

深部地熱貯留層の評価 —流体採取時の地熱貯留層の挙動予測

安川 香澄¹⁾・矢野 雄策²⁾・石戸 経士²⁾

1. はじめに

地熱地域を開発するに当たって、たまたま掘った井戸の生産性が良いとか、還元流体のみこみが良いからと言って安易に生産ゾーン、還元ゾーンを決めてしまうのは考えものである。なぜなら、流体採取に伴う地熱貯留層全体の挙動は、地熱流体の生産及び還元ゾーンの配置や、設定流量によって変化するからだ。この関係は、フラクチュア・ネットワークの構造に依存するので、貯留層ごとに異なってくる。従って地熱地域を開発する際は、事前にいくつかの生産設定について貯留層挙動を予測し、最適生産法を見出しておくことが望ましい。

本文では、既に数値モデリングが行われている鬼首カルデラ熱水系を例にとり(安川・石戸, 1989a, 1989b, 1992), 流体採取時の貯留層挙動をシミュレーション計算した結果を示す。総流体生産量を一定に保って生産を行う場合、総生産量を調整しながら蒸気生産量を安定させて生産を行う場合について、生産及び還元ゾーンの配置が貯留層挙動にどのように影響するかを調べた。

なお、貯留層シミュレータは、工業技術院 RIPS の CRAY 上の THOR、生産井内の二相流の計算には、WELBOR (THOR と同じく S-CUBED 社製の数値シミュレータ)を使用した。

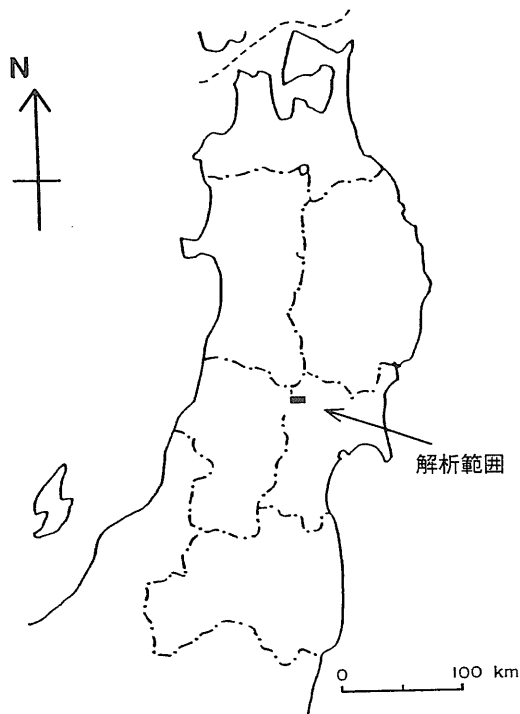
2. 解析及び結果

2.1 自然状態モデル

解析範囲は、鬼首カルデラの南部を含む東西13 km, 南北7 km の範囲とした(第1図)。水平方向

には1 km 四方のメッシュ(第2図)、鉛直方向には9層に分割し、各グリッドの岩相区分に対応させて浸透率を与えた(第3図及び第1表)。この浸透率分布はモデリングの際、自然状態における温度分布・圧力分布について観測データとの一致が見られるまで数回変化させている。4側面は不透水とし計算領域の内外での物質及び熱の出入りは無いものとした。底面では温度一定、上面では圧力一定とした。

