

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/312452249>

Reservoir Engineering Studies at the Matsukawa Geothermal Field

Article · July 1994

DOI: 10.11367/grsj1979.16.255

CITATIONS

6

READS

278

1 author:



Mineyuki Hanano

Japan Metals and Chemicals Co., Ltd.

32 PUBLICATIONS 318 CITATIONS

SEE PROFILE

松川地熱地域における貯留層工学的調査

花野峰行 *

(平成5年6月21日受付, 平成6年3月11日受理)

Reservoir Engineering Studies at the Matsukawa Geothermal Field

Mineyuki HANANO

Abstract

Matsukawa was the first geothermal power plant established in Japan. It started power production in October 1966, and is the only vapor-dominated geothermal field developed to date. The power plant has been continuously producing full power, 22MWe, for almost 27 years. Matsukawa is located about 600km northeast of Tokyo and about 27km northwest of Morioka, Japan. It is in the Hachimantai volcanic region, one of the most active volcanic regions in Japan. This paper reviews reservoir engineering studies at Matsukawa. This includes a study of the current state of the reservoir studied mainly by pressure buildup tests, a study of the initial state of the reservoir studied mainly by reconstruction of a reservoir pressure profile, and a numerical modeling study of the natural state of the reservoir.

Continued pressure buildup tests since 1986 have revealed that there is a lateral steam flow from southwest to northeast in the Matsukawa vapor-dominated reservoir, and most of the steam is supplied from southwest of the development area. This result suggests that the vapor-dominated reservoir extends further southwest than the area now being exploited. These conclusions are supported by production records and chemical data of produced steam.

The study on the natural state of the Matsukawa geothermal reservoir has revealed that there was a thin vapor-dominated zone at the shallow part of the reservoir (around 300m to 400m depth) and the current production zone (800m to 1300m depth) was filled with liquid before exploitation. Early production wells produced wet steam with some hot water at first, but they turned to produce only dry steam after a production period of 6 months to 1 year, because of the existence of low permeability aureole around the reservoir and high heat flow. Estimated conductive heat flux, 1.5W/m^2 is as high as that of The Geysers.

The natural state modeling study showed that the model of the initial state of the reservoir, described above, was feasible. The results also indicated that the low permeability aureole was very important for the evolution of its natural state and also for production of superheated steam from the liquid zone below the thin vapor-dominated zone in the shallow part of the reservoir. Initial temperature distribution and the results of the simulation study suggest that there is an extensive heat source in the southwestern part of the reservoir.

* 地熱エンジニアリング㈱ 〒020-01 岩手県岩手郡滝沢村鶴飼字笹森72-2

(JMC Geothermal Engineering Co., Ltd. ; 72-2 Sasamori, Ukai, Takizawa-mura,
Iwate 020-01, Japan)

1. はじめに

松川地熱地域は、岩手県盛岡市の北西約27kmに位置する蒸気卓越型地熱地域である。周辺には岩手山や秋田駒ヶ岳などの第四紀の火山が密集しており、同じく第四紀の火山である三ツ石山を隔てた約7 km南西には熱水型の地熱地域である葛根田地熱地域がある。

松川地熱発電所は1966年10月に運転を開始した日本で最初の地熱発電所である。当地域における発電は、当初出力9.5MWeで開始され、1967年4月に12.5MWe、1968年3月に20MWe、1973年4月に22MWe、1993年6月に23.5MWeとなり現在に至っている。現在、10本の生産井と2本の還元井が使用されており、23.5MWeの発電が安定に継続されている。当地域における開発の経緯や発電の経緯については、例えば、森(1967)、大西ほか(1981)、七沢(1987)、花野ほか(1989)、森・片桐(1991)、Hanano et al.(1993)などに述べられている。

松川においては、以前から種々の研究がなされている(例えば、中村・角, 1961; 中村, 1967; 早川, 1967; Sumi, 1968; Baba et al., 1970; Yoshida, 1984; 赤澤・村松, 1988)。本報では、花野ほか(1989)、Hanano and Sakagawa(1990)、Hanano and Matsuo(1990)、Hanano et al.(1991a, 1991b)、Hanano(1992a, 1992b)、Hanano et al.(1993)などにに基づき、従来実施してきた圧力ビルドアップテストによる貯留層の現在状態の調査や、開発初期に取得された各種データからの開発前の初期状態の解析ならびに貯留層の自然状態モデリングの結果に基づき松川地熱貯留層に関して総合的に述べる。なお、本報では圧力は全て絶対圧力で示す。

2. 地質概要

松川とそれに隣接する葛根田を含む地域の地質図と地質断面図をFig. 1に示す。この図にあるように、松川地域の地質は、上位から順に、松川安山岩、玉川溶結凝灰岩類、滝ノ上温泉層、国見峠層からなるが、松川の貯留層深度に存在する玉川溶結凝灰岩類と滝ノ上温泉層は、松川から直線距離で約7 km離れた葛根田地域において地表に露出する。

赤澤・村松(1988)によれば、松川安山岩は、新鮮で堅硬緻密であり、松川地域全体を広く覆うことから、松川における地域的なキャップロックとなっている。玉川溶結凝灰岩類は、岩相から、上部、中部、下部に区分されるが、この中でも、下部は蒸気を生産する生産ゾーンの一部となっており、上部は当貯留層のキャップロックの一部になっている。

当地域には、Fig. 2に示すように、縦型の断層が発達しており、蒸気は、これらの断層と貫入岩に沿うフラクチャから生産されている。蒸気が生産されているのは主に玉川溶結凝灰岩類と滝ノ上温泉層、国見峠層からであり、深度的には約800~1,300 m(海拔約0~-500 m)からである。貫入岩としては、地域西部に、東北東~西南西から北東~南西の方向性を示すひん岩が広範に分布している(Fig. 2)。このひん岩は、後に述べるように、貯留層の側方の遮蔽の一つと

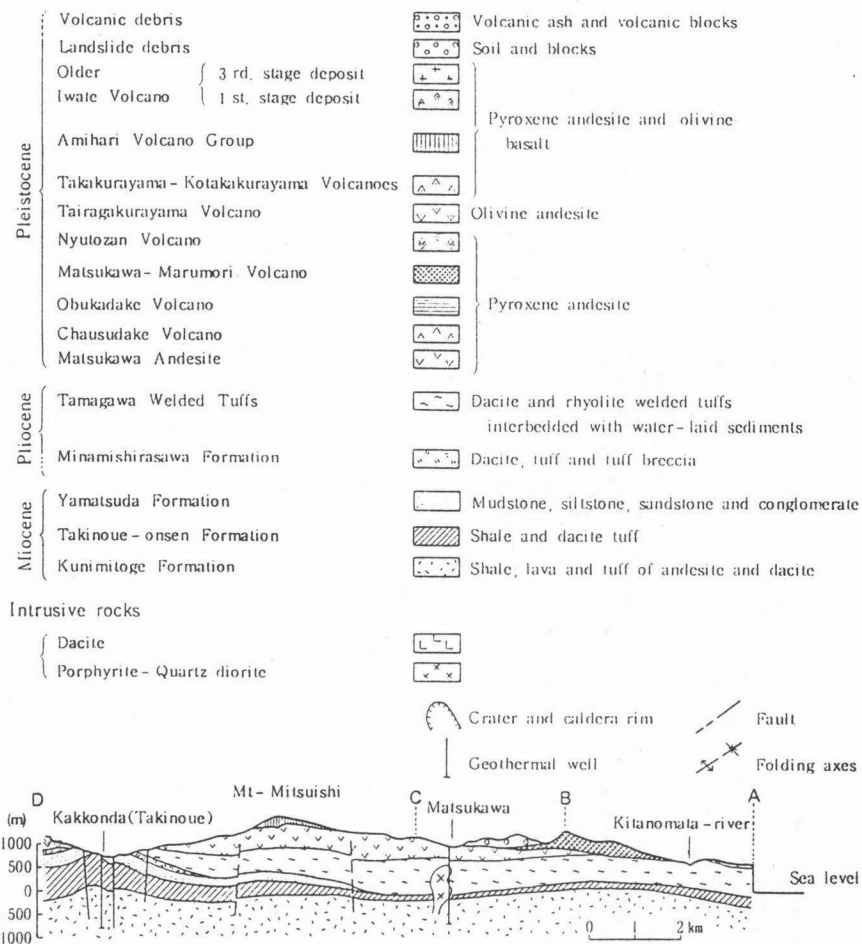
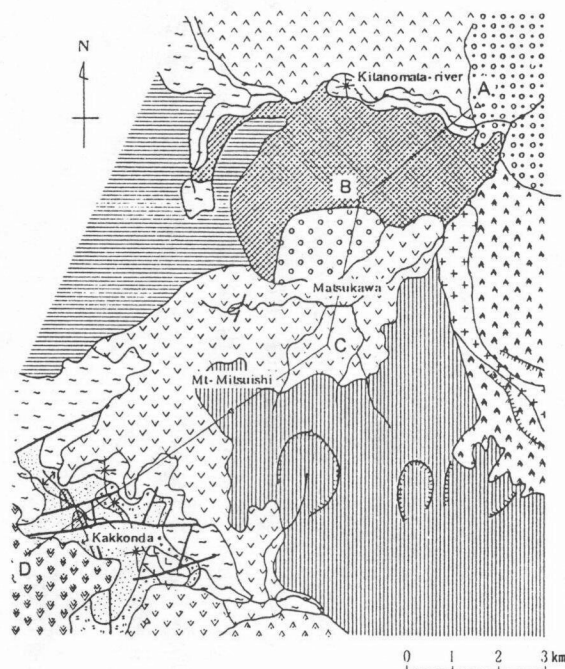


Fig. 1 Geological map of Matsukawa and Kakkonda, compiled by O. Kato (from unpublished data of Japan Metals and Chemicals Co., Ltd., 1989).

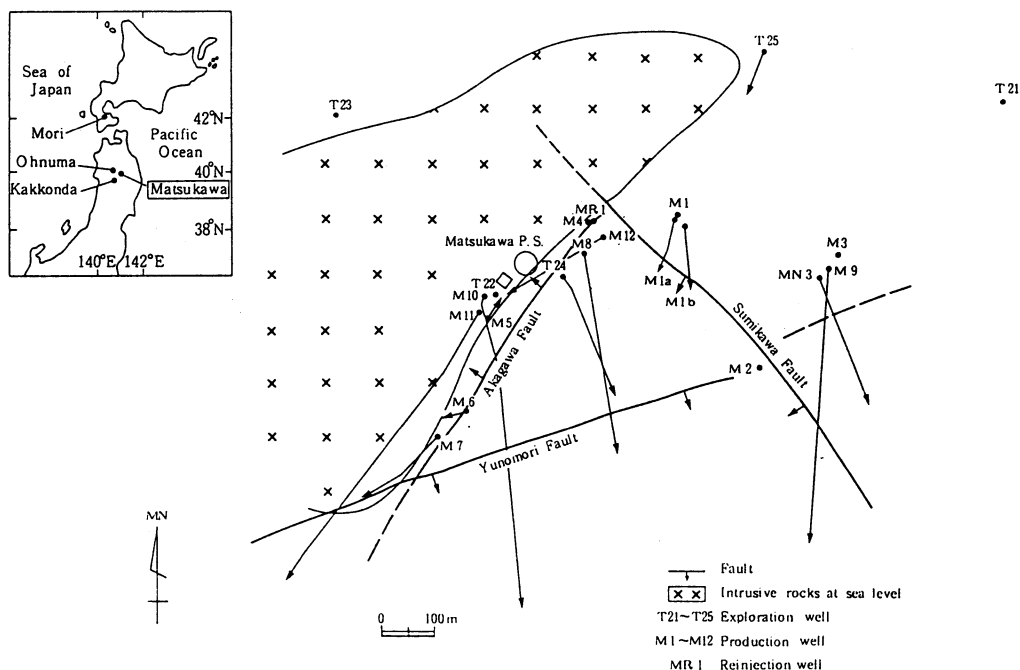


Fig. 2 Fracture map at sea level of Matsukawa (after Akazawa and Muramatsu, 1988).

