

高温岩体地熱エネルギー開発プロジェクトに参加して

厨川 道雄¹、元資源環境技術総合研究所

要旨

工業技術院サンシャイン計画（後にニューサンシャイン計画となる）のもとで、1975年から始まった高温岩体プロジェクトは、2002年まで続いた。私は、プロジェクト開始時から、資源環境技術総合研究所を退職する2000年までこのプロジェクトに何らかの形で関係した。

高温岩体に関する研究開発は、資環研における室内研究、岐阜県焼岳山麓と山形県肘折における現場実験をはじめ、高温岩体の概念を提唱したロスアラモス国立研究所におけるIEA高温岩体地熱エネルギー実施協定のもとでの日米独共同研究に加え、電力中央研究所が独自に実施した秋田県雄勝での現場実験などを通して実施された。さらに、IEA地熱実施協定のもとに高温岩体タスク部会を設けるなど、その活動は国際的規模で展開した。

高温岩体プロジェクトには、資環研や地質調査所、東北大学、地熱技術開発(株)、石油資源開発(株)、三井金属鉱業(株)、電中研をはじめとする多くの研究機関や大学、企業が参加して進められた。本来ならこの報告書は、それぞれの立場から執筆を行うことがベストと思われるが、ここでは、工業技術院時代の研究所の実績を中心にまとめるとの趣旨から、HDR開発の一端を担った筆者がHDR地熱エネルギーの研究開発について述べることにした。

本文

1. はじめに

地熱資源は以下にあげる多くの利点を有しており、我々の身近に存在する自然エネルギーとして、注目されている。

- ・世界で有数の火山国であるわが国は、世界第3位の地熱資源を有する。
- ・他の自然エネルギーと同様、CO₂の排出量が少なく、環境に優しい。
- ・自然条件に大きく左右され出力が不安定な風力や太陽などに比較して、エネルギー密度が高く、安定的なエネルギー源である。したがって、ベースロード電源としても使用可能である。
- ・開発の歴史も古く、多くの経験を有している。

1974年、石油危機を契機として、通商産業省工業技術院においてサンシャイン計画が開

¹ 国立研究開発法人産業技術総合研究所名誉リサーチャー

始された。その1年後、資源環境技術総合研究所（当時は公害資源研究所、以下資環研と称す）は、サンシャイン計画の一環として、高温岩体（Hot Dry Rock、以下HDRと称する）開発に係る基礎研究を始めた。1980年には新エネルギー総合開発機構（1988年に新エネルギー・産業技術総合開発機構に改組、以下NEDOと称す）が設立され、石油代替エネルギーの開発に関する技術開発が促進された。

資環研においては、高温岩体開発に関する研究を実験室レベルで推進した。さらに、国内においては、岐阜県や山形県における現場実験に参加するとともに、海外においてもロスアラモス国立研究所で実施された国際エネルギー機関(IEA)実施協定のもとでの日本、アメリカ、ドイツによる高温岩体地熱エネルギー開発に参加し、HDR開発の推進に努めてきた。また、1997年にはIEAの地熱実施協定が開始された。この実施協定にはいくつかのタスクが設けられたが、筆者はその一つのHDRタスクの部会長を務めた。国内外におけるHDRの歩みをTable 1にまとめた。

Table 1 高温岩体研究開発の歩み

年度	日本の状況	世界の状況
1971		アメリカロスアラモス国立研究所(LANL)が高温岩体発電を提唱
1974		LANLがフェントンヒルで高温岩体開発実験(フェーズ1)を開始
1975	サンシャイン計画のもとで資環研(当時公資研)で高温岩体の基礎研究を開始	
1977	サンシャイン計画により、岐阜県焼岳山麓にて高温岩体開発実験開始	イギリスのコーンウォールで高温岩体開発実験を開始
1980		LANLが高温岩体開発実験(フェーズ2)を開始
1981		IEA実施協定のもとで日本、ドイツがフェントンヒルプロジェクト(フェーズ2)に参加
1985	サンシャイン計画高温岩体実験場を山形県肘折で開始	
1986	電中研が秋田県秋ノ宮で高温岩体開発実験を開始	フランスのソルツでECのもとでの高温岩体開発実験を開始(継続中)
1991		イギリスのコーンウォール高温岩体プロジェクトが終了
1992		LANLフェントンヒルプロジェクトが終了
2002	ニューサンシャイン計画高温岩体プロジェクト(肘折)が終了 電中研雄勝プロジェクト終了	オーストラリア・クーパーベイズンで高温岩体開発実験が開始(継続中)

1997年以降、地熱発電の設備容量が52万kWから増えておらず、さらに新エネルギー法（新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法）ができた際、地熱が新エネルギーから除外された。このような状況の下で、経済産業省は地熱開発に関する研究開発予算をほぼゼロとすることを決定し、山形県肘折りで実施されていたHDRプロジェクトが2002年に終了した。産総研においても、2003年以降は地熱の技術開発予算は大幅に削減された。これによって、地熱関連の研究者が、大学などに転出したり、専門的に関係のある他のテ

ーマに取り組んだりした。しかし、2006年に新エネルギーと再生可能エネルギーの概念整理が行われた際に、地熱が復帰した。2012年の再生可能エネルギーの固定価格買取制度が導入されるとともに、2011年に発生した東日本大震災によってエネルギー政策が見直され、2012年には、地熱関連予算が大幅に増えた。また、環境省は国立・国定公園内における地熱開発規制を見直しするなど、地熱エネルギー開発にフォローの風が吹き始めた。

アメリカにおいては、マサチューセッツ工科大学が **Engineered (Enhanced) Geothermal Systems (EGS)**を提案した。EGSとは、HDRや熱水型地熱貯留層の増強のための開発を含めた、いわゆる人工的に地熱貯留層の形成や改善を行う開発システムを意味する。EGSは、アメリカを始め、オーストラリア、EU（フランスとドイツが中心）、スイスなどで促進され、日本でも石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)が中心となって推進している。このように、我々がHDRで開発された技術や培った知見は、現在EGSとして、世界中で活かされている。

HDRの開発は、前述のようにサンシャイン計画(およびニューサンシャイン計画)プロジェクトとして行われた。岐阜県焼岳山麓における小規模現場実験、山形県肘折における実証実験、アメリカ・ロスアラモス国立研究所(LANL: Los Alamos National Laboratory)における日米独共同研究などによって、HDRの開発が推進された。1980年にNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構、当時は新エネルギー総合開発機構)が設立されると、NEDOがIEAの国際共同研究や日本におけるHDRの現場実験を工業技術院から委託され、プロジェクトの推進に当たった。HDRプロジェクトに主として参画したのは、資環研、東北大学、電力中央研究所、三井鉱業(株)、石油資源開発(株)であるが、その他多くの大学や企業がその開発に協力した。

2. HDRとは

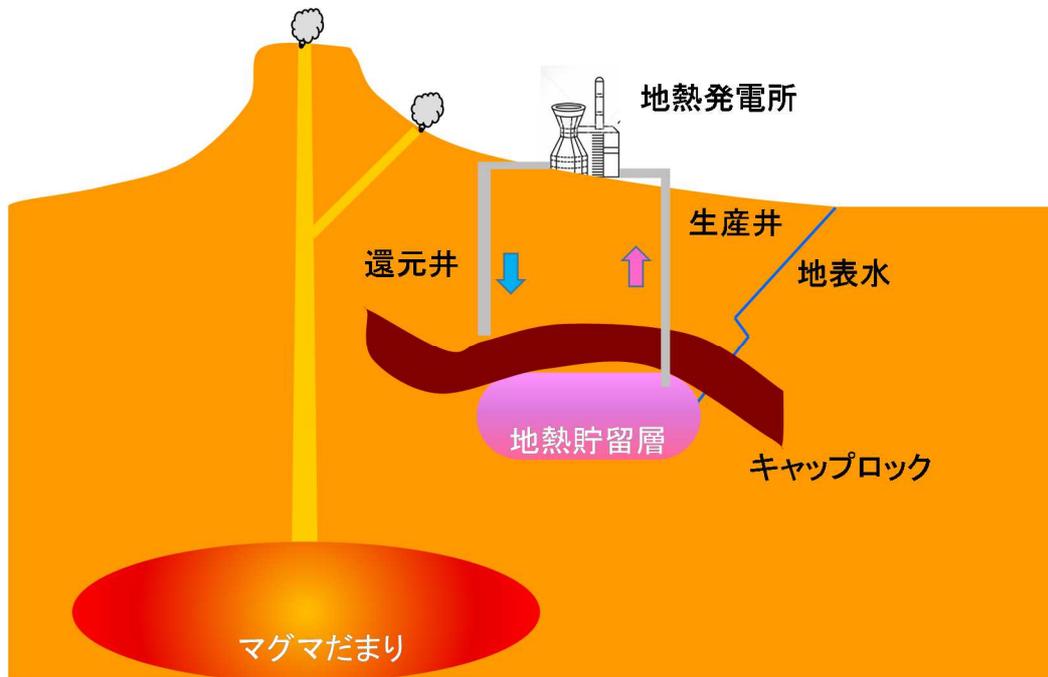
地熱エネルギーは、地下に貯えられた熱エネルギーで、太陽、風力、波力などの他の再生可能エネルギーと異なり、太陽エネルギーを起源としておらず、地下深くに存在するマグマの熱を起源としているところに特長がある。地球そのものが有する熱を取りだして、利用しているのである。

Fig.1に従来型(高温熱水型)の地熱開発のイメージを示す。高温の地熱貯留層を探し当てた後、貯留層にめがけて、坑井を掘削し、この坑井(生産井となる)を通して貯留層に含まれる熱水や蒸気を取り出し、タービンを回して発電する。発電に使用された後の熱水は、還元井を通して、再び地下に戻される。したがって、地下から取り出された熱水は、環境に放出されることはなく、環境を汚染しない。

高温熱水型の地熱貯留層が地下に形成されるには、

- 1) マグマなどの熱源により、地下の温度が高くなっていること、
- 2) 地表から雨水などの地表水が、断層などの亀裂を流れて流れていること、

3)地下で暖められた地表水がキャップロックなどによって流れがせき止められ、地下に貯えられていること、
の3つの条件を満たさなければならない。



Fig,1 高温熱水型地熱エネルギー

しかし、我が国を含め世界には、地下の岩盤が高温になっているものの、地表水が十分地下に流れ込まない、あるいは流れ込んでも熱水や蒸気を貯えられるような地下構造になっておらず、地熱貯留層が形成されていないところが多い。このような高温の岩盤から熱エネルギーを取り出そうというのが HDR の考えである。開発の手順は、まず Fig.2 に示すように、高温の岩盤に向けて坑井（後に注入井として使用）を掘削する。次に、この坑井に高圧の水を送り込み、坑井周辺の岩盤に亀裂(フラクチャ)をつくり、それを成長させる (Fig.3)。岩盤内をフラクチャが成長する際、岩盤が割れたり、滑ったりするときに音(微小地震: Acoustic Emission)が発生するので、それを観測して解析し、フラクチャの位置を確認する。確認されたフラクチャをめがけて、新たな坑井（生産井として利用）を掘削する (Fig.4)。これによって、注入井と生産井、これらをつなぐフラクチャからなる循環ループが形成される。注入井から水を送り、フラクチャ内を流れる際に加熱し、生産井を通して熱水として回収し、地表で熱エネルギーを取り出す (Fig,5)。このエネルギーを電気に変える（発電）。発電に使用した熱水は、再び注水井に送り込む。

