2 次回収の計画に対する基礎知識

藤 井 清 光*

Fundamental Knowledges for Planning Secondary Recovery

By

Kiyomitsu FUJII

Abstract: For the purpose of obtaining a successful result of secondary recovery method it needs a detailed plan for the project. Fundamental knowledges for planning the method, including a reservoir study carried out by the use of decline curves, are described in this paper.

I. 計画に対して考えるべきこと

わが国の油田で行われた多くの2次回収のなかには、非常によい成績を上げたものがある半面、全く失敗に終わったものもある。それらについて調べてみると、成功したもののなかには油層の条件が元来よいものもあるが、計画がよかつたために、よい結果になつたものがある。逆に、かなりよい条件の油層でありながら、計画が不適当であつたために、失敗したものもある。このように、2次回収を成功させるためには、綿密な計画を立ててこれを実行することが最も重要なこととなる。

2次回収の計画は次の順序によつて行われる。

- (1) 油層の調査
- (2) 2次回収の種類の決定
- (3) 作業計画を立てること

まず、2次回収は自然条件である油層の性質に大きく支配される。それでこれについて十分に調査する。そして油層に適した2次回収の方法を決定する。次に油層の性質に応じた作業計画を立てる。作業計画を立てる場合には、次の項目について考慮する。

- (1) 注入する流体の種類と量
- (2) 掘るべき井戸の数、配置、その時期
- (3) 井戸からの産出量(時間の経過による)
- (4) 現在ある採油井に対する処置
- (5) 地上設備——注入流体の処理装置

以下にはまず、一般の2次回収に対する油層の調査に

ついて記し、次には各回収法の計画に対する基礎知識について記す。後者に対しては、わが国の現状では、2次回収のなかでもガス圧入と水攻法が主体をなしているので、おもにこれについて記す。

II. 2次回収に対する油層の調査

2. 1. 調査の種類

2次回収を行う前に油層について十分に調査し、油層の状態を正確に知らなければならない。これに基づいて、最も適した2次回収の方法を計画する。調査項目には次のようなものがある。

(1) 地質および地質構造：これは2次回収の計画の基礎になる。特に油層の分布状態を明らかにする必要がある。

(2) 深さ：油層の分布状態が明らかになれば、深さは自ずから定まる。これは掘鑿費と採油費に関係がある。したがつて油層の深さは、2次回収の経済的判断の根拠になることがある。特に水の注入(水攻法)においては、従来は深い油層に対しては実行されなかつた。

(3) 層の厚さ：油層が薄い場合には、経済的に成り立たない。それで油層はなるべく厚いものが多い。層が非常に厚い場合には、1度で2次回収を行うことができないので、2段にわけて行わなければならない。しかしわが国には、このように厚い油層はほとんど存在しない。

(4) 孔隙率：一般には孔隙率は大きい方がよい。それは油の埋蔵量が大きくなる可能性があるからである。

* 東大工学部採油教室

孔隙率はロータリー式でコアを採り、それについて行うのが普通である。孔隙率の測定には非常に誤差が入りやすいので、充分な注意が必要である。

(5) 流体の飽和率：油層の孔隙に存在する流体の飽和率は、2次回収の成功のいかに深い関係がある。油の飽和率は高いほどよい。これが低いと2次回収の成功の可能性は少ない。ガス圧入を行う場合には、ガスの飽和率が低いことを必要とする。ガスの飽和率が高いと、ガスが油を押さないで流れるからである。水攻法を行う場合には、水の飽和率が低いことを必要とする。水の飽和率が高いと、水が油を押さないで流れるからである。

(6) 油の埋蔵量：油の埋蔵量は(油層の体積)×(孔隙率)×(油の飽和率)×(油の容積係数)により計算するのが1方法である。油の埋蔵量は大きいほど経済的に有利である。

(7) 滲透率：滲透率が小さすぎると、流体(特に水)が入りにくいので、有利でない。滲透率は油層全体にわたつて一様であることが望ましい。油層の相対滲透率としては、油に対するものはなるべく大きく、ガスに対するもの、および水に対するものはなるべく小さいことが望ましい。