して働いている。

当地域の変質帯は、角（1970）、高塚・高島（1991）などによれば、中心部に高温で生成される酸性変質帯があり、周辺に向かって、より低温で生成される変質帯に移行し、さらにその外側では、より低温で、かつアルカリ性環境下で生成される緑色変質に変化する分布を持つことで特徴づけられている。この分布は、熱水変質を引き起こした地熱流体の流動に関係があるものと考えられている。開発地域の南西側の赤川上流には大規模なパイロフィライトの分布がある。このパイロフィライトは200℃を越える高温の環境下で生成される変質鉱物であることから、この場所は、当地域においてかつて地表噴気活動が存在した頃には、最も地表噴気活動が活発な場所であったと考えられ、この周辺の地下には強力な熱源が存在するものと考えられる（角，1970）。しかし、変質鉱物の分布等からみて、当地域における地熱活動は消長を繰り返しており、現在は、地熱活動が最も活発だった時期にくらべると、比較的落ちついた状態にあるものと考えられている（角，1972）。

3. 貯留層の現在状態

蒸気卓越型に限らずいずれの地熱資源においても、蒸気などの地熱流体は、貯留層圧力と坑井

の流入点圧力の差に比例した量が坑井内に流入し、坑口から生産される。しかしながら、タービンには所定の圧力の蒸気を供給しなければならないため、生産井の坑口圧力を大きく変化させることはできず、坑口圧力は常にはほぼ一定の値で操業される。坑口で蒸気のみを噴出する蒸気卓越型坑井の流入点の圧力は、蒸気の流量と坑口圧力によって決まる。従って、ほぼ一定の坑口圧力で操業した場合の蒸気卓越型坑井の蒸気生産量の経時変化は貯留層圧力の経時変化によって決まると言える。このため、蒸気卓越型地熱貯留層の現在状態の調査としては、貯留層圧力分布の経時変化の調査が最も重要である。ここでは、この貯留層圧力分布の経時変化を調査する目的で圧力ビルドアップテストを実施した（花野ほか, 1989; Hanano and Sakagawa, 1990; Hanano et al., 1991a）。

松川における圧力ビルドアップテストは1986年10月より継続して実施している。松川のほとんどの生産井は、現在は、ほぼ乾き蒸気のみ生産している（例えば, Hanano et al., 1993）。従って、坑井内は蒸気単相であるため、Hanano et al. (1991a) に述べられているように、坑口での圧力ビルドアップ挙動を観測することにより、比較的容易に、必要な精度で、流入点における圧力ビルドアップ挙動を推定することができる。

これらの一例として、生産井M7の圧力ビルドアップ挙動のMDH (Miller-Dyes-Hutchinson) プロットをFig.3に、同じく生産井M9の圧力ビルドアップ挙動のlog-logプロットをFig.4に示す。ここでは、蒸気の生産を継続していた期間が、少なくとも半年から数年と長く、また、その期間における生産量もほぼ一定であるので、MDHプロットによる解析を行った。なお、熱水型の坑井では、流入点の圧力をそのままプロットするが、蒸気卓越型の坑井においては天然ガス

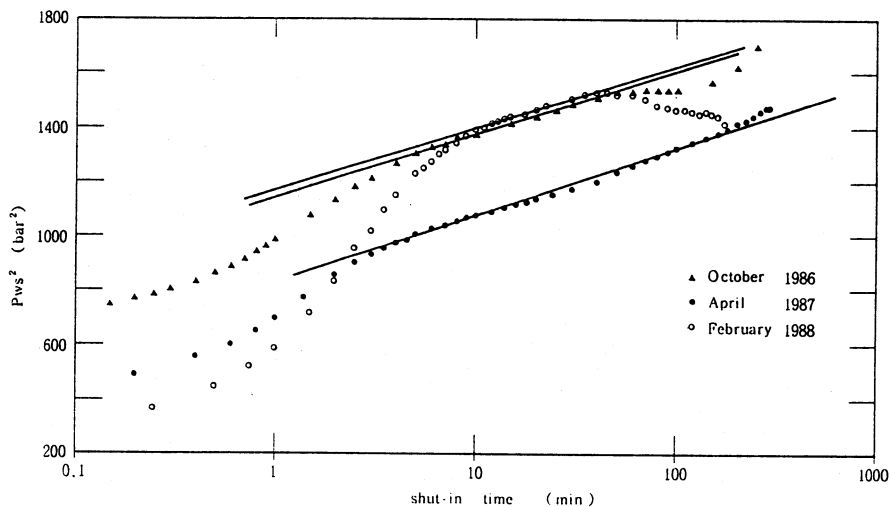


Fig. 3 MDH (Miller-Dyes-Hutchinson) plots of feed-point shut-in pressures of M7 (after Hanano et al., 1991a).

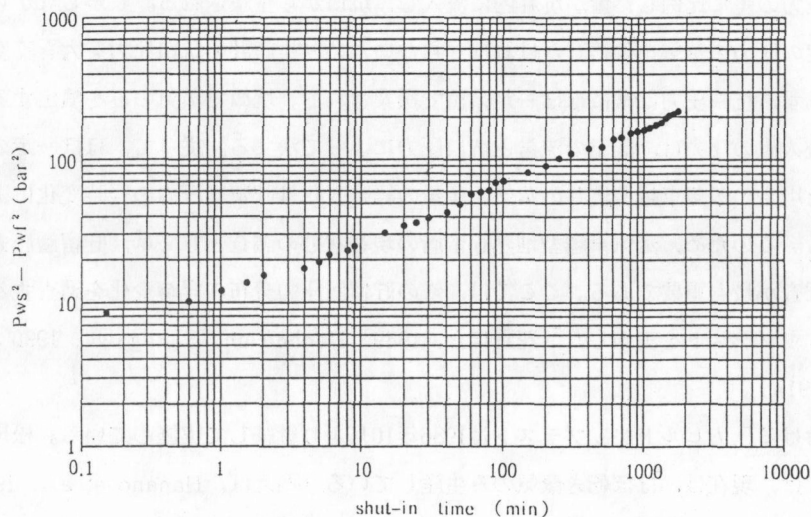


Fig. 4 Log-log plot of M9 (after Hanano and Sakagawa, 1990).

Pws : shut-in feed-point pressure, Pwf : flowing feed-point pressure.

井同様、流入点圧力の平方値をプロットする（例えば、Matthews and Russell, 1967, p.24）。

松川で得られた圧力ビルドアップ挙動にはいくつかの特徴的な挙動がある。例えば、生産井M7の圧力ビルドアップ挙動は、MDHプロット上で明瞭な直線を示し、M7井周辺での蒸気の流動が水平放射状流でよく近似できることを示している（Fig. 3）。松川の坑井の蒸気生産は、エア掘りなどの結果から明らかなように、主要なフラクチャに遭遇した場合にのみ蒸気が噴出する（例えば、片桐, 1976；赤澤・村松, 1988；斉藤, 1990）。従って、Fig. 3に示したM7井の圧力ビルドアップ挙動は、M7井の周辺では、坑井を切る複数のフラクチャが縦横に発達しそれらが複雑につながっていることを示唆している。

一方、生産井M9では、log-logプロット上で傾きが1/2の直線的な圧力ビルドアップを続ける（Fig. 4）。これは、M9井周辺での蒸気の流動は水平放射状ではなく、フラクチャに強く規制された直線状の流動が卓越していることを示している（例えば、Raghavan et al., 1972）。このことは、M9井の周辺では、坑井を切るフラクチャは一方向にしか発達しておらず、他のフラクチャとの複雑なつながりも少ないことを示唆している。

また、Fig. 3に示したM7井の1986年と1988年の圧力ビルドアップは、1530 bar²のあたりから直線を離れ、圧力上昇が一旦停止するか、あるいは圧力が下降する。この現象は、蒸気型坑井の圧力ビルドアップに特有の現象である、坑井内または坑井近傍のフラクチャ内での蒸気の凝縮現象である（例えば、Strobel, 1976）。

この現象は、Hanano et al. (1991a) に述べられているように、以下のように説明できる。

すなわち、蒸気卓越型坑井では、坑井に流入する蒸気はほとんどの場合過熱蒸気であるが、蒸気の生産を止め圧力をビルドアップさせると、坑井内または坑井近傍のフラクチャ内のどこかで、蒸気の圧力はその温度に対応する飽和圧力を越える場合があり、蒸気の凝縮現象が起きる。ところが、この凝縮が起きている間は圧力はほとんど上昇しない。これは、この現象が起きている間は飽和状態であり、蒸気の温度はほとんど変化しないので、結果として、圧力は温度によって規制されるためほとんど上昇しないわけである。しかし、周囲の地層から熱伝導等により熱が供給され、凝縮で発生した液相がすべて蒸発してしまうと、再び圧力は上昇する場合がある。この現象は、Moench and Atkinson (1978) によるシミュレーション解析により確認されている。なお、1987年の圧力ビルドアップは上昇が遅かったため、調査を打ち切った時点では、まだ凝縮が起きる圧力までは上昇していない。

Fig. 5 は、圧力ビルドアップテストによって得た1988年10月の時点での松川地域の貯留層圧力分布である。この圧力分布から、松川地熱貯留層とその現在状態について以下のように言える(花野ほか, 1989; Hanano and Sakagawa, 1990)。

当地域の貯留層圧力(密閉圧力)は地域の南西側において高く、地域の北側および東側で低い。このため、南西から北東に向かう急激な圧力勾配が存在する。この圧力勾配は、当地域の生産ゾーン内において南西から北東に向かって蒸気が流動していることをあらわしている。このため、当地域において現在生産されている蒸気のほとんどは、地域の南西方向より供給されていると考えられる。

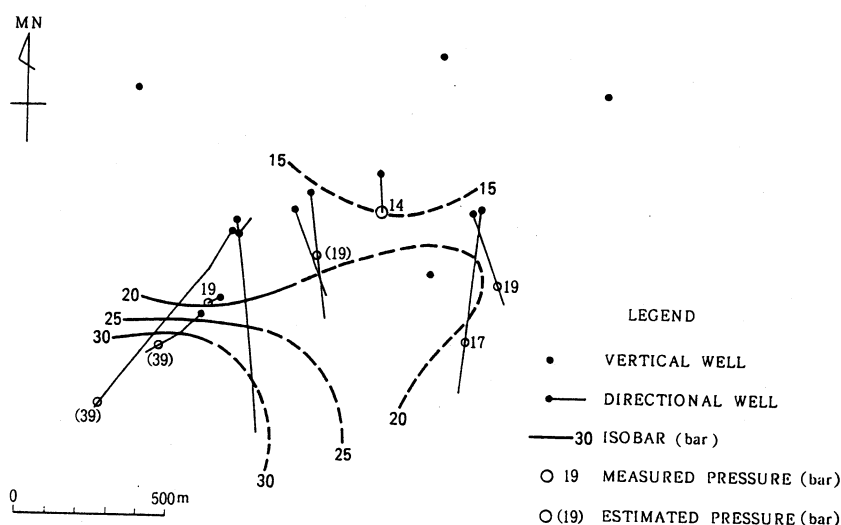


Fig. 5 Shut-in pressure distribution at feed-points in October, 1988 (after Hanano et al., 1989).