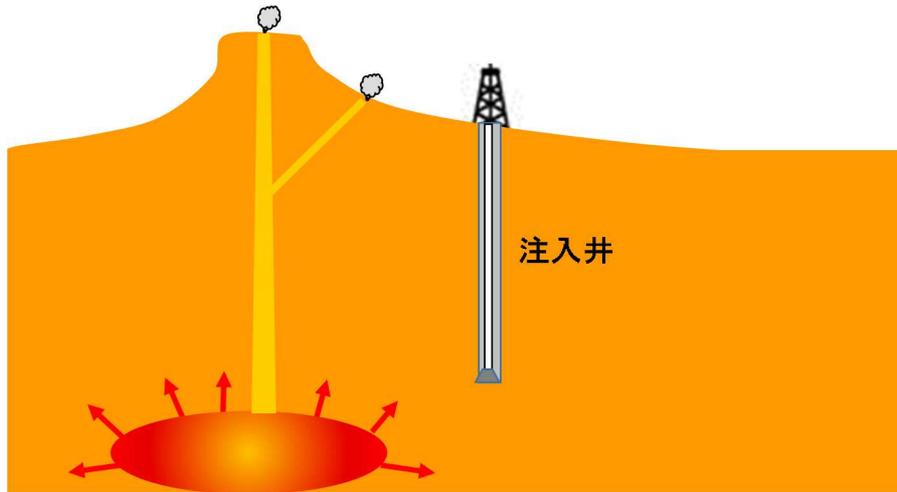


Fig.2 注水井の掘削－HDRの開発手順1

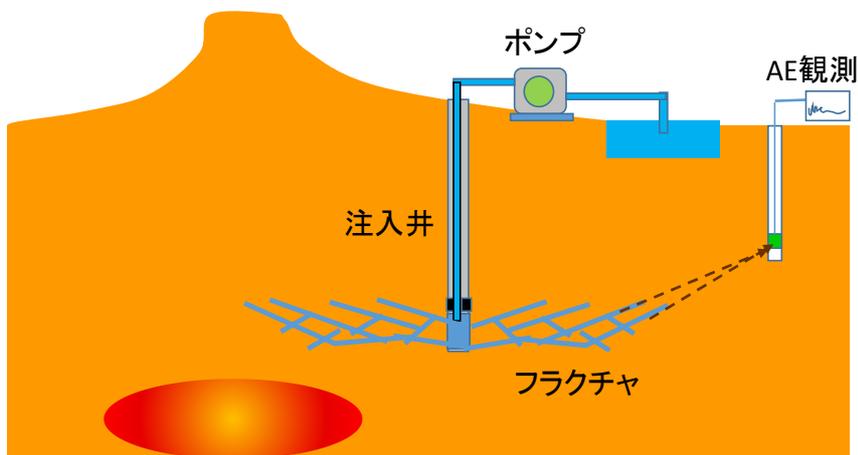


Fig.3 貯留層の形成とAE観測－HDRの開発手順2

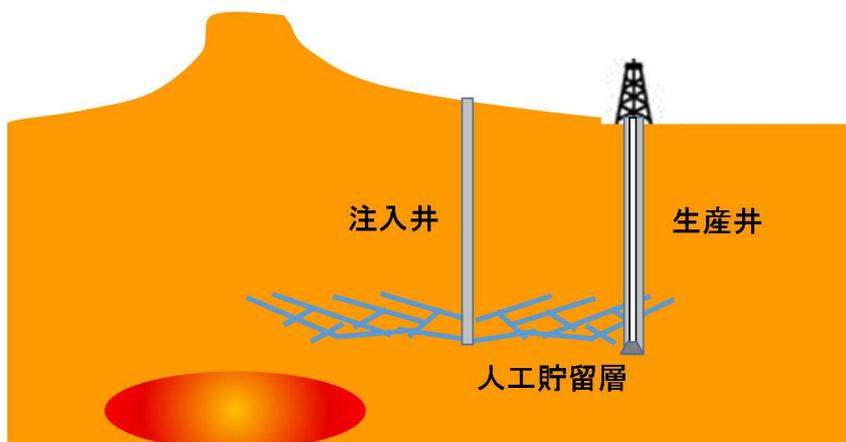


Fig.4 生産井の掘削－HDRの開発手順3

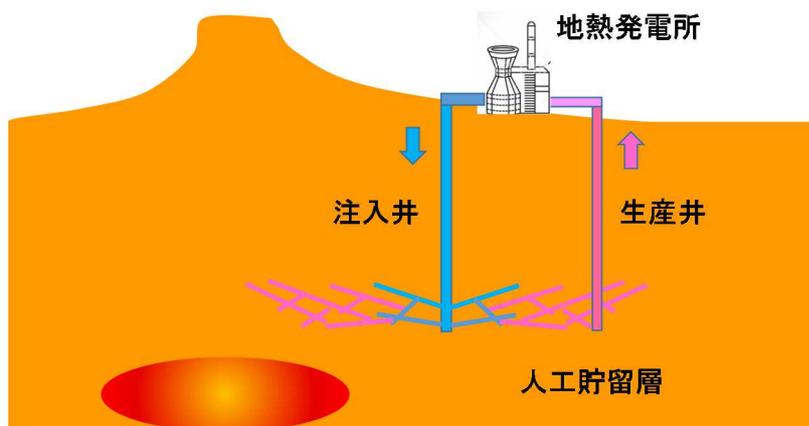


Fig.5 熱エネルギーの抽出－HDRの開発手順4

3. 資環研が HDR の研究開発に取り組むことになった経緯

我々の研究室では、1970年当時岩石力学に関係する新たなテーマを模索していた。そのとき、アメリカから HDR 開発に関して「1972年からニューメキシコ州フェントンヒルで、地下 3,000 メートルに 2 本の坑井を掘削した。1 本目の坑井に高圧の水を注入し、水圧破砕によって約 200℃ の岩盤に亀裂(フラクチャ)を入れた。注水を続けると、フラクチャが伸びて、もう 1 本の坑井につながった。その後、一方の坑井に水を注入して、フラクチャで暖め、他の坑井から熱水として回収した。」という情報が入った。Fig.6 にフェントンヒルのフラクチャ(HDR 貯留層)のイメージを示す。

坑井に高圧の水を注入して、岩盤を破砕する水圧破砕技術は、1940年代から石油やガス井の生産性向上のために、広く普及していた技術である。この技術は地下の地圧(岩盤に加わっている圧力)の測定にも使われおり、筆者もこの研究を実施したことがある。

フェントンヒルは、近くに約 100 万年前に形成されたバイアス (Valles) カルデラが存在する火山地帯である。水圧破砕で岩盤内にフラクチャを何 100 メートルも成長させたとの情報を聞いて、火山性の亀裂の発達した岩盤にフラクチャをつくったものと想像した。しかし、実際に話を聞いてみると、全く違うことが分かった。

Fig.7 に示すように、「100 万年前に噴火したバイアスカルデラの熱は、周囲に拡散しながら、岩盤を暖める。また、カルデラ外部の岩盤は、噴火によって破壊されることがなく、健全な状態にある。したがって、HDR サイトとしては、最適である。」との考えのもとで、サイトが選定されたのである。

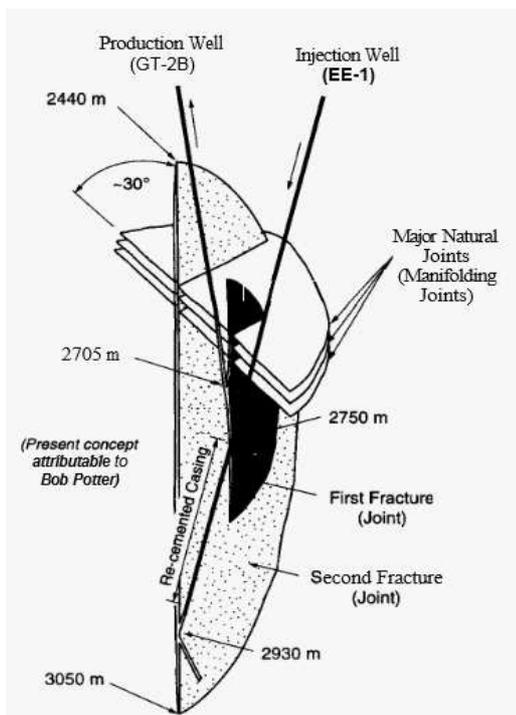


Fig.6 フェントンヒルで形成された世界初の HDR 貯留層
(D. Brown 参考文献 7)

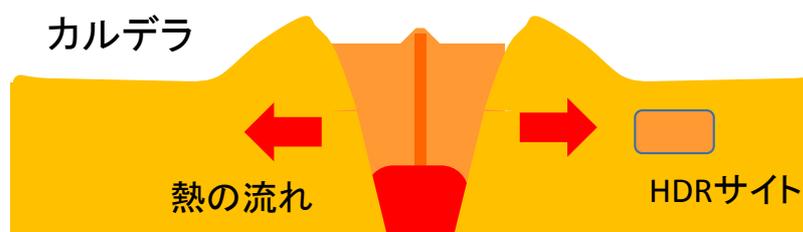


Fig. 7 フェントンヒルサイトとカルデラの関係

日本では 1974 年に、①太陽エネルギー②地熱エネルギー③石炭エネルギー(液化・ガス化)④水素エネルギーを重要項目とし、風力発電を含めたサンシャイン計画が開始された。地熱エネルギーに関しては、1966 年に岩手県松川地熱発電所が運転を開始し、翌年 1967 年には大分県大岳地熱発電所も操業を開始した。世界第 3 位の埋蔵量を誇る日本では、地熱エネルギーは非常に有望な国産エネルギーとして注目され、新たな地熱資源の開発を目指して、地熱の調査や探査が積極的に進められた。この研究には、工技院から地質調査所が参加した。当時、資環研(当時公資研)の我々のグループでは、鉱山の開発のために、岩石力学や岩盤の掘削に関する研究を行っていた。

アメリカにおける HDR の開発研究の情報が入り、我々が行っている岩石力学の研究が応用でき、かつ日本でも有望なエネルギー源となりうるとの判断で、サンシャイン計画の開始から 1 年後の 1975 年に、HDR の研究開発を実施することとなった。

4. 岐阜県焼岳山麓における現場試験

資環研では、地熱貯留層を形成するため、高圧の水を岩盤に注入して亀裂を入れる、いわゆる水圧破碎の研究を中心に行った。さらに、1977年に開始した岐阜県焼岳山麓での現場実験（サンシャイン本部の受託を受けて、三井金属鉱業(株)と石油資源開発(株)が実施）にも積極的に参加した。

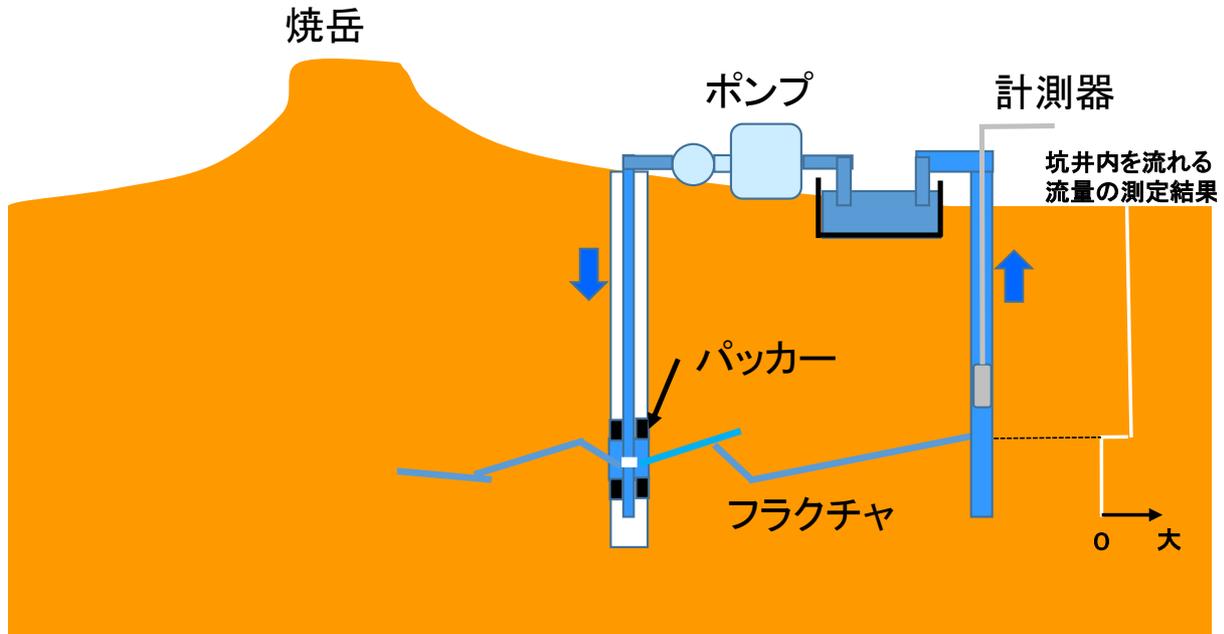


Fig.8 焼岳山麓における HDR 現場のイメージ

焼岳での実験のイメージを Fig.8 に示す。ここでは、深さ約 300 メートルの坑井を 2 本掘削した。1 本の坑井(注入井)にパッカーを挿入して水圧破碎を行い、フラクチャを形成し、さらに送水を続けてフラクチャを他の坑井(生産井)に達するまで伸ばした。フラクチャが坑井に到達した深さは、坑井に沿って流量計を降ろし、流量を測定することによって求められる。すなわち、Fig.8 に示すように、フラクチャから生産井に水が流入している位置では、坑井内の水の流れが変化するので、流量計を坑井に沿って降ろすと、流量変化からフラクチャが達した位置が求まる。この実験で、2 本の坑井とそれをつなぐフラクチャから成るループを形成することができたので、水の循環試験を行い、どの程度の水が回収できるかなどのデータを得た。また、異なる深さにパッカーを設置し、複数のフラクチャを形成した。ほとんどのフラクチャは既存の亀裂に沿って成長した。この実験によって、フラクチャは、深さによってその方向が異なり、地下の亀裂系は非常に複雑であることを実感した。

