

| | | | |
|-----------|------------------------------|--------------|----------|
| 氏 名 | Hong 洪 | Cheng 承 | Xie 燮 |
| 授与学位 | 工 学 博 士 | | |
| 学位授与年月日 | 昭和 61 年 7 月 9 日 | | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 5 条第 2 項 | | |
| 最終学歴 | 昭和 50 年 9 月 中国東北石油学院開発系卒業 | | |
| 学位論文題目 | 石油の三次採取法としての火攻法に関する基礎的研究 | | |
| 論文審査委員 | 東北大学教授 田中 正三 | 東北大学教授 横山 秀吉 | |
| | 東北大学教授 千田 侖 | 東北大学教授 只木 楨力 | |

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

石油はエネルギー源として、近代産業の根幹をなす重要なものである。しかし、地球上に埋蔵される石油の量には限界があり、他方、産業の発達に伴って石油の消費量は増加しているため、近い将来、政治的影響を除外しても、石油の需給のバランスが成り立たなくなると予想されている。そしてこのことは確認埋蔵量と生産量の比が次第に小さくなってきていることと、新しい大油田の発見が極めて困難になってきているという事実によって裏付けられている。従ってこのような状況において、必要油量を確保するには、地下に埋蔵される油の採取率の向上や重質油の利用などの新技術の開発が急務である。

地下の油層から原油を採取するにあたって、地下の自然の排油力による採油を一次採取といい、水攻法などの人工的な排油力による採取を二次採取という。現在、水攻法はほぼ完成された技術として多くの油田で実施されている。特に、中国では、初期の油層圧力を維持することによって採取率を向上させるため、生産初期から水圧入を実施し、効果を上げている。しかし、一般に、一次及び二次採取法による採取率は40%程度が限界であり、地下に埋蔵する油の大半が採取されないまま残っている。また、一次及び二次採取法では採取困難な大量の重質油が既に探査されたまま油層内に残っている。これらの残油を強制的に採取する方法を総称して三次採取法という。従って、三次採取法の技術の開発により、すでに採取・消費された石油の何倍かの量が採取可能になると言えよ

う。これらの新技術の開発が熱望される所以である。

本研究は、理論的研究を主とし、火攻法を実施した場合の油層内挙動解析及び火攻法の適用可能な条件について検討を行うことにより、火攻法を確立した採取法となす一助とならんとするものである。

第 2 章 改良 4 相 7 成分モデル

火攻法に関する理論研究での最大の問題の 1 つは、原油が多成分の混合物であることをどのように取り扱うかということである。その取り扱い方如何によっては、気化・液化現象や燃料として消費される油量などが実際と著しく異なったものとなる。従来の研究においては、原油の多成分性を表現するのに単一組成の成分の数を増す方法を採用していた。しかし原油は無限と言えるほど多くの異なる分子構造の炭化水素成分をもっており、モデル上の原油の成分数をいかに増しても現実とは掛け離れたものとなることは否定できない。さらに計算上の制限もあり、実際には成分数を 2 とした取り扱いが最も多い。

一般に油層工学では、原油の性質を表すのに原油の比重量を基本パラメータとしているが、本研究でも原油の多成分性を、比重量の関数として表すことにした。このような考え方では、数学モデルにおいては、原油を仮想上の 2 成分の混合物とし、その 1 つの成分は原油中の最も軽い組成まで代表できるもの、またもう 1 つは最も重い組成まで代表できるものとすればよい。そしてこの 2 つの仮想油はいずれも独立の性質を持たず、ただその混合割合によって原油の比重量を表現するのみであり、この点が従来の取り扱いと大きく異なっている。

本研究で開発したモデルは 4 相 7 成分のものであるが、上述のように原油の多成分性の取り扱いなどで従来の 4 相 7 成分モデルとは異なるものである。従って本章では、このような新しい考え方により開発された改良 4 相 7 成分数学モデルの基本式、流体の性質と油層条件を表すパラメータの計算式について詳述した。

また、火攻法の挙動に基づいて、数学モデルの安定性と精度の向上のため、変化が激しいガスのモル分率をすべてモデルの基本変数として取り扱うなどの改良も行った。

第 3 章 火攻法実験並びにその結果とシミュレーション結果との比較

本章ではまずはじめに、数学モデルの妥当性を検討するために行った燃焼管による小規模火攻法実験について述べた。実験は空気圧入量を変化させて行い、その結果より、火攻法における油層内の挙動解析を行った。

