



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

## 地熱発電分野の技術戦略策定に向けて — 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

Vol. 106 2021 年 9 月

はじめに .....	2
1 章 解決すべき社会課題と実現したい将来像 .....	5
1-1 社会課題と将来像 .....	5
1-2 解決・実現のための方法 .....	6
1-3 環境分析とベンチマーキング .....	7
2 章 解決・実現手段の候補 .....	16
2-1 在来型地熱発電の導入拡大の促進 .....	16
2-2 超臨界地熱発電の早期実用化 .....	23
2-3 地熱資源利用の次世代革新技術の開発 .....	27
3 章 おわりに .....	29

TSC とは Technology Strategy Center (技術戦略研究センター)の略称です。

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)

## はじめに

本レポートは、地熱発電技術を対象とする TSC Foresight vol. 12「地熱発電分野の技術戦略策定に向けて」<sup>1</sup>に続くレポートである。Vol. 12では、地熱発電技術の置かれた状況、在来型地熱発電分野での技術課題、非在来型地熱発電（Engineered / Enhanced Geothermal System、以下「EGS」という）実現に向けた技術開発の必要性について解説した。本レポートでは最新の技術・政策動向に関する分析、在来型地熱発電分野の技術課題解決に向けた具体的なアプローチ、EGS の中でも特に超臨界地熱発電の早期実現に向けて取り組むべき課題とそのアプローチについて解説する。また、地下の膨大な地熱資源の利用拡大が期待される次世代革新技術についても紹介する。

地熱発電は、地球内部に蓄えられた熱エネルギーを利用した発電技術である。ライフサイクル二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量が非常に少なく（約 13g-CO<sub>2</sub>/kWh）<sup>2</sup>、長寿命<sup>3</sup>で設備利用率が高いという利点を有する<sup>4</sup>。加えて、地熱は再生可能エネルギーの一つであるが、変動性再生可能エネルギー（太陽光、風力）による発電とは異なり、電力を安定的に供給できることから、ベースロード電源となり得る発電技術である。

火山国である我が国では世界第三位の地熱資源ポテンシャルを有している（23,470 MW）<sup>5</sup>。さらに 2011 年の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）に伴う福島第一原子力発電所の事故ならびにその後の電力供給の深刻な混乱が契機の一つともなり、地熱発電は重要な再生可能エネルギーとして期待が高まっている。在来型地熱発電では、天然の地熱貯留層を掘りあて、高温・高圧の水蒸気・熱水を取り出して発電を行う（図 1）。取り出した水蒸気・熱水を電気に変換する技術には、噴出した蒸気・熱水を直接利用するフラッシュ発電と、水よりも低沸点の媒体を利用して熱交換をするバイナリー発電がある。これら地熱発電に関する技術における我が国の競争力は高く、2019 年の地熱発電タービン・発電機市場における日系企業のシェアは 61%であった（図 2）<sup>6</sup>。

こうした特長を踏まえ、「長期エネルギー需給見通し（経済産業省、2015）」に示された 2030 年の電源構成目標（以下「エネルギーミックス目標」という）では、2030 年の地熱発電の導入設備容量目標が 1,500 MW（約 1,000 MW 分の新設）と設定された。しかしながら、2012 年の固定価格買取制度（Feed-in Tariff、以下「FIT」という）開始か

<sup>1</sup> <https://www.nedo.go.jp/content/100788676.pdf>

<sup>2</sup> 今村ほか、日本における発電技術のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量総合評価。電力中央研究所、2016、総合報告 Y06。

<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y06>

<sup>3</sup> 日本地熱協会。経済産業省第 62 回調達価格等算定委員会資料 3、主力電源としての地熱発電導入の展望。2020。

[https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/062\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/062_03_00.pdf)

<sup>4</sup> "参考資料 1 各電源の諸元一覧"。コスト等検証委員会報告書。エネルギー・環境会議コスト等検証委員会、2011、p.12。 [http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111221/hokoku\\_sankou1.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111221/hokoku_sankou1.pdf)

<sup>5</sup> 平成 22 年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書。環境省。2011。

<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/>

<sup>6</sup> 2020 年度成果報告書、2020 年度日系企業の IT サービス、ソフトウェア及びモノの国際競争ポジションに関する情報収集。NEDO、2021。

ら 2021 年 3 月までの期間の導入量は約 80 MW にとどまっている<sup>7</sup>。大規模案件としては 2019 年 5 月に運転開始した山葵沢地熱発電所（秋田県湯沢市、発電出力約 46 MW）があるが、その後は 2024 年に安比（岩手県八幡平市、発電出力約 15 MW）とかたつむり山（秋田県湯沢市、発電出力約 15 MW）で見通しが立っているのみである。このような状況に鑑み、在来型地熱発電技術に関しては、改めて課題を抽出し、技術的／制度的解決手段について整理が必要である。

また近年、我が国を代表とする沈み込み帯<sup>8</sup>の近傍では、プレートテクトニクスによって地下に引き込まれた海水に起因する水分が高温・高圧（超臨界状態）<sup>9</sup>で賦存していると考えられている。地球温暖化対策という観点から、この超臨界地熱資源を活用する地熱発電（以下「超臨界地熱発電」と呼ぶ）の早期実用化が望まれており（図 1）、革新的環境イノベーション戦略（内閣府）においても有望技術として特定されている。超臨界地熱発電技術の早期実用化に向けた課題の抽出と優先順位づけを行い、解決手段を整理する必要がある。

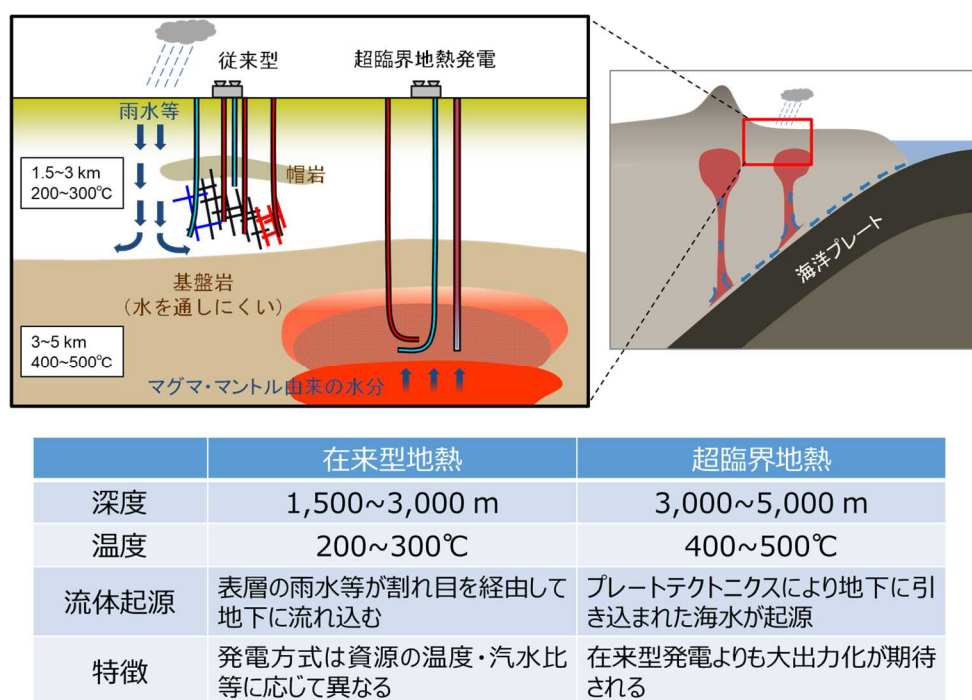


図1. 在来型地熱発電と超臨界地熱発電（上図：イメージ図、下図：概要）

出所：産業技術総合研究所作成資料等を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

<sup>7</sup> 日本地熱協会. 経済産業省第 30 回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資料 4, 2030 年地熱発電の導入見込み. 2021.

[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/saisei\\_kano/pdf/030\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/030_04_00.pdf)

<sup>8</sup> 地球上の二つのプレートが会って、下にあるほうのプレートがすべてマントルに沈み込む場所。

<sup>9</sup> 純水の場合、温度 374°Cかつ圧力が 22 MPa 以上で超臨界状態となる。

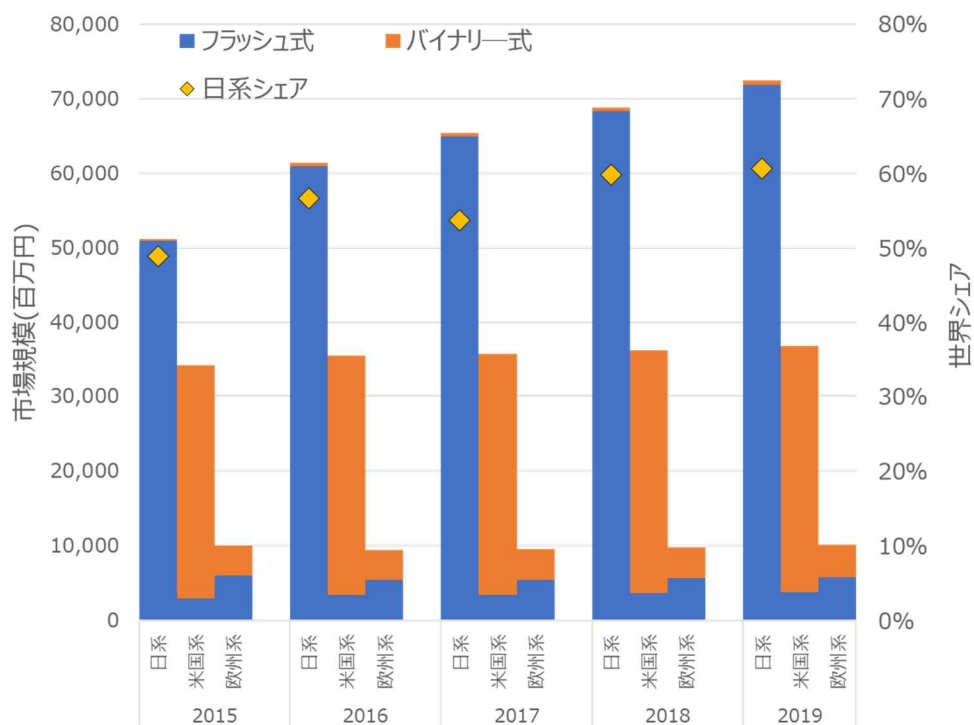


図2. 地熱発電システムに関する地域別市場占有率推移（2015～2019年実績）

出所：2020年度 日系企業のITサービス、ソフトウェア及びモノの国際競争ポジションに関する情報収集（NEDO, 2021）

## 1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

### 1-1 社会課題と将来像

産業革命が始まった18世紀後半以降、世界の平均地上気温は上昇し続けており、この気温上昇の主因は人為起源で排出された温室効果ガス（Greenhouse Gas、以下「GHG」という）の可能性が極めて高いことが「気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書（2014）」<sup>10</sup>にて指摘された。気温上昇は世界各地で深刻な影響をもたらしている大雨・熱波等の増加・長期化につながり、GHGによる気候変動問題の解決は世界共通の喫緊の課題である。我が国においても「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」<sup>11</sup>ことが宣言され、特にエネルギー分野に対する取組強化の方針が打ち出されている。