Fig. 5 に示した貯留層圧力は、生産ゾーンの深度（約800mから1,300m）に対応する静水柱圧力（約70barから120bar）にくらべ、はるかに低い値である。坑井地質調査などにより、当地域の西側、北側は貫入岩体により明瞭に遮蔽されていることが明らかになっているが（Fig. 2）、このような静水柱圧力よりも低い貯留層圧力が安定に存在している事実と、調査井T21が自然対流のない熱伝導型の温度分布を持つと同時に噴気に成功しなかった事実から、当地域の東側も水理構造的にみて遮蔽されていることは明らかである。従って、上に述べた貯留層圧力分布の特徴は、蒸気の生産により、開発地域の北東側の貯留層圧力が大きく低下したことにより形成されたものであると言える。

この水理的な遮蔽の存在は、Fig. 6 に示す観測井の水位変化からもうかがわれる。すなわち、これらの観測井は当貯留層内に発達する熱水対流の頂部にあたると考えられる深度約300mにおける貯留層圧力の変化に対応した水位を観測していると考えられるが、生産井の密集する地域にあるT22井の水位は緩やかに低下しているのに対して、生産ゾーンからは貫入岩体を隔てた位置にあるT23井の水位は全く変化していない。

当地域における蒸気の生産量は、地域の南西側に位置する坑井で多く、北側および東側の坑井で少ない（例えば、Hanano et al., 1993）。当地域の南西側に位置し、現在のところ最も蒸気生産量の多い坑井であるM7井、地域のほぼ中央に位置する坑井であるM8井ならびに地域の東側に位置する坑井であるM9井の蒸気生産量の経時変化をFig. 7 に示す。この図から、これら3坑井の中では最も南西側に位置するM7井はM8井やM9井に比べ蒸気生産量は多く、その減衰

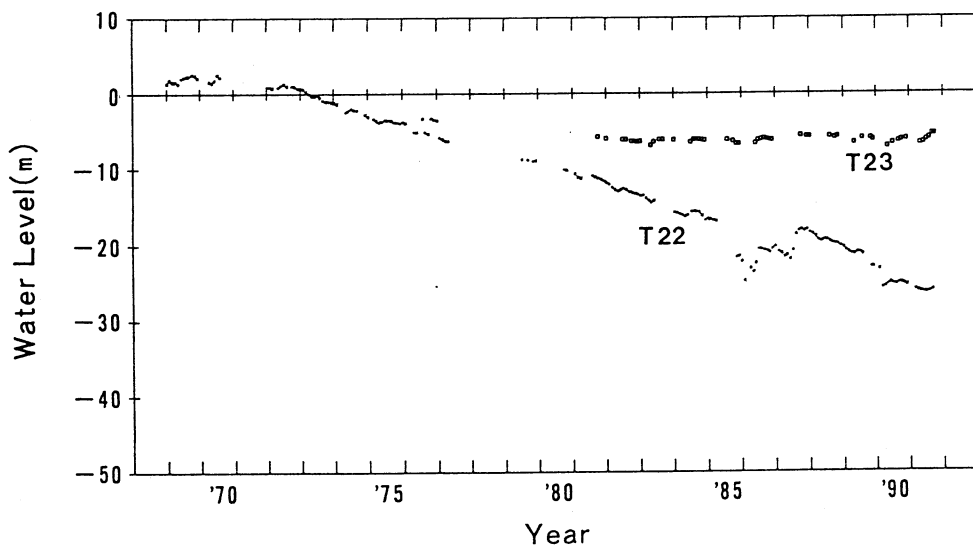


Fig. 6 Change of water level at wells T22 and T23 (after Hanano et al., 1993).

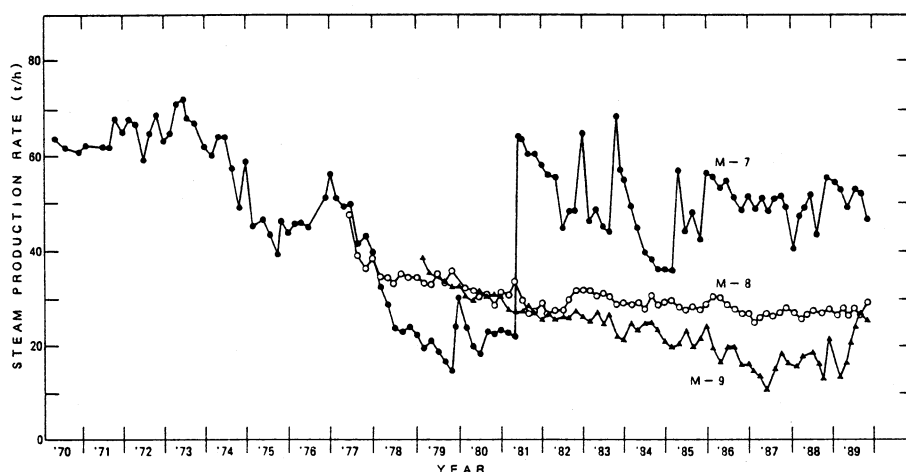


Fig. 7 Record of steam production rates of wells M7, M8 and M9 (after Hanano et al., 1993).

も少ないが、M 8 井、M 9 井と東側の坑井になるほど蒸気生産量は少なくまたその減衰も多いことがわかる。なお、M 7 井の蒸気生産量は1977年頃から一時的に減衰したが、これは、坑井内の部分的な崩壊によるものであり、1981年に改修工事を行い生産量を回復させた。また、M 9 井の蒸気生産量は、1988年3月から継続している還元（例えば、Hanano et al., 1991b ; 1993）により、最近はその低下が緩和されている。

このような蒸気生産量とその経時変化の平面的な分布から考えて、ここで得られた貯留層圧力分布は、生産井の集中する地域を中心とした同心円状の貯留層圧力低下を示すラルデレロ（例えば、Celati et al., 1977）やザ・ガイザース（例えば、Barker et al., 1992）とは異なり、開発地域の外側からの蒸気の供給に強く影響されていると言える。すなわち、蒸気の供給の多い南西側において圧力は高くまた生産量も多くかつその減衰も少ない。一方、蒸気の供給の少ないと考えられる、特に地域の北東側では、圧力は低くまた生産量も少なくかつその減衰も多い。従って、ここで述べた、南西から北東へ向かう貯留層圧力勾配の存在や、北側、東側および西側の遮蔽の存在、あるいは、蒸気生産量経時変化のパターンから、当地域の貯留層は現在開発している地域の南西方向に広がっている可能性があると言える。なお、圧力ビルドアップテストで明らかになった当地域の貯留層圧力は、調査を開始した1986年から現在にいたるまで全く変化しておらず、蒸気生産にともなう貯留層の変化は非常に安定した状態にあると言える。

松川においては、蒸気化学性状についても種々の報告がある（例えば、宮守, 1968 ; Yoshida, 1984, 1992）。ここでは、上に述べた貯留層工学的特徴と蒸気化学性状の特徴との関係について Yoshida and Ishizaki (1988) と石崎・金藤 (1992) に基づき述べる。

松川で生産される蒸気中のガス濃度は大局的にみて南西側で低く北東側で高い, Fig. 5 の貯留層圧力分布とはほぼ同様な分布である (Fig. 8)。これは, D'Amore and Truesdell (1979) のラテラルフローモデルに基づけば, 貯留層内で蒸気は南西から北東に向かって流動していることを示唆しており, 上の議論と調和的である。なお, D'Amore and Truesdell (1979) のラテラルフローモデルは, 本来, 開発前の自然状態における貯留層内の流動について述べたものであり, 生産開始後の貯留層内の流動に関して述べたものではない。しかし, このモデルは, Hanano and Sakagawa (1990) が述べたように, 貯留層内を流動している蒸気が飽和蒸気である限りにおいては, 生産開始後に貯留層内に発生した流動にも適用できる。現在の松川貯留層内においては, M7井, M8井周辺の貯留層内を流動する蒸気は飽和蒸気であることから, このモデルを適用することができる。

松川で生産されている蒸気は, 火山ガス, 古い地表水起隙の蒸気, 比較的新しい地表水起源の蒸気の3種類の混合で形成されている。これらの混合は, Fig. 5 に示した貯留層圧力のバランスに規制されている。すなわち, 蒸気的主要な供給源に近い南西側の坑井では古い地表水起源の蒸気が多くまた圧力も高い。このため, 火山ガスや比較的新しい地表水起源の蒸気は少ない。ところが, 蒸気的主要な供給源から離れているM1b井, MN3井, M9井では, 古い地表水起源の供

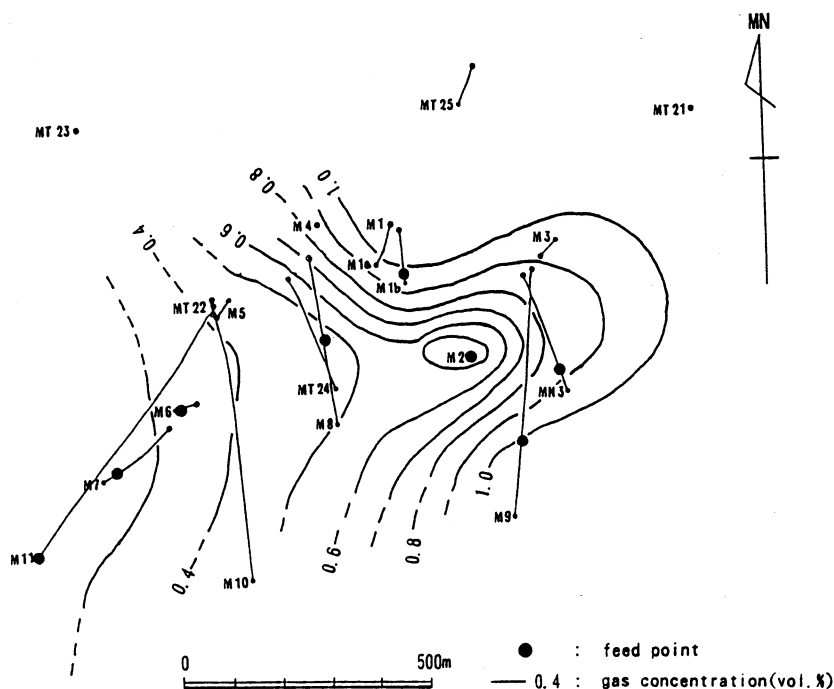


Fig. 8 Distribution of total gas concentration in steam in 1987 (after Ishizaki and Kondo, 1992).

