

「地熱発電」とは？

—地熱発電の現状と課題，産総研の研究開発—

山谷 祐介¹

※本稿は，産総研マガジン・話題の〇〇を解説「地熱発電とは？」(https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20230719.html)に加筆し，再編したものです。

1. はじめに

世界有数の火山国である日本には，膨大な地熱エネルギーが存在しています。地熱発電は，地下1～3 kmの深さから，高温(200～300℃)の水もしくは水蒸気を取り出し，そのエネルギーでタービンを回して電力を得る方式です。似た言葉として「地中熱利用」がありますが，これは地表近くの深さ20～100 mの温度が一定であることを利用して高効率の冷暖房などに活用する省エネルギー技術です。

地熱は，季節や天候に左右されずに年間を通して安定したエネルギーとしての供給が見込めるため，地熱発電には一定量の電力を安定的に供給するベースロード電源としての役割が期待されています。ここでは，地熱発電の概要や現状，産総研が取り組む地熱発電の研究について紹介します。

2. 地熱発電とは

2.1 日本における地熱発電の現状

地熱発電とは，地下のマグマなどによって熱せられた高温の水もしくは水蒸気が持つエネルギーを用いて行う発電のことです。地下の熱と水，水を通しにくいため水を閉じ込めることができる地層(キャップロック)が地熱の3要素と呼ばれています(第1図)。日本列島は火山帯に属しているため，この3要素が揃っている地熱貯留層と呼ばれる場所が他国に比して多く，利用可能な地熱エネルギーが膨大に存在していると考えられています。

日本は，アメリカ(30 GW)とインドネシア(28 GW)に次いで世界第3位の23 GWという豊富な地熱資源量を抱え(資源エネルギー庁，2016)，地熱発電を活用できるポテンシャルが高い国です。しかし，実際に導入されている発電設備で発電可能な電力は約0.6 GW(資源エネルギー庁，

2024)にとどまっており，資源量に対する割合としては非常に少ない状況です。純国産のエネルギーによる地熱発電をベースロード電源の一つと考える政府は，2030年にはこれを1.5 GWにするという導入目標を掲げています(資源エネルギー庁，2024)。挑戦的な目標ですが，この実現に向けて，発電量を上げるためのさまざまな技術開発が進められています。

2.2 地熱発電の技術

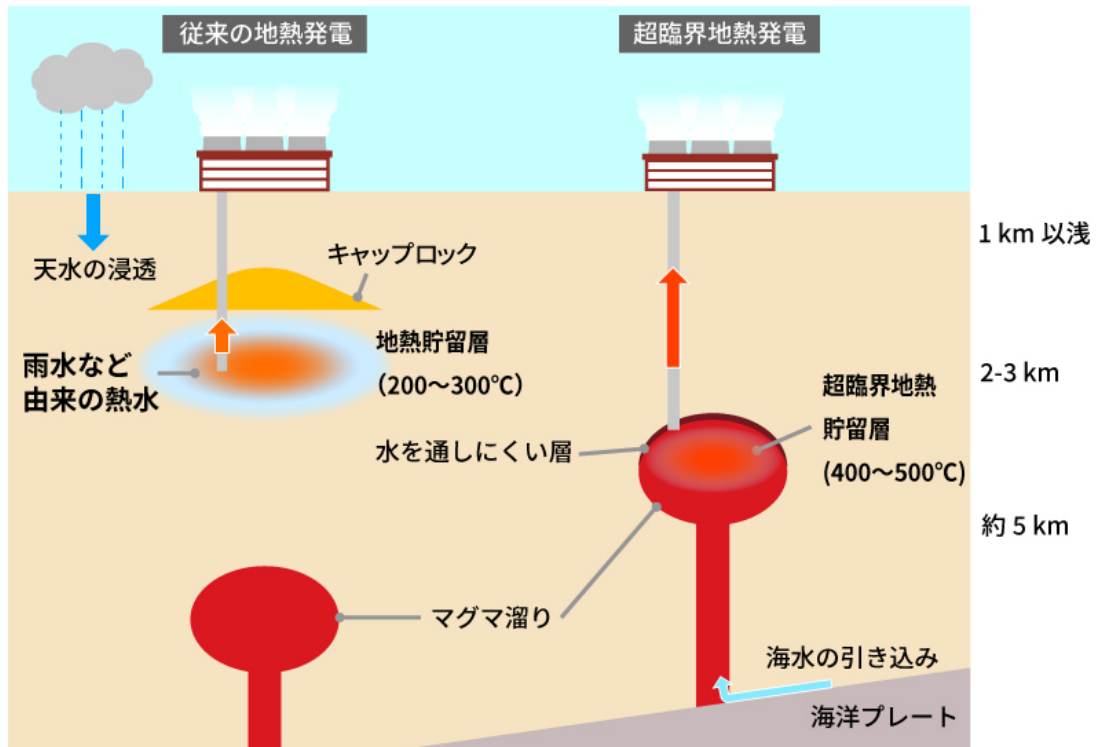
地熱発電と呼ばれる発電方式のうち現在最も主流なものは，地下1～3 kmにある地熱貯留層に坑井と呼ばれる井戸を掘り，高温高圧の地下水(蒸気)を取り出して，発電用のタービンを回転させることで発電するフラッシュ発電方式です。発電に使用した後の水は，一定の温度まで冷やして別の井戸から地下に戻しますが，その一部を温度帯に応じて暖房や入浴などに2次利用，3次利用していくカスケード利用も可能です。