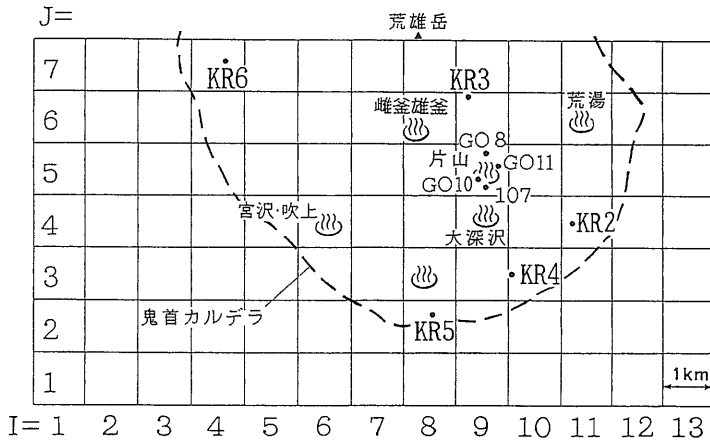
自然状態モデリングでは、熱水活動によって系が



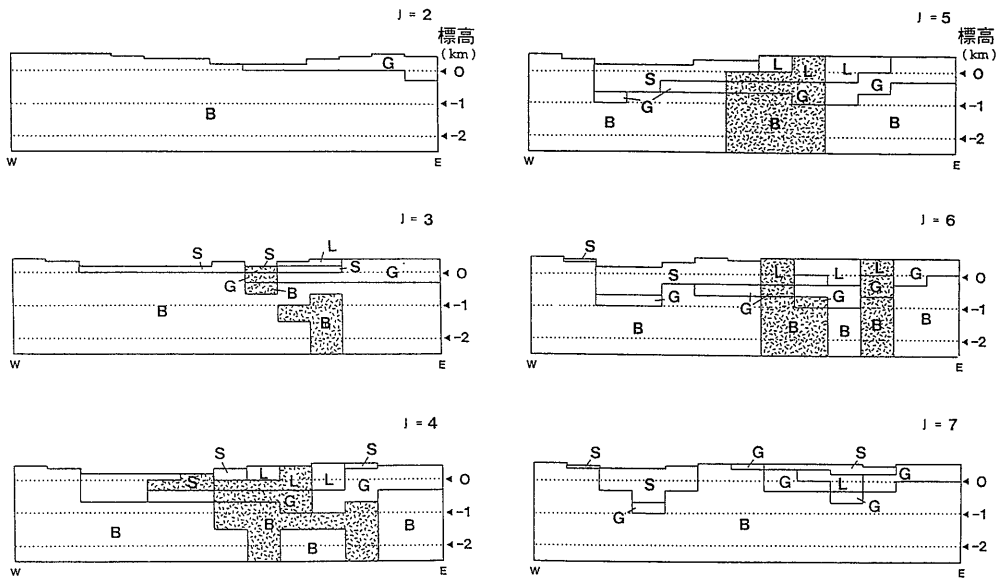
第1図 解析範囲

1) 地質調査所 地殻熱部, (現在 新エネルギー・産業技術総合開発機構)
2) 地質調査所 地殻熱部

キーワード: 地熱貯留層, 生産予測, 蒸気飽和度



第2図 解析範囲とグリッド分け



第3図 岩相区分(東西断面)

陰影部は、浸透率の高い「割れ目あり」グリッドを示す。

次第に暖められ、定常状態に達するまでを計算した。初期状態では系は冷たい状態とし、最下部のグリッド内に熱源及び流体源を置いた。高温の流体は系内を対流しながら系を暖め、最下部の流体源に見合った流量が地表から流出する。地表では放熱も行われるので、最下部の熱源とつり合って系は定常状態に達する。系が暖められた後の定常状態、すなわち系に熱源が与えられてから8万年後の状態を流体生産開始前の自然状態とし、地熱流体採取時の挙動予測計算を行う。

