。これに続いて、2018年にスタートした

第2期NEDOプロジェクトでは、同じ海域で、装置の長期実証実験を実施予定である。

#### • 防波堤に組み込まれた振動水柱型波力発電プロジェクト

防波堤は入射波の遮断と反射波の低減を目的としているが、近年は、防波堤内部に振動水柱型波力発電を組み、発電の機能も付加した多機能型装置が商用化されてきている。この形式は、日本で初めて提案されたもので、運輸省が1998～1999年に、山形県酒田市で50 kW装置の実証実験を行ない、近年でもNEDOプロジェクトで、最新の衝動型空気タービンをを用いた15 kWの実証実験が酒田市で実施されている。スペインのMutrikuプロジェクトは、この形式の装置で、2011年に、出力300 kWの世界初の商用化装置が完成し、継続運転を行っている。イタリアでも、長さ646 mの防波堤の新設に併せて、新型の空気室形状を持つ波力発電装置を多数組み込み、総出力2.7 MW装置の建設を現在、準備中である。

#### • MeyGenプロジェクト

スコットランドのTidal Power Scotland社他によって進められている「MeyGenプロジェクト」の第1期工事では、2017年に、スコットランドの北海岸とストローマ島の間の海域で、1.5 MWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基（世界最大、合計6 MW）が建設され、現在稼働中である。今後、新たに53基が追加建設され、合計86 MWの潮流発電ファームが建設される計画である。

### ■地熱発電

JOGMECでは2020年度から、地熱流体確認のための構造ボーリングとその前段の地表調査から成る「先導的資源量調査」を新設する予定である<sup>3-7)</sup>。これは、かつてのNEDO地熱開発促進調査と同じように、「高いポテンシャルが期待される一方で開発難易度が高い地点における有望地熱貯留層を把握するための調査」を国がリスクを取って実施する形であり、過去のNEDO調査結果が実開発に反映されたように、実際の発電所開発に繋がる成果が得られるのではないかと期待されている。

NEDOでは「簡易遠隔温泉モニタリング装置」の開発成果を発展させ、「地熱資源適正利用のためのAI-IoT温泉モニタリングシステムの開発」に2018年度から取り組んでいる。取得データの解析・解釈方法の確立のためのAI概念の適用とIoTシステムの開発等を行い、AI-IoT温泉モニタリングシステムを開発する。地熱発電との共生のための温泉への影響の定量的評価だけでなく、地熱発電が無い場合の温泉自体の適正利用のための評価も対象にしており、広く環境保全への貢献が期待できる。

次世代地熱発電の代表例である超臨界地熱発電については、2050年頃の普及を目指すロードマップが策定されており、2018年からはNEDOによって「超臨界地熱発電技術研究開発」が進められている。実際に超臨界領域に調査井を掘削して行う調査の実現を目標に、「超臨界地熱資源の評価と調査井仕様の詳細設計」、「調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発」、「超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発」および目標達成に資する革新的技術開発に取り組んでいる。

米国エネルギー省（DOE）のGeoVisionは、“適正コストで実現できる”未来のエネルギー源の一つに地熱を成し遂げる前提で広範な調査研究を行ったもので、米国のR&Dを理解する上で重要なレポートである<sup>3-11)</sup>。現在の26倍に当たる60 GWeを2050年の目標にしながら、在来型地熱・EGS・熱利用での明確な区分はせず、「探査の改善とキーテクノロジーの実現」、「規制プロセスの最適化」、「地熱の価値の最適化」、「利害関係者間の協働の改善」の4つのアクションエリアとその下の計16のキーアクションにまとめることで、目的に向けて合理的かつ分野横断的な今後の米国地熱のR&Dの方向性を示している。

DOEのPlay Fairway Analysisは、石油・天然ガス分野における「プレイ（成因や形状が類似する鉱脈（可能性ある領域）の群）」に注目して各種データの統合解析を行う手法を、一般に難易度とコストが非常に高く

なりがちな“地表兆候に乏しい伏在地熱貯留層”を発見できるようにするために応用する技術開発であり、我が国にも同様の困難さが多々あることから注目に値する<sup>3-12)</sup>。

DOEのフラッグシップPJであるFORGE (Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy) では、広範なEGS技術の商業化という目標に適した、温度175～225℃、中程度の透水性（しかし在来型地熱発電には不足）、極端なコスト増にならない1.5～4 kmのターゲット深度という、ユタ州ミルフォードが最終テストサイトに選ばれ、2019年第4四半期からPhase-3に移行している<sup>3-13)</sup>。ユタ大学を中心とするチームによって、フルスケールの坑井を用いる各種テストや方法論の構築が行われる<sup>3-14)</sup>。

アイスランドの超臨界地熱資源に関する研究開発プロジェクトは、第2期IDDP-2に移行し、2019年までに深度4,659 mまで掘削され500℃以上の温度が得られたとともに、ある程度の透水性を有することが報告されている。噴気試験は未実施であるが、次の深部坑井IDDP-3を掘削するために準備中である<sup>3-15)</sup>、<sup>3-16)</sup>。

イタリアの超臨界地熱発電の実用可能性調査であるDESCRAMLEプロジェクトは、2015～2018年に実施され深度2,900 mで500℃以上の岩体の存在を確認し、現在は終了している<sup>3-17)</sup>、<sup>3-18)</sup>。

スイスでは、かつて誘発地震が大きな問題になってEGS地熱の研究開発が停止になったが、2015年から新たにジュラ州Haute-SorneでEGS型地熱の研究開発が始まり、スイス政府から64 millionスイスフランの支援を得ている<sup>3-19)</sup>。また、ドイツ、フランスでも、1地点の規模は小さいもののEGS技術の適用を前提にするバイナリー方式の地熱発電所の開発が進んでおり<sup>3-20)</sup>、<sup>3-21)</sup>、また、英国でも開発中であるなど<sup>3-22)</sup>、非火山性で高透水性を有する深部熱水層タイプのEGS資源を利用する方式の地熱発電も広まってきている。

## ■太陽熱発電

UAEの新規DEWAプラント<sup>4-1)</sup>、豪州でのVast Solar社の50 MWプラントの建設計画<sup>4-2)</sup>がCSP/PVハイブリットプラントの実用例として注目される（さらにこの豪州Vast Solar社のプロジェクトではNaが熱輸送・蓄熱媒体として大型プラントで使われる点が注目される）。また、モロッコでは、低コストの集光系であるパラボリックトラフ（線集光）からの溶融塩をPV電力による電気炉で565℃へ再加熱する新型の800 MW CSP/PVプラントの建設計画を発表した<sup>4-3)</sup>。高温化に関しては、NREL等がGen3 CSPで開発している塩化物系溶融塩システムの開発<sup>4-9)</sup>、米サンディア国立研究所(SNL)や独DLRの固体粒子を用いる粒子ソーラーレーバ及び粒子蓄熱システムの開発が注目される<sup>4-10)</sup>。燃料化に関しては、水素製造水熱分解サイクルのソーラー反応システムが700 kWth (EU) と500 kWth (豪再生可能エネルギー庁：豪州で日本の開発技術を試験) で実証試験される<sup>4-11)</sup>。

## (5) 科学技術的課題

### ■水力発電

#### [更新需要・老朽化対策]

- ・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。
- ・初期投資の低減と、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。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) 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。

#### [需給調整・余剰電力への対応]

- ・再生可能エネルギーの大量導入に備えてさらなる水力発電・揚水発電の即応性や調整力向上が重要である<sup>1-23)</sup>。

#### [大容量化] (中国)

- ・超大容量水力発電所、単機容量1000 MW水車の開発。

### ■海洋発電<sup>2-10)</sup>

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、高効率・低コストの装置開発、台風等の荒天時における装置の安全性の確保、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、潮流の速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、浮体型装置の場合、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、逆電気透析法では、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の低減が、また、浸透圧法では、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アップが課題である。
- ・装置への生物付着対策としては、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（沿岸廃坑や海底高压タンクの利用等）、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）等がある<sup>2-11)</sup>。

### ■地熱発電

最近の我が国の地熱開発では、成功裏に進むケースは過去の調査データが豊富にある地域を対象にした場合であり、そうでない場合には発電所開発まで至らないケースが少なくない。調査データの一層の充実と共に、開発調査地点をより適切に選定できるようにする必要がある。JOGMECによる公的調査の拡充により「公開可能で共通的に用いることの出来る地球科学データ」の増加が期待され、それを反映した信頼度の高い資源ポテンシャルマップ情報の整備は公的・民間の両方の調査活動を促進する上で有用である。

