

図 7-21 長期循環試験開始時の流動状況. 下部貯留層への HDR-1 井からの単独注入と生産井の加熱による上部貯留層からの流体の流入

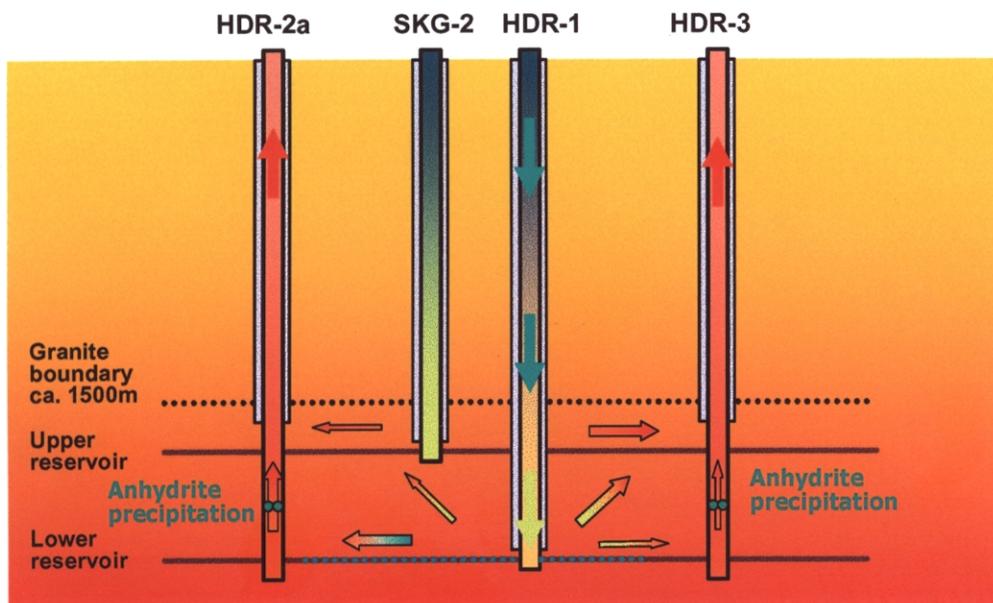


図 7-22 循環の進行に伴う HDR-1 井周辺の下部貯留層冷却と、生産井内での硬石膏スケール発生

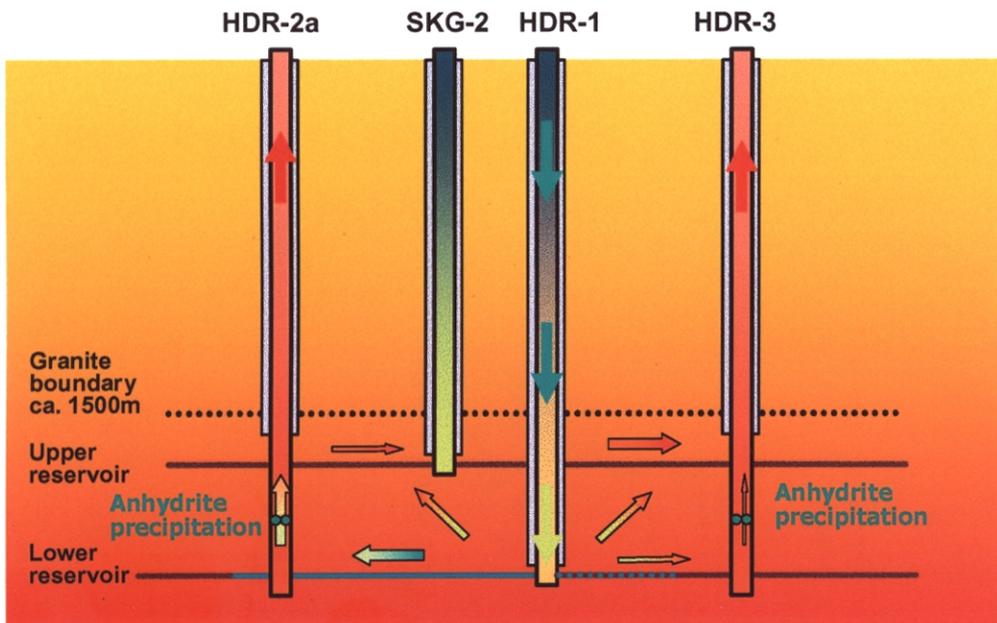


図7-23 生産井HDR-2aへのサーマルブレイクスルー発生と、HDR-2a井内の流体温度の低下と水頭圧力上昇に伴う上部貯留層への流体の流入開始

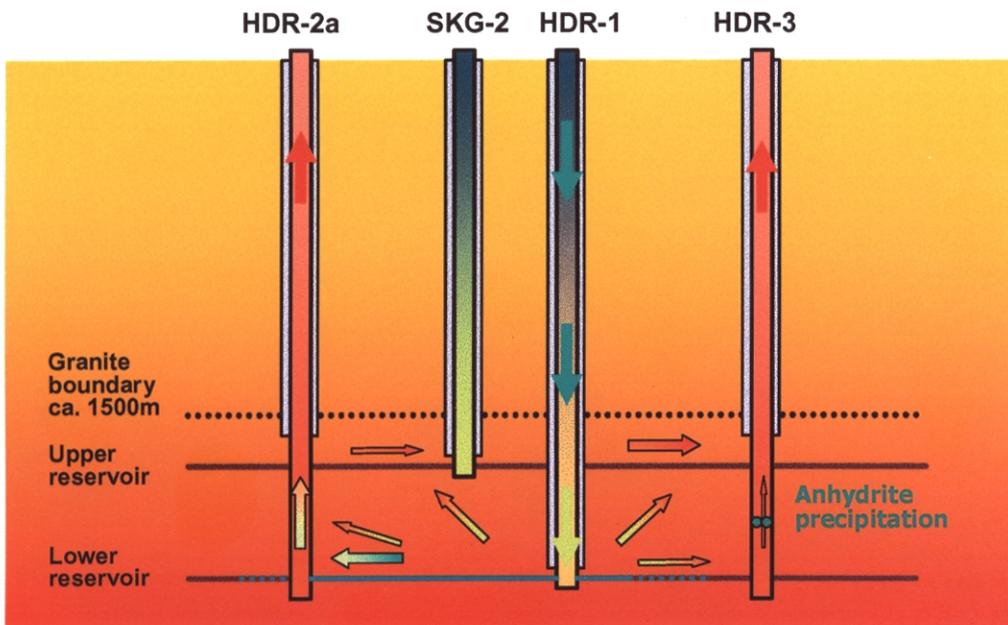


図 7-24 HDR-2a 井の硬石膏スケール浚い後の流動状況. 流動状況は図 7-23 とそれほど大きな変化はない

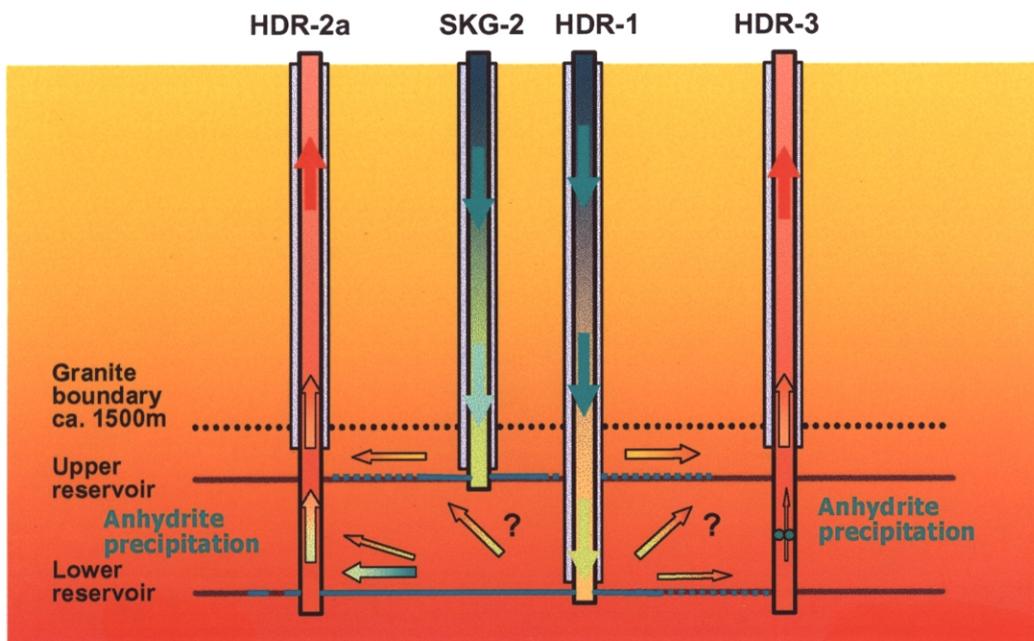


図 7-25 SKG-2、HDR-1 同時注入によるデュアル循環開始後の流動状況. 上部貯留層注入による上部貯留層からの HDR-2a 井への生産開始と SKG-2 井周辺の冷却進行が発生するとともに、HDR-3 井内の温度低下の多少進行に伴う硬石膏スケール発生の顕在化

7-4 結言

トレーサ試験の結果にPTS検層や循環流体の地化学調査の結果を加味して、2本の注入井、2本の生産井によって連結される上下2つの貯留層から構成される肘折 HDR 貯留層システムの循環流動状況の評価を行った。今回の長期循環試験では、HDR-1 井による下部貯留層単独注入から、SKG-2 井と HDR-1 井による上部・下部量貯留層への注入(デュアル循環)にいたる貯留層内の流動状況の複雑な変化を評価することができた。その結果、システム内の流動状況は注入圧力や流量だけでなく、生産井の温度、圧力により変化し、トレーサ試験の結果に明瞭に反映されることが分かった。注入井から貯留層への流入や貯留層から生産井の流出は PTS 検層によって測定できるので、貯留層の見掛けの流動抵抗は比較的容易に把握できるが、流動抵抗の多くは注入井と生産井の近傍の流れに支配されるため、熱交換の評価に必要な貯留層内の広い範囲の流動を把握するにはトレーサ試験の結果が不可欠なことも今回の結果から再認識された。ただし、今回の評価は生産井の坑内状況の制約により、定性的なものに留まっている。

