

資 料

550.83 : 539.12.08*

中性子パルス検層法*

F.A. Alexeyev, D.F. Bepalov, B.G. Yerozolimskiy,
D.M. Srebrodolskiy, N.V. Popov, Yu. S.
Shimelevich & A.S. Shkolnikov

岩 島 箕 亀 男 訳

要 約

ソビエトで開発されたパルス中性子検層法 (ИННК) は孔井のなかで有用な石油層にガス層を検出する新しい効率の良い方法である。

ИННК が他の中性子検層法より優れている最も重要な諸点は

- a) 岩石探査領域が著しく大きく、また測定結果に及ぼす孔井内の有害な影響を受けることがはるかに少ない。
- b) 地層の中性子特性と測定結果との間に一義的な関係をうることができる。この結果本法によれば、岩石層中の塩分含有率をきわめて感度よく測定することができる。

本法は多くの主要な油田ならびにガス鉱床に試みられた。含油層ならびに含ガス層 (の断面) において、ガスと液体、あるいは、水と石油の接触面を、地層水の塩分の影響をわずかに受けるだけで検出し良好な結果がえられた。油層ならびにガス層に対しては、水を含んだ地層に対するよりも 10 倍も高い示度で測定しうる。

本法は砂岩ならびに岩酸塩岩の貯溜層における鋼鉄のケーシングを挿入した孔井に立派に応用できる。ИННК の諸結果は、ケーシングを挿入しない孔井における電気検層の示度に似ている。

講演では ИННК 用の理論、方法論、諸結果を検討した。

物理探査で広く採用されている中性子検層法は放射線源近辺の中性子ならびにガンマ放射線の定常的な室内エネルギー分布にその基礎を置いている。かくして、孔井の中で多孔性 (含水素の) 岩石を検出でき多くの場合、石油の飽和した地層と塩水の飽和した地層との接触帯の状況を決定することができる。しかしながら、この場合えられる情報を一義的に解釈することは難しいか、あるいは、実際にはできない場合が多い。なぜなら測定結果は、岩石のいくつかの中性子パラメータ——平均自由行路、拡散係数、熱中性子の平均寿命——によつて変化し、このほか、測定結果には、測定装置の構造、孔井、掘さく充填等の所興の条件が強く影響しているようである。孔井を囲む岩石の性質に関するものと明白完全な情報は中性子ならびにガンマ量子の空間エネルギー分布のみならず、その時間分布をも研究することによつてえられる。

(文献「1」「2」「3」)

孔井条件下の岩石の性質を調査するために熱中性子の非定常分布の特殊性を利用するという考えは、1956年、ソ連邦科学アカデミー準会員 ゲ・エヌ・フレーロヴィイによつて発表された

* Ф. А. Алексеев, Л. Ф. Беспалов, Б. Г. Ерозолимский, Д. М. Сребродольский, Н. В. Попов, Ю. С. Шимелевич, А. С. Школьников (1962) : Импульсный нейтрон-нейтронный каротаж, Труды Конференции Ядерных Геофизиков, Краков, Польша, р. 97~126.

ものである。パルス中性子検層法の物理学的基礎は1956年から1960年にかけて開発された。現在、この方法は、一連の数々の問題解決にきわめて有効な方法となっており、ソ連邦の多くの石油ならびにガス鉱床に成功裡に試用されている。

周知のように、地殻に最も広く分布している岩石は粘土・砂岩・石灰岩・泥灰岩・岩石膏・ドロマイト・粘土質土等である。

上述の岩石のいくつかは石油、ガス、水が飽和した貯溜層であり、NaCl, KCl, CaCl 等の塩が溶解している。第1表に最も多くみられる岩石、セメント、水のそれぞれの中性子パラメータを示す。

ここで

L_s —初期エネルギー—5.0 MeV の中性子の平均自由行路

D —熱中性子拡散係数

τ —熱中性子の平均寿命

τ の計算の場合の元素の放射捕獲断面積の初期値は文献「4」に、また L_s と D の値は文献「5」で求められている。

岩石における熱中性子の空間時間分布は、文献「7」で拡散の微分方程式の解を基にして考察されている。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \Delta n + q - \frac{n}{\tau} \quad (1)$$

n —高速中性子のパルス終了後、 t 時間経過した時の距離 r における熱中性子の密度

D —中性子の拡散係数

Δ —ラプラス演算子

q —1 cm³/sec 当り発生する中性子の数

τ —媒質中の熱中性子の平均寿命

水素を含まない均質媒質に対するこの方程式の解は

$$n(r, t) = \left[4 \pi (Dt + 2\tau_0) \right]^{-3/2} \exp \left(-\frac{t}{\tau} - \frac{r^2}{4(Dt + 2\tau_0)} \right) \quad (2)$$

