

第 1 章

1

地熱資源開発の現状



第1章 地熱資源開発の現状 目次

我孫子研究所 地圏環境部 主任研究員 伊藤 久敏
我孫子研究所 地圏環境部 上席研究員 海江田秀志

1 - 1 従来型地熱発電と高温岩体発電	8
1 - 2 地熱利用のあゆみ	10
1 - 3 高温岩体発電から見た日本の地熱	12
コラム1：ガイザース地熱発電所の取り組み	14
コラム2：温泉と高温岩体発電	14
コラム3：地中熱利用ヒートポンプ	15



伊藤 久敏（1988年入所）
雄勝実験では、主にボーリングコアや坑壁画像を用いた天然の割れ目性状の調査を行ったほか、地表地質調査や岩石の年代測定を行い、地質構造や地熱源の評価を行った。今後は、オーストラリア高温岩体プロジェクトに協力するほか、年代測定技術を用いた地殻の長期安定性に関する検討などを行う予定である。



海江田秀志（1982年入所）
高温岩体発電技術の貯留層造成と貯留層評価に関する研究を主として担当してきた。現在、開発した技術の他分野への転用や、オーストラリアにおける大深度高温岩体発電実験への適用に取り組んでいる。

1-1 従来型地熱発電と高温岩体発電

火山国日本には我々が利用可能な地熱エネルギーが豊富に存在する。地熱は水力とともに再生可能な純国産の自然エネルギーであり、また、地球温暖化の元凶とされる二酸化炭素の排出量が少ないクリーンなエネルギーである(図1-1-1)⁽¹⁾⁽²⁾。ところが、現状では、地熱による発電は認可出力が約53万kWにとどまり、日本全体の全発電電力量の0.32%に過ぎない(図1-1-2)。これは、地熱開発には坑井掘削などでのリスクが高いこと、化石燃料による発電に比べてコスト高であること、開発可能地域が国立公園などの規制のため限られること、などの問題があるためである⁽³⁾。

仮にこれらの制約が克服されたとしても、従来型地熱発電方式では、天然に局在する地熱貯留層を利用しているため、今後大規模に開発される可能性は小さい(図1-1-3)。しかし、地下は深部ほど高温であり、深度5km以浅で200℃を超える、いわゆる高温岩体は世界的にも広く存在する。火山国である日本では特に高温岩体の分布は広い。高温岩体の開発は一般には透水性の低い岩盤を対象とするため、熱を運ぶ媒体である水を用いて効率よく抽熱できるように岩盤内に割れ目を人工的に造成する必要があり、ここに高温岩体発電技術が必要となってくる。

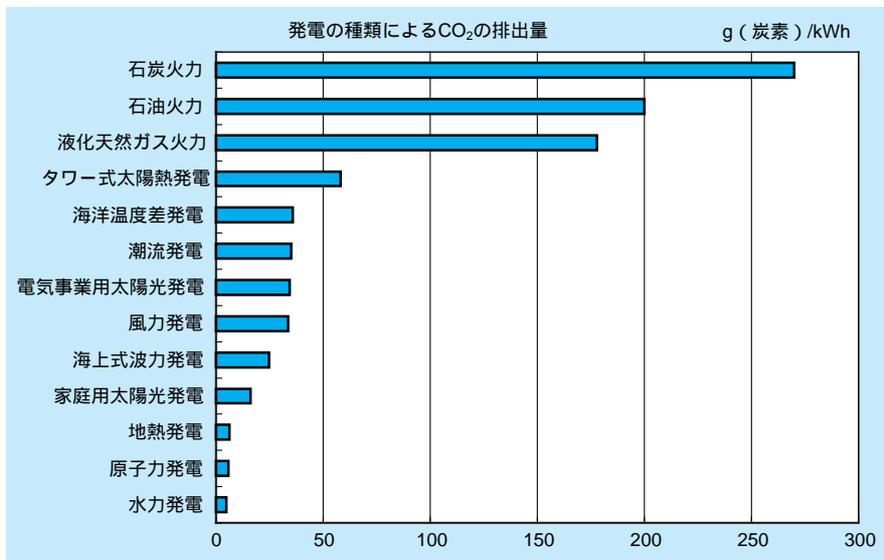


図1-1-1 発電の種類によるCO₂の排出量 (内山 (1995) による)