国立公園内や近傍には従来から多くの資源が存在すると考えられている一方、これまで十分な調査ができていないために貯留層状況が把握されていないと考えられる。規制緩和に頼るだけでなく、空中物理探査に加えて小規模な掘削技術や各種探査技術などを開発し、自然環境への影響が少なく環境と調和できる詳細な調査・解析手法を実現し、貯留層的確な把握とそれに基づく適正規模の発電を進めるべきである。

調査・開発手法には一層のコストダウンが必要である。空中物理探査のように広域から多くの地下情報を収集できる手法の開発や、掘削ビット等の資機材の長寿命化や工期の短縮、自動化・省力化・ネットワーク化の積極的な活用など、コストダウンに資する改良は同一予算での調査内容の充実化にも繋がり、ひいては成功事例の増加にも繋がり得る。

現在利用可能な熱水性地熱資源だけでは量に限界があることから、既開発領域の周辺や、過去調査で熱水や透水性が不十分とされた地域、従来は利用困難な強酸性流体を胚胎する貯留層や大深部の超臨界領域など、非在来型の地熱資源の開発が望まれる。そのため、そのような資源について最新技術を用いた調査・評価が一層進められるべきである。人工貯留層の造成などの地下改質技術や計測・モニタリング技術、シミュレーション技術の一層の向上も求められる。また、超高温や強酸性、膨潤性岩盤などの過酷環境に対応できる掘削技術（傾斜掘削を含む）の向上、各種材料の対環境性能の向上および配管や発電プラントの改良などの技術開発が必要である。

世界的に見て、EGS型の地熱開発は地熱の利用増大に必要不可欠と見なされている。今後はEGSの適用対象を一層広げ、涵養注水、高温の低透水性岩体、超臨界資源などに限定せず、既開発領域の内部や周辺領域も含めたEGS技術開発として広く展開すべきである。NEDO<sup>3-10)</sup>と同様に米国でもEGSを連続的に捉えており<sup>3-11)</sup>、インフィールドEGS（既設発電所の範囲内でのEGS）、ニアフィールドEGS、ディープEGSと分類し、既開発済みの在来型地熱発電から拡大展開できると整理している。また、独仏のEGSは、地下の性状としてはインフィールドEGSに近い。

EGSについては、「注入井側からポンプで流体を圧入しながら生産井側では自然噴出を待つ」という完全閉鎖システム向けの方式だけでなく、生産側に汲み上げポンプを置く方式や、注入・生産の両方にポンプを置くプッシュプル方式など、地下性状に応じたEGS型生産の方法を検討すべきである。また、再生可能的に永くエネルギー採取をするためには、地下の循環経路の周辺には十分な自然対流が生じることが不可欠であり、周辺岩盤の性状評価や比較的広領域に対する透水性改質の可能性も検討すべき課題である。

地熱発電の増加には、開発以前に多くの現地調査が必要であり、そのため地域社会に円滑に受け入れられることが不可欠である。社会科学的なアプローチも含め、そのためのツールや方法論の構築は依然として必要性が高い。低環境負荷である調査・開発手法の開発、地熱の調査・開発の着手前からの温泉モニタリングの実施、温泉への影響が生じない地熱開発手法、誘発地震の評価や抑制についての研究などの他、調査と開発とを社会においても分離して認知されるようにすることで段階に応じた適切な社会受容を得られるために、全体の運営スキームの改良も求められる。

#### [今後取り組むべき研究テーマ]

1. 地熱井掘削の成功率を向上させ、地熱発電開発コストを低減するための高精度の革新的地下イメージング技術・地熱探査技術の開発や、掘削技術の開発が重要である。
2. 高度に持続的な地熱発電を可能にするための、温泉や地表の地熱徴候も含んだ地熱系/地熱貯留層のシミュレーション技術およびモニタリング技術の確立。我が国では温泉との立地の競合という課題があり、細心のモニタリング技術が必要とされている。
3. 温度と透水性、応力場などのEGS技術の適用に必要な情報を含む、資源ポテンシャル評価と情報整

備。実用開発に向けたEGS技術の適用可能域を示すことで、DOEの言うインフィールド/ニアフィールドEGSから段階的に研究開発を促進し、既存地熱地域および周辺からの地熱利用量を拡大する。

4. 発電機の効率向上や発電設備全般の耐環境性能の向上。地熱資源の利用範囲拡大に伴って予想される熱水性状の低品質化（より低い温度、強い酸性など）に対応する。
5. 地域社会との関係を段階的・順応的なものとし、地熱の調査開発の各段階に相応しい社会的受容性と地域メリットの最大化を実現できる地熱資源開発の全体的スキームの構築が必要である。

## ■太陽熱発電

蓄熱システムの低コスト・高温化に関しては、潜熱蓄熱や化学蓄熱の導入が大きなブレイクスルーとなる。潜熱蓄熱では熔融塩PCMカプセルや合金系の開発、化学蓄熱では、これまで十分な知見のある炭酸塩・水酸化物系の蓄熱材をCSPプラントに組み込むシステムの実証試験が必要である。長期的には、さらに高温（900～1500℃）で作動する金属酸化物酸化還元系による蓄熱システムの開発が重要である。化学蓄熱の反応の応答性も課題となる。

超臨界CO<sub>2</sub>タービンの導入が重要課題であり、それには700℃で作動する熱媒体、蓄熱システムの開発が必要である。熱輸送・蓄熱媒体として塩化物系熔融塩や金属Naが有望だが、防食技術の開発が課題。800℃以上の熱輸送・蓄熱媒体としては固体粒子（金属酸化物等）が有望である。太陽集光で800℃以上に粒子加熱するソーラーレーザ開発には成功しているが、粒子循環システム、熱交換器の開発が課題である。

長期的には、水・CO<sub>2</sub>熱分解サイクルによるソーラー燃料製造が注目される。特に空気中からCO<sub>2</sub>回収する技術開発と連携し、ソーラーメタノール、ジェット燃料の製造を目指す研究開発が重要である。ソーラー応システムの大規模化と、大規模化で効率を向上できるかが課題である。

## (6) その他の課題

### ■水力発電

- ・ 初期投資が大きく、助成金、補助金の継続的な利用体制の整備が必要
- ・ 電力需給調整市場一次、二次調整力への対応技術（即応答性）の構築
- ・ 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。簡素化が必要
- ・ FIT認定などに5年程度を要し、計画から運転開始まで約10年かかる。短縮化が必要

### ■海洋発電

#### ・ 実証試験海域の整備

我が国では、現在までに、国が、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電、洋上風力発電に関する6県8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や波浪計測等のインフラ整備に関して、国からの資金援助が無いため、実証試験海域は、まだ本格稼働していない。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としての資金で賄うことで、装置の淘汰が行われ、実用化に至る高性能な装置が早期に実現されるため、国が実証試験海域のインフラ整備を早期に行うことが期待される。

#### ・ 開発ステージにおける開発資金の支援とリスク管理<sup>2-11), 2-12)</sup>

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1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

我が国の研究開発費の支援・補助については、現在、ステージ1、2は文科省の科研費や基礎研究費等の助成金、ステージ4、5は経産省やNEDO等の補助金（必要な研究開発費の2/3を補助）の形で行われているが、ステージ3の支援が無いために、基礎技術の革新が、経産省やNEDOの実証試験に繋がっていない現状がある。今後、ステージ3の支援・補助を行うシステムを確立することが期待され、有望なものについては、100%補助事業で進めることが望ましい。また、ステージ2の提案に関しても、提案内容によっては、経産省やNEDO等の100%補助で支援することが期待される。

また、リスク管理に関しては、技術的な面からは、①それぞれのステージでの試験方法の標準化、②ステージゲートでのチェック項目の正しい選定が必要である。これらについては、IEC/TC114部会で、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電等に関する12の技術仕様書が現在作成済みである<sup>2-8)</sup>。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、我が国の場合、実海域プロジェクトが少ないために、ほとんど例がなく、今後の課題である。また、海洋エネルギー利用装置の認証システムについても、IECの中で検討されているので、これを参考にすべきである。

経済的なリスクに関しては、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。これらの不確実性のリスクについては、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。

また、社会的リスクとしては、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、関係者の同意プロセスを整備する仕組みを設ける必要がある。最近実施された我が国の実証試験海域の選定の際には、地元との漁業協調が選定の評価項目とされている。