次に、理論計算に必要とするパラメータの測定実験について述べた。測定は、原油の多成分性が大きく影響する原油の飽和蒸気圧及び気化成分の比重量、並びに原油の化学反応速度などについて行った。測定結果をまとめ、原油の飽和蒸気圧について次式を得た。

$$P_{sato} = a + b (T - 273.15)^3$$

ここで

$$a = \frac{1}{8.8886 \times 10^{-2} - 1.8610 \times 10^{-4} r_{Oo} + 9.7760 \times 10^{-8} r_{Oo}^2}$$

$$b = \exp\left(\frac{28747}{r_{Oo}} - 36.098\right)$$

また原油の気化成分の比重量の式として次式を得た。

$$r_{og} = -398.33 + 1.2670 r_{Oo} + 0.10021 T$$

これらの方程式は、温度が上昇すれば気化する成分の比重量が大きくなるなどの、多成分の混合物である原油の気化特性を良く表現している。

また本章では、このようにして求めたパラメータの結果を用い、第2章で述べた火攻法シミュレータによる計算結果と、上述の小規模火攻法実験結果との比較を行い、シミュレータの妥当性について検討を行った。その結果、本研究で開発したシミュレータが火攻法のシミュレータとして十分なものであることがわかった。

本章ではさらに、理論計算により、燃焼管実験結果の解析を行った。その結果、火攻法における主たる排油機構と油層内に形成される油バンクについて新しい結果が得られた。まず排油機構についてであるが、乾式火攻法に関する従来の研究では、温度の上昇による原油の粘度の低下が油の流動性を改善し、これが火攻法における主な排油機構だと考えられていたが、本研究の結果によると、油層で温度が高くなった区域のほとんどは、油が既になくなった区域あるいは液体としての流動性を失った油が存在する区域であり、実規模の火攻法について言えば、油層全体に比べて、温度の上昇の影響を受け、液体として流れている油の粘度が低下する区域は、ほぼ無視できるような局部のみであり、火攻法では気化・凝縮による物質の移動が特殊な排油機構として重要であるということが明らかになった。

第4章 シミュレーションによる油層内挙動の解析と火攻法適用条件の検討

本章ではまずはじめに、本理論計算で基準として定めた状態での火攻法の挙動解析を行った。その解析から油層内の挙動が4期に分けられることを新しく述べた。その第1期は火攻法の初期で、そこでは油バンクの形成がみられず、全体の流れがガス押しの様相を呈している。第2期は、油バンクの形成が次第に活発になり、バンクが拡大する時期である。第3期は、油バンクが生産井に到達して、その幅が次第に短くなっていく段階であるが、火攻法の効果が現れた主要な生産期である。第4期は、流体としての油の産出が終了し、その後燃焼帯が生産井に到達するまでの期間で、経済性からみて、生産価値がない段階である。

次に、油層条件及び原油性状などについての7つのパラメータが火攻法の挙動に及ぼす影響を個別に解析した。その結果をまとめると次のようになる。

- ① 初期の流体の飽和率と油層の絶対浸透率は、火攻法の実施に経済的影響を与えるが、純技術的観点からは影響を及ぼさない。
- ② 油層の孔隙率は、火攻法の適用性に大きな影響を与える。すなわち、孔隙率が小さい油層では、

発熱源としての燃料が少なく、また油層岩石の熱容量が大きくなるので、温度の上昇が難しくなる。さらにそのうえ、孔隙率が小さいと、伝導による熱損失量が多くなって、燃焼反応の持続が困難になる。

- ③ 原油の比重量が火攻法の適用性に及ぼす影響は残留油飽和率が及ぼす影響よりも大きい。これは流れが火攻法の適用性に及ぼす影響より、気化・凝縮の影響が主となるからで、第3章で明らかにした排油機構の挙動と対応する。
- ④ ある程度以上の油層厚さがなければ、外部への熱損失により、火攻法の実施が不可能となるが、その限界油層厚さは、その他の条件により異なっている。
- ⑤ 火攻法で軽質油を採取するのは困難である。また火攻法の実施が可能な範囲では、原油の比重量の増加により、採取率など経済的効果は低下する。
- ⑥ 空気圧入量は火攻法の適用性に大きな影響を与えるので、空気圧入量を適当にとることにより火攻法の適用範囲を拡大することが可能である。また、火攻法の実施が可能な空気圧入量の範囲内であっても、空気圧入量があまり少ないと、生産時間が急激に増加し、同量の油を生産するのに累計空気量が逆になる恐れがある。したがって、空気圧入量が少ないほど生産コストが低くなるということはなく、最適な空気圧入量が存在する。

