

我が国の地熱発電の現状と展望

Current status and prospects of the geothermal power generation in Japan

有木和春*

1. はじめに

我が国の地熱発電の歴史は 1918 年 11 月に海軍中将山内万寿治氏が、石油・石炭に代わる将来の熱源として、地熱利用の研究・調査のため、北海道登別、大分県別府他の数地点を踏査し、翌年 4 月に大分県別府で掘削した坑井の噴気に成功し、1925 年に東京電灯（株）（現、東京電力ホールディングス（株））研究所長太刀川平治氏が、この坑井を用いてタービンによる日本最初の地熱発電に成功したことに始まる¹⁾。その後、1966 年 10 月に東化工（株）（現、日本重化学工業（株））により、岩手県松尾村（現、岩手県八幡平市）で我が国初めての商用地熱発電所である松川地熱発電所（9 千 5 百 kW）が操業を開始し、本格的な地熱発電事業の幕開けとなった。2022 年 3 月末時点の我が国の地熱発電導入量は約 56 万 kW である。火山国である我が国は、米国、インドネシアに次いで世界第 3 位の地熱資源量 2,347 万 kW²⁾ を有すると試算されているが、地熱発電導入量は国別で第 10 位となっている。

我が国の地熱発電の必要性と意義については、a) 火山国日本の足元に在る高いポテンシャルを有する純国産エネルギーであり、b) 昼夜・季節変動しない安定電源であり、c) 長寿命で高い利用率、即ち経済的であり、d) 山間地を有する地方自治体に貢献して、災害リスクが小さく、e) 大気汚染成分を殆ど出さず、温室効果ガス排出量の少ないクリーンな再生可能エネルギー電源であり、f) 我が国は世界最高水準の地熱発電設備の技術を有しており、g) 発電後の熱水利用（ハウス栽培や養殖事業）等、エネルギーの多段階利用が可能である、ことに要約される。

地熱発電事業は、地下資源開発と発電所建設・

操業（電力供給）という 2 つの特徴を持ち、地熱資源の存在と地域の理解が必須である。本稿では、地熱発電の仕組み、地熱資源開発の特徴、我が国の地熱発電の現状および展望等について述べる。

2. 地熱発電とは

2.1 地熱貯留層と地熱発電の仕組み

地熱発電とは地下の熱源を利用して発電を行うことである。一般的な地熱発電に利用できる地熱資源は火山地帯の深部に存在しており、天水が地下深部まで浸透すると、高温・高圧の地熱流体（熱水や蒸気）になり、この地熱流体が貯留あるいは流動している領域が地熱貯留層である。そこから地熱流体を採取して、タービンを回転させ、直結している発電機が回転することによって発電する。地熱貯留層が存在するためには、地下に地熱の 3 要素と呼ばれる、マグマ等の“熱源”、熱を運ぶ“水（地熱流体）”および地熱流体が流動する“き裂（容れ物）”の存在が必要である。更に、地熱貯留層の上位に、低温の地下水の地熱貯留層への流入および高温の地熱流体の地熱貯留層からの流出を防ぐための不透水層から成るキャップロックが必要である。地熱貯留層を含む地熱系の概念モデルを図 1³⁾ に示す。

地熱発電の発電方式としては、フラッシュ発電方式（図 2 (a)⁴⁾ 参照）とバイナリー発電方式（図 2 (b)⁴⁾ 参照）がある。フラッシュ発電方式は、主に地下温度が 200℃ 以上の地熱貯留層の発電に適しており、採取した地熱流体中の蒸気で直接タービンを回す。他方、バイナリー発電方式は、より低温の地熱貯留層に適しており、採取した地熱流体との熱交換によって温められた沸点の低い二次