給は少なくこのため貯留層圧力も低い。そのため、火山ガスの影響が大きくなり、また、比較的新しい地表水起源の蒸気が引き込まれている。このように、松川における蒸気の化学性状は、貯留層の物理的挙動と密接な関係がある。

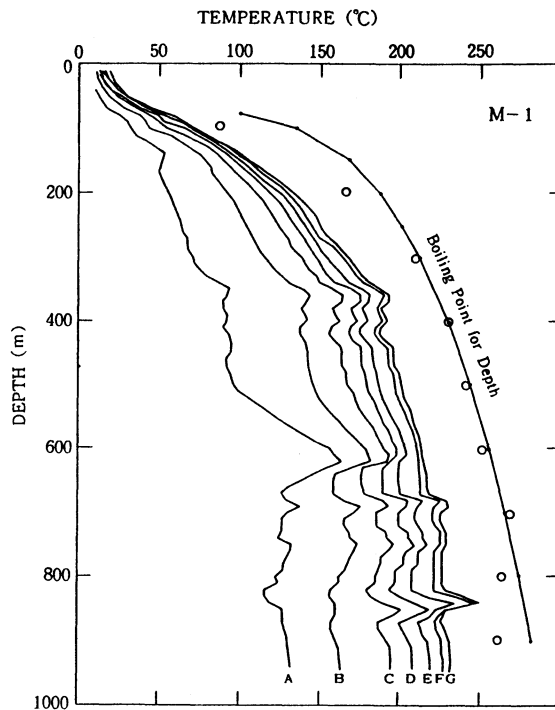
4. 貯留層の初期状態

現在、蒸気卓越型地熱貯留層の初期状態のモデルとして広く受け入れられているのは White et al. (1971) のモデルである。すなわち、キャップロック直下の貯留層内の圧力勾配は蒸気柱圧力の勾配に近く、そこでは蒸気は貯留層内を上昇するが、蒸気がキャップロック直下で凝縮してできた凝縮水は貯留層内を下降し、貯留層内の一部がマクロ的にはポーラスなヒートパイプとなって熱を上方に輸送している。このモデルが提案された後は、松川においてもこの状態が初期状態として考えられた（例えば、平子，1982）。しかし、この初期状態は、必ずしも定量的に検討されたものではなかったため、ここでは、開発初期に掘削された生産井の温度検層結果を用いて開発前の貯留層圧力勾配を復元し、それに基づき、松川地熱貯留層の開発前の姿について検討した（Hanano and Matsuo, 1990）。

この検討においては、まず、開発初期に掘削された生産井 M1, M2, M3 などの掘削終了直後の温度検層結果からホーナー法によって推定地層温度を求め、開発前の初期貯留層温度分布を求めた。この例を Fig.9 に示す。

次に、その温度検層結果と、その時の坑内水位の記録から各生産井の流入点圧力を求め、開発前の生産ゾーンの貯留層圧力勾配を復元した（Fig.10）。流入点圧力の推定は、坑井内に自然流動が存在しない場合には坑井内の圧力勾配はその深度の温度と圧力によって決まる流体の密度のみによって決まることを利用して坑井内の圧力分布を復元し、その結果から圧力ピボットを復元できた場合はそれを用い、データが少ないため有意な圧力ピボットを復元できなかった場合は、逸泥記録などから推定されている流入点の深度に対応する圧力を用いた。その結果、ここで得られた貯留層圧力勾配は典型的な熱水型の地域である葛根田の貯留層圧力勾配とほぼ平行であり、松川貯留層の現在の生産ゾーンは、開発前は熱水で満たされていたと考えられた。

この推定の適否を検討するため、上記の推定地層温度に対応する純水の飽和圧力に、噴気開始当初生産蒸気中に含まれていた非凝縮性ガスの分圧を加算して、開発前における貯留層内の沸騰開始深度を復元した。なお、非凝縮性ガスの分圧については、その80%以上が炭酸ガスであったことから（例えば、中村，1967）、全てのガスは炭酸ガスであったと仮定し、Malinin (1963) による実験式によりおよそ 11bar と推定した。この例を Fig.11 に示す。この結果、開発前の松川貯留層内では、深度約 500～800m 以浅は飽和状態であったが、それ以浅は熱水単相であったことを確認した。



RUN	DATE	STANDING TIME (hrs)	WATER LEVEL(m)
A	Jan. 5, 1964	8	147
B	Jan. 6, 1964	26.5	110
C	Jan. 7, 1964	39.2	95
D	Jan. 8, 1964	73.2	91
E	Jan. 9, 1964	107	85
F	Jan. 11, 1964	147	77
G	Jan. 12, 1964	167	75

Fig. 9 Temperature and water level build-up of M1 after the completion of drilling, and the estimated recovered reservoir temperatures (open circles) (after Hanano and Matsuo, 1990). The temperature build-up data are taken from Takaki and Tanaka (1968). Boiling Point for Depth corresponds to Run G.

以上の結果に基づき作成した、松川地熱貯留層の開発前の初期状態の概念モデルをFig.12に示す。すなわち、貯留層浅部のキャップロック直下に、貯留層圧力勾配が蒸気柱の圧力勾配に近い、薄い蒸気卓越ゾーンが存在したが、現在の生産ゾーンは熱水単相であり、マクロ的にみて White et al. (1971) のモデルが成り立っている。この蒸気卓越ゾーンの深度は、Fig.10に示した生産ゾーンの貯留層圧力がその深度に対応する静水柱圧力に比べ約10barほど低いこととキャップロック下面の深度が約300mと考えられることから考えて、深度約300mから400mであったものと考えられる。このような状態から生産を開始した直後は、Pruess (1985) のシミュレーション

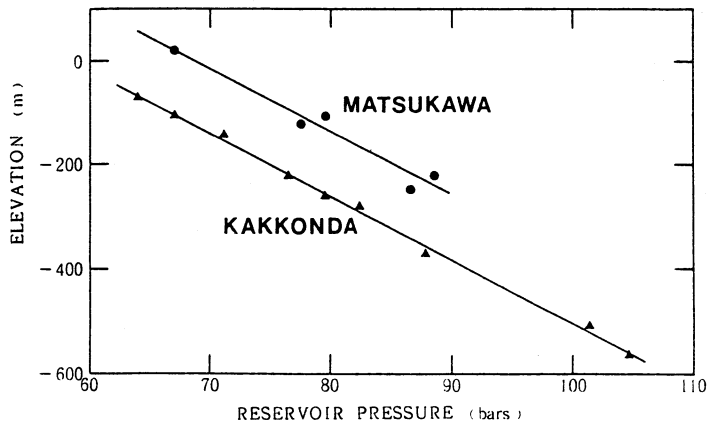


Fig.10 Feed point pressures at Matsukawa and Kakkonda vs. elevations of the feed points. Lines were obtained by the least squares (after Hanano and Matsuo, 1990).

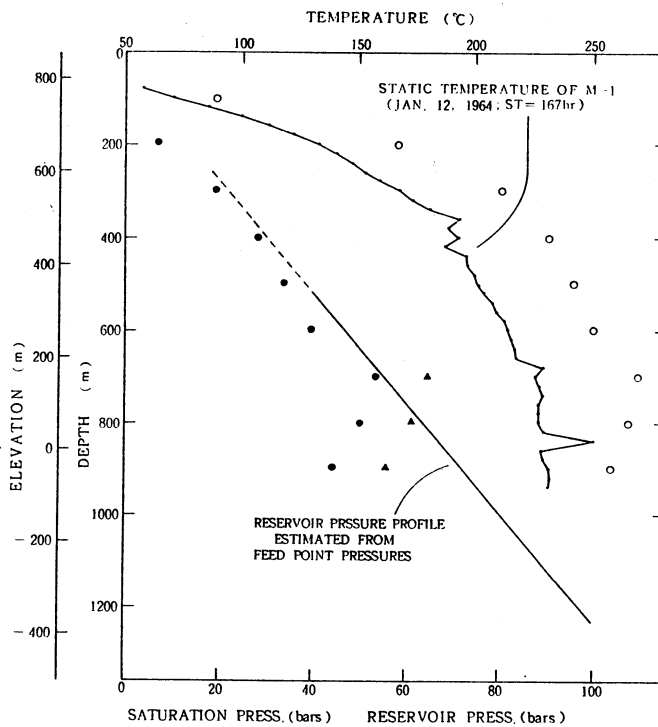


Fig.11 Estimated recovered reservoir temperature of M1 (open circles), saturation pressure corresponding to the temperature (solid circles), total boiling pressure estimated by adding partial pressure of CO_2 (solid triangles), and the reservoir pressure profile estimated from the water level analysis (after Hanano and Matsuo, 1990).

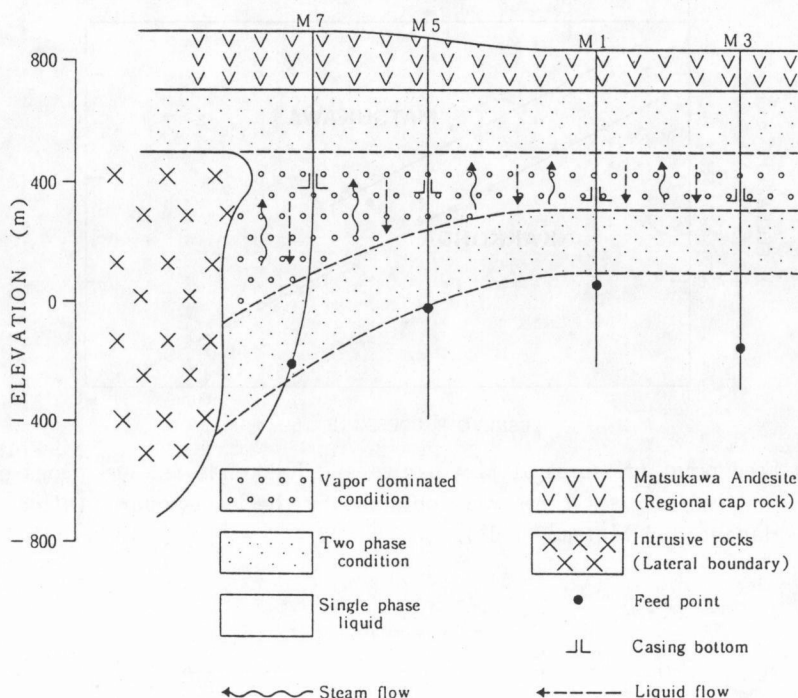


Fig.12 Conceptual model of the initial state of the Matsukawa geothermal reservoir (after Hanano and Matsuo, 1990).

