

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

2004年

松永 烈

# 目 次

	頁
Synopsis .....	v
第1章 緒 論 .....	1
1-1 序 .....	1
1-2 本論文の構成 .....	3
第2章 高温岩体開発の現状および技術的課題と肘折高温岩体開発 .....	5
2-1 緒言 .....	5
2-2 高温岩体地熱エネルギーの概念と資源量 .....	5
2-3 高温岩体の開発技術 .....	10
2-3-1 開発技術の概要 .....	10
2-3-2 破碎技術 .....	11
2-3-3 導通技術 .....	12
2-3-4 循環・抽熱技術 .....	13
2-3-5 貯留層評価技術 .....	15
2-4 各国における高温岩体の開発状況 .....	17
2-4-1 世界各国の高温岩体開発の歴史 .....	17
2-4-2 フランスでの現場実験 .....	21
2-4-3 アメリカでの現場実験 .....	23
2-4-4 イギリスでの現場実験 .....	24
2-5 肘折高温岩体の開発 .....	26
2-6 流体の地化学調査とトレーサ試験 .....	30
2-6-1 貯留層における流動評価のための地球化学的手法 .....	30
2-6-2 流体の地化学調査 .....	30
2-6-3 トレーサ試験 .....	31
参考文献 .....	33
第3章 トレーサの選定と肘折高温岩体への適用性の検討 .....	44
3-1 緒言 .....	44
3-2 無機トレーサの適用性検討 .....	45
3-2-1 室内における加熱実験方法 .....	45
(1) 対象元素と試薬 .....	45

(2) 加熱試験と分析 .....	45
3-2-2 実験結果と考察 .....	46
(1) ヨウ素および希土類元素 .....	46
(2) モリブデン、タングステン、ゲルマニウムなど .....	48
3-2-3 肘折現地試験 .....	50
(1) 試験方法 .....	50
(2) 試験結果 .....	51
3-2-4 無機トレーサの選択結果 .....	55
3-3 蛍光染料の適用性検討 .....	56
3-3-1 室内試験 .....	56
(1) 蛍光染料トレーサと実験方法 .....	57
(2) 実験結果 .....	58
3-3-2 肘折及び葛根田での現場試験 .....	62
(1) 坑井掘削中の試験 .....	62
(2) 坑井内長期放置試験 .....	67
3-4 結論 .....	71
参考文献 .....	72
 第4章 坑井掘削中のトレーサ試験と移流分散 .....	 74
4-1 緒言 .....	74
4-2 坑井掘削中のトレーサ試験 .....	75
4-2-1 試験の概要 .....	75
4-2-2 試験方法 .....	76
4-2-3 試験結果 .....	77
4-3 坑井内におけるトレーサの移流分散評価 .....	81
4-3-1 トレーサの一次元移流分散 .....	81
4-3-2 移流分散曲線による分散率の評価 .....	82
4-4 考察 .....	86
4-4-1 得られた分散率と既存値との比較 .....	86
4-4-2 貯留層へ流入するトレーサ濃度推定 .....	87
4-4-3 トレーサ試験による坑内状況把握 .....	90
4-5 結論 .....	91
参考文献 .....	91
 第5章 上部循環試験中のトレーサ試験と滞留時間分布法による貯留層評価 .....	 93
5-1 緒言 .....	93

5-2 滞留時間分布解析による貯留層評価 .....	94
5-3 上部貯留層開発中のトレーサ試験と滞留時間分布解析 .....	97
5-3-1 初期循環時の試験 .....	97
(1) 試験方法 .....	97
(2) 間欠的生産と流体の溶存成分濃度変化 .....	100
(3) 濃度変化を基にした間欠的生産の補正 .....	102
(4) 循環試験 (Exp.8805) におけるトレーサ試験の RTD 解析 .....	107
5-3-2 2坑井安定生産時の試験 .....	108
(1) 試験方法 .....	108
(2) 滞留時間分布法解析 .....	109
5-4 3ヶ月循環試験のトレーサ試験と滞留時間分布解析 .....	112
5-4-1 試験方法 .....	112
5-4-2 試験結果と流動評価 .....	115
5-5 結言 .....	121
参考文献 .....	123
 第6章 数値シミュレーションによる3ヶ月循環中のトレーサ応答と貯留層の評価 .....	125
6-1 緒言 .....	125
6-2 熱・物質移動有限要素法シミュレーションコード .....	126
6-3 3ヶ月循環試験中のトレーサ応答評価 .....	129
6-3-1 評価方法 .....	129
6-3-2 流量と温度の変化 .....	130
6-3-3 熱交換面積の推定 .....	134
6-3-4 フラクチャ幅の推定 .....	139
(1) トレーサ応答のシミュレーション手順 .....	139
(2) シミュレーションによるマッチング結果 .....	140
6-4 3ヶ月循環によるフラクチャの経時変化 .....	142
6-4-1 フラクチャ形状 .....	142
6-4-2 フラクチャ形状の経時的な変化 .....	143
6-5 考察 .....	145
6-5-1 生産流体の温度変化を基にした貯留層評価の問題点 .....	145
6-5-2 複数の流路から生産するトレーサの検出 .....	145
6-5-3 個別のフラクチャの評価手法 .....	146
6-6 結言 .....	150
参考文献 .....	151

第7章 多坑井マルチフラクチャの流動評価 .....	154
7-1 緒言 .....	154
7-2 長期循環試験 .....	155
7-3 長期循環試験時のトレーサ試験 .....	157
7-3-1 試験方法 .....	157
7-3-2 光ファイバー蛍光光度計による連続測定 .....	159
7-3-3 試験結果 .....	160
7-4 滞留時間分布法によるデュアル循環の流動評価 .....	164
7-4-1 下部貯留層への注入循環時の流動状況 .....	164
7-4-2 デュアル循環時の流動状況 .....	167
7-5 結言 .....	175
参考文献 .....	176
第8章 結論 .....	178
エピローグー今後の高温岩体開発に向けて .....	181
謝 辞 .....	185

# Development of Tracer Testing Procedure and its Application at the Hijiori Hot Dry Rock Test Site

by Isao Matsunaga

## SYNOPSIS

After first oil crisis the Japanese Government have strongly supported researches and development of alternate energy sources of oil, such as solar, geothermal, wind, and coal liquefaction and gasification, under a national program named 'Sunshine Projects'. Hot Dry Rock (HDR) geothermal energy is one of promising energy sources due to its environmental amenities, widely distribution, and huge resource base. Hence a HDR energy research and development program was selected as a program under the Sunshine Projects since 1975.

After finishing small field experiments at a test site near Mt. Yakedake in the central Japan, a HDR R&D program was started in a small caldera at Hijiori in Tohoku district by the New Energy and Industrial Development Organization (NEDO) under the Sunshine project. The object of this program is to develop and test key technologies for the development of a HDR power generation system. During the first phase of the Hijiori program from 1985 to 1991, a reservoir was developed by hydraulic stimulations in a granitic basement at a depth of 1800 m. A three month circulation was successfully conducted to extract heat from the reservoir between an injection well SKG-2 and three production wells, HDR-1, HDR-2, and HDR-3. The thermal energy recovered from the reservoir reached about 8 MW. After accomplishment of the shallow reservoir, a deep reservoir at a depth of 2200 m had been developed in the second phase since 1992. After establishing a two reservoirs and multi-well system with two injection wells of SKG-2 and HDR-1 and two production wells of HDR-2 and HDR-3, a long term circulation test (LTCT) had been carried out about two years for demonstrating and evaluating performance of the Hijiori HDR system.

At each stage of development NEDO conducted circulation tests to evaluate the Hijiori reservoir. The characterization of the fluid flow and heat transfer behavior of an HDR reservoir is very important to predict reservoir lifetime. Beside measurements of flow, temperature, and pressure at surface, pressure-temperature-flow (PTS) logging, geochemical monitoring of circulation fluid, and microseismic monitoring had been conducted by NEDO to characterize the reservoir. We conducted tracer experiments for determining flow regime and its changes in the reservoir. Experimental techniques have been developed for conducting tracer experiments in a unique multi-fracture and multi-well HDR system at Hijiori. Residence time distribution (RTD) analysis and numerical simulation by FEHM are employed for characterizing flow regime in the reservoir.

In chapter 2, the HDR concept was introduced and technologies for development of HDR heat

extraction system were reviewed. R&D activities in the world and also at Japan were briefed. Afterward, R&D at the Hijiori test site was chronologically reviewed in detail. Finally, the importance of geochemical techniques which have been used to investigate HDR reservoir was introduced.

Selection of new tracers and also characterization of their thermal stability were described in chapter 3. Salt are conventionally used for tracer tests in geothermal reservoir. Sodium fluorescein was also used but unstable under high temperature. New tracers were required for conducting a multi-tracer experiment and also repeated experiments without increasing background level. Laboratory experiments under high temperatures and experiments at Hijiori and Kakkonda geothermal field were conducted to choose suitable tracers. Two inert reagents, sodium tungstate and ammonium molybdate, were selected from inorganic reagents. Dye tracers, sodium fluorescein (uranine), rhodamine B, and amino acid G, were also checked in laboratory and at fields. Although thermal stability was not so high at laboratory experiments, uranine indicated high stability in a high temperature region of around 200°C in HDR-2. Considering its advantages of cost and high sensitivity, uranine has been routinely used for experiments.

In chapter 4, hydrodynamic dispersion of tracer was examined in wells HDR-1 and HDR-3. As reservoir volume was one tenth order of that in an injection well, tracer dispersion in the injection well modify tracer concentration to a reservoir. The linear dispersion coefficient should be obtained to estimate tracer concentration into the reservoir. Tracer experiments during deepening drilling in HDR-1 and HDR-3 were carried out and the dispersion length  $\alpha_L$  of around 0.1 m was obtained by matching tracer response curves of linear dispersion with measured concentration of circulation mud. Using obtained  $\alpha_L$ , suitable tracer injection duration for the LTCT was estimated as 5 minutes or more. By considering the result surface instrument of tracer injection was designed for LTCT.

In chapter 5, a RTD method of tracer response analysis was briefed. Then the method was applied for tracer experiments carried out in the upper reservoir. Anisotropic flow toward each production well indicated that HDR-2 and HDR-3 connected a major flow path from injection well SKG-2 while HDR-1 weakly connected through paralleled fractures to SKG-2. Changes of tracer response curves during the three-month circulation indicated that temporal variations in flow paths occurred in the region between SKG-2 and three production wells. Those changes were remarkable initiated by shut-in operation during each stage of the single well production from HDR-1, HDR-2, and HDR-3, respectively.

In chapter 6, flow, thermal, and tracer data collected during the three-month circulation test at the upper reservoir were matched using a planer fracture model on a finite element mesh. A finite element heat and mass transfer, FEHM, code was used to the simulation. Area of each planer fracture was adjusted to match the production temperature change at each feed zone. Then the tracer response was matched by adjusting the fracture aperture. The simulation results indicate that the heat

extraction area of the flow paths extend during the circulation. The aperture of the flow paths ranges 2 mm to 14 mm. The values obtained seem to be in a reasonable range, although it is greater than those found by other investigation of HDR reservoirs.

During the long-term circulation test we carried out tracer experiments every two or three months for monitoring flow regime in the reservoir. Procedures and results of the experiments were described in chapter 7. Two or three kind of tracer reagents among potassium salts, uranine, and naphthalene sulfonates were dissolved in water and pumped in to the deep reservoir at the first half stage and to the both shallow and deep reservoirs in the latter half stage. Fluids from two production wells HDR-2a and HDR-3 were sampled and analyzed to obtain tracer response curves. A fiber-optic fluoremeter was also applied to obtain real time data of uranine concentration.

PTS logs were obstructed by anhydrite scales in the deeper part of HDR-2 and HDR-3. Hence the quantitative analysis of the tracer experiments under the complexity of the flow regime in the multi-well and multi-fracture system was restricted by lack of flow data. Comparison of each tracer response curve suggests that the flow regime in the reservoir was severely affected by injection flow rates, temperature draw down in the reservoir and also anhydrite precipitation in the production wells.

Chapter 8 drew up conclusions of this study and described technological issues need for future development of the HDR heat extraction system.



## 第1章 緒 論

### 1-1 序

昭和 48 年(1973 年)の第4次中東戦争をきっかけに発生した石油危機を契機として、通商産業省において、太陽(光、熱)、石炭(液化、ガス化)、風力、地熱など石油代替エネルギーの開発を目指したサンシャイン計画が開始された。その後、昭和 55 年には石油代替(新)エネルギー開発の促進を目的として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が設立され、活発な技術開発が進められてきた。これまで NEDO で行われてきた地熱関連の技術開発は、全国地熱資源総合調査などの資源調査、断裂型貯留層探査法開発など探査技術、低温熱水還元や可採量増大技術などの掘削・生産技術、未利用地熱資源の開発を目指したバイナリーサイクル発電、高温岩体(HDR)発電技術(要素技術)の開発など、広範にわたり、国内だけでなく海外においても、広くその成果を認知されている。例えば、山形県肘折にある NEDO 実験場では、1984 年以来、HDR 開発に必要な要素技術の開発のために種々の実験が行われてきた。特に、1991 年には 1800m 付近の花崗閃緑岩中に造成された上部貯留層を対象に3ヶ月間の循環試験が、2000 年から 2002 年にかけては上部貯留層から約 400m 深部に造成された下部貯留層と上部貯留層を用いて2年近くの長期循環試験が実施されており、循環・熱抽出に関する多くの知見が得られている。

地熱資源には以下に挙げるような利点を有しており、我々の身近に存在する自然エネルギーとして、地道な開発が必要と考える。

- 世界でも有数の火山国であるわが国に、豊富に賦存する。
- 他の自然エネルギー同様に CO<sub>2</sub> 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い、安定的なエネルギー源である。
- 開発の歴史も古く、開発に多くの経験を有している。

特に、最近の地球環境問題への意識の高まりとともに、高温の地熱資源に乏しいドイツ、フランス、スイス、オーストラリアなどの国々においては、再生可能エネルギー開発の一環として HDR 開発の動きが活発化している。これらの国々における開発は、単なる技術の開発に留まらず、石油開発の豊富な技術や経験を基にして、商業化を視野に入れた実規模のシステム開発を進めていることが大きな特徴である。しかし、目に見えない高温の地下深部を開発の対象としているため、依然開発にあたっては不確実性も高く、経済的に見合った HDR システムの開発には、多くの現場での事例や経験が必要になると思われる。幸い、1970 年代にアメリカフェントンヒルで最初に現場実験が開始されて以来、イギリス、ドイツ、フランス、そして日本と世界各国において現場実験が進められただけでなく、日米独による IEA 国際共同研究に代

表されるように、各国間で技術や情報の交換も活発に行われ、多くの技術的課題の共有と解決が図られてきた。

現在では、フランスのソルツや、オーストラリアのクーパーベイズンにおいて、地下 4km 以深の高温の岩盤に熱交換を行うための大規模な人工貯留層の造成を達成するまでに至っており、今後はこの HDR 貯留層に水を注入・循環して、熱水や蒸気を安定して取り出す開発のステージに入ろうとしている。この HDR 開発の中核をなす人工貯留層からの熱抽出では、HDR 貯留層内の循環状況を把握することが重要になる。これは将来の貯留層の安定性を監視するとともに、将来の生産特性の変動や寿命を予測し、必要な場合には水圧破碎や坑井の掘削を決めるための重要な情報を提供するからである。トレーサ試験はこの HDR 貯留層内の循環状況を把握するために最も有力な手段の一つで、アメリカフェントンヒル HDR 実験場を始めとしてこれまで多くの知見が蓄積されてきた。しかし、これまでの研究では、主に注入井と生産井間を一つの領域として取り扱った定性的な評価が行われており、HDR 貯留層の特徴である複数のフラクチャを対象とした評価については満足に行われていない。

筆者は、アメリカフェントンヒルでの HDR 開発のための IEA 共同研究に参加し、流体の地化学的手法を用いた貯留層評価の研究に従事して以来、肘折 HDR 実験場での現場実験を中心としてトレーサ試験による HDR 貯留層の評価手法の研究、開発を行ってきた。肘折実験場は4本の坑井が東西約 150m 南北約 100m の狭い範囲に配置されており、その間を結ぶ東西方向に延びる複数のフラクチャの導通状況だけでなく、熱抽出に伴う貯留層の変化を的確に把握可能である。このため、研究にあたっては、複雑な貯留層の流動解明に必要なトレーサ試験方法の開発と、それを用いた肘折貯留層評価を重点とした。特に、前者については、室内実験と現場試験によって短期間の繰り返し試験に必要な新規トレーサの選択、注入井内での移流分散を考慮したトレーサの適正な注入方法の決定、光ファイバー蛍光光度計を用いた蛍光トレーサの原位置連続測定法の開発を行い、これまでに比べて簡便にしかも高精度でトレーサ試験を行えるようになった。これらは一度に行ったわけではなく、上部貯留層開発に伴う初期循環試験、2坑井生産試験、3坑井生産による3ヶ月循環試験、更にはその後開発された下部貯留層を含めた長期循環試験において、順次改良を加えながら開発を行ってきたものである。また、貯留層の評価に関しては、上部貯留層における3ヶ月循環試験や上部・下部両貯留層で実施した長期循環試験のトレーサ試験を中心に評価を行い、貯留層内の流動状況は循環の経過とともに変化するものの、注入井の流量変化や生産井の開閉によってより大きな影響を受けることを明らかにした。

これら研究、開発で得られた成果は、今後実用化を目指した HDR 開発のために非常に重要と考える。特に、上述した長期循環試験は実用化に必要な多坑井、異なる注入井を持った複数の貯留層を対象に行われた世界で初めての現場実験であり、大規模な HDR 貯留層内の流動を把握するだけでなく、長期間にわたって貯留層の流動を安定して制御するための操作を考える上で、貴重な情報を提供すると考える。このため、本論文として、トレーサ試験により肘折 HDR 貯留層の評価を行った一連の研究成果をまとめた。

## 1-2 本論文の構成

本論文は全8章から構成する。第1章は緒論である。

第2章では、HDR 地熱エネルギーとは何かについて、これまで未利用な地熱資源としての有望性を含め述べる。次いで、HDR を開発するためにはどのような技術が必要かについて、想定される開発ステップに沿って述べる。更に、世界各国で行われてきた現場実験の状況について述べ、日本国内、特に山形県肘折において実施されてきた現場実験の経緯を紹介する。最後に、HDR 貯留層開発における循環流体の地化学調査とトレーサ試験の重要性を述べ、本論文の研究課題との関係について言及する。

