論文

肘折高温岩体に形成された人工貯留層の亀裂面の熱交換面積の推定*

天満 則 夫¹ 松 永 烈¹ 厨 川 道 雄¹
山 口 勉² ジョージ・ジボロスキー³
宮 入 誠⁴

Estimation on the Effective Heat Extraction Area of the Reservoir at Hijiori Hot Dry Rock Test Site

by Norio TENMA¹, Isao MATSUNAGA¹, Michio KURIYAGAWA¹,
Tutomu YAMAGUCHI², George ZYVOLOSKI³ and Makoto MIYAIRI⁴

1. National Institute for Resources and Environment, Onogawa, Tsukuba 305
2. New Energy and Industrial Technology Development Organization
3. Los Alamos National Laboratory, Geoanalysis Group
4. JAPEx Research Center

At the Hijiori Hot Dry Rock test field in Yamagata prefecture, a three month circulation test (Exp. 9102) was conducted in 1991, using a injection well SKG-2, and three production wells HDR-1, HDR-2 and HDR-3. During Exp. 9102, pressure, temperature and flow rate were periodically surveyed in the production wells with the PTS (Pressure, Temperature and Spinner) combination tool. Several flow paths were recognized from the PTS surveys and flow rate and temperature changes during Exp. 9102 were obtained.

To estimate the heat extraction area, which consisted of several flow paths in the Hijiori HDR reservoir, a model was developed for each flow path using both Finite Element Heat and Mass Transfer Code (FEHM) and Gringarten's model. Calculations were repeated, changing the heat extraction area, until the temperature of production well obtained the best match of Exp. 9102.

By matching the observed temperature in the producing zones, important features were observed. There were several flow paths in which the heat extraction area remained constant. Other flow paths, however, experienced an increase in heat extraction area. The main flow paths were produced in wells HDR-2 and HDR-3.

These paths had about the same length to heat transfer area ratio. During Exp.9102 very little heat transfer interaction between the fractures was observed.

KEY WORDS: Hot Dry Rock, Heat Extraction Area, Feed Zone, Simulation

1. 緒 論

高温岩体開発のための現場試験がサンシャイン計画のもと、山形県大蔵村肘折地区の肘折カルデラで1984年から開始された。カルデラ内には、天然貯留層の探査を目的に既に SKG-2 (深度1,802m) が掘削されていた。この SKG-2 の坑底温度は254℃に達したが、蒸気や熱水を含む地熱貯留層の存在を認めることはできなかった。そこで、地下の高温な岩盤から熱エネルギーを抽出するための人工貯留層の構築のために、1985年に SKG-2 の坑底部の14mを残してケーシングパイプを設置し、1986年10月に水圧破砕を行った。この水圧破砕により、深度1,800m付近に大きな人工貯留層が造成された¹⁾。その後、SKG-2 の周辺に、1987年に HDR-1 (深度2,206m)、1989年に HDR-2 (深度1,910m)、1990年に HDR-3 (深度1,907m)

を掘削した。この人工貯留層の特性を把握するために、これらの坑井を用いて1991年までに計3回の循環試験が実施された。1991年に行った4坑井循環試験 (Exp.9102) では、それぞれの坑井において地表で流量、温度および圧力の計測を行うとともに循環中の坑井内の圧力、温度および流量の計測 (PTS検層) が実施された。

PTS 検層による計測結果²⁾をもとに、人工貯留層の抽熱能力を把握・評価するために人工貯留層を構成する複数の亀裂面の熱交換面積を独立して推定することを試みたので、その結果を報告する³⁾。

2. Exp. 9102における PTS 検層

2・1 Exp.9102の概要

肘折高温岩体実験場は、月山東方約10kmにあり、直径約2kmの肘折カルデラ内の南縁部に位置している。実験場周辺の地質は先第三系の花崗閃緑岩を基盤とし、新第三系および第四系より成る。基盤岩である花崗閃緑岩は、深度1,450~1,480m以深に存在する。

Exp.9102は、1本の注入井 (SKG-2) と3本の生産井 (HDR-1, HDR-2 および HDR-3) を用い、貯留層の特性を

* 1993年11月10日受付 1994年1月24日受理

1. 正会員 資源環境技術総合研究所地殻工学科

2. 正会員 新エネルギー・産業技術総合開発機構地熱技術開発室

3. ロスアラモス国立研究所地球環境科学部

4. 石油資源開発(株)技術研究所

キーワード: 高温岩体, FEHM, 熱交換面積

Fig. 1 (a) History of flow rate of injection well, SKG-2 during Exp. 9102.

