放射能検層よりの油層評価*

—Rantau 油田におけるガンマーレイ-中性子検層の解析—

会 田 英 夫**

(昭和42年8月30日受理)

On Gamma Ray-Neutron Log Interpretations in Rantau Oie Field

by

Hideo AITA

Abstract The gamma ray-neutron Log interpretation methods applicable in Rantau Oil Field are described here with informations and several examples.

A linear relationship is verified between the gamma ray values and SP values at the water bearing formations in this field, and the writer Concludes that gamm ray log is available to determine the shale percentage in this field.

The porosity of the shaly formation can be derived successfully by using the combination of gamma ray and neutron values.

The detection of gas bearing formation is possible by the cross plot of the porosities derived from the neutron log vs. the porosities derived from the Micro log, the open hole neutron vs. the cased hole neutron, and the dual spacing neutron.

1. ま え が き

従来、放射能検層は油層の評価にあたって定量解析の点でやや問題があるとされ、あまり頻繁には用いられなかったが、最近になって多くの努力が払われた結果、孔げき率などはかなり正確な値を期待できるようになった。

加えて、地層に含まれている特定の元素、たとえば塩素の検出を行なう塩分検層なども一般的に用いられつつあり、今後、放射能検層は油層評価に重要な役割りを果たして行くものと期待されている。

放射能検層は、その目的に従って原理や測定法などを異にした数多くの検層装置、すなわちガンマー線検層・中性子検層・塩分検層および密度検層などが、現在多く用いられているが、本論においては、それらのうち、

Rautan 油田でこれまで用いられてきたガンマー線 (GR) 検層・中性子検層***、すなわちニュートロン・ガンマー線 (N- γ) 検層の測定実績に基づいた油層評価法について、検討を試みたものである。

1・1 地層の状況

Rantau 油田の油層を胚胎する地層は、中新世後期の海退堆積物で、砂泥互層よりなり、油層は深度 300 m ~ 1,000 m 間に介在する 3 ~ 30 m の厚さを持つ中 ~ 細粒の石英質砂岩である。それらの油層の中には、頁岩と葉層をなし、いわゆる頁岩質砂岩 (shaly sand) も少なくない。地層水の塩分は、一般に深度とともに比例して濃くなるが、1,000 m の油層でも塩分濃度が 15,000 ppm を超えることは稀である。

1・2 坑井の条件

ほとんどの坑井は、7 $\frac{5}{8}$ " または 8 $\frac{1}{2}$ " のビットで比重 1.3 内外のクレーベース泥水で掘さくされ、5 $\frac{1}{2}$ " のケーシングを挿入され、フルホールセメンチングガンパ-仕上げが行なわれている。時として低圧油層への逸泥や、浅部ガス層からの噴出事故が起るが、既存油層を掘

* 昭和42年5月26日、石油技術協会総会シンポジウム (油層評価) において講演

** 北スマトラ石油開発協力 (株)

*** 一般にガンマー線 (GR) 検層と中性子 (N- γ) 検層は組み合わせ用いられ、GR-N 検層と呼ばれている。

さくするぶんには問題は少ない。

1・3 検層の状況

本油田においては、インダクション検層とマイクロ検層から水層と油およびガス層を、また中性子検層から油層とガス層を判別している。一般にクリーンサンド(clean sand)においては、解析は事実と良く一致するが、頁岩質砂岩においては必ずしも良い結果を得てない。特にガスの生産を目的としない本油田においては、油層とガス層の境界を厳密に定める必要があるので、油層の評価はもっぱらガス層の判定に重点がおかれている。そのため近い将来は、密度検層も取り入れて精度の高い評価を行なって行く予定であるが、探掘井の多い本油田においては、数多くの検層を行なうことは経済的な面から好ましくないので、現在ほとんどの坑井に対して用いているガンマー線—中性子検層をもって、可能な限り油層評価を行なっていくことが課題とされている。

2. ガンマー線検層より頁岩含有率 (shale percentage) の決定

2・1 一般的関係

頁岩は微量ながら放射能物質を含んでいるので、頁岩質砂岩の頁岩含有率 (shale percentage) P は、ガンマー線 (GR) 検層によって求められるが、GR 値は堆積層の種類、測定条件などによっても大きな影響を受けるので、それからただちに P を決定することはできない。例えばクリーンサンドであっても、砂岩粒子が放射能物質を持った粒子で構成されていれば、頁岩と区別できない反面、石灰岩などにおいてはクリーンサンドと同じような低い値となる。またケーシング内で測定されたものに対しては、ケーシングの肉厚やセメント等について考慮されねばならない。

