

新	3446	乙	1741	博士（工学）	2002/12/19	盧 祥国	ル シャングオ
---	------	---	------	--------	------------	------	---------

外合22-14

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Oil Recovery Mechanisms and Practices of
Chemical Flooding in Daqing Oil Field
(大慶油田におけるケミカル攻法の
油回収機構と実践)

申 請 者

盧 祥 国
Xiang-guo Lu

2002 年 12 月

大慶油田は Song-Liao 堆積盆の中央部に位置する面積 26 万 km^2 の中国最大の油田であり、世界有数の巨大油田の一つである。過去 40 年以上に亘る開発の結果、現在の平均生産含水率は 85 % 超である。水攻法による油回収率は油田全域で原始埋蔵量の約 40 % と予測され、水攻法後にも約 60 % の油が残存することになる。

水攻法の低回収率は、大慶油田の高い層状性と高粘性油によるものである。

ポリマー攻法は、少量の水溶性ポリマーの添加により圧入水の易動度を有効に低減させて、回収率向上を図る水攻法の改良プロセスである。大慶油田における油層温度、地層水の塩分濃度、油粘性、非均質性などの油層特性は、ポリマー攻法の効果を高める条件となっている。しかし、ポリマー攻法を成功させるにはポリマー分子量の最適化、置換効率の改善、生産水の利用法等の技術的課題に取り組む必要がある。加えて、ポリマー攻法実施後の残存油飽和率分布の評価ならびに残存油回収のための有効な採油増進法も重要な技術課題である。

本研究では、実際に大慶油田においてポリマー攻法を実施するに当たって、技術的な課題に関する解答を得るために実験室における実験および油田におけるパイロットテストの評価と分析を行った。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、大慶油田の開発の経過と油層特性を記述している。特に、油層の非均質特性に対してケミカル攻法が有効であることが指摘されている。次いで、大慶油田においてこれまでに実施されたケミカル攻法において見られた技術的課題のまとめと分析をした上で、本研究の意義と目的について述べている。

第 2 章では、まずケミカル攻法において使用されるポリマーのタイプと分子構造を記述している。次いで、大慶油田で用いられている水和ポリアクリルアミドに関して、溶解プロセスおよびレオロジー特性について考察し、ポリマー溶液の高レジスタンス流動の原因となるリテンション、易動度降下など、多孔質媒体中の流動特性およびケミカル攻法への適用について述べている。ポリマーのリテンションは岩石粒子表面へのポリマーの吸着と孔隙狭隘部における滞留に起因するもので、ポリマー溶液の流動特性の評価として抵抗係数 F_r (水とポリマー溶液の易動度比) および残留抵抗係数 F_{rr} (ポリマー攻法前後の水相有効浸透率比) を導入している。

第 3 章では、ポリマー分子量の最適化について、コア掃攻実験およびパイロットテストの結果から究明している。ポリマー分子量が過大な場合は低浸透率層の掃攻に有効でなく、逆に過小な場合は易動度が十分に低減されない。ポリマーの選定基準として、有効層厚の 70 % 以上を通過すること、高い易動度降下力と耐剪断性を持つこと、必要な圧入量が得られることを挙げている。特定の岩石に対するポリマーの選定には、孔隙サイズとポリマー分子量の関係から、孔隙の相当毛細管半径 r_h とポリマー分子の水力学的振動半径 r_p の比 r_h/r_p が 10 より大きいことが必要としている。また、一定のポリマー濃度と剪断レートに対して、ポリマー分子量が大きい程、残留粘性が高く、油回収率に有効であることが確認している。

コア実験およびパイロットテストを総括して、大慶油田南部ではポリマー分子量 $10 \times 10^6 \sim 17 \times 10^6$ 、北部では $12 \times 10^6 \sim 28 \times 10^6$ を基準とし、その適用性は大慶油田における商業的なポリマー攻法の実施によって検証されている。

第4章では、浸透率が $10 \mu\text{m}^2$ より大きい層でポリマー溶液のチャネリングが観測されていることから、特に高浸透率層の閉塞によるポリマー攻法の改善法について検討されている。ポリマー攻法の適用中または適用前にコロイド状分散ゲル (CDG)、または陽イオンおよび陰イオンポリマーを連続的に圧入することによって、チャネリングを有効に閉塞できることを実験により確認している。

CDG の組成試験によれば、大慶油田に対する CDG の最適な成分はポリマー、クエン酸塩アルミニウム、およびチオ尿素の混合比で 100:1:25 である。同じポリマー濃度に対して、CDG の F_r および F_{rr} はポリマー溶液のそれらよりも格段に大きく、CDG の場合は F_{rr} が F_r よりも大きい特長を示すこと、CDG では分子間および分子内のクロス結合が生じること、また、人工コアによる圧入実験では CDG は高浸透率部の閉塞に有効であることを確認している。陽イオンポリマーは溶液の粘性増加が小さく、塩分濃度への依存性が小さい特性を示し、高浸透率層への圧入に有利である。人工コアによる陽イオンと陰イオンポリマーの連続圧入実験では、後者のみの場合に比べて吸着力および抵抗係数の増加を確認している。

