

## 第5章 貯留層モデルによる生産予測シミュレーション

### 5.1 緒言

現在多くの地熱地域では、探査・開発で取得された各種データに基づき概念モデルを構築し、これに整合する数値モデルを用いて合理的な発電規模の決定や生産 - 還元計画を作成し、蒸気生産が開始されている。しかしながら、蒸気生産開始以前に作成される自然状態モデルは、モデル構築に際して多くの仮定（浸透率分布や境界条件等）があるため、貯留層モデルとそれに基づく生産予測結果の一意性は必ずしも保証されているわけではない。従って、モデルの信頼性を向上させるためには、生産 - 還元によって生じる貯留層内の变化を説明するようモデルを修正する作業“ヒストリーマッチング”が不可欠となる（石戸，1999）。

数値モデルで最も重要なパラメータの一つとなる浸透率に関しては、噴気試験の際に実施された圧力干渉試験の解析結果が有意義な基礎資料となり、澄川地域では、Pritchett et al.(1989)、Garg et al.(1991)、Ishido et al.(1992)等により報告された。Pritchett et al.(1991)は、こうした圧力干渉試験の解析結果に基づき浸透率分布を設定し、これまでに記述された概念モデルを考慮し自然状態モデルを構築した。同モデルを用い数種類の運転シナリオで実施された生産予測シミュレーションの結果から、本地域は 50MWe の発電には充分余裕をもって対応できるとの結論が得られた（坂井ほか，1993）。

運転開始以降の発電状況と貯留層管理については、Ariki et al.(2000)で報告されている。生産ヒストリーから、比エンタルピーの緩やかな低下が確認され、Kato et al.(2000)は地化学モニタリングとその解析からその原因は還元流体の早期還流であることを報告し、これはトレーサテストにより検証された（熊谷ほか，2000）。こうした蒸気生産開始後の貯留層の挙動は、Pritchett et al.(1991)による既存モデルでは再現できず、モデル修正と貯留層の再評価による生産 - 還元計画の見直しが課題となった。

本章では、以上に述べた概念モデル並びに諸データの解析から得られた貯留層パラメータを再検討し、既存の数値モデルに対し適宜修正を加え、自然状態と生産ヒストリーの再現によるモデルの精緻化を行った過程、並びにこれより得られたベストモデルを用いて実施した生産予測シミュレーション結果について述べる。併せて、今後の貯留層管理の課題について言及する。

なお，本研究では，貯留層シミュレータ STAR ( Pritchett, 1995 ) を使用した。

## 5.2 解析条件

### (1) 計算領域とグリッド間隔

計算領域とグリッド分割を図 5.1 に示す。計算領域は，澄川地区の生産井及び還元井の坑井群を中心として南北 4,700m，東西 2,800m，面積 13.16km<sup>2</sup> の範囲である。南側境界及び北側境界は，それぞれ深部から高温流体の流入が想定される焼山 - 八幡平火山列付近，及び地表水の流入が想定される熊沢川流域とした。また，西側境界は，N59-SN-5 調査井では逸泥兆候がなく，熱伝導型の温度プロファイルを呈した事実より，同坑井付近に設定した。東側境界は，大沼地区坑井群と澄川地区坑井群は，お互い水理的連続性が認められず両者の間には不連続境界が想定されたため，この付近に設定した。

グリッド間隔は，主要生産井・還元井の配置される領域を南北及び東西ともに 200 m，その周辺を 500mとし，東西方向 (i 成分) で 11 ブロック，南北方向 (j 成分) で 16 ブロックに分割した。既存モデルでは，南北方向で 500m均等に，また，東西方向では中心で 300mであり，改良モデルではグリッド間隔を狭くし坑井毎の異なる挙動の再現に努めた。

鉛直方向は，-2,000mASL をブロックの底面として，最上部は，最高 1,000mASL として，地表標高を考慮し北側に向かって低くなるため適宜空ブロックを設定した。グリッド間隔は，底部から+400mASL までは 200m間隔，それ以浅では 100m間隔とし，合計 18 のブロックに分割した。

### (2) 岩石物性値

代表的な南北断面による岩石分布図を図 5.2 に示す。岩石区分は，大局的には地表地質及び坑井データから得られた地質層序に基づき，上位より下位に向かって，第四紀火山岩類 (L)，石仮戸沢層 (K)，銭川温泉層 (F)，トロコ層 (C/E)，高石沢層 (B)，第三紀花崗閃緑岩 (Z)，及び石英安山岩 (X) と設定した。さらに，概念モデルに表現される熱水対流系や噴出特性を再現するために，C/E，B 及び Z の各層については以下の細分を行い，それぞれ固有の絶対浸透率を設定した。

アップフロー域 ( 南部の高温流体の上昇流域 )

南部生産域（エクセスエンタルピーの噴出特性をもつ坑井群の領域）

主要生産 - 還元域（ノーマルエンタルピーと主要還元井の領域）

周辺域（上記 と の周辺域）

リチャージ域（北部の熊沢川流域）

岩石物性値の一覧を表 5.1 に示す。岩石物性値の内，密度，孔隙率，熱伝導率，及び熱容量については，ボーリングコアを用いた岩石物性試験の結果に基づく。最も重要な解析条件の一つとなる絶対浸透率に関して，圧力遷移試験（圧力干渉試験を含む）の解析結果として，これまでに Pritchett et al.(1989)，Garg et al.(1991)，Ishido et al.(1992)，矢野ほか(1994a)及び Garg and Owusu (1996)等の報告がなされている。これらの解析結果並びに逸泥頻度とその量を参考として，自然状態シミュレーション及びヒストリーマッチングの過程で適宜調整を行った。最終モデルが得られた時の絶対浸透率の分布の特徴を以下に示す。