第3章では、肘折 HDR 貯留層の循環試験中に使用する新たなトレーサの選定について述べる。HDR 貯留層の評価のように比較的短期間に繰り返しトレーサ試験を行うためには、再循環によるバックグラウンドの増加を防止する必要がある、異なるトレーサを使用できることが望ましい。このような目的のために、室内での加熱試験、肘折での坑井掘削や循環試験時の現場実験によって新たなトレーサの選定を行った。また、検出感度や費用の点で優れる蛍光染料の1つであるフルオレセインナトリウム(ウラニン)の適応性を検討し、有効性を示す。

第4章では、注入井におけるトレーサの移流分散の評価を行った結果について述べる。高温岩体では注入井と生産井との間隔が比較的短く、しかもその間がフラクチャによって結ばれているため、トレーサの流動に寄与する貯留層の容積は比較的小さい。このため、坑井内でのトレーサの移流分散が大きい場合には、坑口から注入したトレーサは裸坑部のフラクチャとの導通部分に達するまでに濃度が大きく変化し、貯留層の状況を定量的に把握することが難しくなる恐れがある。このため、肘折での坑井掘削中にトレーサ試験を行いトレーサの分散長を求め、長期循環試験時のトレーサ注入について検討した結果を述べる。

第5章では、肘折 HDR 実験場の上部貯留層を対象に実施したトレーサ試験を、滞留時間分布 (RTD) 法によって評価した結果について述べる。まず、RTD 法を用いた HDR 貯留層の評価方法について述べ、肘折上部貯留層循環試験中に行ったトレーサ試験に適応した結果を述べる。これら評価の結果、注入井から生産井への流体の流動は循環時間の経過とともに大きく変化することを示す。

HDR 貯留層においては、長期間安定して熱エネルギーを抽出するために、循環の経過につれて貯留層内の流れがどのように変化するかを把握することが必要である。第6章では、熱・物質移動有限要素法シミュレーション (Finite Element Heat and Mass Transfer: FEHM) コードを用いて3ヶ月循環試験中に実施したトレーサ試験のマッチングを行い、フラクチャ形状の経時変化を求めた結果を述べる。

第7章では、長期循環試験中に行ったトレーサ試験結果を基に、多坑井マルチフラクチャからなる貯留層内の流動を評価した結果を述べる。まず、長期循環試験の概要を述べ、次いで長期循環試験の循環形態に合わせて新たに試作した光ファイバー蛍光光度連続測定システムを中心に、トレーサ試験方法について述べる。最後に、循環試験中にほぼ定期的に実施したトレーサ試験により得られた RTD 曲線の

経時変化とPTS 検層結果を基に、貯留層内の流動状況がどのように変化したかを評価する。

第8章は結論であり、本研究の成果をまとめ、今後の技術的課題を示す。

## 第2章 高温岩体開発の現状および技術的課題と肘折高温岩体開発

### 2-1 緒言

高温岩体(Hot Dry Rock;以降HDR)地熱エネルギーの概念は、1970年代初頭にアメリカニューメキシコ州にあるロスアラモス科学研究所(現在はロスアラモス国立研究所;LANL)で提案された(Potter et al., 1974; Smith et al., 1975)。このアイデアは、高温ではあるが透水性が低くて熱水や蒸気を賦存する貯留層が発達していない岩盤の持つ熱エネルギーを、人為的に熱交換を行うための貯留層を造成して取り出そうというものである。既に地熱発電の行われている地域でも、高温ではあるが蒸気や熱水の十分ではないいわゆる空井戸の存在が知られている。更に、地熱地帯ではなくても、地下深部では比較的高温の岩盤が期待できるため、もしHDR開発技術が確立されれば、膨大な地熱資源を開発できることになる。その意味でHDR開発は地熱流体の存在を前提とした従来型の地熱開発に比べて、より普遍的で膨大な地熱エネルギーの開発を目指した次世代の地熱資源開発といえる。

この章ではHDR地熱エネルギーとは何かについて、その資源量を含め述べる。次いで、世界各国と日本で行われてきた現場実験の状況について述べる。更に、HDRを開発するためにはどのような技術が必要かについて、想定される開発ステップに沿って述べる。また、それらステップごとの技術を適正に実施するための技術や、施工後の結果を判断する際に重要な貯留層評価技術についても述べる。最後に、今後実規模のHDR貯留層を開発する場合に想定される技術的課題と、その中でトレーサ試験や循環流体の地化学調査が果たす役割について述べる。

### 2-2 高温岩体地熱エネルギーの概念と資源量

我々の足下に広がる岩盤の持つ熱エネルギー量は膨大で、例えば平均温度が250℃の岩体1km<sup>3</sup>が持つ熱エネルギーは、25℃を基準温度とすると、 $2.25 \times 10^{17}$  Jにも達する。仮にこの岩盤から温度が150℃になるまで熱エネルギーを取り出すことができれば、そのエネルギーから16MWの電力を20年間にわたって発電できることになる。これらの熱エネルギーは岩盤の間隙中に存在する流体にも保持されているが、そのほとんどは岩石自体に保持されている。例えば岩盤の間隙率を5%とすると、岩盤の保有する熱エネルギー量は流体の保有する量の12倍に達する(宮崎, 1991)。

このような岩盤の持つ熱エネルギーを利用するには、岩盤から熱エネルギーを取り出して地表まで運び出すための媒体が必要である。一般の地熱資源では、地層内に存在する熱水や蒸気はその役目を果たしている。しかし、地層内に存在する熱水や蒸気の量が非常に少ない場合や、開発の初期には地層内に熱水や蒸気が存在しても周辺の透水性が悪くて生産量に見合う流体の補充がない場合には、岩盤の持つ熱エネルギーを有効に取り出すことができない。このような状態の地熱エネルギーを積極的に利用しようとするのがHDRの考えである。しかし、高温の岩盤中に熱交換面となるフラクチャを人工的に作り、これを貯留層として利用しようという考え方がHDR開発の中心的な概念であるため、現場実験が進むに連

れて実際の地質条件に対応してHDRの概念も変遷してきた。

上述したようにLANLで最初に提唱されたHDRの概念は、均質でほとんど透水性のない岩盤中に人工的に大規模なフラクチャを作り、それを熱交換器として利用しようというものであった(Smith et al., 1975)。彼らが現場実験を行ったロスアラモス西方のフェントンヒル(Fenton Hill)の地下に広がるプレカンブリア紀の花崗岩類は、彼らの考えていたようなほぼ均質で透水性の低い岩盤と考えられた。しかし、詳しくは後述するように、フェントンヒル第Ⅱ期計画の進捗に伴い、HDRにおいても天然の割れ目を無視できないと考えられるようになってきた(Murphy et al, 1983)。また、アメリカに引き続いて大規模な現場実験を開始したイギリスのコーンウォールのローズマノウス(Rosemanowes)では、対象とする岩盤に天然の割れ目が数多く発達しており、水圧破碎(hydraulic fracturing)により新たなフラクチャを造成するというよりも、高圧水を注水することにより既存の割れ目を連結して導通を良くする水圧刺激(hydraulic stimulation)という概念が適当と考えられるようになった(Richards et al., 1994)。図2-1にフェントンヒルⅡ期計画開始時に考えられていたHDR貯留層モデルと、イギリスで考えられていたモデルを対比して示す。

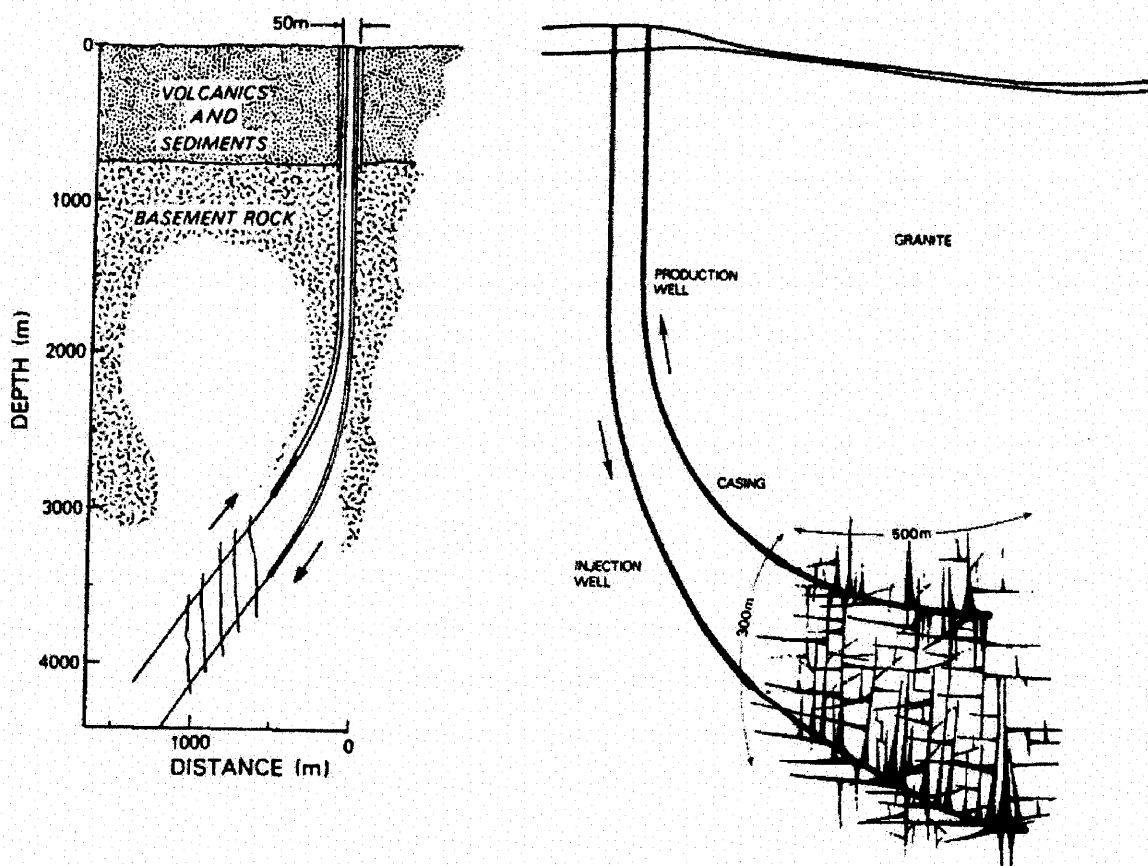


図 2-1 フェントンヒルⅡ期計画における複数の水圧破碎フラクチャモデル(a) とイギリスローズマノウスにおける水圧刺激による天然割れ目の導通による HDR 貯留層モデル(b)。

1980 年代後半に入って、ライン地溝帯の西端部に位置し、付近に透水性の高い断層が存在するフランスのソルツ(Soultz)での実験が始まると、水圧刺激の概念は更に変化して、坑井と透水性の高い断層とを

導通させる手段であると考えられるようになってきた(Jung, 1992)。日本においても東北大学のグループが高温湿潤岩体(Hot Wet Rock; HWR)としてほぼ同様の概念を提唱し、従来型地熱地域での熱水増産等に適応しようとしている(Takahashi and Hashida, 1992)。

このように HDR 開発の中心となるフラクチャ造成の概念の変遷とともに、HDR は単に「高温ではあるが熱水・蒸気が存在する貯留層が発達していない透水性の悪い岩盤」という定義(Tester et al., 1989)から、「ある長い期間にわたって商業的に熱エネルギーを取り出すためには(地表から人工的に)注水を行う必要のある地熱システム」という広い定義(Batchelor, 1989b)に変わってきた。その意味では、HDRと熱水対流型地熱との間にはそれほど明瞭な境界はないといえる(Sass, 1996)が、開発にあたり HDRの方が人為的なあるいは技術的な色合いが強い地熱システムだといえることができる。この点に関して、IEA(国際エネルギー機関)のエネルギー技術協力プログラムのもとで 1997 年 3 月に発足した高温岩体タスクでは、従来の HDR の定義に留まらず地熱資源に何らかの人工的手段を加えて地下から熱エネルギーを商業的ベースで開発する技術を対象とし、最近の HDR の広義な概念を採用している(厨川, 1998)。また、HDR の発祥の地であるアメリカでも、HDR 開発で培った技術を従来型地熱開発に積極的に活用し、地熱エネルギー開発を進めるべく Enhanced Geothermal System(EGS)という概念を提唱しており(Clifton and Entingh, 1998)、HDR 開発技術の積極的な展開が進められている。

既に述べたように HDR の保有する熱エネルギー量は膨大である。このため、HDR から熱を効率的に取り出す技術が確立できれば、利用可能な地熱資源量を大幅に増大できる。例えば Armstead and Tester (1987)は深度 10km までの HDR 資源量を  $1 \times 10^8$  Quads ( $1 \text{ Quad} = 2.93 \times 10^8 \text{ MWht}$  あるいは  $2.52 \times 10^{14} \text{ kcal}$ )と算定している。この量はわが国の年間エネルギー消費量(1994 年で  $5.1 \times 10^{15} \text{ kcal}$ )の 50 万倍にも達する。彼らの算定は単に地表面下の温度勾配と掘削可能深度を基にした資源量計算のため、実際の資源量は相当に割り引いて考える必要はあるが、単純に石油、原子力、従来型地熱資源など他のエネルギーと比較すると、その資源量は2桁以上多い膨大な量である。

最近、Sass and Robertson-Tait (1998)はアメリカ西部の各地熱地域の開発状況を調べ、カリフォルニア州の Geysers、Coso、Salton Sea、ネバダ州の Steamboat Spring、Dixie Valley、ユタ州の Roosevelt と Soda Lake という地域が上述した EGS の適地と述べている。これらは現在開発中のものを含みアメリカ西部の主要地熱地域をなしており、EGS (あるいは HDR)は普遍的な地熱資源であることを示唆している。

国内においても、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)によってより詳細な資源量の評価が行われている(NEDO, 1994)。この評価では、これまで日本各地で行われた地熱開発促進調査のデータを用い、総合評価の終了した 29 地域から熱伝導型を示す坑井が存在する 18 地域を選定し、容積法によって深度 3km までの  $250^\circ\text{C}$  以上の資源量を  $1.4 \times 10^{17} \text{ kcal}$ 、深度 3~5km のものを  $4.9 \times 10^{17} \text{ kcal}$  と試算している(図 2-2)。NEDO による試算では実際の坑井温度データを使用(あるいは外挿)し、更に地質条件を加味している点でより確度の高い資源量評価となっている。これを発電量に換算すると、それぞれ約 2,900 万 kW(20 年)と約 9,800 万 kW(20 年)となり(表 2-1)、1998 年現在の地熱発電量 52 万 kW に比べて2桁も多く、HDR が豊富な賦存量を有する有望な地熱エネルギー資源であることが明らかである。NEDO の評価資源量はあくまでも従来型地熱を対象とした促進調査地域に対するものであり、HDR そのものを調査対象とすれば資源量は更に多くなる可能性がある。

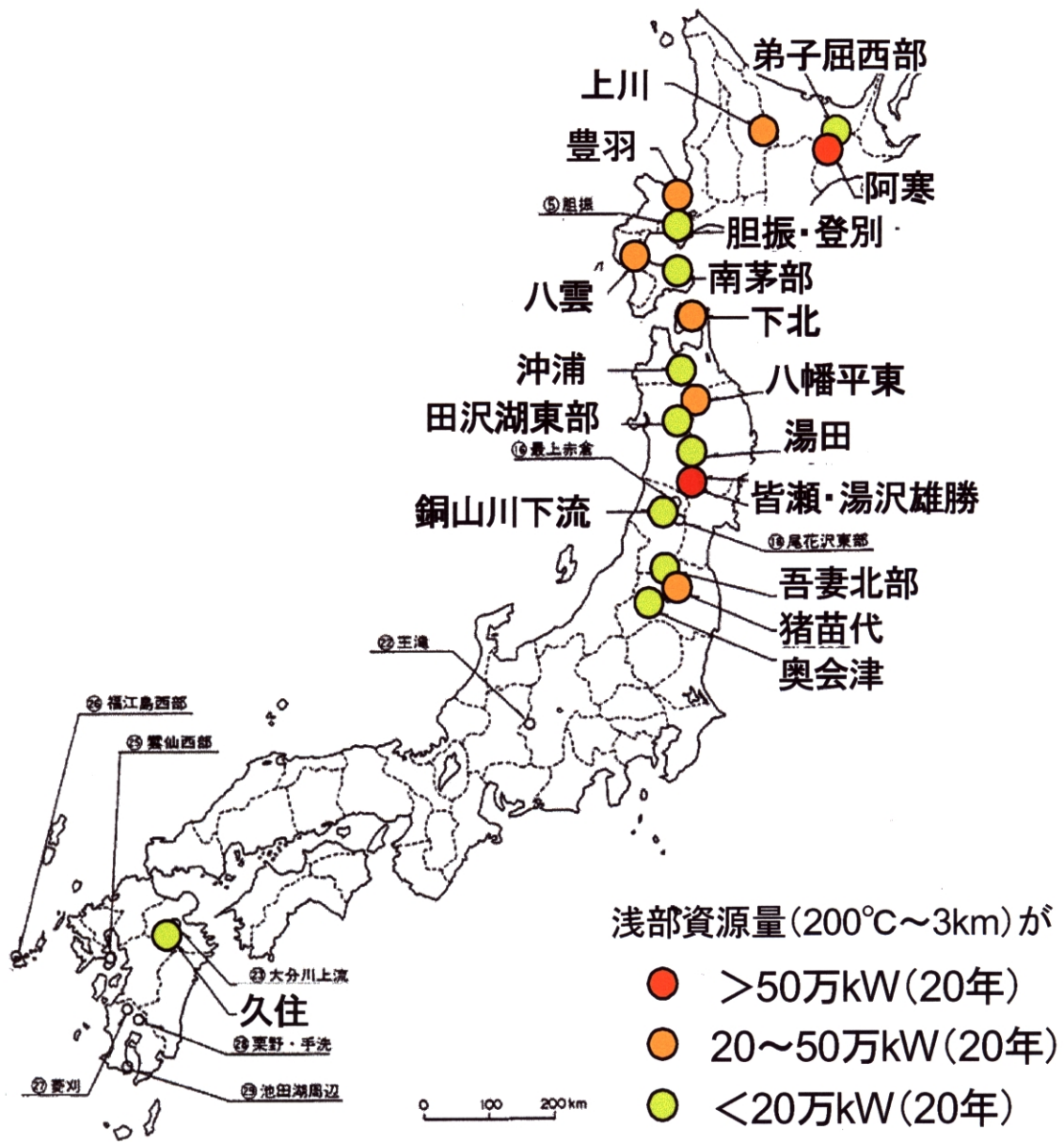


図 2-2 NEDO 地熱促進調査地域から選択した国内における HDR 資源有望地域 (NEDO, 1994)



表 2-1 わが国における高温岩体資源量算定対象地域と広域資源量(発電可能資源量;20 年)

地域名	資源量算定対象面積 km <sup>2</sup>	浅部資源量(電力;MW)		深部資源量(電力;MW)
		200℃深度～3km	250℃深度～3km	
弟子屈西部	18	20	1	126
阿 寒	139+	642+	512+	1569+
上 川	79	239	167	768
豊 羽	66	246	186	663
胆振～登別	58	113	46	451
八 雲	82	365	292	859
南 茅 部	25	68	34	192
下 北	73	248	143	528
沖 浦	26	78	43	202
八幡平東部	66+	319+	261+	720+
湯 田	3.5	9	4	26
田沢湖東部	67+	109+	17+	470+
皆瀬～湯沢雄勝	129+	728+	595+	1296+
銅山川下流	35	100	60	302
吾妻北部	32+	108+	64+	263+
猪 苗 代	51+	235+	205+	530+
奥 会 津	49	198	146	429
久 住	40+	152+	115+	419+
合 計		3978+	2891+	9814+

NEDO 報告書(1994)を一部改変. 表中の+は当該地域が資源量算定地域の外側へ広がっている可能性を示す.