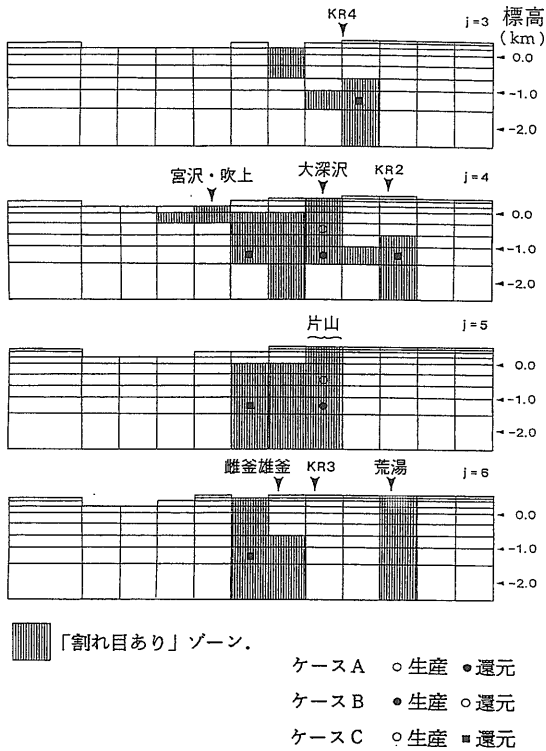
第1表 各岩相に与えられた浸透率

	「割れ目なし」		「割れ目あり」	
	k_H	k_V	k_H	k_V
B	0.1	0.1	2.0	10.0
G	0.1	0.1	2.0	10.0
L	0.2	1.0	2.0	10.0
S	1.0	0.1	10.0	10.0

k_H : 水平浸透率, k_V : 鉛直浸透率 (md) .

B : 花崗岩基盤, G : グリーン・タフ,

L : 溶岩, S : 湖成堆積層.

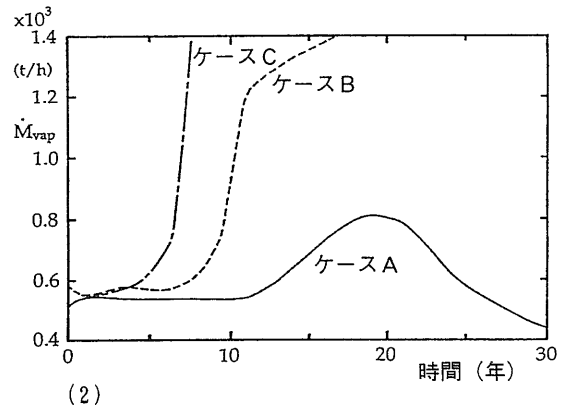
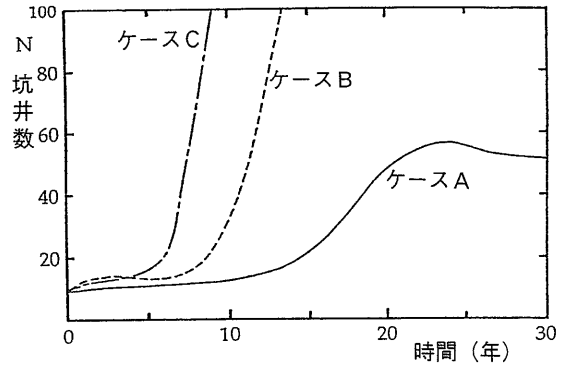


第4図 挙動予測計算における生産・還元配置。
 ケース A 及び C では生産ゾーンは350 m、
 還元ゾーンは500 mで、ケース B ではそ
 の逆である。生産は2つのグリッドで行い、還
 元はケース A 及び C では2つのグリッド、ケ
 ース C では5つのグリッドで行うが、総生産量・
 還元量はいずれも等しい。

2.2 総流体生産量を一定値に保って生産を行う場合

片山地域を中心に、総流量2,000 t/hの流体を生産、その70%にあたる1,400 t/hの熱水を還元した場合の30年間の挙動を予測計算した。還元は生産と同時に開始し、還元流体の温度は100°Cとした。片山地域では鬼首地熱発電所が操業しているが、ここでの計算に用いた設定はこれとは無関係であり、より広範囲の熱水流動系を扱うことを目的としている。

第4図は、ケース A~C の3つの場合の生産・還元ゾーンの位置を示す。ケース A では、浅部で生産、深部で還元を行い、ケース B では、深部で生産、浅部で還元する。いずれも、平面的には同じメッシュ内の上下で生産・還元を行う。ケース C では、生産、還元の深度はケース A と同じだが、