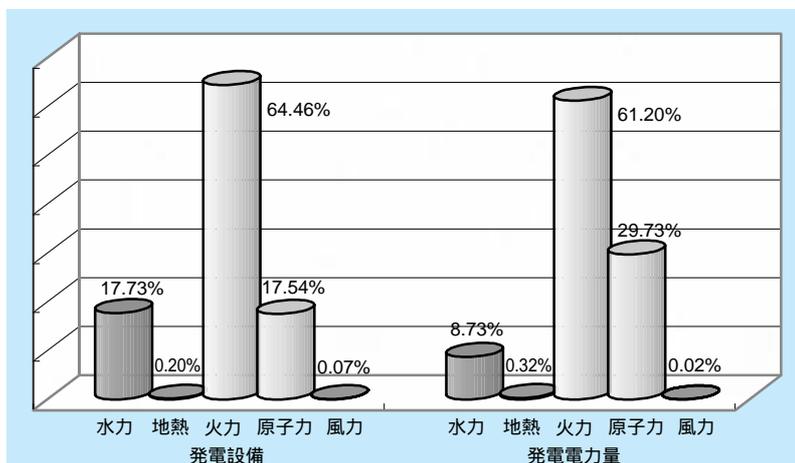


図1-1-2 電源別発電設備と発電電力量 (平成13年度) (電気事業便覧より作成)

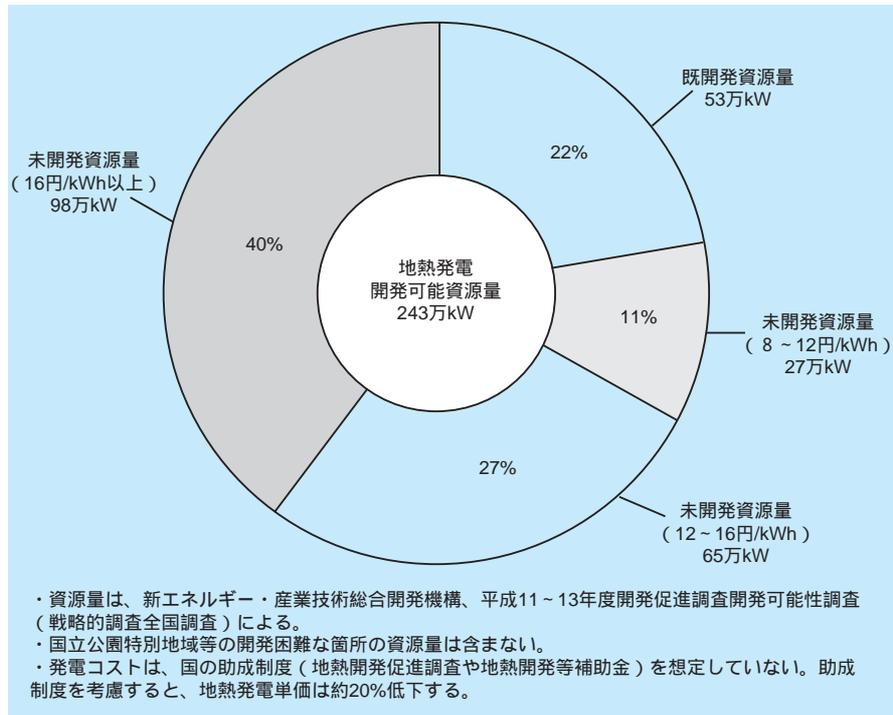


図1-1-3 わが国の地熱発電開発可能資源量（地熱エネルギー：2002による）

1 - 2 地熱利用のあゆみ

地熱は少なくともローマ帝国の時代以前から温泉浴や暖房などで利用されてきた。このような地熱の直接利用は2000年現在60ヶ国以上に及び、熱出力で合計1620万kWとされている。地熱発電は20世紀初頭にイタリアで始まり、2001年現在約20ヶ国で発電設備容量は合計827万kWである（表1-2-1）。

わが国では、1973年のオイルショックを契機に、翌年にはエネルギー問題の根本的な解決と環境問題を緩和するため、「サンシャイン計画」が発足した。この中で地熱エネルギーは主な開発目標の一つとして位置付けられた。さらに1980年には「新エネルギー総合開発機構」（後に、「新エネルギー・産業技術総合開発機構」と改称）（NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization）が設立され、地熱エネルギー開発を探索・採取、熱水利用、高温岩体、深層熱水に分け、それぞれの研究開発が行われた。

