

地域イノベーションと震災復興に寄与する地熱エネルギーの利用

浦島 邦子

和田 潤

グリーンイノベーションユニット

1 はじめに

2011年3月の東日本大震災を契機に、日本では「日本再生のための戦略に向けて」をはじめとするさまざまな検討が進んでいる¹⁾。特に、グリーン・イノベーション戦略の強化と前倒しを軸とした、新たなエネルギーベストミックス実現の戦略が議論されており、これまで以上に再生可能エネルギーの導入が加速されることは必須である。エネルギー・環境会議²⁾と関係省庁・関係機関が協力して、国民的議論を深め、新たなベストミックスをエネルギー基本計画として策定し、これに沿ったエネルギー・環境産業戦略およびこれらを支えるグリーン・イノベーション戦略からなる「革新的エネルギー・環境戦略」について「政策推進指針」(2011年5月17日閣議決定)にて述べら

れている。これによると、短期的には電力制約への政策対応や災害に強いエネルギー供給体制の構築等、新たな成長の芽(エコタウンの建設、省エネ・新エネビジネス、分散型エネルギーシステムの展開など)の育成と資金需要拡大の好循環形成、被災地域における先行モデル的な実施への積極的な対応、そして中長期的には安全・安定供給・効率・環境の要請に応える新たなエネルギー・環境構造を検討することになっている³⁾。

再生可能エネルギーは、その自然の補充する力の範囲内で利用しても枯渇せず、また一般に地球温暖化の原因にもならない。国際エネルギー機関(IEA)発行のRenewables Informationは「絶えず補充される自然の過程に由来し、様々な形態

のうち太陽から直接供給される光や地球内部で発生する熱、太陽や風や海洋や水力やバイオマスや地熱資源から発生した熱や電力、そして再生可能資源に由来するバイオ燃料と水素」を再生可能エネルギーとしている。このうち、太陽光発電は、我が国ではすでに住宅用のものについては余剰電力の買取制度が導入され、住宅用太陽光パネルの普及が進んでいるが、効率向上が課題である⁵⁾。また、近年は産業界で風力発電や小規模水力発電⁶⁾、火力発電所でのバイオ燃料の混焼⁷⁾など導入が進んでいる。

本稿では、我が国の状況と世界各国での現状を俯瞰し、地熱のエネルギー源としてのポテンシャル、熱利用を通じた地域への貢献ならびに政策的な対応策について述べる。

2 地熱エネルギーに関する現状と課題

2-1

地熱資源

地熱資源とは、地球が元来地中

に持っている熱のうち、エネルギーとして利用できるものを指す。発電のほか熱源として直接利用が可能であり、これを活用することで化石燃料と温室効果ガスの削減が期待できる⁸⁾。

地中の温度は、地下深度に伴って上昇し、この上昇割合を地温勾配と称する。日本の陸地での平均的な地温勾配は30℃/km程度である⁸⁾(世界平均は20℃/km程度)。したがって、深度を問題に

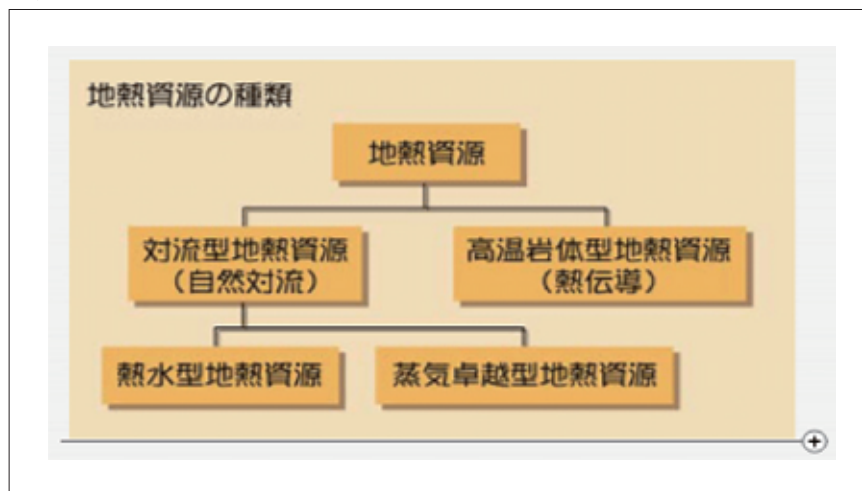
しなければ、地中の熱源自体はあらゆる土地に存在する。ただし、それを経済的に利用するためには、高温の熱がなるべく浅い場所にあることが望ましい。その熱を適度に取り出す限りは、絶えず新たな熱が地球の深部から補充されるため、持続可能かつ再生可能なエネルギー源といえる。

図表1に示すように、地熱資源には熱の補充の形態により、地中奥深い熱が地下水に伝わりその水の移動により上がってくる「対流型地熱資源」と、移動する水がなく岩石の熱伝導により伝わってくる「高温岩体地熱資源」がある。地熱資源とよばれてきたものは、利用しやすい前者が中心で、熱は熱水または蒸気として得られ、温泉のように自然湧出している場合もある⁹⁾。

図表2に、地熱資源の地下モデルを示す。これまで発電に利用されてきた熱水や蒸気は、水を通さない遮蔽層に行く手を阻まれた圧力の高い地下水の貯留層が地熱で加熱されたもので、深さは1000～2000 m くらいの場合が多い。この熱せられた地下水が、井戸（生産井）を掘ることにより、圧力を持った蒸気または熱水として地上に取り出される。発電に供する熱水にせよ温泉にせよ、その水の根源はほとんど周辺地域に降った雨水であることが近年になって判明してきた。地熱発電に供したあとの冷めた水は、地下の水バランスの保持、あるいは地下由来の不純物による周辺環境影響防止のために、還元井を通じて再び地中に戻す場合が多い¹⁰⁾。

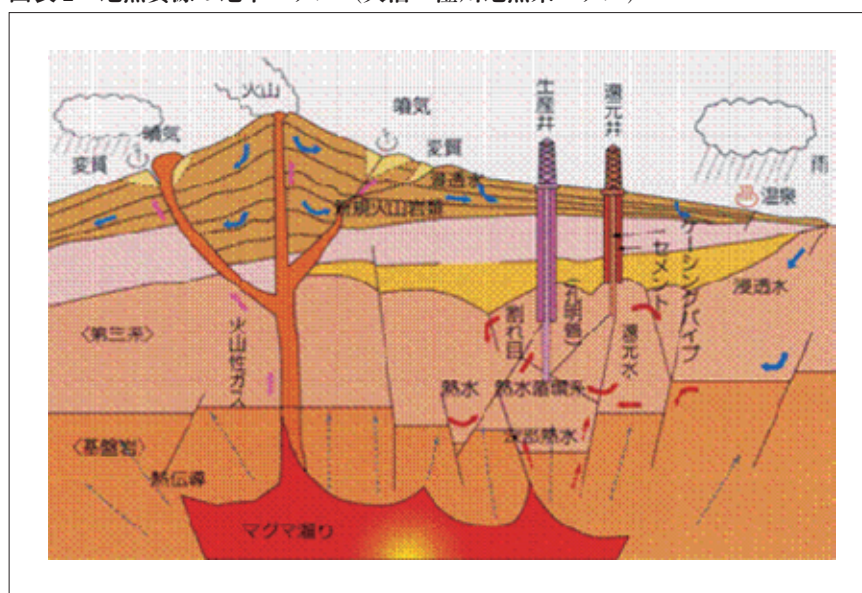
我が国は、世界でも地熱資源の豊かな国である。図表3に世界の地熱発電の資源量と設備容量を示す。我が国の地熱資源量は、150℃以上の熱水資源だけで発電出力に換算して23,470 MW分（150℃の熱水資源として30年間持続できる出力）とされ¹¹⁾、米国、

図表1 地熱資源の種類



出典：参考文献⁹⁾

図表2 地熱資源の地下モデル（大沼・澄川地熱系モデル）



出典：参考文献¹⁰⁾

インドネシアに次いで世界3位の資源量を有し、まだ手つかずの地熱資源が豊富に存在することを意味する。

地熱資源は、地熱発電のほか熱源として直接利用することも可能である。図表4に地熱エネルギーの利活用のフロー図を示す。地熱資源は通常、熱水や蒸気が自分の圧力で坑井から出てくるため、システム構成にもよるが、基本的に外部電源喪失などの非常時でもエネルギー供給源としての機能を確保しやすい。

地中熱利用とは、地下(0～100 m 深程度)の土壌または地下水の熱をヒートポンプの熱源として活用する技術であり、科学技術動向

No.90(2008年9月)でも取り上げた。地中の温度は年間を通してほぼ一定で、夏は気温より低く冬は高い。そこで、夏は地下に廃熱、冬は地下から抽熱してヒートポンプの熱源として利用すれば、大気を熱源とする場合よりも低動力で冷暖房ができ、融雪や給湯を行うことができる¹²⁾。

