

2.1.7 地熱発電・利用

(1) 研究開発領域の定義

地熱発電とは、高温の地熱によって生成された水蒸気や熱水により直接あるいは水や低沸点媒体と熱交換して蒸気タービン発電機を駆動して電力を発生させるものである。

ここでは、地熱資源の探査（地質調査や物理探査、地化学探査など）および特性把握技術、掘削技術、地熱発電技術（ドライスチーム式、フラッシュサイクル、バイナリーサイクルなど）の他、地下の諸特性を人工的に改質してエネルギー回収を促進する技術（地熱増産システム：EGS（Enhanced/Engineered Geothermal System）、涵養地熱システム、高温岩体発電など）や超臨界地熱資源のような非在来型資源の調査・開発、環境や社会との調和を図る各種技術（合意形成手法、景観保全技術など）も対象となっている。

(2) キーワード

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、誘発地震、バイナリー発電

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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CO₂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。

日本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年間にわたり政策的地熱研究開発は停止されていた¹⁾。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。地熱は本来日本の得意分野であり、世界シェア約70%²⁾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。しかしながら、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ている。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し、未来の安定的エネルギー源としての世界的な定着に貢献することが望まれる。

[研究開発の動向]

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ス地熱地域、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

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

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。最近の山葵沢や松尾八幡平も該当)。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みると、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³⁾。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%におよぶ⁴⁾)を日本の東芝、富士電機、三菱日立パワーシステムズの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⁴⁾。

地球温暖化対策としてCO₂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46.199 MWeの山葵沢地熱発電所が運転を開始している。さらに、北海道函館市(南茅部地域、6.5MWeバイナリー式を計画)、岩手県八幡平市(安比地域、14.9MWeフラッシュ式を計画)、秋田県湯沢市(小安地域かたつむり山、14.99MWeダブルフラッシュ式を計画)、岐阜県高山市(奥飛騨温泉郷中尾地区、1.998 MWeダブルフラッシュ式を計画)など、新たな地点で比較的大きな地熱発電所の操業に向けた建設も進んでいる。他にも各地で調査・開発が続けられており、既設発電所の発電設備更新や余剰熱水によるバイナリー式発電の実施など、さらなる有効活用に向けた検討も進められている。また、2022年3月時点の1 MWe以下の小規模発電所は69地点、事業者66社あり、これらの設備容量(認定出力)の合計は8,470kWに増加している⁵⁾。

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・地熱事業部)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合わせて導入している。2020年度から、地熱流体確認までカバーできる深部ボーリングによる先導的資源量調査を新たに開始し、事業者参入の一層の促進を目指している。

NEDOは2013年度に「地熱発電技術研究開発」を開始し、2018年度には「超臨界地熱発電技術研究開発」も加えて、主に比較的長い視点に基づく内容や地上・環境面を対象にした各種研究開発を担っている。2021年度からは「地熱発電導入拡大研究開発事業」に一本化され、より一層地熱発電の導入拡大の促進を目的とすることが明確にされている。

2012年にFIT制度（再生可能エネルギーの固定価格買取制度）が導入され、地熱発電の場合は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、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な場合などは、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ている。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た。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。2021年4月には環境大臣が地熱開発加速化プランを示し、自然公園法と温泉法の運用見直し（例えば、2021年9月の温泉資源の保護に関するガイドラインの改定）や、温泉・自然環境への支障を解消する科学的データの収集・調査のための措置などが図られ、開発リードタイムの短縮や地熱施設数の倍増を目指した取り組みが一層強化されている。

〔論文・特許動向〕

本研究開発領域の論文および特許動向として、以下の特徴が見られた。なお、調査内容、分析結果の詳細は「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.E1.7 地熱発電・利用」にて報告している。

