

■ 特集 ■ 採鉱技術からみた資源開発

石油技術からみた地下資源開発

Exploitation of Petroleum Reservoirs for Maximum Recovery.

田 中 正 三^{*}
Shozou Tanaka

1 緒 言

1973年の石油禁輸から始まった石油供給の不安は、現在まで絶えず日本を揺さぶっております。この情勢下で多くの論説が発表されておりますが、開発分野の技術的側面を解説したものは少ないように思われます。

「サウジアラビアが100万 bbℓ/日の増産を決定した」といった新聞記事が、しばしば目に止ります。100万 bbℓ という数字は何処から出て来たのでしょうか。常識的に考えて政治と経済の接点で決った数字でありましょう。現在世界はサウジアラビアの石油増産に大きな関心を持っています。世界一の埋蔵量を有するサウジアラビアは、その意志さえもては無限の増産の可能性を持っているようにも思われます。しかしサウジアラビアの増産能力は技術的にみてどれくらいか、当事者以外誰も分からないようにも思われます。そこで時には逆にサウジアラビアの石油生産限界説がでて来たりします。

石油問題が政治と深くかゝわっている現在、技術的な問題点は秘密のベールに包まれるのは当然ですが、新聞や雑誌で石油関係の記事を読む時、一応の油田開発の技術的常識を持つことも必要なことと思われます。そこでこゝでは石油生産量はどのような条件より決定されるか説明したいと思ひます。

2 油層中の流体の流動

油田の埋蔵量が非常に大きいとしても、その油田から採れる産油レートには限界があることを知らねばなりません。石油タンクのバルブを広く開くと、短時間に確実にタンクはからになります。油田の場合採油井

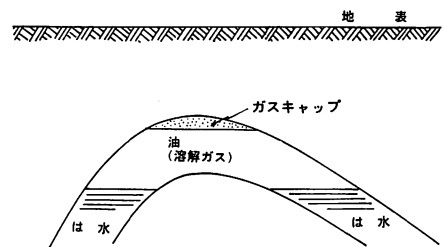


図-1 油層中の流体の分布

のバルブを広く開くと、一時的には多量の油が流出しますが、油の流出は短時間で止ってしまい、油層には多量の油が残留してしまいます。油層から永続的に採油し、採収率を上げようとするれば、産出レートを制限することが絶対に必要なのです。油層中の油は、同じ油層に存在する水やガスの力により油層内を流れるのですが、採油井のバルブを広く開くと、これら水やガスのもつ有効な作用が浪費されてしまうのです。

図-1に油層中の流体の分布を示します。油層上部にガスキャップがあり遊離ガスが存在します。油層下部には水（はずい）があり、油には天然ガスが溶解しています。これらは水とガスが油の流動のエネルギー源です。

油層開発が始まり油層圧力が低下すると、はずいは油を押しながら油層中央部へ流入して来ます。この作用を水押し排油といいます。産油レートとは水の侵入レートが均合えば、油層圧力の低下は最小限となり、油は安定したレートで長期間産出します。中東の大油田の排油機構は水押し型であると言われてています。

ガスキャップ中の遊離ガスの作用は、はずいの作用と同じです。溶解ガスは油より分離し膨張し油を油層から流出させます。前者をガスキャップガス押し型、後者を溶解ガス押し型と呼んでいます。

* 秋田大学鉱山学部教授

〒 010 秋田市手形学園町 1-1

これらは水とガスの作用により、始めて油は油層中の採油井へ向って流れて行くのです。

3 産油レートを制限する理由

油層中を流体が流動するのは、油層圧力と採油井の圧力に差があるからです。この圧力差をドローダウン (draw down) といいます。坑口のパルプを広く開きドローダウンを大きくすれば、産油量は増大しますが、こゝに悪い効果が現われて来ます、その一つが水の不規則な侵入です。

図-2は油層の平面図です。油層の周囲には水が存在しています。油層圧力の低下につれ、水が一様に入ってくる油の採取率は非常によくなりますが、採油井の圧力を余り低くすると、図-2のように水は油を押し分けて採油井へ進み、坑井のまわりを占領してしまいます。このような現象をフィンガリング (fingering) といいます。フィンガリングが起ると産油量は激減し、採取率も低下します。このため採油井のパルプは広く開けないのです。

次にガスエネルギーを考えてみます。油に溶解しているガスは、圧力の低下と共に油より分離し、油を伴って油層中を流れますが、ガスの流動性が大きいので、油を油層に残して採油井へ流れる傾向をもっており、早期にガスエネルギーが枯渇してしまいます。採油中のガスと油の産出レートの比をガス油比と呼んでいますが、ガス油比が大きいことは、ガスが油をバイパスしている証拠なので、採油に際してはガス油比を大きくしないよう努めているのです。