5. ロスアラモス国立研究所における日米独国際共同研究

5. 1 ロスアラモスにおける現場実験

1981年から国際エネルギー機関（IEA）のもとで、日本、ドイツ、アメリカ3カ国が高温岩体地熱エネルギーに関する実施協定を結び、アメリカ・ニューメキシコ州 LANL で共同研究を開始した。日本は、NEDO が実施主体となり、この協定に署名した。プロジェクト開始後、日本チームのまとめ役として、資環研から私が参加した。また、三井金属鉱山(株)の門脇正和氏と石油資源開発(株)の宮入誠氏も一緒に赴任した。1年半後、私に代わって資環研の松永烈氏、引き続き山口勉氏がまとめ役を勤めた。

5. 1. 1 HDR の設計と水圧破砕

LANL の研究者は、フェントンヒルにおいて先に実施した深さ 3,000 メートルにおける Phase-1 の実験結果から、水圧破砕によって発生するフラクチャは鉛直方向に伸びると考えていた。その考えをもとに 4,000 メートルにおける HDR の開発システム（Phase-2）の設計を行った。すなわち、Fig.9(a)に示すように、深さ 4,000 メートルクラスの 2 本の坑井（EE-2 と EE-3）を掘削した。これらの坑井の深さ 3,000 メートル付近から鉛直方向に対して 35°の角度を有するように曲げて掘った。そうすると、EE-2 から水圧破砕によりフラクチャを発生させ、成長させると EE-3 に達することになる。2 本の坑井を水圧破砕に先立って掘削したのは、掘削費用が大幅に安くてすむことも、大きな理由であった。我々がロスアラモスに赴任した時点では、ドイツの 3 名の長期研究者が赴任していた。フェントンヒルでは、2 本の坑井の掘削が終了しており、EE-2 に高圧の水を送り込んで、フラクチャを発生させる準備に取りかかっていた。

岩盤に亀裂が少なく、健全であれば、一般に水圧破砕によって引張破壊が発生すると考えられる。引張破壊によるフラクチャは、最大地圧の方向（地中で最も力のかかっている方向）に向かって成長する。地下の浅いところでは、地殻運動の影響もあり、最大地圧は水平方向であることがある。しかし、地下の深いところでは、一般に最大地圧は鉛直方向であると考えられている。焼岳山麓における現場実験では、水圧破砕によって坑井付近では引張破壊が生ずることが多かったが、その後既存の亀裂に沿う形でフラクチャが成長することが多かった。一方、フェントンヒルの現場は、地下 4,000 メートルと非常に深く、地下から採取したコアを観察すると比較的亀裂が少なく、健全であったこと、さらに同じフェントンヒルの深さ 3,000 メートルで実施した水圧破砕（Phase-1）により、鉛直方向に亀裂が成長したことなどを考えると、深さ 4,000 メートルでも水圧破砕によって鉛直方向に成長するものと考えていた。

水圧破砕の際、フラクチャがどこで発生し、どのように成長するかを観測するために、地下に高精度の地震計を設置し、破壊に伴って発生する微小地震を計測した。

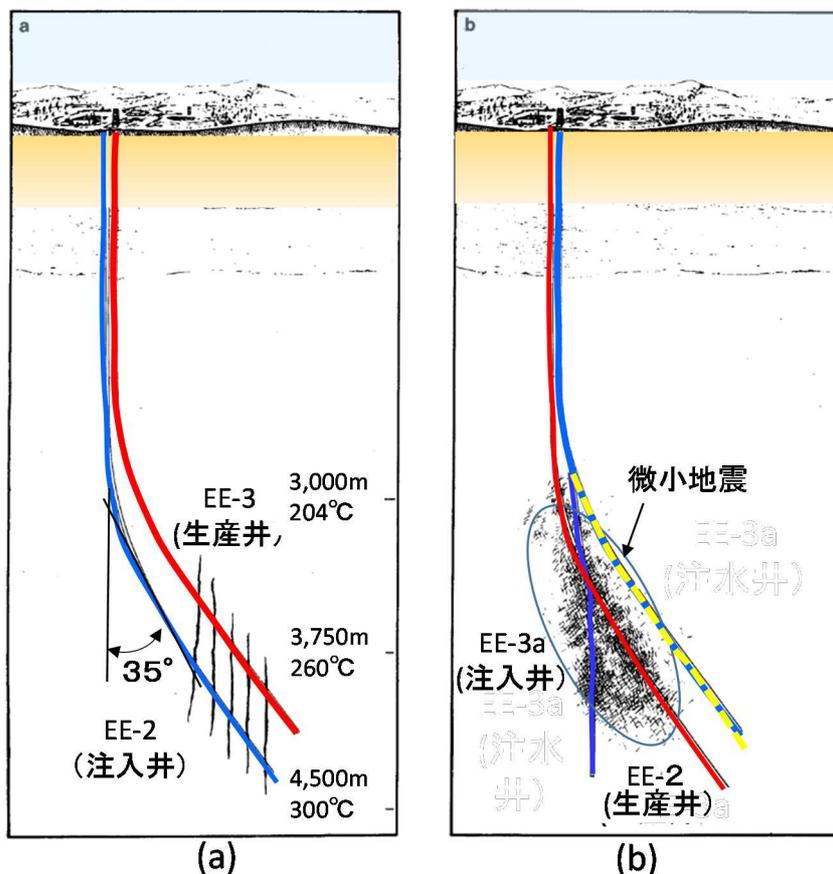


Fig.9 フェントンヒル Phase-2 の坑井

(a)実験開始時の坑井配置 (b)EE-3 坑底部枝掘り後の配置

(文献 8)

私の赴任後、EE-2 への高圧水の注入が始まった。EE-2 で発生したフラクチャが EE-3 に達すると、EE-3 に水が流れ込んで水位が上昇し、最終的に EE-3 の坑口からあふれ出ることになる。しかし、いくら EE-2 に水を送っても、EE-3 の水位は変化せず、EE-2 から発生したフラクチャは、EE-3 に到達しなかった。その原因を調べるため、計測した微小地震 (AE) を解析し、フラクチャの成長方向を確認した。その結果、Fig.9(b)に示すように、フラクチャは鉛直方向に成長せず、EE-2 に沿って斜めに成長したことが分かった。すなわち、フェントンヒルのように、比較的天然の亀裂系が少ないところにおいても、水圧破砕によって成長するフラクチャは、天然の亀裂系に支配されることが分かった。

そこで、2本の坑井とそれらをつなぐフラクチャから成る高温岩体熱抽出システムを構築するため、EE-3 の深さ 3,000 メートル付近から、フラクチャを貫くように坑井を掘り直した(枝掘りという)。この枝掘りした部分を、EE-3a と称した。これによって、EE-3a を注入井に、EE-2 を生産井にした熱エネルギー抽出システムが出来上がった。

この実験結果から、事前にフラクチャの方向を正確に予測することは非常に難しいことが分かった。地下の高温岩盤に熱抽出システムを構築するには、先に述べたように、Fig.2 から Fig.5 に示す手順で行うことが最も良いことが確認された。フェントンヒルプロジェクトの後で始められたフランスとドイツが EU のもとで実施しているソルツ HDR プロジェクトや、後述する山形県肘折における HDR プロジェクトでは、この手順に基づいて HDR 熱抽出システムを構築した。

5. 1. 2 ロスアラモスで筆者が実施した研究

ロスアラモスにおいては、私は現場実験の進捗状況やその後の研究計画を把握し、日本人のメンバーに伝えるとともに、国際共同研究の受託機関である NEDO へ報告し、NEDO の要望を LANL のプロジェクト責任者に伝えた。また、個人的には、水圧破碎によってフラクチャがどのように成長するかに興味を持ち、その研究を行った。

LANL のジボロスキー氏は、石油生産に伴う、貯留層からの石油の挙動を解明するシミュレーションプログラム FEHM (Finite Element Heat and Mass Transfer) を開発し、フェントンヒルプロジェクトの熱抽出シミュレーションに適用するための研究を行っていた。私は、このプログラムに亀裂の成長に関するサブルーチンを開発し、現場実験で得られたデータを入力し、水圧破碎の際、どの程度の流量で水を送ると、どのくらいの大きさのフラクチャが、どのように成長するかの研究を FEHM を用いて実施した。フェントンヒルでは、EE-2 の坑底部から複数のフラクチャが形成されていた。これらのフラクチャの特性は異なり、送水すると容易に水が流れ込むフラクチャと、なかなか水が流れ込まないフラクチャがあった。高温の岩盤からできるだけ多くの熱を抽出するには、多くのフラクチャに水を流し込んで、できるだけ広い範囲で岩盤から熱を回収する必要がある。そのためには、送水量が多い方がよいか、少ない方がよいかをシミュレーションによって解析した。その結果、水量を多くして坑井内の水圧を高めた方が、より多くのフラクチャに水が流れることが分かった。この成果を LANL のプロジェクトマネージャーに報告し、ポンプの送水量を上げるように進言した。

私の他の日本人研究者は、現場実験の解析などのため、地質、探査、計測などそれぞれの専門を生かして、いろいろな分野の研究を実施した。その成果について、ここでは述べないが、日本人研究者が、LANL における HDR 開発について大いに学び、かつそれぞれに経験をもとに大いに貢献したことは言うまでもない。

5. 2 ロスアラモス国立研究所での経験

5. 2. 1 日本とドイツの研究者 (プロジェクトへの派遣期間)

IEA 実施協定のもとで、プロジェクトに参加できる研究者の数は、制限があった。1 年以上の長期研究者は、日本とドイツからそれぞれ 3 名以内である。半年以内の中期研究者についても、制限があったような気がするが、それについて LANL はあまり気にしていなかった。ドイツは、早々と 3 名の長期研究者を決め、共同研究開始すると間もなく

LANL に送り込んだ。3 人ともプロジェクトの実施期間中滞在するとのことで、家を購入した研究者もいた。

これに対して、日本はできるだけ多くの研究者に経験を積ますとの考えもあって、研究者の滞在期間はほぼ 1 年から 1 年半であった。長期派遣研究者として、資環研、三井金属鉱業、電中研から参加した。また、中期派遣研究者は数多く、資環研、地質調査所、石油資源開発、東京電力、鹿島建設、大成建設、清水建設、間組、飛島建設などからの参加があった。しかし、ドイツからは短期的な訪問者はあったが、中期派遣研究者はほとんどいなかった。