- ・領域全体の論文数は増加傾向にあった。国別推移でも概ね各国が増加傾向にあるが、中国の伸びが群を抜いていた。
- ・各国の論文シェアでは、中国は2015年より増加傾向にあった。米国は減少傾向にあり、日本及び欧州諸国は停滞気味であった。
- ・Top1%、Top10%論文は、2019年以降中国が欧州を抜き、首位となった。
- ・領域全体の特許ファミリー件数は増加傾向にあった。国別の特許ファミリー件数シェアでは中国が増加傾向にあるが、米国、日本、ドイツは減少傾向にあった。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

経済産業省の長期エネルギー需給見通しでは、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を進めるとともに、現在は平均値では約55%に留まっている地熱発電の設備利用率を、83%程度まで向上させる必要がある⁵⁾。

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、2021

年度には20件（新規3件、継続17件）、2022年度は10月20日時点で19件（新規5件、継続14件）が採択されている。独自調査事業の地熱ポテンシャル調査も実施しており、これまでに「空中物理探査」を国内18地域で実施し、見いだされた開発有望地域において温度構造や地質構造把握のためのボーリング調査を実施した。2020年度からは先導的資源量調査として、5地域での地表調査や2000 m級を含むボーリング調査が実施されている⁶⁾。

JOGMECでは、地熱特有の技術課題解決を目的とする「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、坑井近傍探査技術として、高耐熱の分布型光ファイバー音響センサ（DAS）を用い、地表発振・坑内受信による弾性波探査（DAS-VSP）およびAE観測による構造探査手法を開発した。また、設備腐食等から開発が忌避される酸性熱水地域を未利用の地熱資源と位置付け、その有効活用のための地下熱水の酸性化メカニズムの解明や探査技術の開発を行っている。②では、地熱流体噴出量が減衰した地熱貯留層に対し、地熱貯留層周辺の深部に地表水を注入して噴出量の維持・回復を図る人工涵養技術の開発と実証試験を福島県柳津西山地域で実施している。また、坑井への注水刺激によって坑壁や周辺地層の透水性を改善させ、地熱流体の噴出や還元の量を増大させる技術開発と2地域での実証試験を実施し、技術マニュアルを公開した。③では、立地制限の克服や設営費等の低減、作業効率化、省力化を目的にした小型ハイパワー掘削リグの設計・開発や、掘削コスト増大の一因である逸泥対策の所要時間を短縮する目的で、土木分野における水中不分離セメント技術を導入して改良し、地熱井への適用を図る技術開発が行われた。2022年度には、米国等海外において近年提案されている複数坑井の連結などによる「クローズド方式の地熱発電」に関しても調査研究を開始している。このクローズド方式の地熱発電は、JOGMECの事業によって評価が進み、コスト的には実現性が難しいことが確認されている⁷⁾。

他の取り組みとして、将来の担い手となる技術者育成に繋げる地熱開発研修や、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が2016年度から行われており、定期的な地熱シンポジウム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なされている。

ニュージーランドGNS ScienceとMOUを締結し、現地研修やワークショップなどで技術情報交換を行っている。2021年12月には両者の国際オンラインセミナー「カーボンニュートラルと地熱」を開催し、国内外の地熱資源開発事業者等に対して地熱とCO₂や水素をテーマとした最新技術情報を提供した。JOGMECでは、新たな課題として2021年度から「カーボンリサイクルCO₂地熱発電技術」に取り組んでおり、過去調査で地熱流体の兆候に乏しかった地点で水の代わりに超臨界CO₂を熱媒体として発電するための技術開発を開始している。