また、我が国ではエネルギー自給率（国民生活や経済活動に必要な一次エネルギーのうち、自国内で算出・確保できる比率）が非常に低く（2019年のエネルギー自給率は12.1%）、利用しているエネルギーの大部分を海外から輸入する石油・石炭・天然ガス等の化石燃料に依存している（2019年の化石エネルギー依存度は84.9%）。石炭・天然ガスに関してはアジア・オセアニア諸国への輸入依存度が高く、原油に関しては中東への輸入依存度が極めて高い<sup>12</sup>。エネルギーの安定供給という観点から、エネルギー自給率の向上は我が国の重要課題の一つであると言える。

太陽光・風力・地熱・水力等の再生可能エネルギーは、利用時に排出されるGHGが非常に少なく、国内でエネルギーを生産できるという特徴を有する。また、再生可能エネルギーの導入拡大によって、現在の大規模・集中型の電力システムから災害・リスクに強い分散型の電力システムへの転換の加速化が期待される。2018年に経済産業省により策定された「第5次エネルギー基本計画」<sup>13</sup>においても、3E+S（エネルギーの安定供給、経済効率性の向上、環境への適合、安全最優先）の原則の下、安定的で負担が少なく、環境に適合したエネルギー需給構造を実現することが目標として掲げられている。2030年の実現を目指すエネルギーミックス目標としては、2017年時点で約16%であった再生可能エネルギーの電源構成比率は22～24%とされており（図3）、この水準達成に向けて低コスト化、系統制約の克服、不安定な発電出力に対する調整力の確保に取り組む方針が打ち出された。さらに2050年に向けては、あらゆる選択肢を追及する「エネルギー転換・脱炭素化を目指した全方位での野心的な複線シナリオ」を採用する方針が示され、再生可能エネルギーに関しては、経済的に自立し脱炭素化した主力電源化を目指すことも明記されている。

<sup>10</sup> Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC, 2018.  
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

<sup>11</sup> 2020年10月26日の第203回臨時国会における管内閣総理大臣所信表明演説による。

<sup>12</sup> 資源エネルギー庁. 令和元年度（2019年度）エネルギー需給実績を取りまとめました（確報）.  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/gaiyou2019fyr.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/gaiyou2019fyr.pdf)

<sup>13</sup> 資源エネルギー庁. 第5次エネルギー基本計画（平成30年7月）. 2018.  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/)

将来的に、再生可能エネルギーの利用が最大化されかつ地球環境への負荷が最小化された、持続可能な社会システムの早期実現が望まれている。

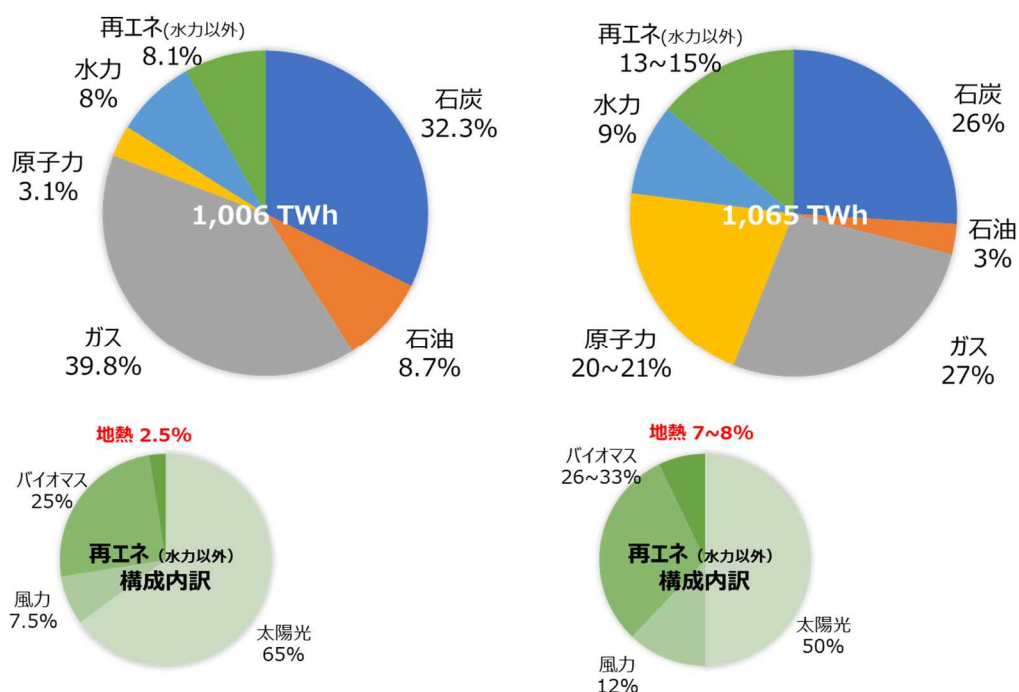


図3. 我が国における発電電力構成の現状（左図）と「長期エネルギー需給見通し（経済産業省、2015）」に示された2030年の電源構成目標（右図）

出所：IEA World Energy Outlook 2019（OECD/IEA, 2019）及び日本のエネルギー2019（経済産業省・資源エネルギー庁）を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

## 1-2 解決・実現のための方法

持続可能な社会システムという将来像の実現のための方法として、再生可能エネルギーの一つである地熱発電の分野では、特に、在来型地熱発電の導入拡大促進と超臨界地熱発電の早期実現が考えられる。

地熱発電に一般に期待される主な利点を以下に示す。

- ・ 国内に豊富に賦存する地熱資源を利用するという点で、エネルギーセキュリティの向上に資する。
- ・ 季節・天候等の自然条件に左右されず、昼夜を問わず安定的な発電が可能なベースロード電源である。
- ・ 災害時・緊急時には、近隣地域での非常用電源として利用可能である。
- ・ 低温の地熱資源に関しては、小規模発電（バイナリー発電及びトータルフロー発電）による地産地消が可能である。

この他にも、地熱発電に利用後の熱水・蒸気のカスケード利用（ハウス栽培や養殖事

業等)や地熱発電に関連する雇用機会の新規創出などといった価値提供を通じて、地域(自治体、地域企業、住民)との共生・地域活性化に貢献することが期待される。以上を踏まえ、持続可能な社会システムという将来像の実現に向けて、我が国において地熱発電の拡大を積極的に推進する意義は非常に大きい。

先述の第5次エネルギー基本計画においても、地熱発電は「発電コストが低く、安定的に発電を行うことが可能なベースロード電源を担うエネルギー源」と位置付けられ、地域との共生を図りつつ緩やかに自立化を実現していくことが期待されている。2030年の実現を目指すエネルギーミックス目標において地熱発電の導入拡大が掲げられており、地熱の導入設備容量目標は1,500 MW(約1,000 MW分の新設)と設定された(図3(右図))。ただし、本目標は在来型地熱発電のみを対象とし、超臨界地熱等のEGSの寄与は考慮されていない。本目標を達成するには、「2021年度までに新規開発地点を開拓」し、「地表調査開始から発電所建設完了までの開発期間を10年未満に短縮」する必要がある。

一方、超臨界地熱発電は在来型地熱発電に対して以下の優位性を有する。

- ・ プレートテクトニクスにより地下に引き込まれた海水を起源とする熱水系を対象としており、在来型地熱発電で利用される熱水系と異なるため、開発対象となる地熱資源量が拡大する。
- ・ 超臨界地熱発電では発電所あたりの出力の大規模化が可能であり、発電所あたりのGHG排出量削減ポテンシャルは在来型地熱発電よりも大きい。
- ・ 超臨界地熱発電では生産井1本あたりの発電容量が在来型の数倍以上高く、在来型地熱発電と比べ単位kWあたりの敷地改変面積を低減することが可能となる。

「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針2020(NEDO, 2020)」<sup>14</sup>では、地熱発電による2050年のCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルを全世界で年間約7億トンと試算し、このうち超臨界地熱発電等の革新技術によるCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルを年間約3億トンと見積もった。2020年に内閣府により策定された「革新的環境イノベーション戦略」<sup>15</sup>において、GHG排出量を削減するポテンシャルが大きい有望な革新的技術の一つとして、超臨界地熱発電が選定されている。

### 1-3 環境分析とベンチマーキング

#### 1-3-1 各国の政策動向

2015年に国連総会で採択された持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)では、誰もが使えるクリーンなエネルギーが目標の一つとなっており、2030年までに世界のエネルギーミックス(電源構成)における再生可能エネルギーの割合を大幅に拡大させること、およびクリーンエネルギー技術への投資の促進が

<sup>14</sup> <https://www.nedo.go.jp/content/100903678.pdf>

<sup>15</sup> <https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf>

ターゲットに掲げられている。再生可能エネルギーの導入拡大は、世界共通の潮流であり、この流れは今後も一層加速化すると考えられる。このような状況のなか、地熱発電に関しても、世界の地熱資源国では目覚ましい勢いで開発が進められている。2020年時点で世界の総発電設備容量は15,950 MW、総発電量は約95.1 TWh/年と報告されており（図4）、2010～2020年の期間における発電設備容量の増加量は年間約505 MWであった。

