資 料

野外における放射線応用計測器の利用

3. 石油井検層†

宮入 誠

石油資源開発(株)技術研究所

190-11 東京都西多摩郡羽村町緑が丘 3-5-5

Key Words: oil well, neutron log, density log

現在、石油鉱業においては、油田の探鉱および開発段階で掘削した坑井の地層および油層の解析に検層という手段を用いているが、その中でも放射線を利用した密度検層機および中性子検層機と呼ばれるものが、油層の解析、すなわちどの深度のどの地層にどのくらいの量の石油があるかを調べるのになくてはならない不可欠なものになっている。その理由は、これら検層機が石油鉱業規格の標準ピットに基づきキャリブレーションされているため、その測定値に普遍性があること、そして測定値と地層の物理的パラメータとの関係が物質収支式のかたちで定量化できることである。

実際に、これらの検層機を用いて油層の解析がどのように行われるかを中心に話を進めることにする。また、密度-中性子検層以外の放射線応用検層機であるパルス中性子検層法についても述べる。

1. 石油井における検層の役割

検層とは、図1に示すように掘削された坑井に測定機を降ろし、深度に対して連続的に地層の密度、比抵抗などの物理量を計測する手法である。過去においては、石油井もコア掘が原則であり、これらのコアにより油層の評価を行っていた。しかし、1927年に、Electrical Coring という触れ込みで、フランスの Shulmberger 兄弟が、坑井の調査に比抵抗を計測する電気検層を導入して以来、徐々に検層が坑井間の地層対比、油層の定性的な評価などに使用されるようになった。その後1960年代に入って、密度-中性子検層機が実用化され、それまでの比抵抗検層だけでは求められな

かった地層の孔隙率等が算出できるようになり、油層の定量解析が可能となった。現在では金のかかるコアの採取は最小限に押さえられ、油層評価の大部分は検層により行われている。

2. 密度-中性子検層と油層解析

油層解析の目的は、掘削した坑井のどの深度にどのくらいの量の油があるかを求めることである。そのためには、貯留層の岩相、孔隙率(ϕ)、その孔隙を満たす油の割合(S_o)等を求めなければならない。図2は解析に用いる簡単な地層モデルで、地層は岩石の粒子(岩石マトリックス)とその粒子間の隙間(孔隙)により構成され、孔隙は水、油、ガス等の流体で満たされているとしたものである。このモデルより、単位体積当たりの油の量は $\phi S_o = \phi(1 - S_w)$ により求めることができる。

図1 検層作業概念図

† Field Uses of Radiation Applied Instruments. 3. Nuclear Well Logging in Oil Wells. Makoto MIYAIRI: Technical Laboratory, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd., 5-5, Midorigaoka 3-chome, Hamura-machi, Nishitama-gun, Tokyo 190-11.

$$\phi + V_{ma} = 1$$

$$S_o + S_w = 1$$

図2 地層モデル

図3 密度検層機原理図

2.1 密度検層機とそのレスポンス

密度検層機は、一般に γ - γ 密度計と呼ばれているものと原理的にはまったく同一のものである。現在使用されている装置は、多様な坑内条件に対応できるように、図3に示すような坑壁圧着タイプで、かつスペーシングの異なる2つのディテクタを用いたいわゆる dual detector タイプとなっている。このようにスペーシングの異なるディテクタを組み合わせることにより、誤差の原因となる坑壁に付着した密度の低い泥壁の影響を補正することができる。これらの補正は、装

図4 密度検層坑内装置と検層カーブの例

置内で自動的に行われる。装置は、石灰岩の標準ビットにより校正されており、検層カーブは、密度の単位で表示されるので、ほとんど補正なしに直接、解析に使用することができる。また、密度とともに坑径および自然 γ 線の強度も同時に記録される。図4に密度検層機の坑内装置および測定カーブの例を示す。なお、使用線源は、 ^{137}Cs 55.5 GBq (1.5 Ci)、ディテクタはシンチレーションカウンタを用いている。