したがって GR 値を P の尺度として用いるためには、あらかじめ、その油田において両者が比例関係にあることを確かめた上、その限度内において用いる必要がある。

2・2 GR 値-SP 値関係

1本の坑井で、地層水の塩分濃度が一定と推定される地層区間においては、SP 値の変化は主として P 値のみによって支配されると考えられる。したがってその部分の値に対応する GR 値が、どのように変化するかを観察することによって、GR 値が P の尺度となり得るかどうかを検討できる。

第1図は Rantau P-55 号井で測定されたガンマー線—中性子 (GR-N) 検層と電気検層 (E. S) の1部である。この部分においては、図の右に水飽和率が記入されている如く、1部を除きほとんどが水層である。本井の

第1図 GR-N-ES of P 55 Rantau

第2図 SP-Gr. (8 1/2" open hole) Relation

GR 値と SP 値の関係は、第2図に示されたごとくほぼ一直線をなして分布する (この中で点1および点51は上記直線から大きくそれているが、それは頁岩質砂岩が含油、含ガスをしたことによる SP 減退現象と考えられる)。

第3、第4図は、ケーシング内での GR 検層につい

て上述の方法を用い GR 値と SP 値との関係を検討した例である。本井は図に示したごとく、地層水の塩分濃度から A, B, C の 3 つに区分される。また本井の GR 値の頁岩基線も、各区分ごとに多少異なった値を持って

いる。したがって本井の全点が 1 直線で表わされるとすれば、かなりのばらつきが出るが、A, B, C の各地層区分ごとで GR-SP 関係を纏めると、第 4 図のごとく、各点はそれぞれの区分で直線関係を持っていることが判明する。

第 3 図 GRN, ES Logs of P 68 Rantau
(GRN surveyed in $7\frac{5}{8}$ -5 $\frac{1}{2}$ " cased hole)

第 4 図 SP-Gr ($7\frac{5}{8}$ -5 $\frac{1}{2}$ " cased hole) Relations

2・3 P 値の推定

前節のごとく、ともに P の因数をもった GR 値と SP 値が直線関係にあることは、この油田の地層には異常な放射能物質が含まれてなく、GR 値は P 値の函数とみることができる。経験的に P と GR 値は直線関係をなすので⁽¹⁾、GR 値の最小値つまりクリーンサンドに対応する値と、最高値つまり頁岩基線に対応する値との間を 100 等分すれば P 値の尺度ができる。

第 2 図および第 4 図において、かりに GR 値の最少値を $P=0$ とし、GR の頁岩基線の値を $P=100$ とし、この間を等分した目盛を横軸の下方に特に設け、これによって各点の P 値を読みとった。これらの値をもって後述の中性子検層より求められる ϕ_N (neutron porosity) に対して、頁岩補正を行ない求めた有効孔げき率は、その部分のコア孔げき率に近似する結果を得ているので、この P 値はほぼ妥当な値であると考えられる。

2・4 適応と問題点

2・4・1 SP 値と α

本油田の頁岩質砂岩はコアやマイクロ検層より判断して、ほとんどがクリーンサンドと頁岩の葉層と見なせる。この場合 P 値と SP 減退係数 (α) との間には、Doll⁽²⁾ によって関係式が導びかれているほどなので、2・2 の GR 値と SP 値との関係において、SP 値の代りに α 値を用うるのが適当と考えられるが、本油田では、水層でかつクリーンサンドに掘さくされた坑井が少ない上に、地層水の塩分濃度の不均一さから、SSP 値の決定に未だ疑問を残しているので、塩分濃度の同程度である地層区分内では、SP 値は α 値の函数であるという意味で SP (PSP) を用いた。

2・4・2 Statistical fluctuation

本油田においてはクリーンサンドと頁岩とでの GR 値の差は、さほど大きくないので、GR の statistical fluctuation が、GR 値の読みとり大きな誤差を生む恐れを持っている⁽³⁾。従ってこの疑問をなくすためには、2 回以上測定し、地層の GR 値であるか、fluctuation であるかを定める必要もある。またこの fluctuation からの誤差を少なくする方法として、本油田では測定の時定数 (time constant) を一般的な 2~3 秒よりやや大きい 4~5 秒とし、毎時 300~360 m の速さで測定している。

2・4・3 坑内条件の影響

第 5 図 Porosity and P Determinations from GRN Log

(α examples of P-55 Rantau)

