

外倉22-42

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

地熱貯留層管理のための貯留層並びに坑井内の
モデリング技術に関する研究

(Study on modeling of reservoir and wellbore
for geothermal reservoir management)

申 請 者

加藤 久遠

Hisao Kato

2003 年 3 月

地熱発電所の操業において、発電出力を維持していくには、運転開始前に地熱貯留層のポテンシャルである発電規模を的確に予想すること、並びに地熱貯留層の特性に見合った効率的な生産－還元を行うことが不可欠な条件となり、貯留層管理の果たすべき役割は大きい。モデリング技術は、現状の貯留層の状態とその挙動の予測の際に適用され、貯留層管理の中で重要な役割を果たしている。

本研究は、貯留層と坑井内のモデリングを通して貯留層の物理化学的挙動や坑井内の噴出挙動の把握並びにその予測に関する技術の開発を行い、適正な貯留層管理に資することを目的とし、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、地熱開発を取り巻く環境、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の管理が重要であることを指摘した。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た。併せて、蒸気減衰の諸問題について言及した。

運転開始2年後から蒸気減衰が顕著に認められ、補充生産井の適宜追加、並びに既存坑井の改修工事が実施され、出力回復が行われた。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（坑内調査）等により、減衰の主要因は、坑内スケールの付着と、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にあることが推定された。

第3章では、坑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の予測のためのモデルを構築し同モデルを用いてそれらを予測し、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内で混合した直後で生じている。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、坑内へ流入する高温及び低温の各熱水はそれぞれ硬石膏に関し丁度飽和しているにも関わらず、坑内にてそれらが混合すれば、混合熱水は硬石膏に関し過飽和となり硬石膏沈殿が生じるものと考えられる。

硬石膏に過飽和な混合流体は、坑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による噴出流量の変化も解析した。

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収まり、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、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 ± 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。

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、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著しい温度低下が起きている。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 ± 0.05 ($\pm 5\%$)、流体質量で概ね $1/2 \sim 2$ 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。同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、以下の知見を得た。

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 31.0 MW から 18.7 MW 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 低い値となり、本地域が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 (multiple interacting continua) 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。

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。

以上を要約すると、本論文は、貯留層並びに生産井坑内のモデリングを通して、蒸気生産開始後の貯留層及び生産井坑内で発生している現象に対する理論的な解釈とその挙動の将来予測を行ったものである。特に、坑内のモデリングに関しては、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とともに、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。また、貯留層のモデリングに関しては、今回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関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とともに、貯留層管理上、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こと、生産領域の温度低下を抑制するために生産井からより遠方へ還元領域を確保する必要があること、並びに、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が必要となることが、課題として抽出された。これらは、地熱貯留層の適正な管理に大きく貢献するものといえる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2003 年 3 月

審査員

(主査) 早稲田大学助教授	理学博士 (東京教育大学)	円城寺 守
早稲田大学教授	Ph. D (スタンフォード大学)	在原 典男
早稲田大学教授	理学博士 (東京大学)	内田 悦生