(8) 流体の流れに関する油層の連続性：油層のなかには、流体の流れを遮断するものがあつてはよくない。すなわち、流体の流れに関する油層の連続性は大きいほどよい。

(9) 流体の性質：油の粘性が高いと、特に水攻法が実行しにくくなる。粘性の高い油は、火攻法に対してはさしつかえない。油層に含まれている水のイオンが時に作業に関係する。すなわち、水が波濤しやすい物質を含んでいるか、または水が腐蝕性をもっているか等も見落してはならないことである。

(10) エネルギーの種類：油層のなかの油を井戸に向かって流すエネルギーとしては、ガス・水および重力がある。このエネルギーの種類は2次回収の種類決定に関係することがある。一般に水押し型の油層は水攻法に適しない。ガスキャップの存在も水攻法に適しない。

(11) 油層岩の成分：油層に含まれている粘土鉱物は水に接触して膨潤することがある。このことは油層のなかの流体の流れに対して抵抗になる。それで水攻法を行う場合には、油層岩のなかの粘土鉱物の種類および量について、予め調べなければならない。

(12) 開発経過：各井戸の記録に基づき、2次回収の対象となる油層全体の開発経過について調べる。開発経過として必要な記録は、油層の圧力および各流体(油・ガス・水)の産出量がおもなものである。これより油層のエネルギーの種類、ガスの存在状態、水の侵入状態、

井戸の故障の程度、油の採収可能埋蔵量などを知ることができる。これより2次回収の実行方法を具体的に決定することができる。

(13) 採油井の状態：現在ある採油井の状態は2次回収の作業に直接関係する。特に必要なものは、ケーシングの配置、孔明管の位置、行われた水止めの状態、採油上の障害の程度などである。

2. 2. 調査方法

油層の状態を知るには、次の記すような方法を行う。

(1) 各種のログによる判断：測定記録があれば、なるべく多くの種類のものを使用する。古い井戸で、正確な記録のないものには、放射能の測定が適している。

(2) コア分析：孔隙率、流体の飽和率および滲透率がコア分析の最も重要なものである。水攻法を行う場合には、粘土鉱物の性質について調べる必要がある。

(3) 流体の試験：油層に含まれている油・ガスおよび水の性質について試験する。

(4) 油層の状態の判断：これには油層が開発されてからの総ての油層の圧力の記録、各種流体の産出量の記録を用うる。

(5) 過去の作業記録による判断：これには仕上げ方法、水止め方法、採油に関する障害、掘り下げ等の記録を用うる。

(6) 試験的の注入：2次回収の成功のいかに最終的に判断する方法として、試験的に流体を注入する方法がある。

2. 3. 減退曲線による調査

採油井より産出する油の量は、時間の経過とともに一般に減退する。これは減退曲線といわれる。この曲線は油層の物理的性質、特に滲透率・圧力・油の粘性・油の飽和率などの影響を強くうける¹⁾。したがって多くの採油井の減退曲線を比較することにより、油層の全般的性質を知ることができる²⁾。これの要点を記し、2次回収の計画に応用すれば次のようになる。

(1) 流体の流れに関して連続した油層に存在する採油井の油の産出減退曲線を片対数グラフ(産出量を対数目盛にとる)に記すと、油層の物理的性質が不均一であっても、各曲線は平行になる。このことより油層の流体の流れに関する連続性を知ることができる。2次回収の計画においては、注入した流体が流れる範囲を知ることが最初に必要になる。上の方法により連続性を知れば、確実な計画を立てることができる。

(2) 減退曲線より油層の総ての部分の(滲透率)×(油層の厚さ)の値の分布状態を知ることができる。このことは注入井および採油井の配置をきめるのに役立つ。

(3) 減退曲線の形は油層のエネルギーの影響をうけ

る。このことより採用すべき2次回収の種類を決定することができる。さらに油層において、部分的に作用するエネルギーが異なる場合には、それに応じて注入井および採油井の位置を有効に決定することができる。