第5図 (1)総生産量2,000 t/hを維持するのに必要な坑井数の経時変化。
 (2)全坑井で生産される蒸気量の経時変化。

周辺部で還元を行う。

第5図(1)は、ケース A~C について、坑口圧5 barsで総生産量2,000 t/hを保つのに必要な坑井数の変化を示し、第5図(2)は、それらの坑井で生産される蒸気の総量を示す。生産・還元に従い生産ゾーン内の圧力が下がると、坑井一本当たりの生産量が減少し、総生産量の維持に必要な坑井数が増加する。一方、生産ゾーン内の蒸気飽和度は上昇するので(第6図)、総流体生産量は一定でも、蒸気生産量は増加する。

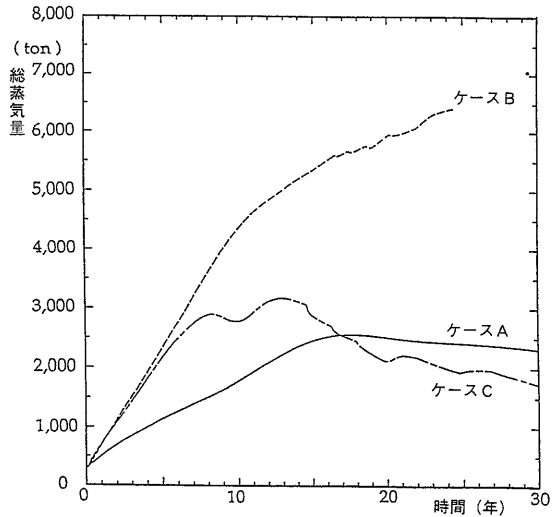
ケース B 及び C では、総生産量を保つのに必要な坑井数が10年以内に急増し、15年後にはケース B で400本、ケース C では800本もの坑井が必要となる。これは生産ゾーンの水平的広がり2 km²に対して、非現実的な数である。仮にその数の坑井を用意すれば、15年後の蒸気生産量はそれぞれ1,300 t/h(約13万 kW 相当)、1,900 t/h(約19万 kW)に達するが、圧力低下のため、坑口圧5 barsでは流体

が噴出しなくなり、18年程度で生産は終わる。

一方ケース A では、生産ゾーンの下方に熱水が還元される。鉛直方向の透水性が大きいので生産ゾーンへの流体供給が円滑で、圧力低下が小さい。また、30年間では還元水による生産ゾーンの冷却も余り顕著でない。このため坑井数はピークでも53本で、総流量を保ちつつ30年以上に渡り流体を生産することができる。

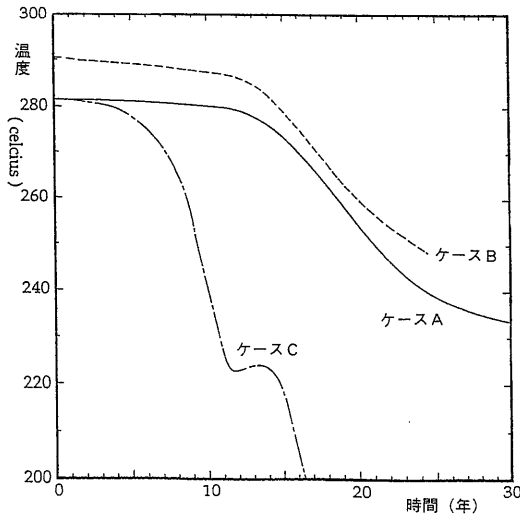
第7図に、ケース A ~ C における生産ゾーン内の温度、圧力の経時変化を示す。生産ゾーンが深部、還元ゾーンが浅部という設定のケース B では、生産ゾーンと還元ゾーンの間にも沸騰が発生し、生産ゾーンへの流体流入が小さくなる。その様子は、第8図での2相ゾーンの広がりをもケース A と比較すれば明らかである。ケース C では側方から流体が供給されるが、水平浸透率が低いため生産ゾーンへの流入量が不足し、ケース B と同様の結果となる。なお、ケース C の生産ゾーン圧力が生産開始と同時に急激に下がるため第7図(2)では初期よりケース C の圧力がケース A より低いように見受けられるがケース A と C の初期圧力は等しい。