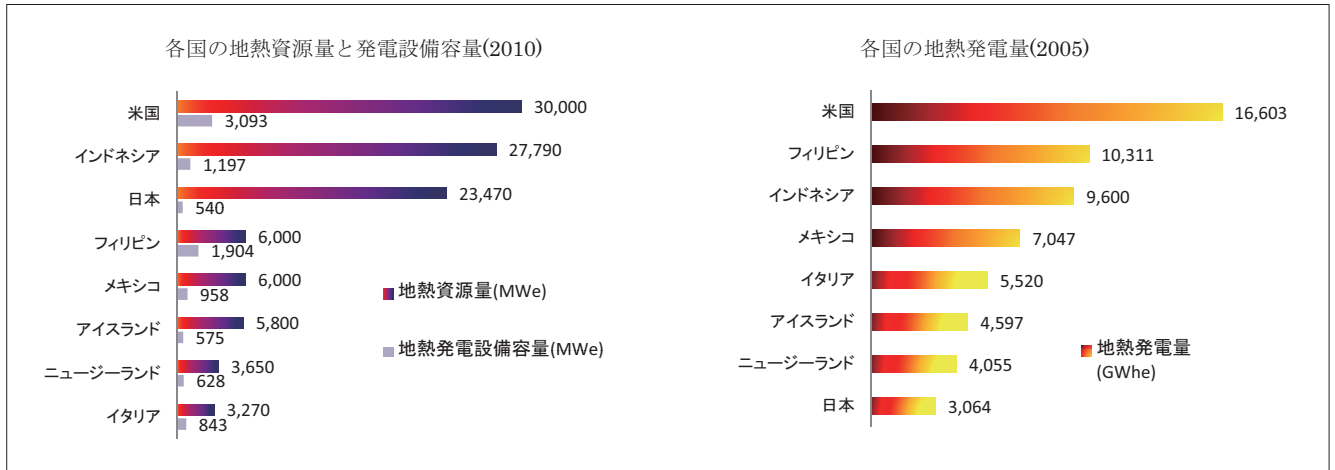
2-2

地熱発電

2-2-1 他の再生可能エネルギーとの比較

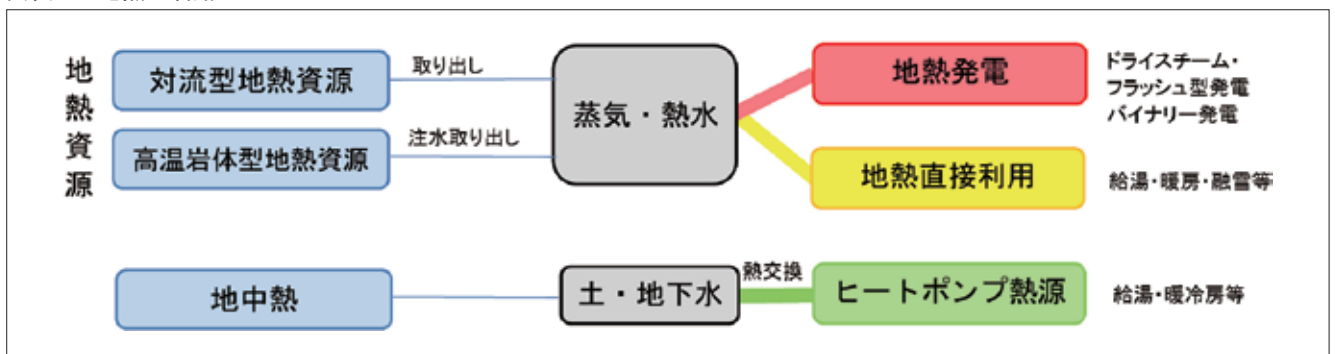
地熱発電の特徴を他の再生可能

図表3 各国の地熱資源量と発電設備容量、地熱発電量



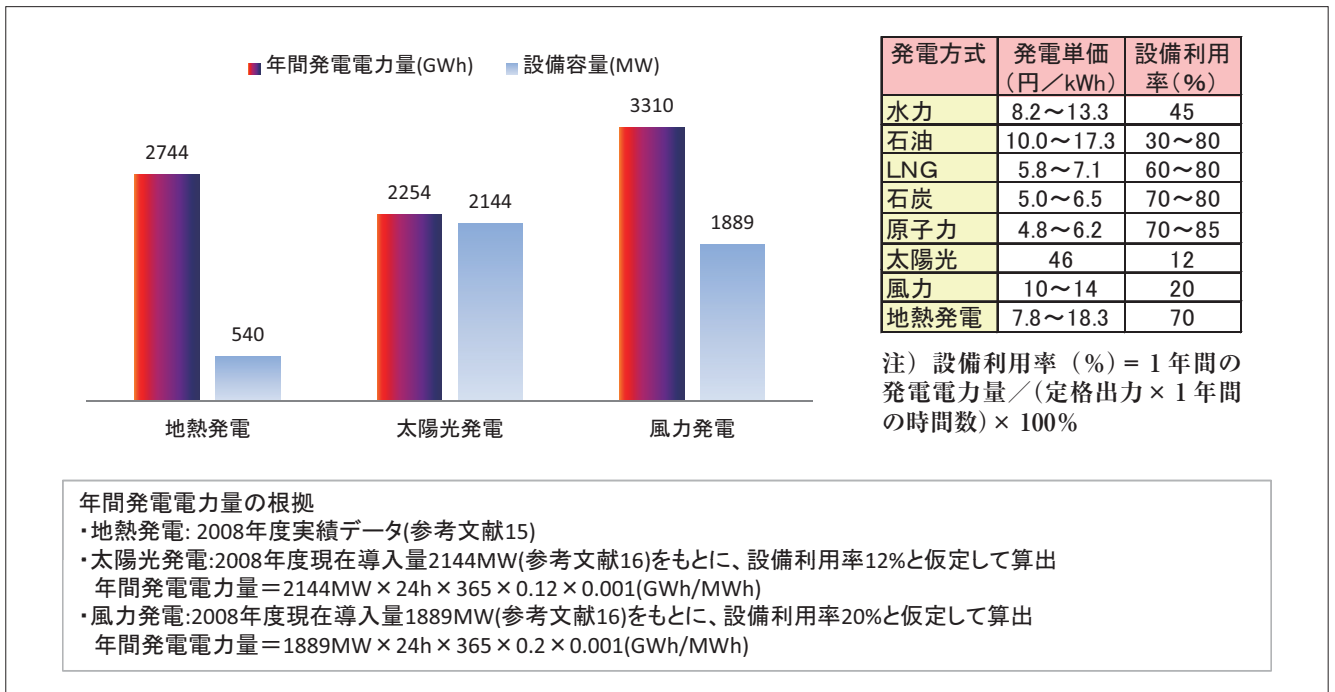
出典：参考文献^{13,14}を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表4 地熱の利用



科学技術動向研究センターにて作成

図表5 年間発電電力量・設備容量・発電単価・設備利用率の比較 (2008年度)



グラフは科学技術動向研究センターにて作成、発電原価・設備利用率の出典は参考文献¹⁵
 ※原子力に係る発電原価については、現在内閣府原子力委員会による再評価が行われている。

エネルギーと比較すると、大きな特長として、次の点が挙げられる。
 ・太陽光発電や風力発電に比べ、供給信頼性が高い。バックアッ

プ電源や蓄電池などを設置することなく、電力の安定供給が可能である。また、太陽光発電や風力発電よりも稼働率が高いので、図

表5に示すように、同じ出力でも年間では数倍の発電電力量が得られる。設備利用率も高く、発電単価も太陽光と比較すると

1/5 から 1/3 程度である¹⁵⁾。

- ・副生する熱をいろいろな用途に活用可能である。
- ・ライフサイクルとしての CO₂ 発生量は、太陽光発電・風力発電の 2~4 分の 1 と少ない。(図表 6)

2-2-2 日本の地熱資源開発に関する課題

我が国の地熱発電所は、1990~96 年にかけて 314 MW 増加し、この期間の増設分が現在の容量 540 MW の過半数を占めている。これは、1974 年のサンシャイン計画開始以降、石油開発技術や鉱山技術をもとにゼロから地熱資源の探査技術や熱水・蒸気のハンドリング技術などを開発し、人材を育成してきた成果が具現化してきたことと呼応している。しかし、1999 年の八丈島発電所運転開始以降は、後述する小規模なバイナリー発電の増設を除き、新規の導入はなかった¹⁸⁾。これは近年、米国、アイスランド、フィリピン、

インドネシア、イタリアなどで急激に導入が進んでいるのとは対照的である。

我が国の地熱発電が他の再生可能エネルギーや海外諸国の地熱発電とは対照的に伸び悩んでいる理由として、下記のような要因が指摘されている。

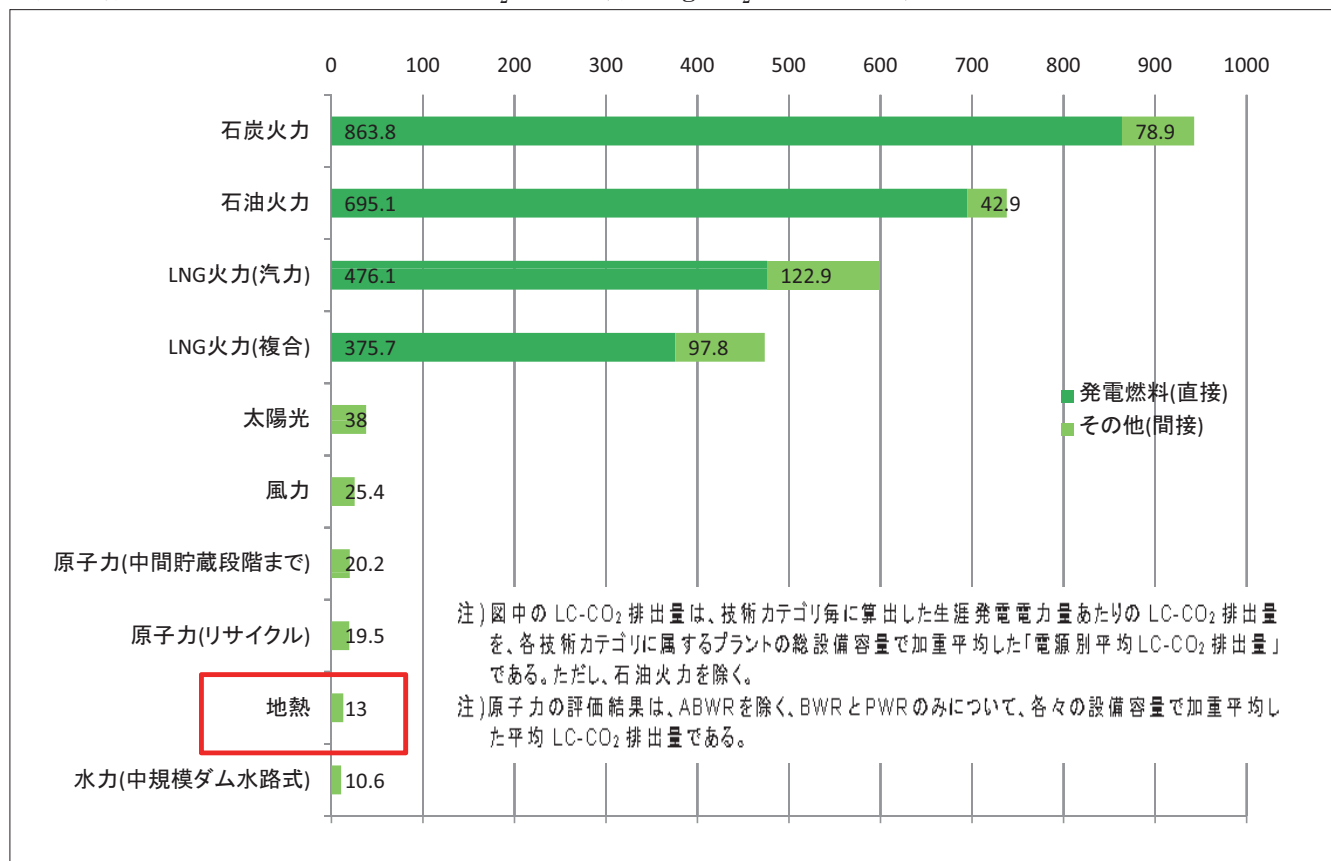
- ①資源調査に長い年月を要し、また調査結果によっては途中で事業化を断念せざるを得ないリスクがある
- ②適地の多くが自然公園内にあり、現行の自然公園法のもとでは開発が困難
- ③温泉に影響を与える懸念が指摘される
- ④環境影響評価手続きに最低 3 年を要する
- ⑤上記各項の二次的要因として、事業開始から発電開始までのリードタイムが 10 年以上におよび、資金回収が遅く、ビジネスインセンティブが乏しい
- ⑥再生可能エネルギーの中で、政

