

地球のあたたかい贈り物 -地熱資源と温泉-

佐脇 貴幸¹⁾・高橋 正明²⁾・水垣 桂子¹⁾

1. はじめに

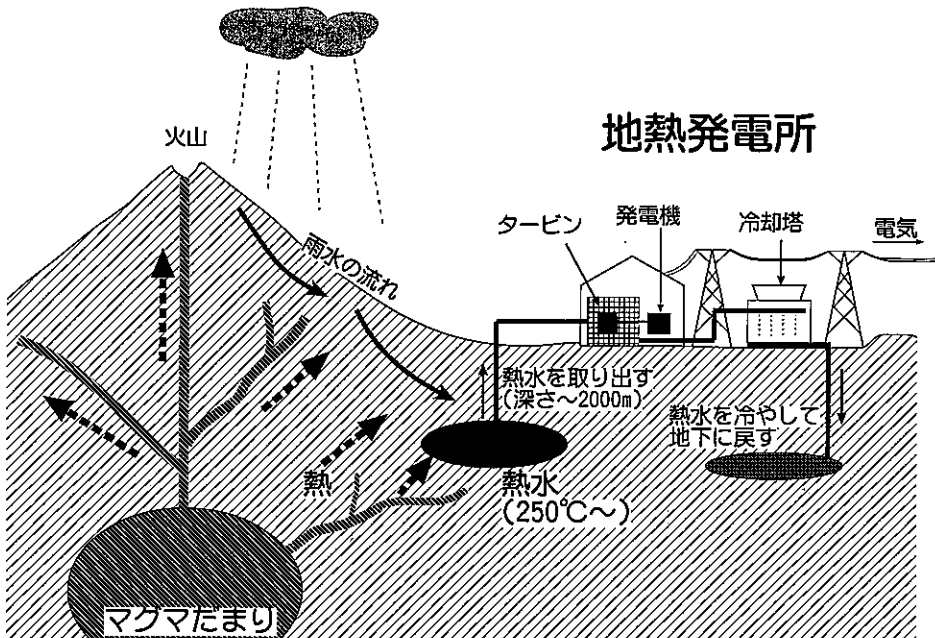
産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 (<http://www.gsj.jp/AIST/GRE/index.html>) では、その研究開発の1つとして、地熱発電・地熱資源探査に関わる研究を行っています。北陸地質情報展では、地熱発電の仕組みとともに、地下深くにある熱水の研究方法(貯留層変動探査法, 流体包有物の研究), それを採り出す方法(ボーリング)等について展示・紹介しました。また、北陸三県に分布する温泉の特徴について、地学的な観点から紹介しました。これらのうち、地熱発電の仕組み、ボーリングの仕組み、流体包有物に関しては、水垣(2000)、水垣ほか(2000)、佐脇ほか(2001)でも紹

介いたしましたので、それらは簡略に記すとともに、今回新たに展示した北陸地方の温泉と産業技術総合研究所で行っている研究(貯留層変動探査法の開発, 高温岩体発電システムの開発, アジア地域の地熱資源調査)について紹介します。

2. 地熱発電

地熱発電では、地下の割れ目にたまっている天然の熱水を取り出して、それから分離した蒸気の圧力でタービンを回転させて発電します(第1図)。

地熱発電を行うには、まず熱水を取り出すための坑井(生産井)を掘ります。坑井を掘ることをボーリングといいます。深さは500~3,000m, 地下の



第1図 地熱発電の仕組み(佐脇ほか, 2001).