今後 HDR システムを安定して運転するためには、システムの流動制御手法の開発が重要となるが、今回長期循環試験で実施したような注入井の流量制御や生産井の坑口圧力調整が最も簡便で効果的な手法と考えられる。このような手法を適応するにあたって、今後より定量的なデータを基にした評価が必要である。そのような評価に必要な定量的なデータとして、坑井とフラクチャの交点(生産井のフィードポイン

ト)における圧力、流量及びトレーサの応答が考えられる。これらデータを取得することにより、Hyodo 他 (1995, 1996) の行った流路網による流動解析や、それぞれ流路におけるトレーサの応答解析を行い、複雑なシステムの定量的な評価が可能になるものと考えられる。

生産井坑内の各フィードポイントにおいてのトレーサ応答を得るには、長期循環試験中に地表の循環ラインでのトレーサ連続測定に使用した光ファイバー蛍光光度計の応用が考えられる。既に、光ファイバーを用いた坑井内温度計測システムは開発されており(例えば Smithpeter et al., 1999; 渡辺, 2003)、長距離伝播による光度減衰の問題は光源としてレーザを使用することで対応が可能と考えられる。

更に、坑井内検層だけでなく、通常のトレーサ試験でも困難なサーマルブレイクスルーの予知を行うためには、貯留層内の温度分布あるいは特定の温度フロントを把握する方法の開発が必要である。そのためには、熱分解特性の異なる複数の蛍光染料を用いたマルチトレーサ試験が有望と考えられる。

参考文献

- Abe, H., Duchane, D.V., Parker, R. H., and Kuriyagawa, M., 1999, Present status and remaining problems of HDR/HWR system design. *Geothermics*, 28, 573-590.
- Barczewski, B. and Marchall, P., 1992, Development and application of a lightfibre fluorometer for tracer tests. In *Tracer Hydrology*, Hotzl & Werner eds., pp.33-39, Balkema.
- Benischke, R. and Leitner, A., 1992, Fiberoptic fluorescence sensors – An advanced concept for tracer hydrology. In *Tracer Hydrology*, Hotzl & Werner eds., pp.41-47, Balkema.
- Brown, D.W., DuTeaux, R., Kruger, P., Swenson, D., and Yamaguchi, T., 1995, Fluid circulation and heat extraction from engineered geothermal reservoir. *Geothermic*, 28, 553-572.
- 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.
- Hyodo, M., Shinohara, N., Takasugi, S., Wright, C.A., and Conant, R.A., 1996, Transient analysis of the 1991 Hijiori shallow reservoir circulation test. *Proc. 21st Geothermal Reservoir Engineering Workshop*, Stanford University. Shinohara, N., Takasugi, S., Wright, C.A., and Conant, R.A.,
- Kawasaki, K., Oikawa, Y., Sato, Y., Tenma, N., and Tosha, T., 2002, Heat extraction experiment at Hijiori test site (First year). *Proc. 27th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, California, January 28-30, pp.89-94.
- 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. *Prod. World Geothermal Congress '95*, 4, 2679-2683.
- 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. of 26th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, California, January 29-31, pp.74-77.
- 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 Stanford Workshop on*

- Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, California, January 28-30, pp.101-104.
- Oikawa, Y., Tenma, N., Yamaguchi, T., Karasawa, H., Egawa, Y., and Yamauchi, T., 2001, Heat extraction experiment at Hijiori test site. *Proc. of 26th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, California, January 29-31, pp.255-257.
- Robinson, B. A., 1985, Non-reactive and chemically reactive tracers: Theory and applications, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Rose, P.E. and McPherson, P.A., 1997, New fluorescent tracers for use a geothermal tracer. *Geothermal Resources 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.
- Rose, P., Beniot, D., Goo Lee, S., Tandia, B., and Kilbourn, P., 2000, Testing the naphthalene sulfonates as geothermal tracers at Dixie Valley, Ohaaki, and Awibengkok. *Proc. 25th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, California, pp.295-298.
- 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.
- Smithpeter, C., Normann, R., Krumhans, J., Benoit, D. and Thompson, S., 1999, Evaluation of a distributed fiber-optic temperature sensor for logging wellbore temperature at the Beowawe and Dixie Valley geothermal fields. *Proc. 24th Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford University, California, SGP-TR-162, 329-335.
- 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. of 21st Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Eng.*, Stanford Univ., Stanford, California, January 29-31, pp.74-77.
- 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.
- 渡辺二郎, 2003, 地熱の新技术(その8) 光ファイバー温度計測システム, 地熱エネルギー, 104, 390-395.
- 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.

第8章 結論

トレーサ試験は地層中の流体の循環状況を把握するために最も有力な手段の一つで、これまでも多くの知見が蓄積されてきた。しかし、HDR 貯留層の評価に不可欠な複数のフラクチャを対象とした研究は十分に行われてきたとはいえない。このため、HDR 貯留層を予定した期間、安定して運転するに重要となる循環流体の流動状況把握に必要な、トレーサ試験法の開発を目的に本研究を実施した。実際には、山形県肘折の NEDO 高温岩体実験場で実施された一連の循環試験を対象に、新規トレーサの選択、適正なトレーサ注入方法、蛍光トレーサの原位置連続測定法の開発を、順次改良を加えながら進め、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効率的なシステムを開発した。更に、循環試験中に実施したトレーサ試験について、滞留時間分布法や数値シミュレーションによる評価を行い、貯留層挙動の評価を行い、評価結果が地熱貯留層を能動的に制御する際に重要な情報となることを示した。本章ではそれら研究結果のまとめを行った。

