

# 「国内における地熱開発」の現状

上 滝 尚 史

地熱発電は二酸化炭素排出量が少なく、昼夜や季節変動に影響を受けることのない我が国に豊富に賦存している再生可能なエネルギーであり、国内においては50年以上の操業実績を有している。しかしながら、地熱発電の設備能力は国内全体で約56万kWであり国内の総発電設備容量の僅か0.2%程度である。その原因としては地下の開発リスクがあることや調査から開発の期間に10年以上の長期間を要することなどがある。本稿では地熱発電の特徴、開発の現状及び課題などについて紹介する。

キーワード：地熱発電，貯留層，エネルギー自給率，フラッシュ発電，バイナリー発電，ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量

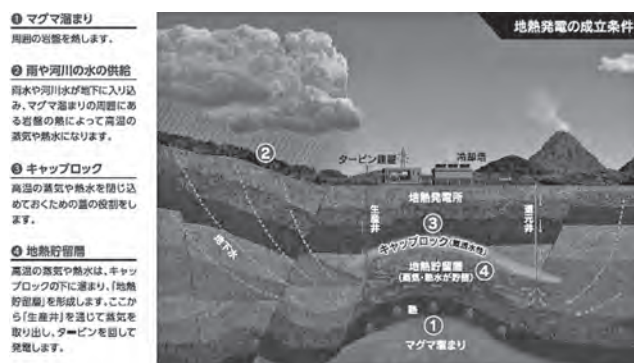
## 1. はじめに

我が国は第6次エネルギー基本計画（2021年10月）において、2050年カーボンニュートラルに向けた長期的な展望とそれを踏まえての中間的な目標として2030年には既存の技術を最大限活用して温室効果ガスを2013年度から46%削減する方針を示している<sup>1)</sup>。その中で日本は火山国であり、国内には豊富な地熱エネルギーが賦存していることから、それらを積極的に利用して目標を達成する努力が求められている。国内における本格的な地熱発電は、1966年に松川地熱発電所（岩手県・出力2.35万kW）、1967年に大岳発電所（大分県・出力1.45万kW）が運転を開始し、50年以上の長い歴史を有している。地熱を含む再生可能エネルギーの開発利用は2011年の東日本大震災を機に国のエネルギー政策の見直しにより全国で急速に進んでおり、本稿では地熱開発のしくみ、地熱発電の特徴、発電方式、国内外における開発の現状及び今後の課題について紹介する。

## 2. 地熱発電とは

我が国は火山列島と呼ばれているが、地熱発電は国内のどこでも建設できるものではなく、発電をするためには地下に3つの条件が揃う必要がある。その内の一つは熱であり、地熱発電には地下で200℃以上の温度が必要である。地球上ではどこでも地面を深く掘れば高温になるが、経済的に掘削ができる深度は限られ

ており（現在の地熱開発では3,000m程度が経済的に掘削のできる限界）、一般的に言われている3℃/100mの地温勾配では3,000m掘削しても200℃に到達することは困難である。そこで火山やマグマが浅部まで上昇し岩盤が温められている特殊な高温地帯を探すことになる。二つ目は水の供給である。発電には蒸気が必要なことから、高温の岩盤から熱を効率よく回収するための蒸気や熱水の供給が必要になる。蒸気や熱水の起源は基本的には天水であり、天水が長時間かけて地下に浸透したものが高温の岩盤に温められて蒸気や熱水になる。三つ目は温められた蒸気や熱水を閉じ込めることができるキャップロックと呼ばれる蓋のような構造を有する“地熱貯留層”という器が必要である（図-1）<sup>2)</sup>。



