

## 第7章 多坑井マルチフラクチャの流動評価

### 7-1 緒言

高温岩体発電を行うためには、高温の地熱流体を長期間（発電所の耐用年以上）にわたって安定して取り出すことが重要である。そのためには、大量の熱エネルギーを持つ高温の岩体が存在するだけでは不十分で、このような高温の岩体から効率的に熱交換を行うための流路の造成と保持が重要である。十分な熱交換面積を1枚のフラクチャで得ようとする、生産井と注入井間の距離は非常に大きな距離が必要となり現実的ではない。このため HDR を開発しようとする場合、注入井と生産井間にいくつかのフラクチャを造成する、いわゆるマルチフラクチャシステムの適用も考えられている(Abe et al., 1999)。

6章の「マルチフラクチャのトレーサ応答評価」において、肘折の上部循環試験中に注入井 SKG-2 の最下端 10m から注入した流体が、複数のフラクチャを経由して生産井に達したこと、そしてその流動特性が時間とともに変化したことを明らかにした。このように、1箇所から貯留層へ注入する場合でも複数の流路を経由した流動が生じており、マルチフラクチャシステムのように複数の注入箇所と複数のフラクチャ内を流れる循環流体の流れはより複雑になると考えられる。このようなシステムを用いて安定した循環熱抽出を行うには、複数のフラクチャをどのように流体が流れ、そしてその流れが時間とともにどのように変化するかを把握することが重要である(Brown et al., 1999)。造成した複数のフラクチャの中である特定のフラクチャだけを卓越して流体が流れるようなことになると、せっかく作った複数のフラクチャの意味がなくなるからである。

肘折 HDR 実験場では、1つの注入箇所を持つ上部貯留層を対象とした3ヶ月間の循環試験が平成3年に終了した後、PBR ライナーを用いて下部貯留層の水圧破碎が行われ、マルチフラクチャシステムの造成に成功した。この間の経緯については既に第2章で紹介した。その後、平成12年11月から平成14年8月にかけて実施された長期循環試験では、この多坑井マルチフラクチャシステムによる循環熱抽出挙動を把握するために HDR-1 井からの下部注入と HDR-1 井と SKG-2 井を用いた上部下部同時注入という2つの注入方式により注水循環が行われた(佐藤・岡部, 2001; Oikawa et al., 2001; Kawasaki et al., 2002)。このような2本の注入井、2本の生産井によるマルチフラクチャシステムでの循環熱抽出試験は世界初めての試みであり、実規模の HDR 開発のための重要なステップとして位置づけられるものである。

本章では肘折 HDR 実験場で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する。まず、7-2 において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としてトレーサ試験方法について述べ、循環試験中にほぼ定期的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(Matsunaga et al., 2001; Matsunaga et al., 2002; Yanagisawa et al., 2003)。最後に、長期循環試験を初めとして、これまで肘折で実施した多くの実験や試験で得た経験を基に、今後 HDR 開発を進める上での技術的な課題について述べる。

## 7-2 長期循環試験

アメリカのフェントンヒルを初めとして、イギリスのコンウォール、フランスのソルツ、そして日本の肘折及び雄勝の各実験場では、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、人工貯留層の三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、さらに熱抽出の評価に必要な貯留層評価技術という要素技術を開発してきた。このようにして、HDR 貯留層開発の対象となる 200°C 以上の地熱流体の得られる深度において、熱抽出システムを作ることはそれほど困難ではないと考えられるようになってきている。しかし、これらプロジェクトにおいて未だ明らかになっていなかったのが、長期的に抽熱を行った場合の人工貯留層の熱出力性能である。発電等に利用するためには 15 年から 20 年の長期間にわたって安定して熱水や蒸気を生産する必要がある。このため、既に 2-5 でも述べたように長期循環試験が実施された(佐藤・岡部, 2001; Oikawa et al., 2001)。