本論においては、 P 値は前述のごとく GR 値の最大値と最少値を等分して求めることなので、地層の絶体的な GR 値は必ずしも必要でない。従って坑内条件がほぼ同一な本油田においては、見かけの値をそのまま用いてもさしつかえない。

また1つの坑井の測定において、クリーンサンドの部分が増定されていない場合は、同じ条件で測定された附近坑井のクリーンサンドの GR 値を用いる。そのような場合でも、それら2つの坑井で、 GR の頁岩基線が等しいかどうかを確かめた上でなければならない。

2・4・4 砂粒分析値との関係

ガンマー線検層から求められた頁岩含有率と、その部分のコアを採集し節分けによって得た 325 メッシュ (0.044 mm) 以下 (頁岩と考えられる粒子) の重量 100 分を、Rantan P-55 号井 660 m 層において比較した例を第5図の左方欄に示す。この例のごとく、本油田の油層部では、ガンマー線検層から得た値がかなり大きくとも、砂粒分析からの値が 10% を超えるものはほとんどない。

このように大きな差が出るのは、砂粒分析を行なう場合、コアが乾燥されるので地下の条件と異なること、表示に重量を用いていること、さらに油層が葉層であるので、節分けに用いられた資料が砂岩部に偏したこと、などの点から、両者に必然的に相違が出るものと考えられるが、本論には、砂粒分析からの値はあまり意味を持たないものと考えられる。

3. 中性子検層からの孔げき率

3・1 一般的関係と方法

クリーンサンドの孔げき率は、中性子検層から Dewan の補正チャート⁽⁴⁾を用い直接求められる。しかし頁岩質砂岩に対しては、砂層中の頁岩分に含まれる水もが、あたかもその砂岩の孔げき中に飽和されている水 (油) と同じように中性子と作用するので、砂層中の頁岩含有率が判明しないと、真の孔げき率は求められない。水の元素指数 (Hydrogen index) を 1.0 とした場合、頁岩のそれは 0.5 とされるので、頁岩質砂岩の見かけの孔げき率 ϕ_N と有効孔げき率 ϕ との間には

$$\phi_N = \phi + 0.5P \quad (1)$$

の関係がある。さらに密度検層の資料があれば、それから求められる孔げき率 ϕ_{FDL} は ϕ との間には

$$\phi_{FDL} = \phi + 0.12P \quad (2)$$

ただし P は頁岩含有率で砂岩粒子の密度を 2.65、頁岩の密度を 2.45、および飽和液体の比重を 1.0 とした場合

の関係があるので、式(1)、(2) から P と同時に ϕ が第6図のごときチャートによって解かれる⁽⁵⁾。この方法

第 6 図 Porosity Determination from Neutron Porosity and P

は頁岩質砂岩の孔げき率と頁岩含有率を求める手段として現在最も適切な方法とされ、一般に用いられている。

3・2 ガンマー線検層と組み合わせる方法

本油田では、密度検層が使用されていないので、前記 2・2 のごとき方法によってガンマー線検層から求めた頁岩含有率、すなわち P 値と中性子検層から求めた ϕ_N を前節の式 (1) に代入し、有効孔げき率 ϕ の算出を試みた。

第5図の中央欄は Rantan P-55 号井の $GR-N$ 検図の一部分で、これより ϕ_N と P を求め、第6図のチャートを用い ϕ を求めた。

この ϕ を第5図右端欄に破線で、またその相当部分のコアを採集して得た孔げき率の値を実線で記入し、比較した結果、両者はほぼ一致していることが判明した。なお ϕ_N 値も同欄に点線で記入したが、それらは実際の孔げき率よりかなり大きな値となっている。

ケーシング挿入後測定された $GR-N$ 検層でも、上記方法にてある程度まで孔げき率の算出が可能である。前章第3図の P-68 号井に対して前記の方法で ϕ を求めてみると、第1表に示したごとき値を得た。本井ではコアが採集されなかったので、隣接坑井の C・S・T 資料から得た値と比較すると、ほぼ妥当な値を示すことが判断できる。