## ■地熱発電

FIT制度には大きな効果があるが、必ずしも細部は地熱の特性に合致していない。現在、15 MWeを境に2段階の設定となっており、その前後で事業採算性が大きく変化する。しかし、地熱の場合は他の再エネと異なり、人間が自由に出力を設定することは非合理性が大きく、地熱貯留層ごとの特性に応じた最適な出力を目指すことが、貴重な資源の有効活用の観点から本来は相応しい。発電規模に応じた価格設定の細分化など、地熱に適した改正が望まれる。

他の地熱国では、地熱専用の法律など資源開発向けの法律が適用されているが、わが国では温泉法を代表とし、他が主目的である種々の法律が適用されている。そのため、手続きの煩雑さの他、国家的命題の地熱に対する全国統一的な科学的一貫性が担保できておらず、資源特性をふまえた鉱区管理のような機能もない。そのため、既開発域の近傍でも新規事業者の調査が認められ、地熱資源の適正管理や温泉影響に対する懸念が生じる場合がある。これまでの法とも調和的かつ適正な資源開発・管理に資する一元的な「地熱法」を制定することで、情報公開と新規参入の促進、環境調和型開発の徹底、リードタイムの一層の短縮などが期待される。

10年間以上の停滞期のために、特に、地熱に関係する中堅世代の人材不足が公的、民間の両部門で深刻である。2012年頃から政策的な研究開発が再開しているものの、人材育成には時間を要するため依然として状況は大きく変わっていない。地熱の特性も踏まえ、長期間安定的な大学・研究機関向けの研究開発スキームや民間開発を支援するスキーム、研修制度の継続などにより、地熱に携わる人材の厚みを増すことが期待される。

温泉事業者の懸念など、有望地域であっても地元との調整が困難な場合は少なくない。その一方で、調査から実際の発電所操業に至るのは僅かであることから、必要以上に地域内での摩擦を生じさせている可能性もある。地表を主とする概査、坑井掘削を伴う調査、実開発のための精査と建設、さらには規模の拡大まで、本来は段階毎に異なる判断基準や地域の参画レベルで、地域のコンセンサスを得ながら順応的に進めていくべきである。社会的受容性を高めるための体制づくり、ツール、全体スキーム、政策支援のあり方などが中長期的な課題である。また、小規模発電から段階的に開発を進めることは、環境影響の見極めなどの点で優れるがコスト高となる恐れがある。その対処策としては、ドイツが導入しているような開発に伴う保険制度の導入も検討する価値がある。

■太陽熱発電

CSPの国際的な研究プラットフォームにSolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Systems) があるが、日本は未加入であり、これにより研究開発が大きく阻害されている。SolarPACESは国際エネルギー機関IEAの実施協定であり、国単位での参加が必要である。現在、SolarPACESには20カ国が参加しており、参加国間で共同研究開発を積極的に行っている。これらの成果は一部の表面的な部分しか開示されないため、非参加国は重要な研究成果を共有できない。実施協定への参加費用は年間1万ユーロとのことであり、ぜひ参加することが必要と考える。

(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 ●システム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	△	→	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が実施されている。 ●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 カナダ	基礎研究	△	→	●ダムや貯水池が不要な低落差水カタービンの開発が進められている <sup>1-24)</sup> 。 ●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。

2.1 俯瞰区分と研究開発領域  
エネルギー区分

欧州	基礎研究	○	↗	<p>【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。特に、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。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●小型およびマイクロ水カタービンアプリケーションの開発。</li> <li>●水中および地下の水力貯蔵のコンセプト構築。</li> <li>●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</li> </ul> <p>【スκαν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、昨年、水力発電で200 GWhを達成、2023年までに600 MWを追加する予定。</p> <p>【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。</p> <p>【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。</p> <p>【スイス・オーストリア】 国境を越えて、900 MWのナントダグ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。</p> <p>【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。</p> <p>【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。</p> <p>【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。</p>
中国	基礎研究	○	↗	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●地方の水力発電の基盤改善、小規模の水力発電を開発。</li> <li>●水の生態学的管理と保護の強化。</li> <li>●法による水力管理の総合的な強化と科学技術による水力開発促進。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>揚水発電所の設備容量では世界第1位。2017年12月末現在、揚水発電所の設備容量は2,849万kW、建設中の発電所は3,871万kWに達する。揚水発電所の設備容量は、2025年までに1億kWに達し、総設備容量の約4%を占める。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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●大容量1000 MWタービンユニット：フランス水車の設計開発。</li> <li>●クレーンビーチ水力発電所（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月運開。</li> <li>●揚水発電所：性能、信頼性などの主要技術、運転条件転換に関する研究。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<p>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。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>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<sup>1-25)</sup>。</p>

■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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●第二期（2013年度～2017年度）、第三期（2018年度から5年間）の海洋基本計画において、海洋再生可能エネルギーの実用化のための技術開発と発電事業の産業化の推進、装置の実証実験のための実証フィールド建設の推進が謳われた。</li> <li>●海洋温度差発電：佐賀大学では、1973年から現在まで、熱交換器、システムに関する研究を継続実施し、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現在実施中。</li> <li>●波力発電：佐賀大学、日本大学他は固定式、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。佐賀大学では、波力発電の性能解析用の新しい粘性流体解析法を開発</li> <li>●潮流・海流発電：水中浮体式海流発電、水平軸型及び鉛直軸型潮流発電装置に関する要素技術研究を大学や企業で継続実施中。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●海洋温度差発電：沖縄県久米島の100 kWプラントを用いて、2段階ランキンサイクルシステムの実証試験を継続実施中。</li> <li>●波力発電：東京大学が神奈川県平塚で、固定型の45 kW振り子式装置の実証実験を実施中。東京大学他が、福井県越前海岸でブローホール型30 kW装置の実海域実験を継続実施中。</li> <li>●潮流・海流発電：NEDOプロジェクトで、(株)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装置の長期実証実験を実施予定。</li> <li>●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8海域を選定した。しかし、系統連携は未接続。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●The U.S. Department of Energy (DOE) Water Power Technologies Office's (WPTO) が海洋エネルギー関係の開発費を拠出（2008年度～2018年度で、波力発電45%、潮流発電17%、海洋温度差発電1%、資源量評価等37%の開発費配分）。</li> <li>●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いる。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。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●30企業が海洋エネルギー利用装置に関する研究を行っている。波力発電、潮流発電、海洋温度差発電に関する13の実証実験サイトを利用。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。Ocean Energy社は浮体式の500 kW振動水柱型装置をハワイ域での設置を準備中である。</li> <li>●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が稼働中である。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。2050年までに、海洋再生可能エネルギー関係で、100 GWの設備容量（欧州の電力消費量の10%）、40万人の雇用確保を目標としている。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。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●2030年までに、全電力の65%を再生可能エネルギーによる電力とすることを目標としているが、風力発電や太陽光発電がメインである。</li> <li>●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。</li> </ul> <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●2030年までに、全電力の40%を再生可能エネルギーによる電力とすることを目標としているが、風力発電のウエイトが大きい。</li> </ul>

2.1 俯瞰区分と研究開発領域  
エネルギー区分

	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●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実施中。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●スコットランド政府は、海洋エネルギーに関する世界のリーダーを目指し、これまで、90の波力発電関連プロジェクトに、40百万ユーロの研究開発費を投じている。</li> </ul> <p>【ポルトガル】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●波力発電と洋上風力発電を中心に研究開発を実施している。</li> <li>●波力発電に関しては、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。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●欧州委員会では、海洋再生エネルギーの応用研究・開発に関する公的ファンド（Horizon2020）を加盟国に配分している（2018年：4件、2019年：3件）。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●浮体式の280 kW潮流発電に関する実証実験を実施中である。</li> <li>●連結浮体式波力発電に関するNEMOSプロジェクトやブイ型波力発電装置18 kW×2基、合計36 kW）に関する実証実験が進行中。</li> </ul> <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●Sabella潮流発電装置（1 MW）は2015年にグリッドに接続され、稼働中である。OceanQuest社は実海域実験用の1 MWの鉛直軸型潮流発電を製作済み。</li> <li>●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、SEENEOHとPaimpol-Brehatの2か所を保有。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●英国は海洋エネルギー利用に関する世界のリーダー役を担っている。</li> <li>●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。Orbital社は2 MWの浮体式潮流発電装置の実証実験を実施中。</li> <li>●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をオークリー諸島に保有。世界各国からの装置の実証実験を実施中で、地域の雇用に貢献している。この他に、Wave Hub等の12の実証実験サイトを保有。</li> </ul> <p>【ポルトガル】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●海底ヒンジ型振り子式波力発電装置（WaveRoller、500 kW）や浮体式の振動水柱型波力発電装置（MARMOK-A-5）の実証実験を実施中。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●浙江大学では、650 kWの水平軸型のプロペラ式潮流発電装置等を開発し、研究開発を継続中。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●LHD Technology社の1.7 MW潮流発電装置が稼働中で、中国の固定価格制度€0.33/kWhが適用された。</li> <li>●2017年から稼働中の可動物体型波力発電装置Sharp Eagleを200 kW装置へアップグレード。</li> </ul>

韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●KRISO が 20 kW の海洋温度差発電や防波堤組み込み式の振動水柱型波力発電に関する基礎研究を実施中。波力発電と潮流発電の実証フィールド建設を建設中。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Sihawa 潮汐発電所（254 MW、2011 年の建設）が稼働中。</li> <li>●KRISO が Jeju 島に建設した 500 kW 振動水柱型波力発電装置が稼働中。</li> <li>●政府が Uldolmok に建設した 1 MW 潮流発電装置が稼働中。</li> <li>●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。</li> </ul>
カナダ	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●10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。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●世界的な潮流発電実証フィールド FORCE を所有し、多数の実機スケール実験を実施中。</li> <li>●2社（SME 社の浮体型 280 kW 装置、Yourbrook Energy System 社 40 kW 装置）の潮流発電装置が稼働中。</li> </ul>

■地熱発電

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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●産総研・再生可能エネルギー研究センター（FREA）は、超臨界地熱資源開発や地熱貯留層モニタリング技術、温泉モニタリング技術などの課題に取り組んでいる。また、九州大学などいくつかの大学が総合的な地熱研究を行っている。</li> <li>●NEDO では、地上機器周りの基礎的な検討や強酸性流体活用のための化学処理・材料開発、スケール対策技術、将来の大規模発電に向けた超臨界地熱資源の開発に関する研究を実施している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●JOGMEC は、2020 年から先導的資源量調査を新設し、これまでの空中物理探査や地上調査と合わせて地熱資源ポテンシャル調査を進める計画である。また「地熱発電技術研究開発事業」として、弾性波による貯留層探査技術、貯留層への水の涵養および透水性改善の技術、地熱貯留層掘削技術の開発等を進めている。</li> <li>●NEDO では、未利用資源の活用に向けた高性能低沸点媒体や温泉・蒸気のハイブリッド発電などのパイナリー発電関連の技術開発、環境や地域社会との共生のためのエコロジカル・ランドスケープデザイン手法や簡易遠隔温泉モニタリング装置の開発、さらに、地熱発電の設備利用率向上を目指した IoT-AI 技術を用いる O&amp;M 最適化手法などを開発している。</li> <li>●温泉発電を主とする小規模発電所は 45 力所 6.941 MWe（2017 年度末）となっている。比較的規模の大きな開発も進み、岩手県松尾八幡平（7.499 MWe）、秋田県山葵沢（約 46.2 MWe）が操業開始し、さらに数 M～15 MWe 規模の発電所が向こう数年以内に運転開始予定である。2020 年の全設備容量は 550 MWe となる見込みである。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●DOE では直接熱利用も含め、多面的な研究開発に継続的に取り組んでいる。技術開発予算は近年増加しており、2020 年は約 120 億円となり、厚みのある研究開発を進めている。</li> <li>●2017 年からサウスダコタ州に小規模の EGS の実験サイト（EGS Collab）を作り、完全コントロール環境下での原位置試験等により、岩石中のき裂の挙動や透水性向上に関する研究を実施している。</li> </ul>

2.1 俯瞰区分と研究開発領域  
エネルギー区分

米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Efficient Drilling for Geothermal Energy (EDGE) として、2025年までに標準的な掘削速度を2倍（1日あたり掘進長を76 m以上）にすることを目標に、工期中の掘削停止時間の短縮、革新的掘削技術の開発、研究からの技術移転加速のための連携、という3つの分野で2018年から研究開発を進めている。</li> <li>● 機械学習の地熱への適用を進めるプログラムが、掘削ターゲット選定などの資源探査から発電所運用にわたってのライフサイクル全体での技術革新とコストダウンを目指して、2018年から開始されている。</li> <li>● 2018年からは、水をほとんど使わずに坑井刺激を行い地下の透水性を改善する手法の開発（Waterless Stimulation）や、加圧区間を限定して効率的な坑井刺激を行うために高温・過酷環境下でも坑井内での区間分離を可能にする技術開発（Zonal isolation technologies）も開始している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 世界最大の地熱発電国であり、2019年時点の総設備容量は約3,700 MWeである。2015年以降、新規地熱地域の開発は無いものの、発電設備の再整備や統合化、他再エネとの共同運用、空・水冷複合型冷却による夏場の出力向上、および既存地熱地域の拡張などによって競争力を維持し、発電量はここ5年間で7～10%の伸びを示している。</li> <li>● 探索的掘削が必要なため難易度とコストが非常に高くなる“地表兆候に乏しい伏在地熱貯留層”を発見する技術として、石油・天然ガス分野で成果を挙げているプレイ（成因や形状が類似する可能性域の群）に注目して各種データの組み合わせ評価等から高透水性領域を抽出する Play Fairway Analysis が、2014～2020年で検討されている。これまで、熱や透水性の評価で好結果を得ている。</li> <li>● FORGE（Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy）はDOE地熱研究のフラッグシップで、商業的なEGS発電の方法論を確立する目的で、民間企業では出来ない最先端の技術開発やテストを行って革新的な科学技術の加速を目指している。2019年第4四半期からフェーズ3（テクノロジーのテストと評価）が始まり、ユタ州ミルフオードが最終サイトに選ばれ、ユタ大学を中心とするチームによってフルスケールの坑井を用いる各種テストや方法論の構築が行われる計画である。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	<p><b>【EU】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Joint Research Centre (JRC) はヨーロッパ全体の地熱資源ポテンシャルやEU支援プロジェクトの概要をまとめたレポートを出している<sup>3-23)</sup>。全EUの経済的可能性があるポテンシャル（EGS込み）は、2030年時点で22 GWe、2050年時点では522 GWeと報告されている<sup>3-24)</sup>。</li> <li>● メキシコとのEGSや超臨界地熱に関する共同研究であるGEMexプロジェクトが2016～2020年に行われ、メキシコ内陸のAcoculcoおよびLos Humeros地域にてEGSと超臨界地熱資源調査や技術開発を実施している。</li> </ul> <p><b>【フランス】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 全研究分野から171のLaboratories of Excellence (LabEx) が選ばれているが、ストラスブール電力会社、ストラスブール大学およびCNRS（フランス国立科学研究センター）などからなる「The G-Eau-Thermie Profonde」 Laboratory が受理し、2012年から9年間（初期は3 M€規模）の深部地熱資源の研究開発予算がついている。最近の年間予算は約2 M€。</li> </ul> <p><b>【英国】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 近年新たなEGS地熱のR&amp;Dが始まり、EGS型地熱の基礎資源量の新しい評価結果も公開されている。GWattプロジェクトという、より深部のEGS利用の可能性を調べるプロジェクトも行われている。</li> </ul> <p><b>【イタリア】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 世界で初めて地熱発電を実用したこともあり、独自のタービン技術、探査技術等の研究が行われている。</li> </ul>

欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●超臨界地熱の実現可能性調査としてDESCRAMBLEプロジェクトが2015～2018年に亘って行われ、2017年に深度2,900 mで500℃以上の岩体の存在を確認した。</li> </ul> <p>【アイスランド】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●アイスランドでは、深度4～5 kmの高温地熱系へ掘削し調査することを目的に深部掘削プロジェクト (Iceland Deep Drilling Project : IDDP) が実施されており、そのための基礎研究も盛んに行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●EUでは、「地熱利用が環境および社会に与える影響の完全な理解」と「地熱資源を広く費用対効果の高い方法で開発できるシステムの構築」の2つを大きな課題として、研究及び革新的開発を促進するためのフレームワークであるHorizon2020の他、プロジェクトの資金調達の支援 (CEF Energy) や投資ファンド機能 (ESIF)、中小企業の競争力強化に資するもの (COSME) など、多岐に渡る支援策を用意している。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●2019年にはカーリーナサイクル2か所を含む10か所のバイナリ方式地熱発電所が稼働しており、総発電容量は43.05 MWeである。2015年以降新たに、South German Molasses Basin内の4か所に合計17.7 MWeが追加されている。ミュンヘン北東部でも2020年度以降を目標に4.3 MWeの開発が進められている。</li> </ul> <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●実用的な開発を火山性地熱資源とEGS型資源を対象に行っている。前者はグアドプール (カリブ海の領土) 地域にだけあり、これまで15 MWeの地熱発電が開発され、地域の必要電力の5%をまかなってきた。本地域は2016年にイスラエルのORMAT社に売却されており、今後2坑井が追加されて2022年頃には25 MWe程度に拡大される予定である。</li> <li>●EGS型資源の開発では、かつてのEUパイロットプロジェクトである北東部アルザス地方Soulz-sous-Foretsで、2016年から1.7 MWeの商業発電を継続している。</li> <li>●アルザス地方ストラスブール近郊のVendenheimとIllkirichにおいて、地元電力会社がそれぞれ、40 MWthの熱供給と6 MWeの発電、25 MWthの熱供給と夏場のみの3 MWeの発電という熱電併給のEGS型地熱開発を計画し、各種調査を実施している。電力会社はアルザス北端部にも400 km<sup>2</sup>以上の探査の権利と40 km<sup>2</sup>程度での地熱開発の権利を有しており、2018年頃から反射法地震探査などの各種調査を実施している。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●南西部Cornwall地方において2つのEGS型のプロジェクトが実施中である。そのうちUnited Downsプロジェクトでは、掘進長5,275 mの生産井と2,393mの注入井が2019年に掘られ、180～185℃に達することが報告されている。2021年頃までに商業発電を実現することが目標とされている。</li> <li>●United Downsプロジェクトでは、ドイツ企業とGFZポツダムが共同開発したInnova Rigという、高度自動化を施した掘削装置を用いていることが特徴の一つである。</li> <li>●もう一つのEGSプロジェクトであるEdenプロジェクトでも、初期の開発予算が確保され、最初の深部井の掘削の準備が進められている。</li> </ul> <p>【イタリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●総設備容量915.5 MWeは全電力需要に対しては2.1%だが、トスカナ地方では30%もの需要を賅っている。20 MWeの発電所が、2020年の運転開始を目標に建設が進められている。</li> <li>●現在イタリアでは、再生可能エネルギー全般に対する基本インセンティブが削減され少額であることや、地熱は他再エネよりも利用可能なインセンティブが少ないことなどから、顕著な成長を望みがたい状況となっている。</li> </ul>

2.1 俯瞰区分と研究開発領域  
エネルギー区分

				<p>【アイスランド】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●IDDPプロジェクトは、第1期に深度2,114 m付近で超臨界温度領域の資源の存在を確認し、第2期 (IDDP-2) ではサイトを変えて深度4,659 mまで掘削して500 °C以上の温度とある程度の透水性を深度3 ~ 4 km付近で確認しているが、2020年5月時点では噴気試験は実施されていない。現在は、次の深部坑井が計画されている。</li> <li>●2019年のアイスランドの総設備容量は663 MWeに至り、国内発電の60 %以上をまかなっている。2020年には755 MWeに増加すると予想されている。</li> </ul> <p>【トルコ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●世界地熱会議2005開催後から地熱開発が明確に増大しており、2015年以降は200の生産井と90の還元井が掘削され、世界トップクラスの721 MWeの増加があった。現在の総設備容量は1,549 MWeであり、さらに48 MWe相当が建設中で、予算措置が付いたが着工前なのが332 MWe程度ある。</li> <li>●熱水性地熱資源のポテンシャルは4,500 MWeであるが、EGS型地熱資源のポテンシャルも約20,000 MWeと評価されている。EGS型資源の調査では、深度4,500 mの井戸で295 °C以上に達したことが報告されている。</li> </ul> <p>【スイス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●過去のEGS研究開発の教訓を生かしながら、現在2プロジェクトを進行中で、さらに2つが調査段階にある。2015年に始まったHaute-Sorneプロジェクトは、一時その実施を巡って近隣住民との裁判もあったが、2018年にはプロジェクト遂行が認められ、64 millionスイスフランの補助が与えられている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●中国科学院などが、チベット南部や雲南省などの坑井データをもとに地熱ポテンシャルの評価をしており、EGSに関する調査も行っている。</li> <li>●2018年頃には、中国で最初の地質資源のカスケード利用の研究開発拠点が、当初発電容量0.280 MWeにて河北省西安に建設されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●チベット南部の八羊井 (Yangbajing) 地熱発電所で16 MWeの蒸気フラッシュ発電が操業を開始しており、四川省の康定 (Kangding) には0.4 MWeのテストプラントが、雲南省の徳宏 (Dehong) では2 MWeの発電所が建設されている。2019年には、中国の総設備容量は34.89 MWeである。また、中国は暖房や地中熱利用などの直接利用にも力を入れており、その設備容量やエネルギーは世界一である。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●KIGAM (韓国地質鉱物資源研究院) や各大学が積極的に地熱探査技術やバイナリー発電技術の研究をしている。国内数百以上の地温勾配や熱流量のデータから地熱データベースおよび国内の地熱分布をとりまとめ、地下6.5 kmまでの技術的に可能性のある発電ポテンシャルを19.6 GWeとしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●NEXGEO社がKIGAMや大学と浦項 (Pohang) において、EGS発電の開発研究を行い深度4 kmを超える掘削が実施されたが、2017年に水圧破碎時に被害を伴う地震がサイト近傍で発生してしまい、その影響からEGSに関するプロジェクトは全て停止している。</li> </ul>
その他の国・地域	基礎研究	○	→	<p>【台湾】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●1970年代から資源調査等を行っており、2014 ~ 2019年の研究開発予算は約1250万ドルだった。</li> </ul> <p>【ニュージーランド】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●オークランド大学では地熱トレーニングコースを長年にわたって実施し、毎年国際WSを開催するなど国際的な観点で技術者養成を行っている。</li> </ul>

	応用研究・開発	○	→	<p><b>【インドネシア】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●世界有数の地熱ポテンシャル（約29 GWe）があり、有望地域の調査が多く実施されているが、FIT価格などの政策がこまめに変わっており、開発者の困惑を招いている。2019年末時点の導入容量は2,138.5 MWeであるが、2020年および2025年の見込みを2,289 MWeおよび7,000 MWe程度としている。</li> </ul> <p><b>【フィリピン】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●ここ5年間では12 MWeの増加に留まったが（1,918 MWeの設備容量で世界3位）、有望な探査段階のサイトが18か所あり、2021～2026年の間には約91 MWeの増加が見込まれている。</li> </ul> <p><b>【台湾】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●1970年代～1990年代には中小規模発電所があったが、2019年に新たに0.3 MWeの発電所が清水（Cingshuei）にて操業を開始し、さらに4.2 MWeの設備を追加建設中である。2021～2022年にかけて12のMW級発電所の建設が計画されており、総設備容量は150 MWeに達する予想である。</li> </ul> <p><b>【ニュージーランド】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●2000年代に地熱発電量を急速に増大させたが、現在は国内需要を十分まかなえる程であるため、新規開発に向けての掘削は減少している。技術力を有効利用するためニュージーランド外務省が海外開発援助プログラムを運営し、インドネシア、東アフリカ、カリブ海諸国などの地熱開発を支援している。</li> <li>●2018年にKawerauにて25 MWeの発電所が稼働を開始し、Ngāwhaでは31.5 MWeの発電所が建設初期段階にあるなど、緩やかに増加している。2020年時点の総設備容量は1,064 MWeである。</li> </ul> <p><b>【ケニア】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●ケニアの地熱発電開発は2015～2019年には世界トップクラスの伸びを示し、国の全発電容量の29%にあたる865 MWeになっている。さらに資金確保済みの複数の計画があり、2020年には1,193 MWeに達する予想である。</li> <li>●ケニアの地熱開発の特徴は、坑口発電を積極的に導入して初期収益確保のタイミングを大幅に早めている点である。坑口発電は、生産井の仕上げ後、発電所全体が完成するよりも前のタイミングで、小規模な地熱発電機を生産井の極近傍に設置し、先行して売電事業を行いながら並行して発電所全体の開発を進める技術と考え方である。現在まで15台の坑口発電機を設置し、初期収益確保までの期間を約36か月から6か月へと大幅に短縮している。</li> </ul>
--	---------	---	---	--

■太陽熱発電

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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●愛知製鋼、新潟大学、北海道大学、東京工業大学が水酸化カルシウム系<sup>4-7)</sup>、合金系、金属酸化物酸化還元系、塩化物溶融塩系の高温の蓄熱システムや熱媒の開発を行っている。また、IHI、新潟大学が太陽熱による燃料製造システムの開発を行っている。新潟大学が開発した水熱分解水素製造システムは豪州再生可能エネルギー庁の補助で、豪国研CSIROと連携して豪州において500 kWthで実証試験される<sup>4-11), 4-12)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●豊田自動織機はパラボラトラフのような線集光用レシーバを開発し、海外で評価している。</li> </ul>