高温岩体発電は1970年にアメリカのロスアラモス国立研究所で提案され、まず、同研究所によりニューメキシコ州フェントンヒル地点で実験が行われた。その後、ヨーロ

表1-2-1 世界の地熱発電設備容量（2001年12月現在）

国名	設備容量(万kW)	国名	設備容量(万kW)
アメリカ	223	ニカラゲア	7
フィリピン	193	ケニア	5
イタリア	92	グアテマラ	3
メキシコ	89	中国	3
インドネシア	59	ロシア	2
日本	55	トルコ	2
ニュージーランド	43	ポルトガル	2
アイスランド	17	その他	2
エルサルバドル	16		
コスタリカ	14	計	827

「わが国の地熱発電の動向」（社地熱調査会：2002）より

ッパと日本を中心に実験が進められ現在に至っている（表1-2-2）。

表1-2-2 国内外におけるHDR開発の現状

国名	フィールド位置	区分	開発主体	実験期間	岩質	坑井		坑底温度	備考
						本数	最深深度		
ヨーロッパ連合	ソルツ (フランスアルザス)		EU, フランス ドイツ イギリス他	1986 ~	花崗岩	3 5,000m	3,876m 5,000m	168 200	天然の熱水系の中での循環。1993年に水圧破砕を行い生産井を掘削。1995年に6週間の循環実験で熱出力8~9MWを達成。1999年坑井を5,000mまで掘削。2000年に深部の貯留層を造成し、2002年に新たな生産井を5,000mまで掘削。
スイス	オッターバッハ (ドイツ国境近く)		スイス連邦エネ ルギー省他	1999 ~	花崗岩	2	1,535m 2,755m	4.2 /100m 4.0 /100m	5000m級での実験のための基礎データ収集が目的。2,649mから花崗岩と推定。温度勾配は4 /100m。
オーストラリア	クーバーバイズン		Geodynamics Ltd	2002 ~	花崗岩 (推定)	2	4,900m (予定)	260 (予定)	2002年度より4,900mの坑井掘削を開始し、2004年までに生産井の掘削および循環実験を実施の予定。
アメリカ合衆国	フェントンヒル (ニューメキシコ州)	第1期	ロスアラモス 国立研究所	1973~1980年	花崗閃緑岩	2	2,928m 3,064m	205	1977年に世界で初めて2坑井間の導通に成功。1980年には連続288日間の循環実験を実施し、熱出力2~5MWを達成。60kVAのバイナリー発電実施。
		第2期	同上	1979~1995年	同上	2	4,400m 4,000m	327	実験初期は日本とドイツが参加した。1983年熱出力35MW級の人工貯留層を造成。1986年~1993年にかけて断続的に抽熱実験を実施。最高熱出力9MWを達成。
イギリス	コーンウォール	第1期	ケンボン 鉱山大学	1976~1979年	花崗岩	4	300m	15 (推定)	基礎的事項を掌握し、第2期計画立案に役立てるために地圧計測、熱水流動シミュレーション手法を開発。
		第2期	同上	1979~1982年	同上	2	2,100m	80	1982年に2坑井間で初の循環テストを実施した。
		第3期	同上	1982~1991年	同上	1	2,650m 級	105	1985年から1988年までの3年間に亘り2,600m付近での循環実験を実施。回収率80%以上を達成。
ドイツ	ウラハ		連邦地質調査所 ハノーバー大学	1978~1980年 1990~1992年	片麻岩類 同上	1 1	3,334m 4,500m	140 169	1980年に水圧破砕を実施し、二重管システムで循環テストを実施。坑井コア調査、各種検層、地圧測定など基礎データの収集。
		第1期	ルール大学	1976~1984年	花崗岩	6	300m級	14	1979年および1980年に水圧破砕と循環実験を実施。
		第2期	鉱山地質調査所 同上(?)	1976~1980年 1980~1989年	花崗岩 同上	4 2	250m級 800m	約30	水圧破砕の後、3坑井間で循環テストまで実施。ゲル清と砂による水圧破砕。回収率58%。
フランス共和国	ル・メイエ・デ・モンターニュ	第2期	地質省	1986~1992年	花崗岩	2	500m	17	100m離れて2坑井間の循環流量108 l/minで回収率50%。
スウェーデン王国	フジャルバッカ		NEDO	1985~1991年	花崗閃緑岩	4	1,788m	235	1991年に深さ1,800mで90日間の連続循環実験を実施し、熱出力8.5MW。
肘折	山形県最上郡 大蔵村肘折	浅部	同上	1992~2002年	同上	3	2,303m	271 (2,205m)	1995年深さ約2,300mにおいて約1ヶ月間の循環実験を実施、熱出力9MWを達成。2000年より2002年まで連続循環実験を実施、50kWの発電。
		深部	同上	1986~1989年	火山礫凝灰岩	2	400m級	60	電中貯留層を通過した循環実験を実施。電中の貯留層を通過した循環実験を造成し、これからの貯留層を通じた循環実験を実施。
日本	秋田県雄勝郡 雄勝町秋ノ宮根木	第1期	電力中央研究所	1986~1989年	同上	3	1,303m	250	深度700m付近と1,000m付近の2カ所から貯留層を造成。生産井の水圧破砕などにより回収率の改善。1995年の1ヶ月間循環実験で回収率約25%、熱出力約1.5MW。1999年に3本目の坑井を1,303mまで掘削。2001年は新坑井と既存坑井の導通確認し、2002年度に総合評価を行った。
		第2期	同上	1989~2002年	花崗閃緑岩	3	1,303m	250	2001年は新坑井と既存坑井の導通確認し、2002年度に総合評価を行った。
焼岳	岐阜県上宝村 焼岳山麓		工技院サンシャイン 計画推進本部	1977~1984年	粘板岩・砂岩	8	300~ 1,000m	60 (300m深)	わが国最初の高温岩体発電実験であり、約20m離れた2坑井間で循環実験を実施した。