(4) 油層が垂直方向に少し離れて、いくつか存在する場合には、減退曲線を分析することにより、各層を別々に評価することができる。2次回収は必ず層ごとに行わなければならない。わが国の古い油田では、1本の採油井によつて、いくつかの油層を同時に採油している例がある。もしその油田で多くの採油井が掘られ、それが少しずつ掘り下げしているような場合には、減退曲線を使用して、油層の存在位置、油層の大体の性質、油層の拡がりの程度などを知ることができる。このことは2次回収の計画を立てる場合に非常に役立つ。

(5) 減退曲線の形から、油層の2次回収に対する成功の可能性を推定することができる。例えば、曲線全体が一定の傾向で減退しているものより、急に折れ曲つたものを多く含む油層の方が、2次回収に対しては有利である。

(6) 一般に減退曲線より採取可能性を計算することができるので、2次回収の実施の経済的判断をすることができる。

以上のように減退曲線は2次回収の計画に有効に利用される。ただし欠点としては、ある程度開発された油層でないと減退状態がわからないことである。しかし構造の似た油田では、かなり似た減退状態を示すことがある。それで一般の油田について研究することは、特定の油田の状態を判断するのに非常に役立つ。わが国の油田の減退曲線については、発表されたものがある³⁾。

III. ガス圧入の計画に対する基礎知識

油層に対して行われるガス圧入としては、圧力の回復 (pressure restoration)、圧力の維持 (pressure maintenance) およびガス押し (gas drive) の3つが行われる。このうち、現在のわが国で実施が考えられるのは、後の2つであるので、これについて記す。

3. 1. 圧力の維持

(1) 注入するガスの種類：最も普通には井戸から出た天然ガスが用いられる。天然ガスはガソリンプラントを通つて重い炭化水素は除かれ、大部分はメタンとなり、井戸に注入される。したがつてガスの処理が簡単でない。

(2) 井戸の数：これは油層の大きさに関係する。注入井の数は他の2次回収の方法に較べると非常に少ない。一番少ない場合は1本でよい。その位置は油層構造の一番高い点にきめるのが普通である。油層の大きさと

その構造によつて、注入井はこれより増加させる。採油井の数は最も経済的になるように決定すればよい。このためには井戸のスペーシングの理論に基づくのがよい⁴⁾。採油井の配置は普通の油田の開発の方法を採用してよい。ただし注入井と採油井の間の距離を余り近づけないようにするのがよい。ガスの注入を始める時期は、油田が開発されてから後、なるべく早い方がよい。

(3) 実施後の問題点：この方法で一番問題になるのは、注入井から入ったガスが直ちに採油井に出てしまうことである。このことが発生する原因を記すならば、次のようになる。

a. 油層に接してガス層がある場合。そのガス層が注入されたガスの通路になつて、ガスが採油井に流れる。このような場合には、注入井においてセメントなどを使用して、ガス層をふさぐことが必要である。

b. 採油井がガスキャップの近くにある場合。ガスキャップが存在する時には、開発が進むに従つて、そのガスキャップは拡がる傾向となる。そのためにガスが採油井に流れる。これを防ぐためには、ガスキャップの存在する油層では、ガスキャップの近くに採油井を作らないことが必要である。

c. 油層の滲透率が場所によつて異なる場合。流れの抵抗が小さいために、滲透率の大きい部分の油がガスによつて先に押し出される。その後はそこがガスの通路になる。したがつてこのことは、ガスを注入し始めた当時には起ることが少なく、開発が進み、油が産出されるに従つて起りやすくなる。これを防ぐ方法は実際には非常に難しいのではあるが、粘性の高い油をガス油比の高くなつた採油井に対して押しこむことは、比較的良好な結果となる。

d. 油の飽和率が低くなつた場合。油層の開発が進むに従つて、油の飽和率は低くなる。そのため油に対する相対滲透率が減少し、ガスに対する相対滲透率が増加する。このためにガスが油を押さずに、直接に採油井に流れる。油層が古くなると、どうしてもこのようなことが発生するので、これを防ぐことはできない。この時期になればガスの注入をやめるべきである。