- ・ キャップロックの役割を果たす石仮戸沢層（K）は， $0.01 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と最も低い値を与えた。地表水の流下を制限し，蒸気層の形成を促進させるためには非常に低い値を設定する必要があった。北部の還元域ではキャップロックを考慮せず，天水の深部への浸透を促した。
- ・ 主要生産 - 還元域のトロコ層（C/E3），高石沢層（B3）及び花崗閃緑岩（Z2）の水平方向は，それぞれ  $40 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ （東西方向）と  $40 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ （南北方向）， $20 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ （東西方向）と  $80 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ （南北方向），及び  $50 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ （東西方向）と  $50 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ （南北方向）と最も高い値を与えた。これは，高石沢層内にある S-4 坑 - KY-1 坑の圧力干渉試験で南北方向浸透率が  $139 \sim 141 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  であるのに対し，東西方向浸透率は  $3.36 \sim 28.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と異方性が認められたこと（Garg et al., 1991），また，トロコ層と花崗閃緑岩の両者にフィードポイントをもつ SC-1 坑の圧力遷移試験結果が  $74 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と高い値を示したこと（Ishido et al., 1992）に基づく。一方，鉛直方向は，両者とも  $5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と水平方向に比べて低い。鉛直方向の浸透率については後述する。
- ・ 南部生産域では，トロコ層（C/E2）及び高石沢層（B2）の水平方向は，それぞれ  $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  及び  $20 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と相対的に低い値を与えた。これは，エクセスエンタルピーの再現には，低い浸透率を設定し生産ブロックの圧力低下を促進させる必要があったためである。

- ・ 主要生産 - 還元域の周辺部 (C/E4・B4) は、 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と低い値を設定した。高浸透率領域を適度に限定することは、還元流体の還流を促すために効果的であった。
- ・ アップフロー域は、深部の花崗閃緑岩 (Z1) では  $20 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  (全方向一律) と比較的高い値を設定した。これは、後述するソースとして与えた高温流体の質量流束を浅部へ流動させる必要があるためである。トコロ層 (C/E1) 及び高石沢層 (B1) では、エクセスエンタルピーを再現するために、それぞれ  $0.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  及び  $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と低い値を設定した。

相対浸透率は、X カーブを用い、液相及び気相の残留飽和率は、それぞれ 0.30 及び 0.05 とした。なお、毛細管圧力及び吸着は考慮していない。

### (3) 境界条件とソース・シンク

境界条件並びに質量及び熱の流入 / 流出条件の一覧を表 5.2 に示す。

#### 境界条件

境界条件は、控えめな予測を行うために上面を除く側面と底面はすべて断熱・不透水の閉境界の条件を設定した。また、上面に与えた定温定圧境界は以下の流入 / 流出の設定により行った。

#### 質量及び熱の流入 / 流出条件

##### a) 深部からの高温流体の流入

熱源周辺 (澄川地区の南西方) より高温流体の上昇流が想定されるため、最も南側の底面ブロック ( $1 \leq i \leq 10, j=1, k=1$ ) に高温の質量流束を与えた。内部エネルギーは、最も西側のブロック ( $i=1$ ) で  $2,800 \text{ kJ/kg}$  を、最も東側のブロック ( $i=10$ ) で  $2,620 \text{ kJ/kg}$  を、その間は線型補間により与えた。これは南東部より南西部の方が地下温度が高いことに基づく。各ブロックとも流量は、一律に  $0.5 \text{ kg/s}$  (合計  $5 \text{ kg/s}$ ) とした。以上の結果より、質量流束による総熱流量は、 $13.5 \text{ MWe}$  となる。質量流束の内部エネルギーの程度は、蒸気層の発達に大きく影響を及ぼす。南部の領域で厚い蒸気層を形成させるためには、このような高い内部エネルギーの設定が不可欠となった。

##### b) 底面からの熱流束

貯留層の深部では熱伝導による貯留層への熱の供給が考えられる。ここでは底面が

らの熱流束は、南部ほど熱源に近いからこれが高くなることを想定し、j座標（南北座標）に依存して変化させ、東西方向の違いによる変化は考慮せず、底面ブロック（k=1）にそれぞれ与えた。最も南側のブロック（j=1）では  $1.00\text{W/m}^2$  を、北部の j=13（熊沢川の南側）で  $0.11\text{W/m}^2$  を、その間は線型補間により与えた。熊沢川流域の j=14～16 ブロックでは底面からの熱流束は与えていない。以上の結果より底面からの熱流束による総熱流量は、 $5.2\text{MWe}$  となり、前述の質量流束に比べて小さい。

本地域周辺に分布する温泉等の地熱兆候地から放出される熱流量は、熱流量調査から約  $11\text{MWe}$  と見積もられた（地質調査所，1975）。石戸（1998）は、地表での熱流束は深部での熱流束の下限值を与えると報告しており、本モデルで設定されたブロックへの総熱流量  $18.7\text{MWe}$  は、妥当な値と考えられる。

#### c) 地表での流入 / 流出

地表表層では、常温、大気圧が常に維持されている。従って、最上部ブロック（ブロックの中心）においては 3 bar、30 に保たれるための熱・質量の流入 / 流出条件（伝導 - 放射条件）を設定した。なお、この設定圧力については、標高 - 貯留層圧力における実測値とのマッチングにより決定された。

#### d) 北部での流出

地域北方には、噴気・温泉等の地熱兆候が認められる。従って、南部から流入してくる高温流体の一部は、地表水と混合し北方へ流動していることが想定される。この流出口を最北部の一つのブロック（11,16,10）に設定した。流出流量は、上述の底面ブロックからの総流入流量と同じ  $5.0\text{kg/s}$  とし、流入流量と流出流量の収支の均衡を図った。これは最上面ブロックにおいても流入と流出がバランスしていることを意味する。

### 5.3 自然状態シミュレーション

#### (1) 初期条件、計算時間と最大時間ステップ

自然状態シミュレーションにおける初期条件は、底面ブロックを 250、最上面ブロックを 10 とし、その間は線形内挿した。圧力は常温の静水柱圧力勾配 ( $1\text{bar}/10\text{m}$ ) をそれぞれのブロックに与え、ブロック内の相状態はすべて液単相とした。計算時間は 10 万年とし、最大時間ステップを 50 年と設定した。