Fig. 1 (b) History of flow rate of production wells, HDR-1, HDR-2 and HDR-3 during Exp. 9102.

Fig. 1 (c) History of temperature of production wells, HDR-1, HDR-2 and HDR-3 during Exp. 9102.

Fig. 1 (d) History of pressure of injection well, SKG-2 and production wells, HDR-1, HDR-2 and HDR-3 during Exp. 9102.

把握するために1991年8月6日から約3カ月間にわたって実施された。この実験で得られた注入水の流量、注入流量に対する生産井からの蒸気・熱水の生産流量、生産井の坑口における生産水の温度、注入井および生産井の坑口圧力の実験期間中の経時変化をそれぞれ Fig. 1 (a) ~ (d) に示す。注入流量はほぼ一定値 (16.7kg/s) を保った (Fig. 1 (a))。しかし、試験初期には貯留層内を刺激して蒸気・熱水の生産流量の増加を目的に、また、貯留層内の亀裂面内の水の流動を促進し、さらに AE を発生して亀裂面の位置を把握するために、注入流量を短期間ではあるが2倍あるいは3倍に増加した。また、中期には注入井と個々の生産井間の導通特性把握のため、1本の生産井を残して他の生産井の坑口バルブを閉じる、いわゆる単独坑井生産試験を行った。そのため、Fig. 1 (b) に示されるように、一部各生産井の生産流量が変動している。Exp.9102中期の単独坑井生産試験以後、9月23日から11月3日までは、3坑井生産による貯留層特性の経時変化を把握するため、注入流量を一定に保った。この期間の各生産井の生産流量の比、すなわちHDR-1 : HDR-2 : HDR-3 は、1.0 : 2.3 : 2.4となり、HDR-2とHDR-3の生産流量はほぼ等しく、HDR-1の約2倍の値を示した。これにより、SKG-2からHDR-2とHDR-3の方向にはHDR-1の方向に比べて透水性の高い亀裂、すなわち、フローパスが存在していると推定される。Exp.9102期間中の3本の生産井からの総注入流量に対する生産流量は約80%であった。

Fig. 1 (c) に示すように、HDR-1の温度は時間の経過とともに徐々に上昇し、3カ月後に約180°Cに達した。これに対して、HDR-2の温度は180°Cに達した後徐々に下がり、最終的に約150°Cになり、HDR-3の温度は試験初期に160°Cに達した後ほぼ安定し、約170°Cを保った。

また、Exp.9102期間中、生産井ではフラッシングが起こらないように坑口でバルブ操作が行われ、各坑井の圧力は、注入流量を16.7

kg/sより増加したときや単独坑井生産試験を行ったとき以外は、SKG-2の注入圧力がほぼ3 MPaと安定しており、HDR-1、HDR-2およびHDR-3もほぼ1 MPaで安定していることが分かる (Fig. 1 (d))。

循環試験中、SKG-2から注入された水は、坑底から岩盤を通り、3本の生産井の異なる箇所に入力した。そこで、試験開始前に各坑井の温度と圧力のバックグラウンドを測定し、それぞれの生産

Fig. 2 The results of temperature survey on production wells.

Fig. 3 Trajectories of SKG-2, HDR-1, HDR-2 and HDR-3 and location at feed zones at Hijiori Hot Dry Rock test site.