出典 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構  
図-1 地熱発電の成立条件

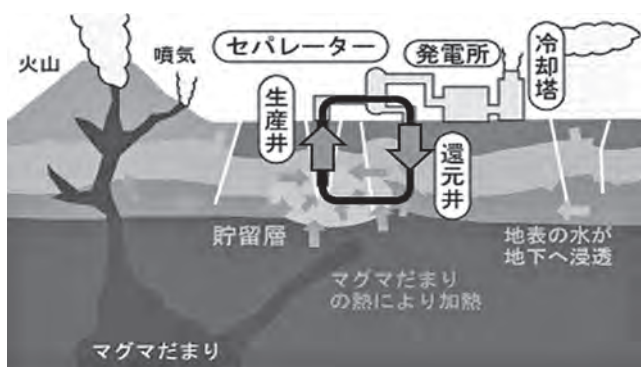
### 3. 地熱発電の特徴

地熱発電は無尽蔵なエネルギーを有するマグマを熱源としていることから、供給される天水や還元した熱水がその熱に温められて半永久的な利用ができるシステムである（図—2）。

そのシステムにおいて安定した発電をするためには、過剰な蒸気や熱水の採取、熱水の還元による貯留層岩盤の局所的な冷却を回避するなどの貯留層管理の工夫が必要である。このような地熱発電ではあるが、再生可能エネルギーの中でも下記に示すような特徴を有している。

#### (1) CO<sub>2</sub> 排出量の少ない低炭素エネルギー

今村・他（2010）は、電力中央研究所報告において電源別ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量<sup>a)</sup>を比較し、再生

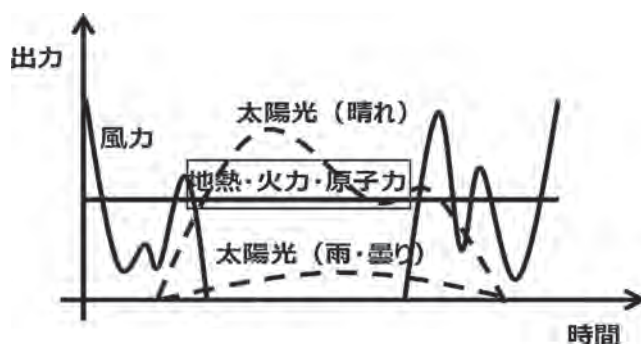


出典 経済産業省 資源エネルギー庁（2019）に一部加筆  
図—2 地熱発電の概念

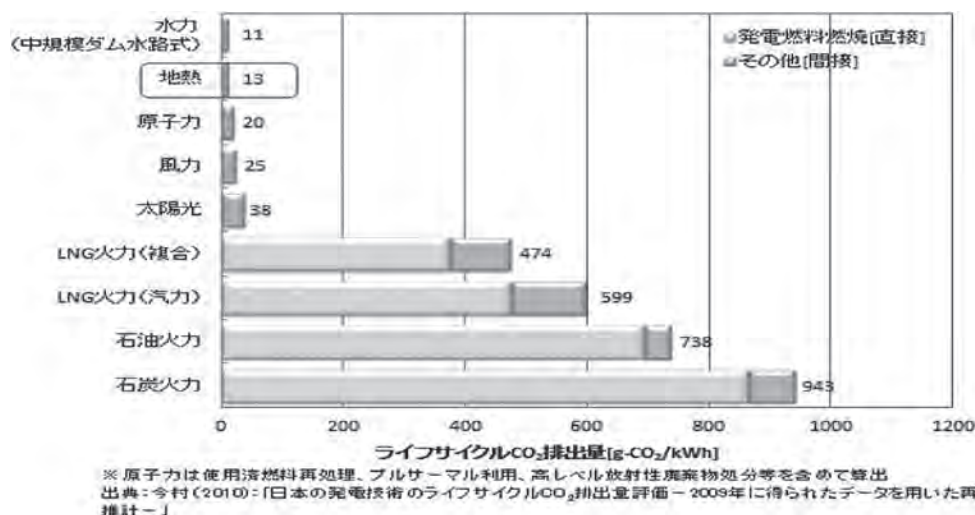
可能エネルギーである水力・風力・太陽光・地熱が化石燃料を焚く火力発電（石炭・石油・LNG）より排出量の少ないことを示した。その中でも地熱発電のCO<sub>2</sub>排出量が、火力発電と比較して1/70~1/40と少ないことや再生可能エネルギーの中で風力発電や太陽光発電と比較しても1/4~1/3と少ないと評価された（図—3）<sup>3)</sup>。