第1章では、本論文の背景として、地熱エネルギー、特に HDR 開発の重要性について説明するとともに、本論文の構成を説明した。

第2章では、HDR 地熱エネルギーについての概念の変遷を述べるとともに、その賦存量が膨大であるという地熱資源としての有望性を述べた。次いで、この未利用の HDR 開発を目指して日本を含む世界各国で行われてきた現場実験の状況について述べた。更に、HDR を開発するために必要な技術を概観し、それぞれの開発のステップを適正に実施するためや、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述べた。最後に、トレーサ試験や循環流体の地化学調査が果たす役割の重要性と本研究開発で検討を進めた課題との関係について述べた。

第3章では、肘折 HDR 貯留層評価のために使用する新たなトレーサとして、タングステン酸ナトリウムとモリブデン酸アンモニウムを選定した経緯を述べた。HDR 貯留層でのマルチトレーサ試験の実施や、繰り返し試験時のバックグラウンド濃度増加防止のために新たなトレーサの選択が必要であった。このため、室内加熱試験と現場実験の両者により、新しい無機トレーサと蛍光染料トレーサの検索を行った。

室内試験では、従来から地熱貯留層の評価に一般的に使用されているハロゲン元素とともに、感度が高く熱水中でのバックグラウンド濃度の低い希土類元素、感度はそれほど高くはないが、水中で陰イオンとなり岩石への吸着が少ない Mo、W および Ge、陽イオンとして分析感度が高い Ba、Sc、Y の3グループを選び、加熱吸着試験を実施した。

その結果、無機トレーサとしてはタングステン酸ナトリウムとモリブデン酸アンモニウムが有望と考えられた。このため、肘折での循環試験中に使用して現場での適用性について検討を行い、定性的な評価を行う上では十分なことを確認した。更に、検出感度や費用の点で期待される蛍光染料として、フルオレセイン、アミノ G 酸、ローダミン B の3種類について室内加熱試験を実施したところ、程度の差はあるものの全て 200℃付近で急激に分解が進むという結果が得られた。しかし、肘折で実施した坑井掘削中の試験および長期間坑井内に放置する試験を行った結果、フルオレセインの熱分解はそれほど進行しないことが確認された。このため、フルオレセインは肘折で十分に使用可能と判断し、以降の現場実験で使用することにした。

第4章では、注入井坑内におけるトレーサの移流分散の影響を評価するために、HDR-3 井と HDR-2

井の増掘中にトレーサ試験を行った結果を述べた。各試験ともにトレーサの応答曲線が得られたが、分散長を求めるためには明瞭な応答曲線を得る必要があり、流体の採取時間間隔を30秒程度にする必要があることが分かった。

一次元流れによる分散を仮定して、試験結果に最もフィットする縦分散長 α_L を求めたところ、0.1～0.2mとなった。この値を用いて下部貯留層を対象としたトレーサ試験の予測を行った結果、フラクチャへ流入するトレーサの濃度は移流分散の影響が大きくなり、フラクチャへの流入濃度は注入濃度に比べて半分程度まで低下すると見込まれた。このため、トレーサの注入時間を長く取るなどの対応策を検討し、トレーサの注入時間を5分以上取る必要があることを明らかにした。この結果は、長期循環試験時のトレーサ試験手順決定に活用した。また、トレーサの坑井内滞留時間から求めることのできる坑内容量は、裸坑部分からの逸水や裸坑部分の拡坑容量を把握する場合に、良い指標となりうると思われる。

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を述べた。まず、RTD法を用いたHDR貯留層の評価方法について説明を加え、次いで肘折での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た。対象としたのは上部貯留層における循環試験で、1988年夏に肘折で最初に行われた15日間の循環試験(Exp.8805)、1989年夏に実施した1ヶ月間の循環試験(Exp.8902)と、上部貯留層で行われた最後の循環試験である1991年の3ヶ月間循環試験(Exp.9102)中に行ったトレーサ試験の評価を行った。

Exp.8805とExp.8902の結果を比較することによって、HDR-1井とHDR-2井との導通状況の違いを評価するとともに、間欠生産による影響も評価した。その結果、SKG-2井～HDR-1井間の方がSKG-2井～HDR-2井間に比べて V_m と $V_{1/2}$ が大きいこと、また第1回目のトレーサ試験に比べて第2回目の方が $V_{1/2}$ が増加しており、流動状況がより広範囲になったと考えられた。

3ヶ月間の循環試験では、1本の注入井と3本の生産井による循環だけでなく、途中短期間それぞれの生産井ごとに単独生産試験が行われたため、循環試験の経過に伴う貯留層の変動だけでなく、流路ごとの流動状況や、坑口をシャットインすることによる流動状況の変化についても把握することが可能であった。トレーサ試験によって得られた応答曲線を比較することにより、循環の時間経過やそれぞれの生産井との間の流動状況の変化は、それぞれ生産井で異なることが明らかになった。このような違いを生み出す原因として、各坑井と東西に延びる主フラクチャとの導通状況の違いが想定された。単独坑井試験時のシャットインによる影響の程度はそれぞれの坑井で異なり、SKG-2井との導通が直接的なHDR-2井やHDR-3井では単独生産時に V_m が増加しており、単独坑井試験時の注入圧力の上昇によってフラクチャの開口が発生したものと考えられた。単独坑井生産時の影響が少なかったHDR-1井に関しても、一連の単独坑井生産後には流動状況の改善が認められ、これら作業によるフラクチャ内流動状況の改善効果を定性的に評価することができた。