府による初期投資援助が乏しい
このうち、特に他国と比較して我が国特有の懸念は②~④である。自然公園法は、自然環境や景観保護のため、国立公園などでの発電関連設備の設置を規制している。国立公園や温泉地には地熱発電に使われる熱水資源が豊富にあるが、この規制によりこれまで開発が進まなかった。

また、2010 年 5 月に民主党政権による事業仕分けにより、「地熱開発促進調査事業」と「地熱発電開発事業」の 2 事業が廃止や白紙化を前提とした「抜本的改善」の措置を受けることが決定された¹⁹⁾。

地熱開発のコストのうち、掘削費用が最も大きな割合を占めていることも解決しなければならない。地熱の商業化のカギは、十分な供給量の熱水を確保できるか否かにかかっているため、事業を安定的に行うに足る熱水脈を発見するまでに掘削ターゲットを誤るリスクが高い。発見までに多くの

図表 6 各発電方式によるライフサイクル CO₂ 排出量 (単位: g-CO₂/送電端 kWh)



出典：参考文献¹⁷⁾

掘削が必要となれば、地熱事業への投資は莫大なものとなる。地下2000 m程度まで掘るとすると、井戸1本3億円～4億円のコストがかかることから、民間事業者にとってリスク負担が重い。これも、これまで事業化が進まなかった大きな要因である。

地熱に限らず、いわゆる新エネルギーには政府が初期投資を援助している。しかし、使用する発電源によって差が大きい。平成23年度新エネルギー等導入加速化支援対策事業の結果²⁰⁾によると、

太陽光発電は1/3以内か25万円/kWのいずれか低い額、風力発電は相当の理由がある場合には個別協議により最大15億円、天然ガスコージェネレーションおよびマイクログリッドについては上限5億と別途上限等が定められている。一方、地熱への補助率は、調査井掘削事業が1/2以内、地熱発電施設設置事業が1/5以内である²¹⁾。これは、例えば約10億円かかる掘削調査に対して、最大5億円しか負担されないことを意味する。後述するバイナリー発電50kW

システム（送電端）および系統連系等に必要な電力設備においては、約1.2億円の設置費用²²⁾に対して、補助金は2400万円程度である。このように⑥に記したように、地熱発電は政府援助の点でも不利であった。

こうした多くの理由により、他の再生可能エネルギーと比較してあまり注目されてこなかった地熱は地熱特有の課題もあるが、解決策がある程度見込まれる課題がほとんどである。

3 日本の地熱エネルギー利用の現状

3-1

「発電」としての利用

これまでに国内に設置された事業用地熱発電の単機出力、すなわち1台の発電機を構成する一連の設備容量は数MW～112MWである。一部ホテルなどの自家用には、100kWの例もある。事業用地熱発電では、発生した電力が遠隔の需要地へ送電されて使用されることから、火力・水力発電所等と同様に集中型電源の性格を有する。大まかにいえば、事業用地熱発電は大型の風力発電機と同規模ないし1桁大きく、中小規模の水力発電所と類似した出力となっている。既存の典型的な地熱発電は、取り出した蒸気または熱水を減圧（フラッシュ）することで一部が蒸発してできた蒸気を蒸気タービンに導いて、タービンを回して発電する。従って同じ熱水流量でも熱水の温度が高いほど発電出力が大きくなり、ひいては経済性に勝るので、温度の高い熱水が得られる地点に設置することが好ましい。

図表7に全国にある地熱発電の

現状を示す。現在、全国8都道県で稼働しており、主に火山帯に沿って北海道・東北・九州の特定のエリアに偏在して分布している。発電のみならず、同時に熱供給源としても利用されており、地域の事業などにも貢献している。

3-1-1 ドライスチーム方式 およびフラッシュ型 発電

生産井からの噴出物が熱水を殆ど含まない蒸気であれば、簡単な湿分除去を行うのみで蒸気タービンに送って発電することが可能であり、これをドライスチーム（dry steam）式発電と呼ぶ。我が国最初の地熱発電である松川発電所はこの方式で、1966年以来現在も継続して発電している。井戸から主に熱水が得られ蒸気が少ない場合は、汽水分離器で汽水分離（フラッシュ）して水蒸気を蒸気タービンに導いて発電する。これをフラッシュ型発電という（図表8）。汽水分離器で蒸気を分離した後の熱水の圧力がまだ十分に高い場合には、2つ目の汽水分離器を設けて熱水を減圧し、更なる蒸気を発生させて蒸気タービンの中間段に

投入することにより、出力向上および地熱エネルギーの有効利用を図ったダブルフラッシュサイクル方式も一部で行われており、図表7に示す森および八丁原発電所にて採用されている。

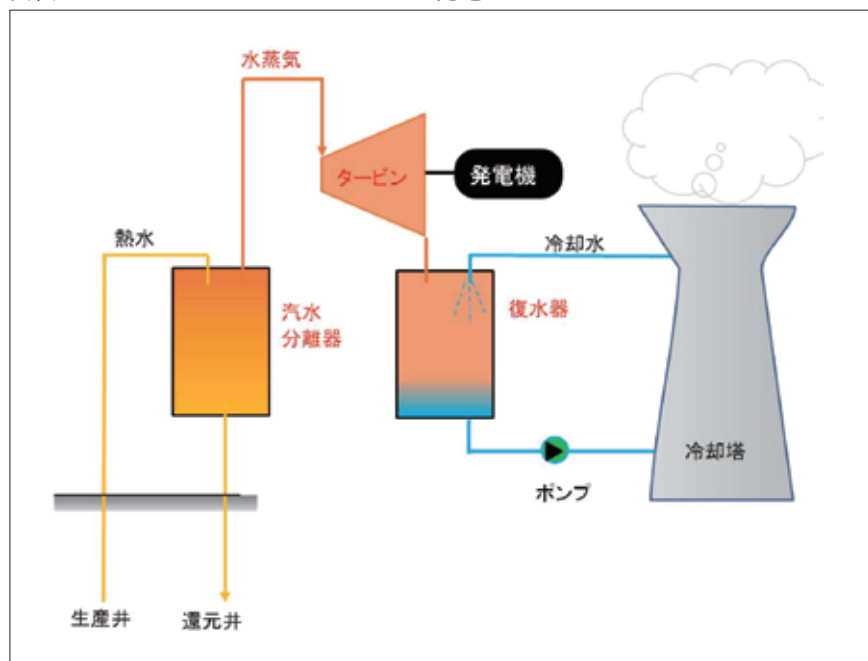
ドライスチームおよびフラッシュ発電は、単機の最大出力は140MW（ニュージーランド）で、集中型電源として用いられている発電方式であり、地熱発電の主流となっている。これらの発電方式は、主に熱水温度200℃以上の地点に適している。この大型発電に使用される地熱用タービンは、日本のメーカー3社（三菱重工、東芝、富士電機）が世界7割のシェアを占めている。地熱用のタービンや発電機は、地下からの様々な物質がそのままタービンに送られることもあり、通常の火力発電より過酷な環境にさらされる。通常は2年に1度のメンテナンスを必要としていたが、日本製の地熱タービンは静止部や回転部をコーティングすることで耐食性を向上させた。さらに湿分（水滴）を捕獲してタービンの外に排出する装置を適用するなどの改良により、今では6年間使い続けても問題な

