

内 2-6

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

RHEOLOGICAL AND FLOW RESISTANCE  
PROPERTIES OF EOR POLYMERS  
IN RESERVOIR ROCKS

EOR用ポリマーのレオロジー特性と  
油層岩石中の流動抵抗

申 請 者

オマール A. アブデルカリム

OMAR A. ABDELKARIM

資源及材料工学専攻・石油工学研究

平成 2 年 10 月

最近の世界石油事情は環境問題に加え、政治経済問題として極めて厳しい対応に迫られている。それにも拘らず、石油に代る代替エネルギーはまだ見透しが暗い。したがって、ここ当分は新油田の探鉱、開発と原油の回収技術改善による回収率増進を計ることで石油の確認埋蔵量増加を見込む方向に石油産業の技術的趨勢が向かわざるを得ないだろう。この中の中心技術課題はEnhanced Oil Recovery (EOR)技術の開発である。

EOR技術は化学攻法、熱攻法、ガスミッシブル攻法に大別されるが、従来2次回収法として水攻法が採用されてきている油田が多いので、これに引続く3次回収法としては化学攻法が採用されることになるだろう。しかし化学攻法は界面活性剤等のケミカルス利用のため採油経費が増大し、現在の油価ではまだその利用は一般化するに至っていない。ポリマー攻法は化学攻法の一部でもあり、且つポリマーは広く水処理にも使用されているので、価格的にも手頃であり、水攻法の大きな欠点である水のフィンガリング現象を抑え、モビリティコントロールを計ることで、原油の増収を計ることができるので、経済的にも技術的にも魅力ある方法として広く利用されている。最近のポリマー攻法プロジェクトの増加はこの回収法の重要性を反映している。例えば米国だけでも1984年から1986年の2年間でポリマー攻法プロジェクトの50%増加が記録されている。

ポリマー攻法の第一の目的は流体の流れを上手に制御して、より経済的に原油を回収することにある。この場合、ポリマー流体のレオロジー的性質と岩石内を通過するときの流体の流動抵抗を解明することが極めて重要な課題である。

この研究はこれら課題に答えるための基礎研究であり、地殻内部の油層環境条件に適するポリマーを選択するため、各種化学構造の合成ポリマーを利用して、その水溶液のレオロジー特性と油層中を流れるときの流動抵抗等の流動特性を測定してEOR用ポリマーの評価を行ったものである。

この論文は以下に述べるように7章からなり、主としてポリマー流体のレオロジー特性と油層岩中を流れる時の実験結果を中心にしてまとめたものである。

第1章は総括的な概論とEOR用ポリマー及び油層岩石特性に関する研究の歴史的背景について述べたものである。油層岩の特性に関しては主として、ポリマーのリテンションやモビリティと関係する毛細管圧力や孔隙径分布などについて述べ、ポリマー溶液についてはブラインの組成や塩濃度の影響について、またポリマーの化学構造とそれらのレオロジー特性に関する研究について調べた。

第2章では異なった構造のポリマーについて低剪断速度でのレオロジー特性について試験した。この試験のために必要な測定装置は市販のものでは不十分なため、新たに2乃至200 $\text{sec}^{-1}$ の剪断速度範囲で測定可能な毛細管粘度計を開発して、EOR用ポリマーのレオロジー特性を調べた。この測定装置は簡便ではあるが、その開発で低剪断速度下の粘度測定が容易になった意義は大きい。ここで測定される範囲の剪断速度は圧入井から少し離れた油層位置では極く普通に見られる流

体流動速度である。

粘度と剪断速度の関係については2系列の代表的ポリマーについて測定された。その一つはacrylamide (AAM)系ポリマーであり、他の一つはN-vinyl formamide (NVF)系ポリマーである。異なったポリマー及び塩(NaCl)濃度のもとにおける2系列ポリマーのレオロジー特性の比較ではAAM系ポリマーの方がNVF系のものより粘度が少し高かった。しかしNVF系ポリマーはAAM系のものより広範囲の剪断速度範囲でニュートン流体の挙動を示した。このことは油層岩のような孔隙の形状や孔隙径分布の違いのため、剪断速度が広範囲に変化するような場合にはNVFポリマーに利点があることを示すものである。

第3章では油層岩中でポリマーが流動するときの流れの抵抗に関して、ポリマーの化学構造とブライン濃度の影響について研究したものである。ここでは第2章で取上げた2つのポリマーに加えてpoly(acrylamide-co-sodium acrylate)及びpoly(N-vinyl formamide-co-sodium acrylate)が実験研究で使用され、異なった濃度のブライン中における1価、2価カチオンの影響について、粘度、スクリーンファクターやBerea砂岩の流動抵抗係数について測定を行った。ここで用いた4系列のポリマーいずれについても、その抵抗係数はブライン中のカチオン濃度の増加に伴って減少することが判った。ブライン中の2価イオンは1価イオンに比較して、粘度、スクリーンファクターでは大きな減少を示したが、抵抗係数に関しては殆どその差が観察されなかった。

第4章ではポリマーのアニオン化度と温度が流体の流動抵抗に如何なる影響を及ぼすかについて検討した。NaCl濃度が低い溶液では、その粘度、スクリーンファクター、抵抗係数及び残留抵抗係数はAAM系ポリマーのアニオン化度増加に伴って増加した。粘度の増加はアニオン化度30mol%で最も顕著であった。その流動抵抗は高濃度のNaClを含むブラインでは大きく減少し、アニオン化度の高いポリマーはブライン濃度に影響されることが大きいことを見出した。

ポリマーに対する温度の影響については現在まで、まだ十分な対策が立てられていないが、ここでは20°Cから60°Cまでの範囲で、種々のポリマーの流動特性に如何なる変化が現れるかを検討した。この結果温度上昇に従って、粘度、スクリーンファクター及び抵抗係数が著しく変化することが判った。しかし塩濃度が高い場合は温度に拘らず粘度は低く、その差は殆ど認められなかった。耐熱性の対策として、ラジカル捕捉剤を加えることによって粘度、スクリーンファクター、抵抗係数が如何に変化するかを検討した。この結果コア内流動試験による抵抗係数では20乃至50°Cまでは抵抗係数の低下は殆ど認められず、捕捉剤の効果が現れたが、粘度やスクリーンファクターでは余りその効果が認められなかった。

第5章では孔隙内の流動抵抗について理論的解析を加えるための実験研究として、管内に球形ガラスビーズを充填し、その流動抵抗を流速を変えて測定した。また同様な目的で浸透率の異なったBerea砂岩を用い、夫々の抵抗係数測定を行

った。この結果高い流速ではAAM系ポリマーはダイラタント流れ挙動を示した。2つの浸透率の異なるコアで流動試験を行い、ポリマー濃度の影響について調べた。この結果高浸透率砂岩ではダイラタント流れ挙動は認められなかった。低浸透率コアではダイラタント流動挙動はポリマー濃度の増大に伴って顕著になった。この2つのコアで低流速の場合の抵抗係数に関するポリマー濃度の影響は殆ど同じであった。

第6章はポリマー攻法による油の回収に関する研究で、ポリマー分子量とその濃度が油回収率に如何なる影響を及ぼすかについて、Berea砂岩を通し、油置換実験を行って検討した。この結果AAM系ポリマーを利用した場合、その分子量を増加すれば回収率は増大した。また、油回収に対するポリマー濃度の影響はAAM系ポリマー水溶液の濃度を250, 500, 750及び1000ppmとして夫々の回収率を調べた。この回収率はポリマー濃度の上昇に伴って増加した。最も高い油回収率はポリマー濃度を750ppmとした時に達成された。そしてこれ以上のポリマー濃度では、より高い油回収率を見ることはできなかった。これらの結果から、ポリマー分子量を増加させることと、ポリマー濃度を増大させることは回収率の点で同じ成果を示したが、岩石の性質やブラインの条件によって、いずれか一方を選択することで適切にモビリティコントロールを達成させうることになるかと判断した。

第7章は以上の結論である。これらの研究では特に低剪断速度のもとでニュートン粘度の測定が容易にできる実験装置を開発することができ、この装置はまた、第5章で述べたように、ガラスビーズ等一定形状の粒子を充填して測定することにより、コア試験による抵抗係数測定値との比較が可能となった。さらにこの研究では、AAMやNVF系ポリマーに対して、アニオン化度の影響も検討し、新しい知見をEOR用ポリマーに加えることができた。また高濃度ブラインの影響についても1価、2価カチオンの影響を明らかにし、これら油層環境下でのポリマー選択に新しい評価基準を確立することができた。