第6章では、熱・物質移動有限要素法シミュレーションコード(FEHM)を用いて、1991年に上部貯留層を対象に実施された3ヶ月循環試験(Exp.9102)の実測値と数値シミュレーションとのマッチングを行い、貯留層の規模及び循環時間の経過に伴う変化を評価した結果を述べた。まず、循環試験中のPTS検層から求めたフラクチャごとの生産流体温度の経時変化とシミュレーションとのマッチングにより、それぞれの流路の熱交換面積だけでなく、循環時間の経過による熱交換面積の変化も把握可能なことが分かった。また、肘折上部貯留層の場合、注入箇所から生産井までの導通距離の近いフラクチャほど縦横比が小さく、しかも生産井から注入した流体は注入深度よりも上方へ流動しやすいことが分かった。次に、生産流

体温度の経時変化とのマッチングによって求めた熱交換面積を基に、更にトレーサ試験により得られる応答曲線とのマッチングを加味することで、フラクチャ幅(厚み)を推定した。今回得られたフラクチャ幅は 2 ~ 14 mm の範囲にあり、坑井試験から推定された値に比べて1桁大きな結果となったが、生産井掘削の際して得た定方位コアに認められる数 mm のフラクチャ開口幅とほぼ一致した。

実際の HDR 貯留層の評価を行う場合には、温度の変化が起こる前に貯留層の評価を行う必要がある。このため、前もって現場の状況を想定した貯留層モデルを設定し流量ごとのタイプカーブを作成することにより、トレーサ試験によって得られるデータから簡便におおよその貯留層容積を推定する方法を提案した。更に、トレーサピーク濃度到達時間と坑井間隔を基にしてフラクチャ幅の概略値を求めることにより、熱交換面積を推定することが可能なことを明らかにした。

第7章では、上部・下部2層の貯留層を対象に実施された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た。まず、長期循環試験の目的や概要を述べた。長期循環試験では、循環形態に合わせて効率的にトレーサ試験を行うため、新たに流体自動採取装置と光ファイバー蛍光光度連続測定システムを作成した。これら装置を用いて、下部貯留層注入による循環時6回、上下両貯留層への注入、いわゆるデュアル循環試験中に6回、合計12回のトレーサ試験を実施した。その結果、トレーサ試験によって得られた応答曲線は貯留層内の流動状況を鋭敏に反映していることが分かった。特に、デュアル循環時の流体流動は複雑なため、貯留層からの流出状況を正確に把握するためには、生産井坑口で得られるトレーサの RTD 曲線に上下貯留層の生産寄与率を考慮した補正を加える必要があることが分かった。このような評価を行った結果、トレーサ試験によって得られる応答曲線は、注入流量の変化や循環の停止などによって大きく変動することが明らかとなった。また、応答曲線の変動は、PTS 検層によって求めることができる坑井近傍の流動抵抗だけでなく、注入井と生産井間の広範な領域の流動状況を反映することも分かった。

本節冒頭にも述べたように、本研究では山形県肘折の NEDO 高温岩体実験場で実施された一連の循環試験を対象に、新規トレーサの選択、適正なトレーサ注入方法、蛍光トレーサの原位置連続測定法の開発を進め、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効率的なシステムを開発した。更に、肘折循環試験の解析評価を通して、トレーサ試験により得られる情報が貯留層挙動の評価に非常に重要な役割を果たすことを明らかにした。

肘折での現地試験により、地下の高温岩体中に熱交換のためのシステムを造成し、循環・熱抽出に必要な各要素技術の開発は実用化の段階を迎えたといえよう。しかし、今後 HDR システムの実用化を目指すためには、いくつかの技術課題も残されている。ここでは、先ず実際にどのような場合に HDR が開発の対象となるかを考え、今後 HDR 開発に向けて必要な技術的課題を検討する。

これまで地熱開発の対象となってきた熱水対流型の地熱系では、熱源だけでなく、熱を地表に運び出すための流体と、それらを貯えるための貯留構造(即ち貯留層)の存在が必要である。一般に新規の地熱を開発する場合、広域の調査から始められ、段階を追って有望な地熱開発地点を絞り込むための調査が進められる。その結果高温の地熱蒸気が期待できるようであれば、直接探査である構造試錐や調査井の掘削段階へと移行する。構造試錐では、地下の地質構造を把握するために小口径のコア掘削が行われ、掘削終了後に電気検層や温度検層を行うことにより直接地下の情報を取得できる。更に、開発の可能性が高いと判断されると熱水の採取を目指して調査井が掘削される。調査井により噴出試験を行って十分な温度と量の流体が得られるかを調査し、数値シミュレーションを用いた貯留層の評価が行われる。