第 1 表 Porosity Determination of P 68 Rantau

Level	Gr.	SP	N-CPS	P %	ϕ_N %	ϕ %	ϕ_{core} %
A zone	1	6.0	0	137	100	50.0	0
	2	4.7	-10	152	50	42.0	17.0
	3	4.6	-12	150	48	45.0	23-28
	4	4.5	-18	140	44	48.0	26.0
	5	5.2	-10	145	68	46.0	13.0
	6	4.5	-15	153	44	42.0	19.5
B zone	7	6.5	0	140	100	50.0	0
	8	3.5	-38	170	5	36.5	34.0
	9	5.6	-7	147	72	47.0	11.0
	10	3.5	-39	158	15	41.5	37.0
	11	4.0	-30	160	20	41.0	32.0
	12	4.8	-12	152	45	44.0	22.0
	13	5.8	-14	152	75	44.0	6.0
	14	6.0	-15	150	85	44.5	4.0
	15	4.6	-20	165	40	38.5	19.0
	16	6.1	-3	152	92	44.0	0
C zone	17	6.3	-1	154	93	43.0	0
	18	7.0	0	147	100	50.0	0
	19	4.1	-38	167	25	37.5	26.0
	20	4.5	-36	162	37	39.5	21.5

x Side wall core porosity data of the corresponded level of the surrounding well

3.3 適応と問題点

3.3.1 ϕ_N の求め方

中性子検層から ϕ_N を得るためには、測定前の適正な

第 7 図 Porosity Index from Neutron

キャリブレーションの必要のあることはいうまでもないが、補正チャートの用い方にも注意を要する。すなわちどんな場合にも 1 つのチャートが適応するとは限らない。初めに頁岩基線のニュートロン値が $\phi_N \approx 50\%$ であること、次に数カ所のコア（クリーンサンドの部分）の孔げき率とその部分の ϕ_N がほぼ一致していることを確かめた上で、補正チャートが用いられるべきであって、もし一致しない場合は、そのチャートはコア分析値と ϕ_N の比較などから修正を必要とする。⁽⁶⁾

ケーシング内でのニュートロン値は、裸孔のそれに比較して多くの条件の影響をこうむっているの、それから正確な ϕ_N を求めることは無理かも知れないが、本油田においては、標準のチャートをやや経験的に修正した第 7 図のチャートを用いて、3.2 の例のごとき妥当な結果を得ることが可能である。

3.3.2 ϕ_N を補正するチャート

第 6 図のごとき ϕ_N を補正するチャートは、各油田において砂岩粒子の密度、頁岩の密度を実測して作成されるべきものであるが、本油田では未だ決定的な値を得ないので、第三系の平均値といわれる砂岩粒子密度 2.65、頁岩密度 2.45 を用いた⁽⁶⁾。

また、 ϕ を求める際 ϕ_N と P が判明しておれば、前述の式 (1) の関係から第 6 図のごときチャートは必ずしも必要でないが、中性子検層のキャリブレーションが適正であるかどうか、またガス層を区別するためにも役だつので、一様このチャートにプロットしてみることが望ましい。

3.3.3 ガス層に対する孔げき率

ガスを含んでいる油（水）層においては、次章で述べる理由から ϕ_N から ϕ を求めることは複雑となり、誤差が大きくなる恐れがあるので、前記方法をもって ϕ を求める場合は、ガス層（地下条件で遊離している）は除外される。

4. ガス層の判定

4.1 ϕ_N と ϕ の比較による方法

ガス層においては ϕ_N と ϕ との間に、

$$\phi_N = \phi(aS_{GN} + 1 - S_{GN}) \quad (3)$$

ただし a は地下条件におけるガスの水素指数、 S_{GN} は中性子検層によって測定される層のガス飽和度の関係がある⁽⁷⁾。かりに a が 0.25、 S_{GN} が 0.6 のガス層では $\phi_N = 0.55 \phi$ となり、そのガス層の ϕ_N 値は実際の孔げき率に比較しかなり小さな値となる。従って、マイクロ検層やコア分析から得た孔げき率と ϕ_N を比較することによって、ガス層は判別

できる。

頁岩質の油（ガス）層においては、ガス層であっても油（ガス）層中の頁岩の影響を受けるため、この方法は必ずしも良い結果を得ていないが、上記方法で ϕ_N の代りにそれを P で補正して得た ϕ と、他の方法から求

第 8 図 ϕ derived from Neutron Log vs ϕ Micro Log

第 9 図 GRN-ES of P 59 Rantau

めた ϕ を比較すれば、ガス層の判別が可能である。

第 9 図の坑井の GR-N 検層図において、点 4~15 (565~715 m) はガス層であるにもかかわらず、頁岩質のガス層のためにニュートロン値は、この部分とほぼ同じ孔げき率（実際上の）を持つ含油層の部分である点 17~21 (725~765 m) とほとんど同値で、ガス層の判別は困難であるが、第 8 図のごとく P 値によって補正された ϕ を ϕ_N の代わりに用いれば、ガス層は明確に判別できる。