井の流体の流入箇所（フィードゾーン）の特性を評価するためにPTS（圧力、温度、流量）検層を行った。試験中には原則として、週1回の割合で各坑井について、順次計測を行った。したがって、計測を行った日は坑井によって異なる。取得したデータは坑井に沿った温度、圧力およびスピナー回転数である。このデータをもとに生産井のフィードゾーンの位置と流入量および温度変化を求めた。

2・2 各フィードゾーンの流量と温度変化

Fig. 2にPTS検層によって得られた各生産井の1,500m以深の循環試験開始前および循環試験中の温度曲線を示す。ここで、点線は循環試験開始前に測定したバックグラウンドに当たる温度曲線であり、実線が循環試験中の温度曲線である。先にも述べたようにPTS検層は週1回各生産井に対して順次行われているため、循環中の温度曲線はその測定日が異なっており、HDR-1が9月7日、HDR-2が9月5日、HDR-3が9月21日の測定結果である。各生産井の温度曲線上に急激な変化（温度アノマリー）が数箇所見られる。これは坑井内へ岩盤の初期温度よりも温度の低い流体が流入しているところ、すなわち、流体のフィードゾーンを示している。図中に顕著なフィードゾーンと思われる箇所を矢印で示し、上部から番号をつけている。また、HDR-1では、Exp.9102では認められなかったが、1989年の循環試験時（Exp.8902）に深度1,530m、1,628mの2箇所フィードゾーンが確認されているため、フィードゾーンは"3"から番号を付けてある⁴⁾。本文では、この番号を付けたフィードゾーンをそれぞれの生産井への流入点とみなし、以後"zone"と称することにする。Fig. 3は各坑井の坑跡を水平面に投影し、更に各zoneの位置を矢印で示したものである。

Fig. 4 (a) ~ (c)にPTS検層から得られた循環試験期間中のHDR-1、HDR-2およびHDR-3の各zoneの流量変化を示す。このうち、Fig. 2に示したHDR-3のzone 1からは、HDR-3の生産流量に寄与するような流量変化は認められなかったため、Fig. 4 (c)ではzone 1を除外してある⁵⁾。また、HDR-1の深度2,150mにセメントライナーが設置されており、HDR-1のフィードゾーンはケーシングの影響によって各zoneの流量変化が測定できなかった。そのため、Fig. 4 (a)のHDR-1の各zoneの流量変化は、次節に示すMurphyの方法で、"total"と示したHDR-1の全生産流量から求めたものである。また、各zoneからの生産流量は、PTS検層の測定期間毎の平均流量として表記してある。平均流量を求める際には単独坑井生産試験を行った期間は除いて計算を行った。

流量変化に関する図中の点線はExp.9102の期間を3あるいは4区間に分けて、各フィードゾーンの流量変化を1次あるいは2次曲線で表現したものである。また、Fig. 2およびFig. 4より以下のことが分かる。

Fig. 4 (a) History of flow rate at feed zones (zone 3, zone 4, zone 5 and zone 6) of HDR-1.

Fig. 4 (b) History of flow rate at feed zones (zone 1, zone 2, zone 3, zone 4 and zone 5) of HDR-2.

Fig. 4 (c) History of flow rate at feed zones (zone 2, zone 3, zone 4 and zone 5) of HDR-3.

- 1) 各生産井のそれぞれのzoneによって生産流量が異なる。
- 2) 温度アノマリーの大きな箇所、すなわちHDR-1のzone 3, zone 4, HDR-2のzone 3, zone 4およびHDR-3のzone 3がそれぞれの生産井の生産流量に対する寄与率が高くなっている。

2・3 HDR-1の各zoneの流量変化の計算

Murphyが提案した方法⁶⁾を用いて坑井内の温度分布に基づくHDR-1の各zoneからの流量分布を計算した。

Murphyは、坑井内の流れを乱流とし、岩盤内への水の浸透による熱伝導および岩盤内の深さ方向の熱伝導が無視できると仮定したとき、循環試験中の坑井内温度分布と初期岩盤温度分布から、坑井内の2箇所の異なる深度1と2における流量比が(1)式で与えら

れることを示した。

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Delta T_1 g_{e1}}{\Delta T_2 g_{e2}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

$$g_e = \sqrt{g(t) \bar{g}(t)}$$

$$g = \frac{\partial T}{\partial D}$$

$$\bar{g} = \frac{1}{t} \int_0^t g(\tau) d\tau$$

Q は流量、 ΔT は循環時間 t の間における水の温度変化、 g は坑井内の温度勾配を意味し、 $g(t)$ は循環開始後、時間 t における温度勾配、 $\bar{g}$ は、循環時間 t の間の温度勾配の変化率の時間平均である。