## 2-3 高温岩体の開発技術

### 2-3-1 開発技術の概要

HDR から長期間安定して熱エネルギーを取り出すには、対象となる高温で透水性の悪い岩盤に熱交換を行うための流路を造る必要がある。このためには、①対象となる高温の岩盤を見つけだす探査技術、②地表と高温の岩盤とを結ぶ坑井を掘削する技術、③熱を取り出すための流路を造るフラクチャリング（破碎）技術、④生成したフラクチャの広がり把握して熱抽出のための循環経路（貯留層）を造るための導通技術、⑤貯留層から必要な期間、効率的に熱を取り出すための循環・抽熱技術、⑥取り出した熱の利用技術という一連の技術が必要である（松永, 1993）。図 2-3 に HDR 開発の概念的な手順を示す。これら技術はハード的な作業に分類されると考えられるが、一方でそれら作業によって長期間、効率的に熱抽出を行うための貯留層を造成することができたかを判断する貯留層評価というソフト的な技術も重要な役割を担っている。

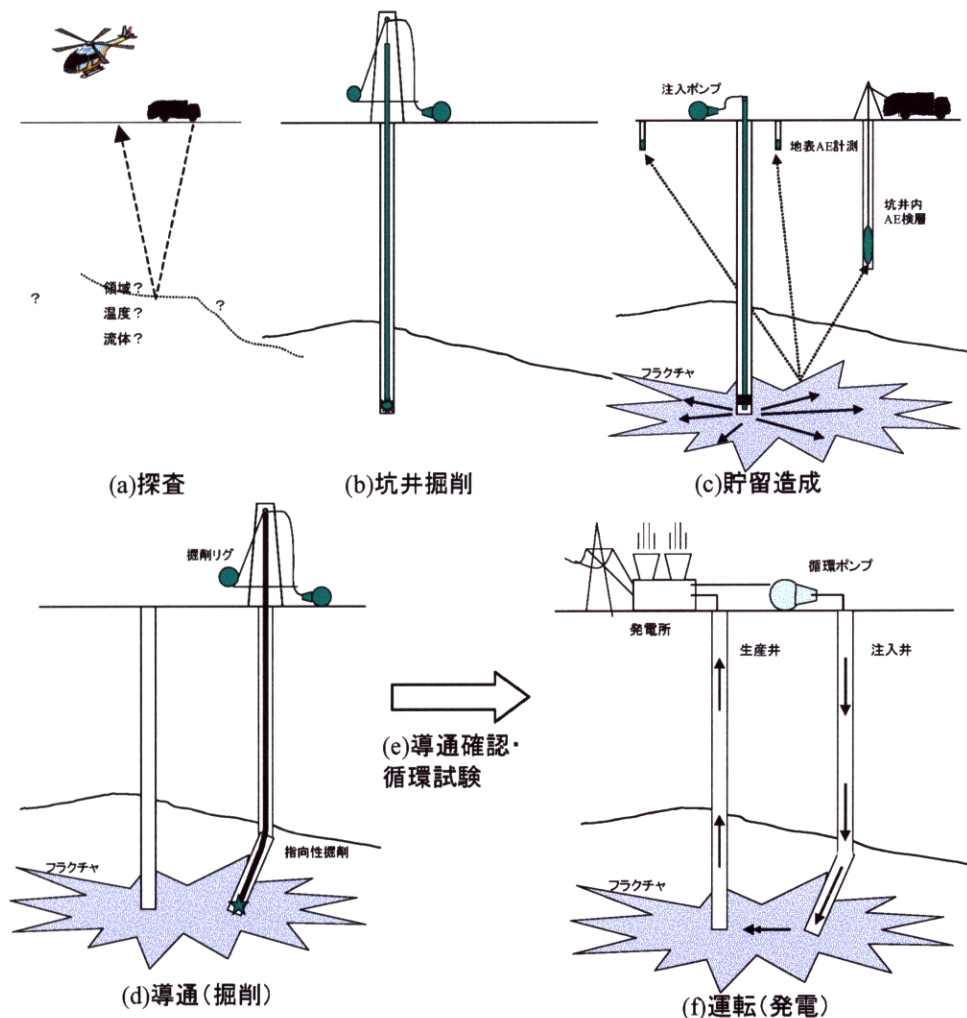


図 2-3 高温岩体開発の技術的な手順

①に関しては、従来型の熱水・蒸気の卓越する地熱貯留層を目指したものの結果的に HDR 型であったという場合が多いと考えられるので、従来の探査技術の応用が主となる。また②に関しても、対象となる HDR 中に熱抽出システムを造るこのためには、貯留層への流体の注入点や貯留層からの取り出し点を適正に配置するために、設定した目標点に向かって正確な掘削を行う必要があるが、従来の地熱掘削技術により対応が可能と考えられる。更に、⑥に関しても従来の発電あるいは熱利用技術の範疇である。従って、③～⑤が HDR 開発で中心的な技術といえることができる。

佐藤他(1999)も、熱水対流系を対象とした従来の地熱発電所の開発に合わせて HDR 開発のプロセスを調査、開発、建設、運転の4段階に区分し、開発段階および運転段階での地下システム設計－地下システム形成－地下システム計測・評価のループを繰り返すことによって目標の地下システムを実現するところが HDR 開発の最大の特徴であると述べている。

### 2-3-2 破碎技術

HDR 貯留層の場合、長期間にわたり安定して熱エネルギーを供給するためには、いかに大きく(熱交換面積を持つ)、しかも流動抵抗の少ないフラクチャを、いかに効率的に造れるかがポイントとなる。例を挙げて考えてみる。仮に 20 MW 規模の発電所を想定すると、1時間当たり約 200 t の蒸気を必要とする。このような大量の蒸気を長期間安定して取り出すためには、200 万  $\text{m}^2$  の熱交換面積を持つ貯留層が必要と試算されている(Bachelor, 1989a)。これを単に1枚のフラクチャで賄おうとすると 1.4 km 四方以上の巨大なフラクチャを必要とし、とても現実的とはいえない。このため、サイズの小さな複数のフラクチャから熱抽出を行おうというアイデアが従来から考えられてきた。それでも、450 m 四方のフラクチャとして 10 枚が必要となる。

このように大規模なフラクチャを造るために最も効率的と考えられているのは、水圧破碎技術である。水圧破碎では、坑井の対象となる区間をパッカー等により密閉し、その区間に高压の水を注入して岩盤にフラクチャを作る。この技術は 1940 年代後半に石油貯留層から石油の回収率を増加するために開発されたもので、現在石油の分野では増産技術として一般的に使われている(Hubert, 1987)。しかし、砂岩などからなる均質な堆積層を主な対象とする石油貯留層とは違い、HDR における水圧破碎では、高温でしかも花崗岩のような硬い岩盤を対象とするため、使用する機器の耐熱性等の点で問題が多い。このため、①裸坑部で使用可能な耐熱パッカーを開発して使用する(Dreesen and Miller, 1985)、②裸坑部の一部にケーシングライナーを設置し、その上部に水を注入する際のパイプの熱収縮を補償するためにスリックジョインを取り付けた PBR ケーシングライナーを使用する(Smith et al., 1983)、③対象区間から下部に砂充填を行い、その上部のケーシングを一部リーミングして水圧破碎を行う(海江田他, 1988)等の方法が試みられているが、大規模な水圧破碎を行うために十分な技術を確立するまでには至っていない。また、既に前節でも述べたように、HDR 現場実験場で遭遇する岩盤は天然の割れ目が多く、水圧破碎を行う際にそれら割れ目の影響が無視できないほどに大きいことが分かってきた(Murphy et al, 1983; Richards et al., 1994)。このため、単に引っ張り破壊により透水性の高いフラクチャが形成されるというよりも、既存の天然の割れ目やジョイントが滑ることにより岩盤の透水性が増加するとの認識が確立してきた。このため最近では、水圧破碎よりもむしろ水圧刺激あるいは坑井刺激と呼ぶ方がふさわしいと考えられている。

(Richards et al., 1994)。

### 2-3-3 導通技術

HDR においては、坑井への人工的な注入によって透水性の向上したフラクチャは、熱抽出を行うための循環流体の流路としてだけでなく直接熱交換面として使用されるため、その領域(方向と範囲)を把握することが重要になる。水圧刺激によるフラクチャの進展方向やその広がり、地圧条件や岩盤の透水性、強度、天然の割れ目の状態等多くの要因に支配される(例えば Haimson and Fairhurst, 1969; Daneshy, 1973; Pine and Batchelor, 1984)。このため、坑井の掘削中に得られるコアを用いて原位置地圧の推定や岩盤性状の把握が行われる(例えば Genter and Traineau, 1992; Dezayes et al., 1995; 及川他, 1995)。また、坑井内検層により坑井周辺の岩盤性状の把握や、超音波を利用した BHTV (Borehole Televiewer)、電気抵抗のコントラストを利用した FMI (Formation Micro-imager) や FMS (Formation Micro-scanner) 等の坑井内可視化装置によって天然割れ目の調査が行われている (Tenzer et al., 1991; Genter, et al., 1995)。

フラクチャの進展予測とも密接に関連するが、導通性が良くて広い熱交換面積を確保するためには、実際にフラクチャがどのように広がったかを正確に把握し、フラクチャのどこに生産井を掘削するかを判断することも重要である。このためには、坑井内や地表から各種の探査が行われているが(新妻, 1990)、現在最も重視されているのは、水圧破碎時に発生する AE (Acoustic Emission) を用いる方法である。なお、水圧破碎時に発生する微小音については、海外では一般に微小地震 (Microseismic) と呼ばれているが、本論文では国内において一般的な呼称である AE を使用する。

AE の利用は、HDR の研究開発が始められた初期の段階から LANL によって進められ、坑井内3軸ゾンデを用いた震源決定方法としてホドグラム解析法が開発された (Albright and Pearson, 1982)。この方法は、直交する3方向に配置したセンサーでとらえたP波の初動から波の到来方向を求め、P波とS波の到達時間差から距離を求めて、震源を決定しようとするものである。しかし、ホドグラム解析には AE 発生点が遠くなると誤差が非常に大きくなるという欠点がある。このため、地表や坑井内での多点観測を取り入れた震源決定が行われるようになってきた。例えば、肘折では生産井の坑跡を決定する際に、地表ネットと坑井内計測の両観測結果から震源分布を求め、良好な結果を挙げている(佐々木, 1995)。

最近、単に AE の震源分布だけでなく、AE の波形に含まれる多くの情報を利用して HDR の貯留層構造をより詳細に把握しようという国際共同研究 MTC プロジェクトが 1995 年から 1998 年にかけて行われ、表 2-2 に示すように世界各国の HDR 実験場で得られたデータを対象に種々の解析が行われた(新妻, 1996)。このプロジェクトは 2001 年まで新しいプロジェクトとして継続され (Murphy et al., 2000)、その後もボランティアな形で継続され、折りにふれて情報や成果の発表、交換の催しが開催されている。

表 2-2 MTC プロジェクトで行われた AE 関連の研究と解析手法(新妻, 1996)

実験場	貯留層キャラクタリゼーション	き裂挙動解析	ダブルット解析	コラプシング法	震源トモグラフィー	AEクラスタリング	AE反射法	SWD
コンウォール			○	終了				
ソ ル ツ	○	○	○	○	○	○	○	○
フェントンヒル				○	終了	○	○	
クリントン(米)			○					
雄 勝	○		○	○	○			○
肘 折	○		○	○				
葛 根 田							○	
八 幡 平		○						○
フェルバッカ								
基 礎		○	○	○	○		○	○

#### 2-3-4 循環・抽熱技術

循環・抽熱技術に関しては、フラクチャ内の流動をいかに把握し、それをいかに制御できるかが問題となる。フラクチャ内流動の把握に関しては次の貯留層評価で詳しく述べるが、HDR 貯留層の運転時に経済性を作用する重要なパラメータとして、生産流体の温度履歴、循環流体の回収率(あるいは逆に逸水率)、貯留層の流動抵抗(貯留層インピーダンスあるいは単にインピーダンスと呼ばれている)の3つがある(例えば Richards et al., 1994)。生産流体の温度は発電施設の選択に影響を及ぼすが、その経時変化はHDR発電システムの安定的な運転を考える上で更に重要である。循環開始時に生産流体の温度がいかに高くても、早い段階で急激に生産流体温度が下がることは貯留層の寿命がつかたことを意味するからである。また、流体の回収率も重要なパラメータである。いくら高温の流体が回収できても、注入量に対してわずかであれば、注入に投入されるエネルギー量に対する採取されるエネルギー量は小さくなる。また、誘発地震や周辺帯水層への逸水の怖れも考慮しなくてはならなくなり、環境上も問題になってくる。インピーダンスは単位流体を循環させるために必要な圧力、即ち注入井と生産井間の差圧を生産流量で割ったものとして定義されている(例えば Murphy, 1981)。インピーダンスは循環に必要なポンプ動力の設計に密接に関係するので、発電コストに直接影響を及ぼす。このため、HDR 貯留層の経済性を考える場合には回収(逸水)率とともに最も重要なパラメータの一つと考えられている(Murphy et al, 1999)。

これら各パラメータ自体は循環を行っている際に地表で簡単に求められるが、HDR 貯留層の経済性を向上するために数値の改善を図ろうとすることはやっかいである。これらパラメータは貯留層内の流動状況を反映して相互に関係し合っているからである。例えば、長期間安定して高温の熱水を生産しようとすると、注入井と生産井間の間隔を広げ熱交換面積を大きく取れば良いが、そうすることによって逆にインピーダンスが増加し、流体の回収率が低下する可能性がある。また、フラクチャの透水性が高くインピーダンスが低い場合には、逸水率が高くなる可能性がでてくる。

英国で行われた HDR プロトタイプシステムの設計においては、インピーダンスの目標値として  $0.1 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$  を想定していた (Batchelor, 1989b)。Hyodo et al.(1995)は肘折の浅部貯留層における循環試験中のインピーダンスについて評価し、坑井近傍のインピーダンスが最も影響することや、生産井内の浮力の

影響が大きいことを指摘している。肘折浅部貯留層のインピーダンスは  $1 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$  程度で、ソルツでの循環試験では  $0.2 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$  と更に低い値を達成している。

フラクチャ内の流体流動は、フラクチャの開口によって透水性が大きく変化するため、循環水の注入条件とともに、岩盤の応力状態が大きく影響する。Willis-Richards et al.(1995)は、フラクチャのせん断挙動に影響する差応力、フラクチャの開口に影響する最小主応力、フラクチャ表面の状態の3つをパラメータとして用い、各国の HDR 貯留層の比較・分類を行っている。また、最近では Duchane (1998)が主要実験場での主要循環データの比較を行っている(表 2-3)。

既に貯留層造成の項でも述べたように、長期間安定して熱抽出を行うためには複数のフラクチャ(群)が必要となる。このため、個々のフラクチャについてだけでなく、フラクチャ相互の関係を評価することも重要となる。この点に関しては 1995、1996 の両年山形県肘折で行われた上下2つの貯留層による循環試験(Nagai and Tenma, 1997)が参考となる。この試験では上部と下部貯留層の間で強い干涉作用が認められ(Tenma et al., 1996)、複数のフラクチャ間での流量制御の困難さを示唆している。

表 2-3 世界の主要 HDR 貯留層の代表的循環データ

	貯留層深度 km	推定貯留層 容 積 $\text{Mm}^3$	代表的注入 圧 力 $\text{MPa}$	代表的注入 流 量 $\text{l/s}$	最 高 流 体 回 収 率 %	備 考
フェントンヒル 第 1 期	2.9	0.6	8	6	90	世界初の循環システム
フェントンヒル 第 2 期	3.5	6.5	27	6	93	タイトな循環システム. 自動化システム
ローズマノウス	2.6	3.5	10	20-25	80	最長の循環試験. 温度降下を確認
肘 折	1.8-2.3	0.7	3-5	13	79	多坑井生産システム
雄 勝	0.7-1.0	1.3	7	7-8	25	単一坑井での上下2層システム
ソ ル ツ	3.5	240	2-4.5	20-25	100	注入と生産を調整. ダンホールポンプ使用. HWR