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
2) 産総研 深部地質環境研究センター

キーワード: 地熱資源, 地熱発電, 流体包有物, 温泉, 探査手法

温度は250～320℃くらいです。普通は蒸気とお湯が混ざった状態で出てくるので、蒸気とお湯を分離する装置を通します。分離した蒸気は、パイプラインでタービンに送られます。タービンに入る時には120～200℃くらいになります。タービンには発電機がつながっていて、これで発電します。発電に使った後の蒸気は、冷却塔でさましてぬるいお湯にします。このお湯と最初に分離したお湯は、還元井から地下の割れ目に戻します。このように、地熱発電では、一度使った熱水は捨てずに地下に戻し、再度加熱されて戻ってくるものを利用できるようにしています。このため、地熱エネルギーは「再生可能エネルギー」と呼ばれています。

地熱発電所は、国内では主に九州、東北地方の火山地帯に建設されており、その数は合計17カ所、発電量は全部で533MWとなっています。世界で見ると、アメリカ合衆国2,545MW、フィリピン1,908MW、イタリア785MW、メキシコ780MW、インドネシア770MW、ニュージーランド441MW、アイスランド170MW、エルサルバドル161MW、コスタリカ115MWなどが主なところで、1998年12月現在では、日本は世界第6位になります(日本地熱調査会、2000)。なお、地熱発電に関する情報は、早川(1970)、湯原(1992)、あるいは

<http://www.jgea.or.jp/>,

<http://www.tohoku.meti.go.jp/geo/>,

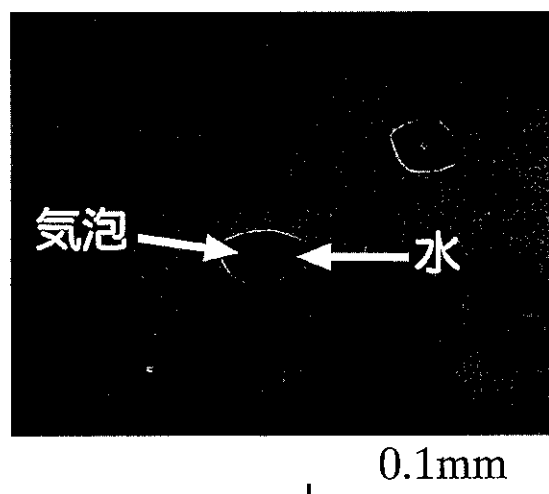
<http://www.enecho.meti.go.jp/ground/>

などでも知ることができます。

3. 流体包有物—熱水のマイクロカプセル—

冷蔵庫で作った氷は、白く不透明に見えることがよくあります。これは、氷そのものは透明なのですが、中に細かい空気の泡がたくさん含まれているので、全体として白く濁って見えるのです。このように、固体の中に液体や気体(まとめて流体ともいう)が閉じこめられているものを流体包有物といいます。自然界では、氷はもちろんですが、鉱物でも同じような現象がみられます(第2図)。

流体包有物はいろいろな原因で形成されます。地下の深いところに高温の流体が存在する場所があり、そのまわりにある鉱物がなんらかの原因で割れると、その割れ目に熱水が入り込みます。その割



第2図 流体包有物(広島花崗岩中のもの)。

れ目がもう一度閉じると、流体が閉じこめられて流体包有物になることがあります。また、鉱物結晶が成長する時に、結晶成長が不十分だった部分に流体が取り込まれてできることもあります。このようにして地下深部で鉱物の中に閉じこめられた流体包有物は、「熱水のマイクロカプセル」とみなすことができ、閉じこめられた時の温度や圧力、成分などをそのまま記録しています。ですから、流体包有物を調べると、通常ではなかなかうかがい知ることのできない、地下深部での熱水の温度・圧力や化学成分などを知ることができ、ひいては、その熱水が地熱発電に使えるかどうか調べることができます(水垣ほか、2000)。なお、流体包有物の研究の詳細に関しては、笹田(1988, 1989)、佐脇(1994)、千田(1996)、山田(1999)や、<http://www.aist.go.jp/GSJ/dGT/hoyuJ.html> などをご覧ください。

4. 貯留層変動探査法の開発

地熱発電を行うためには、地下から熱水(蒸気)を取り出すことになるわけですが、この熱水の生産に伴って、地下の熱水が溜まっている場所(地熱貯留層)の状態(温度や圧力など)が徐々に変化していきます。従って、もしも無計画に生産を進めてしまうと、例えば、地熱貯留層内の熱水が枯渇し、ひいては地熱発電所の出力を減衰させてしまうことにもなりかねません。このような状態を未然に防ぎ、