密度検層機は、地層の密度を測定しているわけであるから、図2のモデルに対するレスポンス (ρ_b) は次式で表される。

$$\rho_b = \phi \rho_o + (1 - \phi) \rho_{ma}$$

$$\rho_o = (1 - S_w) \rho_o + S_w \rho_w$$

ここで、 ρ_o , ρ_w , ρ_{ma} はそれぞれ油、水、岩石マトリックスの密度である。油の場合は、 $\rho_o \doteq \rho_w$ であるから、 $\rho_b = \phi + (1 - \phi) \rho_{ma}$ となり、岩石マトリックスの密度が分かれば、孔隙率を求めることができる。

2.2 中性子検層機とそのレスポンス

中性子検層機は、一般的に中性子水分計と呼ばれているものと原理的にはまったく同一である。したがって、主として地層の水素原子密度に依存していると考えられるので、物質の水素原子密度を水の水素原子密度で除して標準化した値を hydrogen index (HI) とすると、モデル地層に対するレスポンス (HI) は次式で表される。

$$HI = (HI)_r \phi + (1 - \phi) (HI)_{ma}$$

$$(HI)_r = (HI)_w S_w + (HI)_o (1 - S_w)$$

(HI)_w は1であり、油の場合には (HI)_o も約1であるから、 $HI = \phi + (1 - \phi) (HI)_{ma}$ となる。

実際には、図5に示す石灰岩の標準ビットで、(HI)_{ma} = 0 となるように校正されているため、石灰岩では $HI = \phi$ となり、直接的に孔隙率と対応している。したがって、HI は中性子検層で測定される見掛けの孔隙率として ϕ_N と表記される。検層カーブ上では ϕ_N は

図5 中性子検層機キャリブレーションビット
(by American Petroleum Institute)

石灰岩を基準とした孔隙率 (porosity) という意味で, limestone porosity unit という単位で表示される。石灰岩以外の岩石では, $(HI)_{ma}$ は零にはならず, また ϕ と ϕ_N との関係も完全には直線にならない。図6に代表的な岩石に対する ϕ と ϕ_N の関係を示す。

ここで CNL とは, 中性子検層機の型式を示すもので, compensated neutron log の略である。したがって, ϕ_{CNL} とは, CNL タイプの装置によって計測された ϕ_N という意味で, 中性子検層の場合は, 装置の型式によってもキャリブレーションカーブが異なるため, このように区別する。

現在用いられている装置は, 図7に示すように密度検層機と同様な dual detector タイプで, 坑径や泥壁などの影響を補正するように設計されている。また, このタイプの装置は, 前述の密度検層機とのコンビネーション測定が可能のため, ρ_b , ϕ_N を同時に測定できる。 ρ_b , ϕ_N を組み合わせることにより, 岩相判別, 油-ガスの判別, 複数の岩石からなる地層の孔隙率の算定等が可能となる。

3. 油層解析の手順

油層の解析は, 実際には図8に示すような手順で行われる。図中, 左側はそれぞれの解析に必要なデータ, 括弧内はパラメータである。岩相判別は, ϕ_N , ρ_b から孔隙率を求めるのに必要な岩石マトリックスのパラメータ (ρ_{ma} , ϕ_{Nma}) を知るために必要であり, ρ_b - ϕ_N

図6 中性子検層機キャリブレーションカーブ
(Courtesy of Schlumberger)

図7 中性子検層機原理図

のクロスプロットまたはオーバーレイから求める。密度-中性子検層のオーバーレイとは, 両者とも石灰岩を基準とした孔隙率のスケールで重ね合わせてやることで, 実際には, 中性子検層カーブの孔隙率0%に密度検層カーブの密度2.71 (石灰岩の密度) を合わせて重ねればよいようになっている。