図表7 地熱発電の現状（2010年11月現在）

所在地	発電名称	所在地	蒸気供給	発電	用途	定格出力	運転開始	地熱直接利用
北海道	森	北海道 亀田郡森町	北海道電力	北海道電力	一般電力	50MW	1982	農業用温室69軒
秋田県	澄川	秋田県 鹿角市	三菱 マテリアル	東北電力	一般電力	50MW	1995	
	大沼	秋田県 鹿角市	三菱 マテリアル	三菱 マテリアル	一般電力	9.5MW	1974	
	上の岱	秋田県 湯沢市	秋田地熱 エネルギー	東北電力	一般電力	28.8MW	1994	くりこまフーズ(食品工業)、皆瀬温水プール、秋の宮温水プール
岩手県	松川	岩手県 八幡平市	東北水力地熱	東北電力	一般電力	23.5MW	1966	八幡平地熱蒸気染色工房、700軒近い宿泊施設、別荘、保養所、商店、温浴施設に暖房・給湯熱供給、農業用温室95軒
	葛根田1号	岩手県岩手 郡雫石町	東北水力地熱	東北電力	一般電力	50MW	1978	岩手県営屋内温水プール 〔愛称：ホットスイム〕
	葛根田2号	岩手県岩手 郡雫石町	東北水力地熱	東北電力	一般電力	30MW	1996	
宮城県	鬼首	宮城県 大崎市	電源開発	電源開発	一般電力	15MW	1975	鳴子熱帯植物園
福島県	柳津西山	福島県河沼 郡柳津町	奥会津地熱	東北電力	一般電力	65MW	1995	
東京都	八丈島	東京都 八丈町	東京電力	東京電力	一般電力	3.3MW	1999	農業用温室、混浴施設
大分県	杉乃井 ホテル	大分県 別府市	杉乃井ホテル	杉乃井ホテル	自家用 電力	1.9MW	1981	温泉利用、冷暖房、給湯・調理
	大岳	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	12.5MW	1967	
	八丁原1号	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	55MW	1977	
	八丁原2号	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	55MW	1990	
	八丁原バ イナリー	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	2MW	2006	
	滝上	大分県玖珠 郡九重町	出光大分地熱	九州電力	一般電力	27.5MW	1996	民家40戸への給湯
	九重	大分県玖珠 郡九重町	九重観光 ホテル	九重観光 ホテル	自家用 電力	0.99MW	1998	温泉利用、暖房、給湯
鹿児島県	大霧	鹿児島県 霧島市	日鉄 鹿児島地熱	九州電力	一般電力	30MW	1996	
	霧島国際 ホテル	鹿児島県 霧島市	大和紡観光霧 島国際ホテル	大和紡観光霧 島国際ホテル	自家用 電力	0.1MW	1984	温泉利用、冷暖房
	山川	鹿児島県 指宿市	九州電力	九州電力	一般電力	30MW	1995	
8都道県	17地点		13社	9社		540.09MW		

参考文献²³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表8 ドライスチーム / フラッシュ型発電



科学技術動向研究センターにて作成

いほど安定的に運転できるような高度の品質を具えており、こうしたことがシェア拡大の理由となっている。

3-1-2 バイナリー発電

蒸気タービンは一般的に水蒸気で回転するが、水蒸気の代わりに水より沸点の低い物質、例えば炭化水素に熱を与えて蒸発させ、圧力をもった低沸点物質の蒸気で駆動する発電システムをバイナリー（サイクル）発電とよぶ。本方式では、水蒸気駆動では利用できない150～200℃未満の熱源でも発電が可能であり、その概要を図表9に示す。

近年、世界では本方式が急増し

ている。この発電方式ではイスラエルのOrmat社が世界のトップシェアで、九州電力(株)八丁原発電所(110 MW)では、出力の衰えた既設生産井を利用して、出力2 MWのバイナリー発電設備を2006年に導入した。タービンを駆動する作動流体にはノルマルペンタン(沸点:36°C)が用いられている。また、水とアンモニアの混合物を作動流体とするカーリーナサイクル発電は、バイナリー発電の一種であり、さらに低温(100°C未満)の熱源でも発電が可能である。

バイナリー発電はRPS法^{注1)}上の新エネルギーの1つとして認定された。フラッシュ発電のような高温熱源を必要としないため、フラッシュタイプと比較すると設置可能な場所が多く、我が国でも今後増加が見込まれる。

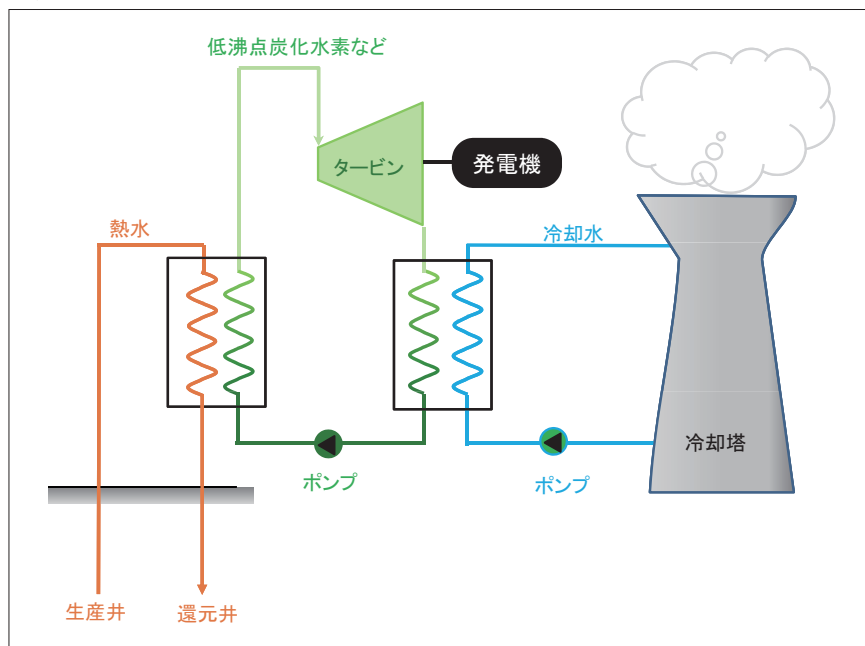
3-1-3 温泉発電

既存の温泉熱を温浴に適する温度にまで下げる際に、これまで利用せずに放熱していた熱を利用してカーリーナサイクル発電すれば、約722 MWの発電が可能との試算がある²⁴⁾。これは前述のバイナリー発電の一種であるが、俗に温泉発電と呼ばれ、新たな井戸を掘ることなく、現有の温泉の熱を利用して容易に新たに発電ができることが特長である。温泉発電は、現有の地熱発電容量に加えた発電ポテンシャルを有すると期待されている。図表10にその概要を示す。

3-1-4 高温岩体発電

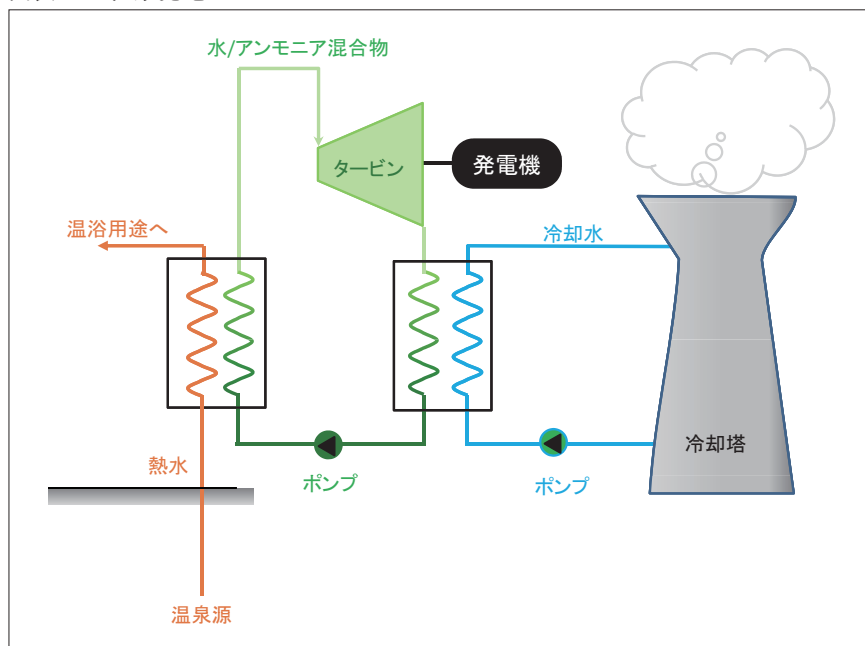
高温岩体発電(Enhanced Geothermal System: EGS)とは、図表11に示すように、地下にある高温の岩体に地上から水を投入して、人工的に蒸気や熱水を発生させ、これを地上に回収することでタービンを回す発電方式である。

図表9 バイナリー発電



科学技術動向研究センターにて作成

図表10 温泉発電



科学技術動向研究センターにて作成

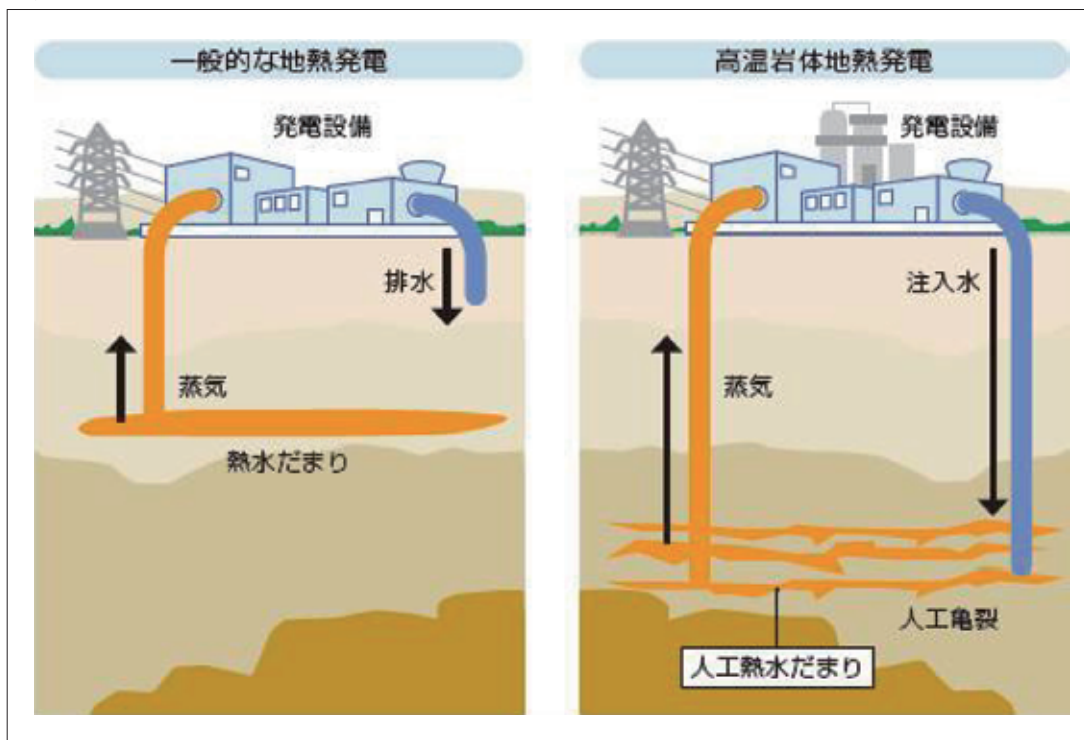
高温岩体発電は天然の蒸気や熱水が得られない場所をターゲットとした次世代技術である。この方式では、地下の高温岩体に水が通るための亀裂を人工的に発生させること、地中に高压水を注入し熱水や蒸気を回収することが重要な技術である。