図 7-1 に長期循環試験の循環システムの概要を示す。図には示していないが、循環に使用される水は肘折カルデラの中央部を東西に流れている苦水川から 1,000m<sup>3</sup> の貯水池にポンプアップされ、更に実験場内にある 450m<sup>3</sup> のピットに送られる。この 450m<sup>3</sup> ピットからの水はサイリスタ制御の電気モータにより駆動する横置き型の多段タービンポンプ(ESP 社 TJ9000 型)によって注入井から貯留層に注入された。

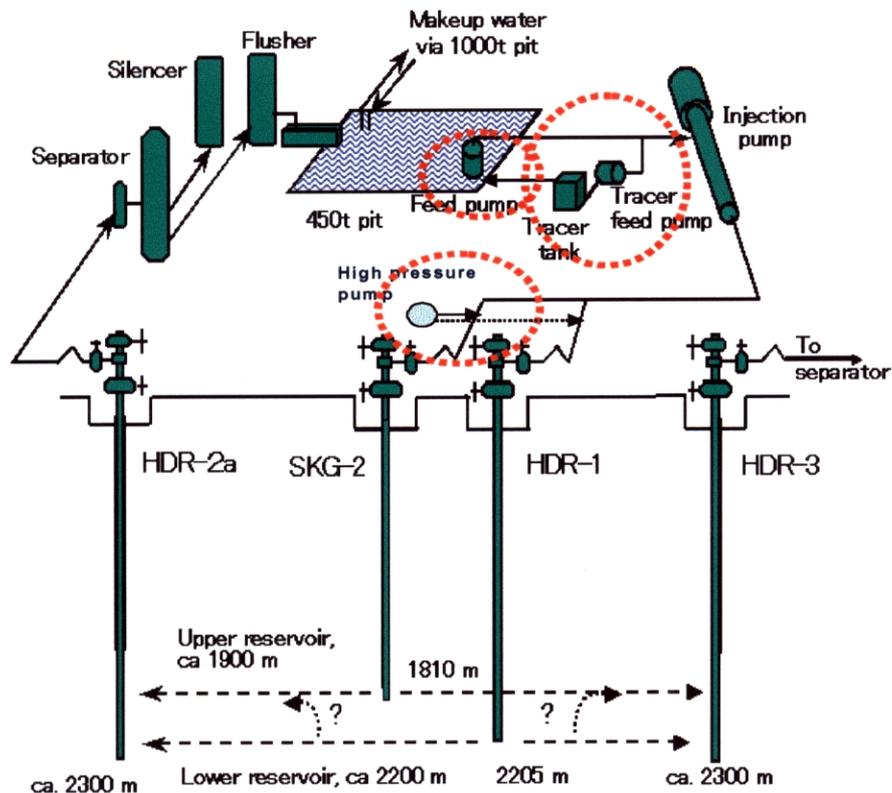


図 7-1 長期循環試験時の循環システムの模式図. 上部貯留層での循環試験に対しての主要な変更箇所を赤い波線の楕円で示した

生産井側の配管システムは上部貯留層における循環試験の時と同様の配置で、坑口の電動袖バルブで坑口の圧力・流量を制御し、その下流側の2相流ラインによりセパレータに導いて熱水と蒸気に分離した。分離された蒸気は、オリフィス流量計によって流量を計測した後、サイレンサーにより大気中に放出され、熱水はフラッシュを経由した後、三角堰によって流量を計測し、再び450m<sup>3</sup>ピットに放流された。

長期循環試験の前半はHDR-1井のみを用いて下部貯留層への注入を行い、HDR-2及びHDR-3井からの生産を行う下部貯留層(注入)循環試験を、後半はHDR-1井による深部貯留層への注入だけでなく、SKG-2井を使用して上部貯留層への注水も同時に行う上下(デュアル)循環試験を実施した。下部貯留層への注入では、下部貯留層からの抽熱特性評価等を目的に、HDR-1井に16.7kg/sec(60t/h)のレートで注水を行い、HDR-2a井及びHDR-3井から生産を行った。デュアル循環試験では、生産井として使用するHDR-2a井及びHDR-3井が上下2つの貯留層の両方に導通しており抽熱効率が高いことが予想されるため、注水井として新たにSKG-2井を加え、HDR-1井とあわせて16.7kg/sec(60t/h)の注水を行った。当初HDR-1井とSKG-2井の注水量比率を1:1として循環を行ったが、上下2つの貯留層の流動状況が異なることによる生産のアンバランスに対応し、実験の後半には循環特性を向上するため下部貯留層への注入割合を増加させ1:3として循環を行った。更に、デュアル循環試験期間の後半3ヶ月間は100kWの小型バイナリー発電ユニットを設置して、生産流体から分離した蒸気を用いた発電試験を行った。図7-2に長期循環試験中の循環流体温度の経時変化を示す。また、図7-3に長期循環試験中の注入・生産流量の経時変化を示す。