## (2) 計算結果

### 総エネルギー，流体質量，及び蒸気容積の経年変化

計算開始から 10 万年間の全ブロックの総エネルギー（岩石と流体の合計），蒸気容積，及び流体質量の経年変化を図 5.3 に示す。計算開始とともに高温流体の質量流束と底面での熱流束のそれぞれの流入があるため，これを反映し総エネルギーは，初期の 10,000～20,000 年間で急激に増加する。この変化に伴って蒸気層が形成され，その容積も増加する。一方，蒸気層の発達，即ち流体の容積の増加による圧力上昇は，最上ブロックからの流体の流出を発生させるため，流体質量は，逆に急激な低下が起こる。この流体質量の急激な低下は，浅部圧力の低下を引き起こし，約 25,000 年から地表水のブロックへの流入が発生し，総エネルギー及び蒸気容積の低下と，流体質量の増加が起こる。その後深部からの高温流体の供給と地表部からの冷水の流入がバランスされた時点（60,000 年以降）で準定常状態が得られた。但し，蒸気容積に関しては，準定常状態に達した後でも緩やかな増減が認められる。

### 坑井内温度のマッチング

各坑井基地で代表的な坑井における坑井内温度のマッチング結果を図 5.4 に示す。南部に位置する高温領域での坑井（SA-1 坑）では良好なマッチング結果が得られた。深部に温度インバージョンが観測された SC-1 坑では，その深度での温度インバージョンの再現は困難なものの大局的な整合は図られた。北部の還元領域（SB-4 坑，SD-1 坑，SN-8R 坑）では，深度 1000m 付近において計算結果は実測値より若干高くなったものの大局的な坑井内温度分布の状態は再現できた。

### 貯留層圧力のマッチング

標高に対する各坑井のフィードポイントの圧力のマッチング結果を図 5.5 に示した。各坑井とも計算結果は，実測値の  $\pm 5$  bar の範囲内に収まっており，良好なマッチング結果が得られたことを示している。標高 0m ASL 以浅では実測値より計算結果の方が相対的に高く，逆に標高 -500m ASL 以深では実測値より計算結果の方が相対的に低い結果となっている。

前述のとおりブロック上面の標高は，地表下数 m～数 10m に存在する不飽和帯を考慮しないため，フリーパラメータとして標高 - フィードポイント圧力の実測データと

のマッチングに基づき決定された。最終モデルでのブロック上面の標高は、最も高いレベルで 1,000mASL、最も低いレベルで 500mASL となり、1bar での深度は地表面から約 210m 深となった。これは、掘削時に測定されたキャップロック直下の逸泥層の水位と一致する。

#### 温度，圧力，二相領域の分布

温度，圧力，二相領域及び質量流束のそれぞれの分布を代表的な南北断面（ $i=3, 8$ ）として図 5.6 に示す。各断面とも温度，圧力，二相領域のそれぞれの分布は大局的には同様の結果を示し，二相領域上面のレベルはキャップロック（石仮戸沢層）底面の設定深度とほぼ一致すること，南部の高温領域に向かって二相領域の厚さは厚くなること，二相領域が見られない北部領域では温度は北側に向かって急激に低下することが概念モデルと整合する。また，計算結果では，温度がより高温である西側で二相領域の発達により深部まで及んでおり，噴出特性とも一致する。

二相領域の発達の程度には，高温の質量流束の流量と熱量，底面からの熱流束，キャップロックの浸透率が最も敏感なパラメータとなる（Yano and Ishido, 1995；花野，1994）。本研究においても上記のパラメータを適宜調整し，その改善に努めた。浅部に広がる蒸気層の発達の程度は，圧力分布（標高 - 圧力図において）にも影響を及ぼすとともに，広範囲に分布する蒸気層の存在は北部での温度を観測値以上に上昇させる原因となる。前述のとおりキャップロックの範囲を調節することにより南部域で適度に蒸気層を発達させ，北部域の温度上昇を抑制し，大局的な温度・圧力のマッチングを図った。

圧力分布について，等圧力線は標高 - 500mASL 付近を境に浅部では北傾斜，深部では南傾斜となり流体流動の方向は逆転する。これは，温度分布と整合し，浅部では南部から上昇した高温流体が北方へと流動するのに対し，深部では地表より流入した低温流体が南方へと流動することを示している。これは，Kubota(1988)が火山列からの距離で等圧力線を描き，低温域には下降流が卓越し，かつ，深部で北方域から南方域に流体の流れがあるとした対流系のモデルと調和する。

## 5.4 ヒストリーマッチング

### (1) フラクチャーパラメータ

ヒストリーマッチングでは、生産井/還元井のフィードブロック（及びその近傍）に位置する岩石タイプについては、MINC 法（Pruess and Narasimhan, 1985）を適用した。MINC モデルでは、浸透率が高く、体積割合が小さいフラクチャーゾーンと、浸透率が低く、体積割合が大きいマトリックス部に分割する。そのため、フラクチャー体積割合（ $V_{fr}$ ）、フラクチャー間隔（ $L_{fr}$ ）、マトリックス部の浸透率（ $k_m$ ）及びマトリックス部の分割数（シェル数）のパラメータが付加される。各岩石タイプに与えたこれらのフラクチャーパラメータの一覧を表 5.3 に示す。なお、MINC モデルへ変換したブロックでは、フラクチャーゾーン及びマトリックス部のそれぞれの孔隙率は、変換前のポラスモデルと等価とした。

## (2) 初期条件

初期条件は、自然状態シミュレーションの最終ステップ（10 万年後）の状態（圧力と内部エネルギー）をそれぞれのブロックに与えた（フラクチャーゾーンとマトリックス部は同一条件）。また、ヒストリーマッチングでは、地化学トレーサ（Cl 成分）を考慮するため、初期状態として全ブロック均等に 200mg/kg の濃度を与えた。これは、蒸気生産開始時の生産流体の Cl 濃度の平均値に相当する（加藤ほか、2001a）。また、南部底面ブロックに設定した質量流束においても同様に流入流体の Cl 濃度はこの初期状態と同一条件とした。一方、最上ブロックから流入する流体の Cl 濃度は、10mg/kg と低い値を設定した。

## (3) 解析期間と時間ステップ

計算開始を 1994 年 11 月（試運転開始時）とし、最大時間ステップ 10 日で、2002 年 12 月末まで計算を行った。各坑井の生産流量及び還元流量の月平均値を、対象とする生産ブロック及び還元ブロックに対しそれぞれ流出並びに流入として与えた。また、複数フィードポイントがある坑井（SC-1, SC-2, SC-3, 及び SE-5）ではそれぞれ複数のブロックを設定した。

## (4) 計算結果

### Cl 濃度のマッチング

還元熱水の生産領域への還流は、生産流体の Cl 濃度の増加として現れる。一方、蒸



気復水の還流は、生産流体の Cl 濃度の低下を引き起こす (Kato et al., 2000)。従って、生産流体の Cl 濃度の経年変化は、還元流体の還流の程度を規制する拘束条件として有意義である。Cl 濃度変化をモデリングに活用した事例としては、Amistoso et al.(1993), McGuinness et al.(1995), Kissing et al.(1996), Parini et al.(1996)等が挙げられる。

各生産流体の Cl 濃度のマッチング状況を図 5.7 に示す。Cl 濃度は、蒸気生産開始時 (1994 年末) には各生産井とも概ね 200mg/kg 付近にあり、その後経年的に増加が認められる (S-4 坑, SB-1 坑, SC-1 坑, SC-2 坑)。計算結果は、こうした増加の挙動を大局的に再現されている。S-4 坑では増加のトレンドに関して一致した結果が得られた。SB-1 坑では、1999 年から蒸気復水と分離熱水の還元系統の変更に伴い Cl 濃度に明瞭な変化が生じている。計算結果においても大局的に増減のパターンは観測値と整合している。SC-1 坑のフィードポイントは、より深部に位置し、SC-2 坑のそれは逆により浅部に位置する。一方、還元井のインジェクションポイントは生産井のフィードポイントより相対的に浅部に位置している。計算結果ではこうした関係を反映し、SC-1 坑では Cl 濃度の増加は緩慢であるのに対し、SC-2 坑ではその増加率は高く、若干観測値と差異が認められる。各生産流体の平均値については、計算結果は実測された Cl 濃度の経年変化を、絶対値並びにそのトレンドともよく一致しており、ここで構築されたモデルは還元流体 (分離熱水及び蒸気復水) の還流状況を大局的に再現していることが判明した。

#### 噴出エンタルピーのマッチング

前述のとおり南部の生産領域に位置する SA-1 坑, SA-2 坑, SA-3 坑及び SA-4 坑では蒸気単相 (或いはそれに近い) の噴出挙動が観測されている。これらの生産井に対しては、実測された噴出流量を生産ブロックから生産させると噴出エンタルピーに振動が発生し現実と乖離するという問題が生じた。これは、対象ブロックの生産能力に反して無理に生産を行っていることが原因として考えられたため、これらの生産井に対しては、生産指数に準じたパラメータである Vstar (Pritchett, 2001) を用いて生産ブロックの圧力と比エンタルピーに応じた生産を行い、生産流量と噴出エンタルピーのそれぞれのマッチングを行った。

各生産井の噴出エンタルピー (生産流量を含む) のマッチング結果を図 5.8 に示す。

蒸気単相の噴出エンタルピーに近い挙動を示す SA-4 坑では、それらの噴出期間を通して、噴出エンタルピー並びに生産流量とも良好なマッチング結果が得られた。蒸気生産開始から蒸気単相を示し、その後徐々に噴出エンタルピーの低下が観測される SA-1 坑及び SA-3 坑では、実測値の緩やかな変化のトレンドには一致しないものの噴出エンタルピーの大局的な低下の挙動は再現された。なお、自然状態シミュレーション結果では、これらエクセスエンタルピーを示す生産井のフィードポイントは、いずれも二相領域内に存在しており、上述の噴出特性とも調和する。

ノーマルエンタルピーを示す生産井のうち S-4 坑及び SB-1 坑は、Cl 濃度の経年変化及びトレーサテストから蒸気復水の還流が明瞭であることが判明し（熊谷ほか、2000）、短期間（約 5 年間）に噴出エンタルピーは約 200 kJ/kg の低下が認められた。計算結果では、このような短期間での低下は再現できていない。この原因については、後述（コールドスイープの項）する。

SC-1 坑では実測された噴出エンタルピーは経年的に低下が認められるが、計算結果にはその挙動が再現されていない。同坑井の噴出エンタルピーの低下は、坑井内に析出した硬石膏スケールにより高温フィードの流入率が低下したことが一つの原因となっていることを報告した（第 3 章で詳述）。本解析ではこうした坑井内状況の変化を考慮していないため観測結果との乖離が見られる。SC-2 坑では、計算結果は、実測値の挙動を再現し解析期間中横這いの状態を推移する。各生産井の生産流量で加重平均された平均の噴出エンタルピーについては、解析期間の前半は、計算結果は実測値より低いものの（SC-1 坑のミスマッチが原因）、後半ではお互い整合し、蒸気生産後の噴出エンタルピーの大局的な挙動が再現された。

#### 貯留層圧力のマッチング

本地域では、貯留層圧力の連続観測を地域北部に位置する 2 本の観測井（KY-1 坑及び SN-8R 坑）で実施している。それらの観測状況と計算結果とのマッチング結果を図 5.9 に示す。

KY-1 坑は、E 基地内にある還元井に囲まれた領域に位置する圧力観測井である。運転開始前の一斉噴気試験当時から圧力観測を実施しており、多くの生産井及び還元井と圧力応答が認められている（新エネルギー・産業技術総合開発機構、1991）。この中で生産井 SB-1 坑と同坑井との圧力応答は最も敏感であり、還元領域内にあるにも