Duchane (1998)の Table 1 と Table 2 を修正

それぞれのフラクチャにおける流動状況を把握するためには、温度・圧力・流量(Pressure-Temperature-Spinner; PTS)検層が有効な手段である。PTS 検層器は温度圧力のセンサーとともに流量を計測するための回転羽を1つのゾンデに組み込んだもので、このゾンデを坑井内において一定速度で上下させ、その時に得られる羽の回転数と坑井径から流体の流速を求めることができる。HDR 貯留層では水圧刺激によって形成されたある限定された流路を熱交換面として使用するため、貯留層の変化を経時的にモニタリングすることが重要である。肘折では循環中に繰り返し PTS 検層を行うことにより得られた個々のフラクチャごとの流量、温度の経時変化を基にして、貯留層の生産特性評価が行われている(宮入他, 1992)。また、PTS 検層結果について数値シミュレーションによるマッチングを行い、それぞれのフラクチャの熱交換面積推定が行われている(天満他, 1994)。

HDR 貯留層の場合、流体の流入・流出位置やその時の循環条件が良く把握されているため、トレーサ

試験や流体の地化学成分のモニタリングも流動状況把握のために有効な手段となりうる(Rodrigues et al., 1995)。肘折では、それぞれの循環試験ごとにトレーサ試験を行い、トレーサの滞留時間から貯留層容積を求めている(例えば松永他, 1994)

#### 2-3-5 貯留層評価技術

水圧破碎、導通、循環・抽熱の各技術は、高温岩体中に熱抽出システムを作り、運転するという一連の作業に対応した技術分類である。これに対して、ここで述べる貯留層評価技術とは、長期にわたり安定して熱エネルギーを生産できる地下熱抽出システム(貯留層)を作るために、HDRを開発するそれぞれの段階で最適な作業を行うために必要な情報を得るとともに、作業後に目的とした貯留層ができたどうかを判断・評価するための技術といえる。従って、貯留層評価はそれぞれの作業と密接に関連し、それぞれの開発ステップの中で実行される部分が多く、これまでに述べてきた各技術と重複する部分が多い。

一般の地熱熱水系の開発と異なり、HDRでは熱抽出システムへの出入り口となる坑井刺激を行う箇所を比較的自由に選択できる。逆に、HDR貯留層では、いったん地下熱抽出システムを作ると注入点や生産ゾーンが限定されるため、安定かつ効率的な熱抽出のためには注入水のフラクチャ内での流動状況やその経時変化をいかに早い段階で把握できるかが重要となってくる。しかも、抽出される熱エネルギー自体は、基本的には岩体内に蓄えられたものなので、熱抽出が進むにつれて岩盤の温度は徐々に低下し、それにつれて流体流動も変化してくる。また、それ以外にもフラクチャにおける造岩鉱物の溶解や、流体からの鉱物の析出・沈殿等もフラクチャ内の流動に影響を及ぼす。このようなフラクチャ内部の状況やその変化をそれぞれの段階で把握するとともに、将来の状況を予測して適切な対応を考えることが貯留層評価の目的といえる。

肘折では、上部貯留層の開発、下部貯留層の開発を通して、これまで各坑井を掘削した段階で各種の坑井内検層、注水・導通確認試験を行うとともに、循環試験を行ってきた。これら試験の間、貯留層の評価に必要な多くのデータが取得されている。主に肘折で行われてきた調査手法と得られる貯留層情報との関係を表2-4にまとめた(松永, 1996)。開発に先立ち地表から行われる物理探査を除けば、坑井の掘削によって最初の地下情報が得られる。肘折では、これまでにHDR-1、HDR-2、HDR-3の各坑井が掘削されている。それらの坑井を掘削する際には、花こう閃緑岩の性状を把握するためにスポット的にコアを採取した。それらコアの多くは定方位コアリングで採取されたため、コア中の割れ目の方向を調べることによって貯留層のフラクチャ性状についての情報を得ることができる(八木他, 1989)。また、これらコアについて熱伝導率や熱膨張率の測定や高温高压下でのコア透水試験(松永他, 1993)、強度試験を行い(及川他, 1989)、取得したデータは後述する数値シミュレーションに使用されている。

既に破碎技術で述べたように、原位置地圧の情報は貯留層の造成に非常に重要であるが、深部の地殻応力の測定に一般的に用いられている水圧破碎法は、HDRの場合には主に温度上の制約によって実施困難なことが多い。このため掘削時に発生する坑井内のフラクチャの方向から地圧を推定したり、コアを用いる原位置応力測定が行われている。前者としては坑井掘削中の泥水圧力や熱応力によるフラクチャ(ドリリングインデュースドフラクチャ)や、坑井周辺の応力集中によるフラクチャ(ボアホールブレイクアウト)の発生方向を基に原位置応力の推定が行われている(例えばSato et al., 1990;岡部, 1997)。後者

としてはDSCA (Differential Strain Curve Analysis)、ASR (Anelastic Strain Recovery)、AE、DRA (Deformation Rate Analysis)等幾つかの方法が提案されている(例えば松木, 1992)。肘折においても主にDSCA法により原位置応力が求められ(Oikawa et al., 1993, 2000; 及川他, 1995)、コア観察結果から推定された主応力の方向と調和する結果が得られている。また、AEの発震機構の解析結果を基にして貯留層領域の応力推定も行われている(Cornet and Yin, 1995; Tezuka and Niitsuma, 2000; Sasaki and Kaieda, 2002)。

表 2-4 これまでに肘折 HDR 実験場で行われた貯留層評価のための各種手法とそれらによって得られる貯留層情報

	岩盤物性	原位置応力	フラクチャ 位置方位	透水・流動 特性	岩盤温度	貯留層容積
コア物性試験	◎	◎				
コアフラクチャ解析		○	◎			
BHTV観測		△	◎			
オープンホール検層	○		△			
比抵抗トモグラフィ			○	○		
AE観測		○	○	△		
坑井注水試験		○		◎		
PTS検層			○	◎	◎	
流体地化学調査				△	○	△
トレーサ試験				○	△	◎

得られる情報の質によって：◎、○、△の順に分類した

坑井掘削後にはオープンホール検層やBHTV観測等の坑井内の検層が行われ、フラクチャや変質ゾーンに関するデータが取得された(NEDO, 1990; NEDO, 1993)。また、フラクチャの導通状況や透水性に関するデータを得るために、注水試験や導通確認試験も不可欠で、肘折においてもしばしば実施されている(Kadowaki, 1996)。

貯留層内の流動状況を把握する上で循環試験は最も需要である。フラクチャの流動状況は注入井や生産井の坑口条件や時間とともに複雑に変化する。このため、肘折では上部貯留層で2週間～3ヶ月間の、また下部貯留層では1ヶ月間の循環試験が実施されてきた。このような循環試験の際には、注入・生産両坑井の流量、圧力、温度を継続して監視している。また、坑井内ではPTS検層が行われ、流体の流入流出位置、流量や温度について詳しいデータが得られている。更に、PTS検層を繰り返し行うことにより、各流出位置における流体温度や量の経時変化も得られ、貯留層解析を行う上で重要なデータとなっている(宮入他, 1992; Miyairi et al., 1996)。また、上述したように循環試験の前後にも必ず注水試験が実施され、経年にわたる貯留層の変化が把握されている(例えば及川他, 1993; Kadowaki, 1996)。更に、循環



試験中には流体の地化学性状のモニタリングやトレーサ試験も行われており、肘折では生産井ごとの性状の違いが注入水とフラクチャ内の既存熱水との混合希釈だけでなく、フラクチャ内での岩石の溶解にも左右されていることが明らかになっている(松永他, 1994; Matsunaga et al., 1995a; 1995b, 2000)。

以上述べた各手法によって得ようとする情報は、

- ①主にコアから得られる岩石の機械的、熱的あるいは透水性に関する物性、
- ②コアやBHTV観察などによって得られるフラクチャの空間的な分布と原位置応力、
- ③注水試験や循環試験によって得られるフラクチャの透水特性、
- ④循環試験によって得られる熱抽出や透水特性とその経時変化に関するもの、

に大別できる。なお、①から④の順番は、対象とする領域や時間的スケールが小さいものから大きいものへと順番に並べてある。また、注水試験や循環試験については、貯留層の流体－応力－熱－化学の連成した挙動を対象としているため、必要な情報を得るためには既に上述したように試験期間中に幾つかの測定方法を併用・繰り返す必要がある。

貯留層評価の次のステップは、これら得られた多くの情報を基にして貯留層の状況を把握するとともに、数値シミュレーションにより将来予測を行うことである。地熱開発では TOUGH2、TETRAD、STAR、FEHM などいくつかの貯留層シミュレータが使用されており、最近では EGS や HDR 貯留層のようなフラクチャ内の熱交換をシミュレートするために GEOCRACK や FRACTURE などの計算コードも開発されている(Kohl and Hopkirk, 1995; Sanyal et al., 2000; Swenson et al., 1999)。肘折に関しては産総研とNEDO委託先の1つである三井金属鉱業の両者が数値シミュレーションを行っている。産総研ではロスアラモス国立研究所で開発された熱・物質移動有限要素法コード FEHM(Zyvoloski et al., 1988)を用いて、上部貯留層での循環試験結果とのマッチング(山口他, 1990; 1991; 天満他, 1994)や、長期循環試験のシミュレーションを行っている(Tenma et al., 2001; 天満他, 2003)。また、D/SC と名付けられた貯留層近傍の地質構造やフラクチャ分布特性を基に 3 次元のフラクチャモデルが作成可能なコードの開発も行われ(手塚・渡辺, 2003)、上述の三井金属鉱業が HDR 貯留層の評価や現地実験の仕様決定の支援ツールとして開発した GEOR3D とのリンクも図られている。

## 2-4 各国における高温岩体技術の開発状況

### 2-4-1 世界各国の高温岩体開発の歴史

世界で最初に HDR の概念を提唱したアメリカのロスアラモス国立研究所によるフェントンヒルでの現場実験を始めとして、1970 年代後半から 1980 年代初期にはイギリスコーンウォールのローズマノウス、ドイツのファルケンベルグ(Falkenberg)とウラハ(Urach)、フランスのラ・メイヨ・デ・モンターニュ(La Mayet-de-Montagne)、日本の焼岳において現場実験が開始された(Parker, 1989b; Kappelmeyer and Rummel, 1987; Haenel, 1982; Cornet, 1989; 寿賀, 1984)。フェントンヒルやウラハを除いて、それらは何れも数百mの坑井による小規模な実験が主であった。1980 年代の後半には、スウェーデンのファールバック(Fjällbacka)で小規模な現場実験が始まり(Eliasson et al., 1988)、ローズマノウスでは岩盤の温度は 100℃以下と低いものの 2,000m 級の坑井を用いた約2年間の長期循環試験が行われ、発電を目指した

大規模なシステムの設計が行われた。

1980 年代後半に入ると、石油事情が安定化してくるとともに新エネルギー研究開発が低調になってきた。このような情勢の中で、世界の HDR 研究をリードしていたアメリカでは、エネルギー省の地熱関連研究予算の減少が続き、1996 年にはついにフェントンヒル実験場が閉鎖されるに至った。しかし、HDR 開発のために培われた多くの技術は、従来型の地熱開発に利用できるものが多く、EGS への積極的な展開が図られていることは 2-2 で述べたとおりである。

一方、ヨーロッパでは実験規模の拡大に伴う経費増加に対応するため実験現場の統合が図られ、ローズマノウス、ウラハおよびドイツ国境に近いフランスソルツの 3ヶ所の候補地から最終的にソルツが選択され、現場実験の重点化が行われた。現在、ソルツでは将来の商業発電を目指して EC・仏・独の出資により大規模な現場実験が行われている (Gerard et al., 1997; Weidler et al., 2002)。一方、これまで地熱とは縁遠いと考えられていたオーストラリアの中央部に地殻熱流量の大きな花崗岩が広範に存在することが明らかになり、HDR に対する関心が高まっている (Wyborn et al., 1997)。1993 年には豪州政府所属のエネルギー研究開発公社が主催して、ロスアラモスとコーンウォールプロジェクトを実施しているケンボーン鉱山大学 (Camborne School of Mines; CSM) の研究者を招いて HDR の会議を開催し、ニューサウスウェールズ州の Hunter Valley において小坑径の坑井による掘削費を獲得してこれまでの実験段階から実規模開発を目指した活動を始めた (Chopra and Wyborn, 1998)。その後、南オーストラリア州の Cooper Basin において、民間資金を導入した商業規模の HDR 発電所の建設計画が立ち上がり、2003 年後半には 4km 以深の HDR 貯留層の開発が進められている (Geodynamic, 2003)。また、高温の地層とは縁遠いと考えられるスイスでも、1996 年に深部地熱採取 (Deep Heat Mining; DHM) 計画が提案され、熱水利用と発電を目指してバーゼルにおいて 2,000m クラスの坑井掘削が開始されようとしている (Hopkirk, 1999)。これら各国の現場実験は花崗岩類を対象とした点では共通しているが、岩盤の応力条件や透水性等がそれぞれ異なっており、研究開発の対象や手法も若干異なっている。

日本における HDR への取り組みは比較的早く、1975 年には通産省サンシャイン計画の一環として公害資源研究所 (現産総研) で基礎研究が開始された。それ以降、岐阜県焼岳西側山麓で小規模な現場実験 (寿賀ら, 1984) が進められるとともに、ドイツとともにフェントンヒルでの IEA 国際共同研究に参加し、大規模な熱抽出システム造成に関する新しい技術の取得を図った (厨川, 1984)。

HDR 共同研究終了を期に、焼岳から山形県肘折に実験場を移して、NEDO によって地下 1,500m 以深に広がる高温 ( $>250^{\circ}\text{C}$ ) の花崗閃緑岩を対象に HDR 開発のための要素技術開発を目的とした現場実験が進められ (Matsunaga, 1995b)、2000 年から 2002 年にかけて実施された長期循環試験によって現場での実験計画は終了した (松永ら, 2003)。また、電力中央研究所では、複数のフラクチャシステムの造成を目指して、秋田県の雄勝において現場実験が進められ (例えば堀・北野, 1996)、2001 年に計画を終了した (海江田ら, 2002)。このような現場実験による技術開発が行われた一方で、東北大学では文部省の科学研究費により理論的研究や室内試験を中心とした研究を続けており、最近では重点領域研究「フラクタルと抽熱」のテーマのもとで複数の大学による共同研究が行われた (阿部, 1996)。これまで述べた各国の HDR 現場実験場の概要と開発の略歴を表 2-5 と表 2-6 にまとめる。

表 2-5 世界各国の HDR 実験場の概要

国 名	場 所	地 質	坑 井	温 度	実験期間	主な実験等
アメリ カ	フェントンヒル	花崗閃緑岩	2928m, 3064m	205°C	1972-1980	286日間循環試験(2—3MWt)
		変成岩	4400m, 4000m	327°C	1979-1996	1年程度の長期循環(10MWt)
イギ リス	ローズマノウス	花崗岩類	300m x 4	15°C	1976-1980	破碎関連の基礎実験
			2000m x 2, 2600m	105°C	1980-1990	2年間の長期循環(6MWt)
ドイ ツ	ウラハ	花崗岩類	3334m	104°C	1977-1990 2001-	2重管システムによる循環試験 実用化を視野に現場実験中
	ファルケンベルグ	花崗岩類	300m x 6	14°C	1977-1981	破碎技術開発を主とする基礎実験. 小規模循環試験
フラン ス	ル・メイヨ・モンター ニュ	花崗岩類	250m, 700m	—	1981-1988	AE観測やき裂挙動に関する基礎研 究. 小規模循環試験
E C	ソルツ	花崗岩類	2227m, 3590m, 5084m, 5093m	200°C	1986-	商業化を目指した実規模実験 坑井間隔450m
スウェー デン	フェールバッカ	花崗岩類	500m x 2	17°C	1984-1995 ?	熱利用を目指した小規模実験
オーストラ リア	ハンターバレー	花崗岩類	1946m	>90°C	1999-	温度測定坑を掘削、小規模調査
	クーパーベイズン	花崗岩類	4421m	250°C	2003-	商業化を目指した実規模実験
日 本	肘 折	花崗閃緑岩	1800m, 2200m, 2300m x 2	270°C	1984-2002	浅部・深部2層・多坑井生産・浅部で 3ヶ月間循環試験(9MWt)、下部で 10ヶ月間の長期循環試験
	雄 勝	花崗閃緑岩	1027m, 1100m	228°C	1989-2001	浅部・深部2層
	東八幡平	凝灰岩	300m, 700m	60°C	1983-	小規模実験、計測法・機器開発
	焼 岳	砂岩・粘板岩	300m x 3	60°C	1978—1983	小規模実験

表 2-6 世界各国の HDR 開発研究の展開

国 名	実験サイト	1975	1980	1985	1990	1995	2000
日 本	焼岳		◆ 小規模実験				
	肘折			◆ 基礎調査	◆ 上部貯留層開発 3ヶ月間循環	◆ 下部貯留層開発	◆ 長期循環
	秋の宮/雄勝			◆ 秋の宮(小規模)		雄 勝	
ア メ リ カ	Fenton Hill I	◆ 抽熱実証					
	Fenton Hill II		◆ IEA国際共同研究	◆ MH	◆ ICFT(2ヶ月)	◆ LCFT	
イ ギ リ ス	Rosemanowes		◆ 小規模実験		◆ LCFT('85-'88)		
ド イ ツ	Falkenberg		◆ 小規模実験				
	Urach		◆ 単一坑井試験	◆ 小規模実験	◆ 小規模循環試験	◆ ICFT(4ヶ月)	◆ 深部開発デモ
フ ラ ン ス	Le Mayet de Montagne		◆				
	Soultz						
スウェーデン	Fjallbacka		◆			?	
オーストラリア	Hunter Valley						◆ 調査井
	Copper Basen						◆ 商業化システム

フェントンヒルでの IEA 共同研究が終了してからは、地熱関連の IEA 多国間共同研究は途絶えていたが、1997 年3月に HDR と深部地熱に関する新たな協定が発効した。HDR に関しては、日本をタスクリーダーとして、アメリカ、スイス、イギリス、EC、オーストラリアが参加し、これまでの各国の経験を基にしてタスクシェアリングによる共同研究が開始され、2007 年まで継続される予定である(厨川, 1996; Mongillo and Nieva, 2003)。また、東北大学を中心に 1995～1998 年の間、文部省や NEDO 等の支援を受けてアコースティック・エミッション (Acoustic Emission; AE) による貯留層の高度計測に関する国際共同研究 (More-Than-Cloud; MTC 計画) が実施された。引き続いて、人工貯留層のモデル化と挙動評価技術の進展を目指した「次世代型地熱発電のための貯留層の統一的理解」に関する国際共同研究へと展開がなされている。