循環開始前の温度勾配および循環中の PTS 検層 (10月26日実施) による温度勾配と (1) 式を用いて、HDR-1 の各 zone の流量分布を計算した。その計算結果は既に Fig. 4 (a) に示してある。なお、図中の表記については 2・2 で説明したとおりである。

3. 熱交換面のモデル化およびパラメータ

3・1 モデルの概念

Exp.9102では注入流量の約80%に当たる熱水が、注入井である SKG-2 から貯留層内に造成された複数の亀裂面をフローパスとして通り、Fig. 2 や Fig. 3 に示される各生産井のそれぞれの zone から回収されている。この各 zone に対応したフローパスの抽熱に関する面と等値な抽熱能力を示す亀裂面モデル、すなわち、亀裂面の熱交換面を仮定して、その亀裂面モデルの大きさを解析的に求めた値、すなわち、亀裂面の熱交換面積を評価することを試みた。そのため、以下に示す仮定を行った。

1) 注入井から注入された水は独立した亀裂面をフローパスとして流れ、生産井の zone から生産されるものとした。したがって、PTS 検層で得られた各 zone の生産流量は対応するフローパスを流れた注入流量と等しいものとする。

2) Fig. 5 に示すように、熱交換面のための亀裂面のモデルは注入井および生産井とに垂直な平面とした。2本の坑井間距離は求める各 zone と SKG-2 の注入深度 1,800m の点とを直線で結んだ概算値を用いる。この坑井間距離を Table 1 に示す。なお、モデルは亀裂面に対して鉛直方向に面対称で、かつ 2 坑井を通る平面に対して対称とした。

3) 循環試験開始前の温度検層で得られた各 zone と坑井との交差位置の岩盤温度を亀裂面の初期温度とし、岩盤内の温度も亀裂面と同じものとした。

4) 亀裂の幅を計測した例は少ないが、Jung⁷⁾によれば亀裂の幅は、水圧破碎時で 1~2 mm になるとの報告があった。そこで今回の計算では、亀裂の幅は一定値、すなわち、2 mm とした。

3・2 熱交換面積の推定に用いたパラメータおよび推定方法

亀裂面の熱交換面の大きさ、すなわち、熱交換面積の推定にはシミュレーションコード FEHM⁸⁾ (Finite Element Heat and

Fig. 5 The idea of the heat extraction model for simulation.

Table 1 Distances of injection point of SKG-2 to feed zones of production wells. (unit; m)

	HDR-1	HDR-2	HDR-3
zone 1	—	220	—
zone 2	—	140	160
zone 3	60	50	70
zone 4	40	50	70
zone 5	40	40	100
zone 6	70	—	—

Table 2 Parameters used for simulation.

Parameter	Value
Permeability	
Fracture	$2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
Rock	$1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$
Rock thermal conductivity	$3.0 \text{ W/(m} \cdot \text{k)}$
Water specific heat	$4.2 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
Rock specific heat	$1.0 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
Rock porosity	0.02
Rock specific gravity	2.70
Injection flow temperature	55°C
Boundary impedance	$1.0 \times 10^{-30} \text{ (kg/s)/MPa}$

Mass Transfer Code) を用いた。このプログラムは、流体の質量保存則と系全体のエネルギー保存則を基に、物体中に熱水や蒸気が流れる際の温度および圧力挙動などを有限要素法によって解析するものである。ここでは、前述したように亀裂の幅を 2 mm とし、メッシュを作成し、亀裂および岩盤をポラスメディアとして取り扱った。

シミュレーションに用いたパラメータを Table 2 に示す。このうち熱伝導率、密度および孔隙率は、室内実験の結果から得られた値を用いた。また、岩石の比熱は文献に用いられている値を用い⁹⁾、岩石からの熱伝達を考慮した。FEHM ではモデル境界面と境界面と接するモデル内部の圧力差に応じてモデル外部へ水を流出させることができるようになっている。ここでは、フローパスからの水の逸水を論じないので、モデル外部へ流出する水の流量を規定するパラメータである境界インピーダンスを $1.0 \times 10^{-30} \text{ (kg/s)/MPa}$ と非常に小さい値に設定し、外への水の流出はないものとした¹⁰⁾。