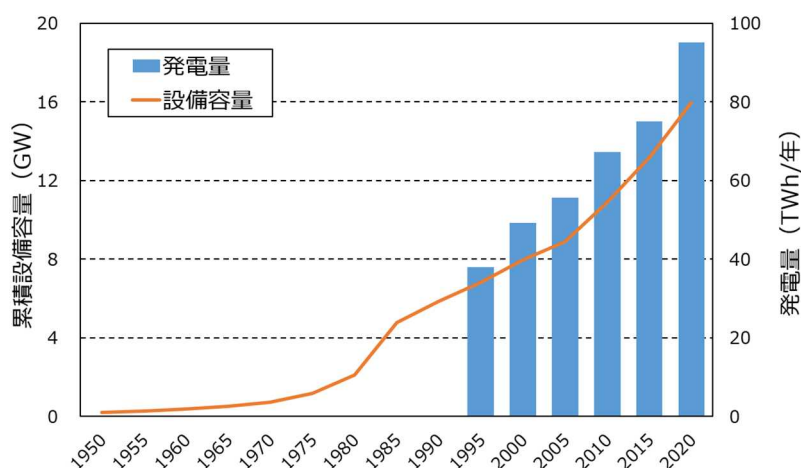


図4. 世界における地熱発電設備容量及び発電量の推移

出所：IEA Geothermal Implementing Agreement, Annual Report 2019 (OECD/IEA, 2019) 及び Proceeding of World Geothermal Congress 2020 等を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

図5に、世界の主要な地熱資源国における国別の発電設備容量の推移を示す。また表1に、2020年時点の発電設備容量が大きい上位10か国に関して、地熱ポテンシャルと2015～2020年の期間における発電設備容量の増加量を示した。図5及び表1より、近年では、フィリピン、メキシコ、イタリア、日本といった国々において地熱発電の導入が停滞しているのに対して、インドネシア、トルコ、ケニアにおいて特に目覚ましい地熱発電の導入が進められているほか、アメリカ、ニュージーランド、アイスランドにおいても着実な設備容量の拡大が進められていることが分かる。

このような状況を踏まえ本節では、近年において地熱発電の拡大が認められる国であるアメリカ、インドネシア、トルコ、ケニア、ニュージーランド、アイスランドをベンチマーク対象国と定める。表2に、ベンチマーク対象各国における地熱研究・開発に関する最近の取り組み、政策動向、2015～2019年の期間における地熱事業への投資額（推定値）をまとめた。インドネシア、トルコ、ケニアでは、政府／政府機関が2030年の地熱発電導入設備容量について野心的な目標を打ち出している点が注目される。また、地熱事業への投資額について、アメリカとトルコ以外の国では投資総額に対してフィー



ルド開発費用（生産井掘削、プラント設備等を含む）の占める割合が非常に大きいことが分かる。

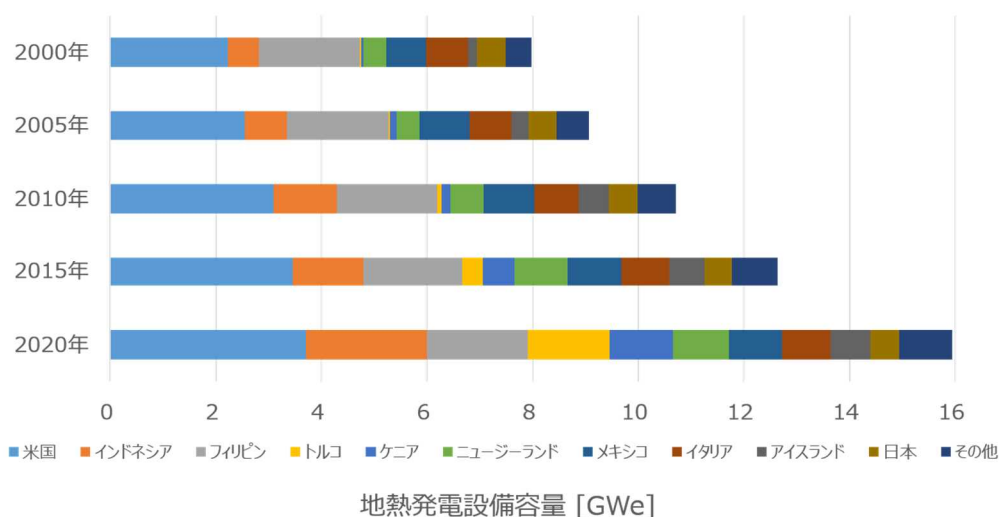


図5. 各国の地熱発電設備容量の推移

出所：Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report (Proceedings of World Geothermal Congress 2020) 等を参考に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

表1. 各国の地熱資源及び地熱発電の状況

出所：Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report (Proceedings of World Geothermal Congress 2020) 等を参考に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

	地熱ポテンシャル [MWe]	発電設備容量 (2020年) [MWe]	2015年からの発電設備容量増加量		設備容量／ポテンシャル [%]
			[MWe]	順位	
アメリカ	30,000	3,700	250	④	12
インドネシア	27,790	2,289	949	②	8
フィリピン	6,000	1,918	48		32
トルコ	4,500	1,549	1,152	①	34
ケニア	7,000	1,193	599	③	17
ニュージーランド	3,650	1,064	59	⑥	29
メキシコ	6,000	1,006	-11		17
イタリア	3,270	916	0		28
アイスランド	5,800	755	90	⑤	13
日本	23,470	550	31		2

表2. ベンチマーク対象各国における地熱開発に関する政策動向

出所：Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report  
(Proceedings of World Geothermal Congress 2020) 等を参考に NEDO 技術戦略  
研究センター作成 (2020)

国名	地熱研究・開発に関する最近の取組み／政策動向	地熱事業への投資額 (FY2015~FY2019) [Million US\$]
アメリカ	<ul style="list-style-type: none"> <li>2015~2019年の期間に新たに開発が進められたフィールドはない</li> <li>2023年までに、設備容量を少なくとも111 MWe増設する計画</li> <li>エネルギー省 (DOE) は、EGSに関する実証試験を含む様々な技術開発・研究テーマに資金を提供している (2019年実績 8,400万\$)</li> <li>DOEは2019年、地熱に関する長期ビジョン“GeoVision”を発表</li> </ul>	976.4 (内フィールド開発費用が597, DOEが提供の研究開発費が360.4)
インドネシア	<ul style="list-style-type: none"> <li>政府は2030年の導入設備容量目標を10,000 MWeと設定</li> <li>2017年以降、地熱開発プロジェクトは減速傾向にはあるが、2027年頃に導入設備容量でアメリカを抜く見込みである</li> </ul>	3,153 (内フィールド開発費用が3,083)
トルコ	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー天然資源省 (MENR) は実施した探鉱データを事業者に開示することで、民間企業の探鉱リスクを軽減</li> <li>MENRは2030年の導入設備容量目標を4,000 MWeと設定</li> <li>地熱関連事業への投資額のうち、民間部門からの資金提供が90%</li> </ul>	3,540 (内フィールド開発費用が1,210)
ケニア	<ul style="list-style-type: none"> <li>政府は2030年の導入設備容量目標を5,000 MWeと設定</li> <li>地熱開発は基本的には公共事業として実施される</li> <li>地熱開発に対する民間投資を、政府政策により手厚く支援</li> <li>2020~2022年の期間で設備容量を328 MWe増設予定</li> </ul>	343.4 (内フィールド開発費用が294)
ニュージーランド	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱開発事業の大半が民間もしくは準政府機関により進められる</li> <li>政府は2035年までに全電力を再生可能エネルギーで賄うことを目標に掲げている (地熱発電は2005~2015年に急成長期を迎えた)</li> </ul>	60 (内フィールド開発費用が60)
アイスランド	<ul style="list-style-type: none"> <li>国の主要なエネルギー供給量の約62%を地熱により供給している</li> <li>今後も更なる地熱利用の拡大を目指している</li> <li>ReykjanesのIDDP深部坑井は、2017年1月に掘削完了 (3~4kmの深度である程度の透水性があり、500℃以上の温度を記録)</li> </ul>	225 (内フィールド開発費用が175)

### 1-3-2 技術動向

#### (1) 地熱発電に関する技術俯瞰

図6に地熱発電に関する技術俯瞰図を示す。本図の最上段は、地熱利用の各種形態 (在来型地熱発電、超臨界地熱発電など) としての技術成熟度レベル (Technology Readiness Levels、以下「TRL」という) を示している。本図の2段目以下では、「資源量評価」から「操業・貯留層管理」に至るまでの開発フェーズに加え、「環境影響評価」、「EGS (超臨界地熱発電を含む)」、「革新的地熱資源利用」の各用途について、要素技術をTRLに応じて例示している。

地熱発電では、開発フェーズや用途に応じて多岐にわたる技術が用いられる。地熱発電の導入拡大のためには、図中のいずれか一つの技術の発展・実用化がブレークスルーとなるわけではなく、様々なフェーズ・用途での要素技術のイノベーションが求められる。TRLも踏まえてバランス良く各フェーズ・用途での技術開発を進めていく必要がある。また、「資源量評価」での物理探査や地質解釈、ならびに掘削や貯留層管理等では、石油・天然ガス等の他の地下資源開発で培われた技術の応用も可能である。