#### (2) ベースロードとなる安定電源

地熱発電は火力発電や原子力発電と同じく一定出力を安定的に維持できるベースロード電源であり、再生可能エネルギーの中では昼夜や天候状態（晴雨・風の有無）に関係なく発電ができる（図—4）。日本地熱協会（出典 電気事業便覧 平成28年版）によると設備利用率<sup>b)</sup>の指標として太陽光発電14%、風力発電21%、地熱発電57%と再生可能エネルギーの中では地熱発電の利用率は高い。



図—4 電源種別の一日の出力変動



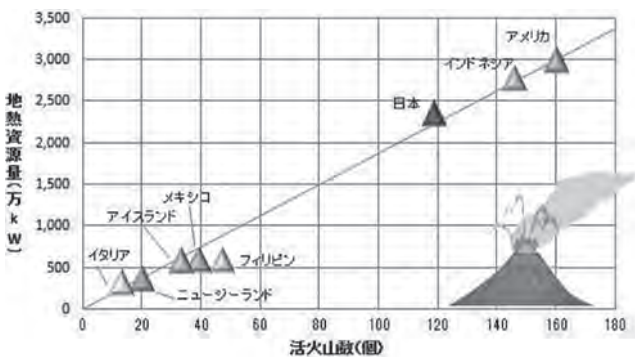
出典 日本地熱協会  
図—3 電源種別平均ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量

a) ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量…発電する時の燃料などの燃焼に加え、原料の採掘から発電設備等の調査・建設・燃料輸送・運転・保守・撤去等に消費される全てのエネルギーを対象としてg-CO<sub>2</sub>/kWhに換算して算出したもの。

b) 設備利用率(%) = 年間発電量 ÷ {発電端出力(認定出力) × 365(日) × 24(時間)} × 100 として計算。

### (3) 国内での豊富な資源賦存量

我が国はエネルギー自給率が低く2018年の自給率は11.8%で、他のOECD諸国と比べると低水準であり、10年ほど前の2010年には自給率が20.3%あったものの、東日本大震災などの要因により現在の水準となっている<sup>4)</sup>。日本はエネルギー資源に恵まれない国であるが、「環太平洋火山帯」に位置していることから、地熱資源のポテンシャルは主要な地熱資源国との比較でアメリカとインドネシアに続く世界第3位の2,347万kWの地熱資源量を有している(図-5)<sup>5)</sup>。しかしながら、地熱発電への利用(地熱発電設備容量)を世界で比較すると2020年時点で第10位とあまり活用されていないのが現状である。



出典 村岡洋文(2009)パラダイム転換としての地熱開発推進  
図-5 各国の活火山数と地熱資源量の関係

## 4. 地熱開発の進め方

地熱開発の調査から開発(発電所建設を含む)までのおおまかなフローを図-6に示す。このフローは環境アセスメントを必要とする出力10,000kW以上のものの例示である。地表地質調査～掘削調査～生産井・還元井掘削/実証試験/貯留層評価などに必要な期間は、開発予定地点の既存データの質や量により異なり、また開発規模によっても異なるが一般的には10



図-6 地熱開発の調査から開発までのフロー(概念図)

年以上掛かる。規模が大きくなれば掘削する坑井の本数や評価にも時間を要するため、開発期間はさらに長くなる。一方で小規模(出力数十～数百kW)な温泉を利用した地熱発電は、すでに坑井掘削が完了していることや環境アセスメントが不要なことから短期間での開発が可能なものもある。

### (1) 地表地質調査のステージ(投資割合<1%, 期間1~2年)

- ①地表で見られる地質・断層・変質・噴気帯・温泉の分布などを調べる地質調査を実施。
- ②地下の比抵抗・密度分布・他を調べる物理探査を実施。
- ③既存坑井があればそれらの地質・変質や比抵抗・密度・温度などの物理データを解析。これらから地熱系概念モデルを作成する。特に規模が大きな地熱発電には一般的に200℃以上の貯留層温度が必要なことから、このステージでは高温が示唆される地域の選定が重要である。