Exp.9102においては、前述したように注入流量は 16.7 kg/s を保った。この流量で 40°C の水を注入すると、数値解析によれば SKG-2 の裸坑部である深度 1,800m での温度は、約 55°C となる。そこで今回のシミュレーションでは注入水温度を 55°C とした¹¹⁾。

また、これまでの現場試験や室内試験の結果を参考に、岩盤の透水係数を決定した¹²⁾。

亀裂面の透水係数は、次のような手順で決定した。まず、注入井と生産井の坑井間隔が 40m で、それぞれの坑井とモデル境界との距

Fig. 6 History of recovery on the variation of permeability.

Fig. 7 The Gringarten's model for simulation.

離が50mとしたモデル、すなわち、注入井と生産井を含む亀裂面の面積として140m×100mのモデルを選んだ。次に、PTS 検層より得られた注入流量の最大値5.0kg/sと最小値0.5kg/sの二つのケースに対して、透水係数を $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2$ の間で変化させて透水係数と注入流量に対する生産流量の割合（回収率）の変化を調べた。注入流量が5.0kg/sの場合について、注水してから1時間（×）、3時間（▲）、6時間（△）、12時間（●）および24時間（○）経過後の透水係数の違いによる回収率の変化をFig. 6に示す。これより、透水係数が $2.0 \times 10^{-9} \text{m}^2$ より大きい場合、シミュレーション開始後、数時間経過すると注入した水のほぼ全量が生産井から回収されることが分かる。ここではそれぞれの亀裂面の透水係数を論ずることが目的ではないので、亀裂面の透水係数を $2.0 \times 10^{-9} \text{m}^2$ とした。

Exp.9102におけるPTS 検層で得られた温度の実測値に合うように、各zoneに対する熱交換面積を以下に示す手順で求めた。

1) Fig. 5に示すように注入井と生産井を含む方向のモデル境界面を結ぶ距離をX、2坑井を通る直線とその直線に平行な境界面との距離をYとして、このXおよびYに任意な値を与える。ただし、生産井HDR-1、HDR-2およびHDR-3は注入井SKG-2のまわりに配置されており、注入流量の約80%に当たる熱水が生産井から回収されるため、Xに値を与える場合、SKG-2から注入された水が主として生産井の方向へ流れるようにすることが必要であった。そこで、注入井とモデル境界面との距離 X_1 を1mと固定し、生産井とモデル境界面の距離 X_2 のみを変えることとした。

2) 前述のパラメータを用いて計算を行い、XおよびYの値を変えて生産井の温度変化を調べる。

3) 各zoneの温度の実測値に最も合う温度変化を示すようなXおよびYの値を求め、この積の2倍の値を熱交換面積とする。

3・3 Gringartenらのモデルによる熱交換面積の推定方法

3・1および3・2で述べたFEHMコードで求めた亀裂面モデルによる熱交換面積と比較するために、簡易な方法として知られているGringartenらの解析解を利用したモデル¹³⁾を用いて、亀裂面の熱交換面積を求めた。この亀裂面モデルはFig. 7の斜線で示すような矩形形状をした熱交換面を仮定し、この中を流れる岩盤および水の温度変化を計算するものである。

このGringartenらのモデルを用いて、以下に示す手順で亀裂面の熱交換面積を求めた。

1) Table 1に示した2本の坑井間距離をFig. 7の一辺Hとして、他の一辺Wを変化させながら、生産水温度を計算する。

2) 計算された生産水温度と最も実測値に合う温度変化を示すWを求め、そのときのHとWの積を熱交換面積とする¹⁴⁾。

4. シミュレーション結果と考察

3・2に示す手順で、Exp.9102におけるPTS 検層で得られた温度の実測値に合うように、各zoneに対する熱交換面積を求めた。

Fig. 8 (a) Calculated production temperature at feed zones of HDR-1 which was established the heat extraction area to get the best match of the Exp. 9102 by FEHM

Fig. 8 (b) Calculated production temperature at feed zones of HDR-2 which was established the heat extraction area to get the best match of the Exp. 9102 by FEHM.