一方含水素液体の飽和した媒質に対しては、

$$\begin{aligned} n(r, t) = & \frac{Dt}{8\pi r \lambda^3} \exp \left[-t \left(\frac{1}{\tau} - \frac{D}{\lambda^2} \right) \right] \left\{ e^{\frac{r}{\lambda}} \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{r}{2Dt} \right) \right. \\ & \left. \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Dt}}{\lambda} + \frac{r}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] - e^{-\frac{r}{\lambda}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{r}{2Dt} \right) \right. \\ & \left. \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Dt}}{\lambda} - \frac{r}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

ただし、

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} L_s$$

これらの解は近似解であり、熱中性子の初期分布は高速中性子の減速の密度に比例させて得られたものである。もつと正確な解は所興の計算体系においては、熱中性子の確実な初期分布を選ぶことによつてえられる。

計算の結果、 r および t が充分大きい値をとると式 (2) および (3) は

$$n(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau} - \frac{r^2}{4Dt}} \quad (4)$$

になる。

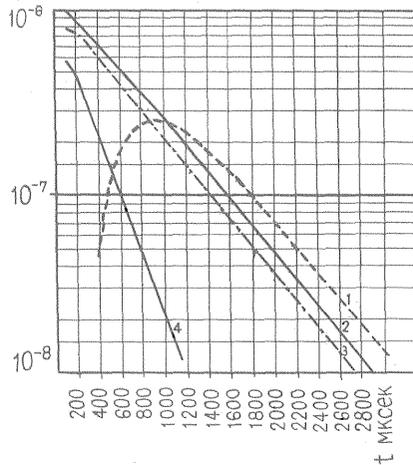
第1図に、石油ならびに塩水の飽和した均一の砂岩媒質において熱中性子の密度が次第に減衰して行く模様を計算した曲線を示す。(曲線1~3は石油の飽和した砂岩媒質、曲線4は塩水の飽和した砂岩媒質の場合) 曲線2~4は色々な初期エネルギーをもつた高速中性子源に対

第 1 表

媒 体	密 度 (g/cm ³)	Ls (cm)	D ₁₀ ^s (cm ² /sec)	τ (マイクロ秒)
水 H ₂ O	1	8.0	0.35	207
石油, C-86%, H-14%	0.9	7.0 ²⁾	0.32	190
乾燥した砂岩, SiO ₂	2.7	28	2.5	1300
油を含んだ孔隙率20%の砂岩	2.4	13	1.1	630
水を含んだ孔隙率20%の砂岩				
NaCl, 200 g/l	2.4	13	1.1	225
石灰岩 CaCO ₃	2.7	25	2	700
油を含んだ孔隙率40%の砂岩	2.4	12.5	1 ²⁾	450
水を含んだ孔隙率20%の砂岩				
NaCl, 200 g/l	2.4	12.5	1 ²⁾	195
粘土 SiO ₂ (60%), Al ₂ O ₃ (15%) Fe ₂ O ₃ (5%), CaO(3%), H ₂ O(15%)	2.1	12 ²⁾	0.9 ²⁾	450
ドロマイト CaCO ₃ , MgCO ₃	2.7	21	1.3 ¹⁾	1000
無水 CaSO ₃	2.9	20 ²⁾	0.9	370
岩塩 NaCl	2.1	48	2 ¹⁾	7
石膏 CaSO ₄ · 2H ₂ O	2.3	10 ²⁾	4.8	250
セメント CaO(65%), SiO ₂ (2%), H ₂ O(15%)	2.0	10 ²⁾	1 ²⁾	330
鉄	7.8	—	—	32 ¹⁾

1) のデータは文献(6)のデータにより計算したもの
2) のデータは概算値を示す。

N (任意の単位)