以下には、実規模に近い現場実験が実施されてきたフランスのソルツ、アメリカのフェントンヒル、イギリスのローズマノウスにおける状況をより詳しく述べる。

## 2-4-2 フランスでの現場実験

フランスのソルツ実験場は、ストラスブルグの北方約 50km、ライン地溝帯の西端に位置している。ソルツ周辺では開発対象となっている花崗岩基盤岩上の堆積層中に賦存した石油の開発が古くから行われ、多くの坑井が掘削されていたため、ヨーロッパの中でも有数の地温勾配の高い地域として知られていた。

ソルツでの開発計画は 1987 年から開始され、深度 1,400m 以深に広がる花崗岩基盤岩に対して GPK-1 (深度 3,590m)、GPK-2 (3,876m)、EPS-1 (2,227m) の 3 本の坑井が掘削されている。図 2-4 にソルツ実験場の坑井配置と AE 観測配置を示す (Baria et al., 1995)。

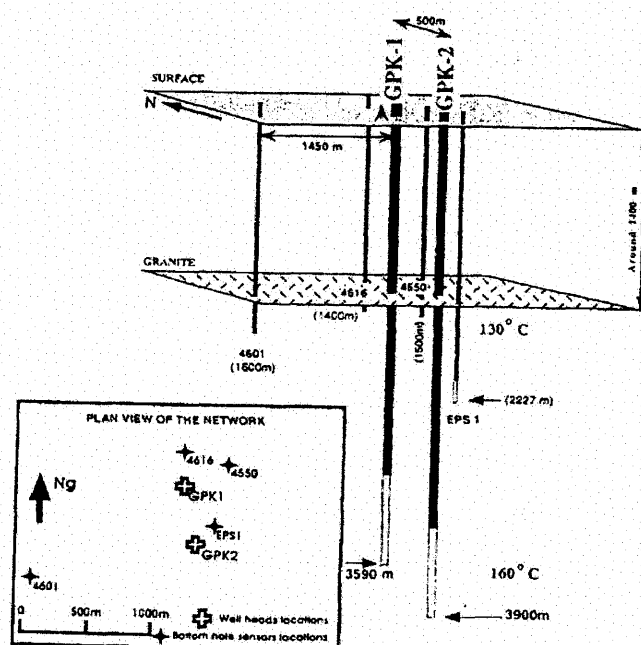


図2-4 フランスソルツ HDR 実験場の坑井 (GPK-1, GPK-2) および AE 観測孔配置 (Baria et al., 1995)。

1993年にはGPK-1井において大規模な水圧刺激が2回行われ、合計で45,000m<sup>3</sup>の水が注入された。この水圧破碎中に観測されたAEはほぼ南北に進展したが、最も透水性が改善されたのはケーシングシュー直下の浅い領域であった。1995年にはAEの分布するGPK-1井の南側約450m付近を目標にGPK-2井が掘削され、1995年と1996年にはGPK-2井から導通性を改善するために水圧刺激が実施された。図2-5には1993年と1995年の坑井刺激の際に観測されたAEの震源分布を示す(Jones et al., 1996)。AEの深度ごとの分布を検討した結果、水圧刺激によるフラクチャの進展は原位置応力の方向(Rummel and Baumgärtner, 1991)だけでなく、FMI検層やEPS-1井コアの調査から明らかにされている既存のフラクチャの卓越方向(Dezayes et al., 1995)の影響を受けていると考えられている(Jones et al., 1995)。1994～1995年にかけて、GPK-1井から行われた水圧刺激により造成されたフラクチャに対して、GPK-1井注入点から約450m離れた箇所での導通を目標としてGPK-2井が掘削された。

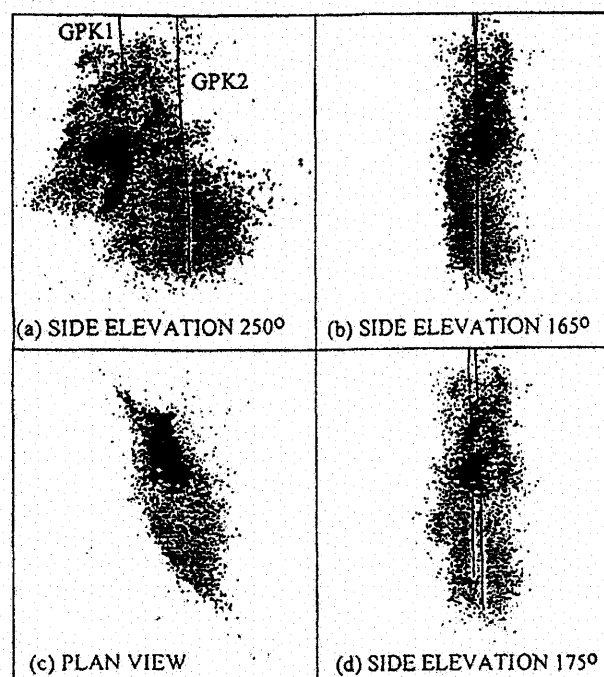


図 2-5 1993 年と 1995 年の坑井刺激で観測された AE の震源分布 (Jones et al., 1996)

1995年の夏には、GPK-2を注入井、GPK-1を注入井として循環抽熱試験が行われ、ダウンホールポンプを用いた試験では137℃の熱水を20 l・s<sup>-1</sup>で生産することに成功している。試験中に導通状況を把握するためにトレーサ試験が行われたが、6週間の試験期間中にトレーサの回帰は認められず、大規模な貯留層(<10,000 m<sup>3</sup>)の存在が示唆されている(Aquilina et al., 1996)。1996年9月にはGPK-2坑井から高注入流量による坑井刺激が行われ、更に地表施設を整備した1997年夏から秋にかけて4ヶ月間の循環試験が行われ、GPK-2とGPK-1井の間で合計28万m<sup>3</sup>の流体が循環され、平均で10～11MWの熱エネルギーを抽出することに成功している(Baria et al., 1998)。この結果を基にして、より高温の領域の開発を目指して5kmまでGPK-2井の増掘が行われ、深部貯留層の開発が進められている(Baria et al., 2000; Weidler et al., 2002)。

### 2-4-3 アメリカでの現場実験

アメリカでは、1974年にニューメキシコ州北部のバイアス(Valles)カルデラの西側外に位置するフェントンヒルで、世界最初の HDR システムの開発(第1期計画)が開始された。フェントンヒル実験場は地温勾配が高く(約  $65^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ )、しかもカルデラ活動による地質構造の乱れの少ない位置として選択された。カルデラ活動によって加熱されたプレカンブリア紀の花崗岩類に GT-2 坑井(深度 2.9 km、温度  $197^{\circ}\text{C}$ )が掘削され、一連の水圧破碎が行われた後に、注入井として EE-1 井が掘削され、世界で最初の循環システムが完成した(図 2-6)。このシステムを評価するため、1978 年初めには 75 日間、更に後半に 28 日間、続いて 1980 年には 286 日間の循環試験が行われた。これらの循環試験では、地下 2.7 km 付近の貯留層から 2~3MW の熱エネルギーを抽出することに成功した。これら第1期計画の実験結果については Dash et al. (1981)が詳しい報告を行っている。また、1983 年には Journal Volcanology and Geothermal Research に特集号が組まれている。

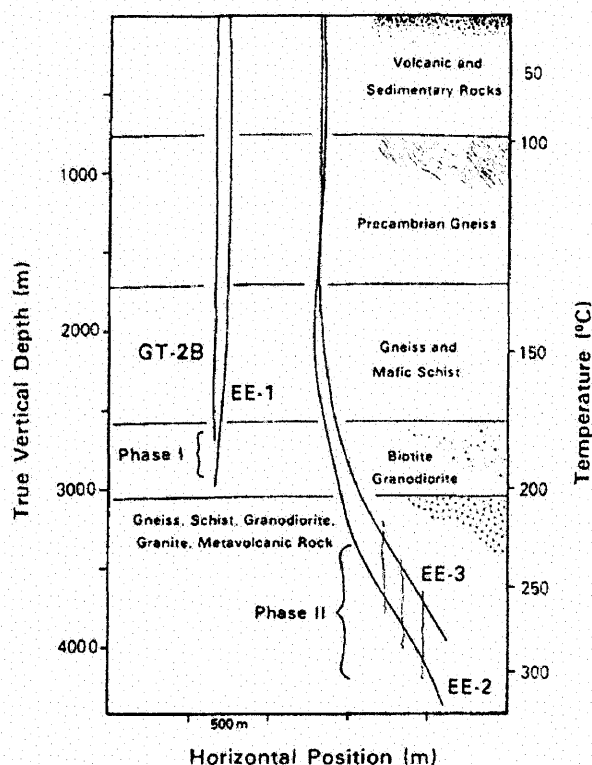


図 2-5 フェントンヒル HDR 実験場の1期・2期計画における坑井と地質断面

これら第1期の実験によって、HDR から実際に熱抽出可能なことが実証されたばかりか、HDR 開発の上で危惧された誘発微小地震、流体の地化学性状や循環水の逸水等の問題は克服可能なことが実証された。また、この間に、現在 HDR 開発に欠くことのできない坑井内 AE 観測機器を始めとする多くの機器やトレーサ試験等の貯留層評価手法が開発された(例えば Albright and Pearson, 1982; Tester et al., 1982)。第1期計画では貯留層規模が小さく、循環による温度低下が著しかったことから、1979 年からより

大規模な貯留層開発を目指した第2期計画が開始された。この研究開発計画は、その後 IEA 国際共同研究となり、1981～1986 年には日独からの研究者も参加して現場実験が進められた(厨川, 1984)。

第2期計画では注入井および生産井として EE-2 と EE-3 の2本の坑井が掘削され、その後2本の坑井間を水圧破碎によって導通させる計画であった(図 2-6)。フェントンヒル第1期計画があまりにも順調に進行したためか、第2期計画では循環システムを開発するにあたり幾つかの失敗を犯している。最も大きな失敗は、1期計画のフラクチャモデルをそのまま深部の第2期計画に当てはめてフラクチャの進展方向を予測し、生産井と注入井の2本の坑井を水圧破碎に先立って掘削したことである。坑井の掘削された1980 年代初めは石油危機直後の石油掘削リグの需要が逼迫していた時期という事情があったものの、EE-2 と EE-3 両坑井を掘削した後 EE-2 井から行われた幾つかの水圧破碎では、想定されていた南北方向の走向を持つ垂直のフラクチャは発生せず、EE-3 井との導通を達成することができなかった。1982 年12 月には EE-2 井から 21,000m<sup>3</sup> を超える注入を行う大規模水圧破碎(Massive Hydraulic Fracturing; MHF)を実施したが、それでも観測された AE は当初予想されていた方向と異なる方向に進展し、EE-3 との導通を達成することができなかった。その後、EE-3 側からも水圧破碎が行われたが循環システムを造成することができず、最後には EE-3 井からの枝掘りによって導通を達成することになった。

1996 年夏にはこの貯留層を用いて1ヶ月間の循環試験(Initial Closed-loop Flow Test; ICFT)が行われた(Dash, 1989)。MHF や ICFT 中に得られた AE の解析結果や ICFT 時の坑井内検層結果から、水圧破碎によって作られたフラクチャはそれまで考えていたような単純なものではなく、多くのフラクチャが複雑に組み合わさっていると考えられた(例えば Dreesen, et al., 1987; Murphy et al., 1983)。

ICFT を最後に日米独による IEA 共同研究は終了し、その後はアメリカ独自で開発が継続された。エネルギー省(DOE)研究予算の減少の中で徐々に地表システムの設置が進められ、1992 年から1993 年にかけて長期循環試験(Long Term Flow Test; LTFT)が行われた。LTFT 期間中の平均で4MW の抽熱を行い、その間貯留層の温度低下が認められないばかりか、実際の運転の際に大きな問題となる逸水率も7%まで低下するという有望な結果が得られた(Duchane, 1995; Brown, 1997)。

その後、LANL では DOE の研究予算が非常に厳しい状況下で、企業の協力を得てプロジェクトを進めるといったシナリオを作り HDR 開発の実用化を目指した。しかし、DOE は最終的に1995 年秋にフェントンヒルの閉鎖を決定した。しかし一方で、DOE は資源量が膨大であり、かつ温室効果ガスの発生の少ないクリーンなエネルギーである HDR の開発を諦めたわけではなく、従来型地熱開発との技術交流を積極的に図りながら、基礎的な研究を継続中である。このため、2-3 でも述べたように DOE は EGS の促進を積極的に支援している。また、1997 年に締結された IEA 地熱実施協定にも参加し、HDR (EGS) の経済性評価および従来型地熱資源との技術交流に関するサブタスクを分担している。

#### 2-4-4 イギリスでの現場実験

イギリスの HDR 開発計画は、コーンウォール半島のカーンメネリス(Carnmenellis)花崗岩バソリスにあるローゼマノウス採石場を実験場として、ケンボン鉱山大学(CSM)の研究グループによって実施された。図 2-7 に実験場の位置を示す。ローゼマノウス HDR 現場実験の成果については、CSM の研究者により2分冊の本としてまとめられている(Parker, 1989b)。また、貯留層内の流体流動に関する評価や地化学的



な評価に関して詳しいレビュー (Richards et al., 1992; Richards et al., 1994) がなされている。

ローズマノウスでの開発計画は研究開発の進展によって大きく3つの期間に分けられる。第1期期間は1977～1980 年に行われた基礎実験の段階で、花崗岩露頭に 300m の坑井2本を掘削し、水圧刺激によって両坑井間をつないで循環試験を実施した。

1980 年に開始された第2期期間は、更に3つの期間 (2A, 2B, 2C) に分けられる。第 2A 期 (1980～1983) では 2.1 km の坑井を2本掘削し、水圧破碎により両坑井間を導通させようとしたが、注入井(RH12)と生産井(RH11)間の導通は不十分で、流体の回収率は 30%と低く、インピーダンスも平均で  $1.8\text{MPa}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$  と比較的高かった。この原因として RH11 井の掘削方向が花崗岩内の既存割れ目の方向と一致し、導通状況が不良だったためと考えられた。このため、第2B期 (1983～1986) では、第2A期に行われた水圧破碎時の AE 観測結果を基にして、新たな坑井(RH15)を 2.6km まで掘削した。RH12 井と RH15 井間の導通確認試験により、貯留層の透水性がよいことが確認されたため、第2C期として貯留層の特性を把握するために長期の循環試験が行われた。

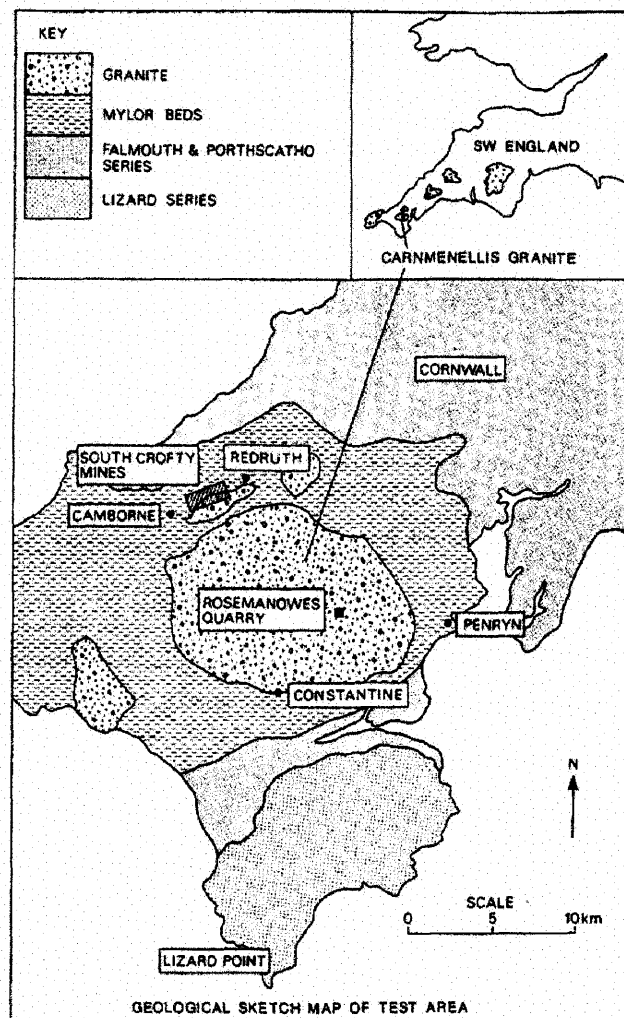


図 2-7 ローズマノウスの CSMHDR 実験場の位置と周辺の地質

第2C期の長期循環試験は、1986年10月1日から1988年9月30日までの2年間実施されたが、大きく三つのステージに分けられる(Parker, 1989a)。第1ステージでは注入流量を段階的に増加させ、貯留層の流動特性を把握した。その結果、流動状況が最も安定するのは注入流量が  $24\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  の時で、注入圧力は10MPa、インピーダンスは  $0.6\text{MPa}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$  となることが分かった。第2ステージでは貯留層圧力を下げるために生産(RH15)井にダウンホールポンプを設置して生産を行ったが、ポンプの運転によりフラクチャの閉塞が認められた。このため、閉塞防止のためにプロップアントの注入が行われた。安定な循環を継続した第3ステージでは、生産流体の温度低下( $1^{\circ}\text{C}/\text{月}$ )が認められ、トレーサ試験により注入井(RH12)坑底部と生産井(RH15)上部との間に流体の短絡が確認された。また、注入流量を一定としているにもかかわらず RH15 からの生産量が漸減した。

1988年から始まった第3期計画は、コーンウォールに発電を目指したプロトタイプ規模のHDRシステムを開発することを目標に、システムの概念設計が行われた。しかし、発電に必要な高温の熱水を得るためには6kmもの坑井を必要とすることなど、コストの点で現実的でないと結論に達し、国内での研究開発は中止され、それまでに蓄積された多くの技術はECプロジェクトとして実施されているソルツで生かされることになった(Garnish et al., 1992)。