NEDOでは、「地熱発電技術研究開発事業」および「超臨界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、ならびに超臨界地熱発電の実現に向けた技術研究開発を推進してきた⁸⁾。2021年度から「地熱発電導入拡大研究開発」に一本化され、重要な技術開発目標を、資源量増大、発電原価低減化、環境・地域共生の3点に集約し、現在3項目14テーマで数多くの研究開発が行われている⁹⁾。そのうち「超臨界地熱資源技術開発」では、資源量評価のための概念モデルの構築と数値モデル化の前提条件を提示し、1地域あたり10万kW以上の有望地域を4カ所選定することを目標にして、湯沢南部、葛根田、八幡平、九重の4地域の資源量評価とDASによる資源探査技術の開発を進めている。「環境保全対策技術開発」では、時間とコストを削減する環境アセスメント手法の開発として、気象調査代替手法および新たな大気拡散予測手法の研究開発とIoT硫化水素モニタリングシステムの開発が行われている。「地熱発電高度利用化技術開発」では、IoT・AIの利活用によって生産量の増大やコスト削減、設備利用率の向上を目的とし、1) 蒸気生産データのAI処理による坑内および貯留層での早期異常検知技術の開発、2) 坑内異常自動検出AI方式、耐熱坑内可視カメラ（BHS）開発、3) 光ファイバマルチセンシング・AIによる長期貯留層モニタリング技術の開発、4) AIを利用した在来型地熱貯

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

留層の構造・状態推定、5) 地熱貯留層設計・管理のための耐高温・大深度地殻応力測定法の実用化、6) 発電設備利用率向上に向けたスケールモニタリングとAI利活用に関する技術開発、7) 地熱発電システムの持続可能性を維持するためのIoT-AI技術に係る技術開発、の7つを実施している。

NEDO技術戦略研究センターでは、在来型地熱発電の技術課題やEGS実用化に向けた整理と技術開発をまとめた『TSC Foresight』Vol.12を2016年に出し、さらに2021年には、在来型の導入促進と超臨界地熱発電の早期実現に向けた提言を含むVol.106が出版されている¹⁰⁾。IoTやAIの活用、超臨界地熱資源の量や質の把握など、今後のNEDO事業に通ずる方向性が記されている。

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。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

JOGMECでは、地質調査と構造ボーリング調査を含む「先導的資源量調査」を新設し、2020年度は6地区で実施している⁶⁾。これは、過去のNEDO調査のように、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行う形であり、近年の新設発電所の多くが過去のNEDO調査の結果を活用しているように、実際の発電所開発に繋がる成果が得られることが期待されている。

また、2021～2025年度の新規研究開発事業として、「カーボンリサイクルCO₂地熱発電技術」を開始した。地熱発電に適した水や地下構造の条件を満たさない地点において、超臨界CO₂の高密度・低粘性に基づく流動や熱交換に対する有利さを生かして、カーボンニュートラルと高効率なエネルギー抽出を両立する技術開発に取り組んでいる。

NEDOでは、2021年度からの「超臨界地熱資源技術開発」において、超臨界地熱資源が形成される可能性が高い4地域での超臨界水の状態把握と資源量評価に着手している。実施期間4カ年での目標は、「我が国における超臨界地熱資源量評価として、1地域あたり100 MW以上（合計で500 MW以上）を提示し、調査井掘削に向けた実施可能な有望域を4か所選定する。」とされている⁹⁾。本プロジェクト期間の成果によって、はじめての超臨界地熱資源領域の直接的な調査に繋がるため、2040～2050年頃からの超臨界地熱資源による地熱発電所（10万kW級）の普及という大きな目標の可否を占う上でも非常に注目される。

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すために広範な調査研究を行ったレポートで¹¹⁾、設備容量26倍(60 GWe)を2050年の目標に、「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をまとめており、分野横断的な今後の米国地熱の研究開発の方向性が示されている。また、総額1兆2,000億ドル規模の超党派インフラ投資計画法案の成立(2021年11月)以降、クリーンエネルギー技術関連への予算措置もあって地熱研究開発へのサポートも一層強化されている。2022年2月にはMulti-Year Program Plan (MYPP)¹²⁾として、2022～2026年度の地熱研究開発の計画がまとめられている。地熱発電の目標は、GeoVisionに沿った60 GWeをEGSと在来型の両方で目指すというものの、今後の新たなプロジェクト等はMYPPから展開すると見られる。DOEの支援で様々なプロジェクトが実行されているが、予算額等でのフラッグシッププロジェクトは“広範なEGS技術の商業化”という目標を持つFORGE (Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy)である¹³⁾。2022年4月ユタ州のテストサイトにおいて高傾斜の井戸(傾斜65°、鉛直深度約2.6km、長さ約3.3km)からの水圧刺激による人工地熱貯留層の造成に成功し、2023年初頭の生産井掘削に向けた準備を進めている。EGS型地熱開発の商業的実用性を占う、注目すべきプロジェクトである。また、DOEでは新たにGEODE (Geothermal Energy from Oil and gas Demonstrated Engineering)と称し、労働力を含めた石油・ガス業界の技術

