

氏 名	花 野 峰 行
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 1 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 53 年 3 月 東北大学工学部精密工学科卒業
学 位 論 文 題 目	蒸気卓越型地熱貯留層の挙動評価と管理に関する 貯留層工学的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 林 一夫 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 中塚 勝人

論 文 内 容 要 旨

蒸気卓越型地熱資源は、生産井の坑口から蒸気のみを噴出する地熱資源である。このため、地熱資源の中では最も容易に発電を行うことができるため、最も古くから商業規模の開発が行われているが、一部の地域では無計画な乱開発による発電出力の低下が問題となっている。

蒸気卓越型地熱資源に関する研究は、従来、工学的な面や理学的な面から多く行われている。しかし、現在までのところ、実在する蒸気卓越型地熱貯留層の、熱水対流系の発生とそれに引き続く貯留層の初期状態の発生から、生産に伴う貯留層の変化までを一連の現象としてとらえ、実際のデータ解析や理論解析にもとづいてその現象を明らかにしようとした研究はほとんど行われていなかった。

本研究では、蒸気卓越型地熱地域での開発における、適切かつ効率的な開発、生産ならびに評価技術の確立をめざし、従来までの方法に地熱貯留層工学的考え方に基づく手法を系統的に導入して、蒸気卓越型地熱貯留層の貯留層管理を系統的に検討した。そのため、我が国において唯一の商業規模の開発の行われている蒸気卓越型地熱地域である岩手県松川地域をその題材として選び、過去に蓄積されたデータや現地試験によるデータ取得による、貯留層の初期状態ならびに現在状態の調査に基づき、長期的な生産に伴う貯留層の挙動変化を明らかにし、最終的には、蒸気卓越型地熱地域において、効率的かつ安定な開発、生産ならびに評価を行うための、貯留層工学的解析・評価に基づく貯留層管理基準を提案した。これらの研究結果は以下のように要約される。

- (1) 蒸気卓越型地熱貯留層の貯留層管理を行う上での基本の一つである貯留層の経時変化をとらえ、貯留層の現在状態を明らかにする方法について検討し、それに基づき松川地熱貯留層の現状を明

らかにした。

①松川貯留層には、図1に示したように、南西から北東に向かう急激な貯留層圧力の勾配があり、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。この現象は、蒸気生産記録や蒸気化学性状の分布からも支持される。

②図1に示した松川の貯留層圧力分布は開発地域の外側からの蒸気の供給に強く影響を受けている。このことから、当地域の貯留層は、現在開発している地点からさらに南西方向に広がっている可能性が極めて高い。

③水位観測結果や圧力ビルドアップテスト結果から、当地域の貯留層圧力の低下はゆるやかであることがわかった。また、蒸気供給源に近いと考えられる坑井の蒸気生産量低下も非常にゆるやかであり、当地域においては当分の間この傾向は続くものと考えられる。

④松川地域においては、水位観測、圧力ビルドアップテスト、生産蒸気の化学性状調査を継続することにより、貯留層管理のための重要な情報を得ることができる。

(2) 開発前に取得された調査結果から、蒸気卓越型地熱貯留層の初期状態を明らかにする方法について検討し、それに基づき、松川地熱貯留層の初期状態を明らかにした。

①松川地域の開発初期に掘削された坑井の、掘削終了後に実施された温度回復測定結果から推定した各坑井の流入点の圧力はその標高に直線的に比例した。この傾きは典型的な熱水型の地域である葛根田における値とほぼ同じである。

②ここで得られた圧力は、平均的な貯留層の温度と考えられる約260°Cに対応する飽和圧力に、炭酸ガスの分圧を加えた値よりはるかに高い値であり、熱水単相の状態であったと考えられる。

③これらの坑井が掘削された開発初期においては、松川地域の生産ゾーンは熱水で満たされていたと考えられる。また、その当時、キャップロックの下に薄い蒸気卓越ゾーンが存在していた可能性が高い。松川地熱貯留層の開発前の初期状態の概念モデルを図2に示す。

④このような状態から生産を開始した直後は、坑井周囲のき裂内で流体が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。その後、貯留岩体ならびに周囲からの流体の供給は少ないが、熱の供給は十分であったためフラッシュフロントが徐々に遠方に進展して行き、乾き蒸気のみを生産する蒸気卓越型の状態となったと考えられる。

(3) ここ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数値シミュレーションによりその可能性を検討した。このため、松川地熱貯留層の形成と、生産に伴うその変化を大局的に再現することを目的として、松川地熱貯留層を単純化した2次元断面ポラスモデルによる自然状態シミュレーション解析を実施した。