以上のように油層からの油の産出は、タンクからの油の流出と本質的に異なり、パルプの開き方一つで、油層からの油の採取率言い替えると累計産油量に大きな差がでてしまうのです。

4 採油方法

図-3に採油井の設備を示します。石油はチュービングと呼ばれるパイプから地表へ流出します。坑井の流出口の先端にビーン (bean) という器具を取付けて流れを絞っているのです。ビーンとしては金属製の棒に小孔をあけたものから、調節式のパルプ型のものまであり、実情に応じて使用されています。

採油井の産油量はこのビーンにより制限されているので、ビーンを大きくすれば当然増産は可能ですが、前に説明したように、ビーンを広く開くこと

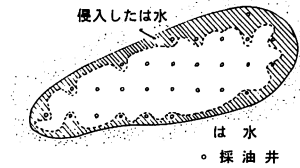


図-2 は水の不規則な侵入

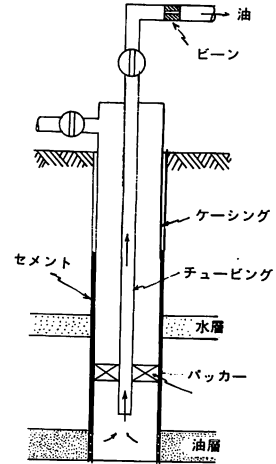


図-3 採油井の設備

はできないのです。

5 油層の採取率

油層の採取率はビーンのサイズにより左右されることを説明しましたが、どんなによい技術を用いても、油層中の油を全部採ることは不可能です。

油層の採取率は排油機構により影響されます。水による水押し型排油が最も採取率が高く、ガスキャップガス押し型、溶解ガス押し型と続きます。表1に各排油機構による採取率の値を示します。油層の形態は千差万別なので、表1の値は一つの目安にすぎませんが、これらの値は十分に考慮された技術を用いた結果

表1

排油機構	採取率%
溶解ガス押し型	5~30
ガスキャップ・ガス押し型	20~40
水押し型	35~70

なので、ビーンを広く開き一時的増産をやると、採取率は表1の値より下がってしまいます。ですから石油の増産はなかなか難しい問題なのです。

6 採油井の産出能力

中東の採油井は1日に1000 kℓ以上の産油量があります。日本ではその2けた下の数十 kℓの石油が出る坑井さえ余りありません。このように石油井はそれぞれ固有の産油能力を持っているのです。ではこれらの採油井の産出能力をどのように評価するのでしょうか。

表2はAとBという2本の試掘井をテストをした時の結果であるとしてします。

図-4は表2のドローダウンと産油レートをプロットした直線を示します。この直線のこう配を産出指数と呼び、この値で産出能力を判定するのです。

B坑井はA坑井より大きい産油量が記録されていますが、産出指数は逆に小さくなっています。さて採油をする時は余り大きなドローダウンをとれないことは既に説明した通りなので、A坑井では油層圧力の10%を、B坑井では8%のドローダウンを採るとしますと、

$$A \text{ 号井の産油量} = 2.0 \times (152 \times 0.1)$$

$$= 30.4 \text{ kℓ/日}$$

$$B \text{ 号井の産油量} = 1.2 \times (138 \times 0.08)$$

$$= 13.2 \text{ kℓ/日}$$

となります。

以上の例でお分かりのように、坑井の産油量はその坑井の産油能力と油層の排油機構の組合せにより決まるので、大きな産油量が報告された坑井から、通常は必ずしも多量の油が流出しているものでもなく、また希望するだけの油を採り得るものでもないのです。

表 2

採油井	産油レート	油層圧力	採油井の圧力	産出指数
	kℓ/day	kg/cm ²	kg/cm ²	kℓ/day kg/cm ²
A	24	152	140	2.0
B	36	138	108	1.2