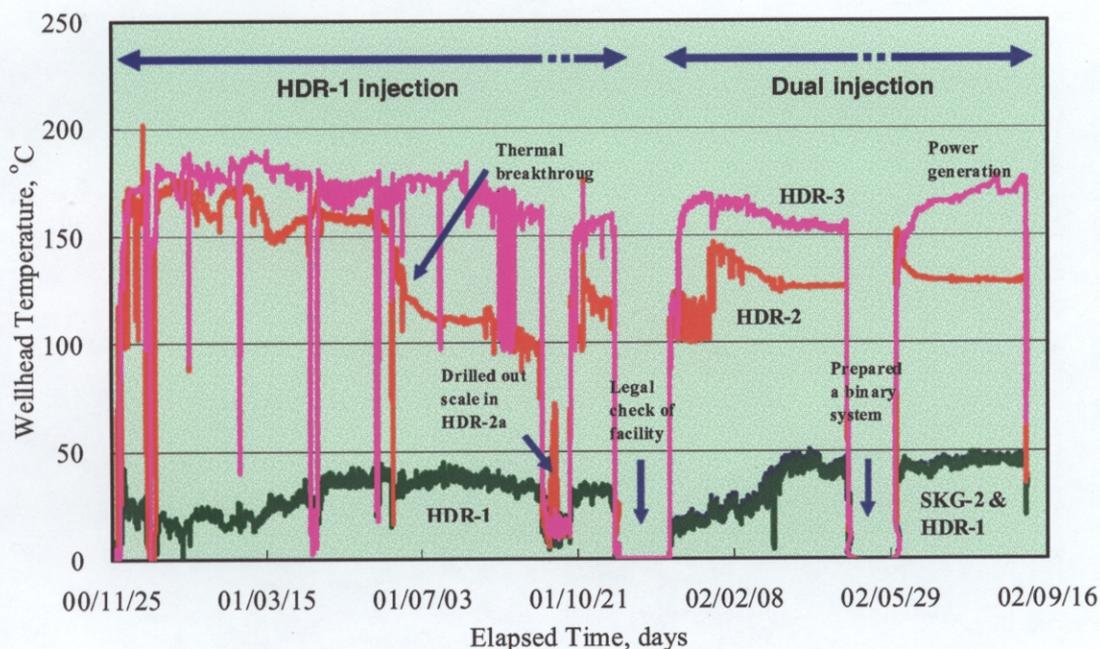


図7-2 長期循環試験中の流体温度の経時変化(HDR-2の流体温度が2001(H13)年6月に急激に低下していることに注意)