イギリス高温岩体開発計画の特徴は、アメリカフェントンヒルでの実験結果を上手く取り入れ、小規模実験から段階的に開発を進めた点と、実験が大規模化した第2期に入っても基礎研究を比較的重視した点である。また、岩盤の温度が高くなかったことが幸いして、技術的にはそれほど問題もなく大規模な循環システムを造ることができたことで、長期循環試験中に色々な試みが行われ、多くの知見が得られている(Parker, 1989b)。

## 2-5 肘折高温岩体の開発

肘折HDR実験場は月山の東側に位置する直径がほぼ2kmの肘折カルデラの南端に位置している(図2-8)。約1万年前の肘折火砕流堆積物に代表される火成活動に伴い形成された肘折カルデラ内には、肘折と黄金の2つの温泉が、またカルデラの南東外側には石抱温泉があり、古くから湯治場として有名であった。このため、昭和43年から昭和48年にかけて実施された地熱資源調査以来、従来型地熱の開発を目的に、昭和49年には地質調査所による全国地熱基礎調査、昭和51年には地熱開発精密調査と、一連の調査が行われてきた。更に昭和54年から昭和57年にかけては、石油資源開発(株)によって地熱発電所の開発に向けたカルデラ内部の地熱調査・探査が行われた。この調査・探査では、SKG-1～SKG-6の坑井が掘削されたが、十分な熱水・蒸気を確保するに至らず、開発計画は中止された。石油資源開発によって掘削された6本の坑井の内、カルデラ内部南側に掘削されたSKG-2井は、深度1,500m以深で花崗閃緑岩基盤岩となり、最終深度の1,800m付近の温度は $250^{\circ}\text{C}$ に達した。しかし、花崗閃緑岩内部での透水性は低く、熱水や蒸気の生産を得るには至らなかった。この間の経緯については木谷・手塚(2002)が肘折実験場周辺の地質とフラクチャ系についてまとめた中に簡潔に記述されている。

肘折カルデラの南側では、石油資源開発による調査・探査と並行して、昭和54年にはカルデラ内部南

側で発電用地熱開発環境調査として2本の坑井が掘削された。また、昭和55年、56年には、「銅山川下流域」地熱開発促進調査において、カルデラ外部の北部、東部地域において6本の坑井が掘削された。

発電地熱開発環境調査の一環としてSKG-2井の西側に掘削された54E-AHD-1井や、逆に促進調査の一環として実験場の東南東側1km付近に掘削されたN56-DZ-6井においても、前者で深度1,502m～1,504mで、後者で1,688m～1,801mで花崗基盤岩を確認しており、カルデラ南側の深部には高温の花崗岩類が広く分布しているものと予想された。このように、①透水性の低い、高温の花崗岩類の広がり、SKG-2井だけでなく周辺の坑井でも確認されていること、②花崗岩基盤に到達したSKG-2井だけでなく、観測井として使用可能なSKG-1井がカルデラ中央部に残されていたこと、更に③実験場として十分な広さの敷地を確保可能なこと、④研究開発に対して県・村・地元が協力的であったこと、⑤循環抽熱に十分な水を周辺の河川から確保可能なことなどから、高温岩体開発実験場として適した場所と考えられた。このため、日米独3カ国によるフェントンヒルでの現場実験終了後の、国内での要素技術開発に向けた実験場として肘折が選定された。

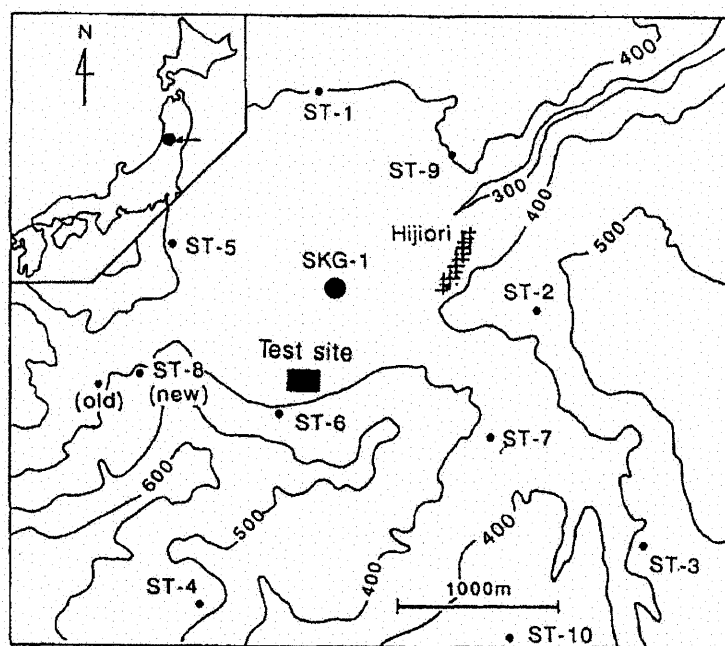


図 2-8 肘折 HDR 実験場の位置. カルデラ中心部に位置する SKG-1 井と周辺の ST-1～ST-10 は AE の観測に使用

肘折での高温岩体開発計画の第一歩は、昭和59年(1984年)に実施されたSKG-2井の予備的な調査である。昭和60年(1985年)からはNEDOの事業となり、フェントンヒルでの国際共同研究が終了した1986年からは開発計画が本格化し、実規模に近い貯留層の開発を通じて、貯留層造成に必要な水圧破碎技術や、人工貯留層の3次元的な構造を把握して地下循環システムを作るためのフラクチャマッピングや掘削導通技術、更に熱抽出の評価に必要な貯留層評価技術というHDR開発に必要な一連の要素技術の

開発が進められた。これらの開発は地熱技術開発、三井金属鉱業、石油資源開発、電力中央研究所の4つ委託先が実施し、産業技術総合研究所(当時公害資源研究所、その後資源環境技術総合研究所)はNEDOや委託先と協力して現場実験に参加し、得られたデータの解析評価を実施した。

肘折でのHDR開発は、大きく2つの段階に分けることができる。即ち、1991年までの前半は深度1,800m付近を対象として上部貯留層の開発が行われ、その後は深度2,200m付近を対象に下部貯留層の開発が進められ(Matsunaga, 1994; Sato and Ikawa, 1995; 厨川他, 1996; Nagai and Tenma, 1997)、2000年から2002年にかけて研究開発の総まとめとなる長期循環試験が実施され、試験の最後には100kW小型バイナリーシステムによる発電も実施された(Kawasaki et al., 2002)。図2-9に長期循環試験実施時の貯留層の状況を模式的に示す。

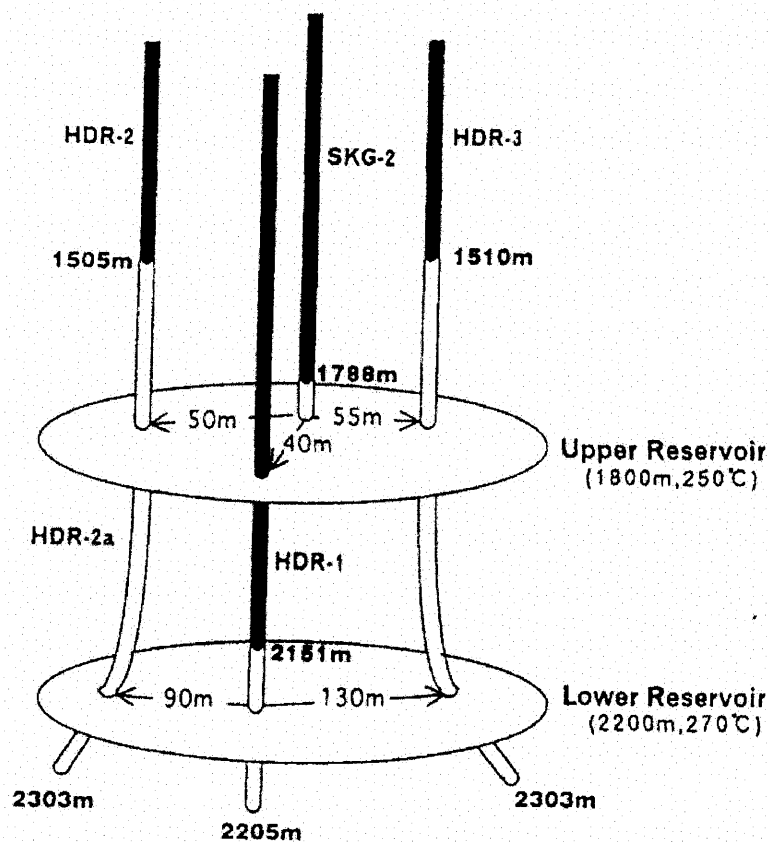


図2-9 肘折HDR貯留層の模式図。1500m付近の花こう閃緑岩基盤に到達するまでは各坑井ともケーシング(黒塗り部分)が設置され、それ以深は裸坑となっている

上部貯留層の開発では、まず1986年に既存の坑井SKG-2井坑底付近からの坑井刺激によりフラクチャを造成し、翌1987年に生産井HDR-1井を掘削してフラクチャと導通することに成功し、翌1988年に2週間の循環試験を行った。その後導通性の改善と流体の回収率の向上を目指して1989年に注入点から西側の貯留層に向けてHDR-2井(1,910m)を、更に1990年には注入点から東側の貯留層に向けてHDR-3坑井(1,907m)を掘削し、その都度循環試験(1989年に1ヶ月間、1991年に3ヶ月間)を実施した。特に、

1991年に行った3ヶ月間の循環試験では、温度150～180℃の熱水・蒸気を安定して生産（回収率80%）することに成功し、地質構造の複雑な日本においてもHDRの概念が適応可能なことを実証した（Matsunaga and Yamaguchi, 1992）。上部貯留層循環試験では、それまで水圧破砕（あるいは水圧刺激）により造成した人工貯留層からの熱抽出で一般的に考えられていた1本の注入井と1本の生産井という、いわゆるダブルットシステムによる循環方式ではなく、注入井から延びるフラクチャに対して、注入井を挟んで2本の坑井を配置し、回収率を上げるという、既存の天然割れ目が多い、地質構造の複雑なわが国に適したシステムにより熱抽出を行ったということが大きな特徴である。このような多坑井間の循環試験は、体積的な高温の岩体も持つ熱エネルギーを効率的に取り出すためにArmsteadとTester（1987）が提案した多坑井貯留層（multi-bore reservoirs）の第一歩となるものであった。

HDR発電を目指した次の開発ステップとして、大量の熱水・蒸気を、長期間安定して生産することが重要な課題と考えられた。そのためには、規模の拡大に必要なマルチフラクチャによる生産と、貯留層の長期的な挙動の把握のために年単位の循環抽熱実験が必要と考えられた。このため、1992年からは、長期間の熱抽出挙動を把握するため、深部のより高温の岩盤内により規模の大きな下部貯留層の開発が進められた。

下部貯留層の開発は、1992年にHDR-1井下部の裸坑部から2,000m<sup>3</sup>規模の水圧刺激を行って造成した貯留層に向けて、1993年と1994年にそれぞれHDR-3井（2,303m）とHDR-2井（2,303m）の増掘を行い、1995年と1996年の2回、予備循環抽熱試験が実施された。これら予備循環試験の結果を基に、地表施設の整備が進められ（Nagai and Tenma, 1997; Tenma and Iwakiri, 1998）、2000年11月から長期循環試験が実施された（佐藤・岡部, 2001; Oikawa et al., 2001; Kawasaki et al., 2002）。長期循環試験の目的は以下のようにまとめられる。

- ① 肘折に造成した高温岩体人工貯留層の抽熱特性及び貯留層挙動を把握・評価する。
- ② これまでに得られた肘折貯留層の理解に基づいて構築した肘折貯留層モデルの特性を長期循環試験によって確認し、高温岩体発電システムを実現するために必要な要素技術体系を構築する。
- ③ 高温岩体から熱抽出を行い、実用的な高温岩体発電の可能性を評価するとともに、実用化のための課題を抽出する。

約2年間におよんだ長期循環試験は、前半に実施したHDR-1井からの下部貯留層への単独注水、循環試験と、後半のSKG-2井を経由した上部貯留層への注入と、後半に実施したHDR-1井からの下部貯留層への注入を同時に行うデュアル循環試験に分けられる。後半のデュアル循環試験では、1980年2月にアメリカフェントンヒルにおいて短期間の発電が行われて以来22年ぶりに、100kW バイナリーサイクルシステムを用いた発電も実施された。

長期循環試験は2002年8月末で終了し、肘折実験場での実験計画は全て終了した（松永他, 2003）。

## 2-6 流体の地化学調査とトレーサ試験

### 2-6-1 貯留層における流動評価のための地球化学的手法

フラクチャ内の流動状況を把握するために、地化学的手法が重要な役割を果たす。ここでいう地球化学的手法とは、流体の地化学調査とトレーサ試験の両者を示すが、両者とも HDR 貯留層内から流出するあるいは貯留層を流動してくる流体の溶存成分自体あるいはその変化から貯留層内の情報を得ようとする点では一致する。前者は貯留層内を流動する(あるいは滞留している)間に周辺の岩盤との間で自然に発生する溶解、沈殿、変質等の相互作用により流体の溶存成分の変化から反応場の温度や容積等を推定するものである(例えば Althaus and Edmunds, 1987; McCartney, 1987)。これに対して、後者は循環のために貯留層へ注入する流体にマーカーとなる物質を人為的に添加し、地下の貯留層内を通過して再び地表に湧出してきた時の時間や濃度の変化から、貯留層内の滞留時間、容積、流動状況を推定しようとするものである。

### 2-6-2 流体の地化学調査

地球化学的手法の内、流体の地化学調査に関しては、主に HDR 貯留層内の流体と岩盤との間の相互作用による流体の変化が基本となるため、現れる変化が遅く、繰り返しての評価は困難である。しかし、表 2-7 に示すように、循環試験時の貯留層内流動評価以外にも、地化学調査の役割は HDR 開発の広い範囲に関係している。

表 2-7 流体の地化学調査の目的と測定対象および得られる結果

評価項目	循環・処理流体の測定対象				備考
	溶存成分	ガス成分	微粒子	微生物	
貯留層刺激・改善の監視	○				処理流体
流路に関する情報	○	α(ラドン)			容積、表面積、フラクチャ幅
貯留層の長期的挙動予測					
温度	○	○			地化学温度計
フラクチャの安定性	○		○		
環境(放流、健康・安全監視)	○	○		○	有害成分
地表坑井施設(スケール・腐食)	○	○	○	○	DO、Eh、H <sub>2</sub> S 等

例えば、フランスのソルツ実験場では、注水刺激による貯留層造成時に、注入水と破碎後に帰ってきた流体中の化学成分濃度を比較することにより、フラクチャの状況について評価する試みがなされている(Pawels et al., 1992)。貯留層造成後直ぐに行われる循環試験では、貯留層岩盤中にあった高濃度の溶存成分が流出してくることから、循環初期の濃度変化から貯留層容積の推定が行われる(Robinson, et al., 1987; Kiho and Ohsumi, 1992)。また、イギリスローゼマノウスでは、循環流体中のラドン濃度によるフラク

チャ幅の推定 (Andrew, et al., 1987) や、Na、Li 等の増加量を基にした熱交換面積の推定の試み (Richard and Savage, 1989) 等、貯留層評価のために種々の試みがなされている。

従来型地熱では、貯留層温度を推定するために地化学温度計 (例えば Fournier and Truesdell, 1973) が広く適応されている。HDR 貯留層においても貯留層温度の推定に地化学温度計が一般的に用いられている (例えば Grigsby et al., 1989) が、その指示温度は初期岩盤温度を反映するものの、岩盤の温度条件で岩石-流体間の反応が十分に平衡状態に達するには循環流体の貯留層内の滞留時間が短すぎ、熱抽出に伴う岩盤の温度降下を十分に反映できていないと考えられている (Murphy et al., 1981)。

循環が長期間にわたると、循環流体による岩石鉱物の溶解や逆に流体からの析出により、フラクチャの流路の拡大や閉鎖が発生し、循環流体の流動や熱抽出に影響を及ぼすことが考えられる。また、流体との反応により岩石が変質し、それに伴って強度の低下が起きた場合には、フラクチャの閉鎖等が発生する可能性があり、貯留層の寿命とも密接に関係する (例えば Shoji et al., 1990)。また、循環流体の化学成分は、坑井内や地表の配管でのスケールや腐食の発生とも関係するので、貯留層の寿命だけでなく熱抽出のための循環ループ全てにわたり大きな影響を及ぼす。従って、長期にわたり貯留層岩石と流体の化学性状がどのように変化していくかを予測する必要がある。また、長期循環試験による循環流体のモニタリングだけでなく、実際に HDR 実験場貯留層の岩石を用いた室内実験による水-岩石反応の検討 (Charles, 1978; Savage et al., 1992; Azaroual and Fouillac, 1997; 松永他, 1997; Plagnes et al., 2000; 木方, 2000) や、水-岩石反応実験結果と数値シミュレーションとの比較による平衡状態の反応生成物の評価 (Savage, 1986; Azaroual and Fouillac, 1997; Durst and Vuataz, 2001) が行われるようになってきた。しかし、反応に寄与する岩石鉱物の複雑さ、高温における反応係数等のデータの不確実さ、流動状態における非平衡反応等の多くの要因によって、シミュレーションではまだ実際の現象を十分に反映した結果を得るまでには至っていない。また、本方法は岩石と流体間の化学反応による変化を把握する受動的な方法のため、繰り返しでの測定ができない、一般に変化に対する応答が遅いという欠点がある。このため、貯留層の流動状況の評価するためには、次に述べるトレーサ試験がしばしば実施される。

### 2-6-3 トレーサ試験

トレーサ試験は、以下のような利点があり、貯留層の流動状況の評価する上で最も有効な方法の1つである。

- HDR 貯留層における流体の移動速度、水理学的な導通性、容積、拡散の状態を直接調べることができる、
- 繰り返して試験ができるために貯留層の経時的な変化を評価できる、
- 試験を比較的容易に行うことができる、
- 適当な試験方法を選択することにより比較的低コストで試験を行うことができる。

このため、一般の地熱地域だけでなく、世界各地の HDR 実験場においてもしばしばトレーサ試験が行われ、貯留層の容積の推定や流体の流動評価が行われている (Tester et al., 1982; Robinson et al., 1987; Pawels, et al., 1991; Rodrigues et al., 1995; Matsunaga et al., 1995c, 1998, 2001, 2002; Aquilina et al., 1998; 柳澤他, 2002)。特に、HDR 貯留層の場合には注入水がそのまま生産流体になるため、リチャージ