TRL	研究段階		実証段階	実用化段階	
	基礎 (TRL:1-3)	応用 (TRL:4-6)			
形態	在来型地熱発電 (フラッシュ方式/バイナリー発電)				
	EGS/高温岩体 (Type1~4 *)				
	超臨界地熱発電 (Type5*)				
	革新的地熱資源利用				
*Type1~5: NEDO TSC Foresight Vol.12 (2016)での分類					
地熱開発全般での開発フェーズ	資源量評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>ミューオングラフィ</li> <li>⇒ 断層・断裂構造推定</li> <li>物理探査技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高分解能MT法など</li> <li>透水性構造の推定 (断裂構造に基づく)</li> <li>長期挙動予測精度の向上</li> <li>THMC連成シミュレーション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>反射法地震探査</li> <li>⇒ 断層・断裂構造推定</li> <li>坑井内弾性波探査(VSP)</li> <li>⇒ 探査分解能の向上</li> <li>深部地層温度の精度向上</li> <li>AI・地球統計学</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>資源量の概算</li> <li>リモートセンシング</li> <li>広域重力探査</li> <li>電気・電磁気探査</li> <li>微小地震探査</li> <li>広域地質調査</li> <li>地化学調査</li> <li>貯留層概念モデル構築</li> <li>貯留層シミュレーション</li> </ul>
	坑井の掘削・仕上げ		<ul style="list-style-type: none"> <li>透水断裂達着の確率向上</li> <li>MWD/LWDの高度化等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高傾斜井の掘削</li> <li>MWD/LWD、等</li> <li>掘削工程最適化・効率化</li> <li>IoT/AI技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在来型地熱井の掘削</li> <li>ケーシングプログラム</li> <li>坑井内物理検層</li> <li>噴気還元試験</li> <li>坑内流動シミュレーション</li> </ul>
	発電		<ul style="list-style-type: none"> <li>高温加熱蒸気清浄化</li> <li>耐腐食性資機材開発 (坑口装置、配管、タービン等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フラッシュ方式発電</li> <li>気水分離器、タービン、発電機、復水器等</li> <li>フラッシュ方式：シングル/ダブル/トリプル</li> <li>バイナリー方式発電</li> <li>有機ランキンサイクル、カーナサイクル等</li> </ul>	
	操作管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境負荷の低減 (全量還元、等)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>高効率熱交換器</li> <li>低環境負荷熱交換媒体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>プラント管理・操業最適化</li> <li>稼働状況モニタリング/遠隔監視</li> <li>貯留層の維持管理</li> <li>貯留層モニタリング (温度・圧力測定等)</li> </ul>
	環境影響評価		<ul style="list-style-type: none"> <li>温泉影響評価</li> <li>誘発地震リスク評価 (THMC連成シミュレーション)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>温泉モニタリング (IoT/AI)</li> <li>硫化水素モニタリング</li> <li>エコジカル・ランドスケープデザイン</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>微小地震長期モニタリング</li> </ul>
	EGS・超臨界地熱関連	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温下での亀裂開口保持</li> <li>CO<sub>2</sub>圧入フラクチャリング</li> <li>マグマ発電</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>THMC連成数値解析</li> <li>坑井資機材の耐腐食性・耐熱性向上 (ケーシング、セメント、泥水、パッカー、等)</li> <li>加圧区間の圧力隔離方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧破砕・透水性改善</li> <li>深部地殻応力測定</li> <li>超臨界地熱シミュレーション</li> <li>光ファイバーセンシング</li> </ul>	
	革新的地熱資源利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>苦鉄質岩層でのCO<sub>2</sub>固定</li> <li>ジオリアクター</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CO<sub>2</sub>循環型地熱発電技術</li> <li>地殻流体中の有用/希少物質回収技術</li> </ul>		

図6. 地熱発電に関する技術俯瞰 (近年、NEDO プロジェクトとして研究/技術開発を実施したものを青字で示した)

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

各種の要素技術自体は、いずれの形態であっても、またいずれの国や地域であっても共通して利用できる可能性はある。ただし、地熱開発/操業者には、開発対象となる地熱地域の地下特性や規模等に応じて、技術や機材の仕様を適切に選択し組み合わせて活用することが求められる。そのため、地熱開発/操業において用いられる技術や機材の仕様ならびにその組み合わせ方等を国際標準化するといったことは現実的ではない。例

例えば、実用化段階にある在来型地熱発電においても、各開発フィールド固有の課題を抱えている場合があり、研究・実証段階にある EGS・超臨界地熱等の非在来型地熱発電の要素技術の実用化により、課題解決がなされる可能性がある。

より過酷な温度圧力環境が想定される超臨界地熱発電においては、利用形態としても研究段階から実証段階に移りつつあり、多くの技術開発課題がある（詳細は2章に述べる）。

## (2) 学術論文の発表動向

地熱発電分野の技術動向を把握するにあたり、近年の論文発表状況に関する調査結果を図7に示した。なお本レポートでは、クラリベイト社が提供するデータベース Web of Science に収録された論文（2006年1月～2020年7月の間に出版されたもの）を調査の対象とした。公表論文数は年々増加の傾向にあり（図7（上図））、地熱発電分野の技術／研究開発が着実に進められていることが伺える。国別の論文件数（上位10か国を表示）では（図7（下図））、アメリカ、トルコに加えて、中国、ドイツ、イタリア、オーストラリアといったベンチマーク対象外の国からの発表が多い一方で、地熱開発が盛んなインドネシア、ケニアは上位に入っていない。これは、地熱発電分野における学術面での技術／研究開発は主に先進国を中心に進められているということを示している。地熱発電を導入可能な国・地域が限定的でありかつ地域ごとに資源の特性が異なることを考慮すれば、地熱資源国がお互いに協力する関係を構築・維持したうえで技術／研究開発を進めていくことが重要である。

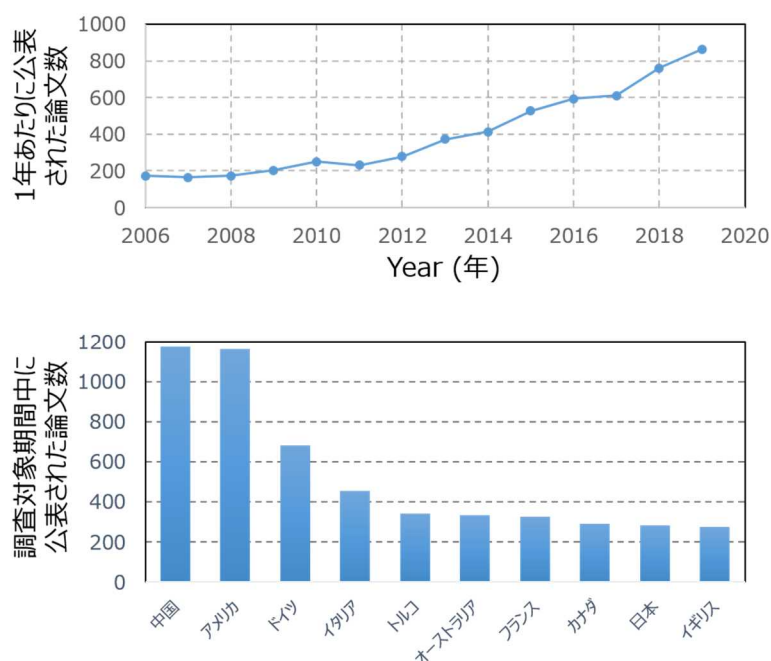


図7. 地熱発電関連の論文に関する年間公表数の推移（上図）及び国別件数（下図）

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

### (3) 各国の開発事例

ここでは、2020 年時点で世界一の地熱発電設備容量を誇り、地熱発電分野の技術／研究開発を世界的にリードする米国、ならびに、超臨界地熱発電の取り組みが先行するアイスランドの事例について紹介する。

#### ① 米国の事例

米国エネルギー省（U.S. Department of Energy、以下「DOE」という）が近年主導した研究開発プロジェクトをレビューし、そこから地熱発電分野での技術動向を表 3 にまとめた。

表 3 からは、以下の傾向が読み取れる。

- ・ EGS 関連の技術開発・実証試験に軸足を置き<sup>16</sup>、特に水圧破砕・坑井刺激技術の確立に注力している。
- ・ 地熱井の掘削成功率向上や発電コスト削減のための技術開発にも重点が置かれ、機械学習技術<sup>17</sup>をはじめとする他分野技術の導入も積極的に進めている。
- ・ 地熱による発電量を向上させるため、未発見資源の探索や低温地熱資源の有効活用に関する基礎研究にも取り組んでいる。

なお、DOE が 2019 年に発表した報告書 GeoVision でも EGS 関連の技術開発の重要性が強調されており、商用 EGS が実現できれば 2050 年までに地熱発電導入設備容量 60 GW が達成可能との見通しが示されている<sup>18</sup>。

---

<sup>16</sup> FORGE プロジェクトの予算規模は、5 年間で総額 140 百万ドルと報告されている。

<sup>17</sup> コンピュータが大量のデータを学習し、分類や予測といった課題を効率的に実行するためのアルゴリズムおよび統計モデルを構築する技術。

<sup>18</sup> GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet. Department of Energy, 2019.

<https://www.energy.gov/eere/geothermal/downloads/geovision-harnessing-heat-beneath-our-feet>

表3. 米国エネルギー省が主導する地熱発電技術関連の研究開発

出所：DOE Geothermal Technologies Office のホームページ公開情報等を参考に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

プロジェクト名	概要
Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ユタ州MilfordサイトにてEGS関連要素技術の研究開発及び貯留層造成に関する実証試験を実施</li> <li>EGSによる持続的且つ経済的な商用発電の実現が目標</li> </ul>
EGS Collab	<ul style="list-style-type: none"> <li>小規模原位置試験を通じて、EGS開発時の岩石破壊挙動や水理特性変化等に関する知見を獲得することが目標</li> <li>FORGE-PJの前段にあたるプロジェクトという位置づけ</li> </ul>
Waterless Stimulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>水資源を（ほとんど）消費しない坑井刺激技術の開発</li> </ul>
Efficient Drilling for Geothermal Energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>掘削停止期間の短縮、掘進率の改善等をはじめとする、革新的な地熱掘削技術の確立のための研究開発</li> </ul>
Play Fairway Analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表で地熱徴候が見られない、未発見の地熱システムの探索</li> <li>地熱による発電量／熱利用量の向上に寄与</li> </ul>
Zonal Isolation	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑井刺激の際、加圧区間を限定し、亀裂の生成位置を制御するための技術を開発</li> <li>EGS開発において、開発コスト及び開発リスクの低減に寄与</li> </ul>
Machine Learning for Geothermal Energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱資源探査や貯留層管理に機械学習技術を適用</li> <li>掘削成功率の向上や発電コストの低減へ寄与</li> </ul>
Subsurface Stress/Lost Circulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱掘削における成功率向上と掘削コスト低減を念頭に、貯留層の応力状態を適切に把握する方法、坑内を循環する流体が地層内に失われるのを予防する技術を開発</li> </ul>
Beyond Batteries/AESI	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱エネルギーを蓄電／蓄熱する手法に関する基礎的検討</li> </ul>
Deep Direct-Use	<ul style="list-style-type: none"> <li>深部の低温地熱資源のカスケード利用に関する基礎的検討</li> </ul>

② アイスランドの事例

超臨界地熱発電の構想はこれまでに複数の国（アメリカ、ニュージーランド、メキシコ、イタリア）で検討されてはいるが、特に先行しているのがアイスランドである。アイスランドにおける大深度高温域への掘削プロジェクト（Iceland Deep Drilling Project、以下「IDDP」という）は、これまでに以下のような成果を上げてきた。

- ・ 2008～2012年にかけて、IDDP-1号井（Krafla地域）を掘削し、過熱蒸気の噴出を確認した（坑口状態での温度450℃、圧力13.8 MPa。約36 MWの発電出力に相当）
- ・ 2016～2017年にかけて、IDDP-2号井（Reykjanes地域、図8）を掘削し、深度4,650 mで温度427℃、圧力34 MPaの地熱流体を確認した（地熱流体は超臨界状態で存在している可能性が極めて高い）