関わらず SB-1 坑の噴気開始や停止の影響を強く受けるという特徴があり，1994 年の後半から 1995 年半ばまでの圧力の急激な低下（-10bar）と増加（+15bar）は SB-1 坑の噴気開始と停止を，1996 年後半の急激な低下は，噴気再開の時期にあたる。それ以降 2000 年末まで SB-1 坑は噴気を継続し，貯留層圧力は小さく変動するものの大局的には横這いとなり，2000 年末における SB-1 坑の噴気停止により貯留層圧力は 3bar 上昇するが，1995 年に認められた噴気停止の時ほどの急激な変化は認められない。2001 年後半の噴気再開により貯留層圧力は低下（-8bar）している。

計算結果では，1994 年後半の試運転開始とともに貯留層圧力は低下（-5bar）し，その後大局的に横這いとなり，観測値に見られる SB-1 坑の噴気開始/停止に伴う大きな変動は認められない。しかしながら，還元領域でありながら生産領域の影響により貯留層圧力が低下している挙動については，観測結果と整合し良好なマッチング結果が得られている。なお，1996 年後半から 2000 年末までの SB-1 坑噴気中では，振幅の小さい周期変動が実測値及び計算結果に生じており，これらは蒸気復水の還元量の季節変動（夏季に減少，冬季に増大）を反映すると考えられる。

SN-8R は，D 基地還元領域の北方に位置している。運転開始以降は，自然状態より約 10bar 貯留層圧力は上昇しており，5bar の範囲内で大局的に横這いで推移している。SN-8R 坑近傍の貯留層圧力が高くなっていることは，生産領域との水理的連続性が乏しいことを示唆している。観測された貯留層圧力の増減は，同観測井から最も距離が近い還元井 SD-2 坑の還元量の変化と相関がある。計算結果は，運転開始により自然状態より 1～2bar 低下しており，観測値のような増加は認められない。但し，貯留層圧力の増減のパターンは，応答の程度は小さいものの一致する。

#### 重力変動のマッチング

蒸気生産開始後の重力変動は，二相領域の拡大や縮小，或いは圧力や温度の変化に伴って発生し，貯留層変動を平面的に把握し，かつ，その予測を行う手法として注目される（例えば，Allis and Hunt，1986；石戸ほか，1992；斎藤ほか，1998）。

重力変動の観測値と計算結果の比較を図 5.10 に示す。観測値は，Sugihara and Ishido(1998)により報告されたものであり，運転開始前の 1994 年と運転開始後の 1995 年との変化量を示し，地域の北東部の還元領域で正異常（+60  $\mu$  gal）が発生し，それ以外の領域で負異常となりその程度は南部へ向かって相対的に大きくなる（- 80  $\mu$

gal)。計算結果は、D 基地付近 (SD-1 坑、SD-3 坑及び SD-4 坑の坑底付近) で正異常の中心 (+3 $\mu$  gal) が、また、A 基地付近 (SA-1 坑及び SA-3 坑坑底付近) で負異常の中心 (-5 $\mu$  gal) が分布し、絶対値は異なるものの増減に対する大局的な挙動は観測結果と整合する重力変動分布を示す。正異常の中心は、還元量が最も多い還元領域に位置しており、一方、負異常の中心は、生産領域に位置し、その噴出特性から貯留層では貯留層内沸騰が拡大されつつあることが示唆される。これらの状況と重力変動のパターンはよく一致し、ヒストリーマッチングにおける拘束条件として有効であることが判明した。

#### 鉛直方向の絶対浸透率

鉛直方向の絶対浸透率は、圧力遷移試験 (圧力干渉試験を含め) の解析では取得しがたいパラメータであり、上昇流地域では鉛直方向の圧力分布データから推定することが可能である (石戸, 1998)。しかしながら、ここで対象とする主要生産 - 還元領域は、上昇流域というよりはむしろ側方流動域にあっている。従って、その推定にあたっては各種観測結果との整合性を図りながら調整を行った。高透水性領域である MV3 層及び AA3 層の鉛直方向浸透率をパラメータとした圧力干渉試験、Cl 濃度の経年変化、並びに重力変動のそれぞれの感度解析結果を、図 5.11、図 5.12、及び図 5.13 にそれぞれ示す。

図 5.11 の圧力干渉試験は、噴気井 S-4 坑の影響を観測井 KY-1 坑で捉えた結果を示す。観測結果では噴気開始から噴気停止まで最大 3.6bar の圧力低下が生じているが、感度解析の結果、鉛直浸透率が  $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  の時に最も良好な結果が得られており、鉛直方向浸透率が低いほど圧力応答はより顕著になることが判明した。鉛直浸透率を  $10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と高くすると圧力低下は 1.5bar 未満と非常に小さくなり、観測値を再現できなくなる。S-4 坑と KY-1 坑のそれぞれの逸泥層は、ともに同一層序 (B3) で同じ層序に位置する。同層序では、水平方向の浸透率は鉛直方向のそれより一桁以上高いオーダーを示し、異方性が強い浸透率構造をもつことが示唆される。

図 5.12 には、噴出流体の Cl 濃度の経年変化について、鉛直方向浸透率をパラメータとしてフィードポイントのレベルの違いによる Cl 濃度増加の程度を示す。澄川地域では還元井のインジェクションポイントよりも生産井のフィードポイントが相対的に深い深度に位置する。還元熱水の生産井への還流の程度は、噴出流体の Cl 濃度の変化