* 日本地熱協会 会長

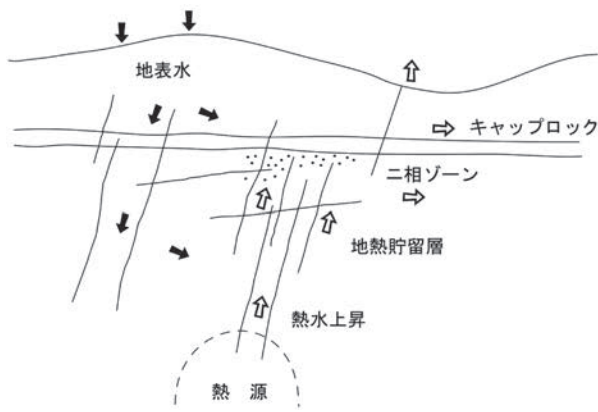


図1 地熱系の概念モデル

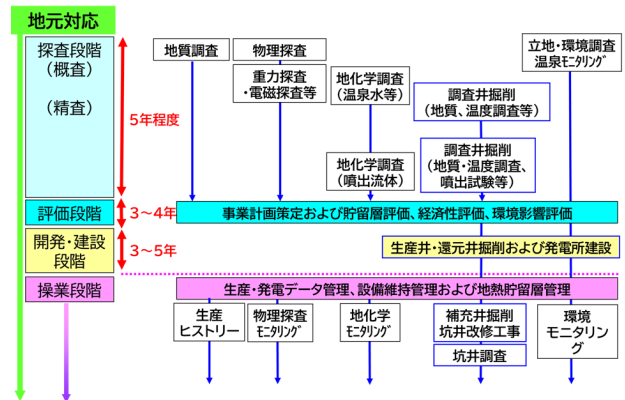


図3 地熱発電事業のフロー

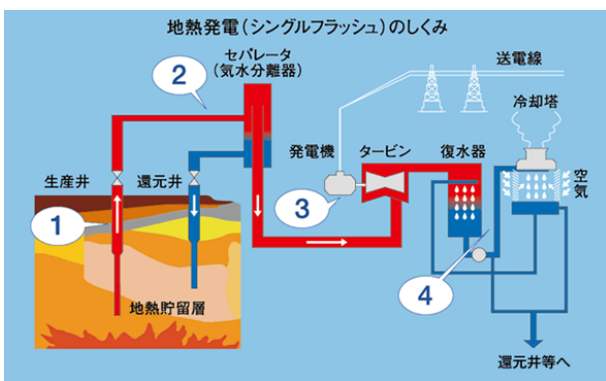


図2 (a) フラッシュ発電方式

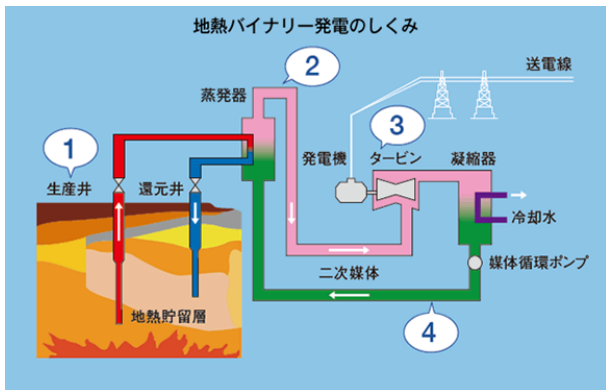


図2 (b) バイナリー発電方式

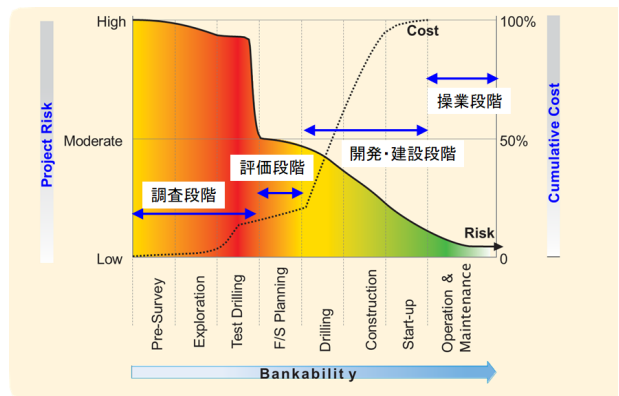


図4 地熱発電事業におけるリスクとコストの関係

媒体の蒸気でタービンを回して発電する。

2.2 地熱資源開発の特徴と地熱発電事業のフロー

地熱発電事業は、地下の地熱資源を調査（探査）し、地熱資源（地熱貯留層）の評価・事業計画策定・環境アセスメント・経済性評価を行い、事業化決定の判断が下されると、地熱資源開発（生産井や還元井の掘削）と地上設備建設に進み、地熱発電所完成後は発生電力を需要家に供する事業である。有望な地熱資源を調査・開発して地熱発電所建設に繋がって操業を開始し、地熱貯留層管理と地上