第 1 図 中性子のパルス点源の近傍における均質砂岩媒質中の $n(t)$ の理論曲線

1. 熱中性子源 (石油を含んだ砂岩) $Ls=0$
2. 0~7 MeV のエネルギーをもつ高速中性子源 (石油を含んだ砂岩)
3. 0~14 MeV のエネルギーをもつ高速中性子源 (石油を含んだ砂岩)
4. 14 MeV のエネルギーをもつ高速中性子源 (石油を含んだ砂岩の水の塩分 200g/lNaCl)

し、(3)式により計算したものであり、曲線1は熱中性子源に対するものである。(文献「7」)

第1図を考察して明らかなように、 $t > 2000 \mu\text{sec}$ では、曲線1, 2, 3は、ほぼ同一の勾配をもつて傾斜している。すなわち、 t の充分大きなところで、中性子密度が漸減するのは中性子の初期エネルギーに岩石の減速特性によるのではないのである。

t が増大するにつれて、公式(4)は、式 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ に近づいて行く。なぜなら、第1に $\frac{r^2}{4Dt}$ は

$t \gg \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\tau}{D}}$ (5) においてまったく小さな $\frac{t}{\tau}$ になるし (文献「5」) 第2に因子 $t^{-3/2}$ の、
 曲線 $n(r, t)$ におよぼす相対的な影響は、 t が増大するにつれて、これまた減少して行くからである。
 かくして、 t の大きなところでは、熱中性子密度の漸減は本質的には岩石の中性子吸収の性質
 (熱中性子の平均寿命 τ) によって決定され、 t の小さいところでは、岩石中の熱中性子の
 拡散プロセス (係数 D) が本質的な役割を演ずる。

曲線 $n(t)$ の形態 (同一の水素飽和性と同一の係数 D をもつ地層における) の差異を検討
 してみよう。ただし、熱中性子の平均寿命は τ_1, τ_2 というように異なる。公式(1), (2), (3), (4)から
 容易に分るように、

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{-t \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right)} \quad (6)$$

すなわち、これら媒質中の熱中性子密度の比は、 t が増大するにつれて増大し、任意の t にお
 けるこれら媒質中の τ の差異によつてのみ決定される。(もつとも、おのおのの曲線の動き
 は係数 D にも依存するが)

この結論は、地層中の水と石油との接触面の決定という問題を解決するのにきわめて重要な
 ことである。なぜなら、石油を含む地層か、水を含む地層かを判別できるのは、これら地層の
 中性子吸収の性質の差異に基づくからである。この差異はこれら地層中の塩素の不均一な濃度
 (第1表参照) と関係がある。すなわち、石油を含む地層と水素を含む地層とでは、 τ の値が
 異なる。

曲線がパラメータ $\frac{t}{\tau}$ をもつ指数の形とはなはだしく異なつているとき、1500~2000
 μsec を超えない遅延時間 t においてのみ、現有の装置でも孔井内で測定することができるけ
 れども、それでも比 $\frac{n_1(t)}{n_2(t)}$ は τ_1 と τ_2 の差異と関係があり、 $n(t) \approx e^{-\frac{t}{\tau}}$ の場合とほぼ同
 じであろう。

上述の計算から、異なる τ (例えば $\tau_{\text{石油}}, \tau_{\text{水}}$) をもつ媒質中では、熱中性子密度はいろい
 ろな速度で減衰するであろうということになる。時間 t が増大するにつれて、中性子密度の
 差異は増大し、理論的には、いかようにも大きくなりうる。このことは公式(6)からも明らかで
 あるが、また、第1図においても例証されるところである。

不断に流れる中性子源を利用する場合、孔井のないこれらの媒質の中でさえ、熱中性子の密
 度は媒質中の熱中性子の寿命の比以上には大きく異なることはない。(文献「5」)

第1表から明らかなように、定常の場合、比は2~3倍以上にはなりえないが、一方、パル
 ス法では比 $\frac{n_{\text{石油}}}{n_{\text{水}}}$ は、例えば $t=1000 \mu\text{sec}$ 経過後には、10倍に達する (第1図参照)。

パルス中性子法が、 τ の変化に対しては高い感度を、他のパラメータに対しては比較的低い
 感度を示すということは、地層を石油と水との飽和層に区別する場合、および中性子吸収性が
 母岩と異なる有用な鉱物を検出する場合、パルス法の最も重要な特徴となる。