LANL に滞在してみて、確かに 1 年あまりの滞在は短かった。しかし、国際共同プロジェクトが終わってみると、日本のやり方が正解だったような気がする。ドイツは、1986 年に EU のもとでフランスとともにソルツにおいて、HDR のプロジェクトを始めた。しかし、どのような理由からか分からないが、HDR 国際共同研究に参加した 3 名の長期研究者は、誰もこのプロジェクトには参加しなかった。すなわち、LANL で得た研究者の知見を、直接自国のプロジェクトに活かすことはなかった。

日本では、1985 年に山形県肘折に HDR の実験サイトを移し、深さ 2 千数百メートルの岩盤を対象に、本格的な HDR 熱エネルギー抽出システムの構築に取りかかった。また、電中研でも独自に秋田県秋ノ宮において、HDR の実証実験を始めた。これらのプロジェクトは、国際共同プロジェクトに参加した研究者が中心となって進められた。日本における地質条件を考慮しながら、LANL における共同研究で得られた知見を取り入れ、プロジェクトを実施した。ドイツに比べて日本では、国際共同研究の成果を十分生かしたと言える。

ドイツに関して言えば、当時地熱開発は行われていなかった。そこで、なぜ IEA の地熱国際共同研究に参加したのかを聞いてみた。「地熱資源はいろいろな国にある。ドイツは地熱開発の技術を保有し、発展途上国での地熱開発に貢献するためだ。」とのことであった。その後、ドイツはソルツプロジェクトに参加しているほか、チリで地熱開発を行っており、最近に至っては、国内で地熱開発の動きがある。ドイツの積極的な政策が功を奏しているともいえる。

5. 2. 2 白黒をつける

アメリカの大リーグでは、引き分けがない。何時間かかっても、勝負がつくまで試合を続けるのは、ご承知の通りである。このように、アメリカでは白黒をはっきりさせるといふ国民性が強いと感じた。その例として、LANL での実験手法に関する二者択一の場面で、どちらに賛成するか明確に述べなかったため、非難を受けたことがあった。

HDR 開発のための現場実験の手順は、予め年度当初に決めていた。しかし、地下の岩盤を対象に開発を進めると予期しないことが起こる。なかなか計画通りに行かないこともあった。HDR の開発に関して、フェトンヒルプロジェクトが世界のトップランナーであ

ったこともその一因である。その最たる例が、フラクチャの成長方向が予測と全く違ったことである。

坑井は、掘った後に崩れないように、坑井の下部を残して(裸坑部という)ケーシングパイプが入られる。裸坑部は、水圧破砕によって地下に貯留層を形成するために必要である。地表から高圧の水を送ると、裸坑部からフラクチャが発生する。一般に、深さが増すと岩盤に加わる地圧が大きくなる。裸坑部でいえば、ケーシングパイプ下端(ケーシングシューという)の地圧が最も小さくなるので、水圧破砕によってそこからフラクチャが発生する可能性が高い(Fig.10)。熱エネルギーは、フラクチャを流れる水を通して抽出されるので、裸坑部に全般からできるだけ多くのフラクチャを形成することが望ましい。そこで、何らかの方法で、裸坑部の下部だけに高圧の水を送り、フラクチャを発生させる必要がある。その方法は、いくつか提案されている。

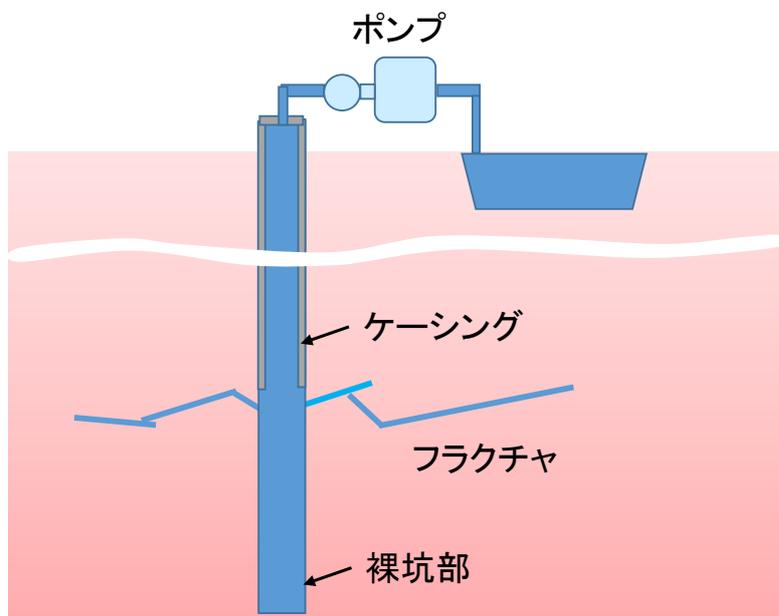


Fig10 水圧破砕による裸坑部からのフラクチャの発生位置

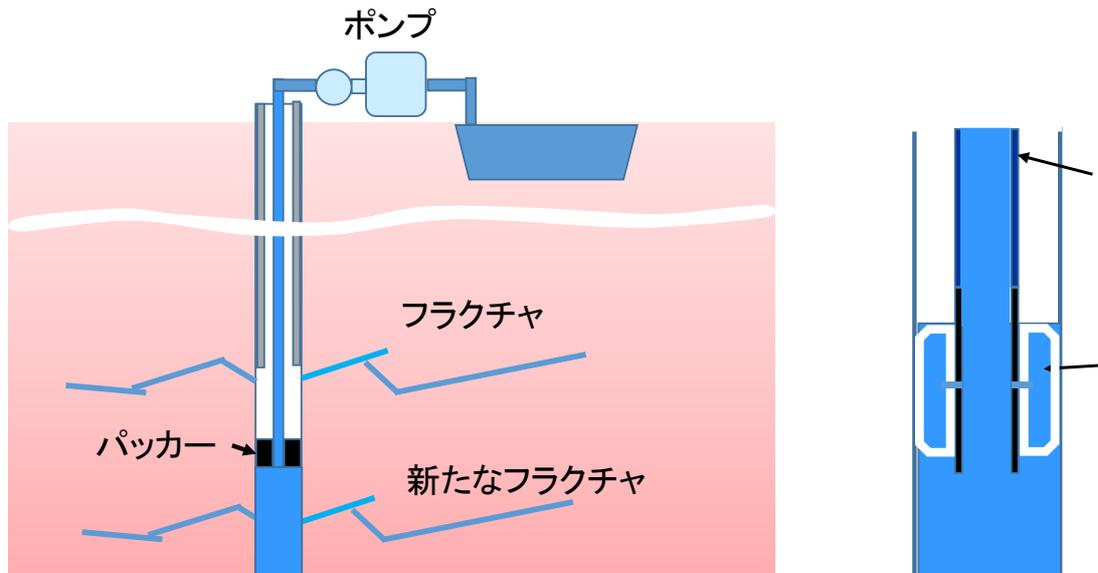


Fig.11 パッカーの概念図

代表的な方法は、パッカーを使用する方法である。パッカーの概念図を Fig.11 に示す。これは、パイプの外側にゴム袋を巻き付けた形状をしている。所定の深さまで降ろして、ゴム袋に水を送り、膨らませると、ゴムが坑井の壁面に密着して、坑井の一部が仕切られることになる。先に形成したフラクチャの下にパッカーをセットし、高圧の水を送ると新たなフラクチャをつくることができる。パッカーをセットする深さは、自由に選択することができる。かつフラクチャを形成した後、ゴムから水を抜いてパッカーを回収することができる。パッカーは、非常に簡便に水圧破碎に用いることができる装置であり、高温・高圧下で使用できるパッカーが開発されれば、HDR の開発に大きく貢献することになる。問題はゴムでできているので、高温に弱いという欠点がある。これまで、フェントンの EE-2 で、パッカーを用いて水圧破碎を試みたが、ゴム部が破損し、不成功に終わったことがあった。

他の方法として、PBR (Polished-Bore Receptacle) という方法が提案された。これは、Fig.12 に示すように、まず坑井内の所定の深さに、精密に研磨された受け口を有するパイプ (Receptacle) をセメントで固定する。その後、受け口に送水パイプを挿入し、高圧水を送って、PBR 下部にフラクチャを形成する方法である。一度 PBR をセットすると、回収することができない。したがって、フラクチャの発生させるために、坑井を仕切る部分は一度決めたら変更できない。しかし、パッカーに比べて、この技術の信頼性は高い。

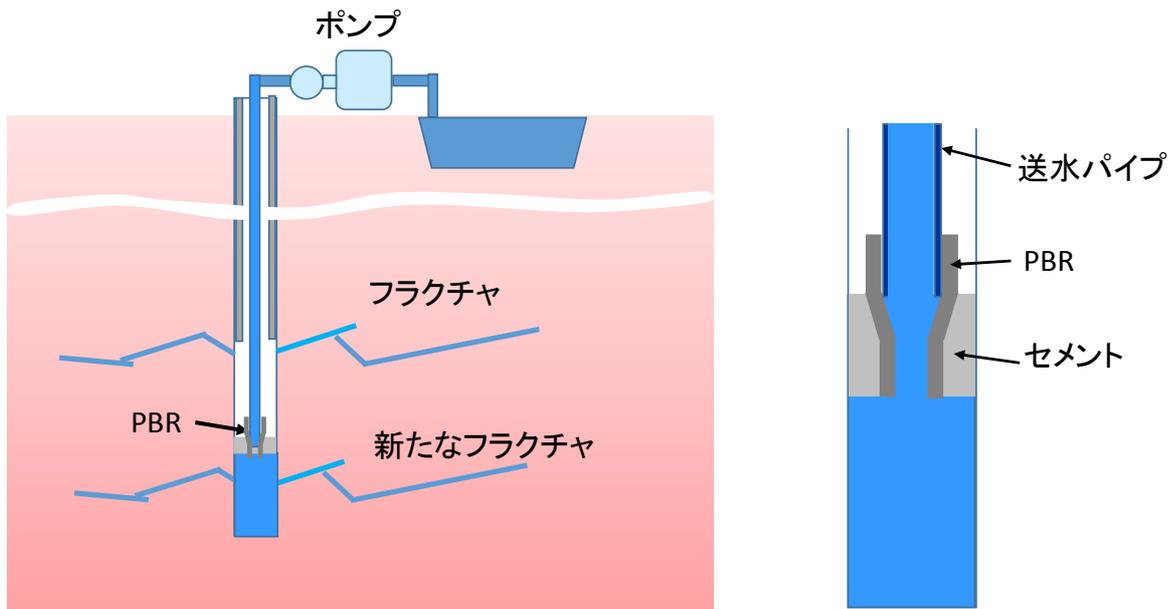


Fig.12 PBR を用いた水圧破碎(イメージ図)

ある時、坑井下部でフラクチャを形成するために、パッカーを用いるか、PBRを用いるかで、大議論となった。パッカーは、柔軟性があるが、信頼性は低く、逆にPBRは柔軟性に欠けるが、信頼性は高い。フェントンヒルプロジェクトを順調に進めるには、PBRが望ましいと思っていた。しかし、我々は、将来日本におけるHDRに役立つ研究開発をフェントンヒルでやってもらいたいとも思っていた。もし、高温で使用できるパッカーが開発されれば、HDRの開発が一層進展すると考えられることから、パッカーも捨てきらなかった。すなわち、私は「フェントンヒルプロジェクトを順調に進めるには、PBRを採用した方がよい。しかし、日本におけるHDR開発を考えた場合、フェントンヒルプロジェクトが少々遅れてもパッカーを開発してもらいたい。」と思っていた。パッカー派とPBR派が大議論を重ねている会議で、意見を求められた。私は「PBRは信頼性が高く良い技術と思うが、パッカーの魅力も捨てがたい」と発言した。すると、LANLの研究者から、「何を言っているのか分からない」との批判を受けた。海外において、二者択一の議論を行っている時には、一方が100%良いとは思わなくとも、両者を比較して、どちらがよいかを明確に述べる必要があると痛感した。