設備管理を適切に行えば、長期の安定した事業となる。

他方、地熱資源の有望地域は、温泉や自然公園と重なるため、地域との共生や自然環境との調和が重要であり、温泉への影響や自然環境配慮について、関係者に丁寧な説明を行い、理解を得る必要がある。そのため、地熱発電事業では、本格的な調査着手に当たり、地域の方々の理解を得るための地元対応からスタートする。図3に地熱発電事業のフローを示す。

地熱調査では、地質、地化学、物理探査等による地表調査を行い、地下構造を推定し、坑井を掘削して地下情報を取得し、データの蓄積とともに地熱貯留層の分布、性状、規模を明らかにしていく。地熱発電事業は、目に見えない地下資源を相手にしており、地下資源開発特有のリスクを伴うとともに、地熱資源の調査・評価・開発と地上設備建設に長いリードタイムと多額の資金が必要となる。図4に地熱発電事業のリスクとコストの定性的な関係を示す⁵⁾。また、地熱発電は再生可能エネルギーであるが、地熱貯留層の能力以上の蒸気を採取し過ぎると、周

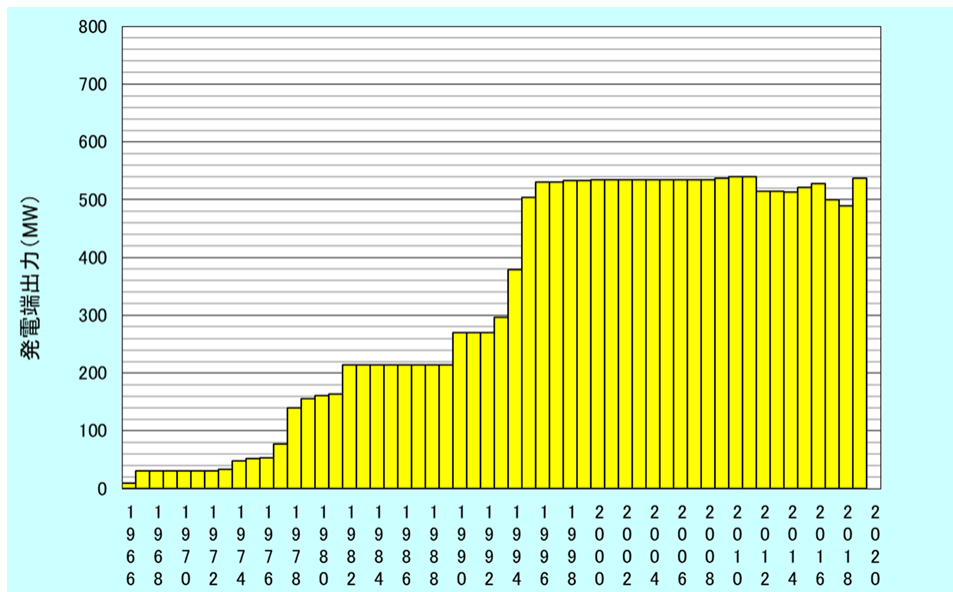


図5 地熱発電の導入量の推移

辺からの地熱流体の供給が追い付かず、持続可能な発電が行えなくなる。故に、地熱貯留層の評価技術と管理技術は重要である。

3. 地熱発電の現状

我が国の地熱発電の導入量の推移を図5⁶⁾に示す。

我が国の地熱発電の導入量は1966年の岩手県での松川地熱発電所の建設後、大岳（1967年；大分県）、大沼（1974年；秋田県）、鬼首（1975年；宮城県）、八丁原（1977年；大分県）、葛根田（1978年；岩手県）、森（1982年；北海道）の各発電所が建設されて約21万kWとなった。そして、1978年の第二次オイル・ショック後、電源多様化の一環として地熱発電の機運が盛り上がり、1980年代に地熱調査・開発が活発に行われ、1990年代に上の岱（1994年；秋田県）、山川（1995年；鹿児島県）、澄川（1995年；秋田県）、柳津西山（1995年；福島県）、大霧（1996年；鹿児島県）、滝上（1996年；大分県）等の大規模な地熱発電所が建設されて累計約54万kWの導入量となった。その後、電力自由化の中で、原子力や火力の電源と比較してコストが高いこともあり、新規の地熱調査・開発は停滞し、冬の時代が続いた。