以上の計算結果では、ケース A のように設定すると、最も長く生産を続けられる。ケース B およ

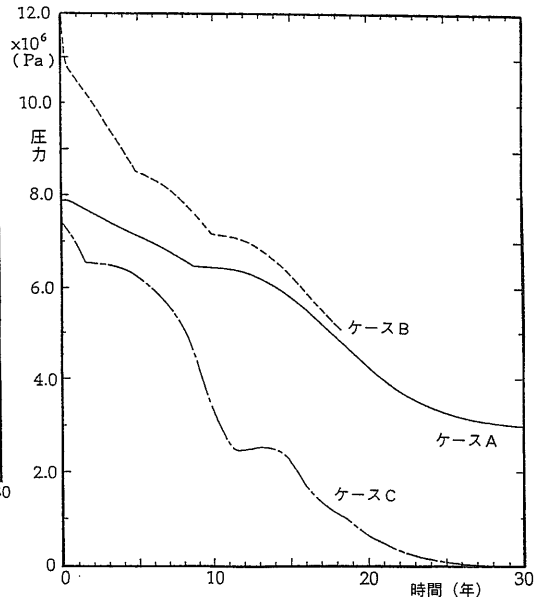


第6図 貯留層内の総蒸気量の経時変化

び C では、必要坑井数が100本を越えるなど、非現実的な結果になったが、これは総流体生産量を一定に保つという設定で計算を行ったためである。生産ゾーンの急激な圧力低下を防ぐよう流量を調整しながら生産を行えば、より現実的な結果が得られるであろう。



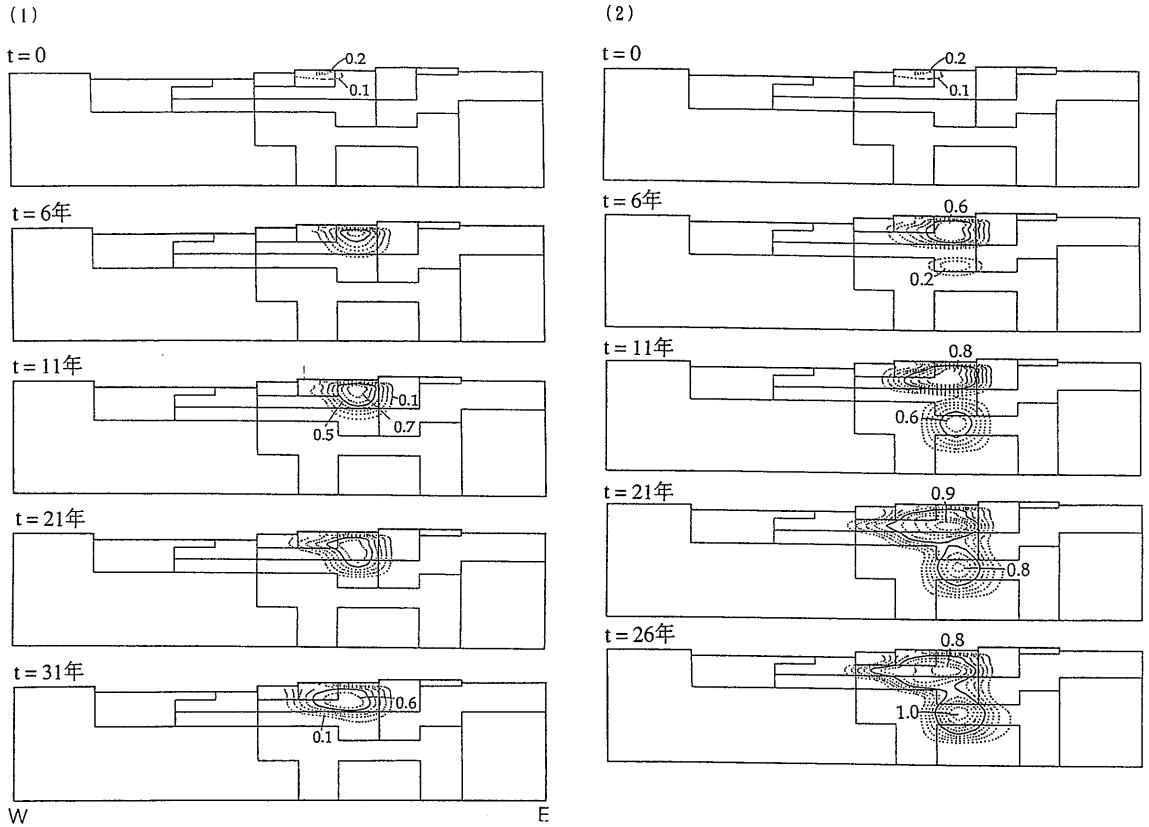
(1)