最終的に、PBRが選択され、実験は成功した。この成果を生かし、PBRは山形県の肘折プロジェクトでも採用された。

5. 2. 3 ギブアンドテイク

先に述べたように、LANLは、1971年にHDR発電システムの概念を提唱し、翌72年からフェントンヒルにおいて、深さ3,000メートルの高温の岩盤から熱を抽出するシステムの研究を開始した。これに比較し、日本では1975年から岐阜県焼岳山麓で深さ300

メートルの岩盤に HDR システムが構築する現場実験を始めたところであった。プロジェクトに関わっている研究者等のスタッフの人数や予算など、LANL は群を抜いていた。

プロジェクトに参加してみると、日本は多額の分担金を支払っていることもあり、LANL のスタッフは、非常に親切であった。こちらから、実験データの詳細や HDR 文献等を依頼すると、すぐ応じてくれた。だが、こちらからの要望には応えてくれるが、先方から進んで実験結果の報告や相談はなかった。すなわち、何となくお客さんのように扱ってくれている気がした。

時間が経って少し LANL での研究生活になれてくると、このままではだめだと思った。そこで、現場実験への参加や現場実験結果の解析を積極的に行った。ある日、フェントンヒルで、注水実験が行われた。一定の流量で水を送り、そのときの水圧を記録していた。フラクチャの透水性が、水圧に反映するので、貯留層形成の解析には重要なデータである。水圧は、ペンレコーダーに記録されていたが、当時信頼性に欠けるので、配管にセットされたブルドン管圧力計（メーカー名は忘れたが、信頼性の高い圧力計と言われていた）の数値を一定時間毎に記録し、ペンレコーダーの記録値を補正していた。送水は、朝から始まったが、夜になっても継続した。冬の雪の降る寒い日だったので、LANL の研究者も 1 人、2 人と現場を去っていき、ついにほとんどの研究者は現場にいなくなった。我々日本人だけが現場に残り、圧力計の記録をとり続けた。

我々だけが、夜に得られた水圧のデータを持つことになった。LANL の研究者が翌朝我々のところに来て、データを見せてほしいと言った。これまでと立場が逆である。我々は取得したデータを説明した。その日を機会に、LANL の我々に対する態度が変わった。先方から積極的に得られたデータを示し、相談に来るようになった。研究の世界でも、ギブアンドテイクの精神が重要であることを認識した。

5. 2. 4 日本企業の海外企業との慣習の違いとまじめさ

先日、エンジニアリング協会の機関誌に、「似て非なるもの、「Contract」と「契約」という記事を見つけた。それによると、日本でいう「契約」とは、単にそこに書かれている取引条件に合意するだけでなく、お互いに礼節を尽くし、双方の立場を理解・尊重しつつ、理想的な取引関係をつくろうという趣旨が含まれている。これに対して、

「Contract」とは、トラブル回避・解決のために、お互いにどう行動するかは Contract に書いてあることだけに割り切ろうという伝統から来ている商慣習であると書かれていた。地下を相手に仕事をしていると、例えば坑井内に計測器を入れた後で回収しようとする引っかけり、すぐに回収できないことなど、トラブルが起こる可能性が高い。このような偶発事故に対処するため、LANL では 15% の予算を Contingency と称して自動的に上乗せしていた。フェントンヒルでは、業者の作業中、不慮の事故が起こって作業が中断することが何回かあった。このとき、業者は「Contract に従って作業を行っているの、自分には非がない。」と言って作業を切り上げていた。これに対して LANL は、この

不慮の事故に対処するために、専門の業者と **Contract** した。とにかく「**Contract**」社会である。

フェントンヒルの地下は、高温・高圧に晒されているため、あるとき坑井の保護のために入れているケーシングパイプが破損し、取り替えなければならなくなった。長さ 3,000 メートルにも及ぶパイプである。信頼性の高いパイプを購入するため、LANL は日本、アメリカ、ドイツのケーシングパイプについて、性能評価を行った。その結果、日本製とドイツ製のパイプが性能を満足していると判断し、両国の企業に応札するよう手配した。実験をできるだめスムーズに進めるために、納期を非常に短く設定してあった。この結果、ドイツの企業が落札した。LANL で調達担当者が、「日本の企業は、納期が短いので対応できないと言って降りた。ドイツの企業も納期に間に合わないことは分かっていたが、**Contract** を見て、納期に間に合わないときどのような罰則があるかを調べ、罰金を払ってでも受注した方が徳であると判断したようだ。日本の企業はまじめだ。」とささやいてくれた。海外に進出するときは、「**Contract**」をよく理解する必要があるようだ。

5. 2. 5 沈黙は無知

私は、科学技術庁の長期留学制度で、1972 年にアメリカ地質調査所 (USGS) で地震予知のための地圧測定を行ったことがある。そのときの上司は、フィリピン出身の研究者であるデラクルツ氏であった。10 年後、デラクルツ氏が LANL から研究受託を受けるための申請を行った。LANL の研究者から「デラクルツ氏に対して、これからヒアリングをするので同席しないか」との話があった。同席して話を聞くと、提案内容はよく、特にヒアリングで質問するようなこともなかったの、黙っていた。ヒアリング後に、LANL の研究者から「話の内容が理解できなかったのか？」と聞かれた。アメリカでは、とにかく思ったことを何か言わなければならないと実感した。

アメリカの大学では、**Verbal Culture** (言葉で自分の考えを他人に伝える文化) が重要なカリキュラムとのことを聞いた。日本では「沈黙は金なり」という言葉がある。自己主張の強いアメリカでは、日本式の考えは通用せず、「沈黙は無知なり」である。

6. IEA 地熱実施協定高温岩体タスク部会

6. 1 タスク部会の立ち上げと実施

1981 年に始まった LANL における IEA 高温岩体地熱エネルギー実施協定が 1986 年に終了した後、IEA において地熱に関する実施協定は途絶えていた。1995 年頃から地熱に関する実施協定を再び立ち上げようという機運がヨーロッパを中心に高まった。パリの IEA 事務局において、年数回の作業部会が持たれた。ここでの実施協定は、LANL における高温岩体地熱エネルギー実施協定とは異なり、タスクシェアリング方式によって各国が互いに協力しようというスキームである。議論の中心となったのは、地熱実施協定のなかに、どのようなタスク部会を設け、どのように活動するかであった。

私は、HDR タスク部会を立ち上げることにした。タスク部会といえ IEA の実施協定として設けるには、最低 3 カ国の参加が前提になる。2 カ国だけだと、IEA のもとではなく、互いに協定を結んで活動すればよいとの発想である。

この頃、HDR は岐路に立たされていた。アメリカのフェントンヒルプロジェクトは、1992 年に終了していた。また、1977 年に始まったイギリスのコーンウォール HDR プロジェクトも 1991 年に終わった。その時点で、HDR に取り組んでいたのは、EU のもとでフランスとドイツ共同のソルツプロジェクトと日本の肘折プロジェクトである。高温岩体タスク部会立ち上げに向けて、各国に参加を要請した。アメリカは、フェントンヒルプロジェクトが終了したこともあり、あまり積極的ではなかった。イギリスも自国内のプロジェクトが終わり、研究者をソルツプロジェクトに派遣している程度であった。その時点で、海外で唯一 HDR プロジェクトを進めているフランスとドイツは、積極的でなかった。フランスはパリに IEA 事務局を有しながら、当時 IEA の活動に対して消極的であった。ドイツは、新たな IEA 協定には参加しないという政府の方針が示されていた。ソルツプロジェクトを運営している EU も、1993 年に設立されてから、IEA のプロジェクトに EU として参加した経験がなかったので、態度を決められなかった。オーストラリアは、将来 HDR プロジェクトを立ち上げる計画を立てている状態であり、スイスも HDR に興味を示していたが、プロジェクトはなかった。

このような状況の下で、まずアメリカに参加を依頼した。フェントンヒルの国際共同研究プロジェクトに参加しているときのアメリカ・エネルギー省 (DOE) の地熱担当者であるジェラシック氏が、1996 年ころに再び地熱関連部署に戻ってきていた。そのような人脈もあり、アメリカが参加に同意してくれた。EU で地熱を担当していたガーニッシュ氏は、フェントンヒルで知り合ったこともあり、EU として初めて IEA の実施協定に参加してくれた。その後、スイスが将来 HDR を始める可能性があるとのことから参加の意を表した。イギリスは、当時 HDR プロジェクトを実施していなかったが、将来のことを考え、高温岩体タスク部会に参加して情報収集を進めることになった。これで、日本、アメリカ、イギリス、スイス、EU の参加が得られ、高温岩体タスクを立ち上げることができた。その後、オーストラリアも参加することになった。1997 年 3 月仙台において、IEA 地熱実施協定が正式に発足した。この実施協定のもとで、「地熱エネルギー開発による環境影響」、「高温岩体」、「深部地熱資源」の 3 つのタスクが承認された。高温岩体タスクを立ち上げるに至って、人脈がいかに大事であることを痛感した。

高温岩体タスク部会には、4 つのサブタスク、「サブタスク A：高温岩体の経済性モデル(リーダーはアメリカ)」、「サブタスク B：高温岩体技術への従来地熱エネルギー技術の応用(リーダーはアメリカ)」、「サブタスク C：高温岩体データの収集・処理(リーダーはスイス)」、「サブタスク D：貯留層評価(リーダーは日本)」が設けられた。この実施協定

は、2002年まで続いたが、私は2000年に資環研を退職したので、タスクリーダーは松永烈氏に引き継ぎ、その後山口勉氏に引き継がれた。

6. 2 コーンウォールプロジェクトとサッチャー英元首相

サッチャー英元首相が1991年9月につくばを訪れた。いくつかの研究所を訪問したが、資環研もその一つであった。私は当時企画室長をしており、サッチャー元首相に資環研の研究概要を説明することになった。

イギリスでは、アメリカに引き続き、1977年から高温岩体の研究を開始した。コーンウォールの花崗岩の採石場で、ケンボーン鉱山大学が中心となって、高温岩体の研究を行った。深さ2,600メートルに貯留層をつくり、熱エネルギーを抽出した。注入した水の80%を回収するなど、目的とする結果が得られた。しかし、岩盤の温度が105℃と低かったため、別に設けられた評価委員会で経済的に成り立たないと判断され、1991年にプロジェクトは終了した。コーンウォールプロジェクトの関係者とは、情報交換等を行うなど密接な関係にあった。

サッチャー元首相は、化学が専門なので、フロンの分解、人工光合成、下水汚泥の油化に関する実験室を見ていただいた。地熱に関してはどの程度関心があるか分からなかったが、資環研の主要テーマであり、イギリスのケンボーン鉱山大学との研究協力があったため、研究所の概要説明の中で、そのときは終了していたがコーンウォールHDRプロジェクトについて説明した。サッチャー元首相は、非常に興味深そうな表情で説明を聞いていたのが印象的であった。その時点で、なぜ高温岩体に興味を示したのか、分からなかった。

2012年3月に、「マーガレット・サッチャー 鉄の女の涙」という映画が公開された。この映画を見て、サッチャー元首相はコーンウォール出身ということが分かった。コーンウォールのプロジェクトについて説明した際、なぜ興味を示したかを納得した。

しかし、コーンウォールプロジェクトの終了前に、サッチャー元首相がつくばに来られていたら、「コーンウォールプロジェクトをぜひ継続していただきたい」とのお願いができたのではないかと、後で残念に思った。だが最近イギリスでは、EGS（第7章で説明）プロジェクトとして、HDRが再び取り上げられることになった。

7. 肘折HDRプロジェクト

7. 1 肘折プロジェクトの経緯

サンシャイン計画(1993年からニューサンシャイン計画)のもとで、フェントンヒルでの国際共同研究に参加し、国内では岐阜県焼岳山麓でHDRの現場実験を行っていたが、1985年に現場を山形県大蔵村肘折に移し、日本で本格的なHDR研究開発が始まった

(Fig.13)。工業技術院サンシャイン本部からNEDOが委託を受け、さらにNEDOが地熱技術開発(株)(GERD)、石油資源開発(株)(SK)、電中所に研究を委託した。資環研に

