



地熱エネルギーの可能性

株式会社H&Sエナジー・コンサルタンツ パートナー
石丸 美奈

目次

1. はじめに
2. 「発電利用」－蒸気発電
3. 「発電利用」－温泉バイナリー発電
4. 「直接利用」－地中熱ヒートポンプ
5. おわりに

1. はじめに

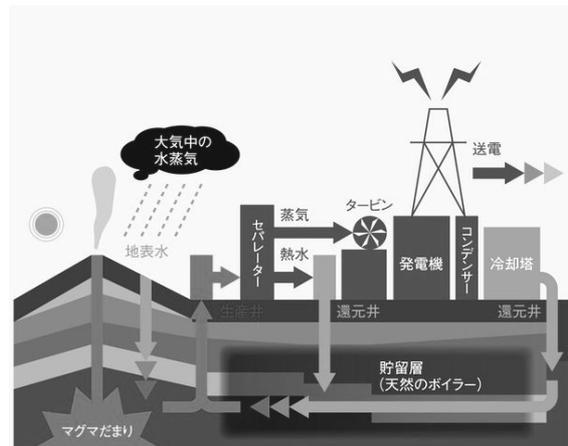
東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、とりわけ再生可能エネルギー開発への取り組みが進む日本で、再び注目を集めつつあるのが地熱資源である。

地熱エネルギーの利用は、蒸気による発電を主とした「発電利用」と地熱の「直接利用」とに分けられ、前者のうちで広く実用化されているのが蒸気発電とバイナリー発電である。一方、後者のうち、日本での普及が期待されるのは、地熱の一部ではあるが、普通の地域の地表から約200mの深さまでの地中にある熱を利用する地中熱ヒートポンプだ。

2. 「発電利用」－蒸気発電

火山や温泉などがある地域では、深さ数kmのところ高温の溶けた岩石（マグマ）が溜まっており、地中に浸透した雨水などがこのマグマ溜りによって熱せられ上昇し、熱水や蒸気となり「地熱貯留層」に蓄えられている。この貯留層に向けて井戸（生産井）を掘り、噴出する200～350℃程度の高温の蒸気と熱水

蒸気発電の仕組み（シングルフラッシュ方式）



（出典）朝日新聞GLOBEサイト

を気水分離機（セパレーター）で分離して、この蒸気でタービンを回し発電するのが蒸気発電（シングルフラッシュ方式¹）の基本的な仕組みだ。

環太平洋火山帯に位置する日本は米国、インドネシアに次いで世界第3位の地熱資源量を誇り、そのポテンシャルは地熱発電に換算すると2000万kW以上（原子力発電所20基分相

1 その他に、生産井から噴き出す水が熱水を殆ど含まぬ蒸気の場合、それを直接利用するドライスチーム方式、蒸気と分離した後の熱水を減圧することにより得られる蒸気も発電に利用するダブルフラッシュ方式等もあるが、日本ではシングルフラッシュ方式が主流である。

世界の地熱資源量と発電設備容量（1 MW＝1000kW）

国名	活火山数 【個】	地熱資源量 【MW】	地熱発電導入量 (2010) 【MW】
米国	160	30,000	3,093
インドネシア	146	27,790	1,197
日本	119	23,470	536
フィリピン	47	6,000	1,904
メキシコ	39	6,000	958
アイスランド	33	5,800	575
ニュージーランド	20	3,650	628
イタリア	13	3,270	843

（出典）活火・地熱資源量：産業技術総合研究所、2009年、
地熱発電導入量：国際地熱協会（IGA）サイト

当）と推定されている。燃料を必要とせず、CO₂ 排出が非常に少ない上、太陽光や風力と異なり、再生可能エネルギーの中では水力などと同様に365日24時間、安定した発電が可能で、ベースロード電源²になり得る貴重な自然エネルギーだ。しかし、国内での事業用新規開発は大規模なもの（環境影響評価法の対象となる認可出力1万kW以上）は1996年の九州電力滝上発電所（2万7500kW）、比較的小規模のものでも1999年の八丈島発電所（3300kW）を最後に途絶え³、地熱発電の設備容量は約54万kW（事業用13か所、自家用5か所）⁴で世界8位に甘んじている。国内電力