として捉えられるが、浅部から還元された還元熱水の深部への流動は、鉛直方向浸透率の程度に影響を及ぼすことが予想される。図 5.12 [ A ] はフィードブロック  $k=5$  ( 標高-1200 ~ -1000mASL ) での、また同図 [ B ] は  $k=7$  ( 標高-800 ~ -600mASL ) での Cl 濃度の変動パターンをそれぞれ示す。より深部のフィードブロックでは、鉛直方向浸透率が  $5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  以下であると Cl 濃度の増加は緩慢であり、 $10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と高い値では増加が顕著となる ([ A ])。一方、より浅部のフィードブロックでは、鉛直方向浸透率が  $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と小さい値であっても Cl 濃度の増加は起こり、鉛直浸透率の増大に伴い増加率は高く、かつ、増加はより早期から発生している ([ B ])。以上より、鉛直方向浸透率は、還元流体の還流の程度に関し敏感なパラメータとなることが判明した。

前述の運転開始 1 年後の重力変動の計算結果から、負異常の中心となった A 基地 ( 生産基地 ) と、正異常の中心となった D 基地 ( 還元基地 ) において、重力変動の挙動に関して感度解析を試みた。鉛直方向浸透率が  $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と低い場合には、生産基地及び還元基地ともに常に正異常を示し、単調に増加する挙動を示す。これは鉛直方向浸透率が低いため還元流体は生産ブロックの深部への流動が抑制される一方、生産ブロックの浅部の二相領域へ流動し蒸気飽和度が低下する。従って、この場合には、重力変動は、浅部で生じる還元流体の挙動に強く影響されることを示している。一方、鉛直方向浸透率が  $10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と高い場合には、生産基地及び還元基地ではともに負異常を示し、変動パターンは逆転する。これは浅部に還元された還元流体は、深部の生産ブロックへと容易に流動し、還元領域においても生産領域の影響を強く受け、負異常を示すと考えられる。鉛直方向浸透率が  $5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  と中間の場合には、生産基地では単調に負異常となるが、還元基地では生産開始から 5 年後までは正異常となり、観測結果と整合する変動パターンが得られる。

以上のように高浸透率領域での鉛直方向浸透率は、貯留層の状態を示唆する有意義な観測値に対し敏感な挙動を示し、モデルを規制するパラメータとして重要な役割を果たすことが判明した。特に還元流体の流動を検討するヒストリーマッチングにおいて有用となる。

#### 貯留層内沸騰過程

貯留層内沸騰の過程は、マトリックス部からフラクチャーゾーンへの熱伝導の効果

によって生じ、そのメカニズムについては、石戸（2002）により詳述されているが、その再現にあたって MINC 法の適用が不可欠であることは、既に Pruess and Narasimhan（1982）に報告されている。その際、フラクチャーパラメータとしてマトリックス部の絶対浸透率（ $k_m$ ）及びフラクチャースペーシング（ $\lambda$ ）が有効なパラメータとなることが、Pritchett and Garg(1990)、矢野ほか(1994b)等により、架空モデルを用いて検討されている。ここでは、本研究で開発された実際のモデルを用いて  $k_m$  と  $\lambda$  をパラメータとして噴出エンタルピーの感度解析を行い、エクセスエンタルピー（特に蒸気単相の噴出）の挙動について検討した。

図 5.14 には、SA-4 坑の噴出挙動を対象として、このフィードブロック並びにその周辺の地層（C/E1, C/E 2, B1, B2）の  $k_m$  と  $\lambda$  に対する噴出エンタルピーを示す。 $k_m$  は、 $1 \times 10^{-19} \sim 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  との 4 条件、 $\lambda$  は 30m 及び 100m の 2 条件とした。SA-4 坑のフィードブロックは生産開始前から既に二相領域内にあり、すべての条件で噴気開始とともにエクセスエンタルピーとなる。 $\lambda$  に関わらず  $k_m$  の低下に伴い噴出エンタルピーは増加する。噴出開始から蒸気単相の噴出が継続して発生する条件としては、 $k_m = 1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  及び  $\lambda = 30\text{m}$  という結果が得られた。また、蒸気単相の噴出が発生する際に、しばしばある時点で噴出エンタルピーが突然急激に低下する現象が認められる（例えば、 $\lambda = 30\text{m}$  の  $k_m = 1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 、 $\lambda = 100\text{m}$  の噴気開始直後）。これは圧力低下が極度に起こり、蒸気飽和度が最大（1.0）となり、その後に周辺部から流体の供給が発生し、圧力低下の回復とともに蒸気飽和度の低下が起こることによる。

図 5.15 には、本モデルによりベストフィットが得られた際の SA-1 坑及び SA-4 坑のそれぞれのフィードブロックでのフラクチャーゾーンとマトリックス部（中心）の温度、圧力、蒸気飽和度の経年変化を示す。SA-1 坑では、噴気開始とともにフラクチャーゾーンの圧力低下（同時に温度低下）が発生し、蒸気飽和度は最大となる。その後周辺からの流体の供給により圧力回復が見られ、これに伴い蒸気飽和度は低下する。これらの変化は急激に起こる。その後フラクチャーゾーンの温度、圧力及び蒸気飽和度は安定する。これに対し、マトリックス部の各状態量の変化は緩慢であり、緩やかな温度・圧力の低下と蒸気飽和度の増加が見られる。7 年経過後においてもマトリックス部とフラクチャーゾーンとの間には熱平衡並びに圧力平衡は達していない。SA-4 坑では、噴気開始とともにフラクチャーゾーンの圧力は顕著に低下が見られるが、同温度の低下は小さく、マトリックス部との差は大きくない。これより、マトリックス

部は常に飽和状態であるが、フラクチャーゾーンでは噴気開始により過熱状態に移行していることが判明した。また、マトリックス部の蒸気飽和度は、0.2 付近で安定し、SA-1 坑のような増加は認められない。

#### コールドスウィープ過程

還元流体（ここでは分離熱水と蒸気復水）は貯留層温度より低く、還元の後その一部は生産領域へ向かって流動し、その流動過程で岩盤から熱の供給を受け、再噴出される。フラクチャーモデルにおいて、その際の熱伝導の程度は、フラクチャースペーシング（平均的なフラクチャー間隔）に依存することが、石戸（1991）により報告されている。澄川地域では、生産井 S-4 坑及び SB-1 坑において還元流体の早期還流により温度低下が発生していることが、第 4 章で詳述されている。