①松川地域の温度検層結果を解析した結果得られた熱流束を与えたところ、実測された温度分布ならびに推定された圧力勾配が十分満足できる程度に再現され、上に述べた初期状態がよく再現された。

②ここで得られた初期状態から生産を行ったところ、ここで得られた初期状態から過熱蒸気が生産されるようになることが確認され、やはり、上に述べた初期状態が十分成り立つことが確認された。従って、各種の予測解析を行う際に不可欠な初期状態の概念モデルを確定することができ

た。

③パラメータスタディを行ったところ、貯留層の上部および側部に浸透率のきわめて低い庶蔽が存在しなければ、蒸気卓越型の初期状態も形成されなければ、また、過熱蒸気を生産する状態にもならないことが明らかになった。従って、本貯留層には生産に伴う外部からの流体の供給はほとんどないことが明らかになった。

④自然状態における熱流束から推定すると、今回シミュレーションの対象とした深度以深の、熱水対流系の底となる場所から至近距離に、溶融状態あるいはそれに非常に近い状態の強力なマグマ性熱源が存在する可能性があると考えられる。

(4) 松川地域における貯留層内の流体の枯渇化の状況を調査し、その対策として還元実験を実施した。

①松川で生産される蒸気は過熱化が進んでおり、貯留層圧力の特に低下した北側と東側の地域では流体の枯渇が始まっている可能性がある。

②新たに掘削した還元井MR 1において還元実験を実施したところ、2度目の実験において平均約20t/hの還元流体のほぼ全量が蒸気約10t/hと熱水約10t/hとして生産井M5から回収された。

③今回の還元実験で熱抽出を行った熱交換面となるき裂群の集合体の大きさを300m×100mと仮定すると、抽出した見掛けの熱流束は約300W/m²と推定され、自然熱流束の約200倍の、非常に効果的な熱抽出を行うことができる。

(5) 以上の成果に基づき、蒸気卓越型地熱貯留層の開発における各種貯留層評価技術の位置づけを行い、蒸気卓越型地熱地域において、効率的かつ安定な蒸気生産を行うための貯留層工学的解析および評価の方法と、貯留層管理技術について検討した。

①坑井から蒸気生産量を減衰させる主要な原因には、貯留層圧力の低下、流体エンタルピーの低下、坑井内・貯留層のスケール付着とシーリング、貯留層外から不十分な流体補給、坑井のメカニカルトラブがある。蒸気卓越型の場合には、この中でも特に、貯留層圧力の低下が最も大きく影響する。

②地熱貯留層管理の基本は、Plan, Do, Seeを一連の流れとした取り組みである。従って、蒸気卓越型地熱地域における地熱開発の貯留層工学的アプローチとしては、データ取得による貯留層の現状把握を基本とし、必要に応じて、貯留層のモデル化による解析や予測を行うとともに枯渇対策を検討するのが基本である。

③モデル化により貯留層挙動予測では、各々の開発状況下での地熱発電の寿命およびその期間において回収が可能な積算電力エネルギー量の評価が重要である。企業活動としての地熱発電の評価においては、この評価は、所定の圧力の蒸気がタービンにいかに関供給されるかという観点で評価されなければならない。このため、貯留層圧力や流体エンタルピーなどの貯留層パラメータの変化の解析のみならず、その変化に伴う坑井からの蒸気噴出挙動の評価が必要である。

④蒸気卓越型地熱地域における貯留層管理において、生産井やモニター井の物理・化学挙動の監視を通して貯留層挙動を通して貯留層挙動を常に監視し、坑井や貯留層の蒸気生産挙動が安定であるかどうかを常に確認する。その結果、異常が発見あるいは予見された場合には、その原因に