需要の0.3%を賄うに過ぎず、そのポテンシャルの3%弱しか活用されていない。

日本で地熱発電の開発が遅れてきた理由には、1. 開発コストが非常に高く、開発期間が長期にわたること、2. 熱源ポテンシャルの80%以上が国立・国定公園域内にあり、規制のため開発ができなかったこと、3. 温泉関係者等の反対、などがある。

地熱発電事業の負担となる初期費用には調査費用、建設費、系統連系費用等があるが、とりわけネックとなっているのが建設費の高さだ。発電には生産井と利用した水を地下に戻すための還元井が同数ずつ必要となるが、井戸を1本掘るだけで数億円かかるため、掘削費が高額になる。また生産井からの蒸気や熱水は年々減少する傾向にあるため、数年に1本の割合で補充井を追加する必要もある。

3万kW級のモデルプラント建設費は210～270億円（70～90万円/kW）と試算されており（コスト等検証委員会）、加えて12億円の調査費用と15億円の系統連系費用（日本地熱開発企業協議会の試算）も必要になる。また予備調査から操業開始までは建設にかかる3～4年を含めて9～13年程度（コスト等検証委員

地熱発電開発の一般的な流れ（出力3万kWモデルケース）



（出典）資源エネルギー庁資料を編集

- 2 時々刻々と変動する電力需要に合わせた電力供給を行う上で、最低のベース部分の安定的な供給を担う電源。地熱発電の設備利用率は太陽光の12%、陸上風力の20%に比べて70%と各段に高い。
- 3 2006年に新設された八丁原バイナリー発電所（2000kW）は既存発電所内での建設。
- 4 2013年6月現在、運転している発電所は17か所で、認可出力合計は約51万5000kW（「NEDO再生可能エネルギー技術白書」、2013年12月12日）。

会)とされている。

コストの問題については、2012年7月の固定価格買取制度(FIT)導入で、設備容量1万5000kW以上の買取価格は1kWあたり27.3円(税込で15年間)、1万5000kW未満は42円(同)と、業界関係者の要望を超える高水準に決まり、事業性が見込めるようになった。しかし、依然としてコスト回収開始までの資金負担は巨額なものとなるため、経済産業省は2012年度から地熱資源の開発を対象とした補助⁵を開始しており、2013年度の予算は総額75億円で、すでに補助の対象となる20の事業が決定している(うち10件は前年度からの継続案件)。補助金の支給の割合は、地表調査(ポテンシャル調査)にかかる費用の4分の3まで、それに続く掘削調査は費用の2分の1まで、そして温泉への影響把握のためのモニタリング調査には一定額となっており、2014年度についても同規模での開発支援を行ってゆく考えだ。

一方、開発期間の短縮に関しては、環境省と経済産業省が、現状で3~4年かかっている環境影響評価(環境アセスメント)を簡素化・迅速化し、期間を半分にする方向での検討を進めている。

国立・国定公園域内での規制問題では、環境省が2012年3月に新たな指針を発表し、域内でも自然環境保護の重要度が高くないエリアであれば、条件付きで発電所の建設が認められるようになった。

残る大きな問題は温泉事業者、自然保護団体などの地域の利害関係者と開発事業主体との信頼関係の構築と地域での共生だが、地熱井(生産井や還元井など)の掘削許可権限は温泉法に基づき都道府県知事にあり、自治体

の協力は利害関係者との対話を進めるにあたって不可欠なものとなる。

また、地熱発電による蒸気と熱水利用が温泉資源に影響を及ぼすことのないよう、開発事業者は継続的なモニタリングと情報開示を行うとともに、トラブルが生じた際の対策を関係者間で協議しておく必要がある。

加えて、発電や温泉以外に未利用のままになっている地熱エネルギーを、地域や室内暖房、工業利用、農業利用、養殖、温水造成や融雪など地元のために直接利用したり、発電後の排熱を段階的に再利用してゆくカスケード利用で、資源の効率的活用を進めることが重要だ。

1977年に運転を開始した日本最大の八丁原地熱発電所(大分県)では、九州電力が地域代表の立ち合いの下、湯量や湯質と大気環境の測定を続け、地元と友好関係を築いており、発電所自体も温泉街とともに観光スポットとなっていて、地域活性化に貢献している。また、東京電力の八丈島地熱発電所では、発電機のタービンを回した後の蒸気で温められた農業用水が、近隣の「温室団地」でカスケード利用され、トロピカルフルーツや観葉植物の栽培といった地場産業に活用されている。

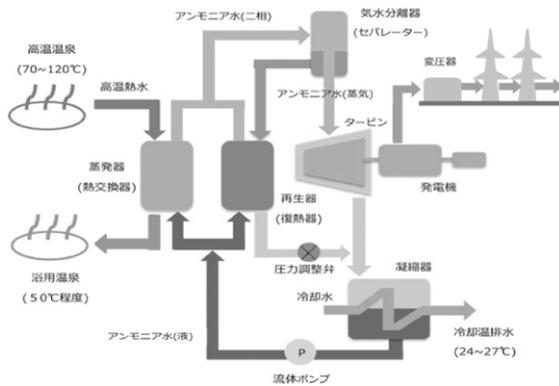
今後、大規模な地熱発電事業を成功させるには、地熱エネルギー利用を多面的に捉え、省エネや産業育成と地域振興に役立てる形で推進できるよう、計画段階から地元とともにプロジェクトを進めてゆく姿勢がますます重要になっている。

3. 「発電利用」－温泉バイナリー発電

80~150℃の熱水があれば発電可能となるのがバイナリー(binary)発電で、熱水で沸点の低い媒体(ペンタン、アンモニアなど)

5 石油天然ガス・金属鉱物資源機構(GOGMEC)を通じた「地熱資源開発調査事業費助成金交付事業」

温泉バイナリー発電の仕組み（カーリーナサイクル）



(出典) 自然エネルギー財団サイト

を加熱し高圧の蒸気を作り、その蒸気でタービンを回し発電する。発電プラント内で熱水を循環させる加熱源系統と、媒体を循環させる系統の2つ (binary) の熱サイクルを利用して発電することからこの名前が付いた。

「バイナリー地熱発電」といった場合は通常、探査・掘削を行う新規開発事業を指すが、日本ではまだ、このような事業はほとんど行われておらず⁶、FITの導入により、既存の温泉を活用する小規模な「温泉バイナリー発電」に関心が集まっている。

沸点温度を柔軟にコントロールできるアンモニア（沸点-33℃）と水との混合媒体を使用するカーリーナサイクル⁷では、70℃以上の熱水があれば発電が可能で、高温すぎる源泉の熱エネルギーをまずバイナリー発電に活用し、50℃程度にまで下げて浴用として利用することが可能になる。

既存の温泉利用であれば開発リスクもなく、探査・掘削コストが不要になる。また、1万5000kW未満の地熱発電施設ではFITでの買取価格が42円と高水準で、7500kW未満の場合、環境アセスメントも必要ない。温泉旅館などの施設があれば、電熱併給（コージェネレーション）による熱の有効利用ができ、資源量によっては、地域の電気や熱需要をすべて賄うことも可能になる。また、利用された熱水の全量が地下に還元されるため、温泉枯渇の心配もなく、利害関係者からの反対が少ない。

長崎県雲仙市の小浜温泉では2013年4月から1年間の予定で、環境省の委託事業として、事業化を見据えた温泉バイナリー発電（出力60kW設備3基の180kW）の実証実験が行われている。これまで1日の湧出量の70%が未利用のまま海に捨てられていたが、バイナリー発電により新たに得られた電力を町内の健康施設に送電し、使用電力の50～70%を賄っている。また実験事業開始後は全国から視察・見学者が訪れるようになり、「小浜温泉ジオツアー」も実施されている。

小浜温泉での取り組みで特筆すべきは、ここでは2004年に新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）と小浜町が主導して進めていた、大規模な掘削をとまなう地熱開発プロジェクトが、地元の反対で中止になった経緯があるということだ。現在の温泉バイナリー発電は、地域にとってメリットのある発電プロジェクトとなっているため、かつて反対運動をしていた温泉事業者が中心となり地域

6 日本で本格的なバイナリー地熱発電と言えるのは、前出の八丁原地熱発電所（総出力11万kW、九重町）内で2006年から営業運転されている、出力2000kWのバイナリー発電所であるが、既存の生産井を利用しており、新規開発ではない。