を地熱に移転するためのイニシアチブを打ち立てた¹⁴⁾。最近の米国 GRC（地熱資源協議会）の年次大会では、2方向から高傾斜井を掘削して地下で分岐させながら連結させるような、ボーリング掘削によるクローズド方式による熱交換系の構築技術が発表されている。こうしたシェールガス等で培われた技術の地熱分野での展開は進みつつあると考えられ、GEODEの今後の動向が注目される。

アイスランドの超臨界地熱資源の研究開発プロジェクトは、一部EUのDEEPEGSプロジェクトとして実施され、2019年までに深度4,659 mまで掘削し（IDDP-2）、500℃以上の温度と、ある程度の透水性を有していた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を掘削するための準備段階にある¹⁵⁾、¹⁶⁾。当時のIDDP-2を利用するシステム想定では、超臨界地熱領域（深度5 km前後）へ注水して従来領域（深度2 km）から生産する像を描いており、注目されるコンセプトである。また、アイスランドを中心とするEUプロジェクトとして、地熱エネルギーと貯留層を利用し、地熱蒸気および大気中のCO₂等の回収と貯留の技術開発プログラム（GECO）も進められている¹⁷⁾。

スイスでは、停止中だったEGS型地熱開発における誘発地震の問題から深部地熱の研究開発が近年徐々に再開されている。現在、ローザンヌ近郊のLavey-les-Bainsおよびジュラ州Haute-Sorneにおいて、それぞれ、在来型およびEGS型の熱電併給型の地熱発電開発が進められている¹⁸⁾。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¹⁹⁾、²⁰⁾、英国でも開発中であるなど²¹⁾、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。

地熱先進国であるニュージーランドでは、Geothermal the Next Generation（GNG）が2019～2024年に掛けて年間約2百万NZドルの資金を政府から得て、主に在来型地熱地域の深部に存在する同国の超臨界地熱資源の将来開発可能性の調査を行っている²²⁾。地化学、物理探査、シミュレーション、地域社会との関係などの研究が進められる。同時に、地熱排出ガスの回収と地下への再注入についても、国際協力の下で調査を実施される。

（5）科学技術的課題

最近の日本の地熱開発では、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・国定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の不明度が高いと考えられる。規制緩和に頼るだけではなく、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、貯留層の的確な把握とそれに基づく適正規模の発電を進める事が望まれる。

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、最新技術を用いた調査・評価が一層求められる。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や、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と同様に米国でもEGSを連続的に捉えており¹¹⁾、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整理としている。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、地下の人工貯留層を閉鎖的に捉える方式だけでなく、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。石油・ガスでの掘削技術の発展に基づき、水平に近い高傾斜の坑井掘削を様々なレイアウトで繋ぎ合わせて完全な閉鎖循環系を構築して地熱開発に用いる提案が米国などで現れており、人工貯留層（熱交換面）の一つの可能性として注目される。しかし、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に速く大きな熱エネルギーを運搬できる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は検討すべき課題である。

ここ数年でカーボンニュートラルへの流れが一層加速し、化石燃料等利用に対する地熱発電によるCO₂削減効果だけでは不十分と考えられるような動きが出てきた。地熱発電自体から生じるCO₂やその他排出ガスの一層の削減や、地熱発電とCO₂地中貯留を同時に行うための技術開発や社会経済的な評価、CO₂の流体特性を積極的に地熱エネルギー回収に活用する技術開発など、エネルギー生産と環境対策の総合的なバランスを取りながら検討を進めておく必要がある。