将来にわたって持続的に地熱資源を開発・利用していくためには、できるだけ発電開始後の早い時期から地熱貯留層の変動を捉えることが必要です。これにより、地熱貯留層がどのように変化していくかを予測し、最適な生産計画を作成することができるようになります。

「貯留層変動探査法」というのは、このような地熱貯留層を管理する技術のことであり、産業技術総合研究所では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)とともにこの技術の開発を進めています。具体的には、重力探査法、電気・電磁気探査法、地震波探査法などの物理探査手法、地質学的・地球化学的な観点から物理探査手法を支援する技術を開発しており、最終的には、これらの手法によって得られた情報を有機的に統合するための処理システム(物理探査ポストプロセッサ)を開発して、地熱貯留層の変動を予測する技術を確立することを目的としています。なお、この研究に関してのより詳細な情報は、

<http://www.gsj.jp/~ishido/res/indexJ.html>,

<http://www.nedo.go.jp/chinetsu/monitor/>

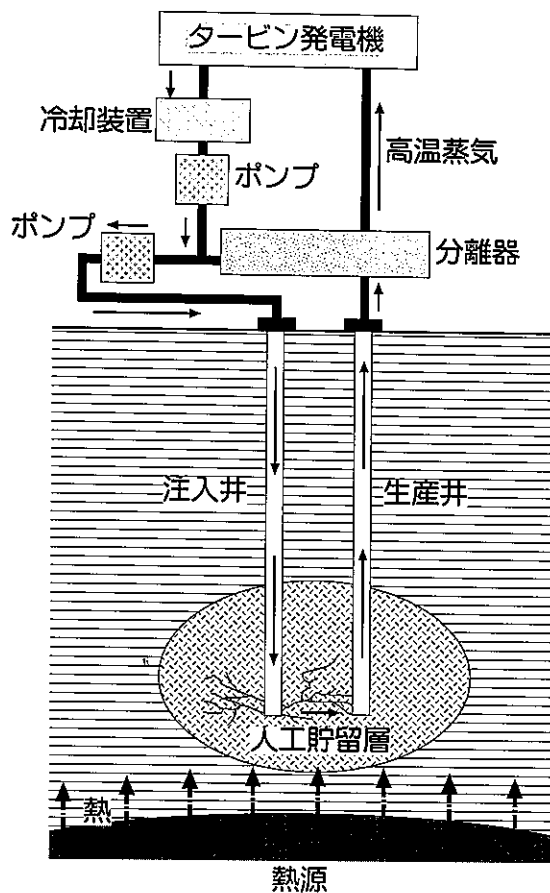
などでも見るすることができます。

5. 高温岩体発電システムの開発

従来の地熱発電方式は、熱源である高温の岩体、熱水、天然亀裂面からなる熱水の通り道(流路)という三条件が同時に存在してはじめて達成されるものです。しかしながら、自然界には、熱源はあるけれども水や流路がない、という場合があります。このように熱水や流路が天然に存在しなくとも、地熱資源を開発・利用するための手段として考え出されたのが、次世代の地熱発電技術である高温岩体発電システムです。

具体的には、地下深部の高温の岩盤に注入井と生産井を掘り、注入井から高圧力で水を送り込んで岩盤に隙間を造ります。これによって流路を人工的に作り出し、熱水の循環系を形成します。この技術を水圧破碎すいあつはさい、地下に作り出された循環系のことを人工貯留層と呼びます。送り込まれた水は、人工貯留層内で加熱され、生産井からそれを噴出させて発電を行います(第3図)。

産業技術総合研究所では、高温岩体発電システム



第3図 高温岩体発電システムの概念図。

を確立するために、「地熱井掘削技術」、「貯留層造成技術」、「貯留層評価技術」、「最適運転技術」といった観点から、NEDOと共に研究開発を進めています。なお、この研究に関してのより詳細な情報は、http://unit.aist.go.jp/georesenv/rgs/geoenergy/index_j.html, <http://www.nedo.go.jp/chinetsu/hdr/> などでも見るすることができます。