結果から考えて、坑井周囲のフラクチャ内で流体は地層内フラッシュを起こし熱水混じりの蒸気を噴出したが、その後、フラッシュフロントは徐々に遠方に進展して行き、それぞれの生産井は、噴気開始後約1年から数カ月の後には乾き蒸気のみを生産する状態となったと考えられる。開発初期の生産井の噴気開始当初の熱水の噴出状況を Fig.13に示す。

蒸気卓越型の状態を作り出し、それを維持するためには、非常に多くの熱の供給が必要だと考えられている（例えば、White et al., 1971）。今、松川地熱貯留層の初期状態に対応するものとして、現在の開発範囲の広がりならびに貯留層の現在状態のところで議論した貯留層の広がりから、やや控え目な推定として、直径が2 kmで、厚さが500 m、孔隙率が10%、貯留層温度が260℃の熱水単相の閉鎖型の貯留層を考えると、この貯留層の初期状態における総熱量は約 10^{18} Jである。一方、松川地域において20年間の間に蒸気として生産された熱量はおよそ 10^{17} Jであり、これは上で求めた初期状態の値の約10%である。しかし、この割合は十分小さな値であるので、この程度の熱量が生産によって貯留層外へ運び出されたとしても、貯留層の温度は大きくは変化しないであろうし、実際の貯留層はここで仮定した範囲の外側とも連結していることから、この程度の熱の流出は、熱水の流入あるいは熱伝導によって適切に補給されるであろう。従って、上で議論してきた、松川貯留層の初期状態から次第に過熱蒸気が生産されるようになる過程は、熱

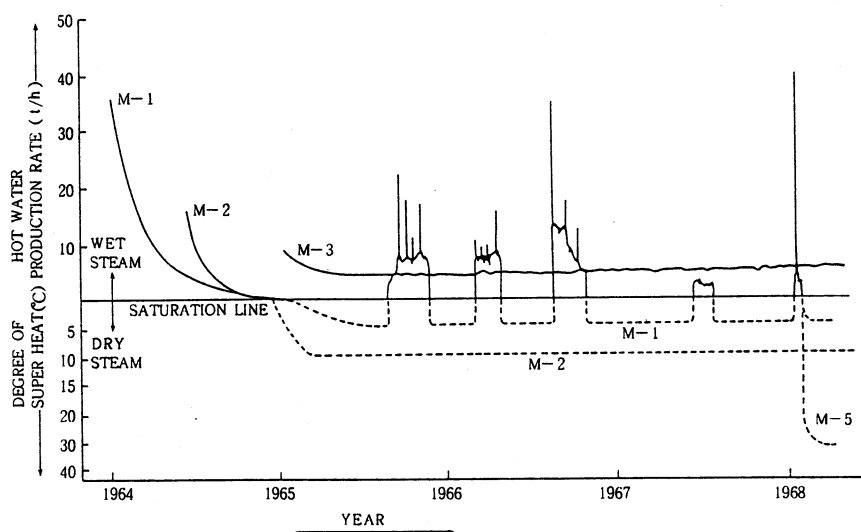


Fig.13 Discharge rate of hot water accompanied by steam from production wells at early stages of the production (after Miyamori, 1968).

収支の面からみても問題ないことがわかる。

村松（1987）は松川地域の坑井から得られたカッティングスを調べ、現在の生産ゾーン深度での沸騰現象を示唆する流体包有物と気相包有物の共生が観察されたと報告している。また、これらの流体包有物がトラップされたのはパイロフィライトの生成期にあたと述べている。このことは、これまで述べてきたことと一見矛盾する。しかし、角（1972）は、最初に述べたように、松川地域の地熱活動は消長を繰り返しており、パイロフィライトを生成した時期の地熱活動はきわめて活発であったと述べている。また、現在の地熱活動はその時期にくらべてかなり落ち着いた状態にあるとも述べている。このことから考えると、パイロフィライトを生成した時期における深部からの熱の供給は現在よりもはるかに多く、このため、蒸気卓越ゾーンの厚さは、坑井が掘削されはじめた開発当初よりもはるかに厚く、現在の生産ゾーン以深まで広がっていたのではないかと考えられる。このような状況下で気相包有物はトラップされたのではないかと考えられることから、これまで述べてきた議論とは矛盾しないと言える。なお、この点については、自然状態のモデリングでさらに検討する。

さて、White et al.（1971）のモデルでは、蒸気卓越ゾーン以深に存在する熱水は塩素濃度の高いいわゆるブラインである。しかし、松川の開発初期に蒸気とともに生産された熱水は、凝縮水起源と考えられる塩素濃度の低い熱水であった（例えば、Sumi and Maeda, 1970）。この熱水の問題については、以下の二つの可能性が考えられる。

一番目は蒸気卓越ゾーンの厚さの変化に関するものである。上で述べたように、松川における

地熱活動は消長を繰り返してきたが、パイロフィライトの生成された時期の地熱活動が最も活発であり、現在の地熱活動は、その時点に比べればはるかに落ち着いたものであると考えられている（例えば、角，1972）。従って、上に述べたように、その時点においては、松川の地熱開発が開始された時点よりも、蒸気卓越ゾーンの厚さは厚く、現在の生産ゾーン以深にまで広がっていたと考えられる。このため、塩素濃度の高いブラインは、その時点では、現在の生産ゾーンよりもはるかに深い場所に位置していたと考えられる。その後、地熱活動の減衰と共に、蒸気卓越ゾーンも収縮した。それに伴い、ブラインより上のゾーンは、蒸気卓越ゾーンが収縮する際に生成された凝縮水によって満たされた。この凝縮水が、松川の開発初期の蒸気生産において得られた熱水だったのではないかと考えられる。この場合には、高塩素濃度のブラインは現在の生産ゾーンよりなお深い場所に留まっているものと考えられる。

二番目は開発初期に掘削された生産井の位置に関するものである。上に述べたように、松川貯留層の周囲には低浸透率の遮蔽が存在する。開発初期に掘削された生産井 M1, M2, M3などは、貯留層全体でみれば下流側の遮蔽の近くに位置するものと考えられる。このような場所においては、蒸気卓越ゾーンから降下する凝縮水の量は、貯留層中心部と比べればかなり多いものと考えられる。従って、松川の開発初期に掘削された坑井の生産ゾーンにおいて凝縮水が卓越していたとしても不思議はないのかもしれない。

これらの点に関しては、今後の松川での調査や蒸気卓越型地熱貯留層の地球化学的モデルに関する研究の進展に合わせてさらに検討すべきであると考えられる。しかし、ここで明らかにした松川地熱貯留層の初期状態は、蒸気生産に伴う貯留層の物理的挙動を調査・解析する、工学的な貯留層管理を行う上ではとりあえず十分な内容である。

5. 松川地熱貯留層の自然状態モデリング

貯留層の初期状態を定量化するための手段の一つとして、貯留層の自然状態モデリングがある（例えば、Bodvarsson, 1988）。この自然状態モデリングは、貯留層内における自然対流系発生 of 標準的なタイムスケールである 10^4 年といったタイムスケールでの貯留層の挙動を解析し、準定常な状態である現在の状態（＝開発前の状態）を再現するモデルを求めるものである。従って、このモデリングでは、適切なモデルを例えば試行錯誤的に逆問題を解くことにより求める。このため、自然状態モデリングは、本質的には、考えられた概念モデルが真に正しいモデルかどうかを検証することはできないが、そのモデルが成り立ちうるかどうかの可能性を検討することができる。

ここでは、この自然状態モデリングにより、上で検討した松川地熱貯留層の初期状態と乾き蒸気生産にいたるメカニズムについてその可能性を検討した（Hanano, 1992b）。今回実施した自

然状態モデリングは、松川地域における最初の自然状態モデリングであることから、Ingebritsen and Sorey (1988) の例にならい、最も簡単な2次元断面ポラスモデルによる解析とした。解析に用いたシミュレータはTOUGH (Pruess, 1987) である。

設定した解析断面は、ほぼ南西～北東の方向の赤川に沿う断面であり、貯留層の現在状態のところで述べた、現在松川貯留層内に存在する蒸気の流動方向に合わせた (Fig.14)。シミュレーション範囲は、上流側は、かつての最も活発な地熱活動を示すパイロフィライトの露頭を十分含む範囲とし、下流側は、調査井により熱水対流が存在しなくなることが確認されている範囲までとした。この断面では、わずかではあるが地表面の標高に違いがあるが、ここでは、地表面は平らであるものと仮定した。解析範囲底面の深度は既存生産井の深度 (最大で約1,500m) を考え2.5 kmとした。解析底面深度の違いに伴う影響は、後で述べるように、別の値 (3 kmおよび4 km) でも検討した。今回のモデリングでは、明らかに熱水対流が存在するゾーンについてその状況を調べることを目的としたので、グリッドの分割は、熱水対流の存在する範囲では細かく設定し、熱水対流が存在しないことが明らかな下流側と、データが全く無い上流側においては分割しなかった (Fig.15)。

貯留層初期数値モデルの設定にあたっては、特に浸透率の値と分布について事前に種々の検討を行った。検討した内容は、貯留層内の垂直方向の浸透率に関しては、①貯留層内における自然

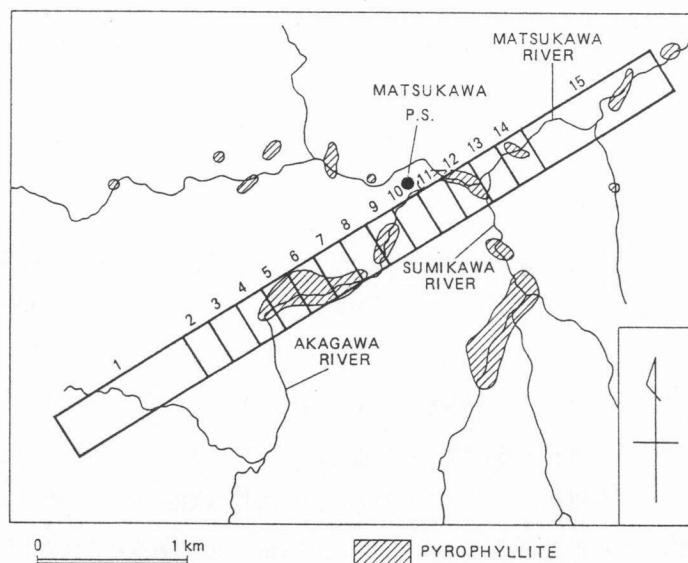


Fig.14 Location of the cross section of natural state modeling (after Hanano, 1992b). Distribution of pyrophyllite is taken from Takatsuka and Takashima (1991).

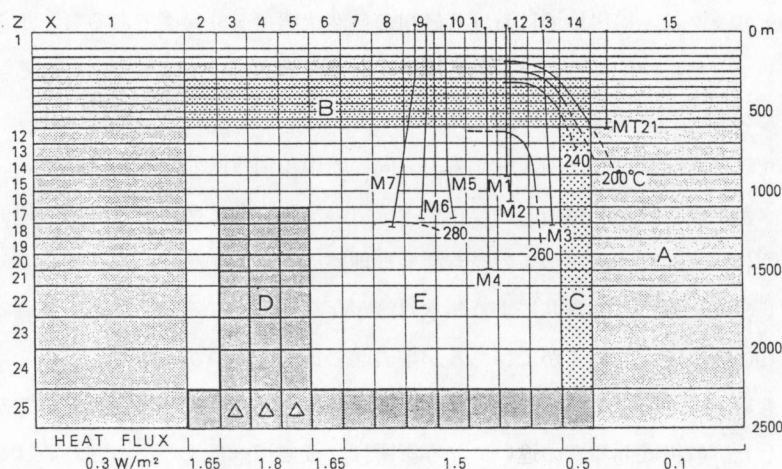


Fig.15 Grid mesh of natural state modeling with estimated initial temperature distribution, along with permeability distribution ($A=5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, $B=1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, $C=5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, $D=1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, $E=1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$), location of mass input (Δ), and conductive heat input of RUN 1 (after Hanano, 1992b).