もうひとつの重要なパルス法の特徴は t の増大につれて、岩石探査領域の有効半径が大き
 くなり、孔井の測定器におよぼす影響が減少するということである。

媒質探査領域の有効半径は関係式：

$$Rn = 2.1 \sqrt{Dt} \quad (7)$$

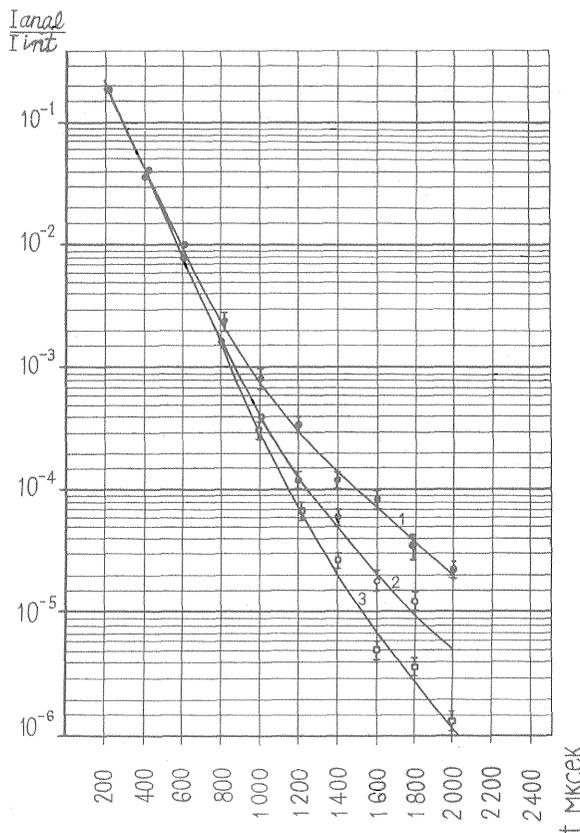
で示される。

孔隙率20%の含水地層の模型を横切るケーシングを挿入した孔井 $\alpha = g^3/4''$ における測定
 では、検査領域半径は $t=1000 \mu\text{sec}$ で40cmを超え、一方、含水準の小さい (3~5%) の
 地層模型では70cmを超えるということが示されている (文献「7」「8」)。

パルス中性子検層法では、孔井の測定器におよぼす障害は t の増大によつても、また孔井な
 らびに岩石中の媒質の中性子吸収性の差異と関係ある他の重要な条件によつても縮少する。大
 部分の場合、孔井中の $\tau_{\text{孔}}$ は岩石中の $\tau_{\text{岩石}}$ よりも小さい。

それゆえ、 t の増大につれて、中性子は岩石よりも孔井により急速に吸収される。 t 時間後には、中性子はおもに岩石から孔井に拡散して行くであろう。これと関係して、孔井中の中性子密度は次第に変化して行つて、岩石中の密度とほぼ同じものとなる。すなわち、それは、岩石の中性子特性によつて決定されている。

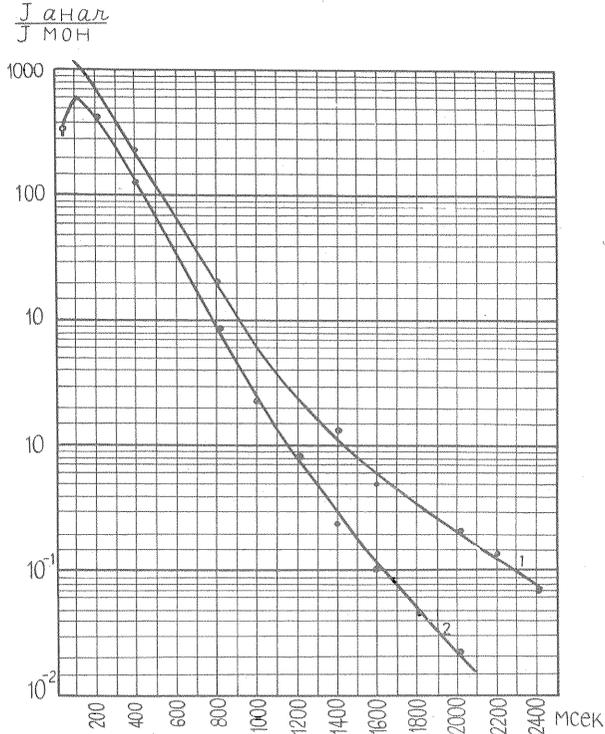
「岩石と較べて「孔が小さければ小さいほど、より大きな t において、このことは正しいということに注意しなければならない。 t が増大すると、熱中性子は次第に変化して、均質媒質におけると同じように $e^{-\frac{t}{\tau_{\text{岩石}}}}$ 型の指数型に近づいて行く。このことは地層模型を基に実験室での測定によつて確認されているところである(文献「8」参照)。 t が比較的小さい場合、孔井は中性子の初期分布の変化により、また岩石とは異なるその拡散性によつて曲線 $n(t)$ の動きを変える。600~1000 μsec 経つと、曲線 $n(t)$ の動きが異なるのは、均質媒質におけるように、本質的には孔井を囲む岩石中の熱中性子の平均寿命の差異によるものであることが計算と実験の結果判明した。このことはまた、孔井が横切つた砂岩と石灰岩の模型においてえられた第2図と3の曲線によつても例証されるところである。