IDDP-2号井では、2020年以降に噴気試験を計画しており、試験を通じて超臨界地熱発電の実現可能性および技術開発の方向性等が詳細かつ慎重に検討されていくことが期待される。更に得られた知見は関係者に適切に共有され、超臨界地熱発電のための革新技術の着想へと繋げていくことが求められる。



図8. アイスランドで掘削された大深度高温地熱井（IDDP-2号井（Reykjanes 地域））  
出所：産業技術総合研究所の撮影・提供（2018）

## 2 章 解決・実現手段の候補

我が国における地熱発電量の拡大に向けては、「在来型地熱発電の導入拡大の促進」及び「超臨界地熱発電の早期実用化」が求められる。本章では、それぞれの開発の現状を整理したうえで解決すべき課題を掘り下げるとともに、抽出された各課題に対して取るべきアプローチについて解説する。また最後に、膨大な地熱資源の将来的な利用拡大が期待される革新技術開発についても紹介する。

### 2-1 在来型地熱発電の導入拡大の促進

#### 2-1-1 課題と解決手段

在来型地熱発電に関して、エネルギーミックス目標における 2030 年の地熱の導入設備容量目標が 1,500 MW（約 1,000 MW 分の新設）であるのに対し、FIT 開始から 2021 年 3 月までの期間導入量は約 80 MW にとどまっている。2019 年時点での調査・開発途上の案件が 119 MW<sup>3</sup>であることを考慮しても、エネルギーミックス目標に向けてさらなる導入を加速する必要がある。以下に導入拡大に向けた課題およびその解決手段を述べる。

##### (1) アクセス可能な地熱資源量の拡大

地熱資源には地域偏在性がある。地熱導入ポテンシャルが高い地域の約 8 割は国立・国定公園（以下、自然公園）に指定された景勝地もしくは温泉地となっており（図 9（上図））、アクセスが難しいことが課題である。

自然公園の特別地域に賦存する地熱資源に対しては、基本的には自然公園外もしくは自然公園内の普通地域からアクセスする必要がある、この際に高傾斜掘削技術（図 9（下図））の高度化が求められる。本技術は地熱開発分野で適用された事例自体が少なく、2020 年時点で自然公園内に賦存する地熱資源に高傾斜掘削でアクセスすることに成功した事例は報告されていない。

また、自然公園の特別地域の開発を進めるにあたっては、より万全な環境配慮とそれに基づく地元理解も重要である。



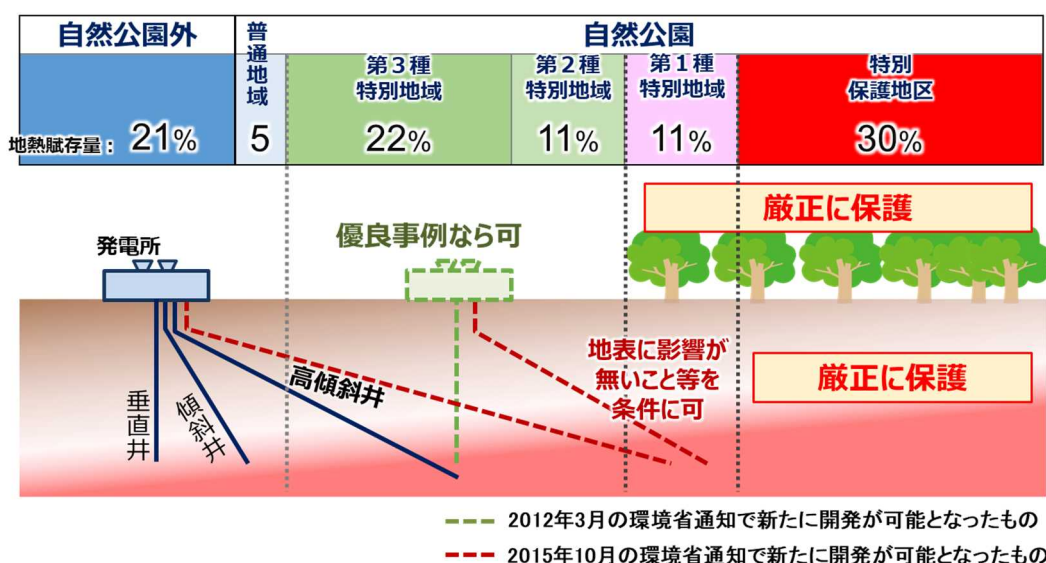


図9. 自然公園内の地熱開発の地域別賦存量（上図）と自然公園内特別地域での地熱開発の取り扱い（下図）

出所：（上図）調達価格等算定委員会（第1回）配布資料（経済産業省，2012）等を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）、（下図）「国立・国定公園内における地熱開発の取り扱いについて」にかかる通知文書（環境省，2012，2015）を参考に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

## （2）開発リスク及び発電コストの低減

発電コスト<sup>19</sup>の低減は再生可能エネルギー利用において共通の課題として位置づけられる。地熱発電においては、地熱資源自体の質や量、場所等に大きく影響される<sup>20</sup>という不利な側面はあるものの、発電に要する総費用の削減を実現できるよう、技術開発を進める必要がある。

地熱発電では、常に掘削失敗（地熱資源が存在しない、もしくは高温ながら蒸気が不足して経済的な開発を断念するなど）のリスクがあり、これを低減する必要がある。例えば開発初期段階での掘削成功率は、3割程度とも言われる<sup>21</sup>。掘削成功率を向上させるためには、地熱貯留層の構造を事前に精緻に把握する必要がある。

地熱開発では初期投資費用（調査・探査費および坑井掘削費等）が高額であり、掘削に失敗すると初期費用は全て無駄になってしまう。特に初期投資費用の大半を占める坑井掘削費の削減については、単なる発電コストの低減だけでなく開発リスクの低減の手段と捉えることもできる。

<sup>19</sup> 一定期間の発電を行うために費やした総費用をその期間に発電した総発電量で除した値。

<sup>20</sup> 一般的に、利用できる蒸気・熱水の温度が高く、発電設備容量が大きいほど発電コストは低下する。一方で、開発の難易度が高い場合、発電コストが上昇する傾向にある。

<sup>21</sup> [第22回 総合資源エネルギー調査会資源・燃料分科会]資料4、地熱発電の現状について、平成29年6月。資源エネルギー庁資源・燃料部。2017。

[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen\\_nenryo/pdf/022\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/022_04_00.pdf)

また貯留層・坑井の適切な維持管理により設備利用率（出力 1,000 kW 以上の地熱発電における 2018 年度設備稼働率は約 57%にとどまる）や総発電量を向上するといった手段が考えられる。

### (3) 調査から発電開始に至るまでの期間の短縮とそのための地元理解

地熱発電では、調査や開発にあたりステークホルダーとの合意形成に時間を要する。地熱の開発期間は、現状では平均 13~15 年程度であり、特に発電所建設前の環境影響評価に 4 年程度の長い年月を要している（図 10）。さらに地熱開発では、事前に地元調整が全て完了し、地元理解も十分に得られているのが理想的である一方で、実際には開発ステップが進むごとに繰り返し地元調整・地元理解が必要ともなる（図 10）。特に、(1) に挙げた資源量の増大にも関係する自然公園内の地熱調査・開発では、ステークホルダーとの合意形成に時間を要し、開発のスピードが非常に遅いという点が現状の課題となっている。円滑な地元調整・地元理解の促進のためには、地域住民や温泉事業者等への正確な情報提供やリスクの見える化を進めていく必要がある。

また、社会受容性を高める観点から、温泉への影響が少ない地熱発電技術が求められている。例えば、バイナリー発電は、フラッシュ発電と比較して発電規模は小さくなるものの、新規に掘削する坑井が少ないもしくは不要であり、また、発電に利用する流体を全量地下に還元できる場合があるなど、環境への負荷が少ないために社会受容性が高い<sup>23</sup>。ただし、バイナリー発電をはじめとする中小規模発電は、現状では FIT に依存している状態であり、経済性の向上に向けて低コスト化・高効率化に資する技術開発が求められる。

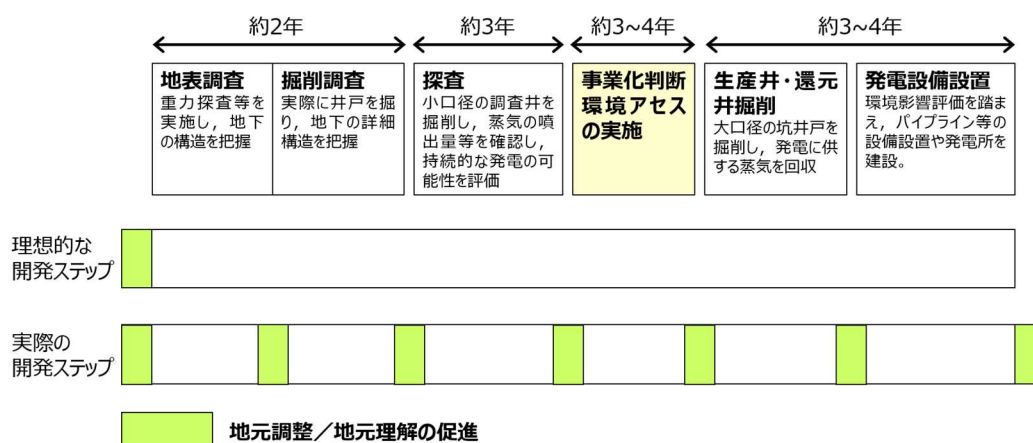


図10. 地熱発電の開発ステップと所要期間、地元調整／地元理解促進のタイミング

出所：総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会  
（第1回）配布資料（経済産業省, 2014）を参考に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

<sup>23</sup> FIT 開始から 2021 年 3 月までの期間に新規導入された地熱発電の発電ユニットは 69 ユニットであり、そのうちバイナリー発電をはじめとする中小規模発電（出力 10 MW 未満）が 68 ユニットである。