対流発生の条件（例えば，Turcotte and Schubert, 1982, p.404），②蒸気卓越ゾーン内のヒートパイプ現象における熱輸送能力の条件（例えば，Turcotte and Schubert, 1982, p.420），③初期状態解析で明らかにした垂直圧力勾配と，自然温泉湧出量を貯留層内を上昇する流体の流量と仮定した値にダルシー則を適用した検討である。なお，ここで行った，自然対流発生の検討においては，貯留層の上下に 250°C を越える温度差が存在することから，臨界レイリー数を Garg and Kassoy (1981, p.46) によってコンパイルされたデータから10と仮定した。これらの結果から，松川地熱貯留層内において深部から浅部へ効率的な熱輸送が行われるためには，少なくとも， 10^{-15} m^2 を越えるオーダーの垂直浸透率が必要であると考えられた。しかし，垂直貯留層圧力勾配からの垂直浸透率の検討では，自然温泉湧出量を貯留層内を上昇する流量と仮定すると流量が少なすぎるが，さりとて，キャップロック以深の貯留層内を自然対流する流量を適切に見積もる手段を考えることができなかったため，有意な値は得られなかった。

貯留層内の水平方向の浸透率に関しては，①圧力ビルドアップテストで明らかにした水平方向の圧力勾配とその部分を流動すると考えられる蒸気の流量にダルシー則を適用した検討と，②圧力ビルドアップテストで得た kh （浸透率 $\times$ 有効層厚）に基づく検討を行った。これらの結果から，当貯留層内の平均的な水平方向浸透率は $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ m}^2$ 程度であると考えられた。

キャップロックや側方の遮蔽の浸透率については，Ingebritsen and Sorey (1988) は Schubert and Straus (1980) による熱力学的な検討結果に基づき $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ としており，ここでもそれになった。ただし，この値の適否については，後で述べるパラメータスタディで検討した。

相対浸透率については、ポーラスメディアの解析に多く用いられている、Sorey et al. (1980) による“fracture flow”型の相対浸透率曲線を用いた。また、残余水飽和率と残余蒸気飽和率についても、Sorey et al. (1980) にない、それぞれ、0.3と0.05とした。これ以外の孔隙率や、熱伝導率、岩石熱容量といった値は、主に安藤(1986)にあるコアデータに基づき決めたが、詳しくはHanano (1992b)に示されたとおりである。

ここでは、熱源としては、例えばFig.9に示したような温度検層結果から得られたキャップロック部の温度勾配から推定した熱伝導による熱入力（平均で約 1.5 W/m^2 ）と、自然の温泉湧出量から推定した質量流入量（総量が約 0.1 kg/s ）を用いた。Ingebritsen and Sorey (1988)は、キャップロック下面深度と熱入力の関係を検討するにあたり、まず、蒸気卓越型の場合、キャップロック下面より上は基本的には飽和状態かまたはそれに近い状態の液相であると仮定した。次に、彼らは、その温度分布は沸騰曲線に乗るものと仮定し、キャップロック下面の温度は深度により一意に決まるものとして近似した。彼らは、このように推定したキャップロック下面の温度と地表の温度との温度差に基づく温度勾配に、キャップロックに対応する平均的な岩石熱伝導率をかけることによりキャップロックを熱伝導により通過して流出する熱流束を推定した。

貯留層からキャップロックを通して流出する熱には、熱伝導により流出するものと蒸気の流出により流出するものがあるが、蒸気卓越型の場合には、キャップロックを通して流出する蒸気はきわめて少ないため、熱伝導により流出する熱量がほとんどであると言える。一方、開発前の、貯留層挙動がほぼ定常と考えられる状態の蒸気卓越型地熱貯留層においては、貯留層外に流出する熱に見合った量の熱が定常的に供給されることにより、蒸気卓越型の状態が安定に維持されている。従って、ここで推定した、キャップロックを通して熱伝導により流出する熱流束は、蒸気卓越型の状態を維持するために最低限必要な熱流束を示すことがわかる。ここで、Fig. 9に示したような温度検層結果からキャップロック下面の深度を約300mと仮定すると、蒸気卓越型の状態を維持するために最低限必要な熱流束は 1.3 W/m^2 と推定された。従って、ここで仮定した熱入力（ 1.5 W/m^2 ）はこの値を約16%上回っており、十分妥当な値と考えられた。なお、この熱流束（ 1.5 W/m^2 ）は、Ingebritsen and Sorey (1988)が蒸気卓越型の自然状態モデリングを行う際に用いた値（ 1.53 W/m^2 ）にきわめて近い値であるが、彼らによれば、この値は、ザ・ガイザースで実測された熱流束と同じオーダーであるとのことである。従って、松川における熱流束は、ザ・ガイザースと同程度の大きな値であると言える。なお、熱流束がこのように近い値となったのは偶然である面もあるが、松川におけるキャップロック下面の深度および温度と、Ingebritsen and Sorey (1988)が用いたそれがきわめて近い値であったことによるものと考えられる。

初期条件については、対流発生のない静的な状態を仮定し、温度については、開発地域周辺で掘削された熱伝導型の温度分布を持つ複数の坑井の温度勾配から深度2.5 kmで 300°C 、地表で15

℃の直線的な場所によらず一定の温度勾配とした。圧力については、地表を1 barとし、温度勾配に対応する静水柱圧力とした。また、境界条件は、基本的には、全ての面において熱と質量に対して開いた条件とした。すなわち、上部は地表に対応する条件を考え、15℃、1 barで開放の境界とし、側方については初期温度、初期圧力を維持する、遮蔽と同じ浸透率 ($5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$) を持つ開放の境界とした。しかしながら、下部については、不透水である境界面に上に述べた熱伝導による熱入力を与え、質量の流入については、最下レイヤー内に与えた。

このような検討により作成した数値モデルを用いて、熱源貫入後の5万年の貯留層挙動をシミュレーションした。多数の修正を行った後に得た最終的なモデル (RUN1) をFig.15に示す。自然状態モデリングにおいては、貯留層が定常かまたは定常に非常に近い状態に達した時点をもって自然状態とする。RUN1では、5万年後において、完全に定常ではないものの、貯留層内の対流は安定しており、温度分布や水飽和率分布の経時変化から、貯留層はほぼ定常に達したとみることができた。一方、RUN1では、さらにシミュレーションを続けると、約6万年頃から貯留層内の対流が不安定になり、特に温度分布と水飽和率分布が周期的に急変するようになった。これは、蒸気卓越ゾーンの形成にともない、McGuinness

(1988) が指摘した蒸気卓越型ポラスヒートパイプ特有の数値計算上の不安定現象が現れたものと考えられる。従って、ここでは、5万年の時点をもって、自然状態とした。

RUN1で得られた貯留層圧力のマッチング結果と温度分布のマッチング結果をそれぞれFig.16とFig.17に示す。このように、貯留層圧力に関しては十分なマッチングが得られた。このことは、計算領域内の平均温度が実際の貯留層のそれとよく一致していることを示しており、熱バランスがよく再現されていることを示している。また、同時に、貯留層内外での流体の流入、流出のバランスもよく再現されていることを示している。一方、この結果は、検層結果等を解釈して得た松川地域の初期温度分布を、細かな点ではまだ十分再現できていない箇所はあるが、全体でみればほぼ満足する程度に再現しているといえる。RUN1で得られた水飽和率の分布をFig.18に示す。この図では、キャップロック直下の貯留層浅

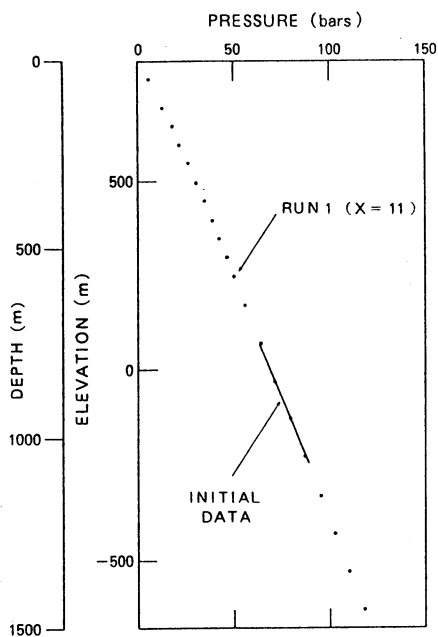


Fig.16 Pressure profile at 50,000 years of RUN1, along with estimated initial reservoir pressure profile (after Hanano, 1992b).

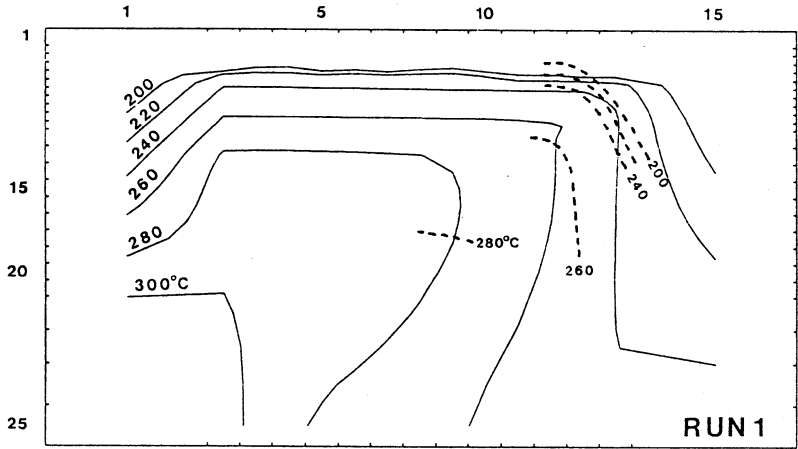


Fig.17 Temperature distribution at 50,000 years of RUN1, along with initial temperature distribution (dashed line) (after Hanano, 1992b).

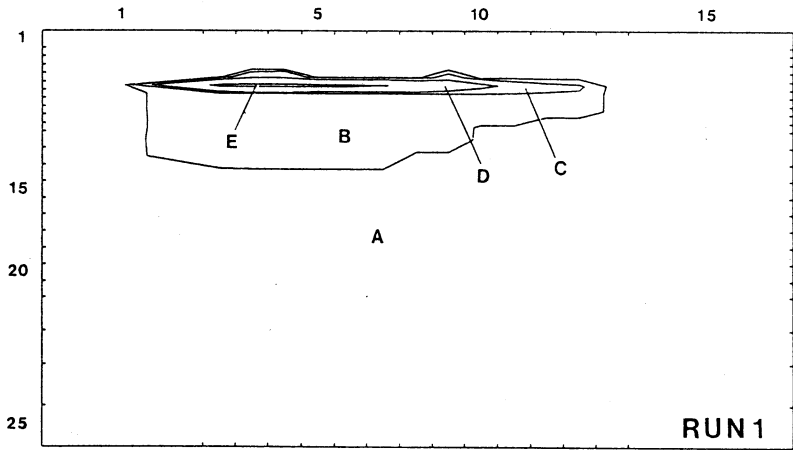


Fig.18 Distribution of water saturation at 50,000 years of RUN1 (A : $S_w = 1.0$ ($k_{rs} = 0.0$), B : $0.95 \leq S_w < 1.0$ ($k_{rs} = 0.0$), C : $0.84 \leq S_w < 0.95$ ($k_{rs} \geq k_{rw} > 0.0$), D : $0.5 \leq S_w < 0.84$ ($0.99 \geq k_{rs} > k_{rw}$), E : $S_w < 0.5$ ($k_{rs} > 0.99$)) (after Hanano, 1992b).