そして、近年、環境適合性を重視し、国産の再生可能エネルギー導入拡大推進の中で、地熱発電導入拡大に向けて、2012年の固定価格買取制度施行をはじめ、規制・制度改革、公的機関による先導的地熱資源調査、経済的支援、技術開発、ガイ

ドライン策定等が行われ、地熱発電事業を取り巻く環境は改善され、新規事業者も多数参入し、多くの地熱調査・開発が実施されている。参考として、2012～2021年度の期間に独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）による経済的支援の実施された地熱発電事業の調査・開発地点を図6⁷⁾に示す。

2022年3月末時点の我が国の地熱発電導入量は約56万kWであり、2030年度導入目標の150万kW（第6次エネルギー基本計画（2021年10月）⁸⁾）には遠い状況である。本格的な地熱資源調査が不要でリードタイムの短い小・中規模案件が先行しており、地熱発電の大幅な導入拡大に至っていない。調査途上の大規模案件の進捗を加速するとともに、新期の大規模案件を発掘する必要がある。

ここで、現時点の地熱発電導入拡大における課題を述べる⁹⁾。大別すると、経済性、地下資源開発、系統接続、社会受容性、規制に関する課題・リスクに分類される。

- ① 事業が成立するための採算予見性の確保：固定価格買取制度は、リードタイムが長く、初期投資が大きな地熱発電事業にとって、採算予見性を確保する点で非常に有効であり、事業が成立する価格水準の維持が課題となっている。
- ② 地下資源開発の課題：地熱資源の開発は、他の地下資源開発と同様に難度が高く、地熱発電所建設に繋がらない確率が低くないために、慎重な調査・評価・開発が必要であり、この地下資源開発リスクが事業者にとっての高いハードル