我が国では、(財)電力中央研究

所が秋田県雄勝で、NEDOが山形県肘折で高温岩体熱の回収試験を実施したことがある。後者では約2年間にわたる熱水回収循環試験と約3か月間の50 kWの発電試験が行われた。いずれも2002年度で終了し、その後は継続した試験は行われていない²⁵⁾。

注1 Renewables Portfolio Standard。新エネルギー等の普及を目的に、電気事業者に対して毎年その販売電力量に応じた一定割合以上の新エネルギー等から発電される電気の利用を義務付けた制度。

図表 11 高温岩体発電



出典：参考文献⁴⁸⁾

3-2

「熱」としての利用

我が国では、家庭で使用されるエネルギーの半分以上は、給湯や暖房などの熱を発生させるために使用されている。また、図表 12 に示すように、産業でも広範囲の熱エネルギーの用途がある。

地熱エネルギーが持つ、他の再生可能エネルギーにない特色は、発電以外にも大量の熱エネルギーを地域に供給できることである。つまり、熱エネルギーを活用することでエネルギー資源の節減と地球温暖化防止が期待できることが大きな特徴である。

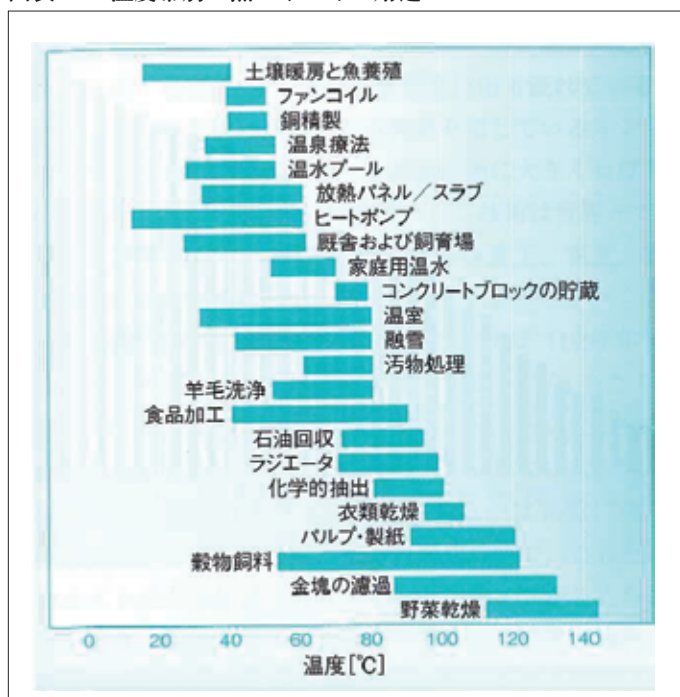
温度の高い地熱資源ほど利用可能な用途が豊富であり、ある用途に用いて温度が下がった熱水を、さらに他の用途に用いることができることから、熱効率のよいカスケード利用が可能となる。その他、フラッシュ発電の汽水分離で生じる還元井戸に戻す前の熱水も、清潔な水道水と熱交換して温水を製

造する熱源として利用できる。発電のみを考えると、熱力学的な原理から 120℃ 以下の熱水は熱エネルギーの 1 割以下しか電力に変換できないが、熱として利用すれば全エネルギー量を利用することができる。

最近、「地中熱」を利用した冷

暖房の普及が世界各国で急速に進んでおり、我が国でもすでに多くの場所で実用化されている。この場合、熱水を取り出すための井戸を掘るのではなく、例えば熱交換杭を埋め込むなどの簡易な工法だけで熱利用が可能である。例えば、最近では東京スカイツリーを核と

図表 12 温度帯別の熱エネルギー用途



出典：参考文献⁸⁾

する大型商業施設でも地中熱利用システムが採用された。ここでは年間総合エネルギー効率 (COP) が、国内の地域熱供給 (DHC) 最高レベルの 1.3 以上になると想定されている²⁶⁾。

地中熱利用は、熱水利用と異なり完全な CO₂ フリーとはいえない

いが、省エネ効果は大きい。日本で普及が進んだ場合のメリットとして、ヒートアイランド現象の緩和や寒冷地での火力暖房の削減による電力消費および CO₂ 排出量の削減、真夏のピーク電力の引き下げと夜間電力の利用による電力消費の平滑化などが挙げられる。

このように、地熱はその地域事情に応じた発電源として、また天候や気象条件に左右されない熱供給源としてエネルギーシステムを構築でき、しかもほとんど化石燃料に依存しないという特徴を有する。

4 地熱利用に関する海外の状況

我が国とは対照的に、世界全体の地熱発電は、1995 年から 2005 年までの 10 年間で急速に伸び、約 3 割も増大した。国別では再生エネルギーを連邦政府・州が支援する米国をはじめ、アイスランド、フィリピン、インドネシアの伸びが著しい。

地中熱ヒートポンプの普及は、米国、スウェーデンで進んでおり、最近では中国でも増加している。

4-1

米国

米国ではエネルギー・環境政策の基本理念の一つとして、「クリーンエネルギー産業での将来の雇用に対する投資」が掲げられている。クリーンエネルギー産業を育成し、環境対策事業に対して最大 23 億ドルの税優遇を行うことで、17,000 人分の雇用創出を見込んでいる²⁷⁾。

現在、エネルギー省 (DOE) を中心として、地熱開発への投資が各方面で盛んである。2009 年の経済再生投資法 (ARR) により、地熱発電の開発実証に 350 百万 US ドル、地中熱ヒートポンプに 50 百万 US ドルの財政があてら

れた²⁸⁾。具体的な施策として、総合データベース (NGDS) を整備して地熱資源データおよび評価、技術情報、研究の成功/失敗情報、政策情報等あらゆる情報をまとめることにより、地熱開発事業者の失敗リスクを低減するように努めている。さらに、DOE 内の電力局が協働して地熱発電所へのアクセス送電線の整備が図られている。

2008 年にスタートした産学官協働の地熱技術プログラム (The Geothermal Technologies Program : GTP) は、2020 年ないし 2030 年までの地熱発電の「普及」と「発電コストの低減」をミッションとしている。ここでは、次の 5 項目に焦点を当てたプロジェクトが現在進行中である²⁹⁾。中でも、National Renewable Energy Lab (NREL) の試算によって全米で発電出力 16,000 GW のポテンシャルがあるとされる、高温岩体発電の開発に特に注力している。

- ・高温岩体発電
- ・熱水型地熱発電
- ・低温地熱資源
- ・戦略的計画策定、システム分析と地熱関連情報
- ・技術評価

一例として、2008 年には、google が EGS 技術に取り組む米 AltaRock

Energy (625 万ドル) と米 Potter Drilling (400 万ドル)、そして北米における地熱エネルギー資源のマッピングなどに取り組むサン・メソジスト大学の地熱研究所 (48 万 9521 ドル) などのベンチャー企業等に 1000 万ドルを出資しており、現在も研究開発が継続している³⁰⁾。

4-2

インドネシア

インドネシアでは日本同様に地熱ポテンシャルが大きいにもかかわらず、地熱発電の利用率は約 4.5%、資源量の 3% にも満たなかった。しかし、2003 年、インドネシア政府は地熱法を制定し地熱発電ロードマップを作成した。それによると、2025 年までに地熱の発電設備容量を現在の約 8 倍の約 1 GW (1 次エネルギーの 5%) に拡大する計画である。この計画達成には民間資金を募る IPP^{注2)} の推進が欠かせないため、年内に円借款 100 億円を含め総額 200 億円規模での地熱の試掘基金を設立する予定とされている。日本の JICA や JBIC、コンサルタント企業、商社などが資金や技術協

注2 Independent Power Producer の略で、独立系発電事業のことで「卸電力事業」とも呼ばれる。1995 年の電気事業法改正で、一般事業者が電力会社へ電力の卸供給を行うことが認められた。

力して開発を行うことになっている³¹⁾。インドネシアは日本のような自然公園法が存在しないことから、地熱開発は日本よりは容易に進むと見込まれている。石油・天然ガス・石炭などの化石資源が豊富な国にも関わらず、地熱開発にも取り組んでいることが興味深い。

4-3

アイスランド

アイスランドは人口約32万人の国である。1930年代、アイスランドの首都レイキャビクでは、石炭発電でスモッグに悩まされて石油へ転換していったが、1970年代の石油ショックで政策の見直しを迫られ、地熱の導入が盛んとなった。地熱は地域暖房への使用が先に進展し、現在では人口の9割近くが暖房を地熱に依存している。地熱は熱源としての利用が主体で、発電は地熱の余剰利用として位置づけられている。同国は水力や地熱といった再生可能エネルギーに恵まれており、2009年には一次エネルギーの85%が再生可能エネルギーでまかなわれ、また、電力は100%を再生可能エネルギー（約30%地熱、70%水力）で供給している³²⁾。注目すべきは、この再生可能エネルギー100%の電力を利用して、元来、漁業以外の産業に乏しかったこの国に、多国籍企業のアルミ精錬工場が進出し、国内電力の7割を消費していることである。この国のクリーンな電力は、アルミニウムという形をとって、アイスランドから海外へ輸出されていることになる。また、スヴァルスエインギ地熱発電所では、発電用に汲み上げた地熱海水を利用して、世界最大の露天温泉ブルーラグーンが運営されており、市民への福祉施設として利用されている。