本章では最後に、7つのパラメータの影響について総合的に評価し、火攻法適用可能性の判定、並びに空気圧入量、採取率、燃焼帯進行速度及び油層内最大圧力勾配を予測する式を得ている。これらの式は火攻法の設計・実施にあたり、経済性、生産時間、設備能力及び空気圧入圧力低下のための補助処置の必要性などの判断の参考にされる。これらの式は以下のである。

① 火攻法適用可能性の判定方程式

$$\begin{aligned} \bar{T} = & 518.24 + 2886.6 \phi + 68.373 \ln (H - 0.19) + 35.265 \\ & \cdot \ln (S_{Or} - 0.099) + 128.75 \ln (\gamma_{Oo} - 870) \\ & + 230.40 \ln (V_{air} + 0.001) \end{aligned}$$

② 採取率の予測方程式

$$\begin{aligned} \eta_o = & 0.77796 + 0.16637 S_{Oo} + 0.17000 \phi - 0.081209 S_{Or} \\ & - 6.1089 \times 10^{-8} (\gamma_{Oo} - 870)^3 \end{aligned}$$

③ 燃焼帯平均進行速度の予測方程式

$$\begin{aligned} \overline{VT} = & 13.319 - 10.094 \phi - 4.0825 S_{Or} - 8.875 \times 10^{-3} \gamma_{Oo} \\ & + 835.23 V_{air} \end{aligned}$$

④ 油層内の最大圧力勾配の予測方程式

$$\begin{aligned} \Delta P / \Delta x = & -158.91 - 71.296 S_{wo} - 44.509 \ln (K) + 42.994 \phi \\ & + 0.24076 \gamma_{Oo} + 11.578 \ln (V_{air}) \end{aligned}$$

第 5 章 結 論

以上の各章で述べたように、本研究は理論的研究を主とし、火攻法を実施した場合の油層内挙動解析及び火攻法の適用可能な条件などについて検討を行ったものである。従来のシミュレータでは、二のパラメータの影響を評価するにとどまっていたが、本研究では、各種パラメータを総合的に評価することができた。

審査結果の要旨

火攻法は従来の方法では油層に残留してしまう石油を採取することを目的とした採油法として注目されており、この方法の確立によって可採埋蔵量の増加が期待される。しかし火攻法は油層に残留している油の一部を燃焼させるため、これまでの採油法には含まれない現象、すなわち油層内の原油の燃焼及び蒸発凝縮などの現象が、熱移動、物質移動現象と複雑に影響しあい、火攻法における油層の流動挙動の解明を困難にしている。このため未だ十分な解明がなされていない段階である。

本論文は新しい数学モデルにより火攻法のシミュレーションを行う計算方法を開発し、そのモデルにより油層内の挙動解析並びに火攻法の適用可能な条件について検討を行うことにより、火攻法の発展に資することを目的とした研究成果をまとめたもので全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では新しいモデルによる火攻法の計算方法の開発研究について述べている。火攻法では油層内の温度が広範囲にわたって変化するため、多成分の混合物である原油の組成の変化及びそれに伴う物理、化学的性質の変化が重要な問題となる。本モデルでは、これを原油の比重量の変化によって表現する方法を採用した。これにより実用上十分な精度で現象をシミュレートすることができ、かつ実用上可能な時間内で計算できるようになった。これは優れた成果である。

第3章では本研究で開発した計算方法による計算に必要なパラメータを測定するための実験、並びに本モデルの有効性を検討するためにに行った燃焼管による小規模火攻法実験、及びその実験結果と計算結果の比較検討について述べている。火攻法実験と計算結果の比較検討により、本研究で開発した火攻法の計算方法が実用上十分な精度を有し、火攻法における油層内の挙動解析に有効なものであることを明らかにしている。

第4章では本研究で開発した計算方法による油層内の挙動解析並びに火攻法の適用条件に関する検討について述べている。はじめに油層条件、原油の性状及び火攻法の実施条件について合計7つの因子を取上げ、それらの因子が火攻法の挙動に及ぼす影響について検討し、その影響の程度を明らかにしている。また火攻法実施の全過程が4期に分けられることも明らかにされた。これらは有用な知見である。ついで火攻法の挙動について総合的な解析を行い、その結果から火攻法の設計及び実施に必要とされる火攻法の適用性判定方程式並びに油採取率などの予測方程式を得ている。これらは火攻法実施上の指針となるものである。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、理論研究を主とし、火攻法を実施した場合の油層内の挙動解析及び火攻法の適用可能な条件について検討を行うことにより、多くの新しい知見を得たもので、資源工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。