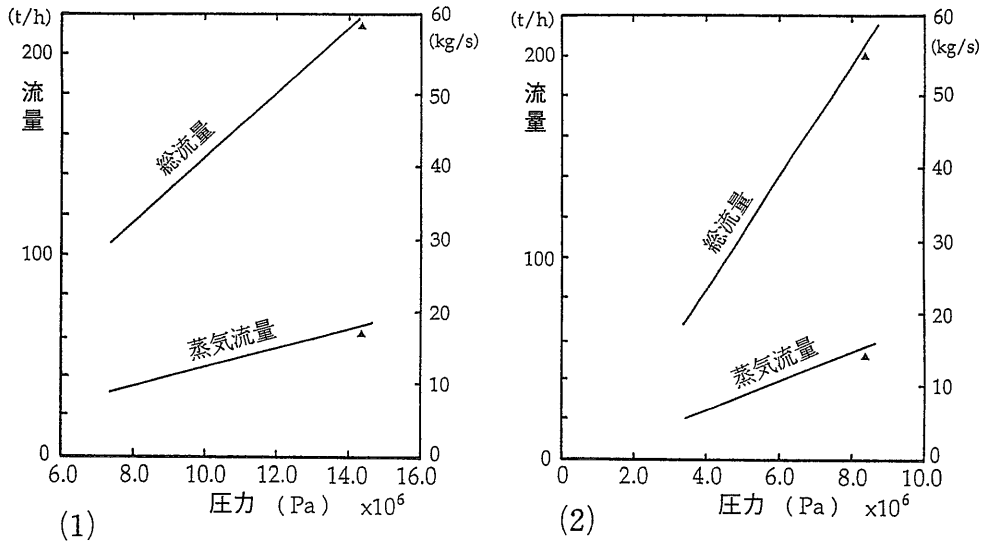
(2)

第7図 生産ゾーンにおける温度・圧力の経時変化。

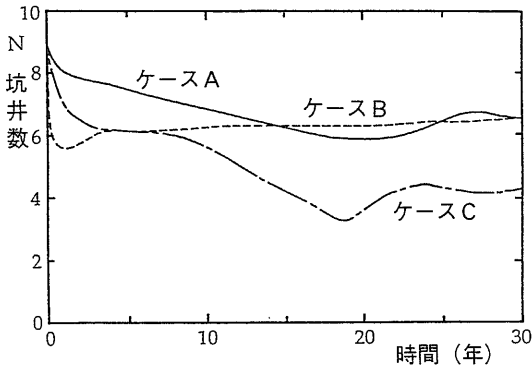
(1)温度。(2)圧力。



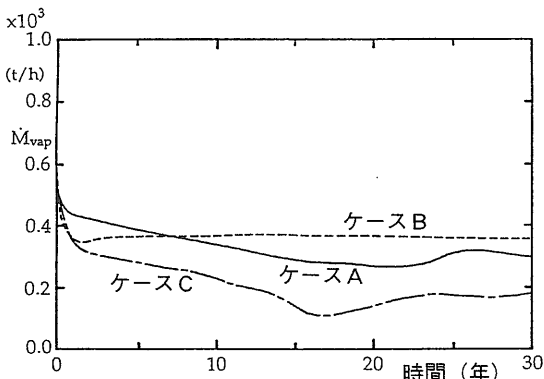
第8図 貯留層内の蒸気飽和度の経時変化 (j=4における東西断面).
(1)ケース A. (2)ケース B.