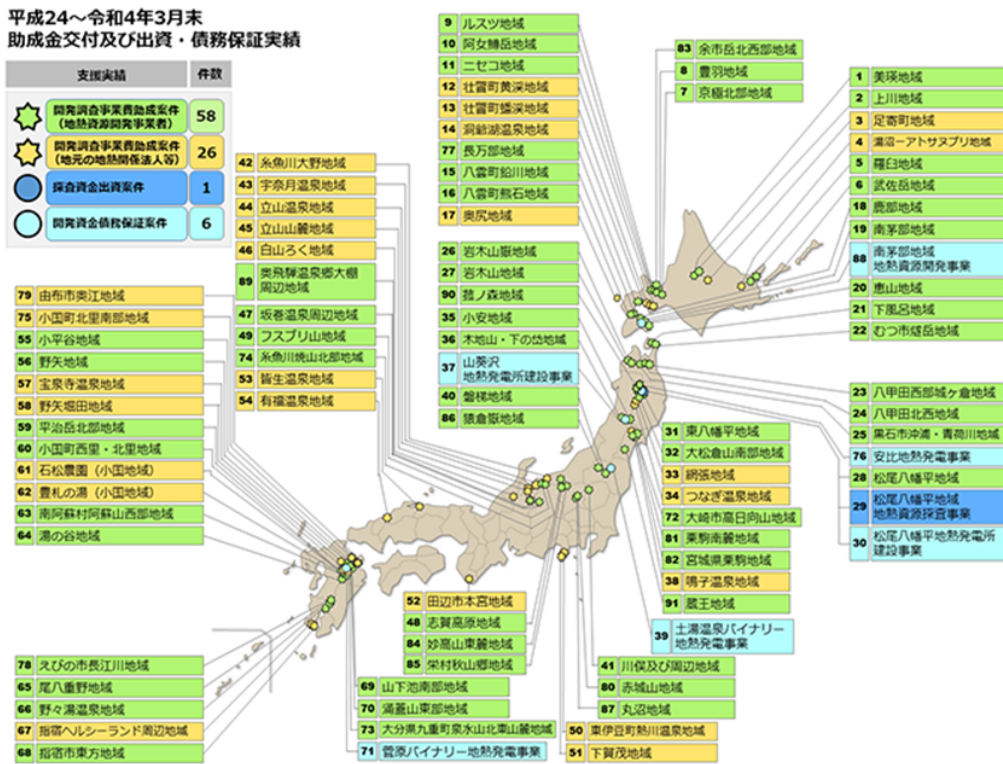


図6 石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）による経済的支援の実施された地熱発電事業の調査・開発地点

となっている。

- ③ 系統制約の課題：地熱発電の有望地域は山間地が多く、大規模開発の可能性が有る有望地点も系統制約によって、規模を縮小するか、開発を断念するかの選択を迫られる場合がある。
- ④ 合意形成に関する課題：地熱有望地域の温泉事業者・自然保護関係者の理解が十分と言えない状況が改善されておらず、調査開始のための地域の方々の理解を得るのが困難な地域や理解を得るまでに長年月が費やされる地域があり、理解促進と地域共生を促すための関係者の努力が続けられている。
- ⑤ 規制に関する課題：温泉法、自然公園法および森林法等に関する規制緩和は進展しているが、抜本的な解消に至っていない。坑井掘削の許認可手続きに係わる温泉法の非科学的な運用の改善は課題として残っており、更に、我が国の地熱資源量の8割が賦存するものの、近年まで地熱調査・開発が困難であった自然公園内の地熱発電事業を進展させるための行政と事業者の協働による取り組みは益々重要となっている。また、国有林野、保安林、保護林、緑の回廊等の規制と手続きについては、調査・開発の障害あるいは長期化を招いており、一層の緩和が課題

となっている。

他方、地上設備に目を移すと、我が国の地熱発電プラント、特にタービン発電機部門のメーカー3社（東芝エネルギーシステムズ（株）、富士電機（株）、三菱重工業（株））は世界トップレベルにあり、3社で世界の6割以上のシェアを持つ。しかし、近年、海外では高温の地熱資源に恵まれない国でのバイナリー発電の導入が進み、バイナリー発電の技術を有する海外メーカーのシェアが拡大しており、引き続き、技術開発とともに経済性追求等の更なる努力が必要な状況である。

4. 地熱発電の展望

地熱発電事業者の活動については、前述のとおり、2012年度の固定価格買取制度施行以降、既存事業者に加えて、新規事業者が多数参入し、各地で地熱資源の調査・開発が進められている。また、公的機関の先導的調査を含む地熱資源ポテンシャル調査も全国的に実施されている。そして、業界団体は前述の困難な課題を解消・低減すべく、関係機関との協議や諸委員会・検討会・分科会等を通じて、政策要望や提言等の活動を行い、事業環境の一層の改善を図っている。

資源エネルギー庁は、地熱発電導入加速化に向



環境省による地熱開発加速化プラン

(令和3年4月27日 小泉環境大臣発表)

- 地熱開発プロジェクトを加速化させるために、自然公園法や温泉法の運用見直し等の実施に加え、環境省自らが率先して行動。
- 改正地球温暖化対策推進法に基づく再エネの促進区域の指定
- 温泉事業者等の地域の不安や自然環境への支障を解消するための科学データの収集・調査を実施し、円滑な地域調整による案件開発を加速化する。
(データ収集・調査:熱源探査を含めた自然環境の詳細調査、地産地消型・地元裨益型の地熱のあり方検討、温泉モニタリング)