4-4

ドイツ

再生可能エネルギーの導入に意欲的なドイツは、地熱利用も積極的に推進している。ドイツ連邦政府は、2020年までに現在の40倍となる約280 MWの地熱発電設備の導入を予測している。これは、年間1.8 TWh分の発電量に相当する。熱供給では、2020年までに地熱発電所からの熱併給で3.4 TWh分、発電を行わない熱供給専用の地熱設備の熱で4.8 TWh分、計8.2 TWh分が深層地熱により供給できるようになると見込まれている。さらに、2030年までに850 MW分の発電設備の導入を予測している³³⁾。

現在、地熱発電所は3ヶ所、発電を伴わない深層地熱による熱供給設備は167か所に達する。その例として、ミュンヘンの南ラングウとウンターハーヒングで、熱水を用いたバイナリー発電を行っている。それぞれ深度3.3-3.4 km程度から120℃程度の熱水を回収するというもので、火山性熱水系がなく他国の地熱発電所に比べ条件が悪いにもかかわらず、こうした発電が行われている点に本腰を入れた開発意欲が感じられる³⁴⁾。ミュンヘンの北のエルディンクでは、1999年に地熱エネルギーの総合利用施設が開設された。本施設では、深さ2300 mの井戸より65℃の温湯が80 t/h供給され、そこから熱交換器およびヒートポンプにより約100℃の熱水を得ている。この熱水は地域暖房と工業に利用され、一方、熱交換およびヒートポンプにより冷却された地下水は人工温泉と飲料水に利用されている。このように地下から得られた熱および水資源を全て有効に利用している³⁵⁾。

ドイツは、こうした地熱発電事

業を推進するために、地熱プロジェクトの条件を優遇し関連するリスクを削減する施策を取っている。2009年1月に施行された改正再生可能エネルギー法では、地熱発電の買い取り補償価格を引き上げ、さらに特別ボーナスを導入した。このように固定価格買取制度などの施策は、効果を発揮している。例えば、10 MW以下の地熱発電所を2009年に新設した場合、1 kWhあたりの固定買取価格は法改正前の14ユーロセントから16ユーロセントに引き上げられ、2015年までの期間限定で新設ボーナス4ユーロセントが加算される。熱併給を行う場合はさらに3ユーロセントが加算される。一方で新設年度による固定買取価格は毎年1ユーロセントずつ減額される。この制度によって、早期の新設設備ほど手厚く事業者に資金が還流され、深度3 km以上も掘削しても採算が合う試算になる。また、2009年1月に導入された「再生可能エネルギー熱法」により、新築の建物への再生可能熱の導入が義務化されたことも、地熱利用を促進する要因になっている³³⁾。

ドイツ連邦環境省は、地熱プロジェクトに対する融資プログラムとして、深層地熱のボーリングへの融資として6000万ユーロを用意し、特に採掘のリスクを削減している。ドイツ復興金融公庫は、商業銀行を通じて深い地中へのボーリング事業に対して貸付を行っており、貸付額は採掘に必要な費用の最大80%までで熱水脈が採掘できないことが確認されると、投資家はその時点から残りの返済が免除される³⁶⁾。継続して研究開発助成も行われており、技術的にも地学的リスクの低減が図られている。ドイツではこのように国策として地熱開発が積極的に進められている。

4-5

オーストラリア

オーストラリアも、再生可能エネルギー普及促進政策を進めている国であり、2020年までに少なくとも360億AUDの新規投資を予定している。電気料金に対する現在の税制補助と連邦政府の

小規模再生可能エネルギー計画(SRES)により、再生可能エネルギーの普及を加速させる見込みである。

2010年には、オーストラリアのジオダイナミクス社が大規模な高温岩体地熱発電プラントの建設を進めている。クーパー盆地では40社を超えるベンチャー企業が地熱発電の開発を進めている。火山国ではないオーストラリアで

は、蒸気や熱水を取り出すために従来の2倍、地下4,000mを超える深さの井戸を掘っている。すでに多くの企業や個人が地熱発電に投資している。エネルギー資源が豊富な国であっても、再生可能エネルギーへの投資が増加していることは、温室効果ガス削減への積極な取り組みによるものと考えられる³⁷⁾。

5 我が国の地熱エネルギーの利用拡大に向けて

5-1

我が国における地熱発電のポテンシャル

我が国の地熱発電は、他の再生可能エネルギーに比べても、あるいは海外諸国の地熱発電と比較しても対照的に伸び悩んできた。2章で述べたように、大型地熱発電施設のサイト調査や建設に時間がかかることや、国立公園内には着手できないこともその原因である。しかし、その間にバイナリー発電などの小型地熱技術や掘削技術が進歩したことは、我が国固有の問題の解決の一助にはなりうる。NEDOによる地熱資源マップも整備され、以前よりも開発リスクが低減されている。

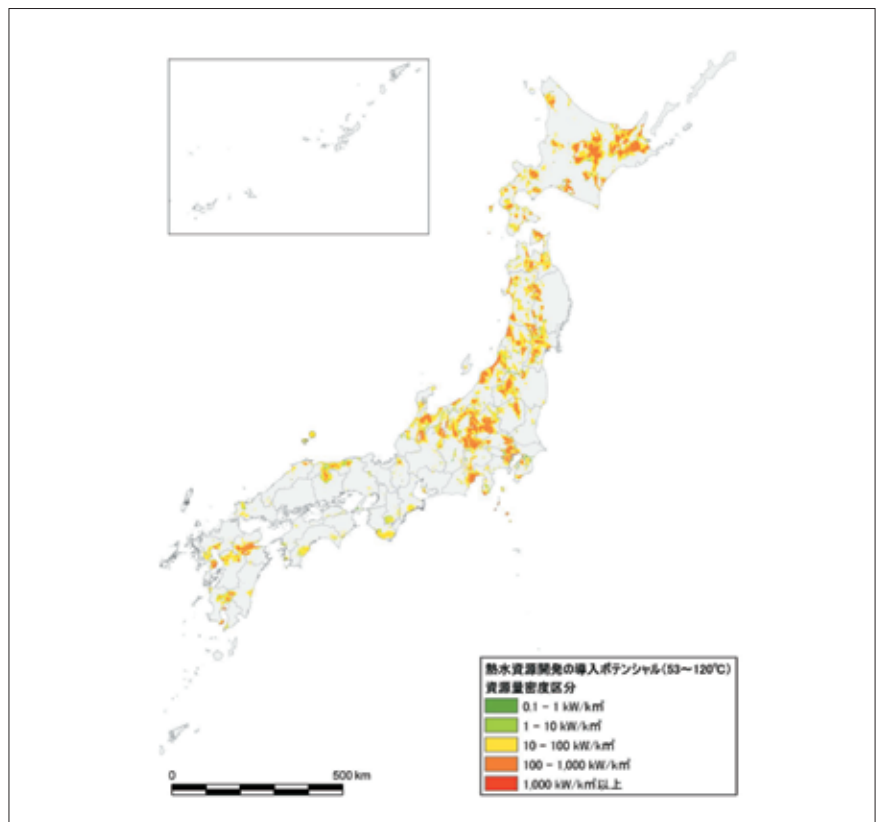
また、バイナリー発電技術の進歩と呼応して、従来は対象外と考えられてきた150℃以下の地熱資源を含めた分布調査データが産総研等によって整備されてきている。例えば、環境省がカーリーナサイクル発電に適すると位置付けている53~120℃の地熱資源は、図表13に示すように、自然公園から離れた地域、例えば東京近郊にも存在する。また環境省は、熱水温度53~120℃ではカーリーナサ

イクル発電、120~150℃では他のバイナリー発電が可能とみて発電出力の試算を行い、53℃~150℃の全国の地熱賦存量を合計約9.6GWと見積もった³⁸⁾。これは、2章で述べた資源量(発電出力23,470MW分)とは別のものである。

前述のとおり、150℃以上の熱水資源23,470MW分の大部分は

国立公園内のもので利用が難しかった。しかし、公園の規制区域外から斜めに掘削して、自然公園直下の熱水を取り出す技術(傾斜ボーリング法)が進み、発電設備の大部分を区域外に設置しつつ区域内の地熱資源を利用できる見通しがついてきた。環境省によれば150℃以上の熱水資源のうち、地熱開発ポテンシャルは、この国立

図表13 53~120℃の熱水資源開発の導入ポテンシャルの分布図



出典：参考文献³²⁾

公園内に向けた傾斜ボーリング法によって、国立公園外の場合の2.2GW分から3倍近くあたる6.4GW分に増加すると見込んでいる。

5-2

地域イノベーションに寄与するポテンシャル

5-2-1 地元への熱供給による低炭素社会の構築

地熱エネルギーがもつ、他の再生可能エネルギーにない特色は、発電以外に再生可能な大量の熱を地域にもたらすことである。図表12に示したように、主に軽工業や農業等、民生用ではいろいろな温度帯ごとの熱需要があるが、熱を発生させるためにこれまでは主に重油・灯油やガスなどの化石エネルギーを用いてきた。家庭でも消費エネルギーの50%以上が冷暖房や給湯など“熱”を作ることにより費やされている^{39,40)}。持続可能な低炭素社会構築を目指す際には、熱を再生可能エネルギー由来に代替していくことは、電力を再生可能エネルギー由来にすること以上にインパクトが大きい。地熱エネルギーの導入は低炭素社会構築への大きな寄与が見込まれる。地域の特性に合った地熱発電方式を導入し、熱を最大限有効活用することによって、エネルギーの地産地消が図られる。