においては、NEDO 地熱技術開発室に研究者が出向して肘折プロジェクトの運営に当たるとともに、基礎研究を実施し、その結果をもとに貯留層の解析を行った。

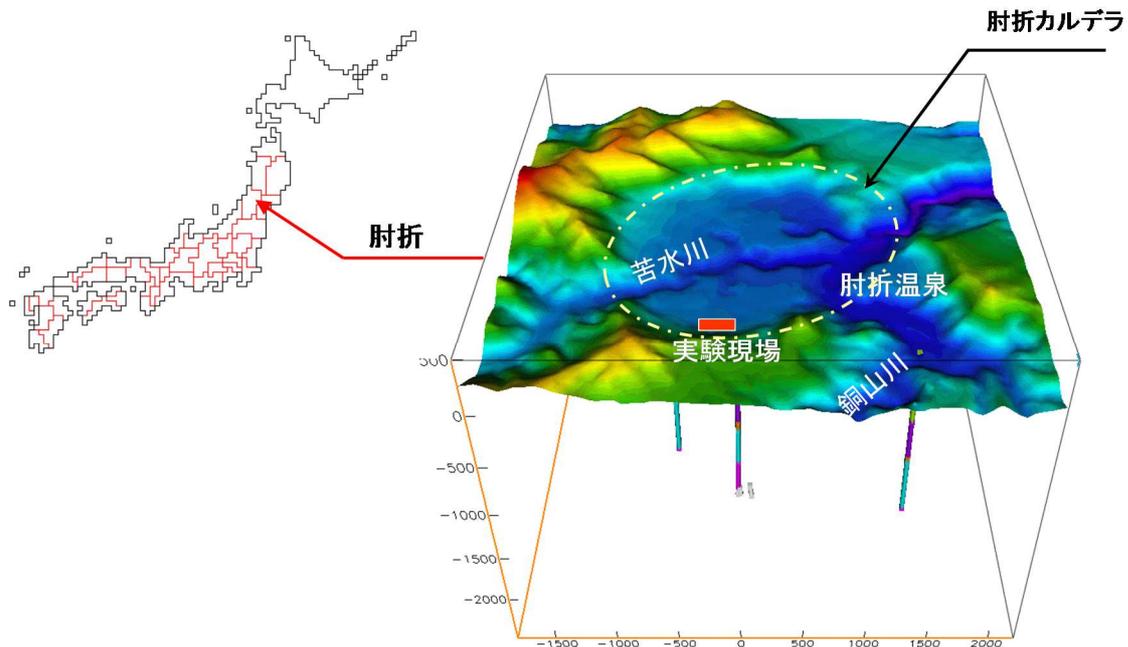


Fig.13 肘折 HDR プロジェクトの位置

肘折サイトで現場実験を行うに当たり、NEDO と GERD が、山形県と大蔵村に実験計画について説明した。その際、私も同行した。山形県と大蔵村はいずれも、現場実験を肘折で行うことを、好意的に受け入れてくれた。また、近くに肘折温泉の温泉組合に対して。ボーリングの許可が必要であったため、説明会を開催した。温泉組合の関心事は、地熱開発によって温泉水が減少しないかどうかである。HDR は、地下にある熱水や蒸気を取り出すのではなく、地表から水を注入してそれを暖めて回収するので、温泉には影響を与えないとの説明を行い、了解を得た。

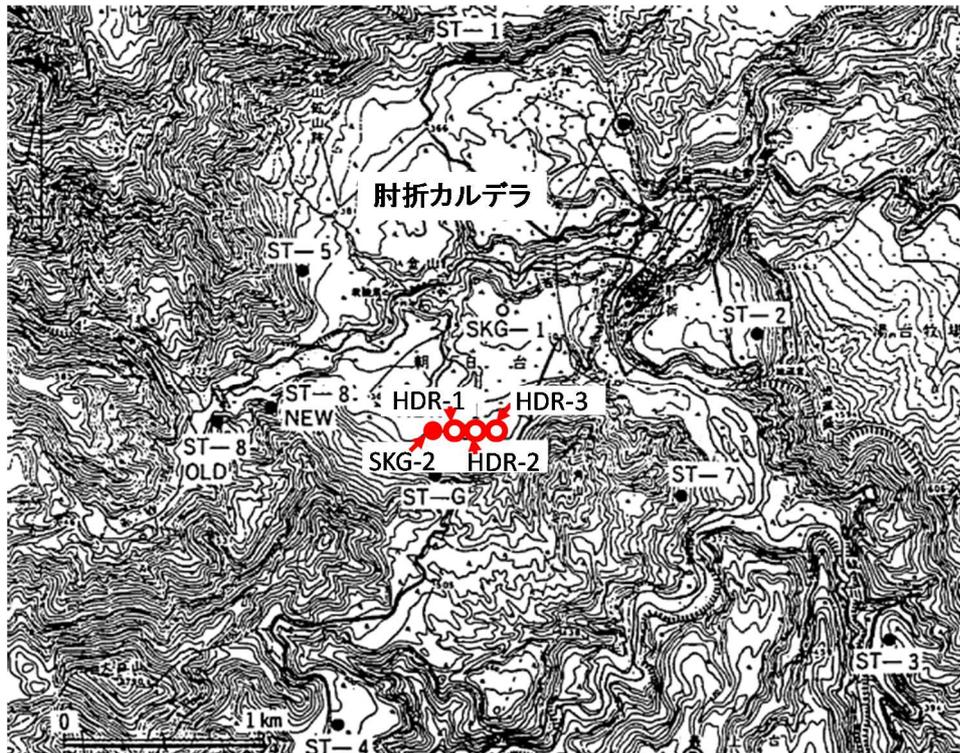


Fig.14 肘折プロジェクトの坑井配置図

(●は既存坑井の SKG-2、○はプロジェクトによって掘削した坑井)

肘折カルデラでは、以前 SK が熱水型地熱探査のため、2本の坑井(SKG-1とSKG-2)を掘削した。特に、SKG-2は深さ1,800メートルで、岩盤温度が250℃に達したが、地熱貯留層は見つからなかった。そこで、サンシャイン本部は、ここで既存の坑井を利用してHDRの現場実験を行うことを決めた (Fig.14)。

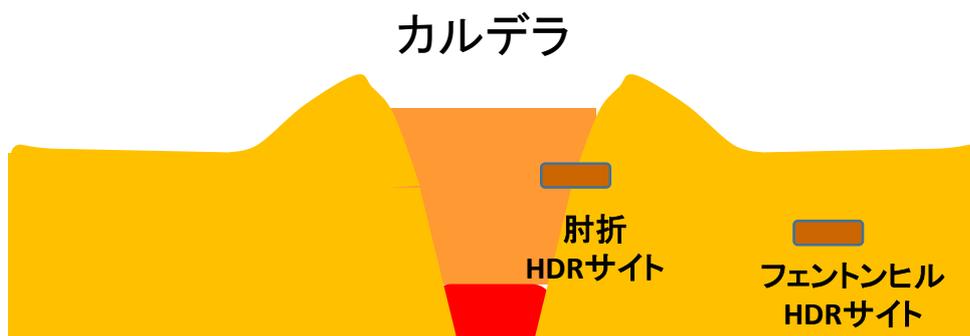


Fig.15 カルデラと肘折サイトとフェントンヒルサイトの位置関係

Fig.15に、肘折サイトとフェントンヒルサイトのカルデラに対する位置関係を示す。フェントンヒルサイトは先に述べたように、カルデラの熱が拡散して暖められた比較的健全な岩盤を対象にしているのに対し、肘折サイトはカルデラの南端に位置し、温度は高い

が、多くのフラクチャが存在する岩盤を対象としている。肘折では、水圧破砕によって形成されるフラクチャは、既存の亀裂に大きく影響を受けることになる。

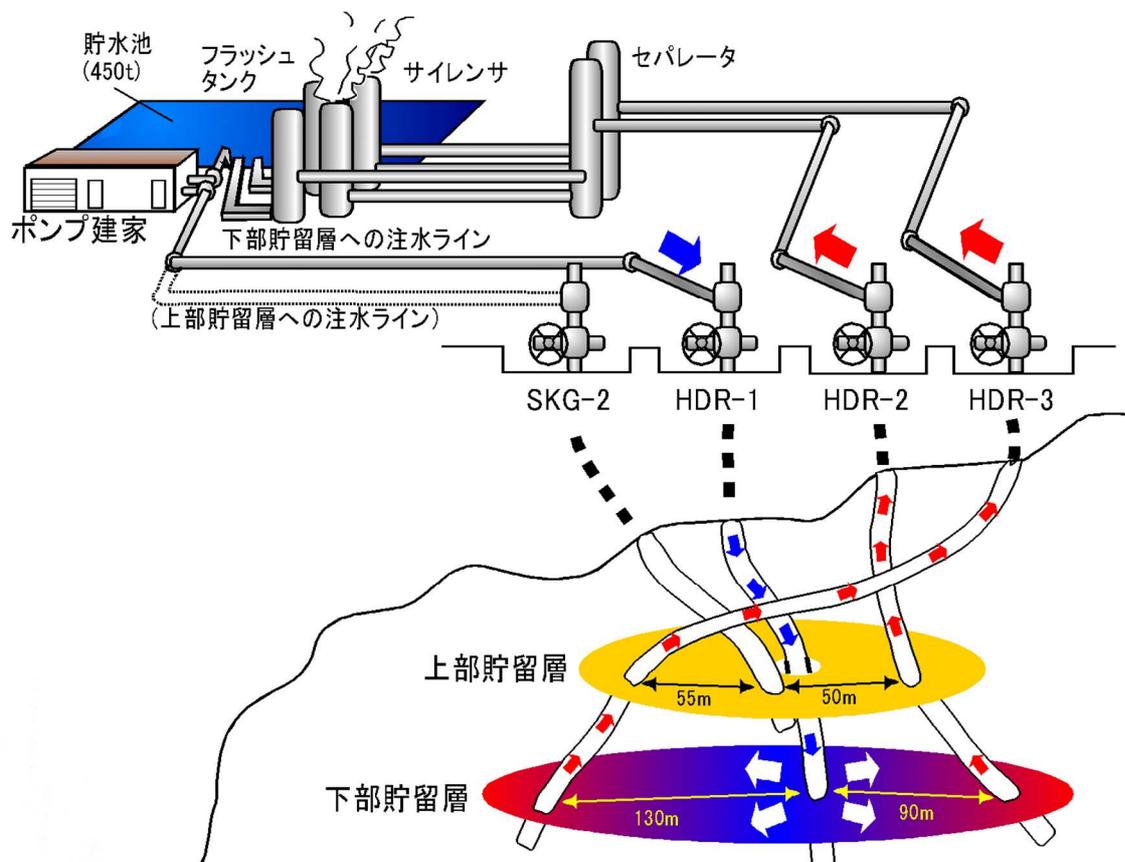


Fig.16 肘折 HDR プロジェクト実験場の坑井と配管および貯留層の概念図

IEA 高温岩体地熱エネルギー実施協定で得た成果を踏まえて、かつ焼岳山麓での実験の成果を踏まえ、1985年に肘折プロジェクトを開始した。既存坑井である SKG-2 に水圧破砕によりフラクチャを成長させた後、1987年に新たな坑井 HDR-1 を生産井として掘削した。これら 2 本の坑井を用いて、1,800メートルに設けられた上部貯留層(温度 253℃)からの熱抽出実験を行った。SKG-2 と HDR-1 の距離は 40 メートルである。1989年には HDR-2 を SKG-2 から 50 メートルの位置に掘削し、1990年にはさらに 3 本目の生産井 HDR-3 を SKG-2 から 55 メートルの位置に掘削した。1991年に SKG-2 を注入井、HDR-1、HDR-2、HDR-3 を生産井として、90 日間にわたる熱抽出実験を行った。この結果、回収率(注入した水量に対して生産井から回収される熱水の割合)は 78%、得られた熱エネルギーは、8.5MW であった。さらに高温部での貯留層の開発を目指し、1988年に深さ 2,205 メートルまで掘り下げた HDR-1 を用いて、1992年に下部に貯留層をつくるために水圧破砕を行う計画を立てた。しかし、HDR-1 をそのままにして水を送ると、深さ 1,800 メートルで、上部貯留層に流れ込んでしまう。水が上部貯留層に流れ込まないようにするため、IEA の共同研究で開発された PBR (Fig.12 参照) を HDR-1 上部貯