の位置や量が明確でない従来型の地熱貯留層に比較して、貯留層内の流体流動をより評価し易いという利点がある。一方で、貯留層（フラクチャ）内の流れだけでなく、坑井内の流動が試験の結果に影響する可能性がある。更に、実際のフィールドの評価を行う場合、境界条件やデータもより多くなるため、トレーサ試験のデータだけでなく他のデータを含めた総合的な解釈が重要になる。坑井内の流動がトレーサ試験に及ぼす影響については第4章で評価する。また、肘折における上部貯留層を対象としたトレーサ試験の解析については第5章と第6章で、更に上部下部2つの貯留層を対象とした長期循環試験中のトレーサ試験の解析については第7章で詳しく述べる。

トレーサ試験には上述したような多くの利点があるが、より詳しく貯留層の性状を評価するためには、今後次のようなトレーサの開発が望まれている(Jones, et al., 1992; Murphy, et al., 1999)。

- 簡便に使用できるトレーサ
- 高温の貯留層に適用できるトレーサ
- 坑井内で使用できるトレーサ機器(注入器や検出器)
- 温度に関する情報取得のためのトレーサ

簡便に使用できるトレーサとしては、計測が容易、入手や取り扱いが容易、安価等の点で、ハロゲン元素や蛍光染料トレーサの使用が適当と考えられる。蛍光染料トレーサについては耐熱の低さが指摘されており、地熱貯留層で使用する場合にはこの点での検討が必要である(Horne, 1986; Adams and Davis, 1991)。蛍光染料を初めとする有機化合物トレーサを地熱貯留層評価に使用するため、ユタ大学のグループにより精力的な研究が行われている(Rose, 1998; Rose et al., 2000)。また、トレーサの安定性には温度だけでなく、流体の pH や酸化還元状態、貯留層岩石の種類等の影響も考えられ(Jones, et al., 1992)、対象地域の使用条件にあった検討が必要と考えられる。このため、最も多く使用されているフルオレセインについて室内での評価実験を進めている(杉田他, 2003)。

試験自体の精度を検証するためには、複数のトレーサを併用して相互の比較を行うことが考えられる。また、HDR 貯留層の評価のように比較的短期間に繰り返してトレーサ試験を行うためには使用できるトレーサの種類が多いことが望ましい。このため、宮崎他(1990)は肘折 HDR 貯留層での循環試験に使用するための新たなトレーサの選定を行った。それらについては第3章で詳しく述べる。

3番目の坑井内機器あるいは手法の開発に関しては、個々のフラクチャの流体流動をより適切に把握できるようになるため重要である。坑井内機器としては、フェントンヒルで放射性トレーサの坑井内計測を行った実績がある(Tester, et al., 1982)。放射性トレーサの場合には検出感度が高いために注入量が少なくても良いという利点があるが、日本の場合には安全性の点から使用することは不可能である。放射性トレーサ以外の物質を使用することも考えられるが、貯留層規模の増大に伴う多量のトレーサのハンドリングが必要になること等、解決すべき幾つかの問題が残されている。今のところ実現可能性の高いと考えられるのは光ファイバーケーブルを使用した坑井内蛍光光度センサーである。このセンサーを開発するためには、高温高圧下で使用するためのワイヤラインの開発等多くの労力と費用が必要である。しかし、蛍光染料トレーサには計測が容易というだけでなく、高感度で、しかも測定装置を工夫することにより連続測定が可能であるという大きな利点もある。今回はこの利点を生かすため、光ファイバー蛍光光度計を用いた地表におけるトレーサ連続検出システムを製作し、肘折での長期循環試験に使用した。その結果を第



7章で述べる(Matsunaga et al., 2001, 2002; Yanagisawa, 2003)。

最後の項目である温度情報取得のためのトレーサに関しては、Robinson(1985)によってエステルやアミドの水和反応を利用した反応性トレーサの研究が精力的に行われ、イギリスローゼマノウス実験場で現場実験も実施された。しかし、反応性トレーサとして選択された物質の水和反応は、温度だけでなく、流体のpH に大きく影響されるため、フラクチャ内の流体条件が不明の場合、温度の把握が困難という問題に遭遇している。一方、蛍光染料の高温での分解から貯留層温度推定の可能性が指摘されており、貯留層の条件等を加味した加熱試験が必要と考えられる。ユタ大学では上述したようにいくつかの蛍光染料について加熱実験を実施しているが(Rose and Adams, 1994)、我々も肘折での使用を念頭に蛍光染料トレーサの加熱試験を実施したが、その結果については第3章で述べる。更に、HDR 貯留層の安定運転のために重要なサーマルブレイクスルー予知に必要な貯留層温度推定のため、蛍光染料の熱分解特性の評価と反応性トレーサへの適応の必要性について第7章で指摘する。

### 参考文献

- 阿部博之, 1996, 次世代地熱開発における学術研究の役割と意義. 資源・素材'96(仙台), A-④-8.
- Adams, M.C. and Davis, J., 1991, Kinetics of fluorescein decay and its application as a geothermal tracer. *Geothermics*, 20, 53-66.
- Albright, J.N. and Pearson, C.F., 1982, Acoustic emission as a tool for hydraulic fracture location: Experience at the Fenton Hill Hot Dry Rock geothermal site. *J. of Geophysical Res.*, 87, 936-944.
- Althaus, E. and Edmunds W.M., 1987, Geochemical research in relation to hot dry rock geothermal systems. *Geothermics*, 16, 451-458.
- Andrews, J.N., Hussain, Batchelor, A.S., and Kwakwa, K., 1987,  $^{222}\text{Rn}$  solution by the circulating fluid in a hot dry rock geothermal reservoir. *Applied Geochemistry*, 1, 647-658.
- Aquilina, L., Deschamps, P., Brach, M., Cotiche, C., Elsass, P., and Fouillac, C., 1996, Geochemical monitoring of the injection and circulation tests (summer 1995) at the Soultz HDR site. *Report BRGM*, R 38791.
- Aquilina, L., Rose, P.E., Vaute, L., Brach, M., Gentier, S., Jeannot, R., Jacquot, E., Audigane, P., Tran-Viet, T., Jung, R., Baumgärtner, J., Baria, R., and Gerard, A., 1998, A tracer test at the Soultz-sous-Forets hot dry rock geothermal site. *Proc. 23rd Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, SGP-TR-158, 343-350, Stanford University, Stanford, California.
- Armstead, H.C.H. and Tester J.W., 1987, *Heat Mining*, E. & F.N. Spon, London.
- Azaroula, M. and Fouillac, C., 1997, Experimental study and modelling of granite-distilled water interactions at 180°C and 14 bars. *Applied Geochemistry*, 12, 55-73.
- Baria, R., Garnish, J., Baumgärtner, J., Gerard, A., and Jung, R., 1995, Recent developments in the European HDR research programme at Soultz-sous-Forets (France). *Proc. World Geothermal Congress '95*, 4, 2631-2637.
- Baria, R., Baumgärtner, J., Gerard, A., Jung, R., and Garnish, J., 1998, Current status of the European HDR

- program at Soultz-sous-Forêts, France. *Proc. 4th Int. HDR Forum*, Strasbourg, France, September 28-30.
- Baria, R., Baumgärtner, J., Gerard, A., Jung, R., and Garnish, J., 2000, The European HDR programme: main targets and results of the deepening of the well GPK2 to 5000m. *Prod. World Geothermal Cong. 2000, Beppu-Morioka*, 3643-3652.
- Batchelor, A.S., 1989a, Preliminary views on the development of a deep system, Section 2 Other considerations, In *Hot Dry Rock Geothermal Energy: Phase 2B final report of the Camborne School of Mines Project*, Parker, R.H. ed., p.1271, Pergamon Press.
- Batchelor, A.S., 1989b, Hot dry rock and its relationship to existing geothermal systems. In *Hot Dry Rock Geothermal Energy, Proc. Camborne School of Mines International HDR Conference*, Robertson Scientific Pub. (London), 13-29.
- Brown, D., 1997, Review of Fenton Hill HDR test results. *Proc. NEDO Int. Geothermal Sympo.*, 316-324.
- Charles, R.W., 1978, Experimental geothermal loop I: 295°C. *Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-7333-MA*.
- Chopra, P. and Wyborn, D., 1998, The commercial framework for a planned HDR project: Hunter Valley, Australia. *Proc. 4th Int. HDR Forum*, Strasbourg, France, September 28-30.
- Clifton, C. and Entingh, D., 1998, DOE's EGS program. *Geothermal Resources Council Bull.*, 27, 167-169.
- Cornet, F.H., 1989, Experimental investigation on forced fluid flow through a granite rock mass. In *European Geothermal Update, Proc. 4th International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy R & D*, pp.189-204, Florence, Kluwer Academic.
- Cornet, F.H. and Yin, J., 1995, Analysis of induced seismicity for stress field determination and pore pressure mapping. *Pure Appl. Geophys.*, 145, 677-700.
- Daneshy, A.A., 1973, On the design of vertical hydraulic fractures. *J. Petrol. Tech.*, 25, 937-949.
- Dash, Z.V., Murphy, H.D., Cremer, G.M., 1981, Hot dry rock geothermal reservoir testing: 1978 to 1980. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-9080.
- Dash, Z.V. ed., 1989, ICFT: An Initial Closed-loop Flow Test of the Fenton Hill phase II HDR reservoir. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-9090-SR.
- Dezayes, Ch., Villemin, T., Genter, A., Traineau, H., and Angelier, J., 1995, Analysis of fractures in boreholes of the Hot Dry Rock project at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben, France). *Sci. Drilling*, 5, 31-41.
- Dreesen, D.S. and Miller, J.R., 1985, Open-hole packer and running procedure for hot dry rock reservoir testing. *USDOE Geothermal Review Meeting*, Washington, DC., September 11-12.
- Dreesen, D.S., Malzahn, M.V., Fehler, M.J., and Dash, Z.V., 1987, Identification of MHF fracture planes and flow paths: A correlation of well log data with patterns in locations of induced seismicity. *Trans. Geothermal Resources Council*, 11, 339-348.

- Duchane, D., 1995, Hot Dry Rock geothermal energy in the USA - Moving toward practical use. *Proc. World Geothermal Cong. '95*, 4, 2613-2617.
- Duchane, D., 1998, The history of HDR research and development. *Proc. 4th Int. HDR Forum*, Strasbourg, France, September 28-30.
- Durst, P., and Vuataz, F-D., 2001, Geochemical modeling of the Soultz-sous-Forêts hot dry rock system. Brine rock interactions in a deep hot fractures granite reservoir. *Proc. 26th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., SGP-TR-168, 232-241.
- Eliasson, T., Lind G., Lindblad-Passe, A., Lindblom, U., Sundqvist, U., and Wallroth, T., 1988, The Swedish hot dry rock project. *Preprints of Int. Workshop on Hot Dry Rock*, 54-61, Tsukuba, Japan, Nov. 4-5.
- Fehler, M., House, L., and Kaieda, H., 1987, Determining planes along with earthquakes occur: Method and application to earthquakes accompanying hydraulic fracturing. *J. Geophys. Res.*, 92, 9407-9414.
- Fournier, R.O. and Truesdell, L.A.H., 1973, An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1255-1275.
- Garnish, J., Batchelor, T., and Ledingham, P., 1992, Hot dry rock in Europe. *Geothermal Resources Council Bull.*, 21, 167-173.
- Genter, A. and Traineau, H., 1992, Borehole EPS1, Alsace, France. Preliminary geological results from granite core analyses for hot dry rock research. *Scientific Drilling*, 3, 205-214.
- Genter, A., Traineau, H., Dezayes, C., Elsass, P., Ledesert, B., Meunier, A., and Villemin, T., 1995, Fracture analysis and reservoir characterizations of the granite basement in the HDR Soultz project (France). *Geothermal Science Tech.*, 4, 189-214.
- Geodynamics Ltd., 2003, Annual report 2003. Geodynamics Ltd. ABN 55 095 006 090.
- Gerard, A., Baumgartner, J., Baria, R., and Jung, R. 1997, An attempt towards a conceptual model derived from 1993-1996 hydraulic operations at Soultz. *Proc. NEDO Int. Geotherm. Sympo.*, 329-341.
- Grigsby, C. O., Tester, J.W., Trujillo, P.E., and Counce, D.A., 1989, Rock-water interactions in the Fenton Hill, New Mexico, Hot Dry Rock geothermal systems: I – Fluid mixing and chemical geothermometry. *Geothermics*, 18, 629-656.
- Haenel, R., ed., 1982, *The Urach geothermal project* (Swabian Ald. Germany). E. Schweizerbart's Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 419 pp.
- Haimson, B.C. and Fairhurst, 1969, Hydraulic fracturing in porous-permeable materials. *J. Petrol. Tech.*, 21, 811-817.
- Hopkirk, R., 1999, personal communication. (DHM 計画に関しては <http://www-deep-heat-mining.unine.ch/dhm-swiss.html> が参考となる)
- 堀 義直, 北野晃一, 1996, 電中研雄勝 HDR プロジェクト—研究計画と主な成果—. 資源・素材'96 (仙台), A-④-4.
- Horne, R.N., 1986, Tracer tests. 20p., *Text of Geothermal Resources Council. Course on Testing of*

- Geothermal Wells*, Palm Springs 1986.
- Hubbert, K., 1987, Preface. In *Reservoir Stimulation*, ed. Economides, M. J. and Nolte, K.G., Schlumberger Education Service.
- Hyodo, M., Shinohara, N., Takasugi, S., Wright, C.A., and Conant, R.A., 1995, An HDR system hydraulics model and detailed analysis of the 1991 circulation test at the Hijiori site, Japan. *Geothermal Resources Council Trans.*, 19, 263-268.
- Jones, R.H., Jupe, A., Wilkins, C., Willis-Richards, J., and Nicholls, J., 1992, Review of HDR measurement techniques, *CSMA Report for AEA Technology*, CSM Associates Ltd., p.220.
- Jones, R.H., Beauce, A., Fabriol, H., and Dyer, B., 1995, Imaging induced microseismicity during the 1993 injection tests at Soultz-sous-Forets, France. *Proc. World Geothermal Cong. '95*, 4, 2665-2669.
- Jones, R.H., Beauce, A., Bitri, A., and Wilson, S., 1996, The analysis and interpretation of microseismicity induced during the 1995 stimulation and circulation experiments at the European HDR project at Soultz-sous-Forets, France, *Proc. 3rd Int. HDR Forum*, 81-82, Santa Fe, USA, May 13-16.
- Jung, R., 1992, Connecting a borehole to nearby fault by means of hydraulic fracturing. *Geothermal Resources Council Trans.*, 16, 433-438.
- Kadowaki, M., 1996, Pressure transient analysis of injection test at Hijiori HDR site. *Proc. 3rd Int. HDR Forum*, 27-28, Santa Fe, USA, May 13-16.
- 海江田秀志, 佐々木俊二, 本島勲, 澤田義博, 日比野敏, 堀義直, 1988, 高温岩体発電のための岩盤破碎技術－ケーシングリーマーサンドプラグ方式水圧破碎法の開発－. 電力中央研究所研究報告: U88026.
- 海江田秀志, 伊藤久敏, 末永弘, 鈴木浩一, 楠健一郎, 木方建造, 新孝一, 2002, 高温岩体発電のための雄勝計画(XII)－研究成果のまとめと今後について－. 日本地熱学会平成14年学術講演会講演要旨集, A37.
- Kappelmeyer, O. and Rummel, F., eds., 1987, *Terrestrial heat from impervious rocks –Investigations in the Falkenberg granite massif-*. Geologisches Jahrbuch Reihe E., BGR, Hanover.
- Kawasaki, K. Oikawa, Y., Sato, Y., Tenma, N., and Tosha, T., 2002, Heat extraction experiment at Hijiori test site (first year). *Proc. 27th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., SGP-TR-171.
- Kiho, K. and Ohsumi, T., 1992, 90 days circulation test of the Hijiori HDR reservoir, Japan: including a geothermal survey to estimate the fluid behavior and reservoir volume. *Geothermal Resources Council Trans.*, 16, 501-505.
- 木方建造, 2000, 地化学的手法による地熱資源評価に関する研究. 京都大学学位論文.
- 木谷清一, 手塚和彦, 2002, NEDO 肘折実験場の地質構造と高温岩体貯留層のフラクチャ系. 日本地熱学会誌, 24, 283-297.
- Kohl, T. and Hopkirk, R.J., 1995, FRACTure – a simulation code for forced fluid flow and transport in fracture, porous rock. *Geothermics*, 24, 333-343.