新成長戦略では、2020年までに再生可能エネルギーの国内一次エネルギー供給に占める比率を10%に引き上げることを目標として掲げている。図表14に示すようにすでに地域レベルでは再生可能エネルギーだけでエネルギー自給率100%以上を達成している地域もある。ただし、これは電力、熱、動力などのエネルギー需給を

一次エネルギー換算した算術上の収支である。地熱資源のある地域は、電力と熱が同時に自前で供給できるので、算術上だけではなく、現実の意味でもエネルギー的に自立できる可能性もある。

5-2-2 地元産業の活性化

国の安全保障やカーボンフットプリントの観点から、エネルギーや食料はできる限り地産地消が望まれる。地熱を利活用することはエネルギーの持続可能なローカルコミュニティを目指すことにつながる。

近年、エコツーリズム⁴²⁾が注目されている。これは、観光客にその土地の資源を伝えることによって、地域の住民が自分たちの資源の価値を再認識するというものである。地域観光のオリジナリティが高まり、地域を経済的に活性化させるだけでなく、一連の取り組みによって地域社会そのものが活気づいていく。つまり、地域固有の魅力を見直すことで、地元自信と誇りを持つ生き生きとした地域に変化し、より活力ある持続的発展できる地域を目指すことができる。

日本最古の松川地熱発電所では、1966年の運用開始以来、地熱蒸気の一部を地元温泉旅館に暖房用として供給している。1971年には蒸気凝縮水を加温して八幡平温泉開発(株)(現八幡平市産業振興(株))に70℃、60t/hの温水を有償で供給し、東八幡平温泉郷の別荘・ホテルおよび観光施設への分湯を開始し

た。そして温泉郷その他における温水需要が大幅に増加する見込みがあるとして、1981年にはさらに200t/h増湯された。このような経緯を経て、現在は東北水力地熱(株)が70℃、最大260t/hの温水を有償で提供している。温水の供給先はホテル・旅館・民宿・ペンション合わせて38軒、保養所25軒、別荘613軒、商店15軒、貸別荘施設・病院・老人ホーム・日帰り温泉施設各1ずつ、農業用ハウス95棟(冬季のみ)である。(図表7参照)⁴³⁾。

また、北海道の音更町では、温泉の熱と氷雪の冷熱の双方を利用して宮崎種のマンゴーを温室栽培し、端境期に収穫している⁴⁴⁾。

このように、日本では余剰の温泉湯を用いた試験的な段階が続いているが、他の地域でも地熱発電とともに大量の熱資源が供給可能になれば、エネルギーの地産地消だけでなく、大規模な新規産業も育成できる可能性がある。

新規の地熱発電所の導入が停滞している中で、事業者の掘削リスクを低減するような資源調査データの整備や小出力地熱発電の実証事業などが継続して行われてきたことは重要である。しかし今後は、このようなボトムアップ型の施策に加え、地域イノベーションを奨

図表14 エネルギー自給率の高い地域(上位10地域)

県	地域名	自給率%	主要電源
福島県	河沼郡柳町	3290	地熱
大分県	玖珠郡九重町	2123	地熱
群馬県	吾妻郡六合村	1333	小水力
青森県	下北郡東通村	1269	風力
熊本県	球磨郡五木村	907	小水力
宮崎県	児湯郡西米良村	774	小水力
長野県	下水内郡栄村	759	小水力
山梨県	南巨摩郡早川町	717	小水力
岩手県	岩手郡雫石町	709	地熱
北海道	苫前郡苫前町	702	風力

出典：参考文献⁴¹⁾

算出方法について

自給率 = その区域での再生可能エネルギー供給量 / その区域の民生・農水用エネルギー需要量

5-3

ライフ・イノベーションの
ポテンシャル

励するトップダウン型施策として地熱発電を活用することが有効であろう。地域が競って地熱発電を核とした持続的な地域総合イノベーション計画全体を策定し、他の模範となるような好事例をモデル地点として、重点的に財政支援や規制緩和と特区認定を行うというような形が望ましい⁴⁵⁾。

地熱発電は運転開始後も随時適切な維持管理が必要であり、定常的な雇用が必要となる。定期点検や機器の修繕・更新工事、新たな井戸の掘削工事等が行われる際には、より多くの動員がある。こうしたことを人材の雇用機会とみなせば、地元の雇用対策にも寄与できる。これに加えて、新規産業の育成を加えれば、さらに雇用創出の規模は大きくなる。

地熱資源が存在する場所には、温泉も存在することが多いことから、地球温暖化について考えるだけでなく、健康を意識した取り組みもセットで考えることができる。こうした取り組みをすることによって、ビジネス客や観光客などの交流人口が生ずる。たとえば、九州で地熱発電設備をもつホテルでは、その見学のために訪れる宿泊客が増大したとの報告がある⁴³⁾。

また、2011年に開業した鹿児島県指宿市にあるがん治療の医療センター⁴⁶⁾では、粒子線治療に使用する約1.5 MW級の電力をバ

イナリー発電によって賄う計画で、2007年よりNEDOによる地熱開発促進調査が実施された⁴⁷⁾。その結果、可能性としては高いものの、再生可能エネルギーの全量買取制度の固定買取価格が20円/kWh以上にならないと採算が合わないことから、実用化には至っていない。指宿では地熱導入に理解いただけるように地元との話し合いを積極的にもち、発電の仕組みや井戸の調査結果を地元で公開して、温泉への影響がないことを科学的に調査して、温泉と地熱の共存共栄を模索している。

こうした取組は、グリーンとライフ、双方のイノベーションにポテンシャルを持つことから、特に高齢化社会が懸念される我が国では、ビジネスモデルとして確立し、多くの地域で推進されることが望まれる。

6 まとめと提言

再生可能エネルギーの一つである地熱は、発電に換算した資源量は約23 GW分現在の日本国内一般電気事業者の電源容量の約1割以上と見積もられており、世界第3位を誇り、数少ない我が国固有の資源である。しかし、現役最古でもある1966年の松川発電所運転開始以来、40年余りの間に、導入された総発電出力は540 MWで、資源量の0.3%未満にとどまっている。これは、近年、米国、アイスランド、フィリピン、インドネシア、イタリアなどで急激に導入が進んでいるのとは対照的である。日本での地熱発電の普及が進まなかった要因には、数年前までは原油価格が安かったことや、景気の低迷などがある。しかし、主な要因は適地の多くが自然公園内にあり、行政・温泉事業者・地権者などとの調整が多大なこと、環境影響評価等その他の手続きが多

いこと等にあった。さらにそれらの問題が複合して事業開始から収益が得られ始めるまでのリードタイムが一般に10年といわれるように非常に長く試算されていたことから、企業は投資に踏み切れない結果となっている。しかし、太陽光や風力を利用した発電とは違い、地熱は天候の影響を受けず、安定供給が見込まれ、ひいてはエネルギーの自給率向上とCO₂の排出削減のポテンシャルを有している。

地熱エネルギーは、他の再生可能エネルギー以上に、発電と発電以外の複数の便益で幅広く地域貢献できるポテンシャルがある。地熱は再生可能なエネルギー源となるだけでなく、熱供給源として、また工事受注、観光客や保養者の増加、特産品の生産、固定資産税など、直接・間接の要因を通じて地域住民の新たな雇用機会をもた

らし、交流人口を増大させ、その結果経済効果に大きく寄与することが期待できる。つまり、地域イノベーションを活性化するプラットフォームの1つとして、地熱は大きいポテンシャルを有する。これは、新成長戦略の中に掲げられた観光立国・地域活性化に通ずるものである。

大規模集中型の地熱発電ももちろん重要であるが、建設に長い年月を要する。特にこれを震災復興に生かすという点では、バイナリー発電や温泉発電など、比較的短期間で実施できるものを手始めに地熱を利用することが望まれる。長期的には、熱水資源の乏しい場所でも適用が期待される高温岩体発電の実用化に向けた施策も重要である。それには、以下のような施策や改善が望まれる。

(1) 関係法律の改定

環境省は、自然公園法と温泉法のあり方について検討する専門家組織「地熱発電事業に係る自然環境検討会」と「地熱発電事業に係る温泉・地下水への影響検討会」を設置し、温泉法の運用基準を見直し、規制の再検討を開始した。国内で地熱開発によって温泉資源が枯渇した事例はない⁴³⁾。温泉に影響を与える懸念については、科学的根拠に基づいた地域への理解促進が必要となる。

(2) 環境アセスメントの短期化

発電出力 10 MW 以上の地熱発電所を新規に設置するには環境アセスメントが必要となるが、現状では少なくとも 3 年以上を要しており、地熱発電が実施されるまで 10 年以上もの年月がかかる。海外の事例を参考に、短期間で評価が完了するような仕組みに改善することが望まれる。

(3) 技術開発支援

地熱開発には、地質・地球化学・環境アセスメント・シミュレーションなどの知識と技術が必要である。中でも、地熱発電には、地熱貯留層の存在を探索する技術の進展が不可欠である。地震観測技術を応用した地熱資源をより確実に掘り当てる技術が開発されてきている。我が国では地震に関する研究開発が盛んであるが、こうした知見は地熱開発拡大にも利用できる可能性がある。2-2-2 で述べたとおり、地熱開発では掘削に係る費用とリスクが大きい。これらの技術開発は、結果的に民間事

業者のリスク負担の低減に寄与することにつながるため、技術開発を推進することが望まれる。また、地下構造を事前に少しでも詳細に知り、掘削のリスクを下げるための地下探査を国が主導して行うことも有効である。

熱水に含まれる不純物が析出して配管や熱交換器を閉塞する「スケール」の問題は、運転阻害や性能低下の原因になる。既設の発電所では適切なメンテナンスにより運転信頼性が確保されているが、その除去に多額の経費を要していることから、スケールの付着防止あるいは低コストの除去技術が求められる⁴⁶⁾。これらも、事業者が共通して抱えている課題であり、技術開発を通じた公的な立場からの支援が望まれる。