このように、ある地域を対象に概査、精査と段階を追って地熱資源の調査が進み、坑井の掘削によって十分な熱水が確保される、すなわち熱水対流型地熱貯留層の存在が明らかになれば、当然そのまま地熱発電所(や熱水利用施設)の開発が進められるであろう。しかし、有望と思われた地域に十分高温の地層が存在するものの、十分な熱水量を確保できる見込みがないと判断された場合に、HDR 開発へと移行するかどうかの判断を行うことになろう。なお、既に従来型地熱の開発が進んでおり、その中で一部の坑井がいわゆる空井戸であるような場合、即ち可採量増大技術開発の対象となる場所については、当然 HDR 開発に関係した多くの技術が適応できるものの、熱水貯留層の存在を前提にしており、その貯留層との人工的な導通を図るという点が異なっている。広義の HDR 概念の範疇に入ると考えられる EGS に関してもほぼ同様の対応が考えられる。

HDR 開発のもう一つのケースとしては、周辺の開発状況等から、最初から対象領域に高温(でかつ低透水性)の(基盤)岩体の存在が予想される場合が考えられる。この場合と、従来型地熱の開発を目指しながら結局 HDR 開発に移行した場合との違いは、対象地域の地下情報の量と質の差異にあるといえる。

上述したような新しいタイプの地熱資源開発は、HDR、可採量増大、EGS (Enhanced Geothermal System) とその呼び名は異なるものの、これまで熱水の生産が困難であった高温低透水の領域を、人工的な注水や循環系の造成によって新たに開発しようとするもので、開発対象となる地熱資源量を大幅に増やすことが期待できる。その量は、第2章でも述べたように、世界の HDR 資源量を石油、原子力など他のエネルギーと比較し、2桁以上という膨大な量となる。もちろん、この量は単純な容積法による計算のため、実際には大幅に割り引いて考える必要があるが、NEDO による国内資源量の試算では、実際に掘削された地熱調査井のデータを基にした深度 3km までの試算に限っても、現在の地熱発電量の約 50 倍という膨大なエネルギー源を国内で開発が可能ということになる。

もちろん、HDR も従来型地熱開発と同じく、他のエネルギー資源と開発コストの点で競合できなくてはならない。昨今の電力自由化の動きや、石油の需給が安定していることなどのエネルギー事情から、現状の発電コストは地熱発電に比べてかなり安く、国内では地熱発電の新規開発がストップした状態にある。

しかし一方で、ヨーロッパを中心に、地球環境問題の深刻化への対応策として、RPS制度などの強力なサポートのもとで自然エネルギーの開発が強力に推進されるようになり、既に第2章でも触れたように、既にドイツやオーストラリアでは実規模の発電を目指した HDR 開発が始まっている。従って、最終的に HDR を開発しようとするインセンティブは、地下の高温の岩盤中に人工的に熱抽出システムを造成し、地表から流体を注入・循環することによって地熱エネルギーを取り出して利用することが、従来型地熱発電だけでなく他の自然エネルギーに比較して経済的な優位性を持つかどうか大きな鍵となってくる。

従来から、地熱発電コストの半分近くは蒸気や熱水の供給に不可欠な坑井の掘削コストといわれているが、HDR では天然に賦存する蒸気や熱水の存在を前提としないため、掘削された坑井を全て利用できるという利点を有している。一方で、地下に人工的に貯留層を造成し、循環を行わなければならないという不利な面があり、これまでアメリカフェントンヒルや肘折ではそれら関連技術についての研究開発を進め、技術的には対応可能な段階に達してきたと考える。しかし、今後、コスト面が重視される商業化を目指した開発を順調に進めるためには、解決すべき技術的課題が残されている。それら技術開発の課題をまとめると、

- ① 簡便で効率的な水圧破碎技術(特に区間限定法)の開発、
- ② 造成したフラクチャの把握技術の精度向上、
- ③ 循環中のフラクチャ内部の(流動や温度)状況を把握する技術の向上、
- ④ 複数フラクチャにおける流動制御技術の開発

の4つが考えられる。

①に関しては、マルチフラクチャによる熱抽出システムを造るために不可欠だけでなく、一旦造ったフラクチャの導通特性の改善や逆に逸水を防ぐために閉鎖する際にも使うことができる。最終的には耐熱性ゴムを膨らませて区間限定を行うようなインフレイタブルタイプの裸坑パッカーの開発が望まれる。また、深部で水圧破碎あるいは水圧刺激を行う場合、一般にフラクストリングと呼ばれる送水パイプによる操作が行われているため、リグが必要である。しかし、循環・運転のステージに入り、導通特性の改善などワークオーバー的要素が強い作業の場合、リグを使用しなくてはならないとすると作業の繁雑さが増すだけでなく、それに伴うコストが大幅に増大する。これに対応するには、最近急速に普及しつつあるコイルチュービングによるワークオーバー技術の適応などが考えられる。

②に関しては、HDR 開発だけでなく、石油、一般の地熱等、(特に流体)地下資源に共通する課題である。HDR 開発の場合、水圧破碎・刺激によって流体の流路をアクティブに造るという利点があり、これまでの多くの経験を通して、AE の観測・解析精度も大幅に向上してきた。しかし、貯留層自体の大きさや地表と貯留層とを結ぶ坑井とのサイズに大きな違いがあり(水圧破碎・刺激によるフラクチャの大きさが数百メートルの大きさなのに対して坑井の径は 20cm 強)、AE 観測の結果だけで生産井の掘削目標を決定するにはまだ不十分である。現在のところ、種々の地質情を加味した判断を行うことが適当であろう。更に、貯留層造成中に地下でフラクチャがどのように進展しているかをリアルタイムで把握し、その情報を地表での注水作業に瞬時に反映できるよう、AE 解析法の進展を期待したい。