## 2-1-2 技術開発の方向性

以下において、前項に挙げた課題およびその解決手段の実現に向けた技術開発の方向性について述べる。

### (1) アクセス可能な地熱資源量の拡大

自然公園外もしくは普通地域から自然公園内（第2種及び第3種地域）に賦存する地熱資源に高傾斜掘削でアクセスする事例を積み上げ、高傾斜掘削技術による自然公園内の地熱開発手法を早期に確立することが重要である。高傾斜井の掘削については石油ガス開発分野で既に膨大な実績もある。ここで培われた要素技術について、地熱地域での高温高圧環境下での適用性も踏まえて、適宜導入していくことも考えられる。

この際、高傾斜掘削技術の適用により掘削コストの増加が見込まれる。本技術の適用に当たっては、対象とする地熱資源の質と量に見合ったコスト増加の範囲内での技術の開発・導入が必要となる。

### (2) 開発リスクおよび発電コストの低減

掘削成功率向上のためには、開発前に地熱貯留層の構造を精緻に把握することが重要である。貯留層構造の推定・把握のためには、物理探査技術が中心的な役割を果たす。表4に示した課題に取り組むことを通じて、物理探査技術の高度化・低コスト化を進めていくことが望まれる<sup>24</sup>。また、現状の物理探査技術による空間分解能が最高で10m程度であるに対し、地熱開発の掘削ターゲットである個々の亀裂の幅が数cm～数m程度であることを踏まえると、飛躍的に精密に地下構造を描写可能な革新的探査技術の開発も望まれる。

---

<sup>24</sup> 地熱貯留層の探査、掘削に関する技術開発は、主に（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（Japan Oil, Gas and Metals National Corporation、以下「JOGMEC」という）が実施している。例えば、表4にある反射法探査の適用により掘削成功率を向上させるという事業が近年、JOGMECにより実施された。

表4. 地熱資源の探査手法に関する現状と課題

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

物理探査分類	代表的な探査手法	取得できる情報	課題
電気・電磁気	<ul style="list-style-type: none"> <li>空中磁気探査</li> <li>MT探査</li> <li>AMT探査</li> <li>自然電位探査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯留層位置</li> <li>キャップロックの有無・位置</li> <li>地下比抵抗構造（空間分解能は数百m程度）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下構造境界の判別</li> <li>比抵抗値，流体・粘土の存在割合，温度の関心の精緻化</li> </ul>
重力	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表重力</li> <li>空中重力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯留層位置，断裂構造の有無</li> <li>地下密度構造（空間分解能は0.5~1km程度）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>深部方向で空間分解能／探査精度が低下</li> </ul>
弾性波	<ul style="list-style-type: none"> <li>屈折法</li> <li>反射法</li> <li>自然微小地震</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基盤構造（屈折法）</li> <li>断裂構造（反射法，空間分解能は10m程度）</li> <li>貯留層位置，脆性－延性境界，断層（自然微小地震の観測）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コストが高く，開発初期段階での適用が検討されにくい</li> <li>山岳部で適用するには，機材の小型化・可搬性向上，測量精度向上が必要</li> <li>探査結果に基づき，貯留層内の水理構造を推定する手法の開発が必要</li> </ul>
熱	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表面温度測定</li> <li>地下地温測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱異常分布</li> <li>深度方向の温度分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>深い坑井（ヒートホール）を掘削する場合，コストが高い</li> </ul>

坑井掘削費の削減にあたっては、モノのインターネット（Internet of Things、以下「IoT」という）技術および人工知能（Artificial Intelligence、以下「AI」という）技術を活用することにより、掘削ビット交換に要する掘削停止期間の最適化や掘削機器利用率の向上、掘削ビットやベアリングの不具合検出及び損傷予測に関する精度の向上等に取り組むことが有効である。

蒸気量の不足等の理由で事業化ができなかった坑井では、坑井周辺の透水性を改善することにより蒸気量向上と開発の促進が期待される。透水性を改善する手法には、例えば坑井周辺で加圧注水すること（図 11（上左図））で既存亀裂の進展あるいは連結（図 11（上右図））を生じさせる水圧破碎法<sup>25</sup>がある。一方、経年的な蒸気・熱水生産量の低下に伴う発電量低下への対策方法としては、人工涵養（図 11（下図））やスケールの除去が有効である。特に、水圧破碎及び人工涵養はともに未確立の技術であり、これらの早期確立に向けた取り組みが不可欠である。

<sup>25</sup> 地上から地下岩体へ坑井を通じて流体を圧入して岩体を破碎する技術であり、石油・天然ガス開発分野では多数の適用実績がある一方で、地熱開発分野での適用事例は限られている。本技術の適用にあたっては、地震の誘発リスクに関する検討が不可欠である。

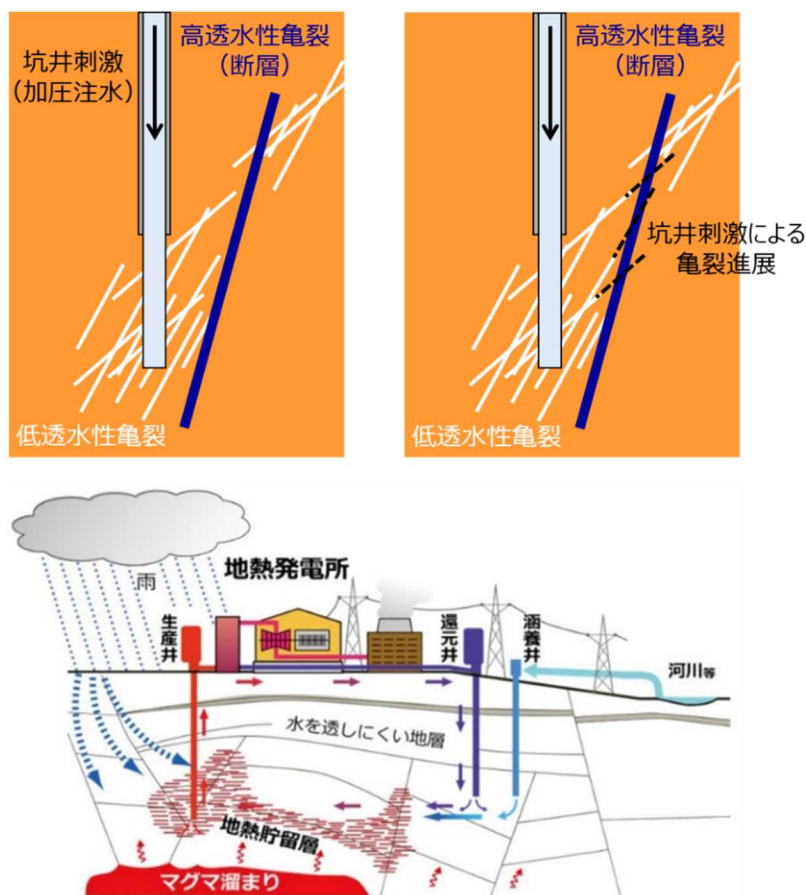


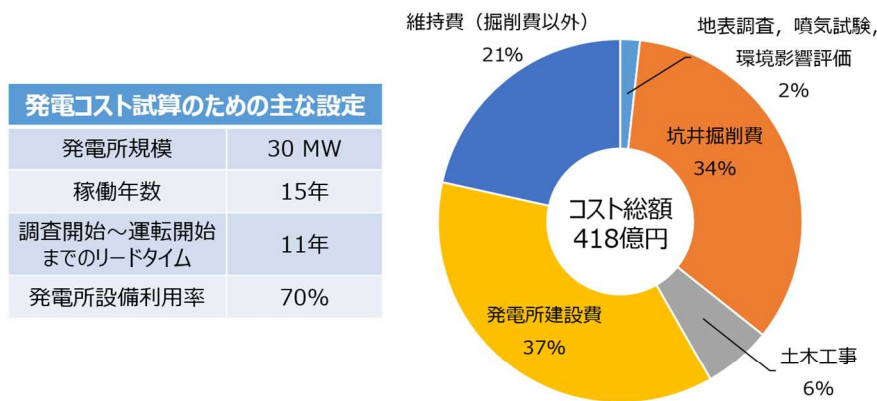
図11. 水圧破碎法（上図）と涵養注水技術（下図）

出所：（上図）NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）、（下図）JOGMEC ホームページ<sup>26</sup>

地熱発電所の設備利用率を向上させるには、地熱システム全体（地下貯留層と地上発電設備）のモニタリングで得られるデータに基づいて蒸気・熱水の生産量を制御し、貯留層管理を最適化する必要がある。地熱システム全体を包括的かつ高精度に遠隔モニタリングするためにはIoT技術の活用が不可欠であり、取得された膨大なデータ（例えば、生産流量、還元流量、貯留層温度及び圧力、発電設備運転データなど）の分析やデータからの異常兆候の検知にはAI技術の活用が有効である。

本レポートでは、上述した技術開発を通じて地熱発電の発電コストをどの程度削減できるのか、感度分析を行った。基準の発電コストを試算する際の主な設定（一例）を図12（上図）に示す。技術開発を通じて設備利用率の向上や坑井掘削費の削減等が達成できれば、発電コストの削減が可能であることが分かる（図12（下図））。

<sup>26</sup> [http://www.jogmec.go.jp/geothermal/geothermal\\_10\\_000003.html](http://www.jogmec.go.jp/geothermal/geothermal_10_000003.html)（2020 アクセス）



技術開発により達成される成果	発電コスト削減率 [%]
1坑井あたりの掘削費を10%削減	3.1
坑井数を10%削減	3.1
設備利用率を10%向上	12.5
リードタイムを1年短縮	0.5
地上設備費を10%削減	3.6
維持費 (掘削費以外) を10%削減	2.6

図12. 発電コスト試算のための主な設定、発電のためのコスト内訳（上図）と発電コスト削減に関する感度分析（下図）

出所：「2019 年度成果報告書 戦略策定調査事業／地熱研究開発事業に係る技術開発シナリオ策定調査（2021）」を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

### （3）調査から発電開始に至るまでの期間の短縮とそのための地元理解

円滑な地元調整・地元理解の促進に向けては、地域との共生に資するツール（例えば、温泉モニタリングシステム（図 13）や硫化水素モニタリングシステム等）の開発に加えて、技術やデータと、技術以外の要素（例えば、経済効果分析）をパッケージ化した統合的な合意形成手法の確立が望まれる。また、自然公園内の地熱調査・開発におけるステークホルダーとの合意形成の促進・円滑化に向けては、環境保全対策技術（例えば、環境アセスメント、土地改変面積の低減等）の向上・強化に取り組むことが望まれる。将来的に対象とする地域に応じて最適なパッケージを提供するためには、合意形成手法の適用事例を共通のデータベースとすることが有効である。