3. 2. ガス押し

ガス押しの計画において、最も問題となるのは井戸の配置である。次に油層の条件と井戸の配置の関係について記す。

(1) 傾斜の急な構造では、構造の高い所に注入井を配置し、低い所に採油井を配置する。

(2) 油層が水平な時には、注入井と採油井を交互に配置することができる。

(3) 構造の低い所にある油を上へ押し上げる目的の

場合には、低い所に注入井を配置する。

(4) 滲透率に差がある場合には、滲透率の低い所に注入井を配置し、滲透率の高い所に採油井を配置する。

(5) 普通は注入井1本に対し、採油井を4~8本にする。この比率は油層の性質および開発方針によつてきめられる。

(6) 油層の性質が(平面的に)一樣であるならば、採油井をなるべく一様に分布する。

(7) ガスが油を押さないで、採油井に現われるような時には、この注入井を採油井に変え、他の場所に注入井を配置する。

(8) 水の産出の多い所には注入井を配置しない。

IV. 水攻法の計画に対する基礎知識

水攻法の作業計画において、基礎知識となるものを記せば以下ようになる。

(1) 試験時代の井戸数：油層の性質によつて、水攻法に適するものと、適さないものがある。それで初めて水攻法を行う場合には、少ない井戸数で試験を行う。それは次のような順序による。

種 類	注入井の 数	目 的
注 入 試 験	1	油層に水が入るかどうかを調べる
pilot test	3	水が油を押すかどうか調べる。必ず3本でかこむ
部分的な水攻法	4~7	本格的な水攻法を行う前に、部分的に行い、経済的に引きあうかどうか確める

(2) 井戸の配置：標準の形は5点法である。油層の面積が大きくない場合には、注入井を周囲に配置する。かなり大きな傾斜をしている場合には、構造の下側に注入井を配置する。

(3) 井戸の距離：これを決定する要素は油層の性質と開発期間である。滲透率が小さい場合には距離を小さくする。開発期間を短かくするためには、距離を小さくする。しかし注入井と採油井の距離が小さすぎると、水が直線的に進み、狭い区域の油しか押さないという欠点がある。

(4) 水の圧力：注入する水の圧力は油層の滲透率、井戸の距離、開発の速さ、地上設備などにより決定され

る。一般的には(注入井と採油井の間がかなり離れている場合)圧力が高い方が、油の回収率が高い。しかし圧力が高すぎると地層が破壊されるので、注意を要する。破壊圧力は一般に深さ1m 当り $0.12\sim 0.35\text{ kg/cm}^2$ である。

(5) 水の注入量：油を押し出すために必要な水の量は、一般に油層の孔隙の量の1~1.5倍である。必要な水の量を毎日の注入量で割ることにより、水攻法の期間がきめられる。これは8~10年以上にならないようにする。

(6) 油の産出量：理想的に油が水により押し出されれば、油層の孔隙に残る油は20~30%にまで下る。しかし実際には、このように能率よく回収されることは少ないと考えられるので、残留率をこれ以上として、将来の油の産出量の予想を立てるべきである。

(7) 水の供給方法・処理方法：一定量の水が1年中確実に供給されなければならない。一般に油層より出る水が最も適している。この水が足りない時には川の水、または海の水が使われる。清水より塩水の方が水攻法には適している。水が鉄管を腐蝕させたり、油層のなかで沈澱物を生じたりする場合には、水の処理を行わなければならない。

(8) 古い井戸の利用：現在ある採油井を利用するか、または新しく井戸を掘るかは、経費によつてきまる。わが国では採油井が多すぎるので、まずこれを利用することを考えるべきである。昔の井戸は水止めが不完全であり、かつ多くの油層を同時に採油したことがあるので、古い井戸の利用には注意しなければならない。特に注入井は完全な井戸であることを必要とする。

参 考 文 献

- 1) 藤井清光：Fundamental Properties of Decline Curve, 石技誌, Vol. 18, No. 6, 1953. Vol. 19, No. 2, 1954.
- 2) 藤井清光：Application of Theory of Decline Curve to Oil Field Exploitation, 石技誌, Vol. 24, No. 2, 1959.
- 3) 藤井清光：わが国の油田の石油産出の減退曲線, 石技誌, Vol. 24, No. 4, 5, 1954.
- 4) 藤井清光：A Study on Well Spacing, 石技誌, Vol. 24, No. 6, 1959.