留層より深い位置に設置し、2,200メートル付近で水圧破砕を行った。この作業は成功を収め、IEA 共同研究の成果が生かされた。その後、HDR-2 と HDR-3 を 2,300メートルの深さまで掘り下げた (Fig.16)。坑底の温度は、270℃ に達した。地下に形成されたフラクチャを確認するために(フラクチャマッピングという)、複数の高精度地震計を設置して、その位置を求めた。水の力によって岩盤が破壊する時や亀裂が滑る時に発生する破壊音 (AE) を地震計に計測し、震源を求める方法である。得られて震源や AE の特性を把握することによって、フラクチャのマッピングを行った。HDR-1 を用いて水圧破砕を実施した時に得られた AE をはじめ、これまで実施された水圧破砕によって得られた AE によるフラクチャマッピング結果を Fig.17 に示す。

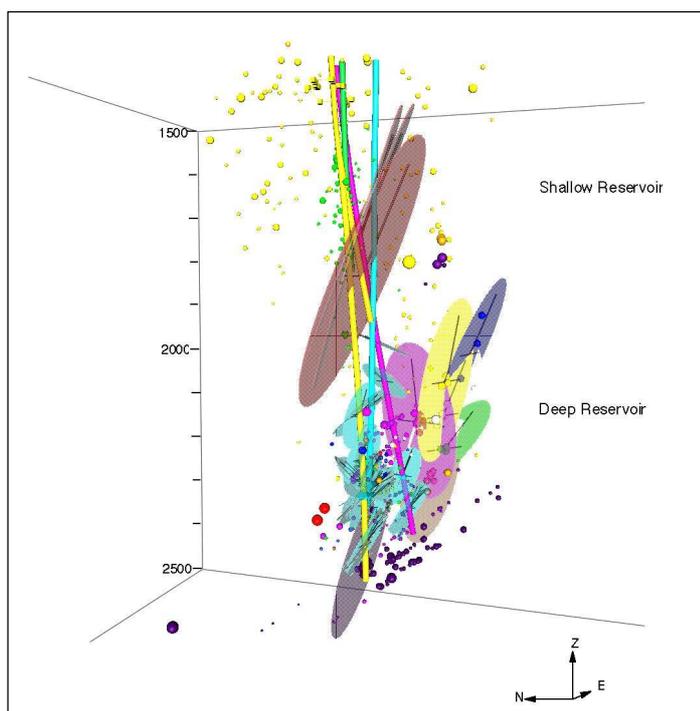


Fig.17 微小地震の観測によって得られた貯留層マッピング結果

このマッピング結果をもとに、生産井となる HDR-2 と HDR-3 がフラクチャを貫通し、かつ HDR-1 との距離がそれぞれ 90 メートルと 130 メートルになるよう、これらの坑井を掘り下げた。1995 年に HDR-1 を注入井、HDR-2 と HDR-3 を生産井とする下部貯留層からの熱抽出実験をそれぞれ 25 日間実施した。この結果、熱水の回収率は 40%、熱出力は 9MW であった。1996 年には、回収率の改善を目的に、注入井と生産井間のフラクチャの水の流れを良くし、さらに注入井に送る水量を少なくして熱抽出実験を 30 日間実施したところ、回収率は 75% に向上した。

2000 年から 2002 年にかけて、上部貯留層と下部貯留層の 2 つの貯留層からの熱エネルギー抽出実験を 550 日間にわたって実施した。そのときの現場の様子を Fig.18 に示す。さらに最終的にはバイナリー発電実験も行った。このときの熱水の回収率は 55%、

電気出力は 50kWe であった。このように 250℃ と 270℃ という高温の岩盤に 2 つの独立した貯留層をつくり、長期間にわたって熱エネルギーを抽出し、さらにこの熱を利用してバイナリーシステムによる発電を行ったのは、当時世界で初めてであった。



Fig.18 肘折実験現場 地下から回収された熱水から分離された蒸気が見られる

7. 2 肘折プロジェクトで得られた成果と日本独自の課題

プロジェクトは、2002年に終了した。17年間にわたって実施された肘折プロジェクトで得られた知見や資料を、後世において活用可能な形で残すことを目的に、2004年6月に高温岩体技術検証調査委員会（委員長：東北大学 新妻弘明氏）が、「次世代地熱開発技術の現状と将来－肘折高温岩体プロジェクトの検証－」と題する報告書をまとめた。この委員会には、5つのサブグループが設けられた。オーバーオールシステムデザイン（リーダー：産総研 相馬宣和氏）、フィールドキャラクタリゼーション（リーダー：東北大学 土屋範芳氏）、貯留層形成（リーダー：東北大学 伊藤高敏氏）、循環と抽熱（リーダー：産総研 山口勉氏）、モニタリング（リーダー：産総研 當舍利行氏）である。委員会のメンバーは、産総研、東北大学の他、九州大学、電中研、GERD、SK、三井金属資源開発(株)、日本重化学工業(株)、(株)リッチストーンなどである。この報告書は、参考文献1を参照されたい。

肘折の成果と課題は、上記報告書に詳しく述べられている。ここでは、私をはじめ多くの関係者が、最も重要な課題の一つと考えている回収率について述べることにする（Fig.19）。

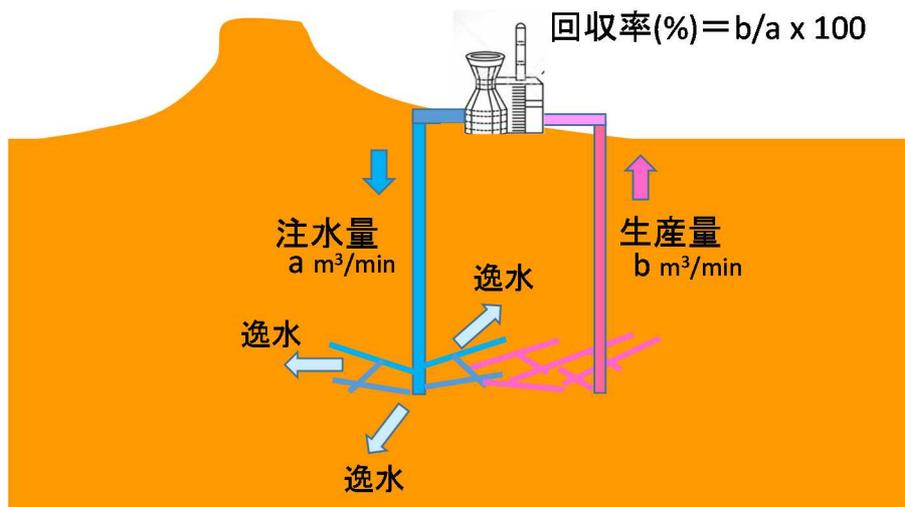


Fig.19 回収率の説明図

先に述べたように、HDR から熱エネルギーの抽出には、水を媒体としている。すなわち、地下に設けたフラクチャに水を流し込み、岩盤(地層)から熱を取り出して地表で回収する。先に述べたように、熱エネルギーを抽出するために、地表から注入井を通して高圧の水を流し込み、生産井から押し出して回収するのが、アメリカのフェントンヒルで採用された方法である。フェントンヒルのように、比較的健全な岩盤を対象とする場合、水圧破砕によってフラクチャは、天然の亀裂に支配されるが、熱抽出のために水を循環させると、系外に流出する水(逸水)は少なく、かなりの割合で生産井から回収できる。そのため、適切に注入井と生産井を配置すれば、生産井の数を最小限に抑えても、高い回収率が得られる。

一方、フランスのソルツプロジェクトの地層は、アメリカと違い透水性の高い天然のフラクチャが多く存在している。そこでソルツでは、高圧の水を流し込んでフラクチャを成長させた後、生産井からダウンホールポンプを使って熱水を汲み上げる方式を採用した。注入井に水を注入しているが、主として地下から回収される水を補充する目的である。そのため、高い回収率が得られている。

肘折の岩盤は、極端に言えばフェントンヒルとソルツの中間に位置する。現場はカルデラの南端に位置するため、天然の亀裂系が発達している。注入井と生産井との坑井間距離が離れているほど、岩盤から得られる熱エネルギーは大きくなり、ちなみにフェントンヒルプロジェクトとソルツプロジェクトの坑井間距離は、数 100 メートル以上である。肘折においては、対象とする岩盤がフェントンヒルと異なっており、また逸水の恐れもあり、このような岩盤に対して初めて挑戦することから、安全性を見て坑井間距離を上部貯留層では 50 メートル、下部貯留層では 90~130 メートルに設定した。肘折では、何回か

水を循環させて熱抽出実験を行っている。上部貯留層において、注入井 1 本に対し、生産井が 1 本の場合、坑井間距離が短いにもかかわらず、回収率は 30～40 程度となった。そこで、生産井を 2 本あるいは 3 本に増やすと、70%以上の回収率が得られた。

このように、複数の生産井を設けることによって、回収率を上げることができる。しかし、生産井の数が増えると、坑井の掘削コストが高いため（一般の地熱開発で、掘削コストが全開発費の 50%程度を占めるといふ報告もある）、経済性に影響を与える。実用化段階では、複数の生産井を設ける場合、より広い範囲から熱を抽出するとの観点から、Fig.20 に示すように、坑井を配置することも考えられる。注入井が 1 本の場合、生産井の数は 3 本必要となるが、生産井を 2 本設けることにより、2 倍の熱エネルギーを取り出すことができ、かつ生産井を 1 本増やせばよいことになる。

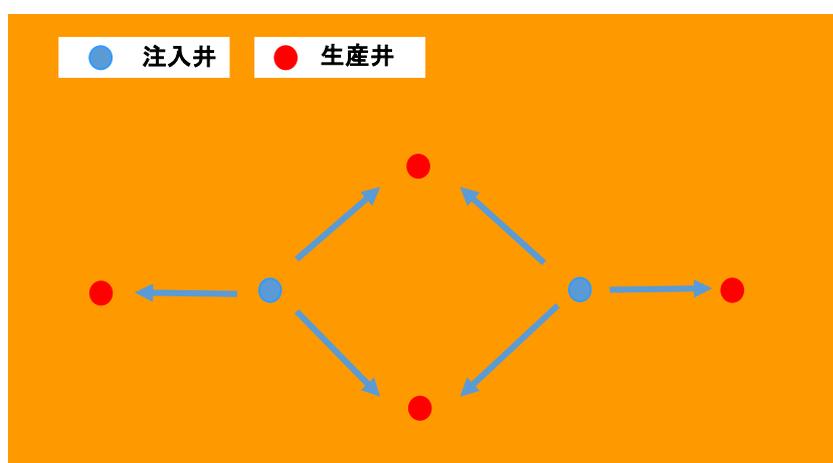


Fig.20 複数の注入井と生産井の配置

もう一つの考えは、ソルツプロジェクトのように、ダウンホールポンプを用いて、熱水をくみ出す方法である。肘折プロジェクトでもその導入を考えたこともあるが、温度が問題であった。ソルツは、深さ 5,000 メートルでも岩盤温度は 200℃ 程度である。これに比べて肘折は、深さ 2,200 メートルで 270℃ にも達する。このような高温で使用できるダウンホールポンプは、当時開発されていなかったため、その使用を断念した。今後、このような高温で使用できるダウンホールポンプが開発されれば、回収率の点から考えて、筆者はぜひ採用してみたい技術であると考えている。

8. HDR の現状と将来 – EGS としての展開 –

8. 1 HDR から EGS へ

もともと HDR の概念が提唱された時には、LANL の研究者はフェントンヒルの現場のように高温(Hot)で、水がほとんど存在しない(Dry)な健全な岩盤(Rock)を対象としていた。LANL に続いて始められたイギリスのコーンウォールプロジェクトも、採石場の下