これらの結果に基づいて、油層における実証のためにパイロットテストが実施され、圧入圧力の上昇と含水率の減少という望ましい傾向が観測されている。

第5章では、ポリマー攻法中の生産水の活用法が検討されている。ポリマーの岩石表面への吸着および孔隙内でのトラッピングによってポリマーは油層内に滞留するが、ポリマー圧入量の約 50 % は圧入中とその後の水攻法中に生産される。実験によれば、生産水を用いたポリマー溶液は淡水の場合よりも強い耐剪断性を示した。コア実験では、生産水中のポリマー濃度が高い場合は直接再圧入することで、油回収率の向上が可能であり、ポリマー濃度が低い生産水は新しい圧入ポリマーの溶剤として有効である結果が得られている。これに基づいて、生産水の再圧入のためのパイロットテストが実施され、油生産の増加が確認されている。

第6章では、ポリマー攻法の適用後に残存する油飽和率分布について、コア実験およびシミュレーションにより検討している。ポリマー攻法実施後にも初期油埋蔵量の約 50 % が油層内に残存し、これは EOR の潜在的な対象となる。非均質3層の人工コアを用いた掃攻実験における油飽和率分布を核磁気共鳴装置 (NMR) によって計測している。NMR のイメージを同様な人工コアを用いた一連の掃攻実験およびシミュレーション結果と組合せると、ポリマー攻法適用後の残存油の大部分は、断面的には低浸透率および中浸透率層に見られ、平面的には圧入井および生産井から離れた領域に見られることが確認されている。これによって、ポリマー攻法後の回収率改善のために必要な生産技術の指針が得られている。

第7章はポリマー攻法後の油回収率を増進させるために行ったコア実験および

マイクロモデル実験に関する記述である。その結果として、高粘性のポリマー溶液およびアルカリ・サーファクタント・ポリマー（ASP）攻法を適用することにより、断面内および平面内の掃攻領域を拡張することができ、ポリマー攻法後の油水界面張力を低減させるのに有効であることが確認されている。ASP 攻法および CDG を用いる ASP 改良攻法は、ポリマー攻法よりも油回収率の向上には有効であるが、実油田への適用には経済性評価の必要性が指摘されている。

第 8 章では、ポリマー攻法および ASP 攻法のコア実験結果に対するシミュレーションについて記述している。ポリマー攻法実験では、圧入開始時の油飽和率によらず、ほぼ同じ残留油飽和率が達成されている。ASP 攻法実験では、アルカリおよび界面活性剤の顕著な効果が置換挙動に現れている。シミュレーションでは、ポリマー攻法の場合は差圧および回収挙動とも実験データに対してほぼ良好なマッチングが得られ、ASP 攻法では、初期油飽和率分布、アルカリ剤によるサーファクタント生成、ケミカルの吸着などに関するより精度の高いデータの必要性が指摘されている。

第 9 章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめて示している。

以上要約すると、本論文は大慶油田におけるケミカル攻法のメカニズムと実践に関するものであり、特に層状油層における水攻法実施後の採油増進の問題を、実験およびシミュレーションによる評価から、実油田におけるパイロットテストの解析までの広い範囲で研究し、それらの成果を取り纏めたものである。

層状油層における水攻法およびその改良法としてのポリマー攻法には幾つかの技術的課題が付随する。本研究で提案されたポリマー選定の最適化、分散ゲルまたは陽イオン・陰イオンポリマーの連続圧入によるチャンネリングの閉塞に関する技術は、実油田における実践によって確認されており、その有効性は非常に高いものと評価できる。また、ポリマー攻法実施下の油田における生産水の再利用法と残留油飽和率分布について明らかにしたことによって、今後のケミカル攻法技術の開発に有益な指針を与えており、さらに、ASP 攻法および ASP 改良攻法がポリマー攻法実施後の採油増進法として有効であることを確認することによって、ケミカル攻法の油回収メカニズムの解明と実用性を大きく向上させた。

即ち、本論文の成果は、従来のケミカル攻法技術を大きく発展させたことで、工学的に価値あるものであり、本技術は油層工学の発展、進歩に資すること大である。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2002 年 12 月

審査員

（主査）

早稲田大学教授 Ph.D.（スタンフォード大学）

在原 典男

早稲田大学教授 工学博士（東北大学）

佐々木 弘

早稲田大学教授 Ph.D.（テキサス大学）

森田 信男