1 - 3 高温岩体発電からみた日本の地熱

高温岩体発電では地温勾配の高い地域がまず有望と考えられる。地温勾配が100 /kmを超えるような地域は北海道、東北地方、九州地方などに点在する(図1-3-1)⁽⁴⁾。このような地域では既に従来型地熱発電が行われているところもあるが、高温岩体発電もまずこのような地域が候補として挙げられる。対象地域を地温勾配が50 /km(ヨーロッパやオーストラリアの高温岩体発電対象地域に相当する)にすれば、対象地域は大きく広がる。

高温岩体発電の適地としては、地温勾配が高いことの

ほかに、深度に比例して地温が上昇するいわゆる熱伝導型を示すこと、地下浅部に人工貯留層となる花崗岩質岩が分布すること、がより有利な条件となる。当所の高温岩体発電実験場である雄勝地点はこの条件を満たし、さらにカルデラの内部に位置するという特徴を有している。熱伝導型の地温勾配を示し、地下2000mでの温度が200 以上であり、基盤が花崗岩質岩である地域は8地域確認されている(図1-3-2)⁽⁵⁾。これらの地域は、高温岩体発電の候補地として特に有望と考えられる。

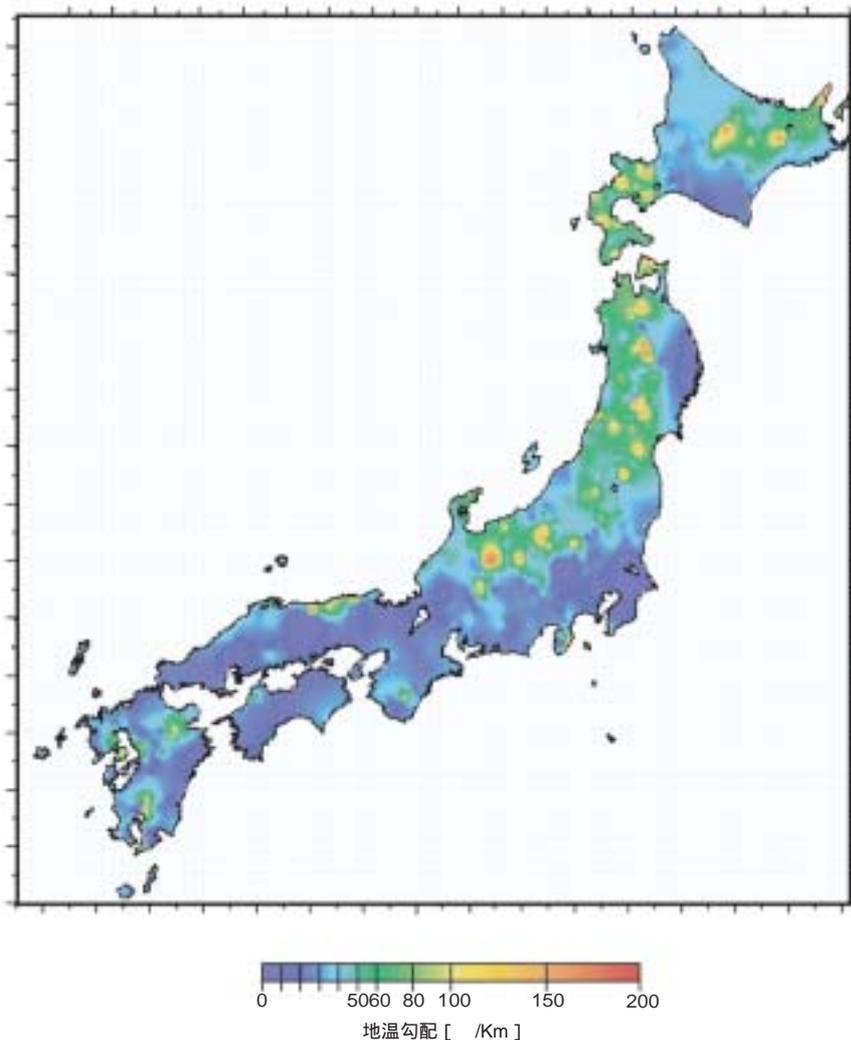


図1-3-1 日本の地温勾配分布(矢野ほか、1999)
産業技術総合研究所 承認番号 第75300-20030213-001号

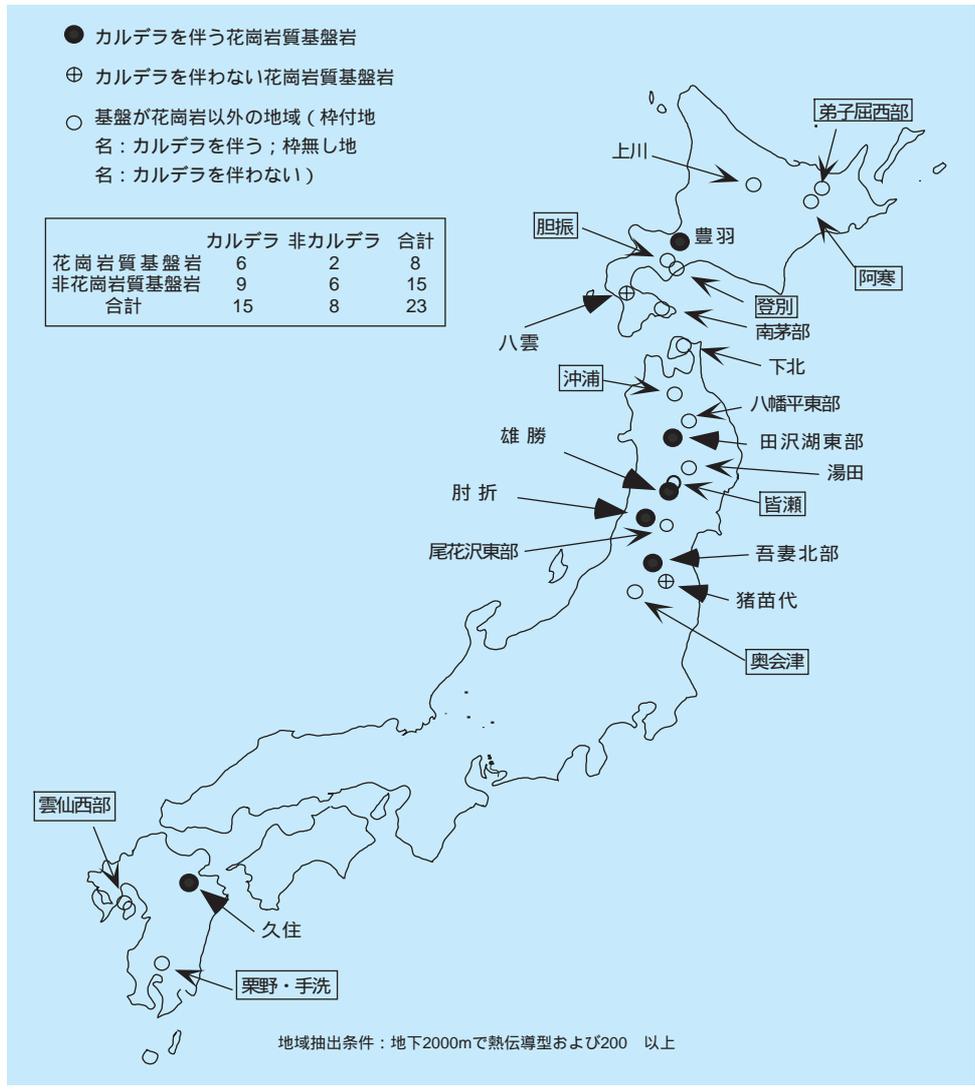


図1-3-2 日本の深部高温岩体分布 (北野ほか、2000)