対応した対策を講じる。ここでは、このような貯留層管理の指針となるべき貯留層管理基準を示した(図3)。

以上のように、本研究において確立した貯留層の現状把握と現状認識に基づいた貯留層管理を行うことにより、安定かつ効率的な蒸気生産を継続することが可能である。

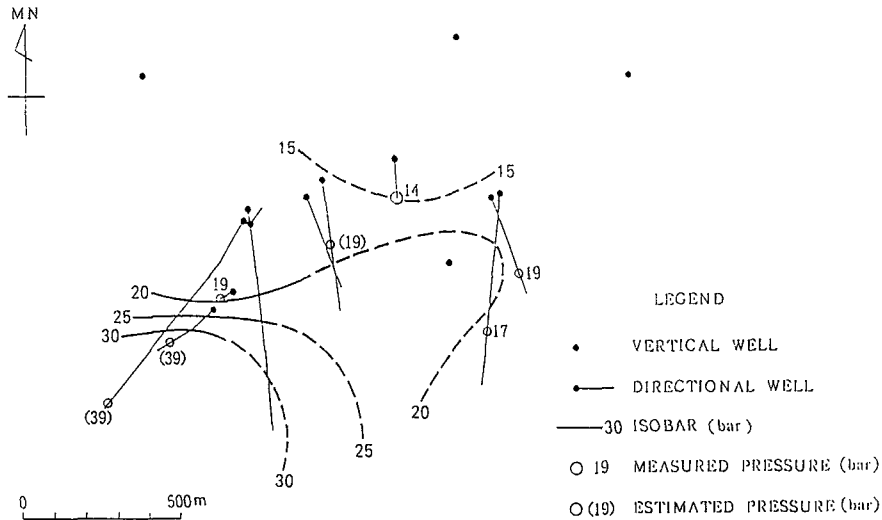


図1 松川地域主生産層内の圧力分布(1988年10月)。等圧線のうち、実線は確実なものであり、破線はやや確実性の低い推定線である。

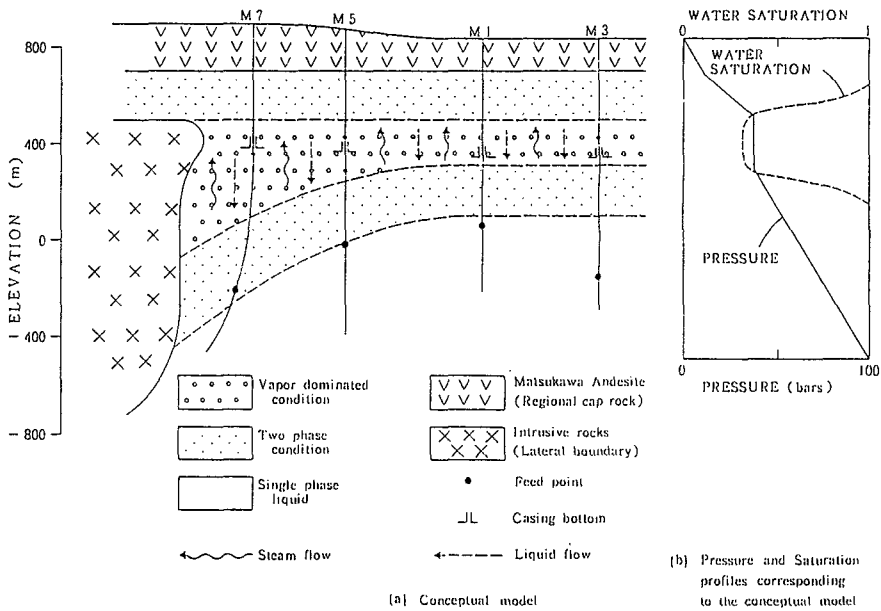


図2 松川地熱貯留層初期状態の概念モデル

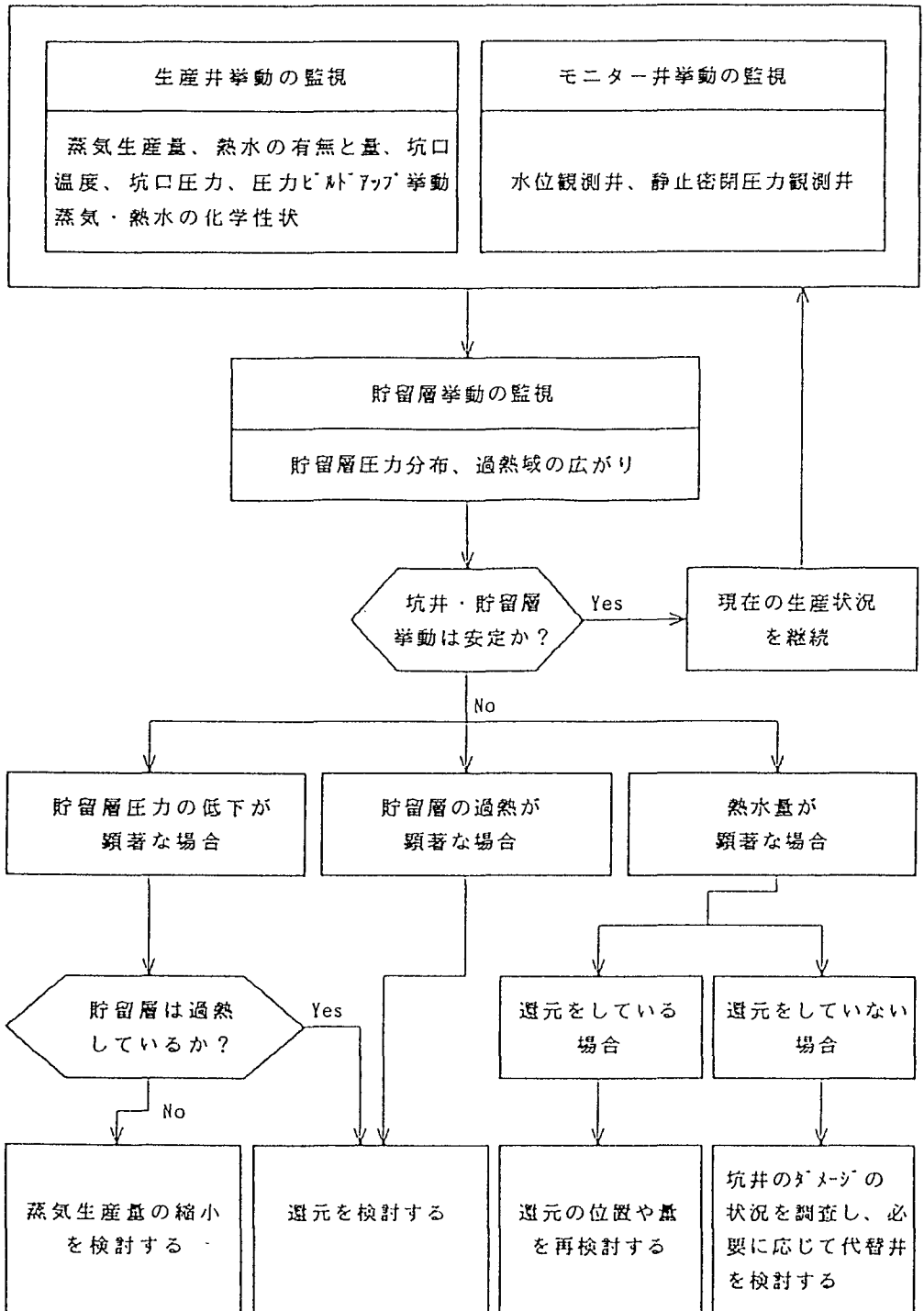


図3 蒸気卓越型地熱地域における貯留層管理基準

審査結果の要旨

実在の蒸気卓越型地熱貯留層に対して、熱水対流系の発生とそれに引き続く貯留層の初期状態の発生から生産に伴う貯留層の変化までを、一連のものとしてとらえて現象の解明を行い、評価を系統的に行った例はない。

本論文は、我国における唯一の商業規模の開発が行われている蒸気卓越型地熱地域である松川地域をその題材として、貯留層の初期状態ならびに現在状態を明らかにし、それに基づき長期的な生産に伴う貯留層の挙動変化を解明するとともに、効率的かつ安定的な開発、生産ならびに評価を行うための貯留層管理基準を提案したもので、全7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、貯留層の経時変化をとらえ、蒸気卓越型貯留層の現状を明らかにする方法について検討し、それに基づき松川地熱貯留層の現状を明らかにしている。これは貯留層管理の基本となる重要な知見である。