4・2 Dual Spacing による方法

中性子検層の測定半径 (investigated depth) は標準のスペーシング (Standard Spacing Neutron 20") の場合、30% の孔げき層においては約 8", 15% の孔げき層で約 12" 程度⁽⁶⁾であるので、泥水のインベージョンの程度によっては、 ϕ_N 値からガス層の判定が困難な場合がある。

このような場合、Standard Spacing Neutron の外にそれよりやや長い (25" 内外) スペーシングをもつ中性子検層 (Long Spacing Neutron) を組み合わせて測定し、両検層の値の比からガス層を判定することができ⁽⁸⁾。すなわち、インベージョンを受けた範囲内において、ガス層の見かけのガス飽和率は、坑壁から遠ざかるにつれて大きくなるので、ガス層の部分における log spacing neutron/standard spacing neutron の比は、油層や水層におけるそれらの値上りも大きくなる。

この方法はインベージョンが非常に小さい場合や、逆に大きな場合は不適当で、中程度の場合が最も効果的である。

第 11 図は第 10 図に示した Rantau P-69 号井における Dual Spacing 法によるガス層判別の例で、油層部分は図中において直線上に並ぶが、ガス層部分のほとんどは同直線の上方にプロットされる。

4・3 裸坑でのニュートロン値とケーシング内でのニュートロン値の比較によって判別する方法

インベージョンを受けたガス層をもつ坑井において、ケーシングが挿入（セメンチング）されると、もはや泥水の静水圧が働らなくなるので、時間とともにインベージョンを受けた部分へガスが復帰してくる。従ってケーシング挿入後測定して得たガス層部のニュートロン値は、裸坑で測定された時のそれよりも比較的高い値を示めすので、両測定のニュートロン値の比がほとんど変わらない油層や水層と判別できる⁽⁸⁾。

第 12 図は前節同様、第 10 図 Rantau P-69 号井での測定に基づいて上記方法を行なった例で、Dual Spacing によってはやや判然としなかった（インベージョンが大きいとめと考えられる）ガス層部分と油層部分の境

第 10 図 Neutron Logs in Open Hole/Cased Hole/Dual Spacing

第 11 図 Crossplot Neutron CPS Long Spacing vs Standard Spacing in Open Hole

第 12 図 Crossplot Neutron CPS Cased Hole vs Open Hole

界線は、本法でより明確にすることができる。

5. 結 び

GR-N 検層による油層の評価は Rantau 油田において、

- i) 頁岩質砂岩の頁岩含有率, すなわち P の推定
- ii) 孔げき率の算出
- iii) ガス層の判定

などに対してほぼ可能である。しかし、i) においてはガンマー線の fluctuation から生ずる誤差の問題、ii) においては含ガス層に対して適応できないことなどの問題が残っている。

中性子検層のみから、ii) や iii) を評価することは、頁岩質砂岩においては困難であるが、ガンマー線検層から求められる P でそれを補正して用いることによって可能となる。

GR-N 検層に密度検層が併用されるならば、油層評価はさらに良い精度を得ることができるが、GR-N 検層はケーシング内での測定も可能で、任意の坑井に随時測定できるので、旧坑井の多い本油田では、本検層のみによる評価法を検討することも重要である。

謝 辞

本論文は石油開発 (株) 佐藤久敬副参事より御指導ならびに御校閲を賜わったが、厚く御礼申し上げる。また

これを公表することを許可された北スマトラ石油開発協力（株）原義之取締役に感謝する。

引 用 文 献

- (1) Schlumberger Document, Log Interpretation Principles: p. 52, p. 63, 1966
- (2) H.G. Doll, The SP Log in Shaly Sand: *AIME* vol. 198, p. 205, 1950
- (3) Schlumberger Document No. 8, Introduction to Schlumberger Well Logging, p. 85-89, 1958
- (4) J.T. Dewan, Neutron Log Correction Charts for Borehole Conditions and Bed Thickness: *Jor. of Pet.* Vol. 207, p. 50, 1956
- (5) Misk and P. Contesso, 1965, Combination of Porosity Tools for Evaluating Shaly Formations: Schlumberger, Part A, 1965
- (6) Schlumberger Document, Log Interpretation Principles: p. 42-43, 1966
- (7) Schlumberger Document, Well Evaluation Conference Nigeria: p. 27, 1966
- (8) Grosmanin, M., and Walker E.B., Gas Detection by Dual-Spacing Neutron Logs in the Greater Oficina Area, Venezuela: *AIME*, vol. 210, p. 140, 1957

訂正： 第4図凡例中，C zone の印の四角は黒く塗りつぶす。