6. アジア地域の地熱資源調査

アジア諸国では、産業の発展に伴い、エネルギーの十分な供給が求められています。しかし、地球環境を守っていくには、二酸化炭素の排出量が少ない「クリーンエネルギー」を開発することが切実な問題となっています。一方、アジア地域には、日本列島、フィリピン、インドネシア、ヒマラヤ山脈などに

代表される火山帯・造山帯があり、豊富な地熱資源に恵まれています。事実、フィリピンでは22%、インドネシアでは4%の電力が地熱発電でまかなわれています。このように、アジア諸国には、クリーンなエネルギーである地熱エネルギーが豊富に存在しており、これを有効に利用することを考える必要があります。これらの地熱資源を調査・開発するために、産業技術総合研究所では、アジア各国と研究協力を行っています。

具体的には、開発を行う前に、アジア地域にはどのような地熱資源が、どこにどれだけあるかを把握するために、ASEAN諸国と共同して「アジア地熱資源データベース」を作成しようとしています。また、日本とインドネシアとの二国間では、「遠隔離島小規模地熱の探査に関する研究協力」という共同研究を行ってきており、インドネシア・フローレス島では、掘削した地熱井で噴気テストに成功しています。なお、この研究に関してのより詳細な情報は、<http://www.gsj.jp/~hiro/agHome/agTOPj.html>、<http://www.nedo.go.jp/chinetsu/indone/index.htm>などでも見ることができます。

7. 北陸地方の温泉

7.1 温泉の水はどこからくるのでしょうか？

温泉の水のもとには、様々な種類があります。雨水や雪が地下にしみ込んでできた地下水はその1つです。海岸の近くや島では海水が地下にしみ込んでくることもあります。古い地層の中に昔の海水が閉じこめられていることもあります。それらは、「古海水」、「化石海水」、「油田鹹水(塩水)」などといいます。また火山の近くではマグマに含まれている水が放出されていると考えられています。それらは、「火山ガス」、「マグマ水」などといいます。これらの水が地下の深いところまで循環して温められたり、地下深くの地層から様々な成分を溶かし込んだりしたものが温泉の水となります。特殊なものとして、地下数十kmから上昇してくる温泉の水もあるらしいことがわかってきました。

7.2 温泉の熱のとはなんなのでしょうか？

火山の地下にはマグマがあります。マグマはそれ自体とても熱く、また「火山ガス」や「マグマ水」

などとても熱い物質を放出しています。そのため火山の近くにはたくさんの温泉ができます。このようにしてできた温泉は「火山性温泉」といいます。

特別に熱いものがない場所でも温泉はあります。1km地下に行くと30℃くらい温度が上がるという、地球自体が放出している熱によって温められているのです。このような「火山性温泉」以外の温泉を「非火山性温泉」といいます。また、地下深くに地下水など温泉の水のもとをたくさん含んだ地層がある場合があります。このような地層が地球自体が放出している熱でじっくり温められると、たくさんの温泉ができます。このようにしてできた温泉は「非火山性温泉」の仲間ですが、特別に「深層熱水」といいます。

7.3 北陸地方の温泉はどうやってできたのでしょうか？

7.3.1 「火山性温泉」

北陸三県に分布する温泉の位置を、口絵4頁に示しました。

白山の近くにある中宮、岩間、親谷の湯、白峰などの温泉、立山(弥陀ヶ原火山)の近くにある立山、地獄谷、みくりヶ池などの温泉は火山性温泉です。岩間の噴泉塔群は、特別天然記念物に指定されています。また、地獄谷温泉は、日本で一番高い所にある温泉として有名です。余談ですが、日本で二番目に高い所にある温泉は白馬鱧温泉(長野県)です。