第3章では、貯留層の初期状態を明らかにする方法を提案し、さらに、それに基づき、過去に得られているデータを用いて、松川地熱貯留層の開発前に状態を評価している。

第4章では、第3章で明らかにした貯留層の初期状態が、どのような条件の下に発生し、どのような過程を経て第2章で得られた現在状態に変化していったかを解明する方法を展開している。さらに、数値シミュレーションを実施して、松川地熱貯留層の自然状態の発生と生産に伴うその変化の過程を明らかにしている。これは、貯留層評価における画期的な成果である。

第5章では、長期生産に伴う貯留層内の流体の枯渇に関して、蒸気生産量や貯留層圧力の低下を緩和し、貯留層内に残された熱エネルギーの効果的な抽出を行う方法について検討し、その有効性を松川地熱貯留層において実験を行い検証している。極めて先導的成果である。

第6章では、蒸気卓越型地熱貯留層の開発における各種貯留層評価技術の位置づけを行い、蒸気卓越型地熱地域において、効果的かつ安定的な開発、生産ならびに、評価を行うための、貯留層工学的解析評価に基づく貯留層管理基準を提案している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、蒸気卓越型地熱貯留層の開発前の初期状態から現在状態に至るまでの貯留層評価法を展開するとともに、実フィールドに適用検証して、新たな管理基準を構築したもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。