部に薄い蒸気卓越ゾーン（例えば、水飽和率 S_w が50%を下回る領域）が存在し、現在の開発ゾーンは熱水単相の状態となった。このように、このモデルにより、Fig.12に示した概念モデルと同じ状態が再現でき、この概念モデルは十分成り立ち得るものであることが明らかになった。

このように、今回の解析では、Fig.15に示した浸透率分布によってマクロ的には十分満足のできる結果を得た。このマッチングを得るにあたっては、Fig.15のAに示した低浸透率の遮蔽の存在は不可欠であった。また、Fig.15に示したB、C、Dは浸透率の高い領域であるが、これを設

定せず、貯留層内を均一な浸透率にした場合には、対流による温度の逆転が広い範囲に発生し、実測温度分布を再現できなかった。これらの高浸透ゾーンのうちBについては、掘削記録からみて、この深度周辺には逸泥が発生している（例えば、赤澤・村松、1988）ことから、この深度の浸透率を高く設定することには大きな問題はないものと考えられる。またCについては、M3での逸泥が、他の坑井とは異なり各深度でみられる（例えば、Baba et al., 1970）ことから、この部分の浸透率を高く設定することには大きな問題はないものと考えられる。Dについては、直接的な証拠は現在のところ何もないが、最初に述べたパイロフィライトの大規模な露頭の地下に存在する、熱源からの熱を供給する上昇流の通路となる断層等の大規模な縦型のフラクチャ群か、または、直接熱源となる新期の貫入岩などに相当するものと考えられる。しかしながら、ここで行ったのは大幅に構造を単純化した2次元断面による解析であるため、今後は、3次元のモデリングなどによりさらに詳細な検討が必要であろう。

次に、RUN1で得られたモデルの妥当性をさらに検討するため、パラメータスタディを実施した。これらのシミュレーションケースをTable 1に示す。このうち、RUN2では、低浸透率の遮蔽がないため、系外との間の流体の流動が容易であり、RUN1にくらべ熱が流体の流動によって流出しやすく、貯留層全体がRUN1に比べて低温になり、貯留層の初期温度分布を再現できないと同時に蒸気卓越ゾーンも形成されなかった。RUN3では、遮蔽の浸透率が低すぎ、蒸気が地表に流出しにくくなっているため、RUN1に比べはるかに厚い蒸気卓越ゾーンが形成され、やはり初期温度分布や初期圧力勾配を再現できなかった。従って、遮蔽の浸透率としてRUN1で設定した $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ はオーダー的にみて十分妥当な値であると言える。

RUN4では、熱伝導による熱流束が2倍となったことから貯留層内での沸騰が非常に活発になり、RUN3と同様RUN1に比べはるかに厚い蒸気卓越ゾーンが形成され、2相ゾーンも生産ゾーンをはるかに越えた深部にまで広がった。このことから、貯留層下部に供給される熱流束が増大した場合には、蒸気卓越ゾーンや2相ゾーンは容易に深部にまで広がることが確認でき、貯留層の初期状態のところで述べた、Hanano and Matsuo (1990) が述べた気相包有物と液相包有物

Table 1 Simulation cases (after Hanano, 1992b).

RUN	Description
RUN1	Current best model and base case for the following runs
RUN2	Without low permeability barrier ($A = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$)
RUN3	One tenth lower barrier permeability ($A = 5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$)
RUN4	Doubled conductive heat input at bottom ($X = 2 - 14$)
RUN5	Cross section depth = 3 km
RUN6	Cross section depth = 4 km
RUN11	Production from 50,000 years of RUN1
RUN12	Production from static initial condition similar to the result of RUN1 with permeability distribution of RUN2

の共存のメカニズムは可能であることが明らかになった。

いま、この熱流束が、温度が 650°C のマグマ性熱源から熱伝導により供給されていると仮定すると、RUN1の結果から熱水対流の下限の温度はおよそ 270°C であるので、この深度からマグマ性熱源までの距離は、RUN1のケースでは約500 m、RUN4のケースでは約250 mとなる。従って、松川においては熱水対流の下限から至近距離にマグマ性の熱源が存在するものと考えられ、この熱源の貫入が繰り返されることにより自然熱流束も変化していると考えられる。

計算範囲を深さ3 kmまでとしたRUN5では、RUN1とほぼ同様の結果が得られたが、深さ4 kmまでとしたRUN6では、RUN1やRUN5とは全く異なる対流パターンとなった。この結果から、ここで設定した条件下では、深さ方向の適切な解析範囲は2.5～3 kmであるが、これを4 kmまで広げることはできないことがわかる。しかし、ここで得られた結果は貯留層自体がそれ以深に全く広がっていないことを意味しているわけではない。すなわち、葛根田で発見された深部貯留層（例えば、加藤ほか、1993；Hanano and Takanohashi, 1993）のような浸透率が著しく異なる貯留層が深部に存在する場合にはさらに深部にも熱水対流は広がることになる。

最後にこのモデルにより、蒸気生産開始後の貯留層挙動を調べた。その結果をFig.19に示す。ここで、RUN11はRUN1の5万年後の状態から生産を行ったものであり、RUN12は、Fig.15では $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ となっている遮蔽の浸透率を $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ として、RUN11の初期状態に似せた静的な初期状態から生産を行ったものである。この結果、低浸透率の遮蔽のあるRUN11におい

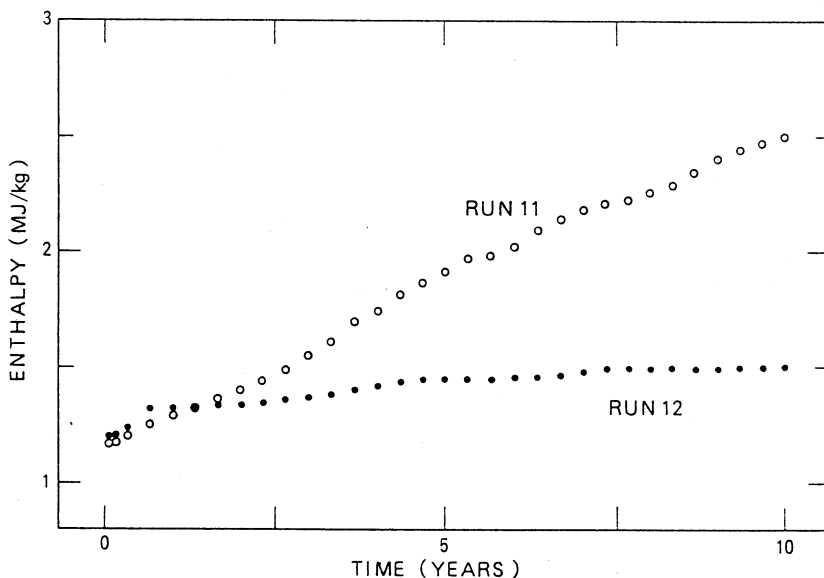


Fig.19 Change of average enthalpy of all production grids (after Hanano, 1992b).

ては生産ブロックの平均比エンタルピーは上昇を続けたが、遮蔽のないRUN12においては、比エンタルピーは約1.5 MJ/kgで安定した。このことは、低浸透率の遮蔽がない場合には、生産に伴う圧力低下により周囲から流体が十分補給されるため、蒸気のみを生産する状態にはなり得ないことを示している。

一方、ここで用いたモデルはポーラスモデルであり、計算グリッド内の温度や圧力を一様としているため、RUN11の結果は直接には乾き蒸気のみを生産する状態にはなっていない。ここで、Pruess and Narasimhan (1982) により行われた、フラクチャモデル (MINC モデル) とそれと等価なポーラスモデルの、生産に伴う流体の比エンタルピーの変化をFig.20に示す。この図から、生産に伴って比エンタルピーが上昇を続けるポーラスモデルは、MINCなどのフラクチャを考慮したモデリングとすれば乾き蒸気のみを生産する状態となることがわかる。従って、Fig.19に示した結果とFig.20の結果とを比べることにより、Fig.15に示したモデルで得られた初期状態（例えばFig.18）は、フラクチャを考慮したモデリングを行えば、乾き蒸気のみを生産するであろうことは明らかである。従って、Fig.12の概念モデルに示した初期状態から、乾き蒸気のみを生産する状態となることは可能であることがわかり、Fig.12に示した概念モデルが成り立ちうる可能性がさらに確認された。

また、RUN11とRUN12の結果から、乾き蒸気のみを生産する状態となるにあたって、Fig.15のAに示した低浸透率の遮蔽の存在は不可欠であることがわかった。従って、この低浸透率の

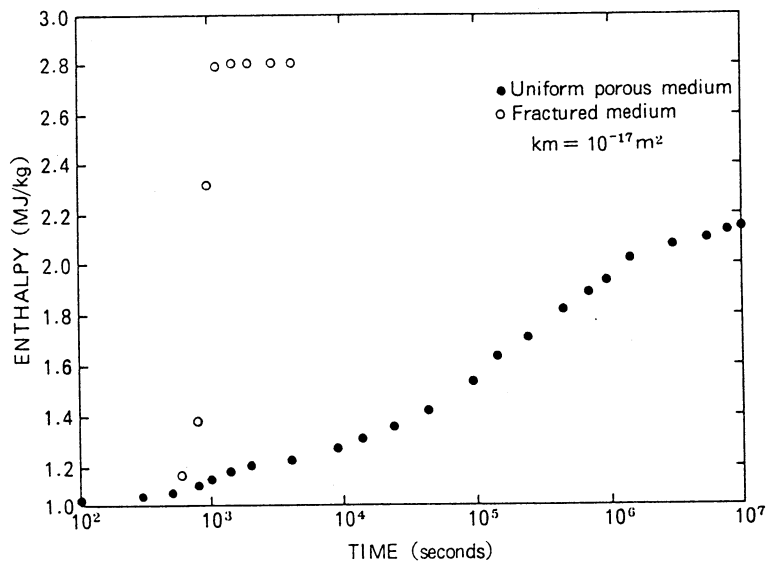


Fig.20 Difference of enthalpy response to production between fractured model (MINC model) and equivalent uniform porous model (after Pruess and Narasimhan, 1982).

遮蔽は、Fig.12に示した初期状態の発生にあたっても不可欠であるばかりではなく、その生産開始後の挙動を再現するためにも不可欠であり、蒸気卓越型の地熱貯留層にとってはきわめて重要なものであることが確認できた。

6. おわりに

松川地域において圧力ビルドアップテストによる貯留層の現在状態の調査、開発初期に取得された各種データからの貯留層の初期状態の解析ならびに自然状態モデリングを実施した結果、松川地熱貯留層に関して以下のことを明らかにすることができた。

- ① 松川地熱貯留層内には、現在、南西から北東に向かう貯留層圧力勾配が存在し、貯留層内では、蒸気は南西から北東に向かって流動している。このため、現在生産している蒸気は、現在の開発地域の南西側から供給されており、貯留層は、全体としては、現在の開発地域よりさらに南西に広がっていると考えられる。
- ② 松川地熱貯留層は、現在はほとんどの生産井において乾き蒸気のみを生産しているが、開発前の初期状態においては、現在の生産ゾーンの深度は熱水単相の状態であった。この状態から、蒸気生産により、現在の乾き蒸気のみを生産する状態に変化した。
- ③ この初期状態とその蒸気生産に伴う貯留層の変化は、自然状態モデリングにより再現でき、この考えが適切であることが示された。また、この自然状態モデリングにより、キャップロックなどの低浸透率の遮蔽は、初期状態の発生のみならず、乾き蒸気のみを生産する状態となるためにも不可欠であったことが明らかになった。

松川においては、現在、特に北東側の生産井で蒸気の過熱度の上昇が顕著になりつつあることと、地形の関係から地域の南西側に掘削基地を配置することが困難であることから、今後の安定な蒸気生産のため、還元による蒸気生産量低下の緩和と貯留層内に残された熱エネルギーの回収が行われている（例えば、Hanano et al., 1991b; 1993）。ここで明らかにした松川地熱貯留層の各状況は、この還元の計画立案と実施に当たり非常に有益であった。現在、本報で述べた各調査やこの還元実験の成果に基づき作成した貯留層管理計画に従い、生産井の圧力ビルドアップテストや調査井の水位変化の観測が継続されている（Hanano, 1992a）。

このほか、松川においては、現在、変質帯の再調査や、岩質や層序の再検討が行われているほか、電気検層結果の再解析による貯留層内外の比抵抗構造に関する再検討が進められている。また、近年国などの調査で掘削された調査井により貯留層外側の温度構造などが明らかになりつつある。これらの調査により、上に述べた低浸透率の遮蔽の実態などが少しずつではあるが明らかになりつつある。今後は、これらの成果をふまえ、松川地熱貯留層の成因とその詳細な構造について検討するとともに、蒸気生産の長期安定性とその対策についてさらに検討していく必要がある。

る。

謝 辞

日本重化学工業㈱地熱事業部および地熱エンジニアリング㈱（旧：日重開発工業㈱）関係各位には本報の発表を許可していただいた。日本重化学工業㈱地熱事業部角清愛博士、佐藤浩博士には研究の実施にあたりご指導いただくとともに本報の粗稿を読んでいただいた。東北大学林一夫教授、高橋秀明教授、中塚勝人教授および日本重化学工業㈱中村久由博士（当時）ならびに地熱エンジニアリング㈱鷹觜守彦博士には研究の実施にあたりご指導いただいた。地熱エンジニアリング㈱吉田裕博士、村松容一博士、土井宣夫博士には種々ご討論いただくとともに本報の粗稿を読んでいただいた。日本重化学工業㈱松川地熱発電所および地熱エンジニアリング㈱探査部諸氏には現地調査にご協力いただいた。これらの方々にお礼申し上げる。

引 用 文 献

- 赤沢司史・村松容一（1988）松川地熱地帯における地下フラクチャー分布。日本地熱学会誌，10，359－371。
- 安藤重幸（1986）地熱開発促進の地域レポート（1）八幡平東部地域。地熱エネルギー，11，2－30。
- Baba, K., Takaki, S., Matsuo, G., and Katagiri, K. (1970) A Study of the Reservoir at the Matsukawa Geothermal Field. *Geothermics*, Special Issue 2, 2, 1440－1447.
- Barker, B.J., Gulati, M.S., Bryan, M.A. and Riedel, K.L. (1992) Geysers Reservoir Performance. *Monograph on The Geysers Geothermal Field*, Geothermal Resources Council, Special Report No.17, 167－177.
- Bodvarsson, G.S. (1988) Reservoir Development Strategy for Liquid-Dominated Geothermal Reservoirs. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 17, 69－90.
- Celati, R., Squarci, P., Stefani, G.C. and Taffi, L. (1977) Study of Water Levels in Larderello Region Geothermal Wells for Reconstruction of Reservoir Pressure Trend. *Geothermics*, 6, 183－198.
- D'Amore, F. and Truesdell, A.H. (1979) Models for Steam Chemistry at Larderello and The Geysers. *Proceedings of the Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, 262－276.
- Garg, S.K. and Kassoy, D.R. (1981) Convective Heat and Mass Transfer in Hydrothermal Systems. *Geothermal Systems (Rybach, L. and Muffler, L.J.P., ed.)*,

- Wiley, 37-76.
- Hanano, M. (1992a) Reservoir Engineering Studies of the Matsukawa Geothermal Field, Japan. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, 16, 643-650.
- Hanano, M. (1992b) Simulation Study of the Matsukawa Geothermal Reservoir : Natural State and its Response to Exploitation. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Energy Resources Technology*, 114, 309-314.
- Hanano, M. and Sakagawa, Y. (1990) Lateral Steam Flow Revealed by a Pressure Build-Up Test at the Matsukawa Vapor Dominated Geothermal Field, Japan. *Geothermics*, 19, 29-42.
- Hanano, M. and Matsuo, G. (1990) Initial State of the Matsukawa Geothermal Reservoir : Reconstruction of a Reservoir Pressure Profile and its Implications. *Geothermics*, 19, 541-560.
- Hanano, M. and Takanohashi, M. (1993) Review of Recent Development of the Kakkonda Deep Reservoir, Japan. *Proceedings of the Eighteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, in press.
- 花野峰行・小田中浩一・大山孝 (1989) 松川地熱発電所の運転と貯留層管理。地熱, 26, 67-91.
- Hanano, M., Sakagawa, Y. and Saida, T. (1991a) Pressure Build-Up Behavior of M-7, A Dry Steam Well in Matsukawa Japan. *Journal of the Geothermal Research Society of Japan*, 13, 45-53.
- Hanano, M., Ohmiya, T. and Sato, K. (1991b) Reinjection Experiment at the Matsukawa Vapor-Dominated Geothermal Field. *Geothermics*, 20, 279-289.
- Hanano, M., Kotanaka, K. and Ohyama, T. (1993) A Quarter Century of Geothermal Power Production at Matsukawa, Japan. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 22, 32-47.
- 早川正巳 (1967) 松川地熱地帯における物理探査。地熱, No.10, 35-51.
- 平子喜信 (1982) 蒸気卓越型の松川地熱貯留層について。日本地熱学会昭和57年度学術講演会講演要旨集, 1.
- Ingebritsen, S.E. and Sorey, M.L. (1988) Vapor-Dominated Zones within Hydrothermal Systems : Evolution and Natural State. *Journal of Geophysical Research*, 93, 13,635-13,655.
- 石崎裕之・金藤太由樹 (1992) 松川蒸気卓越型貯留層における蒸気化学性状の経時変化。日本地熱学会平成4年度学術講演会講演要旨集, B9.

- 片桐邦雄 (1976) 松川地熱井におけるエアドリリングについて。石油技術協会誌, 41, 242-250.
- 加藤修・土井宣夫・村松容一 (1993) 岩手県葛根田地熱地域における新期花崗岩類と地熱貯留層。日本地熱学会誌, 15, 41-57.
- Malinin, S.D. (1963) An Experimental Investigation of the Solubility of Calcite and Witherite under Hydrothermal Conditions. *Geokhimiya (Geochemistry)*, 7, 650-667.
- Matthews, C.S. and Russell, D.G. (1967) *Pressure Buildup and Flow Tests in Wells*, Society of Petroleum Engineers, p.1-172.
- McGuinness, M. (1988) Heat Pipe Stability and Upstream Differencing. *Proceedings of the Tenth New Zealand Geothermal Workshop*, University of Auckland, 117-121.
- 宮守孝全 (1968) 松川地熱地域の噴出蒸気・熱水の化学特性。地熱, No.16, 15-24.
- Moench, A.F., and Atkinson, P.G. (1978) Transient-Pressure Analysis in Geothermal Steam Reservoirs with an Immobile Vaporizing Liquid Phase. *Geothermics*, 7, 253-264.
- 森芳太郎 (1967) 松川地熱開発上の問題点。地熱, No.10, 52-64.
- 森芳太郎・片桐邦雄 (1991) 地熱に情熱を注いだ人々 (第3話)。地熱エネルギー, 16, 64-71.
- 村松容一 (1987) 流体包有物からみた松川地熱地域。日本鉱物学会・日本鉱山地質学会・日本岩石鉱物鉱床学会昭和62年度秋期連合学術講演会講演要旨集, A-42.
- 中村久由 (1967) 松川地熱地域の地下構造。地熱, No.10, 13-34.
- 中村久由・角清愛 (1961) 岩手県松川地熱地帯の温泉地質学的研究。地質調査所月報, 12, 73-84.
- 七沢正敏 (1987) 松川地熱発電所創業20周年を迎えて。地熱, 24, 21-29.
- 大西幸作・多胡武雄・兵藤教正 (1981) 松川発電所の長時間運転実績と信頼性。火力原子力発電, 32, 665-673.
- Pruess, K. (1985) A Quantitative Model of Vapor Dominated Geothermal Reservoirs as Heat Pipes in Fractured Porous Rock. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, 9, Part 2, 353-362.
- Pruess, K. (1987) *TOUGH User's Guide*. Report LBL-20700, Lawrence Berkeley Laboratory, p.1-78.
- Pruess, K. and Narasimhan, T.N. (1982) On Fluid Reserves and the Production of Superheated Steam from Fractured, Vapor-Dominated Geothermal Reservoirs. *Journal of Geophysical Research*, 87, 9329-9339.

- Raghavan, R., Cady, G.V. and Ramey, H.J., Jr. (1972) Well-Test Analysis for Vertically Fractured Wells. *Journal of Petroleum Technology*, 24, 1014-1020.
- 斉藤清次 (1990) 松川, 葛根田及び森地域における地熱井掘削技術の現状。地熱, 27, 325-355.
- Schubert, G. and Straus, J.M. (1980) Gravitational Stability of Water Over Steam in Vapor-Dominated Geothermal Systems. *Journal of Geophysical Research*, 85, 6505-6512.
- Sorey, M.L., Grant, M.A. and Bradford, E. (1980) Nonlinear Effects in Two-Phase Flow to Wells in Geothermal Reservoirs. *Water Resources Research*, 16, 767-777.
- Strobel, C.J. (1976) Field Case Studies of Pressure Buildup Behavior in Geysers Steam Wells. *Proceedings of the Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, 143-149.
- Sumi, K. (1968) *Hydrothermal Rock Alteration of the Matsukawa Geothermal Area, Northeast Japan*. Report No.225, Geological Survey of Japan, p.1-44.
- 角清愛 (1970) 松川地熱地帯の変質帯。地質ニュース, No.189, 16-24.
- 角清愛 (1972) 熱史の化石としてみた地熱地帯の熱水変質。地熱, No.34, 24-39.
- Sumi, K. and Maeda, K. (1970) Hydrothermal Alteration of Main Productive Formation of Steam for Power at Matsukawa, Japan. *Proceedings of Symposium on Hydrogeochemistry and Biogeochemistry, Tokyo, Vol.1 - Hydrogeochemistry*, The Clarke, 211-228.
- 高木慎一郎・田中信一 (1968) 松川地熱坑井の電気検層 (第1報)。地質調査所月報, 19, 507-518.
- 高塚英男・高島勲 (1991) 岩手県松川地域における変質帯とTL年代。日本地熱学会平成3年度学術講演会講演要旨集, A8.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G. (1982) *Geodynamics*, Wiley. p.1-450.
- White, D.E., Muffler, L.J.P. and Truesdell, A.H. (1971) Vapor-Dominated Hydrothermal Systems Compared with Hot-Water Systems. *Economic Geology*, 66, 75-97.
- Yoshida, Y. (1984) Origin of Gases and Chemical Equilibrium Among Them in Steams from Matsukawa Geothermal Area, Northeast Japan. *Geochemical Journal*, 18, 195-202.
- Yoshida, Y. (1992) Carbon isotopic compositions of CH₄ and CO₂ from the Matsukawa Geothermal system, Japan. *Geochemical Journal*, 26, 219-225.

Yoshida, Y. and Ishizaki, Y. (1988) Geochemical Model of the Matsukawa Geothermal Field. *Proceedings of the International Symposium on Geothermal Energy, Kumamoto and Beppu, Japan*, 128–131.