Fig. 8 (c) Calculated production temperature at feed zones of HDR-3 which was established the heat extraction area to get the best match of the Exp. 9102 by FEHM.

 Table 3 Values of the heat extraction area at feed zones of production wells by FEHM. (unit; m^2)

	HDR-1	HDR-2	HDR-3
zone 1	—	1,554	—
zone 2	—	2,072	3,340
zone 3	12,000	2,840	8,880
zone 4	9,600	3,124	2,916
zone 5	1,260	1,032	4,488
zone 6	1,440	—	—

Fig. 9 (a) Calculated production temperature of the variation of the heat extraction area at feed zone 1 of HDR-2.

Fig. 9 (d) Calculated production temperature of the variation of the heat extraction area at feed zone 2 of HDR-3.

Fig. 9 (b) Calculated production temperature of the variation of the heat extraction area at feed zone 2 of HDR-2.

Fig. 9 (e) Calculated production temperature of the variation of the heat extraction area at feed zone 3 of HDR-3.

Fig. 9 (c) Calculated production temperature of the variation of the heat extraction area at feed zone 3 of HDR-2.

Fig. 9 (f) Calculated production temperature of the variation of the heat extraction area at feed zone 4 of HDR-3.

Fig. 8 (a) ~ (c) に各zoneの温度の実測値 (◆, ●印等で示す) と実測値に最も近い温度が得られるような熱交換面積に設定したときの温度変化の計算結果を示す。また, Table 3 にそのときの熱交換面積を示す。ただし, HDR-1 のzone 3およびzone 4では X_1 が 1 mでは, 実測値に合わなかったため, X_1 も試行錯誤的に変化させ計算を行ったところ最終的に20mが最適値となった。これは, HDR-1 の各zoneからの生産水温度が HDR-2 や HDR-3 に比べて高いことに起因している。そのため, HDR-1 のzone 3やzone 4の熱交換面積は, HDR-2 や HDR-3 の熱交換面積に比べてかなり大きな値となっている。しかし, SKG-2 と HDR-1 の坑井間距離は約40mとSKG-2と他の坑井に比べて大きいわけで

はないので, SKG-2 から HDR-1 の各zoneに到るまでのフローパスは, モデルで設定したように平面ではなく3次元的で複雑な亀裂面により構成されているものと考えられる。

Table 3 で各zoneの熱交換面積が異なっているのは, 各zoneの坑井間距離やフローパスの違いを示していると考えられる。また, HDR-1 のzone 3, HDR-2 のzone 3とzone 4およびHDR-3のzone 3が各生産井の抽熱能力の高いフローパス, すなわち熱交換面積を持っている。先に述べたように, HDR-2 とHDR-3からの生産流量は HDR-1 の生産流量に比べて大きい。特に, HDR-2 のzone 3とzone 4およびHDR-3のzone 3は, それぞれの生産井の生産流量の寄与率が高いzoneであり, これらのzone

Table 4 The variation of heat extraction area at feed zone 1-3 of HDR-2 and feed zone 2-4 of HDR-3 during Exp. 9102. (unit; m²)

	HDR-2		HDR-3	
	previous term	latter term	previous term	latter term
zone 1	1,332	1,554	—	—
zone 2	1,480	2,072	668	3,340
zone 3	1,980	2,840	6,660	8,880
zone 4	—	—	1,620	2,916

が生産井のHDR-2とHDR-3の主たるフローパスとなっている。この主たるフローパスの熱交換面積は、Table 3よりHDR-2が5,964m²、HDR-3が8,880m²である。また、HDR-2とHDR-3は注入井SKG-2からそれぞれ50mと70m離れている(Table 1)。HDR-2とHDR-3について熱交換面積と坑井間距離の比を求めるとそれぞれ119と127となる。これにより、ほぼ坑井間距離の増加に比例して、熱交換面積が増加するものと考えられる。

Fig. 8 (a) ~ (c) より、Exp.9102の100日間にわたって比較的良好く両者がマッチングしている場合と循環試験の後期しかマッチングしていない場合があることが分かる。前者は循環試験中、熱交換面積が一定であったのに対し、後者は何らかの原因で熱交換面積が変化したためと考えられる。すなわち、HDR-2のzone 1 ~ zone 3とHDR-3のzone 2 ~ zone 4については、循環試験の初期の温度変化にマッチングするような熱交換面積の値を用いて100日間の温度変化を求めたところ、後期においては計算値が実測値よりかなり小さな値となった。したがって、全期間にわたって両者がマッチングするようにするためには、循環試験の途中で熱交換面積を増やして計算する必要がある。しかし、今回のシミュレーションにおいては、このようなケースに対してはそれぞれ循環初期および後期にマッチングするような熱交換面積を用いて計算した。HDR-2のzone 1 ~ zone 3およびHDR-3のzone 2 ~ zone 4に関する熱交換面積の変化とそれに伴う温度変化の結果をFig. 9 (a) ~ (f)に示す。Table 4には熱交換面積の変化を示す。Fig. 9 (a)に示すようにHDR-2のzone 1の場合、循環初期にマッチングする熱交換面積の温度と後期にマッチングする熱交換面積の温度の差は、100日目では10℃程度である。(a) ~ (f)より、HDR-3のzone 2の場合が最大で90℃程度になる(Fig. 9 (d))。これは、HDR-2のzone 1 ~ zone 3およびHDR-3のzone 2 ~ zone 4の熱交換面積

Fig. 10 The distribution of temperature of feed zone 3 of HDR-3 which was established the heat extraction area to get the best match of the Exp.9102.

(a) 25 days passed (b) 50 days passed
(c) 75 days passed (d) 100 days passed

Fig. 11 (a) Calculated production temperature at feed zones of HDR-1 which was established the heat extraction area to get the best match of the Exp.9102 by Gringarten's model.

Fig. 11 (b) Calculated production temperature at feed zones of HDR-2 which was established the heat extraction area to get the best match of the Exp.9102 by Gringarten's model.

Fig. 11 (c) Calculated production temperature at feed zones of HDR-3 which was established the heat extraction area to get the best match of the Exp.9102 by Gringarten's model.

Table 5 Values of the heat extraction area at feed zones of production wells by Gringarten's model.

	(unit; m ²)		
	HDR-1	HDR-2	HDR-3
zone 1	—	1,760	—
zone 2	—	2,100	2,880
zone 3	6,900	2,750	7,000
zone 4	3,400	3,000	2,450
zone 5	880	800	2,500
zone 6	1,050	—	—

の増加が各zoneによって異なるためと考えられる。実際、Table 4に示した熱交換面積の変化から、温度差の最も大きかった HDR-3 の zone 2 で、循環後期の熱交換面積は循環初期の 5 倍であり、他の zone で 1.2~1.8 倍程度になっている。

また、HDR-1 のすべての zone、HDR-2 の zone 4、zone 5 および HDR-3 の zone 5 はフローパスがほぼ安定しており、循環試験中、熱交換面積の変化がなかったものと考えられる。

HDR-3 の zone 3 の熱交換面積の温度分布を一例として Fig.10 に示す。これは、Fig. 5 の亀裂面モデルを真上から見た図であり、矢印の上方が生産井、下方が注入井の位置に対応している。(a) は 25 日、(b) は 50 日、(c) は 75 日、(d) は 100 日の温度分布であり、温度範囲は 55~235℃である。(d) より、100 日間でほぼ全域にわたり温度低下が認められる。また、温度変化の傾向として、注入井から生産井にかけては (a) の 25 日の温度分布から (d) の 100 日まで大きな変化が見られないが、生産井からモデル境界にかけて、徐々に冷えてきていることが分かる。

また、Gringarten らのモデルを用いて求めた亀裂面の熱交換面積の結果を Fig.11 (a) ~ (c) に示す。そのときの熱交換面積を Table 5 に示す。Table 3 と Table 5 より、求めた結果は FEHM により求めた熱交換面積と良く一致していることが分かる。これより、SKG-2 から HDR-2 および HDR-3 へのように比較的平面的なフローパスに対しては、簡易的な Gringarten による 1 次元モデルを用いても十分に熱交換面積を推定できることがわかった。

5. 結 論

1991 年に行われた 1 本の注入井と 3 本の生産井による循環試験時に実施した PTS 検層結果を用いて、各生産井に認められる複数の亀裂面の抽熱特性を評価するために、亀裂面の熱交換面を仮定して熱交換面積を求めることにした。具体的には、SKG-2 を注入井、各 zone を生産井とする 2 坑井の亀裂面モデルを作成し、PTS 検層結果より得られた生産流量を注入流量として計算を行い、生産水温度が実測値に合うようにモデルの面積を変化させることで、個々の亀裂面の熱交換面積を求めた。その結果、次のようなことが明らかになった。

1) HDR-1 の各 zone、HDR-2 の zone 4、zone 5 および HDR-3 の zone 5 はフローパスがほぼ安定しており、循環試験の間、熱交換面積に変化がなかったものと考えられる。

2) 一方、HDR-2 の zone 1 ~ zone 3 と HDR-3 の zone 2 ~ zone 4 は、循環試験の間何らかの原因で熱交換面積が増加してい

る。

3) 主たるフローパスとなっている HDR-2 の zone 3 と zone 4 および HDR-3 の zone 2 は、それぞれ生産井との距離と熱交換面積がほぼ等しいことから、これらのフローパスについては坑井間距離にほぼ比例して熱交換面積が増加するものと考えられる。

4) HDR-1 の zone 3 と zone 4 の熱交換面積は、坑井間距離がほぼ同じであるにもかかわらず HDR-2 および HDR-3 の熱交換面積に比べて大きいことから、SKG-2 から HDR-1 へのフローパスは平面的でなくむしろ、3 次元的なものと考えられる。

5) フローパスが平面的であると考えられる場合、Gringarten のモデルによって十分な精度で熱交換面積の評価が可能である。

謝辞 ここで紹介した肘折高温岩体地熱エネルギー開発は工業技術院サンシャイン計画のもとで実施している。今回の発表に当たり、サンシャイン計画推進本部の関係者の協力を得た。ここに記して、深謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) 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：日本地熱学会誌，Vol. 13, p. 73-93, (1991)
- 2) 宮入 誠・反町美与志・大崎 豊：物理探査学会第 86 回講演会論文集，p. 173-177, (1992)
- 3) 松永 烈・厨川道雄・天満則夫・宮入 誠：第 2 回地底下裂のキャラクターゼーションワークショップ，論文集，p. 146-151, (1992)
- 4) 公害資源研究所：高温岩体破砕熱抽出技術に関する研究 昭和 63 年度サンシャイン計画研究成果報告書，p. 31-36, (1989)
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高温岩体発電システム技術開発 - 平成 3 年度研究成果の概要 -，p. 21-28, (1991)
- 6) Murphy, H. : SPE 6783, 52nd Annual Fall Technical Conference and Exhibition of SPE of AIME, (1977)
- 7) Jung, R. : Geol. Jb., Reihe E, Heft 39, p. 37-65, (1987)
- 8) Zyzolowski, G. A. : Int. J. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics ; 17, p. 75-86, (1983)
- 9) 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：資源と素材，Vol. 106, p. 843-849, (1990)
- 10) 天満則夫・山口 勉・及川寧己・厨川道雄・小林秀男・松永 烈・ジョージ・ジボロスキー：資源，Vol. 13, No. 6, p. 251-261, (1991)
- 11) 光永祥子：肘折高温岩体開発熱抽出シミュレーション，東海大学卒業論文，(1989)
- 12) 例えば、公害資源研究所：高温岩体破砕熱抽出技術に関する研究 昭和 60 年度サンシャイン計画研究成果報告書，p. 48-60, (1986)
- 13) Gringarten, A. C. Witherspoon, P. A. Ohnishi Yuzo (1975) : J. Geophys. Res., Vol. 80, p. 1120-1124
- 14) 天満則夫・松永 烈・厨川道雄・山口 勉・宮入 誠：資源と環境，Vol. 2, No. 6, p. 11-19, (1993)