ほかにも，フラッシュ発電後の熱水や温泉水を用いてアンモニアや代替フロンなど水よりも沸点の低い媒体を加熱，蒸発させてタービンを回す「バイナリー発電」があります。これは地下水の温度が150℃よりも低い場合にも使える方式で，発電設備が比較的小さいため，小規模の地熱発電を増やすことができます。

一方で，地熱による発電量を抜本的に増やすことができる革新的な技術として「超臨界地熱発電」の実現に向けた研究も進んでいます。超臨界地熱発電は，従来の地熱貯留層よりも深い地下3～5 km程度の深さにある400～500℃のマグマ起源の流体を利用することで，より多くのエネルギーを取り出すというコンセプトです(第1図)。そのような流体がある温度・圧力環境では，純水であれば臨界点(374℃以上，218気圧以上)を超え「超臨界状態(液体と気体の区別がつかなくなっている水)」となっていると考えられるため，超臨界地熱発電と呼んでいます。

¹ 産総研 エネルギー・環境領域再生可能エネルギー研究センター

キーワード：地熱発電，再生可能エネルギー，地熱貯留層，微小地震，温泉モニタリング，超臨界地熱



第1図 従来の地熱発電と超臨界地熱発電の模式図。

超臨界地熱発電は、国の2050年を見据えたエネルギー戦略の中でも有望な革新的技術として位置付けられています。2021～2023年度には、岩手県の葛根田^{かつこんだ}地熱地域など国内4地域で、詳細な地下構造の解析や発電可能量のシミュレーションなど、試験掘削に向けた調査が行われました（新エネルギー・産業技術総合開発機構，2024aなど）。今後は、試験掘削により超臨界地熱システムの存在を実証するとともに、実用化のために必要な技術開発を進める計画です。諸外国でも同様のコンセプトを持つ発電技術の調査が行われていますが、現段階で実用化されたものはなく、日本が先行して発電を実現できれば世界をリードできるのではと考えています。

3. 地熱発電の課題

地熱エネルギーを適正に利用し、地熱発電の大量導入を進めていくには、掘削成功率を上げ、開発に伴うリスクを低減することがカギとなります。

調査や発電用の井戸を掘るためには1本で数億円以上の費用がかかります。発電所の規模にもよりますが、必要な井戸は10本を超えることも珍しくはありません。しかし、直接見ることのできない地下の構造を正確に把握することは難しいので、百発百中で地熱発電に適している地域や蒸

気の出る位置がわかるわけではありません。開発の初期段階における掘削成功率は、約3割にとどまるともいわれています（サニエル・安川，2013など）。井戸を掘ってもうまく蒸気を出すことができなければ、大きな損失となってしまいます。掘削成功率をあげて初期投資に踏み切ってもらうために、発電用の井戸を掘る前の「調査の精度」を上げていくことが、普及にとって大切な課題の一つだと考えています。

産総研は、この課題に対して、地下の構造や状態を物理的・化学的手法で精度良く推定する手法を開発するとともに、各種の地球科学的データから読み取れる情報を自動的に解釈するためにAIを利用することで、有望な掘削位置推定の確実性を上げることを目指しています（Suzuki *et al.*, 2021；新エネルギー・産業技術総合開発機構，2024bなど）。また、国内の地熱発電に適している地域を表す地熱資源量マップを高精度化するための研究も実施しています。