なお、同町の菅原地区では、同様に既存井を利用した5000kWのバイナリー発電所の新設が、2014年3月から始まる予定になっている。

7 バイナリー発電のもうひとつの方式は「ランキンサイクル」で、ブタン（沸点-5℃）やペンタン（沸点36℃）など、比較的沸点の高いものが媒体として用いられ、通常、100℃以上の熱水が必要となる。

主導で事業を進めている。

実証実験の終了後は地元で設備を買い取り、事業化に取り組む予定で、発電後の温泉水のカスケード利用として温泉農園、大露天風呂といった熱利用事業の展開などを検討しているという。

地域分散型の安定したエネルギー供給源のひとつとなり、未利用エネルギーの活用・地産地消、さらには地域の活性化につながるポテンシャルの高い温泉バイナリー発電だが課題も残る。

日本企業は海外に数多くの地熱発電設備（タービン）を輸出しており、大型の装置に関しては大変技術力が高い。地熱の発電関連設備は三菱重工業、東芝、富士電機の3社で世界シェアの7割を占めるほどだ。しかし、日本でのバイナリー発電の普及はこれからで、とりわけ100kW以下程度の小型で安価かつ設置コストの低い発電機は開発途上にある。まだオールインワンでコンパクトな設備が量産されていないため、設備コストが高い。また、温泉発電の場合は設置場所も山間などが多く工事費用もかさむ。

事業の採算性は、利用可能な湯量によって決まる発電規模や、使用する媒体により配置が義務づけられてきたボイラー・タービン技術者の要・不要などにも左右されるが、工事費を含む全体の設備投資費用が100万円台/kWになれば、FITの下で事業採算性が確保されるとのことだ（地熱技術開発株式会社）。

なお、ボイラー・タービン主任技術者の選任に関しては小規模地熱発電の普及拡大を踏まえて見直しが進んでおり、2013年9月には

経済産業省が、出力100kW以下の設備について、3日間程度の講習を受けた従業員でも主任技術者として選任できるよう要件を緩和した。これにより年600万円程度のコスト削減が見込め、現在およそ4年とされている建設費用の回収期間が半年程度短縮されるという（日本経済新聞、2013年8月17日）。

4. 「直接利用」－地中熱ヒートポンプ

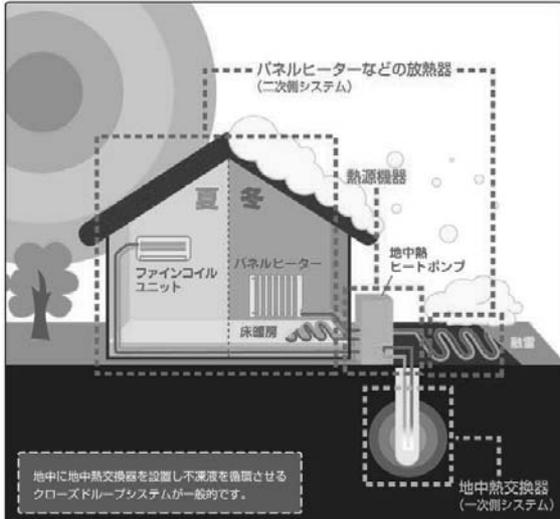
日本のような中緯度地域ではおおむね地下10mより深いところの温度は年間を通じてほぼ一定で、たとえば東京の地下50mの地温は一年中およそ18℃で変化せず、夏は平均気温より10℃程度低く、冬は10℃程度高い。この外気と地中の温度差を利用して冷暖房、給湯、融雪、温室暖房などを行うのが地中熱利用だ。地中熱のメリットは狭義の地熱と異なり、場所を選ばず、日本中どこでも利用が可能な点と、直接利用にあたって暖房のみならず、冷房にも利用できるという点である。

地中熱の利用方法の中で最も多様な用途に活用できるのがヒートポンプシステム⁸で、住宅やビルなどの冷暖房や給湯、プールや温浴施設の加温、農業施設の空調、路面の融雪や凍結防止などに利用されている。

仕組みは通常のエアコン（空気熱源ヒートポンプ）と同じだが、エアコンの場合は熱源として空気熱（外気）を使うのに対し、地中熱ヒートポンプは、地中熱交換器を使い、夏は外気より涼しく、冬は外気より暖かい地中の熱エネルギーを利用するため、同程度の冷暖房を行うために必要な電力が年間で49%も削減できるという結果がでており、とりわけ夏季の節電・省エネ効果が高い。