中小規模発電システムの低コスト化・高効率化に向けては、熱交換器の効率を改善する技術の開発及び安全に使用可能でかつ環境負荷の低い低沸点媒体の開発が有効である。

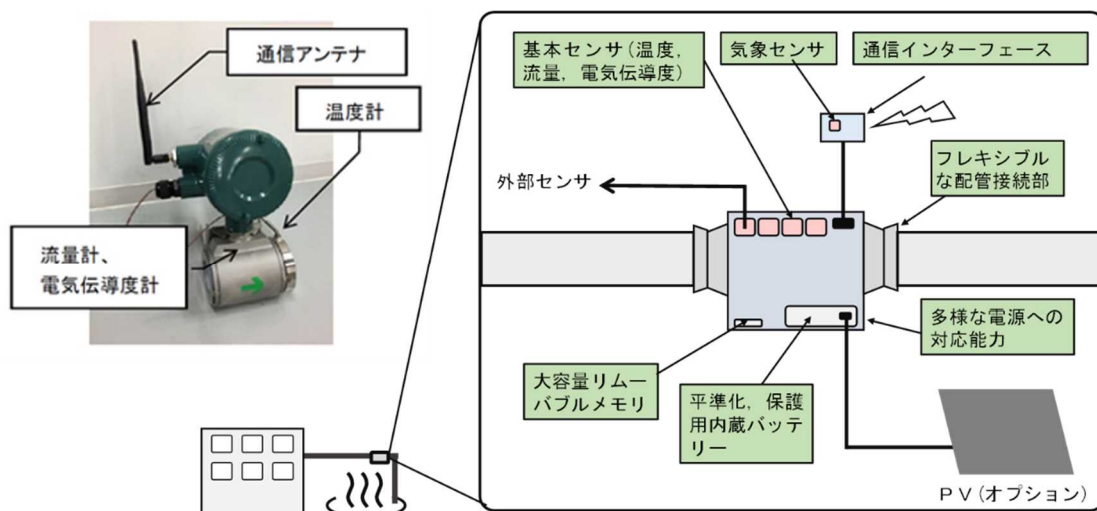


図13. 温泉モニタリングシステム

出所：産業技術総合研究所提供の資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

## 2-2 超臨界地熱発電の早期実用化

### 2-2-1 課題と解決手段

超臨界地熱発電に関して、我が国では 2040 年以降の普及・社会実装を目指して研究開発が進められている。これまでに、資源量評価のモデルフィールドに選定している後志（北海道）、仙岩（岩手県）、八幡平（岩手県）および豊肥（大分県）の 4 地域において、深度 3～4 km に温度 300～500℃の超臨界地熱貯留層と推定される場所が確認された。また、各地域における資源量概査では、1 地域あたり 100 MW を超える発電ポテンシャルを有するとの結果が得られている。その一方で、超臨界地熱資源が確実に存在することを断定するための決定的な情報（有望地点での詳細地下構造、熱構造、超臨界水の存在、貯留層透水性等）はいまだ得られておらず、超臨界地熱資源の特定を最優先で行う必要がある。以下において、超臨界地熱発電の実用化に向けた課題およびその解決手段について述べる。

#### (1) 超臨界地熱資源に関する正確な資源量の把握

これまでの超臨界地熱資源量評価では、超臨界地熱資源が形成されている可能性が高い複数の地域を対象としており、対象地域の超臨界地熱システム概念モデルを構築するにあたっては、広域地磁気地電流（Magneto-Telluric、以下「MT」という）法探査<sup>27</sup>により取得された深部比抵抗分布、既存の坑井で取得された深度方向の温度プロファイル、文献情報（地質学的／地球化学的データ）が用いられてきた。今後、対象地域をさらに

<sup>27</sup> 自然電磁波が大地に浸透した際に生じる電場と磁場を測定することで、地下構造を推定する電磁探査法の一つである。

絞り込み、有望地域における調査井掘削・噴気試験の成功率を向上させるためには、本概念モデルの更なる精緻化・高信頼性化が不可欠である。また、有望地域における発電ポテンシャルは、精緻化された超臨界地熱システム概念モデルに対して詳細に評価する必要がある。

#### (2) 超臨界地熱環境で使用可能な資機材の開発

超臨界地熱発電においては、地熱貯留層の環境として、深度 3,000～5,000 m 及び温度 400～500℃を想定している。IDDP における経験を踏まえれば、坑井を通じて地上に噴出した高温過熱蒸気が高腐食性を有している可能性や、配管等に沈積して障害をきたすシリカ等の鉱物が多量に溶存している可能性まで想定する必要がある。このような極めて過酷な超臨界地熱環境に対して、安全面・環境面で基準を満たす健全な坑井を掘削し、発電まで行うためには、使用する一連の資機材が十分な耐熱性、耐腐食性を有していることが不可欠である。なお、資機材を超臨界地熱発電プラントに適用するにあたっては、実際の超臨界地熱環境もしくはそれに準ずる環境のテストフィールドにて資機材の事前評価（安全性の確認）をすることが望ましい。

#### (3) 超臨界地熱貯留層の透水性の不確実性への対応

貯留層の透水性は、地熱発電における発電コストや発電出力に直結するパラメータであるが、一般に開発前に正確な値を取得することは極めて難しく、超臨界地熱開発においても同様である。まずは超臨界地熱発電の有望地域で調査井を掘削してその評価を行う必要がある。ただし地質の不均質性により、事前評価で期待された透水性が得られず<sup>28</sup>、安定した蒸気生産ができない状況に遭遇する可能性も十分にある。このような場合には、水圧破碎等の人工的手法により貯留層の透水性を改善することが必要となるため、開発リスクの低減のためには人工超臨界地熱システム造成シナリオ<sup>29</sup>についての詳細事前検討が必須である。

#### (4) 発電コストの試算・把握

超臨界地熱発電は、在来型地熱発電と比較して発電所あたりの出力の大規模化が可能であり、生産井 1 本あたりの発電容量が在来型の数倍以上高いため坑井の数を削減可能であるという点でコスト的にメリットが生じる。その一方で、上述した極めて過酷な環境を開発対象とするため、その対策コスト等が発生する。超臨界地熱発電特有のコスト上の長所・短所ならびにその不確実性を精査・考慮したうえで、超臨界地熱発電の発電コストを試算・把握する必要がある。

<sup>28</sup> 我が国の超臨界地熱発電に関する研究開発では、貯留層の透水性が  $10^{-15} \text{ m}^2$  以上であることを想定している。

<sup>29</sup> 超臨界地熱貯留層の透水性が想定より低い場合、人工的手法を駆使することで、いかに想定する値まで改善させるかを具体的に示したシナリオを指す。



## 2-2-2 技術開発の方向性

以下において、前項に挙げた課題および解決手段の実現に向けた技術開発の方向性について述べる。

### (1) 超臨界地熱資源に関する正確な資源量の把握

超臨界地熱資源の蓋然性が高い地域での調査井掘削・噴気試験の成功率を向上させるためには、対象地域の超臨界地熱システム概念モデルの更なる精緻化・高信頼性化が必須である。概念モデルを精緻化・高信頼性化するには、対象地域にてパイロット坑を掘削し、超臨界地熱貯留層の上部における詳細地下情報（地質構造、破碎帯分布など）及び温度情報を取得することが有効である。高密度 MT 法探査、反射法地震探査、微小地震モニタリングで取得される情報とパイロット坑掘削を通じて取得される情報を統合することにより、対象地域における超臨界地熱貯留層存在の確度が大幅に向上することが期待される（図 14）。そして、超臨界地熱資源の賦存がほぼ断定された地域において、超臨界地熱資源まで達する調査井を掘削し、噴気試験を実施することで、超臨界地熱資源の存在確認と発電ポテンシャルを検証することが必要である。ここで、発電ポテンシャルの検証には、AI・地球統計学的手法を活用した地下深部温度構造推定法や三次元超臨界地熱貯留層シミュレーターの開発等が有効である。なお、調査井の掘削及び調査井での各種試験に際しては、事前の環境影響リスク評価により環境影響が十分小さいことが不可欠である。

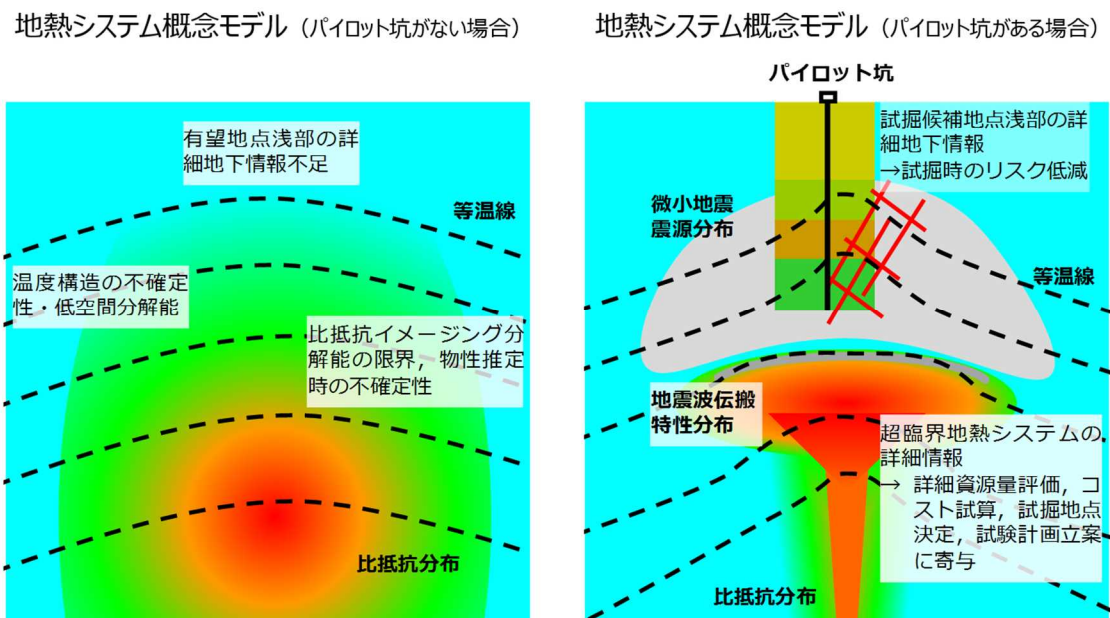


図14. 超臨界地熱資源の存在確認とポテンシャル評価

出所：「2019 年度成果報告書 戦略策定調査事業／地熱研究開発事業に係る技術開発シナリオ策定調査（2021）」

## (2) 超臨界地熱環境で使用可能な資機材の開発

想定している極めて過酷な超臨界地熱環境に対して、安全面・環境面で基準を満たす健全な坑井を掘削し、経済性を満たす発電を行うためには、一連の資機材の開発が不可欠である。研究開発項目の具体例としては、ケーシング材、セメント材、坑井仕上げ仕様及び発電システムが挙げられる（表5）。研究開発にあたっては、資機材は実際の超臨界地熱環境もしくはそれに準ずる環境のテストフィールドにて事前評価（安全性の確認）をすることが望ましく、超臨界地熱研究開発で先行する海外研究機関・大学・企業との国際共同研究も効果的である。