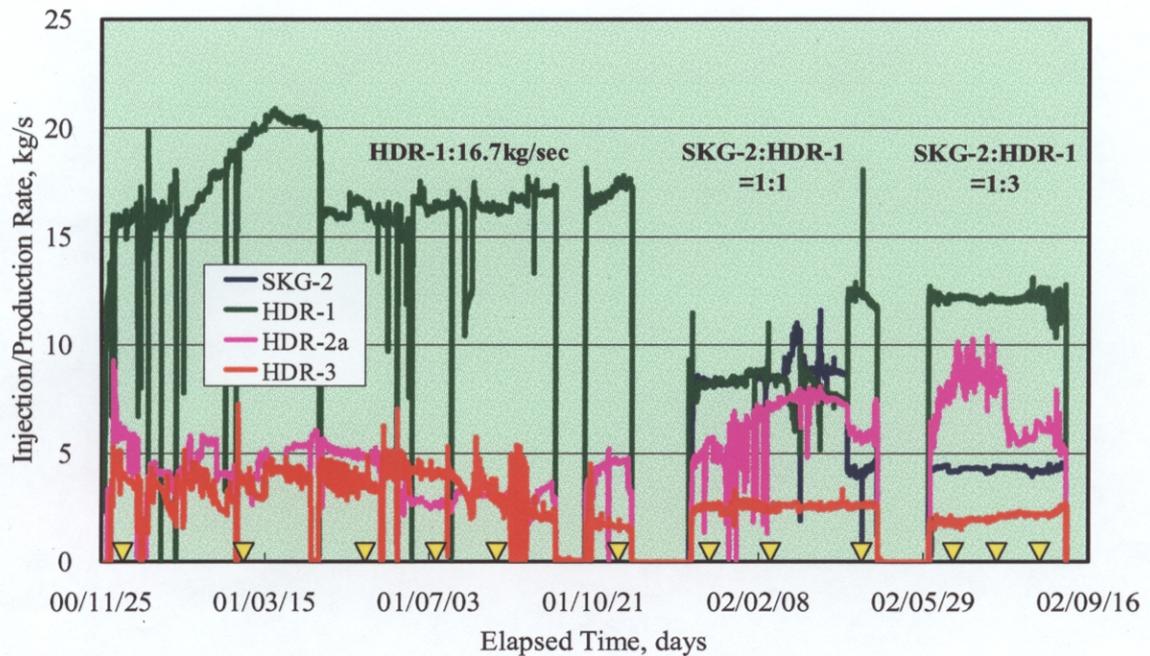


図 7-3 長期循環試験の注入・生産流量の経時変化(HDR-1 井からの単独注入後、地表の注入ポンプからの配管を2つに分岐してHDR-1とSKG-2井からの2坑井注入を実施)。  
▽はトレーサ試験実施時期。

### 7-3 長期循環試験時のトレーサ試験

#### 7-3-1 試験方法

トレーサ試験の方法や採取した流体の分析方法などは、第5章で述べた上部循環試験の場合と基本的に同様である。ただし、前節で述べたように、地表循環システムの設計にあたっては、積雪の厳しい冬期間を含む2年近くの長期の循環を可能とするだけでなく、HDR-1 井だけを用いた下部貯留層への注入・循環試験と、SKG-2 井及びHDR-1 井の2坑井を用いた上部下部両貯留層への注入(いわゆるデュアル)循環試験への対応が図られた。それらに対応して、トレーサ試験の方法や装置についても以下のような変更や改善を行った。

- ① 循環ポンプが多段遠心ポンプに変わったことにより、ポンプ吸い込み側への流体の強制注入が必要となった。このため、これまでのようにトレーサタンクからの自然吸い込みが不可能となったため、1m<sup>3</sup>のトレーサ溶解タンクから循環ポンプへの吸い込みラインに対してトレーサ溶液を加圧注入するポンプを設置した(図 7-1、図 7-4(a))。
- ② 第4章での注入井坑内での移流分散の影響を考慮して、下部貯留層へのトレーサ注入時間を約10分間に設定した。
- ③ SKG-2 井あるいはHDR-1 井への単独注入を可能とするため、循環ポンプからの送水ラインが分岐した下流側に小型の高圧プランジャポンプでトレーサ溶液を注入できるようにした(図 7-1、図