8 地中熱の利用方法にはヒートポンプシステムの他、主として熱伝道、空気循環、水循環、ヒートパイプの4つがある。

地中熱ヒートポンプシステムの基本構成（クローズドループ方式⁹）



(出典) あおもり地中熱ガイドブック

また、夏季の冷房排熱を大気中に放出せず、地中に戻すため、都市のヒートアイランド現象を緩和させる効果があり、放熱用の室外機がないので騒音もほとんどでない。さらに外気温-15℃以下でエアコンが使えない環境でも、安定した温度の地中熱の利用なら運転が可能であり、外気温が低下するとエネルギー効率が下がってしまうエアコンに比べて、高効率な運転ができる。

しかし、日本での地中熱ヒートポンプの利用はほとんど進んでいない。環境省によると、国内での設置件数は2011年までの累計で990件に過ぎず、そのおよそ三分の一は北海道（322件）での設置だ。一方、欧米では1980年代から普及が進み、すでに米国では1万2000MWt¹⁰（2010）、中国では5210MWt（2010）、スウェーデンでは

4460MWt（2010）が導入されており¹¹、米国の場合、平均的な家庭用（12kWt）の100万台分に相当する。スイスでは国の環境対策の一環ということもあり、新築住宅の80%以上に地中熱利用の冷暖房システムが設置されているという¹²。

日本での普及が進まない最大の原因は、ここでも機器設置にかかる初期コストの高さにある。地中熱の利用には熱交換井を掘削しなければならない。戸建て住宅に向く「ボアホール方式」と呼ばれる工法では、地面に100m程のボアホール（地中井）を掘ることになり、ボーリング費用だけで100～150万円（1mあたり1～1.5万円）となる。加えて、技術革新と低価格化が進んでいる通常のエアコンと比べて、機器本体が割高で機種も少ない。またシステム設計なども必要になり、投資資金の回収には30～50年かかるとされている。集合住宅やビルでは地下に打ち込む基礎杭を利用し、この中に熱交換用のチューブを入れる「基礎杭方式」が使えるため、投資回収期間は7～20年に短縮されるという（スマートジャパン、2013年6月21日）。

しかし、2010年にオープンした羽田空港の新国際線ターミナル、2012年に開業した東京スカイツリー、同年竣工のJPタワーの高層棟など、大型施設を中心に利用が進んでおり、知名度も上がりつつある。

国の政策としては、2010年6月のエネルギー基本計画で地中熱も再生可能エネルギーと認知され、翌年4月には経済産業省による再

9 最も一般的な方式で、地中に地中熱交換器を埋設し、内部に不凍液や水を循環させる。その他に井戸などから揚水した地下水をヒートポンプで熱交換させるオープンループ方式がある。

10 MWt（メガワットサーマル）は熱利用設備の容量を表す単位。

11 Lund, John W. et al. "Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review", April, 2010

12 江原幸雄「地熱エネルギー—地球からの贈り物—」2012年

生可能エネルギーの熱利用を促進する導入補助制度が開始された。2013年度には地中熱利用単独で申請できる導入支援のための国の補助金制度が、経済産業省で3、環境省で1あり、さらに15の地方自治体が補助金制度を設けている。これ以外にも、その他の省エネ・再生可能エネルギー設備と併せて申請する導入支援の補助金など、助成制度は充実¹³してきており、普及が進めば、機器の量産による価格低下にも期待がかかる。

5. おわりに

地熱エネルギーは日本にとってクリーンかつ安定的で枯渇の恐れがほとんどない、ほぼ未開発な国産のエネルギー・ソースである。大規模な蒸気発電が地方分散電源やベースロード電源の鍵となるばかりでなく、比較的小規模な温泉バイナリー発電も、地元で電力と熱を供給するとともに、地域活性化の手段になる。地中熱はその遍在性から、火山や温泉のない都市の真ん中でも有効活用ができ、冷暖房のピークカットや、ヒートアイランド現象の緩和に役立つ。

原発事故後の日本のエネルギー安全保障と地球温暖化の防止を考える上でも、それぞれの特性にあった、計画的な開発・利用が望まれる貴重な自然エネルギー源である。

13 利用可能な補助金については、NPO法人地中熱利用促進協会のサイトを参照。