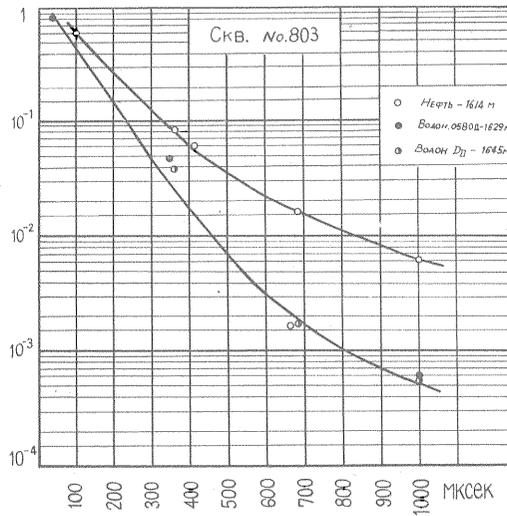
第2図 液体を充填したケーシングを挿入した孔井が横切つた、石油と水を含んだ砂岩 ($m=0.2$) の模型における実験曲線 $n(t)$ 。
 1. 石油を含んだ砂岩
 2. 水を含んだ砂岩、塩分 83 g/l NaCl
 3. 水を含んだ砂岩、塩分 200 g/l NaCl

第2図に、孔井中で測定した曲線 $n(t)$ を示す。孔井は石油を含んだ砂岩(曲線1)といろいろな塩分濃度(曲線2は 83 g/l NaCl, 曲線3は 200 g/l NaCl)の水の飽和した砂岩とを横切る。

容易に分るように、 t が増えると、曲線は分けて、 $t=1700 \mu\text{sec}$ 後は熱中性子密度の差異は



第 3 図 液体を充填したケーシングを挿入した孔井が横切った、石油(1)と水(2)を含む石灰岩 ($m=0.1$) の模型における実験曲線 $n(t)$ 。地層水の塩分 200 g/l NaCl



第 4 図 石油を含んだ地層ならびに水を含んだ地層に対する孔井, No.803 における $n(t)$ の測定結果

$$\frac{n_{\text{石油}}}{n_{83 \text{ g/l}}} = 3 \text{ と } \frac{n_{\text{石油}}}{n_{200 \text{ g/l}}} = 10 \text{ になる。}$$

ИННК 法によると同一の条件で明らかな差異が孔隙率 10% で石油の飽和した石灰岩の模型でも (第 3 図の曲線 1), 塩水の飽和した石灰岩 (曲線 2) でもみられた。ИННК 法だと, $t=2000 \mu \text{ sec}$ で, 10 倍の $\frac{n_{\text{石油}}}{n_{\text{水}}}$ がえられる。

第4図に、孔井における同様の測定結果を示す。(曲線1は石油を含む地層に対して、曲線2は水を含む地層に対してえられたもの。) 訳注¹⁾

坑井 No.803 にはケーシングを挿入してあり、ビットの直径 $7\frac{3}{4}$ "、ケーシング直径 6"、地層水の塩分 200 g/l NaCl。実験室におけると同様、孔井中において INHK の示度は $10^3 \mu\text{sec}$ 後、何層倍もの差異を示した。