図 5.16 では、フラクチャースペーシング（ ）をパラメータとした SB-1 坑の噴出エンタルピーの低下の挙動に対する感度解析結果を示す。SB-1 坑は蒸気復水用還元井 SE-2 坑と距離が近くその還流の影響を受け、約 3 年間で 150kJ/kg のエンタルピー低下が発生した。このような短期間でエンタルピー低下を再現するためには、 を 400 m 以上の大きな値にする必要がある。一方、 をグリッド間隔（200m）と同程度かそれ以下ではエンタルピー低下は非常に緩慢であり、観測値を再現できないことが判明した。

澄川地域のフラクチャー間隔については、窪田（1985）により平均して 300m に 1 回の割合で逸泥が発生すると報告した。その後坑井数が増えたものの概その頻度は同程度で変わらない。従って、噴出エンタルピーのマッチングを向上させるために をグリッド間隔を越えて過剰に高く設定することは、実際とは乖離する。

図 5.17 には 1999 年実施した SE-2 坑でのトレーサテストの解析結果を示す。観測では、トレーサ投入から 3 日後に再湧出があり、同図に示されるシャープなピークが現れた。本モデルで得られた計算結果ではトレーサ応答は認められるものの、応答カーブはブロードとなり、シャープなピークは得られていない。こうした挙動が噴出エンタルピーの再現を困難にさせている原因の一つになっていることが考えられる。

唐崎（1993）は、注水による周辺坑井への短絡のような挙動は、不均質性やフラクチャーを具体的に表現しない MINC モデルでは扱えず、フラクチャー独自のモデル化が必要であることを報告した。ここでの SB-1 坑に見られる還元流体の早期還流につ

いても同様に、MINC モデルではなく、個別のフラクチャーのモデル化が必要と考えられる。

## 5.5 生産予測シミュレーション

### (1) 解析条件

ヒストリーマッチングで得られた結果を初期条件として、10年間（2002年1月～2011年12月）の生産予測シミュレーションを実施した。解析条件を表5.4に、使用した生産井・還元井の座標並びに生産指数に準じた変数（Vstar）を表5.5に示す。

解析条件は、実際の発電システムに則り、設備容量 50MWe、タービン入口圧力 5bar、蒸気復水の発生率は 32%（年平均値を設定）、単位蒸気流量当りの発電出力は 0.45MWe/(kg/s)とした。還元方法については、基本計画は 150 での高温還元であるが、現在一部大気圧還元が実施されている状況を考慮し、150 還元と大気圧還元の 2 条件を設定した。また、生産井は、現在使用している生産井（8 本）を基本として補充井がある場合とない場合の 2 条件を設定した。補充計画は、10 年間で 3 本（1 年後、4 年後、7 年後）である。また、還元井（分離熱水用 9 本；蒸気復水用 4 本）は、2002 年 1 月現在の使用坑井であり、それ以外の補充井は解析期間中には考慮しないものとした。

### (2) 発電出力、噴出流量、噴出エンタルピー及び Cl 濃度の予測

2002 年から 2011 年までの生産予測シミュレーション結果を図 5.18 に示す。同図には 1995 年の運転開始時から 2001 年までのヒストリーデータも併せて示す。

発電出力、噴出流量、噴出エンタルピー及び Cl 濃度の初期値は、前述の坑井毎に設定する Vstar を適宜調整し、いずれもヒストリーデータの最終値となるように修正した。発電出力は補充井がないケースでは緩やかに低下し、減衰率は 150 還元（1.8%）より大気圧還元（2.3%）の方が若干大きい。補充井追加のケースにおいては、適宜出力の回復が見られ大局的に 45MWe を確保できる出力で推移する。各補充井追加後の減衰率は 2～5%の範囲内で概ね実績と同程度を示している。補充井がないケースと同様に、150 還元の方が大気圧還元より出力は高く、その差は経年的に大きくなる。各ケースの 10 年間の総発電量は以下のとおりである。

- ・ 150 還元（補充井あり）  $4.07 \times 10^9$  kWh（平均利用率 92.9%）



- ・大気圧還元（補充井あり）  $3.88 \times 10^9$  kWh（平均利用率 88.6%）
- ・150 還元（補充井なし）  $3.34 \times 10^9$  kWh（平均利用率 76.3%）
- ・大気圧還元（補充井なし）  $3.22 \times 10^9$  kWh（平均利用率 73.5%）

噴出流量と噴出エンタルピーの挙動には、150 還元と大気圧還元で相反する結果が得られた。前者に比べて後者は、噴出流量が低く、噴出エンタルピーは高い。またそれぞれの減衰率は、噴出流量では後者が高く、噴出エンタルピーでは前者が高いという特徴をもつ。これは、大気圧還元では還元温度が低いと還元流量も少ないため、貯留層圧力の低下が促進され、その影響により貯留層内沸騰が活発化し、噴出エンタルピーは高くなると解釈される。

Cl 濃度は、補充井の有無による変化の違いはほとんど見られず、大気圧還元の方が 150 還元より Cl 濃度の増加は顕著である。これは、分離熱水は大気圧フラッシュにより Cl 濃度の増加が起こり、これを反映する。

以上の 10 年間の生産予測シミュレーションの結果、噴気停止に陥った生産井はいずれのケースでも認められず、坑口圧力 5bar での噴出条件で継続噴気が可能との結果が得られた。