米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●DOEが2018年からGen3 CSP (Generation 3 Concentrating Solar Power Systems) で約8千万ドルの予算でCSPプロジェクトを支援。NREL、Sandia国立研究所、Brayton Energy等の13の国研、大学、企業が参加。700°C以上のCSPシステムの開発を目指す。熱媒体は熔融塩、固体粒子、気体の3種類を並行して研究。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●米国内でのCSP建設の新規計画はなく、米企業はコスト的に有利な発展途上国でのCSP建設に乗り出している。国内での大型の開発は上記のGen3 CSPのプロジェクトにおいてダウンセレクトしたシステムが第3フェイズで大型実証試験される予定である。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	<p><b>【EU】</b> Hrison 2020で下記を含む16プロジェクトが行われている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・NEXT-CSP：固体粒子を熱輸送・蓄熱媒体とし800°Cの運転を可能とするシステムを開発中。</li> <li>・Socreates：炭酸カルシウムによる800°C以上の太陽熱流動層化学蓄熱システムを開発中<sup>4-6)</sup>。</li> <li>・Sun to Liquid：金属酸化物酸化還元系による熱化学サイクルを用い、太陽集熱でCO<sub>2</sub>と水から合成ガスを製造し、さらにジェット燃料に転換するCCUプロジェクトが50kWthで成功<sup>4-12)</sup>。</li> </ul> <p><b>【ドイツ】</b> ●ドイツはスペインとともにEUの中でCSP開発の中心的存在。DLRとFraunhofer研究所が太陽熱に関する研究の中心となっている。CSP及び太陽熱による燃料製造などにかかわる多くの分野で基礎研究を行っている。EUのプロジェクトにも多数参加している。DLRが1.5 MWの集光設備を持ち、EUでの大型実証サイトの一つとなっている。</p> <p><b>【フランス】</b> ●国立研究機関であるCNRSのPROMES研究ユニットが1 MWth太陽炉を持ち、研究開発の中心的役割をしている。太陽熱による燃料製造の研究も活発であり、メタンから水素とカーボンナノチューブを合成する反応器開発を日本のIHIと共同開発中。その他、低コスト顕熱蓄熱材料の基礎研究。固体粒子を使用するレシーバ、蓄熱システムに関する研究。</p> <p><b>【英国】</b> ●英国では太陽熱発電に関する研究は一部の大学、企業を除き行われていない。Calix社は上記Socreatesプロジェクトに参加<sup>4-6)</sup>。</p> <p><b>【スペイン】</b> ●国研であるCIEMAT、CENER、またIMDEA Energy公立研究所、並びに各大学、民間研究機関で活発に研究が行われている。CIEMATやIMDEAは大型の太陽集光設備を持ち、EUの大型の実証試験サイトになっている。高温用熔融塩の研究、物性値向上を目指した分散系熔融塩の研究、蓄熱システム全般の基礎研究等多方面。太陽熱利用燃料製造では上記のSun to Liquidプロジェクトで小型のパイロットプラントの実証試験をIMDEAが行った<sup>4-12)</sup>。</p>
				応用研究・開発
	基礎研究	◎	↗	<p><b>【EU】</b> ●DOEが2018年からGen3 CSP (Generation 3 Concentrating Solar Power Systems) で約8千万ドルの予算でCSPプロジェクトを支援。NREL、Sandia国立研究所、Brayton Energy等の13の国研、大学、企業が参加。700°C以上のCSPシステムの開発を目指す。熱媒体は熔融塩、固体粒子、気体の3種類を並行して研究。</p>

				<p><b>【ドイツ】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●ドイツ独自に行っている研究・開発は、新しい概念の低コストヘリオスタットの開発。太陽熱で駆動するソーラーガスタービン用レシーバの開発及びそのシステム開発。DLRでも粒子ソーラーレシーバの開発を行っており、500 kWth で実証試験している。</li> </ul> <p><b>【フランス】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●リニアフレネル型の開発を行っているメーカーが複数ある (CNIM、EUROMED、CEA)。国の補助金により国内にパイロット～商業規模のプラント建設を実施。また、同技術を生かし、EUのプロジェクトとしてヨルダンにプラントを建設。</li> </ul> <p><b>【英国】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●特になし</li> </ul> <p><b>【スペイン】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●Abengoa Solar、SENER等太陽熱にかかわる企業が多く、世界のプラントの半分以上はスペイン企業が係る。プラントレベルの高効率化や低コスト化などは企業自身が実施するか、国研のCIEMATなどとの共同研究開発を行っている。なお、上述のEUプロジェクトの大部分にも参加し応用研究や開発を行っている。</li> </ul>
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●中国科学院が中心となって多方面の基礎研究を行っているが、先行する欧米の研究の後追いが多い。現状考えられる様々な熱媒体、集光系を用いたプラントを建設するための基礎研究を実施。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●2020年までに5 GWのCSPの導入を目指している。トラフ型、タワー型からリニアフレネルまで様々な集光系によるCSPプラントの多数建設している。ビームダウン集光システムによる溶融塩蓄熱型の50MW CSPなど世界初の試みのプラントもある。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●国研の韓国エネルギー技術研究院 (KIER) が小型太陽炉と1 MW級のタワー型太陽集光器を持ち、開発の中心的役割を果たしている。近年は中国のプロジェクトに参加する機会が多い。金属酸化物の酸化還元系を利用した水熱分解による水素製造では日本の新潟大学と共同研究を行っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●空気を熱媒体としたタワー型の200 kW CSPを実証試験したが、ドイツDLRの開発したシステムと同型のものであった。</li> </ul>
その他の国・地域	基礎研究	◎	↗	<p><b>【豪州】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●オーストラリアはASTRI (Australian Solar Thermal Research Institute) とよばれる研究組織を作り、国研CSIROを主軸に、多くの大学、企業と総合的なCSPに関する研究を行っている。実施内容はヘリオスタットの低コスト化、レシーバの高効率化、新規高温蓄熱材料、潜熱蓄熱材料とシステム、超臨界CO<sub>2</sub>タービンの研究等。CSIROは豪州再生可能エネルギー庁 (ARENA) の補助で新潟大学が開発した水熱分解水素製造システムを500 kWth で実証試験する<sup>4-11)</sup>、<sup>4-12)</sup>。また、太陽熱をアルミナの製造工程の産業熱に利用するプロジェクト (ARENA) も行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<p><b>【豪州】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●135MWのタワー型プラントの建設計画がある。また、Vast Solar社が50 MWのCSP/PVプラントの建設計画を発表<sup>4-2)</sup>、Na熱媒を用いる大型プラントとしても注目される。超臨界CO<sub>2</sub>タービンと組み合わせ安全で高性能なシステム開発も行われている。リニアフレネル型コレクタを用いた石炭火力発電所への熱供給や小型マルチタワー式によるCSPプラントの実証の実績もある。</li> </ul> <p><b>【UAE】</b> 既存のCSP/PVプラントでは0.07USD/kWh台を達成。新規建設中のCSP/PVプラントでは、0.595USD/kWhで24時間発電を行う計画<sup>4-1)</sup>。</p>

				【モロッコ】低コスト集光系であるパラボリックトラフ（線集光）とPV電力による電気炉で溶融塩を加熱する新型の800 MW CSP/PVプラントの建設計画を発表 <sup>4-3)</sup> 。
--	--	--	--	--

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：特に顕著な活動・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 ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

### 関連する他の研究開発領域

- ・ 太陽光発電（環境・エネ分野 2.1.4）
- ・ 風力発電（環境・エネ分野 2.1.5）
- ・ 水循環（水資源・水防災）（環境・エネ分野 2.2.3）

### 参考・引用文献

#### ■水力発電

- 1-1) 一般財団法人新エネルギー財団(NEF), 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」『NEF』, [https://www.nef.or.jp/introduction/teigen/pdf/te\\_h30/suiryoku.pdf](https://www.nef.or.jp/introduction/teigen/pdf/te_h30/suiryoku.pdf) (2020年12月31日アクセス)
- 1-2) 経済産業省資源エネルギー庁, 「令和元年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2020)」『資源エネルギー庁』, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020pdf/> (2020年12月31日アクセス)
- 1-3) 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), 「日本におけ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」『LCS』, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-08.pdf> (2020年12月31日アクセス)
- 1-4) ターボ機械協会, 『特集：[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2020年8月号(東京：日本工業出版, 2020). [https://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product\\_id=4877](https://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=4877)
- 1-5) 一般社団法人日本大ダム会議(JCOLD), 既設ダム機能活用検討分科会「既設ダム機能活用検討分科会報告その1：第3章 既設ダムの有効活用と省力化の取り組み」『大ダム』248号(2019), [https://search.jcold.or.jp/publications?utf8=✓&search%5Bdaidam\\_no%5D=248&search%5Byear%5D=&search%5Bmonth%5D=&search%5Btitle%5D=&search%5Bwords%5D=&search%5Bauthor%5D=&button=](https://search.jcold.or.jp/publications?utf8=✓&search%5Bdaidam_no%5D=248&search%5Byear%5D=&search%5Bmonth%5D=&search%5Btitle%5D=&search%5Bwords%5D=&search%5Bauthor%5D=&button=)
- 1-6) 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, <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8676218>

