

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 松永 烈

松永烈氏により提出された論文では、高温岩体（HDR）貯留層を対象として、その流動状況把握に必要なトレーサ試験法の開発と、トレーサ試験結果にもとづいたHDR貯留層の評価方法の確立を目指した研究成果が述べられている。

第1章では、本論文の背景として、地熱エネルギー、特にHDR開発の重要性が述べられている。また、本論文の構成が述べられている。

第2章では、HDR地熱エネルギーについての概念の変遷と、その賦存量が膨大であるという、地熱資源としての有望性が述べられている。次いで、この未利用のHDR開発を目指して日本を含む世界各国で行われてきた現場実験の状況が述べられている。更に、HDRを開発するために必要な技術を概観し、それぞれの開発のステップを適正に実施するためや、施工後の結果を判断する際に重要な貯留層評価技術が述べられている。最後に、トレーサ試験や循環流体の地化学調査がはたす役割の重要性と本研究開発で検討を進めた課題との関係が述べられている。

第3章では、山形県肘折のNEDO HDR実験場において使用する新たなトレーサとして、タングステン酸ナトリウムとモリブデン酸アンモニウムを選定した経緯が述べられている。新たなトレーサの選定は、マルチトレーサ試験の実施や、繰り返し試験時のバックグラウンド濃度増加防止を目的に行ったもので、室内加熱試験と現場実験の両方を行うことにより、新しい無機トレーサと蛍光染料トレーサの選択を行った結果が述べられている。

第4章では、注入井坑内におけるトレーサの移流分散の影響を評価するために、HDR-2井とHDR-3井の増掘中にトレーサ試験を行った結果が述べられている。坑井内での一次元流れによる分散を仮定して、試験結果に最もフィットする縦分散率 $\alpha L$ を求めたところ、0.1~0.2mとなった。この値を用いて下部貯留層を対象としたト

トレーサ試験の予測を行った結果、フラクチャへ流入するトレーサの濃度は移流分散の影響が大きくなり、フラクチャへの流入濃度は注入濃度に比べて半分程度まで低下すると見込まれた。このための対応策を検討し、トレーサの注入時間を5分以上取る必要があることを明らかにした。

第5章では、肘折HDR実験場の上部貯留層を対象に実施したトレーサ試験を、滞留時間分布（RTD）法によって評価した結果が述べられている。まず、RTD法を用いたHDR貯留層の評価方法について説明を行い、次いで肘折での循環試験中に行ったトレーサ試験に適応した結果が述べられている。対象としたのは上部貯留層における循環試験で、1988年夏に肘折で最初に行われた15日間の循環試験、1989年夏に実施した1ヶ月間の循環試験と、上部貯留層で行われた最後の循環試験である1991年の3ヶ月間循環試験中に行ったトレーサ試験の評価を行った。3ヶ月間の循環試験では、循環の時間経過やそれぞれの生産井との間の流動状況が生産井ごとに異なることをトレーサ試験によって明らかにした。

第6章では、熱・物質移動有限要素法シミュレーションコードを用いて、3ヶ月間の循環試験によって得られた実測値と数値シミュレーションとのマッチングを行い、貯留層の規模及び循環時間の経過に伴う変化を評価したことが述べられている。まず、循環試験中の圧力-温度-流量（PTS）検層から求めたフラクチャごとの生産流体温度の経時変化とシミュレーションとのマッチングにより、それぞれの流路ごとの熱交換面積だけでなく、循環時間の経過による熱交換面積の変化も把握可能なことを明らかにした。更に、肘折上部貯留層の場合、注入箇所から生産井までの導通距離の近いフラクチャほど縦横比が小さく、しかも生産井から注入した流体は注入深度よりも上方へ流動しやすいことを明らかにした。つぎに、生産流体温度の経時変化とのマッチングによって求めた熱交換面積を基に、更にトレーサ試験により得られる応答曲線とのマッチングを加味することで、フラクチャ幅を推定した。

第7章では、上部・下部2層の貯留層を対象に実施された長期循環試験（LTCT）中のトレーサ試験について述べ、得られたトレーサ応答曲線を基に、多坑井マルチフラクチャからなる貯留層内の流動を評価した結果が述べられている。LTCTでは、循環形態に合わせて効率的にトレーサ試験を行うため、新たに流体自動採取装置と光ファイバー蛍光光度連続測定システムを作成し、これら装置を用いて、下部貯留

層注入による循環時6回，上下両貯留層への注入，いわゆるデュアル循環試験中に6回，合計12回のトレーサ試験を実施した．貯留層内の流動状況の変化をトレーサ試験の結果から把握する場合，デュアル循環時の貯留層からの流出状況を正確に把握することが必要で，そのためには生産井坑口で得られるトレーサのRTD曲線に上下貯留層の生産寄与率を考慮した補正を加える必要があることを明らかにした．このような評価を行った結果，トレーサ試験によって得られる応答曲線は，注入流量の変化や循環の停止などにより大きく変動することを明らかにした．また，応答曲線の変動は，PTS検層によって求めることができる坑井近傍の流動抵抗だけでなく，注入井と生産井間の広範な領域の流動状況を反映することを明らかにした．

第8章は結論であり，本研究の成果をまとめ，今後の技術的課題と展望が示されている．

松永烈氏は，これまでに例のない大規模な原位置試験を通じて，高温岩体貯留層におけるトレーサ試験法を開発し，更にトレーサ試験結果による高温岩体の評価方法も確立した．トレーサ試験と高温岩体の評価に資する新しい知見を得たといえる．

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる．