

## 第6章 結論

### 6.1 まとめ

本研究は、秋田県澄川地熱発電所を対象フィールドとして、そこで生じた蒸気減衰に関わる諸問題をテーマとして選定し、蒸気減衰や貯留層変動のメカニズムを解明し、適正な貯留層管理について検討を行ったものである。

第1章では、緒論として、地熱開発の取り巻く環境、並びに地熱資源の特性について解説し、発電出力を維持する上で貯留層管理の重要性を指摘した。併せて、従来の研究を概観し、本研究の目的とテーマ概要について取り纏めた。

第2章では、対象フィールドとなる澄川地熱発電所の運転状況と、貯留層特性について詳述し、併せて、蒸気減衰の諸問題について言及した。以下のように要約される。

本地域は、八幡平火山地帯に位置し、南北に並走する花輪沈降帯と、東西系の八幡平 - 焼山の火山列の交差部にあたっている。熱源は、同火山列の地下深部と想定され、熱源付近では上昇流が、北方の低温域では下降流が発生し、全体として一つの対流系が形成されている。

貯留層は、浅部に蒸気層を伴う熱水卓越型貯留層の特性をもち、蒸気層は湖沼堆積物やモンモリロナイト変質帯からなるキャップロックにより地表への流出が抑制されている。地熱流体は、断裂系を通して流動しており、第三系（西黒沢階～台島階）のデイサイト質凝灰岩、黒色頁岩、変質安山岩等や、これらに貫入する第三紀花崗閃緑岩が貯留岩となる。

地熱発電所は、1995年3月より認可出力50MWeとして、生産井6本、還元井9本で運転を開始した。運転開始2年後までは定格の出力を維持していたが、その後出力低下が認められ、1998年9月までに42MWeまで低下した。減衰が顕著なSC-1坑でスケール除去の改修工事が実施され、出力は47MWeまで回復した。しかしながら、減衰は止まらず2000年9月には出力は35MWeまで落ち込んだ。その後生産井SC-3坑の補充により、再び出力は44MWeまで回復した。総生産流量は、大局的に横ばいであるが、比エンタルピーは経年的に低下傾向を示す。

貯留層管理の一環として実施された噴出特性調査、地化学モニタリング、トレーサ

テスト, 検層(坑井内調査)等により, 減衰の主要因は, 坑井内スケールのほかに, 還元流体の早期還流による生産領域周辺の貯留層温度の低下が示唆された。貯留層内の流体流動の挙動の推定には, 流体地化学(熱水成分, ガス成分, 同位体)が重要な役割を果たすことがモニタリングを通じて明らかとなった。

第3章では, 坑井内スケールにより蒸気減衰が生じた生産井 SC-1 坑について, そのスケール生成メカニズムを, 取得されたデータ, 並びに化学平衡論に基づく解析により解明し, スケール成長とこれに伴う蒸気減衰予測のためのモデルを構築し, 同モデルを用いてそれらの予測・評価を実施した。その結果以下の知見を得た。

同坑井は, 坑底付近に温度インバージョンをもち, 地熱流体は低温及び高温の両ゾーンから流入する。硬石膏スケールはこれらの流体が坑井内で混合する直後で生じている。また, 硬石膏スケール及び熱水の化学分析値から求めた Sr 分配係数は, 海底熱水鉱床のチムニーと同様に非平衡条件下で生成されたことを示唆する。

SC-1 坑へ流入する高温流体及び低温流体の混合モデルによる化学平衡計算の結果, 硬石膏の沈殿は坑井内へ流入する際には高温及び低温の各熱水はそれぞれ硬石膏に関しほぼ飽和しているにも関わらず, 坑井内にてそれらが混合することで混合熱水は硬石膏に関し過飽和となり沈殿が生じるものと考えられる。さらに, 硬石膏に過飽和な混合流体は, 坑井内を上昇する過程でフラッシュする。沸騰により流体の温度は低下するため, 熱水は硬石膏に関し不飽和となる。従って, フラッシュポイントより浅部では, 硬石膏の沈殿は起りにくい。これは, 流体包有物の観察結果並びに坑井内調査(キャリパー検層及び PTS 検層)結果とも整合する。

硬石膏に過飽和状態の地熱流体が, 坑井内を上昇する過程である特定区間に硬石膏を沈殿する現象に対して, 非定常ピストン流モデルを用いてモデル化を行った。さらに, 既存の坑井内流動シミュレータと組み合わせ噴出流量の変化も併せて解析した。

2 年間の蒸気生産中に生じるスケール沈殿に対し, 沈殿速度定数を未知変数として与え, キャリパー検層データを実測値としてヒストリーマッチングを行った。キャリパー検層から得られた硬石膏の沈殿量は,  $\log k = -6.00$  と  $\log k = -5.00$  におけるヒストリーマッチングから得られた沈殿量のそれぞれの間にとまり, 両者は概ね一致する。また, 沈殿速度定数 ( $\log k$ ) は,  $-4.50$  の時に, 厚さにおいてはもっとも実測値

に近いスケール層厚が得られ、スケール成長の大局的な挙動が再現された。

ヒストリーマッチングで得られた最適な沈殿速度定数とその周辺の値を用いて、今後 4 年間のスケール成長と噴出流量の将来予測を行った。時間経過とともにスケール層厚は直線的に増加するのに対し、噴出流量の低下速度は増加する。また、沈殿速度定数のわずかな違い ( $\log k$  で  $\pm 0.25$ ) が噴出流量の低下に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。