7-4(b))。このシステムでは、最高 15MPa の圧力で、毎分 10 l 程度のトレーサ溶液を、最大 200 l まで注入を行うことができる。

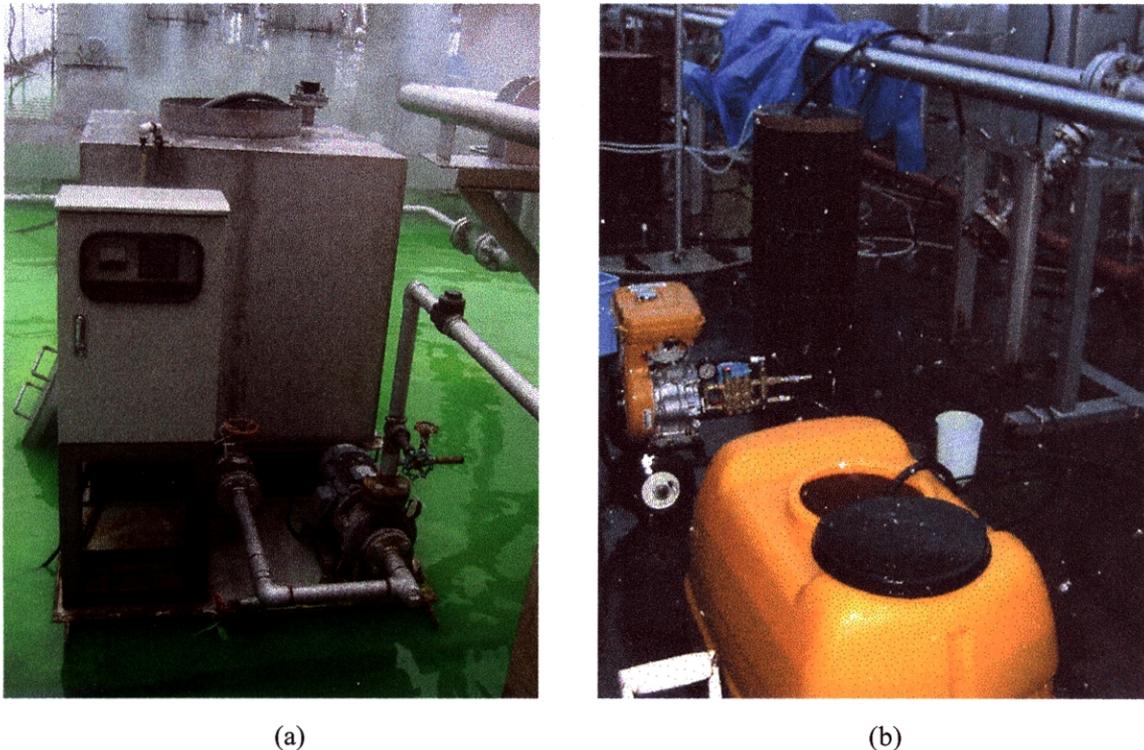


図 7-4 トレーサ試験用溶解タンクと循環ライン注入用ポンプ。(a): 上下両貯留層への同時に注入するためにトレーサを循環ポンプ上流側ラインへ注入するための溶解タンクと低圧ポンプ。周辺にはフルオレセイン Na トレーサ溶液の残液が漏れて広がっている。(b): SKG-2 井を通して上部貯留層へ、あるいは HDR-1 井を通して下部貯留層へ別々にトレーサを注入する際に使用した高圧プランジャポンプと溶解タンク(右側のラインが注入井へ続く高圧のライン)。

- ④ 特に夜間の生産流体試料採取の負荷を軽減するために、任意の時間に流体を自動で採取可能な装置を設計製作した(図 7-5)。この装置は、当初 1996 年の予備循環試験に向けて、任意に設定した時間に HDR-2a と HDR-3 の生産井坑口のどちらかから、500ml の流体試料を最高 50 本まで採取できるよう、設計、製作を行った。その後、長期循環試験時の冬季使用を考慮して、熱水を流通させたままにして途中配管部での凍結を防止する冬季運転モードと、晩春から初秋にかけて行う流体採取時の冷却負荷を低減するための夏季運転モードの 2 つが選定可能なように改良を加えるとともに、後述する光ファイバー蛍光光度計センサーによる自動計測システムとの組み合わせを図った(Matsunaga et al., 2001)。更に、循環試験開始後には、熱水ラインの流体採取部のスケール目詰まりと背圧不足に対応するため、小型循環ポンプを用いて三角堰から熱水を導入するよう改善を行った(図 7-6)。