➡ 10年以上の地熱開発までのリードタイムを2年程度短縮し、最短8年まで短くするとともに、2030年までに全国の地熱発電施設数(自然公園区域外を含む)を現在の約60施設から倍増させることを目指す。

図7 環境省による地熱開発加速化プラン

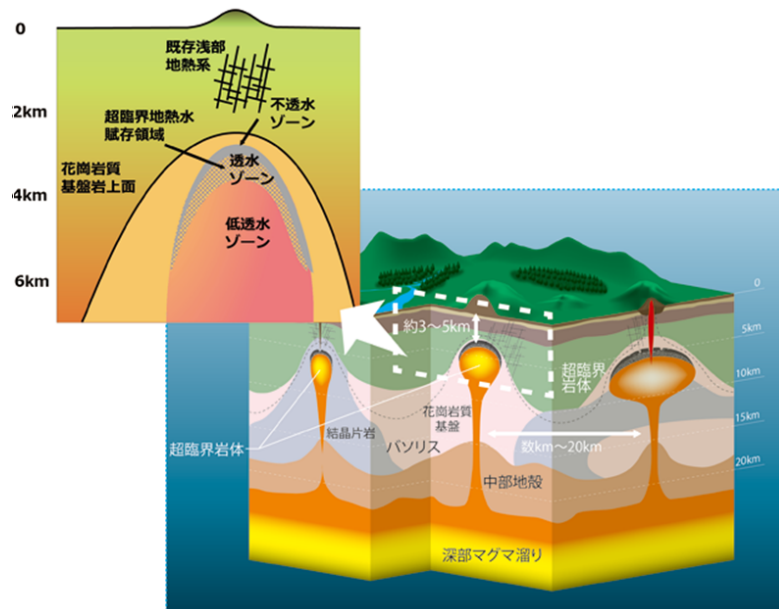


図8 超臨界地熱発電の技術開発

けて、JOGMECによるリスクマネー供給や坑井掘削技術開発の成果共有等の政策強化を図っている。更に、2021年4月に環境省が公表した「地熱開発加速化プラン¹⁰⁾(図7参照)」も踏まえて、地熱資源が豊富に存在するものの、近年まで調査・開発が困難であった国立・国定公園内での先導的調査を早期に行うことで2030年度の導入目標の達成を図る計画である。引き続き、産官学が一体となって、2030年度の導入目標に向けて邁進する必要がある。

更に、地熱発電は、洋上風力発電および太陽光発電とともに、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021年6月)¹¹⁾」において、

成長が期待されるエネルギー関連産業の中の次世代再生可能エネルギーとして、選定されている。その中で、「地熱発電は、再生可能エネルギーであり、安定的な発電が可能なベースロード電源であることから、国自らが行う開発適地における資源量の調査や事業者に対するリスクマネーの供給、自然公園法や温泉法などの関係法令の規制の運用見直し、地元理解の促進等に取り組む。また、2050年のカーボンニュートラルの実現に向けては、超臨界地熱発電等の次世代型の地熱発電技術を世界に先駆けて実現し、これまで開発できていなかった地熱資源を開発し、我が国における抜本的な地熱発電の導入を進めるとともに、超臨界地

熱資源の探査技術や大深度掘削技術，地上・地下の配管，タービンを含めた発電システム全体をパッケージで海外に売り込むことで，我が国地熱産業における海外展開の更なる拡大に取り組む」ことが示されており，期待が大きい。

次世代のイノベーション技術である超臨界地熱発電を図8に示す¹²⁾。次世代型では，在来型よりも深部に存在するといわれている超臨界状態（またはそれに準ずる状態）の水を利用することで，地熱発電容量のさらなる増大を目指している。超臨界地熱発電のメリットの一つとして，生産井1本あたりの生産能力が従来の数倍以上と高いため，従来と比べ単位kWあたりの敷地改変面積を低減することが可能となるため，環境への負荷が低いことを挙げている。

次世代型の地熱発電である「超臨界地熱発電実現」に向けて開発される技術も含めて，在来型地熱発電の調査・評価・開発に有効な技術が適用され，また，地上設備に係わる技術開発も進展し，地熱発電の導入拡大が加速し，発電電力量が飛躍的に増大するとともに，産業としての裾野が広がることを期待している。