4. 環境への影響評価

地熱エネルギーを持続的に利用するためには、環境に与える負荷を低減しなければなりません。産総研では、地熱発電所周辺の温泉や地下の状況をモニタリングする技術を開発し、環境への影響の評価に取り組んでいます。

4.1 地熱発電所周辺の地下環境のモニタリング

地熱発電では、地下の蒸気や熱水を取り出し、発電に使用したあとの温水を再び地下に戻すなど、地下での水の移動を伴う操作をしています。そのため、地下環境に影響を及ぼさずに安定した発電を続けるためには、地下を監視(モニタリング)する必要があります。そのモニタリング方法の一つは、人間が感じないような「微小地震」を捉えることです。福島県の奥会津地熱地域では、長期間の発電で減衰した蒸気量の回復を目的として、人工的な注水を行う研究プロジェクトが行われました。産総研では、プロジェクト期間中に微小地震をモニタリングし、震源の集中ゾーンや地震波の伝わり方の変化などの可視化を行いました(岡本ほか, 2021 など)。このような技術で地下の状況の変化を把握することができ、地熱貯留層を長期間維持するための適切な管理に役立てられます。

4.2 温泉モニタリングシステムの開発と地域理解の促進

国内の地熱発電がこれまで明確に温泉へ影響を及ぼした事例はないと説明されることもありますが、それを検証するためのデータは少なく、今後もリスクが無いとは言えません。そこで、地熱発電が温泉に与える影響に関する科学的データを得るためのAI-IoT温泉モニタリングシステムを開発しました。

このシステムは、第2図に示すように温泉の配管に計測器を取り付けて、遠隔で温泉の流量や温度、電気伝導度(電気を通りやすさ)、外気温、圧力などを連続的に測定すると

ともに、AIにより泉質の変動を自動で検出する仕組みです(浅沼ほか, 2020)。すでに全国10か所以上の温泉地で試験を終え、実装フェーズに入っています。

温泉などの環境モニタリングを高度化する技術を開発するとともに、温泉事業者や近隣住民などの地域の方々には科学的なデータを示して、丁寧に説明していきたいと考えています。

5. 今後の展望

産総研では、2050年のカーボンニュートラル実現に向け、さまざまな角度から地熱エネルギーの適正な利用のための技術開発を行っています。純国産の再生可能エネルギーである地熱発電の導入拡大は、エネルギーセキュリティの観点からも重要です。在来型発電の導入を拡大するための技術開発を進めつつ、超臨界地熱発電などの次世代の地熱発電技術の研究を進め、地熱発電の普及に貢献していきたいと考えています。

文 献

- 浅沼 宏・吉田勇作・梶原竜哉・清田由美(2020) AI-IoT温泉モニタリングシステムの開発:技術紹介. 地熱技術, 45(3,4), 59-66.
 岡本京祐・浅沼 宏・二宮 啓(2021) 常時微動観測による地熱地域での熱水流動モニタリング. GSJ地質



第2図 温泉モニタリングシステム(左)と温泉配管への接続例(右)。

ニュース, 10, 294-298.

サニエル スビール・安川香澄 (2013) 地熱井掘削のリスクと経済性に関する統計的検討. 日本地熱学会誌, 35, 83-91.

資源エネルギー庁 (2016) 地熱資源開発の現状と課題について. 第 18 回 総合資源エネルギー調査会資源・燃料分科会 資料, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/018.html (閲覧日: 2024 年 6 月 11 日).

資源エネルギー庁 (2024) 今後の再生可能エネルギー政策について. 電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 (第 62 回) 資料, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/062.html (閲覧日: 2024 年 6 月 11 日).

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2024a) 超臨界地熱資源量評価 (葛根田地域). 2023 年度成果報告会資料, <https://www.nedo.go.jp/activities/>

[ZZJP_100198.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100198.html) (閲覧日: 2024 年 6 月 11 日).

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2024b) AI を利用した在来型地熱貯留層の構造・状態推定. 2023 年度成果報告会資料, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100198.html (閲覧日: 2024 年 6 月 11 日).

Suzuki, Y., Ioka, S., Muraoka, H. and Asanuma, H. (2021) Shadow effect of the pH distribution of surface waters around the Kakkonda geothermal field, Japan. *Geothermics*, 95, 102111.

YAMAYA Yusuke (2024) Current status and issues of geothermal power generation in Japan: AIST's efforts to overcome them.

(受付: 2024 年 6 月 11 日)