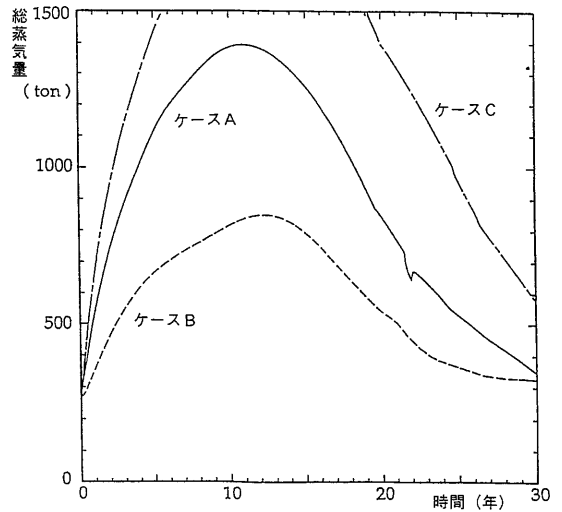
第9図 生産ゾーンの圧力と生産可能な流量との関係。
(1)ケース B・エンタルピー H=1289(J/g), 深度1780 m で生産。
(2)ケース A, C・エンタルピー H=1244(J/g), 深度1005 m で生産。
▲印は自然状態における生産ゾーン圧力。



第10(1)図 総生産量を調整した場合の坑井数の経時変化



第10(2)図 全坑井で生産される蒸気量の経時変化



第11図 貯留層内の総蒸気量の経時変化

第10図は、第5図と同様ケースA~Cについて、(1)式によって設定された流量を生産するのに必要となる坑井数、及びそれらの坑井で生産される蒸気量を示している。ケースA~Cのいずれの場合も、総生産量を一定に保つ場合より坑井数及び蒸気生産量の変化が少なく、安定した生産が行われる。特にケースBは、総生産量一定の場合とは対照的に、最も安定している。これは、生産量一定の場合に初期の圧力降下が大きいケースBが、最も強く(1)式に制御されるためである。P₀-P*の値を変化させれば、ケースAやCの挙動もより強力に制御することが可能であろう。第11図は各ケースにおける貯留層内の総蒸気量の変化、第12図は生産ゾーン内の温度及び圧力の変化を示している。総生産量一定の場合に比べ、どのケースもはるかに変化が小さくなっている。以上のような設定で総生産量を制御した結果、ケースBが最も安定した挙動を示したが、ここで議論したいのは、ケースA~Cのどの方法が最適かということではない。終端圧力P₀-P*設定によりA~Cのどの場合でも制御は可能である。ここで強調したいのは、むしろ、流量の設定により、各ケースでの貯留層挙動にこれだけ大きな違いが出るという事実である。