表5. 超臨界地熱環境下で使用する資機材に関する研究開発内容

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2020）

研究開発項目	内容
ケーシング材	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 高温酸性環境下での耐食性評価</li><li>・ セラミックスやシリコンカーバイド複合材等のコーティング材料の調査</li></ul>
セメント材	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 高温酸性環境下におけるスラリー及び硬化セメントの比較性能評価</li></ul>
坑井仕上げ仕様	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 腐食性流体性状が坑井に及ぼす影響を検討</li><li>・ 噴気状態・静止直後の坑内環境解析</li></ul>
発電システム	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 高温過熱蒸気清浄化（シリカ除去）技術の開発、蒸気清浄化に起因する熱量低下の範囲の評価</li><li>・ 耐腐食性発電システムの開発</li></ul>

## (3) 超臨界地熱貯留層の透水性の不確実性への対応

想定した透水性が調査井で得られない場合には、経済性を満たす発電に必要な状態まで透水性を人工的に改善する必要がある。そのためには、水圧破碎技術（超臨界地熱環境下での岩石破碎メカニズムの解明を含む）と地殻応力計測技術の開発に優先的に取り組むべきである。水圧破碎の適用にあたっては、地震の誘発リスクに関する検討が不可欠である。また、人工超臨界地熱システム造成シナリオ検討のためには、超臨界地熱環境下における地下現象を忠実に再現できる熱・水理・力学・化学連成貯留層シミュレーターを開発する必要がある。

## (4) 発電コストの試算・把握

我が国の在来型地熱発電における発電コストは、コスト等検証委員会により 9.2～

11.6 円/kWh と試算されている<sup>30</sup>。超臨界地熱発電においても、技術開発を通じてこの発電コストと同等もしくはそれ以下を目指すことが求められる。(1)～(3)の課題解決においても、費用対効果を念頭に技術開発を進める必要がある。さらに、在来型地熱発電と同様に、掘削効率の向上や、設備利用率の向上を図るための貯留層管理最適化等、コストの削減に資する技術の開発・導入を進める必要がある。

### 2-3 地熱資源利用の次世代革新技術の開発

地下に蓄えられているエネルギー量は莫大であり、地熱資源を有効利用するための技術開発は非常に重要である。本節では、将来的なさらなる地熱利用で期待される次世代型の革新的地熱資源利用技術（図6最下段）の例を紹介する。

図15（上図）は、アイスランド・ヘトリスヘイジ地熱地域で実施中の CarbFix プロジェクトである。本プロジェクトにおいて、CO<sub>2</sub>を地上で還元水に溶解させたのち、玄武岩<sup>31</sup>の地熱貯留層へ注入（還元）したところ、注入したCO<sub>2</sub>の90%以上が2年以内に鉱物化固定したことが報告されている。図15（下図）は、アメリカの企業等で実証が進められているCO<sub>2</sub>循環型地熱発電である。本方式では、熱水・蒸気の代わりに超臨界CO<sub>2</sub>を循環させることでエネルギー変換効率が向上できるとされており、発電にともなうCO<sub>2</sub>排出量の削減と水資源保護の両立が期待される。実用化に向けては、超臨界CO<sub>2</sub>を地下で損失なく循環させることが課題とされている。このほかにも、地熱流体中に含まれる有用／希少物質（例えば、リチウムやコロイダルシリカなど）を経済的に回収する技術等の開発が進められている。このような次世代革新技術の動向は適宜把握しておくことが重要である。

<sup>30</sup> エネルギー・環境会議コスト等検証委員会. 平成23年12月19日, コスト等検証委員会報告書. 2011. <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111221/hokoku.pdf>

<sup>31</sup> 苦鉄質火山岩の一種であり、カルシウム、マグネシウム等が多く含まれる。

## アイスランドにおけるCarbFixプロジェクト



## CO<sub>2</sub>循環型地熱発電

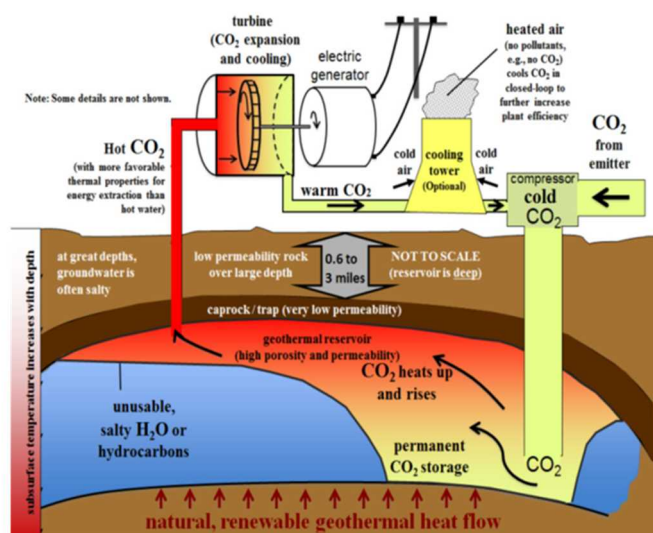


図15. アイスランドでの地熱資源利用におけるCO<sub>2</sub>を用いた次世代革新技術開発の例  
 出所：（上図）CarbFix プロジェクトに関するホームページ<sup>32</sup>、（下図）Garapati, et al.  
 2014（doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.797）

<sup>32</sup> <https://www.carbfix.com/photos>（2021 アクセス）

### 3章 おわりに

地熱発電は将来ベースロード電源となりうる発電技術であり、我が国の地熱資源ポテンシャルが非常に大きいことを考慮すれば、経済合理性を追求しつつ導入を進めていくことが望ましい。前レポート（TSC Foresight vol. 12「地熱発電分野の技術戦略策定に向けて」）では、地熱発電技術の置かれた状況、地熱発電分野の技術課題、EGS／超臨界地熱発電実現に向けた技術開発の必要性を解説したのに対し、本レポートでは、在来型地熱発電及び超臨界地熱発電の各々に関して、課題と課題解決に向けたアプローチを解説した。また、地下の膨大な地熱資源の利用を拡大するための次世代革新技術についても紹介した。

在来型地熱発電に関しては、エネルギーミックス目標として示された2030年の地熱の導入設備容量目標を早期に達成するために（1）アクセス可能な地熱資源量の拡大、（2）開発リスク及び発電コストの低減、（3）調査から発電開始に至るまでの期間の短縮とそのための地元理解という課題を解決することが重要である。一方、超臨界地熱発電に関しては（1）超臨界地熱資源に関する正確な資源量の把握、（2）超臨界地熱環境で使用可能な資機材の開発、（3）超臨界地熱貯留層に関する透水性の把握、（4）発電コストの試算・把握に取り組み、2040年以降の早期実用化・普及に目途をつけることが必要である。今後、我が国において地熱発電の導入が加速するには、新たな事業者の参入や地熱発電に関するビジネスモデルの構築などを進めることも求められる。

本レポートを発行する時点においては、2050年でのカーボンニュートラル、ならびに2030年でのCO<sub>2</sub>排出量46%削減の目標を見据えて、経済産業省・環境省での施策に関する議論が進められており、本レポートで掲げた課題の解決がますます強く求められる状況となっている。経済産業省総合資源エネルギー調査会基本政策分科会第48回会合で示された第6次エネルギー基本計画の素案においては、再生可能エネルギーの最大限の導入が述べられている中で、地熱発電に関してもベースロード電源としての価値が再確認されており、地熱開発の加速化やコスト低減を進める方針が示されている。関係省庁と連携し、自然環境や温泉事業者への配慮を前提に、自然公園法や温泉法、森林法等の規制の運用見直しに取り組むことも述べられており、環境省の審議会（地域共生型の地熱利活用に関する検討会）においては、リードタイム短縮と2030年までの発電施設数の倍増を目指す地熱開発加速化プランに則した議論が進められている。また超臨界地熱発電についても、2050年に向けた施策として技術開発を進めることが同基本計画素案に述べられている。

在来型及び超臨界地熱発電のいずれにおいても、多岐にわたる要素技術の開発を総合的に進めることが必要である。本レポート内で述べた各々の課題に対して解決のためのイノベーションが求められる。地熱資源の持続的活用に向けて、我が国の地熱関係者が一丸となり、国際共同研究等のスキームも上手く利用しつつ、イノベーション創出へ果敢に挑戦していくことが期待される。

技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight Vol. 106

地熱発電分野の技術戦略策定に向けて

2021年9月30日発行

TSC Foresight Vol.106 地熱発電分野 作成メンバー

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)

- センター長 岸本 喜久雄
- センター次長 飯村 亜紀子  
西村 秀隆 (2021年6月まで)
- サステナブル・エネルギーユニット
  - ユニット長 仁木 栄
  - 研究員 熊野 裕介  
石橋 琢也 (2021年2月まで)  
西田 啓之  
江川 光 (2019年10月まで)  
森 則之 (2019年12月まで)  
長谷川 真美 (2021年3月まで)  
上野 伸子 (2020年5月まで)
  - フェロー 太田 健一郎 国立大学法人 横浜国立大学 名誉教授  
安井 至 一般財団法人 持続性推進機構 理事長 (非常勤)  
矢部 彰 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 特別顧問・名誉リサーチャー  
植田 譲 東京理科大学 工学部 電気工学科 教授  
小山 珠美 昭和電工株式会社 理事 社長付、日本工学アカデミー 理事
- 新エネルギー部
  - 主任研究員 加藤 久遠
  - 主査 丸内 亮

●本書に関する問い合わせ先  
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。  
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。  
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。  
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。