本モデルでは、ケーシングのスリットの有無により発生する局所的な流動状況の変化や、ケーシング径の境界における不連続的な変化によって生じるスケール成長について、充分再現するような結果は得られなかった。感度解析の結果からも本モデルは、坑井内流速はスケール沈殿に鈍感であるということが判明した。

第 4 章では、代表的な生産井の地化学モニタリングデータから、それらの還元流体還流のメカニズムを解明した。これに基づき、生産 - 還元を表現するランプトパラメータモデルを構築し、同モデルを用いて還元流体の還流率、並びに各生産井が貯留層内に支配する生産領域の広がりを定量的に解析した。その結果以下の知見を得た。

蒸気復水をトレーサとしたランプトパラメータモデルにより各生産井の還流状況並びに生産タンクの容量を推定した。解析により化学成分の季節変動は十分再現され、実測値と整合する結果が得られた。化学成分の季節変動が認められる坑井では、蒸気復水の還流率が相対的に高く、これが認められない坑井ではその還流率が低い。これは、トレーサテストの結果とも整合する。

各還元区域からの還流率には、明瞭な違いが認められた。R3 区域からは約 9 割の還元熱水が各生産領域へ還流しているのに対し、蒸気復水の還元区域 (R1) の還流率は約 2~3 割と相対的に低い。また、S-4 坑では、生産井および還元井の追加に伴い還流率および生産タンクの容量が変化していることが判明した。

生産タンクの容量が小さい坑井では、還元流体が再噴出するまでの平均滞留時間は短く、岩盤との熱交換が行われている空間が狭いため温度低下が発生している。一方、これが大きい坑井では平均滞留時間も長く、還元流体と岩盤との熱交換が比較的広範囲に行われていて温度低下は緩慢である。

感度解析の結果、評価された未知変数の最適値の許容範囲は、還流率で概ね  $\pm 0.05$  ( $\pm 5\%$ )、流体質量で概ね 1/2~2 倍と評価された。これらは坑井毎に若干変化し、

本モデルでは季節変動が明瞭な坑井ほど得られた最適解の妥当性が高いことがわかった。

第 5 章では、運転開始前に構築された貯留層モデル（分布パラメータモデル）を改良し、貯留層モデルの再構築を図った。特にモデル精緻化のために行ったヒストリーマッチングでは、MINC モデルを適用し、複数の観測データを拘束条件として適用した。これらの過程により作成されたモデルを用いて生産予測シミュレーションを実施し、将来の貯留層挙動と発電出力の変動を推定し、今後の貯留層管理の課題について言及した。そのまとめを以下に示す。

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 18.7MWe 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、高温還元に比べ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。

第6章では、結論として、前章までに得られた知見について取り纏め、併せて今後の課題について補足した。

## 6.2 今後の課題

### (1) 坑井内モデル

本研究で実施したスケール成長とこれに伴う噴出流量予測のモデル化は、効率的な生産井の運用並びに最適な掃坑工事の計画を立案する上で貴重な資料を提供する。また、SC-1坑と同様な性質をもつ生産井に対してもその予測に適用が可能であり、蒸気生産の管理に資するものとなる。

一方、局所的な流速の変化に対応したスケール成長の変化に対して、十分な再現がなされなかった問題点については、今後のモデルの改良が必要となる。スケール成長プログラムと坑井内流動シミュレータとのカップリングは、現時点ではなされておらず、今後の課題となる。また、本研究では硬石膏スケールに焦点をおいて解析されたが、坑井内スケールは、炭酸塩鉱物、硫酸塩鉱物、硫化鉱物、酸化鉱物、珪酸塩鉱物等多種類に及ぶ。これらを含めた汎用性のあるシミュレータの開発が期待される。

### (2) ランプトパラメータモデル

本研究により、蒸気復水の化学的性質は、貯留層流体および還元熱水と異なるため自然トレーサとして重要な役割を果たすことが判明した。また、ここで開発されたモデルは、貯留層管理を行う上で還元流体の生産領域への還流の程度、並びに個々の坑井の生産に關与する影響範囲を推定するための客観性を有した簡便なツールとなる。

一方、本研究で取り扱ったモデルは、液相単相のモデルであり、気液二相貯留層には対応していない。今後は二相領域を考慮したモデルを開発することにより、より汎用性の高い解析が可能となる。また、生産井同志の干渉も全く考慮されていないが、現実にはそれらの影響も少なからず認められている。これについてもモデルの改良が期待される。

### (3) 分布パラメータモデル

既存モデルを見直し、浸透率分布、ヒートソースの熱量等を下方修正することで、噴出エンタルピー、貯留層圧力（圧力観測井）、Cl 濃度と重力変動の挙動の再現に向上が認められ、モデルの精緻化が図られた。これを用いた生産予測シミュレーションでは、総生産流量並びに噴出エンタルピーは現在のトレンドの延長線上を推移し、今後の生産予測として妥当な結果を示した。今後の貯留層管理、並びに補充井計画に資するモデルの構築が図られた。

本研究では、生産開始後の挙動（コールドスウィープと貯留層内沸騰）を再現するためにMINCモデルを適用し、従来のポラスモデルに比べ著しい改善が認められた。しかしながら、還元井から生産井への短絡により短期間のうちに比エンタルピーが低下する現象に対しては、十分な再現がなされていない。こうした挙動に関しては、MINCモデル（統計的なフラクチャーの特性の概念）での対処では適当ではなく、ブロックの細分割により個々のフラクチャーゾーンのモデル化（discrete fracture model）が不可欠となる。これについては、澄川地域の貯留構造（地質構造とフラクチャー分布の関係）の解明とともに、適宜モデルの改良が必要である。