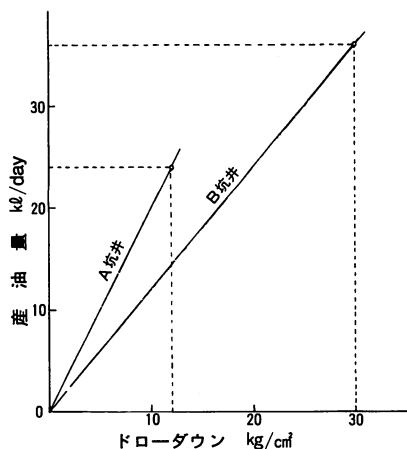


図-4 採油井の産出指数の判定

7 油層圧力の維持

油田開発に伴い必然的に油層圧力は低下して行き、ついには圧力が枯渇し油田が放棄されることとなります。そこで油層圧力を高く維持できれば、それだけでもよいことですが、油層中の油の流れを考える時、圧力を高く保てれば、採収率を大きくできる好条件が生ずるのです。次にこのことを考えてみます。

7.1 ダルシーの式

油層中の油の流量はダルシーの法則により計算されます。直線流動では次式を用います。

$$q = \frac{ak(p_1 - p_2)}{\mu \ell} \quad (1)$$

この式で、

q = 油の流量, cm³/sec

k = 浸透率, darcy

p_1 と p_2 = 上流および下流側の圧力, atm

a = 流路の断面積, cm²

ℓ = 流路の長さ, cm

μ = 油の粘度, cp

さてこの式を調べてみますと、流量は浸透率 k に比例し、油の粘度 μ に反比例します。浸透率は岩石の性質で、産油量の大きい油層の浸透率は大きい値となります。

この浸透率と粘度は、油層圧力の変化と共に値が変わって来ますので、この点を考えてみます。

7.2 油の粘度

油層中の油には天然ガスが溶解しています。テレビなどで映し出される中東の油田では、赤々と天然ガスが燃えており、華やかな彩りを添えておりますが、最近では資源保護の立場から、このガスを利用する努力が払われるようになりました。

油層中での油とガスの関係を考えてみますと、油層圧力が高い時は多量のガスが油に溶解しています。ガスを多量に溶解している油は粘度が低く、流れやすいのです。油田開発が進み油層圧力が低下しますと、ガスは油より分離し、油の粘度は高くなります。その結果油は流れにくくなりますので、油層圧力の低下は望ましくないのです。

図-5は秋田県の油田の中質油の圧力と粘度の関係ですが、ガスの分離が油の粘度に大きい影響を与えることが分かります。

7.3 有効浸透率

式(1)は油層中を油のみが流れるとした時の、油の流

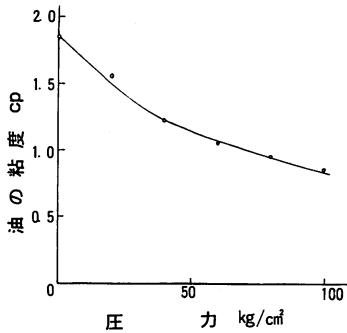


図-5 油の粘度と圧力の関係

量の計算式です。いま油層中を油とガスが一諸に流れている状態を考えてみます。

この時は油とガスそれぞれの有効浸透率という考え方を導入して計算します。直線流動の時の油およびガスの流量の式は次のようになります。

$$q_o = \frac{ak_o (p_1 - p_2)}{\mu_o l} \quad (2)$$

$$q_g = \frac{ak_g (p_1 - p_2)}{\mu_g l} \quad (3)$$

この式で、

k_o = 油の有効浸透率

k_g = ガスの有効浸透率

o = 油を示す添字

g = ガスを示す添字

他の記号は式(1)と同じ。

これらの式を用いて計算する時、有効浸透率のデータを必要とします。有効浸透率は図-6のように油層の油(またはガス)の飽和率の関数であることが見出されています。図-6に示されているように、油層中のガスの飽和率が増加すると、油の有効浸透率は急速に減少し、一方ガスの有効浸透率は急速に増大します。もち論この有効浸透率曲線の形は、油層ごとに違っており画一的なものではありませんが、一般的な傾向は同じです。

油層圧力が下がると油よりガスが分離します。この分離したガスは油の有効浸透率を減少させ、油の流れを妨害し、産油量を低下させることとなります。ガスの有効浸透率は大きくなりますから、ガスは油層中をより多く流れ、結果としてガスエネルギーの枯渇は加速され、採収率は悪化します。

以上の理由から油層の圧力の低下は、できるだけ食い止めねばなりません。しかし油層から油を採れば必ず油層圧力は下がりますので、採油井からの油の流出を絞り、油層のもつエネルギーを有効に使うよう、採