### (2) 掘削調査のステージ(投資割合10~15%, 期間3~4年)

- ①調査井を掘削して地下深部の情報を坑井内検層や坑井試験(小規模な噴出や還元)により取得。
- ②蒸気・熱水の噴出や汲み上げにより得られた流体の化学成分を分析。
- ③掘削により近傍の温泉への影響の有無や道路・基地造成・掘削工事により生態系に影響がないかなど環境モニタリングを実施。このステージで地熱貯留層の有無(温度・圧力・透水性)を判断し、次のステージへの進級を意思決定する。

### (3) 生産井・還元井掘削/実証試験/貯留層評価、環境アセスメントのステージ(投資割合20~25%, 期間4~5年)

- ①このステージでは開発範囲が限定(絞り込みが完了)されていることから、実証(一斉噴気)試験～発電所建設などを考慮した基地配置や生産井及び還元井の掘削が必要。
- ②生産井及び還元井の確保(目標発電出力の50~100%)後、実証試験(一斉噴気試験)を3~6ヶ月実施して坑井特性や貯留層の安定性を調査。並行して観測井などで圧力干渉のデータの取得や温泉モニタリングなどを実施。
- ③実証試験後は得られたデータで貯留層シミュレーションや経済性評価などを総合的に行い、発電規

模を最終的に決定。

- ④発電所の規模を決めた段階で出力 10,000 kW 以上の地熱発電所は環境影響評価法に基づく手続き（環境アセスメント）を実施。

このステージで発電所の規模や運転開始時期の最終的な意思決定をすることになる。

#### (4) 発電所の建設（投資割合 60～70%、期間 2～3 年）

- ①建設工事は前ステージの環境アセスメントが完了し、各種許認可・届出（必要な土地の取得に伴う許認可、保安林の指定解除、電気事業法、他）を取得・提出したのち開始。
- ②許認可取得後は搬入路の整備や発電所・蒸気設備・掘削基地の土木造成工事を実施。
- ③前ステージで生産井や還元井が確保できていない場合はさらに生産井や還元井を掘削。
- ④造成工事完了後は蒸気設備（セパレータ・熱水タンク・サイレンサー・配管・他）や発電所建屋の基礎工事を実施。
- ⑤発電所建屋が完成すればタービンや発電機などの機械・電気の据付工事が始まり、並行して蒸気設備の設置が進行。

発電所及び蒸気設備の建設期間は地点による特性（豪雪地帯・追加掘削工事・他）により 2～3 年では不十分な場合もある。また、送電線の敷設工事は発電事業者が自ら施工する自営線や一般送配電事業者（大手電力会社）の送電網の増設があり、地点によってはこれらの工事が発電所の建設工程に影響を与える可能性があるので関係先とは十分に協議をしながら進める必要がある。

#### (5) 発電所の運転（操業）

操業が開始されれば環境アセスメントに則り、地元自治体との協定に基づく環境モニタリングや発電所の安定運転のための貯留層モニタリング（各坑井の生産量や還元量、圧力観測井の変動、地化学成分変化、他）を実施する。生産井や還元井の能力減衰に備えての生産・還元補充井の掘削地点の選定なども必要になる。

## 5. 地熱発電の種類

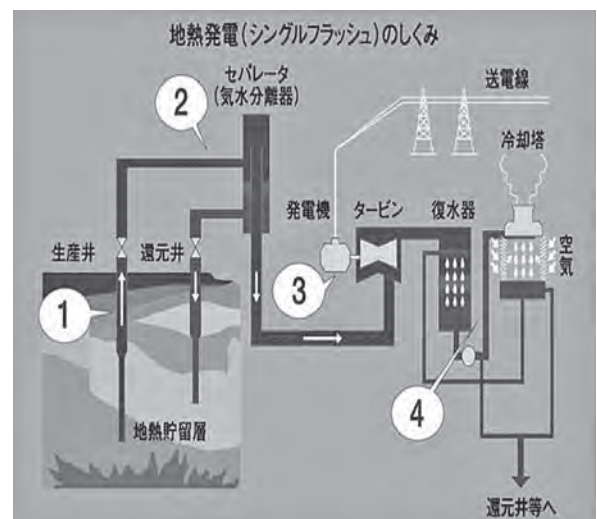
地熱発電の特徴は既に述べているように地熱貯留層から蒸気・熱水（多くの地点では地下深部では被圧された高温の熱水で賦存）から成る地熱流体を採取し、タービンを廻し発電をするものである。発電は高温蒸気を利用するフラッシュ発電と低温蒸気や熱水（温泉）