- 厨川道雄, 1984, 米国ロスアラモスにおける高温岩体プロジェクト. 日本地熱学会誌, 6, 87-99.
- 厨川道雄, 1996, 地熱分野の IEA. 資源・素材'96(仙台), A-④-14.
- 厨川道雄, 佐藤嘉晃, 天満則夫, 山口 勉, 1996, 肘折高温岩体プロジェクトの経緯. 資源と素材, 112, 901-906.
- 厨川道雄, 1998, 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, 23, 3-8.
- 松木浩二, 1992, 岩石の非弾性ひずみ回復を用いた三次元地圧計測法の理論的検討. 資源・素材学会誌, 108, 41-45.
- Matsunaga, I. and Yamaguchi, T., 1992, A three-month circulation test at the hot dry rock test site in Hijiori, Japan. *Geothermal Resources Council Bull.*, 21, 162-166.
- 松永 烈, 1993, 21世紀における実用化に向けて, 21世紀のエネルギー『地熱』—新技術開発と地球環境への貢献、日本地熱学会、特集号, p.164.
- Matsunaga, I., 1994a, Recent progress of hot dry rock geothermal energy development projects in Japan. *Geothermal Resources Council Bull.*, 23, 62-64.
- 松永 烈, 宮崎 章, 天満則夫, 宮入 誠, 1994b, 肘折高温岩体実験場での循環抽熱試験中のフラクチャ内流動と岩石-流体間の相互作用. 地下水学会誌, 36, 229-241.
- Matsunaga, I., Miyazaki, A. and Tao, H., 1995a, Water-rock interactions during a three-month circulation test at the hot dry rock test site in Hijiori, Japan. *Proc. World Geothermal Cong.* '95, 4, 3679-3683.
- Matsunaga, I., 1995b, Recent progress of Hot Dry Rock geothermal energy development projects in Japan. *Geothermal Resources Council Bull.*, 24, 62-65.
- Matsunaga, I., Tenma, N., Miyazaki, A., and Kuriyagawa, M., 1995c, Characterization of forced flow in a deep fractured reservoir at the Hijiori hot dry rock test site, Yamagata, Japan. *Proc. 8th Int. Congress on Rock Mechanics*, 795-798, Tokyo, Japan.
- Matsunaga, I., Tao, H., and Tenma, N., 2000, Geochemical evaluation of the Hijiori HDR reservoir at Yamagata, Japan. *Prod. World Geothermal Cong. 2000*, Beppu-Morioka, 3787-3791.
- Matsunaga, I., Sugita, H., and Tao, H., 2001, Tracer monitoring by a fiber-optic fluoremeter during a long-term circulation test at the Hijiori HDR site. *Proc. 26th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., SGP-TR-168.
- Matsunaga, I., Yanagisawa, N., Sugita, H. and Tao, H., 2002, Reservoir monitoring by tracer testing during a long term circulation test at the Hijiori HDR site. *Proc. 27th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., SGP-TR-171.
- 松永 烈, 1996, 肘折高温岩体貯留層の評価. 資源・素材'96(仙台), A-④-3.
- 松永 烈, 林 秀, 田尾博明, 1997, 流通型オートクレーブを用いた肘折花崗岩試料の岩石水反応試験. 日本地熱学会平成9年学術講演会講演要旨集, A23.
- Matsunaga, I. and Tao, H., 1998, Geochemical evaluation of 1996 circulation test in the Hijiori HDR reservoir. *Proc. 4th Int. HDR Forum*, Strasbourg, France, September 28-30.
- 松永 烈, 及川寧己, 久保智司, 2003, 肘折高温岩体実験の成果—総括—, 日本地熱学会平成15年学

術講演会講演要旨集, 70.

- McCartney, R.A., 1987, Hot Dry Rock geothermal systems: geochemical applications of transient field experiments. *Geothermics*, 16, 419-428.
- 宮入 誠, 反町美与志, 大崎 豊, 1992, 物理探査学会第 86 回学術講演会論文集, 173-177.
- 宮崎 章, 松永 烈, 田尾博明, 1990, 地熱水などの挙動解明に用いるトレーサーの検索. 公害, 25, 119-127.
- 宮崎芳徳, 1991, 包蔵水量法による地熱資源評価の研究. 地質調査所報告, 275, 311-328.
- Mongillo, M.A. and Nieva, D., 2003, The IEA geothermal implementing agreement- Its status, highlights and future prospects. *Geothermal Resources Council Trans.*, 27, 443-447.
- Murphy, H.D. ed., 1981, Relaxation of geothermal reservoir stresses induced by heat production. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-8954-MS, 33p.
- Murphy, H.D., Tester, J.W., Grigsby, C.O., and Potter, R.M., 1981, Energy extraction from fractured geothermal reservoirs in low-permeability crystalline rock. *J. Geophys. Res.*, 86, 7145-7158.
- Murphy, H.D., Keppler, H., and Dash, Z.V., 1983, Does hydraulic fracturing theory work in jointed rock masses ?. *Geothermal Resources Council Trans.*, 7.
- Murphy, H., Brown, D., Jung, R., Matsunaga, I., and Parker, R., 1999, Hydraulics and well testing of engineered geothermal reservoirs. *Geothermics*, 28, 491-506.
- Murphy, H., Niitsuma, H., and Asanuma, H., 2000, The more-than-cloud and successor projects: International joint research on new mapping and HDR/HWR reservoir development technologies. *Prod. World Geotherm. Cong. 2000*, Beppu-Morioka, 3813-3815.
- Nagai, M. and Tenma, N., 1997, Development of hot dry rock technology at Hijiori test site – Program for a long term circulation test-. *Proc. NEDO Int. Geothermal Sympo.*, 351-356.
- 新妻弘明, 1990, 地下岩盤フラクチャ計測法. 応用地質学会シンポジウム予稿集, 42-51.
- 新妻弘明, 1996, 次世代地熱開発のための貯留層マッピングに関する国際共同研究「MTC プロジェクト」. 資源・素材'96(仙台), A-④-14.
- 及川寧己, 山口 勉, 松永 烈, 厨川道雄, 1989, 肘折高温岩体実験場 HDR-1 坑井から採取したコアの物性試験結果について. 資源, 1, 498-508.
- 及川寧己, 松永 烈, 山口 勉, 1993, 肘折高温岩体実験場におけるISIPの計測. 資源と環境, 2, 547-555.
- Oikawa, Y., Matsunaga, I., and Yamaguchi, T., 1993, Differential strain curve analysis to estimate the state of the Hijiori Hot Dry Rock field, Japan. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30, 1023-1026.
- 及川寧己, 山口 勉, 松永 烈, 佐藤嘉晃, 1995, DSCA による肘折高温岩体実験場の地圧評価. 資源と素材, 111, 587-594.
- Oikawa, Y. and Yamaguchi, T., 2000, Stress measurement using rock core in an HDR field. *Prod. World Geothermal Cong. 2000*, Beppu-Morioka, 3819-3822.

- Oikawa, Y., Tenma, N., Yamaguchi, T., T., Karasaki, H., Egawa, Y., and Yamauchi, T., 2001, Heat Extraction experiment at Hijiori test site. *Proc. 26th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., SGP-TR-168.
- 岡部高志, 1997, 坑井掘削に伴って発生する縦フラクチャを用いた地殻応力評価に関する研究. 東北大学学位論文.
- Parker, R., 1989a, Characterization of the Rosemanowes HDR geothermal reservoir using an extended circulation program. In *European Geothermal Update, Proc. 4th International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy R & D*, pp.141-153, Florence, Kluwer Academic.
- Parker, R., ed., 1989b, *Hot Dry Rock Geothermal Energy Phase 2B Final Report of the Camborne School of Mines Project*. Vol.1 & 2, Pergamon Press.
- Pawels, H., Criaud, A., Vuataz, F.D., Brach, M., and Fouillac, C., 1991, Uses of chemical tracers in HDR reservoir studies. Example of Soultz-sous-Forets (Alsace, France). *Geothermal Sci. & Tech.*, 3, 83-103.
- Pawels, H., Fouillac, C., and Criaud, A., 1992, Water-rock interactions during experiments within the geothermal Hot Dry Rock borehole GPK 1, Soultz-sous-Forets, Alsace, France. *Applied Geochemistry*, 7, 243-255.
- Pine, R.J. and Batchelor, A.S., 1984, Downward migration of shearing in jointed rock during hydraulic injections. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 21, 249-265.
- Plagnes, V., Matsunaga, I., Azaroual, M., Tao, H., and Fujimoto, K., 2000, Granite-saline fluid interactions in a dynamic experimental system at 200 degrees C and 50 bars. *Prod. World Geothermal Cong. 2000*, Beppu-Morioka, 3829-3834.
- Potter, R.M., Robinson, E.S., and Smith, M.C., 1974, Method of extracting heat from geothermal reservoir. *U.S. Patent* 3,786,858.
- Richards, H.G. and Savage, D., 1989, Rate of plagioclase dissolution in the Camborne School of Mines experimental hot dry rock geothermal system, Rosemanowes, Cornwall. In *Proc. Sixth Int. Symp. on Water Rock Interaction*, Miles (ed), pp.577-580, Balkema, Rotterdam.
- Richards, H.G., Savage, D., and Andrew, J.N., 1992, Granite-water reactions in an experimental hot dry rock geothermal reservoir at the Rosemanowes test site, Cornwall, UK. *Applied Geochemistry*, 7, 193-222.
- Richards, H.G., Parker, R.H., Green, A.S.P., Jones, R.H., Nicholls, J.D.M., Nicol, D.A.C., Randall, M.M., Richards, S., Stewart, R.C., and Willis-Richards, J., 1994, The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985-1988). *Geothermics*, 23, 73-109.
- Robinson, B. A. and Tester, J.W., 1984, Dispersed fluid flow in fractured reservoirs: an analysis of tracer-determined residence time distributions. *J. Geophys. Res.*, 89, B12, 10374-10384.
- Robinson, B. A., 1985, Non-reactive and chemically reactive tracers: Theory and applications, Ph. D.

- Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Robinson, B.A., Aguilar, R.G., Kanaori, Y., Trujillo, P., Counce, D., Birdsel, S., and Matsunaga, I., 1987, Geochemistry and tracer behavior during a thirty day flow test of the Fenton Hill HDR reservoir. *Proc. 12th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., 121-135.
- Rodrigues, N.E.V., Green, A.S.P., and Barley, R., 1995, Modelling tracer tests in the Rosemanowes HDR reservoir. *Geothermics*, 24, 375-384.
- Rose, P.E and Adams, M.C., 1994, The application of rhodamine WT as a geothermal tracer. *Geothermal Resources Council Trans.*, 18, 237-240.
- Rose, P.E. and McPherson, P.A., 1997, New fluorescent tracers for use a geothermal tracer. *Geothermal Resources Council Trans.*, 21, 249-253.
- Rose, P.E., 1998, The use of polyaromatic sulfonates as tracers in high temperature geothermal reservoirs. *Proc. 20th New Zealand Workshop*, Auckland University, Auckland., 239-243.
- Rose, P.E., Benoit, W.R., Bacon, L., Tanidia, B., Kilbourn, P.M., 2000, Testing the naphtanene sulfonates as geothermal traces at Dixie Valley, Ohaaki, and Awibengkok. *Proc. 25th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., STP-TR-165.
- Rummel, F. and Baumgartner, J., 1991, Hydraulic fracturation measurements in the GPK-1 borehole, Soultz-sous-Forêts. *Geothermal Sci. & Tech.*, 3, 119-148.
- Sanyal, S.K., Butler, S.J., Swenson, D., Hardeman, B., 2000, Review of the state-of-the-art of numerical simulation of enhanced geothermal systems. *Prod. World Geotherm. Cong. 2000*, Beppu-Morioka, 3853-3857.
- 佐々木俊二, 1995, 水圧破碎に伴うアコースティック・エミッションの特性と発生メカニズムに関する研究. 東北大学理学博士論文.
- Sasaki, S. and Kaieda, H., 2002, Determination of stress state from focal mechanisms of microseismic events induced during hydraulic injection at the Hijiori hot dry rock site. *Pure Appl. Geophys.*, 159, 489-516.
- Sass, J.H., 1996, Hot Dry Rock and the U.S. Geological Survey: A Question of Priorities. *Geothermal Resources Council Bull.*, 25, 313-315.
- Sass, J.H. and Robertson-Tait, A., 1998, Potential for “Enhanced geothermal systems” in the western United States. *Proc. 4th Int. HDR Forum*, Strasbourg, France, September 28-30.
- Sato, Y., Oikawa, Y., Tenma, N., Kuriyagawa, M., Ito, H., and Sasaki, S., 1990, In-situ stress of the Hijiori hot dry rock site evaluated from borehole logging, core tests, and microseismics. In *Hot Dry Rock Geothermal Energy, Proc. Camborne School of Mines International HDR Conference*, Robertson Scientific Pub. (London).
- Sato, Y. and Ikawa, T., 1995, Stimulation of the 2200-m-deep reservoir at Hijiori HDR test site. *Geothermal Resources Council Trans.*, 19, 275-278.
- 佐藤嘉晃, 厨川道雄, 松永 烈, 山口 勉, 及川寧己, 天満則夫, 勝山邦久, 1999, 高温岩体地下循環



- システムの設計に関する研究. 資源環境技術総合研究所報告, 第 25 号.
- 佐藤勇一, 岡部高志, 2002, 肘折高温岩体実験場での長期循環試験. 日本地熱学会誌, 23, 283-291.
- Savage, D., 1986, Granite-water interactions at 100°C, 50 MPa: An experimental study. *Chem. Geol.*, 54, 81-95.
- Savage, D., Bateman, K., and Richards, H.G., 1992, Granite-water interactions in a flow-through experimental system with applications to the Hot Dry Rock geothermal system at Rosemanowes, Cornwall, U.K.. *Applied Geochemistry*, 7, 223-241.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1990, 平成元年度 高温岩体発電システムの技術開発(要素技術の開発)報告書.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1994, 平成 4 年度 高温岩体発電システムの技術開発(要素技術の開発)報告書.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1994, 高温岩体資源利用拡大のための基盤調査. NEDO-P-9325.
- Shoji, T., Watanabe, K., and Takahashi, H., 1990, Long term performance of geothermal circulation system – significance of water-rock interaction. In *Hot Dry Rock Geothermal Energy, Proc. Camborne School of Mines International HDR Conference*, Robertson Scientific Pub. (London), 436-445.
- Smith, M.C., Aamodt, R.L., Potter, R.M., and Brown, D., 1975, Manmade geothermal reservoirs. *Proc. UN Geothermal Sympo.*, San Francisco, 3, 1781-1787.
- Smith, M.C., Nunz, G.J., and Ponder, G.M., eds, 1983, Hot dry rock geothermal energy development program, Annual report fiscal year 1982. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-9780-HDR, p.64.
- 寿賀祥五, 中谷章雄, 瀬尾邦夫, 1984, 焼岳における高温岩体プロジェクトの現状. 日本地熱学会誌, 6, 155-168.
- 杉田 創, 松永 烈, 柳澤教雄, 田尾博明, 山口 勉, 青木一男, 2003, フルオレセインの蛍光強度に及ぼす pH および溶存イオンの影響. 日本地熱学会誌, 25, 211-225.
- Swenson, D., Schroeder, R., Shinohara, N., and Okabe, T., 1999, Analyses of the Hijiori long term circulation test. *Proc. 24th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal.
- Takahashi, H. and Hashida, T., 1992, New project for hot wet rock geothermal reservoir design concept. *Proc. 17th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., Jan 29-31.
- 天満則夫, 松永 烈, 厨川道雄, 山口 勉, ジョージ・ジボロスキー, 宮入 誠, 1994, 肘折高温岩体に形成された人工貯留層のフラクチャ面の熱交換面積の推定, 資源と素材. 110, 539-546.
- Tenma, N., Yamaguchi, T., Matsunaga, I., Kuriyagawa, M., and Sato, Y., 1996, Interference of production between two wells during a one month circulation test at the Hijiori Hot Dry Rock test site. *Proc. 3rd Int. HDR Forum*, 10-11, Santa Fe, USA, May 13-16.
- Tenma, N. and Iwakiri, S., 1998, Program of the preparatory period for a long-term circulation test on the Hijiori HDR project. *Proc. 4th Int. HDR Forum*, Strasbourg, France, September 28-30.

- Tenma, N., Yamaguchi, T., Tezuka, K., and Oikawa, Y., 2001, Estimation of productivity from the shallow reservoir using pressure monitoring data in SKG-2 at the Hijiori HDR test site. *Geothermal Resources Council Trans.*, 25, 199-202.
- 天満則夫、山口 勉、菊地恒夫、手塚和彦、George Zyvoloski, 2003, 長期循環試験、第1期の数値シミュレーション結果から推定される肘折貯留層の生産特性について ―多層貯留層を用いた高温岩体発電システムの開発に関する研究(第1報)―. 資源と素材, 119, 625-634.
- Tenzer, H., Mastin, L., and Heinemann, B., 1991, Determination of Planar Discontinuities and Borehole Geometry in the Crystalline Rock of Borehole GPK-1 at Soultz-sous-Forêts. *Geothermal Sci. & Tech.*, 3, 31-67.
- Tester, J.W., Potter, R.M., and Bivins, R.L., 1982, Interwell tracer analyses of a hydraulically fractured granitic geothermal reservoir. *Soc. Petrol. Engrs J.*, 22, 537-554.
- Tester, J.W., Brown, D.W., and Potter, R.M., 1989, Hot dry rock geothermal energy – A new energy agenda for 21st century. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-11514-MA.
- Tezuka, K. and Niitsuma, H., 2000, Stress estimated using microseismic clusters and its relationship to the fracture system of the Hijiori hot dry rock reservoir. *Eng. Geol.*, 56, 47-62.
- 手塚和彦、渡辺公雄, 2003, 確定的/確率論的フラクチャー情報に基づく肘折高温岩体貯留層モデルの作成―新しいタイプのシミュレータ「D/SC」の開発―. 日本地熱学会誌, 24, 267-282.
- Weidler, R., Gerard, A., Baria, R., Baumgartner, and Jung, R., 2002, Hydraulic and micro-seismic results of a massive stimulation test at 5 km depth at the European hot-dry rock test site Soultz, France. *Proc. 27th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, Cal., SGP-TR-171.
- Willis-Richards, J., Green, A.S.P., and Jupe, A., 1995, A comparison of HDR geothermal sites. *Prod. World Geothermal Cong.* '95, 4,
- Wyborn D., Chopra, P., and Somerville, M., 1997, Australia's favourable geological environment for economical extraction of HDR energy: And current proposals. *Proc. NEDO Int. Geothermal Sympo.*, 324-328.
- 八木正彦、品田正一, 1989, 肘折高温岩体における定方位コアとそのフラクチャー解析. 日本地熱学会平成元年学術講演会講演要旨集, A39.
- 山口 勉、佐藤嘉晃、厨川道雄、松永 烈、及川寧己、光永祥子、ジョージ・ジボロスキー, 1990, 高温岩体抽熱システムの評価のための現場実験とモデル化. 資源・素材学会誌, 106, 843-849.
- 山口 勉、厨川道雄、佐藤嘉晃、及川寧己、小林秀男、松永 烈、ジョージ・ジボロスキー, 1991, 高温岩体からの熱抽出実験と人工貯留層のモデル化. 日本地熱学会誌, 13, 73-93.
- 柳澤教雄、松永 烈、田尾博明、杉田 創, 2002, トレーサー試験による肘折高温岩体貯留層の評価. 日本地熱学会誌, 23, 293-301.
- Yanagisawa, N., Matsunaga, I., Sugita, H., and Tao, H., 2003, Reservoir monitoring by tracer test of 2002 dual circulation test at the Hijiori HDR site, Yamagata, Japan. *Geothermal Resources Council Trans.*, 27, 785-790.

Zyvoloski, G., Dash, Z.V., and Kelkar, S., 1988, FEHM: Finite Element Heat and Mass transfer code. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-11224-MS.