部を開発したこともあり、同じように水がほとんど存在しない岩盤（既存の亀裂は発達しているが）を対象とした。

しかし、その後開始された肘折プロジェクトやソルツプロジェクトでは、亀裂が多く、自然に噴出していないが、地下には多くの熱水が存在している岩盤を対象としている。したがって、もはや Dry ではない。しかし、いずれのプロジェクトも英語では Hot Dry Rock プロジェクトと称していた。HDR の概念が日本に紹介された時、誰が命名したか定かではないが「高温乾燥岩体」ではなく、「高温岩体」と名付けた。高温岩体は、まさにフェントンヒルプロジェクトから肘折プロジェクトまで、広範囲な概念を表すような適切な表現だったと言える（Fig.21）。

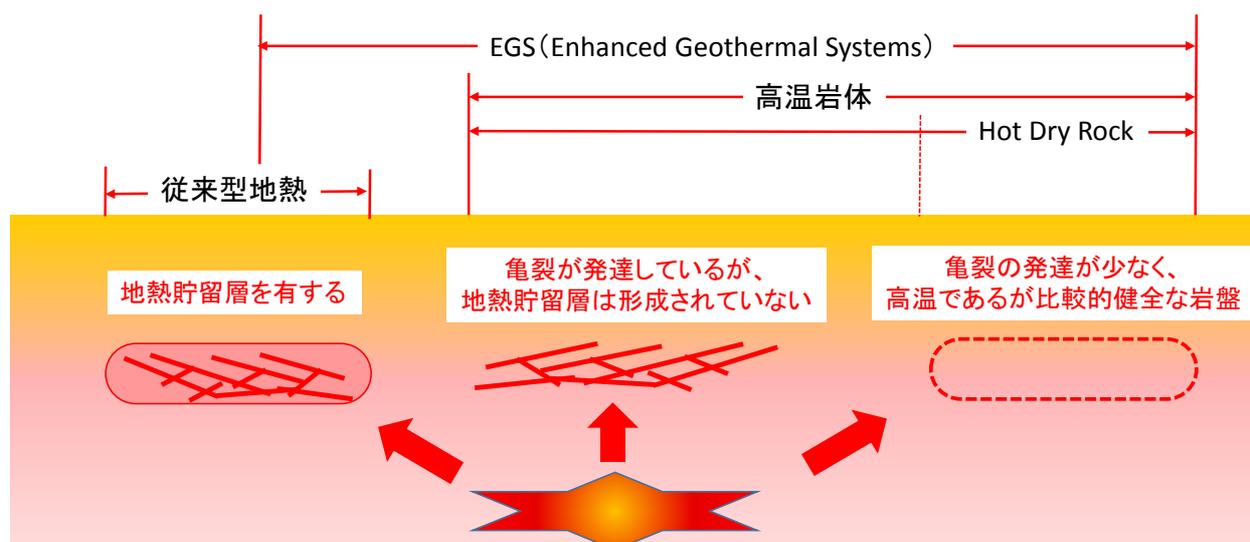


Fig.21 HDR、高温岩体、EGS の開発対象岩盤のイメージ

HDR プロジェクトは、1986 年に開始されたソルツプロジェクト(フランス)と、2002 年に始まったクーパーベースプロジェクト（オーストラリア）は、現在も継続して実施されている。しかし、アメリカのフェントンヒルプロジェクトが 1992 年に終了し、肘折プロジェクトと雄勝プロジェクトが 2002 年に終了した後、中心となるべき日本とアメリカにおいて、HDR は停滞期を迎えた。

2006 年に、マサチューセッツ工科大学のジェフテスター氏が EGS（Enhanced Geothermal Systems あるいは Engineered Geothermal Systems）という概念を提唱した。EGS は Fig.21 に示すように、これまでの HDR の概念を更に広め、従来型地熱にも適用範囲が及ぶ概念である。すなわち、EGS とは、何らかの人工的あるいは工学的な技術を地熱資源に適用し、地熱エネルギーを採取しようとする考えである。

従来型地熱貯留層に対する EGS の適用例を、Fig.22 に示す。すなわち、従来型地熱貯留層を利用して発電を行っているところで、生産量が減少し、あるいは開発した地熱貯留

層の生産量が十分ではない場合、地表から水を供給して、生産量を増やそうとする考えである。

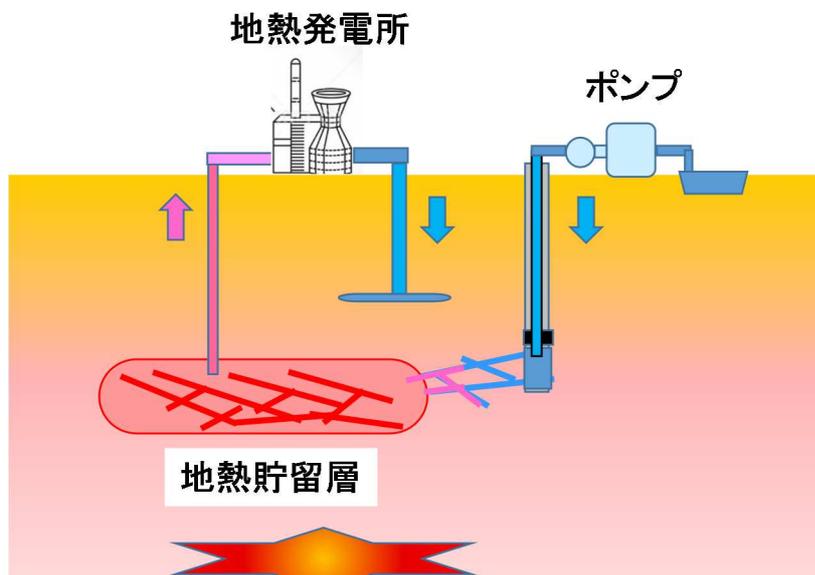


Fig.22 EGS の従来地熱貯留層への適用例

この概念そのものは、特に新しいわけではなく、1990年代 NEDO においても、EGS を「可採量増大技術」プロジェクトと称して立ち上げたことがあった。EGS の技術そのものは、これまでの HDR 開発で使用されてきた技術と共通点が多い。しかし、この概念の導入対象となる現場は非常に多い。それ故、最近 HDR を含めた EGS が世界中で注目されることとなった。

地球温暖化問題に関係して、再生可能エネルギーの重要性が世界的に強調されたこともあり、EGS は世界各国で導入され始めた。これまで HDR プロジェクトとして実施されてきたフランスのソルツプロジェクト（ドイツ、フランス、イタリア）やオーストラリアのクーパーベースプロジェクトは、EGS プロジェクトとして継続されている。アメリカにおいては複数の EGS プロジェクトが実施されている。日本でも、福島県柳津西山地熱発電所において、JOGMEC が主体となり、GERD、奥会津地熱(株)、産総研による EGS 技術の検証実験が始まった。さらに、韓国や中国においても EGS プロジェクトが行われている。

我々が培った HDR が EGS という広い概念に組み込まれ、世界で大いに発展している。さらに、HDR で開発された技術が、天然ガスやオイルシェルの生産のためにも使われている。

8. 2 HDR のきずな

アメリカのフェントンヒル HDR プロジェクトや肘折 HDR プロジェクトには、研究機関、大学、企業などから多くの研究者や技術者が参加した。これらの研究者や技術者は、今でも年 1 回程度集まり、旧交を温めるとともに、情報交換を行い、EGS を始め HDR で培われた技術開発を進めている。Fig.23 に HDR 関係者の懇親会の写真を示す。今後、このような機会をさらに利用し、我々は EGS (HDR) の発展を目指している。



Fig.23 HDR 関係者の集い

9. 謝辞

HDR プロジェクトは、日本、アメリカ、ドイツ、フランス、イギリス、スイス、オーストラリアなど多くの国がお互いに協力し、実施されてきた。

ここで、HDR に参加した研究者や技術者は、数え切れないほどに達するので、参加した機関のみを紹介する。日本では、まずサンシャイン計画を実施した工業技術院サンシャイン本部、さらにサンシャイン本部から委託を受け運営管理を行った NEDO 地熱技術開発室があげられる。研究機関としては、工業技術院の資環研、地調の他、独自の HDR プロジェクトを実施した電中研がある。大学は、阿部総長を筆頭に多くの研究を実施した東北大学を始め、九州大学、京都大学、山口大学などがある。企業としては、GERD。SK

(子会社を含む)、三井金属鉱山が中心となって HDR を推進し、さらに東京電力、鹿島建設、清水建設、大成建設、間組、飛鳥建設などからの協力があつた。

海外との協力も大いに進めた。LANL では多くの研究者の協力を得た。名前を挙げればきりがないので省略するが、実施協定終了後も協力関係は継続した。また、フェントンヒルプロジェクトを推進したアメリカ・エネルギー省にも高温岩体タスクの発足の際、協力を得た。EU もまた、高温岩体タスクに EU として初めて IEA の実施協定に参加してくれた。フランスの BRGM、ドイツのルール大学、イギリスのケンボーン鉱山大学、スイスのチューリッヒ大学と Polydynamics Engineering、オーストラリアの国立科学産業研究機構(CSIRO)や Geodynamics などの協力を得た。

これらの機関の関係者に深く感謝の意を表する。

参考文献

1. 次世代地熱開発技術の現状と将来 – 肘折高温岩体プロジェクトの検証 –
産業技術総合研究所、2004 年 6 月
2. 松永烈、高温岩体貯留層評価のためのトレーサ試験の開発と肘折高温岩体への適用
東京大学学術機関レポジトリ、<http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/bitstream/2261/50253/1/K-216084-1.pdf> 2004 年
3. D.V.Duchane、Hot Dry Rock Heat Mining: An Advanced Geothermal Energy Technology、Los Alamos National Laboratory、LA-UR-91-2749 1992
4. 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、電力中央研究所、電中研レビューNo.49、2003 年
5. Future of Geothermal Energy –Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century、Idaho National Laboratory、INL/EXT-06-11746、2006
6. 「高温岩体発電システムの技術開発 (要素技術の開発)」事後評価報告書、新エネルギー・産業技術総合開発機構、産総研、技術評価委員会、2003 年、
<http://www.nedo.go.jp/content/100089521.pdf>
7. D. Brown、The US Hot Dry Rock Program -20 Years of Experience in Reservoir Testing- Los Alamos National Laboratory、<http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1995/4-Brown.pdf>
8. Potential of Hot-Dry-Rock Geothermal Energy in the Eastern. United States、US Geological Survey、USGS Open-file Report 93-377、1993
<http://rglsun1.geol.vt.edu/NGDS/Other/Potential%20of%20Hot%20Dry%20Rock%20Geothermal%20Energy%20in%20the%20Eastern%20US.pdf>

9. Z.V. Dash et al. Hot Dry Rock Geothermal Energy Development Program Annual Report Fiscal Year 1988, LA-UR 88-7193,
<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/896951-dS8iwy/>
10. 厨川道雄、IEA 地熱実施協定と高温岩体タスクの最近の動向、地熱技術、Vol.23、No.2&2、1998 年
11. 厨川道雄他、IEA 高温岩体タスク部会の活動について、地熱技術、Vol.2 No.3&4、1999 年
12. 厨川道雄、高温岩体の思い出(国際協力を中心に)、地熱技術、Vol.37, No.1&2、2012 年
13. 速水博秀、高温岩体発電技術の現状と今後の課題、鉄と鋼、Vol.73、No.15、1987 年
14. 山口勉他、高温岩体抽熱システムの評価のための現場試験とモデル化、資源と素材、Vol.106、1999 年
15. 天満則夫他、長期循環試験の数値シミュレーション結果による肘折高温岩体貯留層内の流動特性、日本地熱学会、Vol.23、No.4、2001 年
16. 欧米における地熱エネルギー利用の新技术の開発状況、NEDO 海外レポート No, 1001 2007 年 (<http://www.nedo.go.jp/content/100105018.pdf>)
17. “The Future of Geothermal Energy, The Future of Geothermal Energy Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century” アイダホ国立研究所、2006,
(<https://mitei.mit.edu/system/files/geothermal-energy-full.pdf>)

受理日：2016年3月3日