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、そのため地域社会との円滑なコミュニケーションが不可欠である。社会科学的なアプローチも含め、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、掘削技術の開発。
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。日本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、透水性、応力場、亀裂などの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。

(6) その他の課題

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の非合理性が大きく、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、日本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ないほか、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。これまでの法と調和的でかつ適正な資源開発・管理に資する一元的な「地熱法」は、情報公開と新規参入の促進、環境調和型開発の徹底、リードタイムの短縮などが期待される。

10年間以上の停滞期の影響を受け、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が、人材育成には時間を要するため依然として状況に変化は見られない。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。

有望地域であっても温泉事業者の懸念などから、地元との調整が困難な場面が少なくなく、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の恐れがある。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。

(7) 国際比較

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	○	↗	●産業技術総合研究所・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。 ●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きた。 ●JOGMECでは、「カーボンリサイクルCO₂ 地熱発電技術」として超臨界CO₂を用いる地熱発電技術の研究開発を開始した。
	応用研究・開発	○	→	●JOGMECでは、地質調査と構造ボーリング調査を含む「先導的資源量調査」を新設し、2020年度には6地区で実施している。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項目の「地熱発電技術研究開発事業」も引き続き遂行している。 ●NEDOでは、時間とコストを削減する環境アセスメントのための、気象調査代替手法、大気拡散予測手法、IoT硫化水素モニタリングシステムの研究開発を行っている。IoT・AIの利活用によって生産量増大やコスト削減、設備利用率の向上を目的とした各種技術開発も実行中である。 ●温泉発電を主とする小規模発電所は50カ所7.398 MWe（2019年度末）となっている。比較的規模の大きな開発も進み、北海道函館市、岩手県八幡平市、秋田県湯沢市、岐阜県高山市で、新たに2～15 MWeの地熱発電の建設が進んでいる。

米国	基礎研究	◎	↗	● DOEでは直接熱利用も含め、EGS型と在来型の両方を対象に多面的な研究開発に継続的に取り組んでいる。2020年の超党派インフラ投資計画法案の成立を受けて、2022年度からのDOE地熱関連予算は大幅に増額される予定で、190億ドルに達する見込みである。 ● 2022年2月にMulti-Year Program Plan（MYPP）として2022～2026年度の地熱R&Dの計画が示されており、基礎、応用ともに今後のR&DはMYPPを反映して進められると考えられる。 ● 適正価格で実現する未来のエネルギーにおける地熱の役割と道筋について調査研究を行い、Geo Visionと称するレポートにまとめている。ここでは、「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」、「地熱の価値の最大化」、「利害関係者間の協働の改善」の4領域で、可採資源量増大や収益性改善などを目的にした今後のR&Dの方向性を定めている。 ● 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。 ● 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。 ● 2021年からINGENIOUSと称して、米国西部のグレートベースン地域において、商業地熱開発が可能な新たな“隠れた地熱資源”の発見を加速化に資する、地域スケールと開発向け探査スケールの両方で包括的なマップ作りを行う。2022年夏から掘削調査に入る予定である。
	応用研究・開発	○	↗	● 世界最大の地熱発電国で、2020年時点の総設備容量は約3,673 MWeである。2015年以降の新規設備容量は186 MWeに留まるものの、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、設備容量は2015年以降の5年間で約7～10%の伸びを示している。 ● 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、ユタ州ミルフォードでユタ大学を中心とするチームによって進められている。2022年4月には高傾斜の深部井（傾斜65°、鉛直深度約2.6km、長さ約3.3km）からの水圧刺激による人工地熱貯留層の造成に成功し、2023年初頭の生産井掘削に向けた準備を進めている。 ● GEODE（Geothermal Energy from Oil and gas Demonstrated Engineering）が新たに始まり、石油・ガス分野の地下に関する技術や専門知識の蓄積を地熱開発の最困難課題の解決に活用するために、最初にコンソーシアムを設立した後で、分析、研究、開発、デモンストレーションおよび労働力確保の観点等に関し、今後数年間に渡って定期的に各種PJの公募が予定されている。