コラム1：ガイザース地熱発電所の取り組み

これまで従来型地熱開発においては、一般に生産井から蒸気と共に噴出してくる熱水や発電後の熱水を、冷却した後に貯留層に注入すると、貯留層の温度が低下することがあり、貯留層への熱水などの注入は避けられてきた。

ところが最近、生産量が減少してきた貯留層へ熱水や水を注入し、生産量の回復に成功した例が発表され、まさに従来型地熱開発においても高温岩体方式による水の注入と生産が同じ貯留層において行われる可能性がでてきた。

米国カリフォルニア州にあるガイザース地熱発電所は、1945年から本格的に地熱発電所の建設が開始され、1987年には最高出力160.5万kW（設備容量202.3万kW）となり、世界最大の地熱発電所となった。ところがその後、蒸気の実産量が毎年10%程度も減少するという事態に陥った。この原因として、貯留層内の蒸気量の減少による効果が大きいと評価された。そこで、この改善策として貯留層に水を注入し、貯留層内の蒸気量を増加させ、出力の増大を図る計画が米国エネルギー省（DOE）などの協力を得て進められた。

1997年ガイザース発電所近くのクリアーレイクから発電所まで約46kmのパイプラインを設置し、1日に約3万トンの水を注入するシステムを完成させた。これにより、蒸気生産の減衰傾向が改善

されたことから、さらに大規模な貯留層への水の供給計画が進められている。この計画では、2002年末までにサンタローザの町から貯留層まで約64kmのパイプラインを設置し、1日に約4万トンの水を30年間にわたり供給する計画で、都市排水の処理と地熱貯留層の涵養の一石二鳥を狙っている。貯留層の数値シミュレーションなどによれば、この都市排水の供給により、地熱発電量が8.5万kW向上するものと期待されている⁽¹⁾。