流体判別は, 孔隙内を満たす流体を判別するもので, 具体的には, 水, 油, ガス, すなわち水層, 油

R_t : 地層の比抵抗

R_w : 地層の孔隙を満たす水の比抵抗

$\phi_{Nma} = (HI)_{ma}$

図8 油層解析フローチャート

層、ガス層の判別を行う。問題なのはガスの場合で、密度-中性子検層機のレスポンスを表す前述の式の ρ_r, ϕ_{Nr} が1にはならず非常に小さくなるため、これらの流体パラメータを知る必要がでてくるためである。ガス層はオーバーレイから判別することができる。

孔隙間は密度-中性子検層機のレスポンスを表す式を解くことにより得られる。たとえば2種類の岩石からなる複合地層の場合には、各レスポンスを次式で表すことができる。

$$\rho_b = \rho_r \phi + V_{ma1} \rho_{ma1} + V_{ma2} \rho_{ma2}$$

$$\phi_N = \phi_{Nr} \phi + V_{ma1} \phi_{Nma1} + V_{ma2} \phi_{Nma2}$$

$$1 = \phi + V_{ma1} + V_{ma2}$$

ここで、添字 $ma1, ma2$ はそれぞれの岩石マトリックスに対応している。したがって、マトリックスおよび流体パラメータが既知であれば、上記の3元連立方程式を解くことにより、孔隙率および各マトリックスの割合まで算出することができる。

最後に最も重要な水飽和率 (S_w) であるが、これは以上で求めた孔隙率と比抵抗検層から得られる地層の比抵抗 (R_t) より次式から算出される。

$$R_t = a R_w / \phi^2 S_w^2$$

ここで R_w は孔隙を満たす水の比抵抗、 a は石灰岩の場合1、砂岩の場合0.81を一般的に用いる。

以上のようにして各深度の単位体積当たりの油の量 $\phi(1-S_w)$ の値を求め、産出層の深度区間を積分し

てやり、最後に油層の面積を乗じて油田の埋蔵量を算出するわけである。

なお、以上説明した方法は、ごく単純化して油層解析の概念を述べたもので、より厳密な方法を知りたい方は、参考文献1)を参照されたい。

4. その他の放射線検層と油層評価

4.1 自然γ線スペクトル検層

地層中に存在するカリウム (K)、ウラン (U)、トリウム (Th) の量を計測するものである。油層解析において邪魔になるけつ岩分の同定、火山岩貯留層などの複雑な地層の岩相判別などに利用されている。

4.2 熱中性子時間減衰率検層 (thermal neutron decay time log)²⁾

検層機に内蔵されたパルス中性子発生装置により中性子バーストを地層に撃ち込み、それに同期して動作する時間ゲートを用いて、熱中性子の時間減衰率を測定するものである。熱中性子の時間減衰率より地層の熱中性子吸収断面積を知ることができる。

熱中性子吸収断面積は、地層の場合、孔隙内の流体に含まれる塩素 (Cl) によるものが一番大きいので、結果的に塩水の量を計っていることになり、比抵抗検層と同様なレスポンスを示す。したがって、比抵抗検層を使用できない鉄管挿入井における油の飽和率の評価に用いられる。

4.3 C/O-Si/Ca 検層³⁾

パルス中性子検層の一種で、地層に中性子バーストを撃ち込んだ場合に発生する非弾性散乱γ線 (C, O)、熱中性子吸収γ線 (Si, Ca) を計測し、C, O および Si, Ca の比を測定するものである。

酸素と炭素の比 (C/O) より油層と水層を識別することができる。なお、Si/Ca は、岩石マトリックス中に C を含む石灰岩 (CaCO_3) のチェックに用いられる。

文 献

- 1) 宮入 誠: 物理探鉱, 1, 31 (1978)
- 2) Shulumberger: Log Interpretation Principle, Shulumberger (1978)
- 3) 伊藤寿恒: 物理探鉱, 1, 35 (1982)