

## 論文の内容の要旨

論文題目 高温岩体貯留層評価のためのトレーサ試験の開発と  
肘折高温岩体への適用

氏名 松永 烈

昭和 48 年 (1973 年) の第 4 次中東戦争をきっかけに発生した石油危機を契機として、通商産業省 (現経済産業省) において、太陽 (光、熱)、石炭 (液化、ガス化)、風力、地熱など石油代替エネルギーの開発を目指したサンシャイン計画が開始され、活発な技術開発が進められてきた。更に、最近の地球環境問題への意識の高まりとともに、高温の地熱資源に乏しいドイツ、フランス、スイス、オーストラリアなどの国々においては、再生可能エネルギー開発の一環として高温岩体 (HDR) 地熱エネルギー開発の動きが活発化している。この HDR 開発で技術的な中核をなす人工貯留層からの熱抽出では、HDR 貯留層内の循環状況を把握することが重要になる。これは将来の貯留層の安定性を監視するとともに、将来の生産特性の変動や寿命を予測し、必要な場合には水圧破砕や坑井の掘削を決めるための重要な情報を提供するからである。

本研究は、HDR 貯留層を予定した期間、安定して運転するに重要となる循環流体の流動状況把握に必要な、トレーサ試験法の開発を目的に実施した。

第 1 章では、本論文の背景として、地熱エネルギー、特に HDR 開発の重要性について説明するとともに、本論文の構成を説明した。

第 2 章では、HDR 地熱エネルギーについての概念の変遷を述べるとともに、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を述べた。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について述べた。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について述べた。最後に、トレーサ試験や循環流体の地化学調査が果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について述べた。

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を述べた。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。

室内試験により有望と考えられた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、肘折での循環試験中に使用・評価し、定性的な評価を行う上では十分なことを確認した。更に、検出感度や費用の点で期待される蛍光染料として、フルオレセイン、アミノ G 酸、ローダミン B の3種類についての評価を行い、肘折で実施した坑井掘削時の試験と坑井内での長期放置試験の結果から、フルオレセインが十分に使用可能であると判断した。

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を述べた。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。この結果は長期循環試験時のトレーサ試験作業に活用した。

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を述べた。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を述べた。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。このような違いを生み出す原因として、東西に延びる主フラクチャと各坑井との導通状況の違いが考えられた。単独坑井試験時のシャットインによる影響は坑井ごとに異なり、SKG-2 井との導通が直接的な HDR-2 井や HDR-3 井では、単独坑井試験時の注入圧力の上昇によってフラクチャの開口が発生したものと推定した。単独坑井生産時の影響が少なかった HDR-1 井に関しても、一連の単独坑井生産後には流動状況の改善が認められ、これら作業によるフラクチャ内流動状況の改善効果を定性的に評価することができた。

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。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。今回得られたフラクチャ幅は2~14 mmの範囲にあり、坑井試験から推定された値に比べて1桁大きな結果となったが、生産井掘削の際して得た定方位コアに認められる数mmのき裂開口幅とほぼ一致した。

実際のHDR貯留層の評価を行う場合には、温度の変化が起こる前に貯留層の評価を行う必要がある。このため、前もって現場の状況を想定した貯留層モデルを設定し流量ごとのタイプカーブを作成することにより、トレーサ試験によって得られるデータから簡便におおよその貯留層容積を推定する方法を提案した。更に、トレーサピーク濃度到達時間と坑井間隔を基にしてフラクチャ幅のおおよその値を求めることにより、熱交換面積を推定することが可能なことを明らかにした。

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を述べた。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を示した。

トレーサ試験は流体の循環状況を把握するために最も有力な手段の一つで、これまでも多くの知見が蓄積されてきた。しかし、HDR貯留層の評価に不可欠な複数のフラクチャを対象とした研究については満足に行われてこいなかった。本研究では、肘折で実施された循環試験の機会ごとに順次改良を加えながら、新規トレーサの選択、適正なトレーサ注入方法、蛍光トレーサの原位置連続測定法の開発を進め、これまでに比べて簡便にしかも高精度でトレーサ試験を行える効率的なシステムを完成した。更に、このトレーサ試験による評価結果を逐次用いれば、地熱貯留層を能動的に制御できる可能性を指摘した。本研究の成果は、複雑なき裂内の流動が問題となるあらゆる場合に有効であり、適用できる対象は極めて広く、今世紀の重要な課題である放射性廃棄物処分場にも適用できる。