イタリアではラルデレロ地熱発電所において、1970年代に入ってから蒸気の実産量が低下したことから、1980年代はじめより発電後の凝縮水の注入が試みられた。これにより約3万kWの発電量の増加に繋がったとされている。そして、貯留層の深部には高温の岩盤が有り、これに水圧破碎により水を注入し、貯留層の能力を向上させる計画もある⁽²⁾。

日本においても、従来型地熱発電所における生産蒸気量の減少は問題となってきており、これまでの自然に存在する貯留層からの蒸気の実産（受動的）だけでなく、人工的に貯留層を改善し（能動的）、蒸気の実産もしくは出力の増加につなげようとする計画が検討されている。このような、能動的な地熱開発において、高温岩体発電技術が活用されることを期待したい。

コラム2：温泉と高温岩体発電

高温岩体発電方式の地熱開発は、地下浅所に存在する高温の岩体からの熱抽出を目的とし、基本的には地下水などの水が流れていないところを開発の対象としている。この方式では、高温の岩盤に人工的に圧入した水を使って高温岩体のもつ熱エネルギーを抽出することから、温泉などへの影響は少ないと考えられる。むしろ、自然の状態では何千年にもわたって徐々に放出される熱エネルギーを人工的に抽出し、人類のエネルギー資源として活用する方法である。現在の技術では地下5km以浅程度からの熱抽出がコスト的に開発の限度