との熱交換により低沸点媒体を利用するバイナリー発電に大別される。

#### (1) フラッシュ発電

フラッシュ発電は図—7に示す①生産井から取り出した地熱流体を②気水分離器（セパレーター）で蒸気と熱水に分離し、③分離された蒸気でタービンを廻し発電機にて電気を発生させ送電線に流す、④発電に使用された蒸気は復水器で温水（凝縮水）になり冷却塔で空冷され循環再利用する方式である<sup>6)</sup>。

気水分離器で分離された熱水は地熱貯留層に還元され、冷却塔で凝縮された余剰水は還元井での地下還元や河川へ放流する。フラッシュ発電には図—7に示すセパレータで分離した蒸気を使用するシングルフラッシュ方式と分離した熱水をさらにフラッシャー（減圧容器）に導入して二次蒸気を採取するダブルフラッシュ方式があり、国内では多くの地熱発電所がシングルフラッシュ方式だが森発電所（北海道森町）、山葵沢地熱発電所（秋田県湯沢市）、八丁原発電所、大岳発電所（大分県九重町）はダブルフラッシュ方式を採用している。一般的にダブルフラッシュ方式はシングルフラッシュと比較して熱水の持つエネルギーの一部を蒸気化させて使用するため 20% 程度出力が向上するメリットがあるが、ダブルフラッシュ後の還元熱水温度低下によるスケール析出や貯留層の冷却などのデメリットもあり、それらを総合的に判断し選択されている。ニュージーランドでは分離した二次熱水をさらにフラッシュさせるトリプルフラッシュ方式の発電所も操業している。



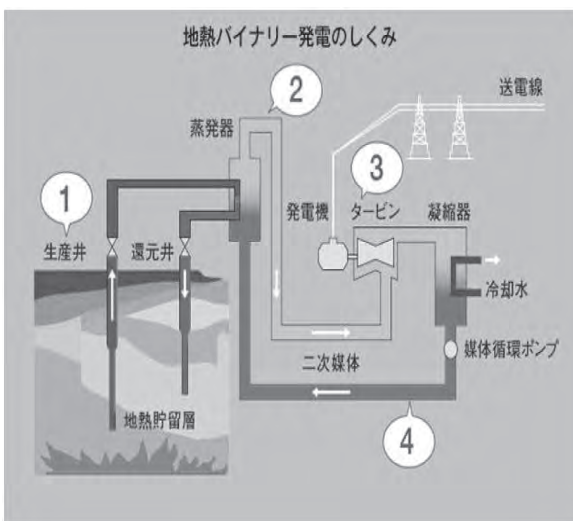
①地熱流体を取り出す生産井②蒸気と熱水を分離するセパレータ③分離された蒸気で発電するタービンと発電機④発電を終えた蒸気の復水器で温水になり冷却塔で空冷し循環再利用

出典 日本地熱協会

図—7 地熱発電（シングルフラッシュ）のしくみ

## (2) バイナリー発電

地熱流体の温度が低い場合はフラッシュ発電に必要な蒸気を得ることができないことや100℃以下の熱水では蒸気が得られずタービンを廻すことができないことから、水よりも沸点の低い二次媒体（オゾン破壊係数の低い新代替フロン、ペンタンなどの炭化水素、水とアンモニアの混合物）を使用し、地熱流体から熱のみを回収して二次媒体を蒸気化させ、その蒸気でタービンを廻し発電する方式がある。地熱流体と低沸点の二次媒体の2つの流体を使用することからバイナリー発電と呼ばれている。バイナリー発電は図—8に示す①生産井から地熱流体を取り出すのはフラッシュ発電と同じであるが②地熱流体を蒸発させずに低沸点の二次媒体を加熱して二次媒体を蒸発器で気化させる③気化した二次媒体でタービンを廻し発電機にて電気を発生④発電に使用された二次媒体は凝縮器（水冷と空冷の両方がある）で液体に戻し、媒体循環ポンプで再利用する方式である<sup>6)</sup>。二次媒体の沸点は常圧で新代替フロン（HFC-245fa）15.4℃、ペンタン36℃、水とアンモニアは混合比により沸点が変化するが30℃前後である。このように地熱流体の温度が低くても二次媒体で発電ができることから80℃を超えるような温泉地では、その温泉を熱源として熱を回収してバイナリー発電を実施した後に温度の低下した温泉として浴用に使用するなどの小規模な地熱発電（温泉発電）が普及している。



- ①地熱流体を取り出す生産井
- ②地熱流体から蒸発器(熱交換器)で熱のみを採取し低沸点の二次媒体を蒸気にする
- ③二次媒体で分離された蒸気で発電するタービンと発電機
- ④発電を終えた二次媒体は凝縮器で冷却(水冷又は空冷)し液体に戻し循環再利用

出典 日本地熱協会

図—8 地熱バイナリー発電のしくみ

## 6. 国内の地熱発電所と新たな地熱資源調査実施地域

(1) 我が国の地熱発電所は、火山や地熱地域の分布から東北と九州に集中しており、国内の地熱発電所の設備容量を合計すると70地点92ユニットで約56万kW、電源構成比で0.2%となる。国内最大の発電所は八丁原発電所(大分県九重町)の11万kW(5.5万kW/ユニット×2ユニット)である。2020年10月時点で、国内における発電出力が1,000kW以上の地熱発電所は20地点23ユニットで発電出力は53.1万kWになる(図—9)<sup>6)</sup>。

(2) 第6次エネルギー基本計画(2021年10月閣議決定)では、2030年の発電目標を150万kWと示しており、その達成のために(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)は、企業による新たな地熱資源の調査・開発の支援を進めており、2012(平成24)年から2021(令和4)年3月までの助成金交付及び出資・債務保証を行った地点は91ヶ所に及び、この中から新たな地熱発電所が建設を予定されている(図—10)<sup>7)</sup>。