- 1-7) 阿黒克俊, 村岡重則, 『奥多々良木発電所定速機可変速化に伴うポンプ水車ランナの設計』ターボ機械2016年3月号(東京:日本工業出版, 2016): 30, <https://www.fujisan.co.jp/product/1281679695/b/1344647/#table-of-contents>
- 1-8) 大石寅彦, 「欧州における揚水発電開発と放射性廃棄物地層処分にに関する技術動向調査」『電力土木』409号(2020): 114, [http://www.jepoc.or.jp/magazine/magazine.php?\\_w=magazine&\\_x=kikan\\_detail&kikan\\_m\\_id=65&kikan\\_n\\_id=1906](http://www.jepoc.or.jp/magazine/magazine.php?_w=magazine&_x=kikan_detail&kikan_m_id=65&kikan_n_id=1906)
- 1-9) 既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針」『首相官邸』, [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kisondam\\_kouzuichousetsu/pdf/kihon\\_hoshin.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kisondam_kouzuichousetsu/pdf/kihon_hoshin.pdf) (2020年12月30日アクセス)
- 1-10) 田村和則, 「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, doi: 10.2208/jscejhe.74.5\_I\_1327
- 1-11) 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』251号(2020), [https://search.jcold.or.jp/publications?utf8=✓&search%5Bdaidam\\_no%5D=&search%5Byear%5D=2020&search](https://search.jcold.or.jp/publications?utf8=✓&search%5Bdaidam_no%5D=&search%5Byear%5D=2020&search)
- 1-12) 名倉理他, 「水車・水車発電機の高性能化」『電気評論』2017年6月号(2017), <https://www.fujisan.co.jp/product/1788/b/1510430/>
- 1-13) 桑原他, 「水力発電設備の最新技術」『電気評論』2012年4月号(2012)
- 1-14) 加藤千幸他, 『特集:ターボ機械HPC実用化分科会』ターボ機械2020年9月号(東京:日本工業出版, 2020), [https://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product\\_id=4893](https://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=4893)
- 1-15) 谷清人, 花田豊, 「水車ランナ特性改善による水力エネルギーの有効活用」『日立評論』2011年8月号(2011): 32-35, [http://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/2011/08/2011\\_08\\_05.pdf](http://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/2011/08/2011_08_05.pdf)
- 1-16) 宮川和芳, 「大きな変流量・変落差運転に対応した新形水車の開発について: 中小水力発電技術に関する実務研修会(令和2年度(2020年度)第1回目)」『一般財団法人新エネルギー財団』, <https://www.nef.or.jp/topics/2020/20200821.html> (2020年12月31日アクセス)
- 1-17) 恒川明伸, 黒瀬高秀, 森正弘, 「常時微動右傾則に基づく水力発電所水圧鉄管の振動特性の推定」『電力土木』409号(2020): 24, <https://ci.nii.ac.jp/naid/40022355762>
- 1-18) 谷川寿浩, 震明克真, 「AIを活用した水力発電機器の状態診断」『電気学会全国大会講演論文集』2020年
- 1-19) 森岡宏之他, 「非接触音響探査法による地下空洞天井部吹付けコンクリート欠陥検出技術の開発」『電力土木』400号(2019): 87
- 1-20) 笹川剛他, 『老朽化水力発電設備の近代化更新技術』ターボ機械2019年2月号(東京:日本工業出版, 2019), [https://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product\\_id=4520](https://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=4520)
- 1-21) 資源エネルギー庁, 「電力市場の課題と将来の方向性について」『経済産業省』, [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/pdf/027\\_06\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/027_06_01.pdf) (2020年12月30日アクセス)
- 1-22) 送配電網協議会, 「需給調整市場について」『送配電網協議会』, <https://www.tdgc.jp/jukyuchoseishijo/> (2020年12月30日アクセス)
- 1-23) 東京電力パワーグリッド, 「再生可能エネルギー導入拡大に向けた取り組み」『東京電力パワーグリッド』,

<https://www4.tepco.co.jp/pg/technology/renewable.html> (2020年12月30日アクセス)

1-24) C. P. Jawahar and Prawin Angel Michael, "A review on turbines for micro hydro power plant", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 (2017) : 882-887, doi : 10.1016/j.rser.2017.01.133

1-25) S. Kim, 2019年ポンプ及び水車分野の研究動向』『韓国流体機械学会論文集』23巻2号(2019) : 75-78

## ■海洋発電

2-1) IEA-OES, "Annual Report 2019", IEA-OES, <https://www.ocean-energy-systems.org/> (2020年9月29日アクセス)

2-2) IEA-OES, "Annual Report 2018", IEA-OES, <https://report2018.ocean-energy-systems.org/> (2020年12月30日アクセス)

2-3) IEA-OES, "Spotlight on Ocean Energy (2018)", IEA-OES, <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/OES-2018.pdf> (2020年12月30日アクセス)

2-4) Ocean Energy Europe (OES), "Ocean Energy key trends and statistics 2019", OES, [https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2020/03/OEE\\_Trends-Stats\\_2019\\_Web.pdf](https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2020/03/OEE_Trends-Stats_2019_Web.pdf) (2020年12月30日アクセス)

2-5) Ocean Energy Europe (OES), "Ocean Energy key trends and statistics 2018", OES, [http://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2019/04/Ocean-Energy-Europe-Key-trends-and-statistics-2018\\_web.pdf](http://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2019/04/Ocean-Energy-Europe-Key-trends-and-statistics-2018_web.pdf) (2020年12月30日アクセス)

2-6) ETIP OCEAN, "Strategic Research & Innovation Agenda for Ocean Energy", ETIP OCEAN, <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2020/05/ETIP-Ocean-SRIA.pdf> (2020年12月30日アクセス)

2-7) European Commission, "Ocean Energy : Technology Development Report", European Commission, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/ocean-energy-technology-development-report> (2020年12月30日アクセス)

2-8) IEC/TC114, "Presentation of latest status on wave, tidal and other water current converters", Delft meeting 2019

2-9) 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), 「平成30年度 NEDO 新エネルギー成果報告会(海洋エネルギー分野)発表資料」『NEDO』, <https://www.nedo.go.jp/content/100885335.zip> (2020年12月30日アクセス)

2-10) 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), 「海洋エネルギー分野の技術戦略策定に向けて」『TSC Foresight』28巻(2018). <https://www.nedo.go.jp/content/100880816.pdf>

2-11) 木下健, 「海洋エネエネルギー利用推進の課題」『文部科学省科学技術・学術審議会海洋開発分科会』第33回(2012), [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu5/siryu/\\_icsFiles/afieldfile/2012/05/16/1321071\\_01.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu5/siryu/_icsFiles/afieldfile/2012/05/16/1321071_01.pdf)

2-12) J. Callaghan and R. Boud, *Future Marine Energy -Results of the Marine Energy Challenge :*

*Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy-* (London : Carbon Trust, 2006), <https://southwales.rl.talis.com/items/6E45C4F0-4AC4-FAF3-7EDE-F6E5D0F669F6.html>