その他、高温岩体技術の実用化に向けた技術開発や資源探索バイナリー発電機の改良なども重要であることから、上記の施策と並行した技術開発の推進が望まれる。

(4) 熱のマネジメント

5-2-2 で述べたように、地熱開発を単独でとらえるのではなく、地熱発電を核とした総合的な地域未来設計を行い、国が支援するようなモデル開発ができないか検討すべきである。地熱発電所から周辺地域への熱の融通は、前述したような形ですでに多くの地点で行われている。しかし、それは発電所受入の条件として地域が事業者から得た利益のようなもので、新設の温室農業や温浴施設などに利用されているものの、地域社会全体のエネルギー構造を持続可能なも

のに変革するほどには至っていない。例えば電力を域外へ供給しているものの、一方では灯油を焚いて暖をとるようなことが行われている。今後の持続可能な社会づくりのためには、地熱の熱エネルギーを産業や生活と合わせて総合的にマネジメントすることが欠かせない⁴⁹⁾。地域共生策の枠組みは既存の制度がある⁵⁰⁾ が、今後は地域が総合的な地域未来設計を行い、国が支援するしくみが求められる。

(5) 地熱開発に対する補助

2011 年 8 月に、再生可能エネルギー電気の固定価格買取を定めた「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が成立し、地熱発電の電力に対しても適用される見通しである。しかしこれは、発電を開始したあとのメリットであり、地熱発電特有のリードタイムが長くリスクの大きいという課題への効果は不透明である。

地熱開発では掘削に係る費用とリスクが大きいことが、民間事業者が参入意欲を低下させる要因の 1 つになっていることから、(3) の技術開発支援と並行して、個別の事業に対して適切なリスク軽減を図ることが必要である。この場合、4-4 で述べたドイツの事例のように、多額の資金の必要な掘削段階で融資したり、掘削が失敗した場合の損害を補てんしたりするような方策も参考になると思われる。2009 年に補助金制度が復活したことで急伸した太陽光発電の例もある通り、地熱開発には補助金は必須であると考えられる。

7 おわりに

東北・関東大震災を契機に、再生可能エネルギーが注目される中で、地熱発電への関心も高まっ

ている。2011 年 7 月には、複数の民間会社が、2017 年を目標に、東北地方で大型地熱発電所の建設

計画を表明した。この度の大震災からの復興を目指す東北地方は、折しも地熱資源に恵まれたエ

リアであり、また比較的寒冷的な気候であるために、持続可能な熱の供給は温暖な地域よりも恩恵が大きい。震災が起きた日は東北地方では雪がちらつく寒い日であったことから、暖をとることにエネルギーが必要であった。発電だけではなく、熱を直接供給できる地熱を活用することは、被災地を含めて地球温暖化対策と人々の暮らしに大きく貢献するに違いない。

謝辞

本稿を執筆するに際して多くの情報提供とディスカッションをしてくださった、九州大学工学研究院 地球資源システム工学部門部 糸井龍一教授ならびに藤井光准教授、(独)産業総合研究所地熱資源研究グループ安川香澄博士、弘前大学北日本新エネルギー研究所所長神本正行教授ならびに村岡洋文教授、地熱エンジニアリング(株)

梶原竜哉博士、湯沢地熱(株)社長 中西繁隆氏、三菱重工(株)エネルギー・環境事業統括戦力室秋葉俊哉氏、アイスランド大使館長谷川明子氏、(株)新日本科学社長永田良一氏ならびに施設企画部高瀬和夫氏、メディポリス医学研究財団がん粒子線治療研究センター事務次長木場積穂氏ならびに永山伸一博士に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 「日本再生のために向けて」：http://www.npu.go.jp/policy/policy04/pdf/20110805/20110805_2.pdf
- 2) エネルギー・環境会議：http://www.npu.go.jp/policy/policy09/archive01_01.html
- 3) 革新的エネルギー・環境戦略：<http://www.npu.go.jp/policy/policy04/pdf/20110607/siryoul.pdf>
- 4) 金間大介、河本 洋「高額率を目指す太陽電池セルの研究開発動向」、科学技術動向 2008 年 1 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 5) 川喜多 仁、「色素増感太陽電池の研究開発動向」、科学技術動向 2009 年 12 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 6) 井上素行、白石 栄一「再生可能エネルギーとしての新たな時代の水力」、科学技術動向 2010 年 3 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 7) 「石炭火力発電での木質バイオマス混焼を加速展開」、p7、科学技術動向 2010 年 5 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 8) 江原、「地熱発電とは何か」、p.27、OHM2011・JUL
- 9) 地熱エンジニアリング(株)ホームページ：<http://www.geothermal.co.jp/index.htm>
- 10) 三菱マテリアル(株)ホームページ
- 11) 村岡洋文「再評価されつつある地熱開発ニーズに込めて」、AIST ホームページ：
<http://unit.aist.go.jp/georesenv/result/green-report/report08/p13.pdf>
- 12) 浦島邦子、戸潤敏孔「温室効果ガス削減に貢献する電力技術」、科学技術動向 2008 年 9 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 13) 安川香澄、「頼れる安定電源、地熱発電」、月刊ビジネスアイ ENECO 2011 年 08 月号
- 14) Bertani, Geothermal Power Generation in the World 2005-2010 Update
- 15) 経済産業省、エネルギー白書 2008 年版 (2008)
- 16) NEDO 再生エネルギー白書
- 17) 今村栄一ら、「日本の発電技術のライフスタイル CO₂ 排出量評価—2009 年に得られたデータを用いた再推計」、(財)電力中央研究所報告書 Y09027
- 18) 地熱開発研究会報告書、地熱開発研究会、2008.6
- 19) 評価者のコメント、中小水力・地熱発電開発費等補助金：
<http://www.meti.go.jp/committee/notice/2010a/20100514002com10.pdf>
- 20) 平成 23 年度新エネルギー等導入加速化支援対策事業：http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/110810/110810_2.pdf
- 21) 平成 23 年度中小水力・地熱発電開発費補助金(地熱発電開発事業)に係る交付先決定について：
http://www.nepc.or.jp/topics/2011/0726_1.html
- 22) 地熱発電の経済性の検討：http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/189/640/8,0.pdf
- 23) 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門ホームページ：<http://unit.aist.go.jp/georesenv/geotherm/resourceJ.html>
- 24) 江原幸男ら、「2050 年自然エネルギービジョンにおける地熱エネルギーの貢献」、日本地熱学会誌 30 (3)、165-179、

2008-07-25

- 25) 電中研レビュー第49号、「未利用地熱資源の開発に向けて—高温岩体発電への取り組み—」
- 26) 東武鉄道ニュースリリース：<http://www.tokyo-skytreetown.jp/news/pdf/090217.pdf>
- 27) エネルギー白書2010：<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2010energyhtml/1-2-1.html>
- 28) 米国エネルギー省報告書“Federal Interagency Geothermal Activitis”、p9
- 29) Geothermal technologies program米国エネルギー省ホームページ：<http://www1.eere.energy.gov/geothermal/index.html>
- 30) Google ニュースアナウンスメント：http://www.google.com/intl/en/press/pressrel/20080117_googleorg.html
- 31) ウェキペディア：http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_power_in_Indonesia
- 32) Geothermal development and research in iceland, Orkustofnun アイスランド大使館提供資料
- 33) 報告書“Bericht der Bundesregierung über ein Konzept zur Förderung, Entwicklung und Markteinführung von geothermischer Stromerzeugung und Wärmernetzung”、ドイツ環境省
- 34) ドイツ地熱協会ホームページ：<http://www.geothermie.de/>
- 35) 企画調査研究、地球環境適応型地熱開発戦略：<http://niweb.kankyo.tohoku.ac.jp/pdf/gravure.pdf>
- 36) ドイツ環境省ホームページ：<http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/43252/4594/>
- 37) 「国内全土で開発可能 高温岩盤で蒸気を作る高温岩体地熱発電」、日経エコロジー 2010年7月
- 38) 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：
<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/chpt6.pdf>
- 39) 藤本博也、「住宅の省エネルギー化に貢献する高断熱技術」、科学技術動向、No.93、2008
- 40) でんきの情報広場：<http://www.fepc.or.jp/present/jigyuu/japan/index.html>
- 41) 「エネルギー永続地帯」試算結果の公表について、千葉大学公共研究センター、2007.7.9
- 42) エコツーリズム、環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/nature/ecotourism/try-ecotourism/about/index.html>
- 43) 地熱発電と温泉利用の共生を目指して（報告書）、2010.5、日本地熱学会
- 44) 十勝毎日新聞ホームページ：<http://www.hokkaido-nl.jp/detail.cgi?id=9992>
- 45) 展望地熱発電2030年、日本地熱開発企業協議会、2005.11
- 46) メディポリス医学研究財団ホームページ：<http://www.medipolis.org/m-rijicho.html>
- 47) NEDO ホームページ：<http://www.nedo.go.jp/content/100086605.pdf>
- 48) ECO Japan、日経エコロジー：<http://eco.nikkeibp.co.jp/article/special/20100721/104312/>
- 49) 新妻弘明、地球環境適応型地熱開発戦略、地熱エネルギー、2002.10
- 50) 地熱発電に関する研究会中間報告について、資源エネルギー庁電力基盤整備課、2009.8.5：
http://staff.aist.go.jp/toshi-tosha/geothermal/gate_day/presentation/METI1-Ito.pdf

執筆者プロフィール



浦島 邦子

グリーンイノベーションユニット
科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

工学博士。日本の電機メーカー、カナダ、アメリカ、フランスの大学、国立研究所、企業にてプラズマ技術を用いた環境汚染物質の処理ならびに除去技術の開発に従事後、2003年より現職。世界の環境とエネルギー全般に関する科学技術動向について主に調査中。



和田 潤

グリーンイノベーションユニット
科学技術動向研究センター 特別研究員
<http://www.nistep.go.jp/>

石炭の高度利用技術（クリーンコールテクノロジー）の開発に長年携わる。2010年7月より現職。グリーンイノベーション全般に関する科学技術や政策に関する調査研究を行っている。