と思われるが、半径約6,400kmの地球の大きさから見れば表面をほんの少し引っ掻いたものにすぎない。しかし、場所によってはこれだけでその地域のエネルギーが賄えるほどの資源となるのである。さらに、石油や石炭のように人類の使いすぎにより枯渇する資源ではなく、ある地域の熱を取りすぎたため永遠にその地域から熱エネルギーがなくなるということではなく、数十年あるいは数百年のオーダーで見れば熱は回復する。地下に眠る膨大な熱エネルギーをできるだけ人類のエネルギー資源として活用して行きたいものである。

コラム3：地中熱利用ヒートポンプ

地下の熱を利用するシステムとして、最近注目されているものに地中熱利用ヒートポンプ（GeoHPもしくはGHP）がある。これは深さ50～100m程度の安定した地温（10～15℃）を利用するもので、坑井に熱交換パイプを設置し、夏は冷房、冬は暖房を行うシステムである（図）。空気熱源ヒートポンプ（いわゆるエアコン）に比べ、省エネルギーのシステムであり、エアコンでは利用できない寒冷地（外気温 -15℃以下）での利用が可能である。また、都会では地表の熱を地下に貯

蔵することになるため、夏のヒートアイランド現象を緩和する役目もはたせる。世界的には米国を筆頭に普及が進んでおり、ブッシュ大統領のテキサス州の自宅にも地中熱利用ヒートポンプが設置されているとのことである⁽¹⁾。日本では、坑井掘削などの初期コストが高いことなどのために普及が進んでいないのが現状であるが、環境にやさしいシステムであること、ランニングコストが安く、結局は低コストであることなどから普及を促進すべきシステムである⁽²⁾。

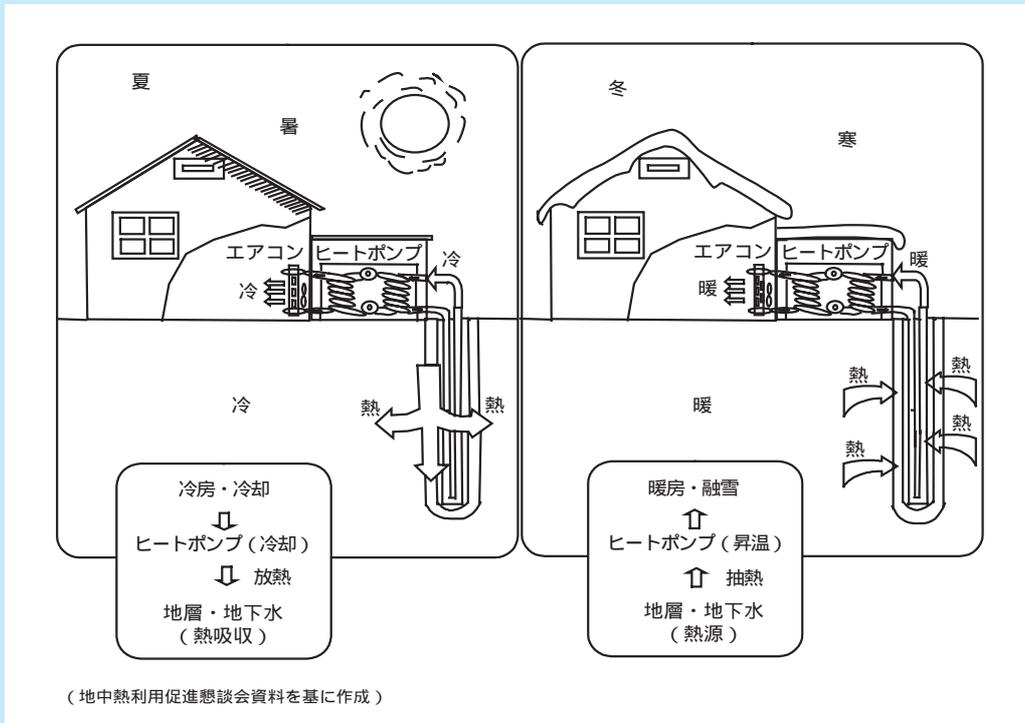


図 地中熱利用ヒートポンプ