欧州	基礎研究	○	→	欧州はEU組織および地理的に属する国ともに対象。国として英仏独は極力、そのほかの国も顕著な動向があれば記載 【EU】 ●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²³⁾。全EUの経済的可能性のあるポテンシャル（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²⁴⁾。 ●EU支援によって様々な要素的な研究開発が進められている。主なPJは、EGS実現性評価（MEET）、掘削技術（Geo-Drill）、材料開発（GeoHex）、地熱流体（GEOPRO、REFLECT）、耐腐食（Geo-Coat）、開発スキーム（CROUWD THERMAL）、誘発地震予測（GEoREST）、多孔質岩の理解（METHROCKS）、安全と効率の向上（EASYGO）など。 【ドイツ】 ●EU支援のDESTRESS-PJとして、EGS型地熱開発での人工貯留層造成時の誘発地震リスクを“ソフト刺激”によって低減する研究を2021年度まで実施した。 【フランス】 ●全研究分野から選出される171のLaboratories of Excellence（LabEx）について、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」が選ばれ、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€。 ●2015年に設立されたGéodénergiesという卓越研究機関によるグループでは、掘削やポンプ、モニタリング、微小地震など種々の技術ギャップを埋める研究開発を行っているが、最近では、地熱エネルギーを生産しながらのCO₂貯留や、リチウム生産をするような、付加的な技術の研究も実施している。 【英国】 ●近年の商業地熱を目指したR&Dに対応して、EGS型地熱の基礎資源量の新しい評価結果が公開されている。EGSを想定したき裂性岩体での透水性と熱/流体フローの間の知識ギャップを埋める目的で、基礎研究PJ（GWatt）も推進されている。 【イタリア】 ●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年に渡って行われ、2017年に深度2,900 mで500℃以上の岩体の存在を確認した。 【アイスランド】 ●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が盛んに行われている。 ●IDDP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℃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、次の深部掘削PJ（IDDP-3）が計画されている。 【スイス】 ●COSEISMIQと称して、EGS型地熱開発時の貯留層の最適化と誘発地震の制御・管理を実現するための、モニタリング、イメージング、力学モデル、リスク分析手法等を統合化する研究開発が進められている。
	応用研究・開発	○	↗	【EU】 ●EUでは、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（2014～2020年）や後継のHorizon Europe（2021～2027年）などが用意され、多国共同の研究PJが多く実施されている。 【ドイツ】 ●2022年時点で、カリナサイクルのバイナリー式や熱電併給型を含めて12か所で地熱発電が行われており、ドイツ地熱協会によると総設備容量は47 MWeである。