5. おわりに

我が国のエネルギー政策の原則はS + 3E（安全性を前提にエネルギー安定供給を第一とし，経済効率性を向上しつつ環境適合を図る）であるが，エネルギーを巡る情勢は，エネルギー自給率，地政学的リスク，技術革新，気候変動問題等に関連して絶えず変化している。直近の情勢変化として，本年2月のロシアによるウクライナへの軍事進攻は，その後の世界情勢に衝撃を与え，様々な点で大きな影響を及ぼし，エネルギー政策においては，脱炭素化に加え，エネルギーの安定供給のための調達先確保が大きな戦略テーマとなっている。

脱炭素化については，2020年10月の臨時国会において，菅義偉前内閣総理大臣は，「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，すなわち2050年カーボンニュートラル，脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言し，2021年4月の地球温暖化対策推進本部開催後に，「2030年度の温室効果ガスの削減目標について，2013年度から46%削減することとし，更に，50%の高みに向けて挑戦を続ける」旨を表明した。

地熱発電は，昼夜・季節変動しない安定電源であり，我が国は世界第3位の地熱資源のポテンシャ

ル，世界最高水準の地熱発電技術および50年以上の地熱発電所操業実績を有していることから，導入拡大が期待されている。

しかし，その進捗は必ずしも捗々しくない。本格的な地熱資源調査が不要で開発リードタイムの短い小・中規模案件は先行しているものの，大規模案件は調査途上あるいは本格的調査未着手であるため，大規模案件を加速させるとともに，新規案件を発掘する必要がある。

地熱発電の導入拡大を加速するためには，引き続き，地域との共生および環境配慮を考慮した秩序ある地熱発電事業を進めるとともに，更なる事業者の努力と施策が必要である。

参考文献

- 1) 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，132（2021）。
- 2) 村岡洋文・阪口圭一・駒澤正夫・佐々木進，日本の熱水系資源量評価2008，日本地熱学会平成20年度学術講演会講演要旨集（2008），B01，石川県金沢市。
- 3) 石戸経士，地熱開発と貯留層工学。地熱，27，73-92（1990）。
- 4) 日本地熱協会，地熱発電に関する情報 地熱発電のしくみ（accessed June 13 2022），<https://www.chinetsukyokai.com/information/index.html>
- 5) The World Bank Energy Sector Management Assistance Program，Geothermal handbook：Planning and Financing Power Generation. 4（2012）。
- 6) 一般社団法人火力原子力発電技術協，地熱発電の現状と動向2020年（2021）。
- 7) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構，地熱資源情報 これまでの支援プロジェクト（accessed June 13 2022），https://geothermal.jogmec.go.jp/initiatives/assist/support_project/index.html
- 8) 経済産業省，エネルギー基本計画 令和3年10月（accessed May. 26 2022），<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>
- 9) 環境省，環境省による地熱開発加速化プラン（accessed June 13 2022），<https://www.env.go.jp/nature/onsen/council/kyoseichinetsurikat-suyo/02kyoseirikatsuyo/sanko7.pdf>

- 10) 日本地熱協会, 地熱発電開発促進のための政策要望 (令和4年度) (accessed June 13 2022), <https://www.chinetsukyokai.com/news/68/%92n%94M%94AD%93d%8AJ%94AD%91%A3%90i%82CC%82BD%82DF%82CC%90AD%8D%F4%97v%965D%8li%97DF%98a%82S%94N%93x%8lj.pdf>
- 11) 経済産業省, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (accessed June 13 2022), <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>
- 12) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合

開発機構, 超臨界地熱発電技術研究開発 (accessed June 13 2022), https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100145.html

著者略歴



有木和春 (アリキ カズハル)

1982年3月九州大学工学部資源工学科卒業。同年4月三菱金属(株)(現、三菱マテリアル(株))入社。地熱資源の探査・評価・開発等の地熱発電事業に携わる。2021年5月より日本地熱協会会長、工学博士、技術士(応用理学部門)。