2.3 流量を調整しながら生産を行う場合

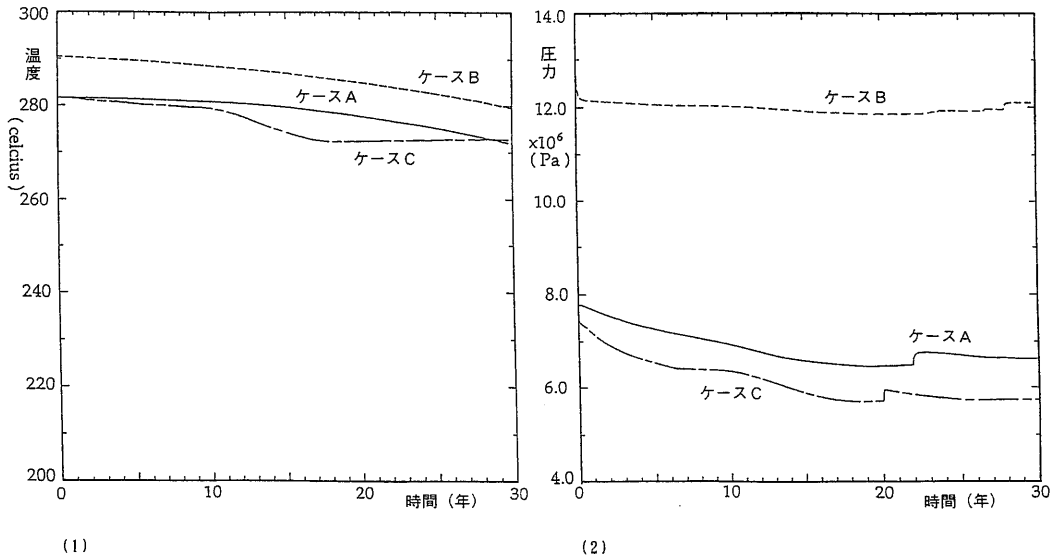
第9図に、ケースA~Cについて、生産ゾーンの圧力と、採取可能な流体の量との関係を示す。坑口圧を5 barsとし、生産流体のエンタルピー及び粘性係数は、生産開始時の値、すなわち生産ゾーンにおける自然状態の流体の値を用いた。ケースA及びCでは、圧力が初期値より約3.5 MPa下がると、蒸気生産量は10 kg/sec未滿となる。そこで経済的な意味も考え、大幅な圧力低下を避けるため、初期圧力より3.5 MPa下がった時の流体生産量が0となるように、次式のように各時点での生産量Mを設定した。

$$\dot{M} = (P - P^*) / (P_0 - P^*) \cdot \dot{M}_0 \quad (1)$$

但し、M₀は初期の流体生産量、P₀は初期の生産ゾーン圧力、P*は終端圧力(ここではP₀-P*=3.5 MPaに設定)、Pは各時点での生産ゾーン圧力である。上記の設定で30年の生産をシミュレーション計算した結果を以下に示す。

3. ま と め

以上の計算は、初期の目的としては生産・還元ゾ



第12図 生産ゾーンにおける温度・圧力の経時変化。
(1)温度。(2)圧力。

ーンの最適配置を知るために行ったものであるが、生産流体の総流量を一定にした場合と、生産ゾーンの圧力に応じて流量を調整した場合とでは、最適な配置が異なるという結果が出た。熱水系の広域的な開発を考える際に、最適生産法を見出しておくのは勿論重要である。しかし、最適な坑井配置を云々する前に、適切な生産量、またその経時変化をふまえておかないと、誤った結果を導くことになる。

なお、この計算に用いたモデルでは、深部からの流体と熱の供給量を一定値(自然状態における値)に定めているが、流体の生産が進むと、深部からの流体供給が促進されるという現象も指摘されている。より厳密に議論するには、既に、自然状態のモデリング及び生産時のヒストリーマッチングが行われて

いるフィールドでのケーススタディを参考にしながら、深部からの供給量も考慮する必要があるだろう。

文 献

安川香澄・石戸経士(1989a)：鬼首カルデラ熱水系の数値モデリング。物理探査学会平成元年度春期講演会予稿集，223-228。
 安川香澄・石戸経士(1989b)：鬼首カルデラ熱水系の数値モデリング(その2)。物理探査学会平成元年度秋期講演会予稿集，364-368。
 安川香澄・石戸経士(1992)：鬼首カルデラ熱水系の自然状態モデリング。物理探査，Vol. 45, No. 3, p. 172-189。

YASUKAWA Kasumi, YANO Yusaku and ISHIDO Tsuneo (1994): Prediction of geothermal reservoir behavior under fluid production.

〈受付：1993年11月29日〉