## ■地熱発電

- 3-1) 柳澤教雄, 「地熱発電の現状」『日本エネルギー学会誌』 93 巻 11 号 (2014) : 1140-1147, <https://ci.nii.ac.jp/lognavi?name=web&lang=ja&tourl=025929468&naid=110009892032>
- 3-2) Geothermal Society of Japan (GRSJ) “Geothermal Energy in Japan”, GRSJ, [https://grsj.gr.jp/wp-content/uploads/brochure\\_japan\\_2020.pdf](https://grsj.gr.jp/wp-content/uploads/brochure_japan_2020.pdf) (2020年8月3日アクセス)
- 3-3) G. W. Hutterer, “Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report”, *Proceedings World Geothermal Congress 2020* (2020) : 1-17, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01017.pdf>
- 3-4) S. Akar et al., “Global Value Chain and Manufacturing Analysis on Geothermal Power Plant Turbines”, *Technical Report* (2018) : NREL/TP-6A20-71128. doi : 10.15121/1452766
- 3-5) 火力原子力発電技術協会, 『地熱発電の現状と動向2018年』 火力原子力発電技術協会編 (東京 : 火力原子力発電技術協会, 2019), <https://www.tenpes.or.jp/books/detail/id=61061>
- 3-6) K. Yasukawa et al., “Country Update of Japan”, *Proceedings World Geothermal Congress 2020* (2020) : 01037, <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/Abstract.php?PaperID=4642>
- 3-7) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 地熱統括部, 「令和元年度地熱統括部事業成果報告」『JOGMEC』, [http://www.jogmec.go.jp/news/event/event\\_k\\_01\\_000037.html](http://www.jogmec.go.jp/news/event/event_k_01_000037.html) (2020年8月3日アクセス)
- 3-8) 丸内亮, 谷口聡子, 「NEDOの地熱関係の研究開発～地熱発電の導入拡大に向けて～ : 地熱発電・熱水活用研究会2019年度第4回研究会資料(2019)」『エンジニアリング協会』, [https://www.ena.or.jp/?fname=gec\\_2019\\_4\\_1-1.pdf](https://www.ena.or.jp/?fname=gec_2019_4_1-1.pdf) (2020年12月31日アクセス)
- 3-9) 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), 「地熱発電技術研究開発」『NEDO』, [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100066.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100066.html) (2020年8月3日アクセス)
- 3-10) 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) 技術戦略研究センター, 「地熱発電分野の技術策定にむけて」『TSC Foresight』 12 巻 (2016)
- 3-11) U.S Department of Energy (U. S. DOE). Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Geo Vision : Harnessing the Heat Beneath Our Feet”, U. S. DOE, <https://www.energy.gov/eere/geothermal/downloads/geovision-harnessing-heat-beneath-our-feet> (2020年12月31日アクセス)
- 3-12) D. L. Siler et al., “Play-fairway analysis for geothermal resources and exploration risk in the Modoc Plateau region”, *Geothermics* 69 (2017) : 15-33, doi : 10.1016/j.geothermics.2017.04.003
- 3-13) U.S. Department of Energy (U. S. DOE). Geothermal Technologies Office, “Quarterly Update : May 28, 2020”, U. S. DOE. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy,

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/05/f75/Q2%202020%20webinar%20FINAL2.pdf> (2020年8月3日アクセス)

- 3-14) U. S. Department of Energy (U. S. DOE). Utah FORGE team, “Want to stay current on what is happening at Utah FORCE? Subscribe here to receive updates”, U. S. DOE. Utah FORGE, <https://utahforge.com/> (2020年8月3日アクセス)
- 3-15) Á. Ragnarsson, B. Steingrímsson and S. Thorhallsson, “Geothermal Development in Iceland 2015-2019”, *Proceedings World Geothermal Congress 2020* (2020) : 01063, <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/Abstract.php?PaperID=5018>
- 3-16) G. Gunnarsson et al., “Expanding a Geothermal Field Downwards. The Challenge of Drilling a Deep Well in the Hengill Area, SW Iceland”, *Proceedings EGU2020* (2020) : 21973, doi : 10.5194/egusphere-egu2020-21973
- 3-17) D. Serra, M. Cei and M. Lupi, “Geothermal Energy Use, Country Update for Italy (2015-2019)”, *Proceedings World Geothermal Congress 2020* (2020) : 01043, <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/Abstract.php?PaperID=4698>
- 3-18) A. Dini et al., “Understanding supercritical resources in continental crust”, *Proceedings European Geothermal Congress 2019* (2019) : 85, [europeangeothermalcongress.eu/programme/list-of-papers/](http://europeangeothermalcongress.eu/programme/list-of-papers/)
- 3-19) K. Link, N. Lupi and G. Siddiqi, “Geothermal Energy in Switzerland – Country Update 2015-2020”, *Proceedings World Geothermal Congress 2021* (2020) : 01103, <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/Abstract.php?PaperID=6844>
- 3-20) J. Weber et al., “Geothermal Energy Use in Germany, Country Update 2015-2019”, *Proceedings World Geothermal Congress 2020* (2020) : 01066, <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/Abstract.php?PaperID=5106>
- 3-21) C. Boissavy et al., “Country Update France”, *Proceedings World Geothermal Congress 2021* (2020) : 01020, <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/Abstract.php?PaperID=4485>
- 3-22) J. Busby and R. Terrington, “Assessment of the resource base for engineered geothermal systems in Great Britain”, *Geotherm Energy* 5, no. 7 (2017), doi : 10.1186/s40517-017-0066-z
- 3-23) Joint Research Centre (JRC), the European Commission’s science and knowledge service, *LOW CARBON ENERGY OBSERVATORY Geothermal Energy Technology Development Report 2018* (Luxembourg : Publication Office of the European Union, 2019), doi : 10.2760/019719
- 3-24) J. Limberger et al., “Assessing the prospective resource base for enhanced geothermal systems in Europe”, *Geothermal Energy Science* 2, no. 1 (2014) : 55–71, doi : 10.5194/gtes-2-55-2014

## ■太陽熱発電

- 4-1) Center for Mediterranean Integration (CMI), “DEWA CSP 700 MWe project : What we know so far”, CMI, <https://cmimarseille.org/menacspkip/dewa-csp-700-mwe-project->

## 2.1

### 俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

- know-far (2020年12月31日アクセス)
- 4-2) Vast Solar, “Vast Solar Projects”, Vast Solar, <https://vast solar.com/projects> (2020年12月31日アクセス)
- 4-3) Susan Kraemer, “Morocco Pioneers PV with Thermal Storage at 800 MW Midelt CSP Project”, SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/morocco-pioneers-pv-to-thermal-storage-at-800-mw-midelt-csp-project/> (2020年12月31日アクセス)
- 4-4) C. Odenthal et. al., “Experimental and Numerical Investigation of a 4 MWh Single-Tank Thermochemical Storage”, *AIP Conference Proceedings* 2303 (2020) : 190025, doi : 10.1063/5.0028494
- 4-5) 児玉竜也他, 「太陽熱発電のための高温の顕熱・潜熱蓄熱術」『太陽エネルギー』43巻5号(2017) : 27-38, <https://www.jses-solar.jp/journal/backnumbers/j241/p27-39>
- 4-6) Solar Calcium-Looping Integration for Thermo-Chemical Energy Storage (SOCRATES), “SOCRATES, Developing the Next Generation Technologies of Renewable Electricity and Heating/Cooling”, BIOAZUL, <https://www.bioazul.com/en/portfolio/socrates> (2020年12月31日アクセス)
- 4-7) H. Kamiya et.al., “Development and Factory Verification of the High-Energy density Thermochemical Storage System”, *AIP Conference Proceedings* 2303, no. 1 (2020) : 190020, doi : /10.1063/5.0029498
- 4-8) R. Buck et. al., “Techno-Economic Analysis of Thermochemical Storage for CSP Systems”, *AIP Conference Proceedings* 2303, no. 1 (2020) : 200002, doi : 10.1063/5.0028904
- 4-9) S. H. Gage and C. S. Turchi, “Internal Insulation and Corrosion Control of Molten Chloride Storage Tanks”, *AIP Conference Proceedings* 2303, no. 1 (2020) : 190010, doi : 10.1063/5.0030959
- 4-10) C. K. Ho, “A review of high-temperature particle receivers for concentrating solar power”, *Applied Thermal Engineering* 109, Part B (2016) : 958-969, doi : 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.103
- 4-11) 児玉竜也, 「高温太陽集熱を利用した水素製造技術の研究開発動向と将来展望」『水素の製造, 輸送・貯蔵技術と材料開発事例集』(東京 : (株)技術情報協会, 2019, <https://www.patent-tec.jp/products/detail/1089>)
- 4-12) 児玉竜也, 「革新的CCU技術 - 太陽熱利用水・二酸化炭素分解技術」『日本エネルギー学会機関誌えねるみくす』99巻4号(2020) : 373-378, <https://www.jie.or.jp/files/libs/2683/202007201540119566.pdf>
- 4-13) CSP News and Briefs, “Switzerland’s International Airport to Buy Synhelion’s First Solar Fuel”, SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/switzerlands-international-airport-to-buy-synhelions-first-solar-fuel> (2020年12月31日アクセス)