黒部川には、黒薙、鐘釣、祖母谷、餓鬼谷、阿曾原など温度が高い温泉がなっています。これらは、火山である立山と新潟の乗鞍岳(白馬大池火山)のちょうど中間に位置しています。黒部川の最上流には、高天原温泉があります。これは、日本で三番目に高い所にある温泉で、岐阜・長野県境にある焼岳と、立山のちょうど中間に位置しています。近くには硫黄沢という噴気をあげ続けている場所もあります(高瀬川の最上流にあります)。黒部川にある温泉は近くに火山はありませんが、「火山性温泉」の仲間ではないかと考えられています。

7.3.2 「非火山性温泉」

北陸三県には、泰澄大師や僧行基が開いた粟津、山代、山中、辰口、湯涌(石川県)、山田(富山県)など千数百年という長い歴史を持つ温泉があ

ります。片山津温泉は江戸時代の、芦原温泉は明治時代の開湯です。いずれも丘陵地にある「非火山性温泉」です。近年は平野部にある「非火山性温泉」の開発がさかんにおこなわれています。

加賀温泉郷の片山津、山代、山中の温泉の泉源は一直線上にならんでいます。これは、地下にある温泉水を地上に送りだす断裂(温泉脈)の方向を反映しているのだと考えられています。また、この地域では1kmで40℃くらい地下の温度が上昇する場所も所々にあります。

7.3.3 「深層熱水」

富山市、滑川市、魚津市、黒部市の平野部にある温泉は深層熱水であると考えられています。このような深層熱水を利用すると、たくさんの温泉の水を地下から汲み上げることができます。石狩平野、新潟平野、関東平野、濃尾平野、大阪平野など大きな平野や盆地の地下には必ずといっていいほどある温泉です。

7.3.4 「和倉温泉」

石川県七尾市の和倉温泉は千数百年という長い歴史を持つ温泉で、95℃の温泉が大量に湧きだしています。古くは、「南湯浦」「湧浦」「涌浦」とも表記されました。また、海底から湧く温泉を得るために「湯島」が江戸時代に建設されています(明治時代に「湯島」まで埋め立てられました)。90℃をこえる温泉は、マグマのような非常に高温の熱のもとが近くにある場合が多いのですが、和倉温泉の熱のも

とがなんであるのかはまったくわかっていません。謝辞：本文を執筆するにあたり、産業技術総合研究所 山口 勉氏、村岡洋文氏、石戸恒雄氏に粗稿を読んでいただき、ご意見をいただきました。ここに記し、感謝の意を述べます。

文 献

- 千田 佳(1996)：地球化学反応速度と移動現象。コロナ社、p.175。
 早川正巳(1970)：地熱 第四のエネルギー。NHKブックス 114、p.210。
 金原啓司(1992)：日本温泉・鉱泉分布図及び一覧。地質調査所、p.394。
 水垣桂子(2000)：大地のエネルギー・地熱発電。地質ニュース、no.548、65-67。
 水垣桂子・佐脇貴幸・笹田政克(2000)：流体包有物 -ミクロの熱水サンプル-。地質ニュース、no.547、51-52。
 日本地熱調査会(2000)：わが国の地熱発電の動向。日本地熱調査会、p.118。
 笹田政克(1988)：流体包有物マイクロサーモメトリーの基礎 -地熱篇- (1)。地熱エネルギー、13、295-311。
 笹田政克(1989)：流体包有物マイクロサーモメトリーの基礎 -地熱篇- (2)。地熱エネルギー、14、27-42。
 佐脇貴幸・大谷具幸・水垣桂子(2001)：大地の恵み 地熱資源を求めて。地質ニュース、no.560、43-45。
 佐脇貴幸(1994)：流体包有物の測定手法について -地熱探査への応用-。地熱、31、343-356。
 山田泰生(1999)：流体包有物の分析測定法(総説)。石油資源開発(株)技術研究所研究報告、14、57-80。
 湯原浩三(1992)：大地のエネルギー 地熱。古今書院、p.182。

SAWAKI Takayuki, TAKAHASHI Masaaki and MIZUGAKI Keiko (2002) : Geothermal resources and hot springs - Gifts from the earth -.

< 受付：2001年12月27日 >