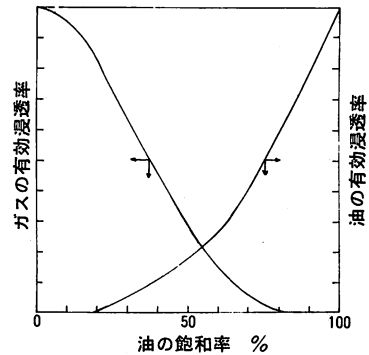


図-6 油およびガスの有効浸透率と油の飽和率の関係

油管理するばかりでなく、積極的に油層圧力維持の方法を適用せねばなりません。この方法として一番広く用いられているのが水攻法です。これを次に説明しましょう。

8 水攻法

水攻法は水圧入法とも言われています。油層に水を圧入し、油の増産を計ろうとする試みは、早くから実施されていました。水攻法が広く適用されるようになったのは1950年代からです。

水攻法では水圧入井と採油井の配列に工夫がされていますが、ここでは図-7に示すような、水圧入井を油層周辺に配置する方法を説明します。この方法では圧入された水は、油層中央部の採油井へ向って油を押しに行きます。油層から油が流出すると、油が流出した後の孔げきは、普通は油より分離したガスにより占められますが、圧入水的作用により、この孔げきに油を押し出して行けば、油層圧力の減退はかなり防げることになります。かゝる水攻法を圧力維持法と呼んでいます。水攻法の実施により油層圧力を高く維持しますと、前に説明した理由により油の採収率は大きくなります。しかしコストも掛かりますので、石油価格が低い

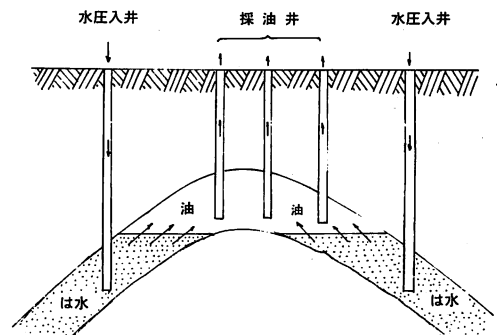


図-7 油層の周辺よりの水の圧入

時には有利な方法とはいえません。石油価格が上昇しますと状況は変わり、魅力ある方法となります。そこで油田開発の当初から水の圧入が開始されることとなります。

水攻法は石油を多量に産出している中東や北海またソビエト連邦でも盛んに実施されております。石油技術者は産出する油量と圧入する水量のバランスをとり、油層圧力の低下を防ぎ、産油量を高水準に保つよう努力をしているのです。

石油が不足した、さあ石油の増産をしてくださいと、産油国に要請しても、採油井のバルブを単に広く開けばすむというものでなく、油田開発の原則の変更ということになりますので、なかなか希望するだけの石油の増産はしてもらえぬというのが現実です。

9 巨大油田

石油を増産しようとして採油井の圧力を下げると、エネルギーの浪費を招くので、増産にはある限界がある。広く水攻法が実施されているので、石油増産の要請は油田開発の原則に関係するので、直ちには応じかねることを説明して来ました。したがって新しい油田が発見されない限り、産油量の増加は今後余り望めないこととなります。

現在世界中で油田が発見されていないかという、そうではありません。次々と油田は発見されています。油田探査開発の範囲も陸上ばかりでなく、海洋へまた極地へと広がっております。

ではどうして石油が不足するかといいますと、理由の第一は消費量の急激な増大であり、第二は既存油田の産油量の減退です。油田からの産油量は必ず減退して行く、これが油田から石油を採る時の宿命です。この2つの要因に新しい油田からの石油の供給は飲み込まれてしまうのです。これを克服するためには数多くの巨大油田を発見するより外ありません。

巨大油田の定義は定まっていないようですが、5億 bbl 以上の埋蔵量を持つ油田を指しているようです。現在中東等にある巨大油田から出る石油の量は、全石油供給量の 85% に達しており、巨大油田が地域的に偏っていることが、石油問題の解決を難しくしているのです。

巨大油田を持たぬ日本が、多量の石油を使う限り、昭和 10 年代から 30 年代にかけて、巨大油田が中東で続々と発見された状況と同じ時代が再び来ない限り、石油事情の好転は望めないように思えます。

しかし油田の石油生産が合理的に実施されておることから、石油の生産量は高い水準を維持できます。要するに増産ができぬということは、石油の安定生産と裏表の関係にありますから、一概に悲観することでもないのです。

10 まとめ

石油問題について悲観論、楽観論いろいろ論文が発表されて来ましたが、中には石油技術の内容を十分理解していないと思われるものも見受けられました。

現在の石油問題は政治経済の問題ですので、本論文は要望に沿わぬものかもしれませんが、今後石油問題を考える時何かの御役に立てば、筆者として望外の喜びです。