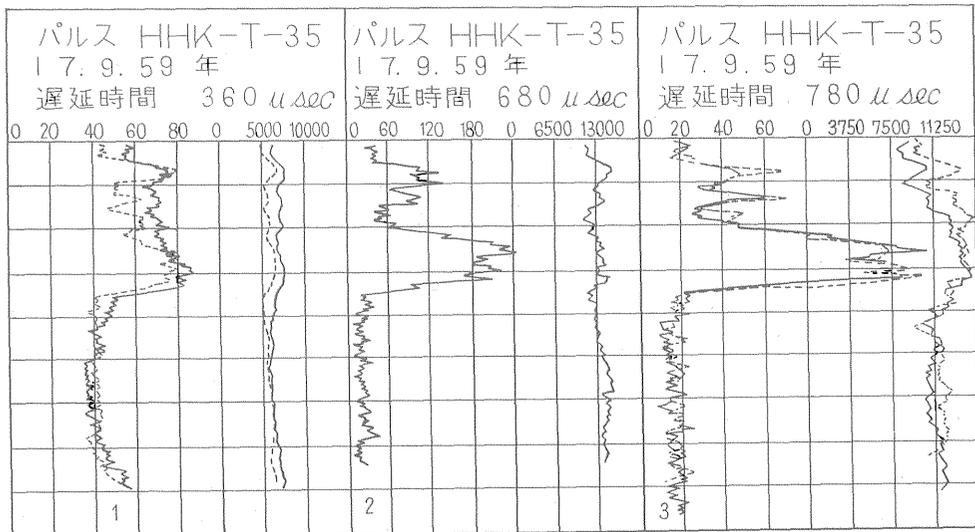
岩石を石油飽和層と水飽和層とに区別する際、INHK の使用を制約する点を考察してみよう。制約というのは、 τ が塩素濃度のみならず、岩石の化学組成、その水分含有率等にも依存しているということに関係がある。

研究したところ、石灰岩にしる、砂岩にしる、15% から 25% の範囲のそれらの孔隙率の変化は 0 から 50 g/l の地層液体中の NaCl の濃度差異に基因する変化よりも小さい範囲で、INHK の示度の変化を惹起すということが分つた。

20+25% の範囲の孔隙率の変化では、石油を含む地層と、少ない塩分——20~25 g/l NaCl——をもつ地層水の飽和した地層とを明瞭に区別することができる(文献「8」「10」)。

もしも孔隙率と地層の化学組織の変化を考慮することができるなら、INHK の適用領域はもつと広範囲なものとなろう。かくして明らかなのは、INHK の示度は、標準の放射能検層の示度よりもはるかに大きく、塩素含有率に依存するということであり、それゆえ、地層水の塩分の値が著しく小さい領域において始めて、貯溜層の孔隙率の変化により INHK 法の適用が制約されるのである。

被探査地層に対して測定器を停止せしめた時(上述したように)、および坑井に沿つて測定器を間断なく動かすとき、坑井中の中性子密度の減衰を測定することによつて、また同時に、いくつかの遅延時間に中性子計数管の示度を読取ることによつて、式 $n(t)$ を決定することができる。測定方法、装置作動条件、とくに、遅延時間 t 等の選択は問題の型に依存する。遅延時間 t は 2 つの条件によつて決定される。すなわち、 t は、一方では、INHK の示度の差異が装置の不安定さに基因する統計的変動と誤差の値をはるかに超えるようにまた他方では、検層図の記録のために必要な計数率を保てるように、充分、大きなものでなくてはならない。多くの場合、例えば、水と石油との接触面を決定するには、ある時間間隔(ある遅延時間)を置いて熱中性子の密度を測定するだけで良い。



第5図 いろいろな遅延時間における「トウイマゼナフティ」トラストの坑井 No.803 における INHK による測定結果
1. $t=360 \mu\text{sec}$, 2. $t=680 \mu\text{sec}$, 3. $t=780 \mu\text{sec}$

訳注1) 原文のグラフには、曲線1、曲線2の表現がみられないが、多分グラフの中で上の線が曲線1で、下の線が曲線2であろう。

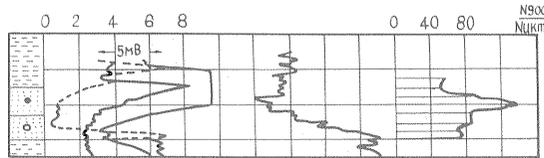
水と油との接触面を決定するための ИННК の適用例として、第 5 図に孔井 No.803 における検層結果を示す。