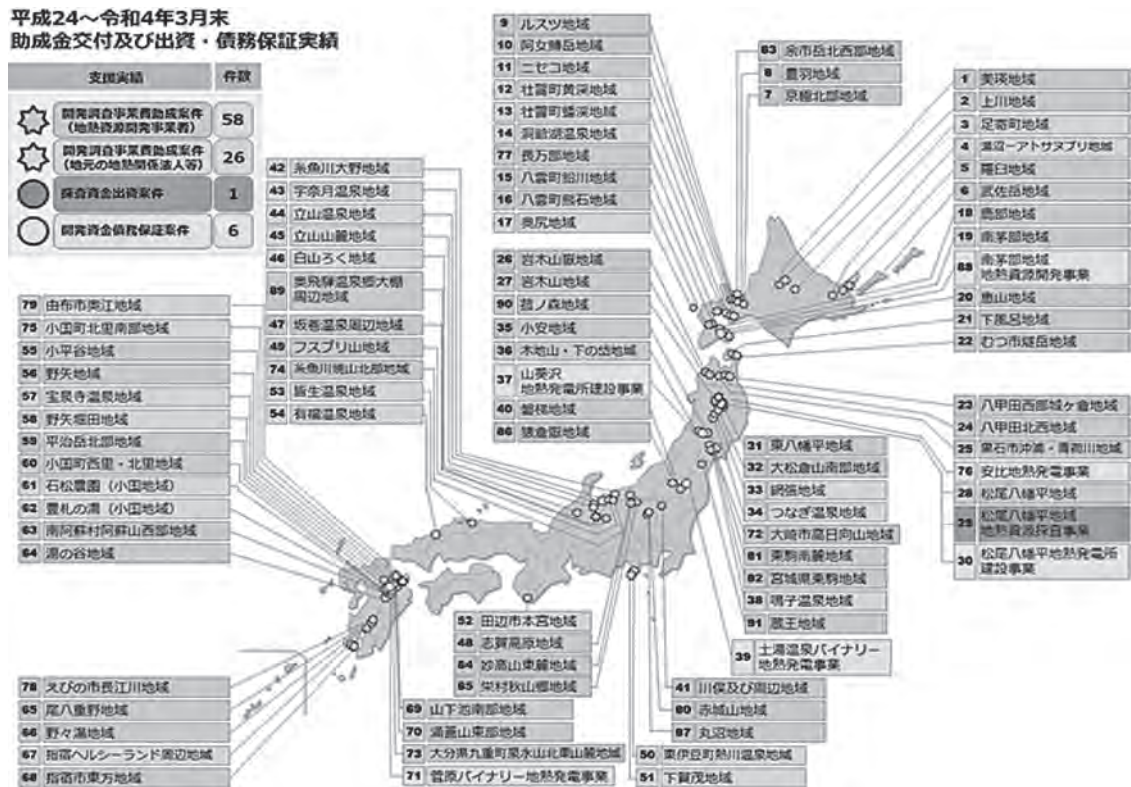
## 7. 今後の課題

国内に豊富にある地熱資源であり固定価格買取制度(FIT)や関係省庁による規制緩和などの政策的な後押しが行われているが、開発は必ずしも捗っていない。そこで日本地熱協会ではさらなる地熱発電の普及・拡大のため経済産業省、環境省、林野庁及び他の関係先



出典 日本地熱協会

図—9 日本の地熱発電所位置図(発電端出力1,000kW以上)



出典 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構  
図-10 国内における地熱発電の調査事業実施地域

に下記の7項目を課題として政策要望を行っている<sup>8)</sup>。

- ① 固定価格買取制度の改革に伴う「地熱発電開発拡大への配慮」
- ② 新規有望地点の発掘と開発支援策の継続・拡大
- ③ 系統制約を最小化する制度検討
- ④ 地域ステークホルダーの理解促進と地域共生を促す事業・制度の継続と拡充
- ⑤ 温泉法と調和的な地熱法の制定
- ⑥ 自然公園内での円滑な地熱開発に向けた自然公園法の適切な運用
- ⑦ 国有林野の貸付・使用等に関する手続きの弾力的かつ迅速な運用

これらの政策の支援と企業の努力により、我が国に豊富に賦存する地熱エネルギーの拡大に官民協力して取り組むことが急務である。



《参考文献》

1) 経済産業省 資源エネルギー庁 蓮沼佳和, 第6次エネルギー基本計画について, 地熱技術, Vol.47, Nos.1&2 (Ser.No.100), p.23-30, 2022

- 2) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 地熱-地域・自然と共生するエネルギー (パンフレット), p.6, 2020年9月, [https://geothermal.jogmec.go.jp/library/pamphlet/file/jogmec\\_geothermal.pdf](https://geothermal.jogmec.go.jp/library/pamphlet/file/jogmec_geothermal.pdf)
- 3) 今村栄一・長野浩二, 電力中央研究所報告, 2010年7月
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁, エネルギー自給率の推移, 2019年3月, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy\\_2021/001/](https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy_2021/001/)
- 5) 村岡洋文・他, 日本の熱水系資源量評価 2008, 日本地熱学会 平成20年学術講演会 講演要旨集, B01, 2008
- 6) 日本地熱協会, 活かそう! 地熱発電! (パンフレット), 2021年11月, <https://www.chinetsukyokai.com/information/index.html>
- 7) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 地熱資源開発 これまでの支援プロジェクト, 2022年3月, [https://www.jogmec.go.jp/geothermal/geothermal\\_10\\_000007.html](https://www.jogmec.go.jp/geothermal/geothermal_10_000007.html)
- 8) 日本地熱協会, 最新情報 令和4年度 地熱開発促進のための政策要望, 2022年5月25日, <https://www.chinetsukyokai.com/news/68/%92n%94M%94AD%93d%8AJ%94AD%91%A3%90i%82CC%82%BD%82%DF%82%CC%90%AD%8D%F4%97v%96%5D%81i%97DF%98a%82S%94N%93x%81j.pdf>

【筆者紹介】

上滝 尚史 (じょうたき ひさし)  
日本地熱協会 顧問  
工学博士