欧州			【フランス】 ●現在同国では、火山地域、EGS型地域および断層地域（Crustal fault system）を発電可能な資源と位置付けている。火山地域はグアドプール（カリブ海の領土）にあり、15 MWeの地熱発電によって同地域の必要電力の5%をまかなってきたが、本サイトは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10 MWe程度の出力が追加される予定である。 ●EGS型地域の開発では、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 Soultz-sous-Forêts で、2016年から1.7 MWeの商業発電を継続している。 ●アルザス地方ストラスブル近郊の Vendenheim と Illkirch において、地元電力会社がそれぞれ6 MWeと3 MWeの熱電併給型のEGS型地熱開発が計画し、2018年頃から反射法地震探査などの各種調査を実施してきた。しかし、2019年に Vendenheim のPJから5km離れた付近でM3.1の地震が観測され、EGS地熱による誘発地震の懸念が生じて本PJは一時停止している。 ●断層地域型では、フランス中央高地地域のサン＝ピエール＝ロシュ付近において、6MWe以上の地熱発電を目指したPJが実施されており、2022年度に深部井掘削を行うことが計画されている。 【英国】 ●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2,393 mの注入井が2019年に掘られて180～185℃に達することが報告された。その後、2021年に最終テストが行われ、2022年に商業発電を目指したバイナリー発電機の試運転を実施するとされている。 ●もう一つの Eden プロジェクトでも、2021年10月までに最初の深部井が鉛直深度4,871 m（長さは5,277 m）で掘削され、商業発電に向けた開発が進められている。 【イタリア】 ●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%もの需要を賄っている。 ●2019年までに、ナノテクベースの材料を適用して節水等を実現し、発電所冷却システムの性能向上を図る技術開発が行われた（MATCHING-PJ）。 ●Enel Green Powerによって、地熱発電からの熱とCO₂を利用したスピルリナ（藻類）の栽培プロジェクトが実施された。同国の最近の地熱の枠組みでは、地熱の排出ガスの削減と再利用に向けた研究に焦点が当てられている。 【アイスランド】 ●2020年のアイスランドの総設備容量は757 MWeで、国内発電の30%以上が地熱発電で作られている。 【トルコ】 ●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のものが332 MWe程度ある。 ●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℃以上に達したことが報告されている。 【スイス】 ●過去のEGS研究開発の教訓を生かしながら、熱電併給型プロジェクトが進行中である。ローザンヌ近郊の Lavey-les-Bains およびジュラ州 Haute-Sorne において、それぞれ、在来型およびEGS型の熱電併給型の地熱発電開発が進められている。Lavey-les-Bains では、900世帯分に相当するバイナリー式発電の実施に向けて、2022年1月から長さ3000mの深部井の掘削が始まっている。
----	--	--	---

中国	基礎研究	○	→	●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。また、山東省や河北省でも、高温乾燥岩体型の資源を活用するEGS型の地熱発電の研究開発が行われている。 ●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。
	応用研究・開発	○	→	●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。
韓国	基礎研究	△	↘	●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。
	応用研究・開発	△	↘	●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年に水圧破砕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。
その他の国・地域（任意）	基礎研究	○	→	【台湾】 ●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。 【ニュージーランド】 ●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。 ●Geothermal the Next Generation (GNG) が、2019～2024年にかけて年間約2百万NZドルの資金を政府から得て、深部に存在する同国の超臨界地熱資源の将来開発可能性の調査、研究を進めている。
	応用研究・開発	○	→	【インドネシア】 ●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。 【フィリピン】 ●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。 【台湾】 ●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。 【ニュージーランド】 ●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。 ●2021年報告では新規建設はないが、既存発電所の坑井や蒸気取り回しの最適化によって発電効率や持続性が改善されている。2021年時点の総設備容量は1,039 MWeである。

				【ケニア】 ●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。 ●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。
--	--	--	--	---

(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

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.

2) Geothermal Research Society of Japan (GRSJ), “GEOTHERMAL ENERGY IN JAPAN,” https://grsj.gr.jp/wp-content/uploads/brochure_japan_2020.pdf, (2023年1月20日アクセス) .

3) Gerald W. Huttner, “Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report,” International Geothermal Association, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGASstandard/WGC/2020/01017.pdf>, (2023年1月20日アクセス) .

4) Sertaç Akar, et al., “Global Value Chain and Manufacturing Analysis on Geothermal Power Plant Turbines,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71128.pdf>, (2023年1月20日アクセス) .

5) 一般社団法人火力原子力発電技術協会『地熱発電の現状と動向2020年』（東京：一般社団法人火力原子力発電技術協会, 2022）.

6) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）「令和2年度 地熱統括部事業成果報告会：2. 配布資料」https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/achievement/briefing_r01_1.html, (2023年1月20日アクセス) .

7) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）「革新的地熱発電の技術開発に関する委託業務「クローズド方式の地熱発電計画策定調査」」令和5年3月
<https://geothermal.jogmec.go.jp/report/jogmec/file/2024-1-17.pdf> (2024年8月7日アクセス)

8) 和田圭介「NEDO 地熱発電研究開発の概要 (2021年11月17日)」一般財団法人エンジニアリング協会, https://www.ena.or.jp/?fname=gec_2021_4_2-1.pdf, (2023年1月20日アクセス) .

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）「地熱発電導入拡大研究開発」https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100198.html, (2023年1月20日アクセス) .

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 技術戦略研究センター（TSC）「地熱発電分野の技術策定にむけて：在来型地熱発電の導入促進と超臨界地熱発電の早期実現に向けて」『TSC Foresight』106 巻 (2021).

- 11) U.S. Department of Energy, “Geo Vision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet (DOE/EE-1306, MAY 2019),” <https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/06/f63/GeoVision-full-report-opt.pdf>, (2023年1月20日アクセス) .
- 12) Geothermal Technologies Office, “Fiscal Years 2022-2026 MULTI-YEAR PROGRAM PLAN, (DOE/EE-2557, February 2022),” U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/GTO%20Multi-Year%20Program%20Plan%20FY%202022-2026.pdf>, (2023年1月20日アクセス) .
- 13) Energy & Geoscience Institute, “Utah FORGE,” <https://utahforge.com/>, (2023年1月21日アクセス).
- 14) Geothermal Technologies Office, “Funding Notice: Geothermal Energy from Oil and gas Demonstrated Engineering (GEODE),” U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/geothermal/funding-notice-geothermal-energy-oil-and-gas-demonstrated-engineering-geode>, (2024年10月31日アクセス) .
- 15) Árni Ragnarsson, Benedikt Steingrímsson and Sverrir Thorhallsson, “Geothermal Development in Iceland 2015-2019,” International Geothermal Association, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01063.pdf>, (2023年1月21日アクセス) .
- 16) Gunnar Gunnarsson, et al., “Expanding a Geothermal Field Downwards. The Challenge of Drilling a Deep Well in the Hengill Area, SW Iceland,” EGU General Assembly 2020, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21973>, (2023年1月21日アクセス) .
- 17) Nökkvi Andersen, et al., “The GECO Project: Lowering the Emissions from the Hellisheidi and Nesjavellir Power Plants Via NCG Capture, Utilization, and Storage,” International Geothermal Association, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/02061.pdf>, (2023年1月21日アクセス) .
- 18) Katharina Link, Nicole Lupi and Gunter Siddiqi, “Geothermal Energy in Switzerland - Country Update 2015-2020,” International Geothermal Association, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01103.pdf>, (2023年1月21日アクセス) .
- 19) Josef Weber, et al., “Geothermal Energy Use in Germany, Country Update 2015-2019,” International Geothermal Association, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01066.pdf>, (2023年1月21日アクセス) .
- 20) Christian Boissavy, et al., “France Country Update,” International Geothermal Association, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01020.pdf>, (2023年1月21日アクセス) .
- 21) Jon Busby and Ricky Terrington, “Assessment of the resource base for engineered geothermal systems in Great Britain,” *Geotherm Energy* 5 (2017) : 7., <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0066-z>.
- 22) Isabelle Chambefort, et al., “GEOTHERMAL: THE NEXT GENERATION,” International Geothermal Association, <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2019/059.pdf>, (2023年1月21日アクセス) .
- 23) European Commission Joint Research Centre (JRC), “Geothermal Energy: Technology Development Report,” European Commission, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/303626>, (2023年1月21日アクセス) .
- 24) Jon Limberger, et al., “Assessing the prospective resource base for enhanced geothermal systems in Europe,” *Geothermal Energy Science* 2 (2014) : 55-71., <https://doi.org/10.5194/gtes-2-55-2014>.

2.1

電力のゼロエミ化・安定化