

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 李 元圭

実油ガス田で適用されているポリマー架橋処理法（ポリマー水溶液を地層内で架橋処理する技術）は、油生産における水の産出抑制や地層の不均質性に起因する圧入流体のチャネリング抑制に大きく貢献している。従来はポリマーの架橋剤としてクロムが使用されてきたが、環境問題の点からクロム以外の架橋剤を使用した新しい手法の開発が望まれる。本論文では、ポリアクリルアミド、アルミン酸ナトリウム、水酸化ナトリウムの混合水溶液であるゲル生成剤と CO₂ 飽和水の交互圧入により多孔質媒体内でゲルを生成させる新しいポリマー架橋処理法（CAG 法：CO₂-water Alternating Gelant Injection Process）を提唱し、その有効性を室内実験と数値モデルによる計算で検証した。

本論文は第 1 章の序論を含めて計 5 章からなる。第 2 章では、ポリマー架橋処理法に関する研究の現状と適用例を調査して、その問題点と課題を抽出している。

第 3 章では、提唱した CAG 法の手順と原理を論じている。CAG 法では、ゲル生成剤と CO₂ 飽和水を所定量ずつ多孔質媒体内へ交互圧入する。両溶液はフィンガリングや拡散により混合され、ゲル生成剤の pH が低下する。pH の低下に伴いアルミニウム種の電離平衡がシフトする際に生じる 3 価のアルミニウムイオンが加水分解したポリマー分子を架橋する。交互圧入の繰り返しによりポリマー分子の架橋率が高まるので孔隙内のゲル生成が促進され、多孔質媒体内の流動抵抗が高まる。アルミン酸ナトリウムの pH 特性を利用したポリマー架橋の原理は、1987 年に Dovan が提唱したものと同一であるが、この原理をゲル生成剤と CO₂ 飽和水の交互圧入によるゲル生成プロセスに拡張したことが本研究の独創的な発想である。

引き続き第 3 章では、適切なゲル生成剤濃度の設計に関する実験、多孔質媒体コアを用いたゲルの生成実験および油回収実験の結果をまとめて、浸透率プロフィール改善と残油の回収に対する CAG 法の有効性を検証している。ガラスビーズを充填したコアに CAG 法を適用すると、ゲルの生成によりコアの浸透率が初期の 1/60 から 1/360 まで低下することを明かにした。油飽和したコア内に水攻法を一定期間実施後に CAG 法を適用した実験では、高浸透率コアの場合は約 12 %、低浸透率コアの場合は約 24 % の増油率が得られた。CAG 法は多孔質媒体内の油置換の易動度比を改善して油置換効率を高める効果があることが論じられている。

浸透率の異なるコアを並列に設置したモデルを用いた油回収実験では、層間クロスフローのない油層に CAG 法を適用した場合の油回収効果を検討している。油飽和したモデルに対して水攻法実施後に CAG 法を約 1.4 PV と 2 回目の水攻法を適用した結果では、CAG 法を実施した期間にゲル生成による高浸透率コアの閉塞が生

じ、2回目の水攻法における圧入水は低浸透率コアへ流入した。この浸透率プロファイル改善効果により、低浸透率コアからの油回収率は大きく高まった。ポリマー攻法と比較すると、単位ポリマー使用量あたりの油回収率はCAG法の方が高く、低浸透率層に存在する残油の回収にCAG法が有効であることが示されている。以上のように、浸透率の異なる数層からなる油層にCAG法を適用すると、油置換効率の改善と浸透率プロファイル改善（掃攻率の改善）の2つの効果による油回収率の向上が期待される。

第4章では、ゲル生成剤とCO₂飽和水の交互圧入による流体の混合とレオロジー的性質の変化、混合流体のpH変化に伴うゲルの生成過程、ゲルの生成による多孔質媒体の性質（浸透率と孔隙率）の変化を数式化して、ゲル生成を伴う多孔質媒体内流動を記述する数値モデルを構築している。さらに、この数値モデルを既存の水攻法とポリマー攻法の数値モデルに組み込むことにより、CAG法による油回収挙動を予測する数値モデルを構築した。数値モデルによる計算結果と実験結果の比較検討では、ゲルの生成速度定数をマッチングパラメータとして、単一コアにCAG法を適用したときのゲル生成に伴うコア内流動抵抗の上昇と油回収挙動を適切に再現することを確認している。実験に替わる手段を提供するという点で、CAG法の数値モデルを構築した意義は大きい。今後の研究で残された課題をすべて実験的に解決するのは多くの時間と労力がかかり非現実的であり、数値モデルによる評価結果を実験的に検証するという研究方針が望ましい。数値モデルの適用限界と今後の検討課題についても言及している。

第5章は本論文の総括である。本論文で提唱したポリマー架橋処理法（CAG法）は、坑井から圧入するゲル生成剤とCO₂飽和水の混合による中和反応を利用して地層内でゲルを生成させるという簡単な原理に基づく。簡単で安価な手順で浸透率プロファイル改善効果が期待されるために、生産井における遮水や圧入井における浸透率プロファイル改善対策として有望である。経済的に採算のとれなくなった油田からの残油回収にも有望な手法と考えられる。本論文の成果はCAG法の有効性を室内実験で検証した段階にとどまるが、ゲルの地層内における安定性、ゲル生成に及ぼす層間クロスフローの影響に関する応用研究を継続して行うことにより、実油田への適用が可能である。以上のように、本研究で提唱したポリマー架橋処理法は今後の石油増進回収法の技術開発に大きく貢献する。

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。