③のフラクチャ内流体流動の把握は、HDR 貯留層の安定した生産や寿命を推定する上でのキーテクノロジーである。②で述べた AE 観測によってフラクチャの方向や広がり精度良く把握できるようになったとしても、今のところ、熱抽出に影響する循環流体の流動領域や流れの分布までを判断することはできない。また、肘折での循環試験でも明らかになったが、循環試験時に発生する AE は格段に少なく、AE

により循環時の貯留層の変動を監視するのは困難な場合が多いと考えられる。また、BHTV や PTS 検層等の坑井内検層では貯留層の出入り口でのフラクチャ形状や流量に関する情報は得られるものの、フラクチャ内部の流動に関しての情報を得ることはできないという問題が残される。

ただし、熱抽出運転のステージになって坑井が増えれば、坑井間での比抵抗トモグラフィーを行うことによって、フラクチャ内の流体流動を把握できる可能性がある。しかし、循環中にこのような作業を行おうとすると、定常運転の妨げになる可能性があるばかりでなく測定に相当の費用がかかる。また、熱抽出を評価する際に重要となる流体の滞留時間や貯留層容積を求めることはできない等の欠点がある。このため、貯留層内の流動状況(や温度の変化)を簡便にしかも低コストで把握できる手法の開発が望まれる。このためにはトレーサ試験の適応、特にフィードゾーンごとの応答を正確に把握できる光ファイバー蛍光光度計を用いた坑井内計測が有効と考えられる。

④に関しては③で述べたフラクチャ内流動状況の把握ができることがある程度前提になる。しかし、個々のフラクチャにおける流動状況が把握できたとしても、それらを制御するには非常な困難が予想される。例えば、肘折での下部貯留層を対象とした循環試験では、注入井 HDR-1 から東西両側に位置する2本の生産井(HDR-2 井および HDR-3 井)への流動状況に大きな差異が認められるばかりか、浅部貯留層との導通状況もそれらに影響を及ぼしており、生産井側の調節だけでは下部フラクチャの流動状況調節が非常に困難なことが分かっている。循環試験中の PTS 検層結果の解析から、下部フラクチャからの生産流量は注入井の圧力に依存するのに対し、浅部フラクチャからの生産流量は生産井圧力(と浅部貯留層圧力との差圧)に依存することも明らかにされている。このことは、流体流動に対するフラクチャ内インピーダンスの影響が大きいことを示唆しており、貯留層造成時に流動状況の良いフラクチャを造ることがいかに重要かを示している。④に関して今後必要な技術開発としては、個々のフラクチャの導通特性を改善するために必要な坑井仕上げ技術、すなわち対象とするフラクチャを限定するためのパッカーの開発、石油の分野で行われているマルチフィードゾーンからの生産技術の適応、フラクチャの透水性を制御するためのプロップアント(支持材)やグラウチング技術等が考えられる。パッカーに関しては高温下での耐久性がポイントとなる。ソルツではシール部分の耐久性向上と使用後のドリルアウトが容易なようにアルミ製の本体とシールからなるパッカーが作成されている。しかし、使用後にアルミ製シール部分のドリルアウトに多くの時間を必要としたとの問題が発生しており、リトリーバブルという面からは今後更なる改良が必要と考えられる。

以上述べた技術は、EGS を初めとして、従来型の地熱開発に適応可能なものが多い。更に、石油や天然ガスなどの開発や、CO₂ の地中固定など適応できる分野も多い。例えば、石油や天然ガス貯留層の開発では、これまでも生産性増大のために水圧破砕がごく普通に実施されてきた。また、従来型地熱の生産性に乏しい地熱貯留層からの増産に水圧破砕(刺激)などの貯留層造成技術を積極的に利用しようとするのが EGS と考えられる。このような技術的な広がりを見ると、今後最も重要な課題は、水圧破砕フラクチャの把握技術を含めた貯留層造成技術であろう。HDR や EGS で開発のポイントとなる高温への耐熱性については、開発の深部化や火成岩を対象とした開発への動きとともに石油や天然ガス開発でも考慮すべき課題となりつつある。上述した裸坑パッカー開発についても適用の機会が増えることによって大幅な技術的な進展が期待される。一方、弾性波を利用したフラクチャの把握技術については、既に LANL などで石油分野への展開が図られているだけでなく、最近のエレクトロニクスデバイスの急速な進歩とともに坑井内検層機器のマイクロ化や高機能化に関する研究が進められている。これら新たな技術を適応す

ることにより、例えば PTS 検層とトレーサ検出の複合化など、多機能な坑井内検層手法の開発と利用の展開も期待される。

これら周辺分野への HDR 技術の適応は、単に技術的な進展に効果的であるだけでなく、更には市場規模の拡大とコスト削減にもつながっている。ひいては HDR や EGS 開発へのフィードバックも大きくなり、HDR 実用化への展望がより確実なものとなろう。今後、実用化に向けた開発が進行中の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での適用や開発を含め、重要な技術課題に着実に取り組むべきである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始適切なご指導とご尽力を賜りました、東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻の大久保誠介教授に、深甚なる謝意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言、ご尽力を賜りました同専攻の福井勝則助教授に、深く感謝申し上げます。

また、討論を通じて、有益なご指導、ご助言を賜りました東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻の佐藤光三教授、登坂博行助教授、増田昌敬助教授に深く感謝申し上げます。

筆者は昭和 51 年4月に旧公害資源研究所に入所以来、一貫して高温岩体開発に関わる研究に携わってきた。本研究は、その間実施した主要な研究である「高温岩体の破碎熱抽出技術に関する研究」、「高温岩体熱抽出システムの解析・評価」で得られた成果に基づくものである。本論文の完成にあたり、これら研究に関係された多数の人から多くのご高配を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

特に、資源環境技術総合研究所時代の研究遂行にあたり、常に温かいご指導と激励を頂いた旧資源環境技術総合研究所長厨川道雄氏に深甚なる謝意を表します。また、室内試験や肘折での現場実験におけるデータの取得、試料採取や分析、更にはデータの解析や評価において、旧資源環境技術総合研究所や産業技術総合研究所の関係者には、多くのご協力とご教示を頂いた。特に、小林秀男先進製造プロセス研究部門主任研究員、山口 勉地圏資源環境研究部門副部門長、地圏資源環境研究部門地圏資源工学研究グループの及川寧己主任研究員、同天満則夫主任研究員、同柳澤教雄主任研究員、同部門地圏環境評価研究グループの杉田 創研究員、宮崎章つくばセンター次長、田尾博明環境管理研究部門副研究部門長、NEDO(前資源環境技術総合研究所)佐藤嘉晃総括主幹の各位には大変にお世話になった。深く感謝の意を表します。

また、本論文をまとめるにあたり変わらぬご厚情を頂いた、地圏資源環境研究部門野田徹郎部門長(現評価部首席評価役)に感謝いたします。

肘折 HDR 開発プロジェクトに関連して、新エネルギー・産業技術開発機構、特に旧地熱技術開発室や委託先の関係者の皆様には、多くの便宜を図って頂くとともに、現場データを利用させて頂いた。特に、元地熱技術開発(株)兵藤正美氏、同(現 SK エンジニアリング(株))佐藤勇一氏、三井金属鉱業(株)(現三井金属資源開発(株))門脇正和氏、石油資源開発(株)技術研究所宮入誠所長、同手塚和彦氏、同大崎 豊氏、電力中央研究所(現(財)地震予知総合研究振興会)佐々木俊二氏、同木方建造氏、同海江田秀志氏には、現場での実験遂行だけでなく、結果の解析や評価について、多大なるご協力、ご助言を頂いた。厚く感謝いたします。

上述した多くの方々以外にも、国内、海外の多くの方々に、委員会、国際会議、現場実験、現場調査など種々の機会を通してお世話頂いた。国内では、水圧破碎関連の研究を中心として山口大学(現崇城大学)水田義明教授、同大学石田毅教授、NEDO 高温岩体検討委員会などを通じて HDR 開発技術全般について阿部博之前総長、新妻弘明教授を初めとする東北大学の先生方、また一般の地熱貯留層でのトレーサ試験を中心に九州大学系井龍一教授等の方々である。

海外では、フェントンヒルでの HDR 国際共同研究に参加して以来、LANL 関係者、特に John Whetten 氏、Donald Brown 氏、Hugh Murphy 氏、George Zvoloski 氏、Bruce Robinson 氏、Mike Fehler 氏、故 Roland Pettitt 氏、John Rowley 氏、またドイツから派遣されていた Bernhard Hoffers 氏、DOE の Allan Jelacic 氏など多くの方々からは、筆者の HDR 開発研究の基礎となった多くのご教示を頂いただけでなく、その後も終始変わらぬ交流を頂いている。また、フランスのソルツ実験場に関しては、現地の Roy Baria 氏、Jörg Baumgärtner 氏、Andre Gerard 氏、BRGM の Albert Genter 氏と(現レンヌ大学)Luck Aquilina 氏、ドイツでは Fritz Rummel Ruhr 大学教授、GAA の Rheinhold Jung 氏、カールスルーエ大学(現 DB) の Christian Thüeringer 氏、スイスでは Geodynamic の Robert Hopkirk 氏や Ladislaus Rybach ETH 教授、イギリスでは前出の Roy Baria 氏、旧 CSMA の故 R. Parker 氏、A. Green 氏、オーストラリアに関しては Geodynamics 社の Doone Wyborn 氏とオーストラリア国立大学の Prame Chopra 氏、など世界各国の多くの方々に、貴重な情報やデータの提供だけでなく、現場や室内での研究について多くの啓発されるご教示を頂いた。また、アメリカ、ユタ大学の Peter Rose 助教授には蛍光染料トレーサの使用に関して有意義な議論や教示を頂いた。ここに列挙した方々を初めとして、名前を挙げられなかった多くの HDR 関係者に、深く感謝の意を表します。

最後に、本論文の完成のために、暖かい援助を惜しまずはげましてくれた妻登志と三人の娘達(しのぶ、かをる、つかさ)に深く感謝します。