### (3) 温度，圧力，二相領域の分布

生産開始 17 年後の温度，圧力，二相領域，質量流束の分布について、高温還元（補充井考慮）のケースでの代表的な南北断面（ $i=3$  及び  $i=8$ ）を自然状態とともに図 5.19 に示す。生産開始 17 年後では、浅部の領域では 250 及び 300 の温度範囲は狭小となり、温度低下が明瞭に認められる。また、同温度範囲の二相領域内では、主要生产 - 還元域を中心に圧力低下が顕著に起こっている。この生産ゾーンでの二相領域内では鉛直方向の圧力勾配は緩くなり蒸気飽和度が高くなっていることが示唆される。生産領域での圧力低下に伴って、同ゾーンでは生産開始前に比べて浅部の二相領域は、より厚く、深い深度へと進展が認められる。断面図  $i=3$  に比べて断面図  $i=8$  の方が、生産流量並びに還元流量は相対的に多い。これを反映し、後者の方が還元領域から生産領域へ向かうコールドフロントは、より生産領域側に位置しているのが特徴的である。

## 5.6 貯留層管理の課題

前述のとおり現状の生産を継続すると減衰は不可避であるため、定期的な生産井の補充が必要となる。しかしながら、新たな生産井の追加は、熱水噴出量の増加を招き、還元対策も同時に検討する必要がある。

還元流体の生産井からの早期還流は、岩盤からの熱回収の効果が小さく、生産ゾーンの温度低下を招き、蒸気流量の低下を引き起こす。このため多くの地域では、生産ゾーンからできるだけ遠方に離して還元ゾーンが設定される。澄川地域においてもこのような生産 - 還元設計を取り入れたものの、生産開始前には流動経路の推定が不十分であり、運転開始以降短期間に温度低下が発生した生産井がいくつか認められた。地化学モニタリングやトレーサテストから還元流体の早期還流が判明した生産井では、その周辺の還元井の運用を変更し（例えば、温度が低い蒸気復水から温度が高い分離熱水への還元に切り替え等）、減衰緩和に成功した事例も見られる。

還元流体によるコールドスウィープの効果を高める対策にあたっては、生産ゾーンと還元ゾーンの水平距離を確保すると同時に、還元深度の設定についても再検討を要する。現在では過半数の還元井の還元標高は、生産井の生産標高より浅部に位置している。こうした状況下では、還元井から生産井への還流の速度は鉛直方向の浸透率が重要なパラメータとなる。本研究では、鉛直方向の浸透率について感度解析した結果、水平方向に比べて10分の1程度と低い値が抽出された。鉛直方向の浸透率が相対的に低い場合、還元標高を生産標高より高く設定することは、還流を抑制する効果が働くことになる。しかしながら、鉛直方向浸透率が高い場合、浅部に還元した還元流体は深部の生産ゾーンに流動しやすいため、還元ゾーンの標高を深部に設定することが必要となる。一方、有木（2002）は、還元温度が及ぼす還元能力への影響についてフィールド実験（澄川地域）並びに数値シミュレーションにより研究し、還元温度が低いほど、流体比容積の低下や岩石の熱収縮等の効果により透水性の増加と坑井近傍の圧力低下が起こり、見掛け上の還元能力は増大することを報告した。このような挙動が起こるには鉛直方向の浸透率が相対的に高い環境（即ち、断裂型貯留層）で顕著に発生し、本研究の結果と矛盾する。今後は、トレーサテストにより還元深度の違いによる還流の程度を定量的に把握し、生産領域の温度低下を抑制する最適な還元深度を検討する必要がある。

一方、還元による生産ゾーンでの貯留層温度の低下を抑制するために、熱水の噴出量を抑制することも対策の一つとして検討する必要がある。熱水噴出量を抑制するこ

とは、噴出流体の比エンタルピーを上げることを意味する。澄川地域では、蒸気単相に近い噴出特性をもつ比エンタルピーが高い生産井がいくつか認められる。また、本地域の南部ではキャップロック下の浅部には、蒸気層がある程度の厚さで分布し、ここからの蒸気生産は高エンタルピー流体の噴出が期待される。しかしながら、浅部の開発は、本地域の貯留層浅部には酸性ゾーンの存在が確認されていること、非凝縮性ガス濃度が高いこと、また、浅部からの蒸気生産では深部からのそれに比べて噴出流量が多い生産は期待できないことといういくつかの短所も存在する。今後はケーススタディを行い、より具体的な検討が必要である。

## 5.7 結言

生産開始前に作成された既存モデルを見直し、現在の貯留層を再現するモデルの構築を図り、同モデルを用いて生産予測を行った結果、以下の知見が得られた。

控えめな予測を行うため、既存モデルに比べ水平方向の浸透率では最大  $200 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  から  $80 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  へ、また、ヒートソースとして与えた高温流体の流入量では 31.0MWe から 18.7 MWe へ、それぞれ下方修正を行った。こうした条件においても自然状態の再現には充分であることが判明した。

鉛直方向の絶対浸透率については、圧力干渉試験、Cl 濃度変動及び重力変動により感度解析を行った結果、 $1 \sim 5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  の範囲で良好な結果が得られた。これは水平方向の浸透率より約 10 分の 1 の低い値となり、本地域が貯留層構造的に断層等の縦型フラクチャーにより支配される地熱系ではないことと整合する。また、複数の拘束条件を用いて鉛直方向の浸透率を決定することは、モデルの精緻化において重要であることが判明した。

貯留層内沸騰並びにコールドスウィープ過程を再現するために MINC モデルへの変換が必要不可欠となった。エクセスエンタルピーの再現にはマトリックス部の絶対浸透率が敏感であり、 $1 \times 10^{-18} \sim 10^{-19} \text{ m}^2$  の値で蒸気単相に近い噴出特性が得られることが明らかになった。

生産予測の結果、3 年毎の補充生産井の追加により利用率 90% 以上を確保しうることが判明した。また、大気圧還元は、高温還元 비해還元温度が低く貯留層温度の低下が懸念されたが、フラッシュ蒸気の大気放出の分が質量欠損の増大となり、貯留層圧力の低下を招き減衰率がより高くなることが判明した。

貯留層管理の上で、今後は、生産井の補充による出力回復と同時に、還元能力の増強が要求される。生産領域の温度低下を抑制するためには、生産井からより遠方へ還元領域を確保する必要がある。熱水の噴出を抑制するための浅部二相領域からの蒸気生産は、今後の検討課題となる。