測定はいくつかの遅延時間において測定器を連続的に移動させているときに行なわれた。
($t=360 \mu \text{ sec}$ —曲線 1, $t=680 \mu \text{ sec}$ —曲線 2, $t=780 \mu \text{ sec}$ —曲線 3)。

ИННК の曲線を考察して明らかなように、 t の増大に伴ない、断層は明瞭に判別されて行く。すなわち、 $t=360 \mu \text{ sec}$ のとき $\frac{n_{\text{石油}}}{n_{\text{水}}} = 2$, $t=680 \mu \text{ sec}$ のとき 7~8。 $t=780 \mu \text{ sec}$ のときの実際の差異は計算値に近い。 $t=360 \mu \text{ sec}$ のとき、孔井中の $\frac{n_{\text{石油}}}{n_{\text{水}}}$ は明らかに計算値より小さい。これは孔井の影響によるものである。

ИННК 曲線とともに ИННК 中性子中性子検層曲線も得られた (時析のない中性子の総計数)。後者の曲線による区別は ИННК 曲線による区別より著しく小さく、20~25% 以下である (文献「1」「2」「3」)。装置の不安定さに基づく測定誤差は、2 回目にとつた曲線の比較から明らかなように、実際は ИННК の曲線には影響していない。

ケーシングの構造が複雑で地層水の塩分が小さい大直径の孔井において、石油を含んだ地層を検出するために、ИННК を使用した例として孔井 No.2787 における ИННК の結果を示す。坑井は $\phi 15\frac{3}{4}$ " のビットで掘さくされ、直径 10" と 6" のケーシングが挿入された。測定は 364~380m の区間で行なわれた。この区間では地層水の塩分は 120 g/l NaCl であつた。孔井は海水で充填された。測定結果を第 6 図に示す。



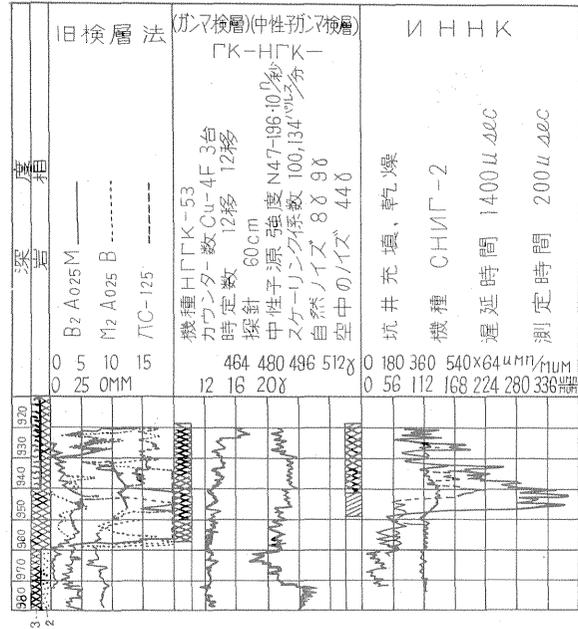
第 6 図 孔井 No.2787 における ИННК 測定結果。ビットの直径 $15\frac{3}{4}$ "、第 1 のケーシングの直径 10"、第 2 のケーシングの直径 6"

ここに、電気検層図と遅延時間 $900 \mu \text{ sec}$ におけるパルス中性子・検層の結果を示す。区間 364~380m、深度 371m において、水と石油との接点点が判明した。石油を含んだ地層部分の示度は水を含んだ地層部分の示度より 2 倍大きい。もちろん、標準の放射能検層の資料では、これらの地層部分に対する示度の差異は認められない。

第 1 表と採油試験の結果の考察によつて、ИННК のデータによると石油を含んだ地層は水を含む地層の示度より何倍も大きい最大の値によつて識別されるはずであるという結論が得られる。いくつかの塊状岩 (マシーヴな岩石) たとえば石灰岩・砂岩等 (同様にガスを飽和した貯溜層) は高い示度によつて識別されるであろう。しかしながら、НГК (中性子・ガンマ検層) もしくは中性子・中性子検層の測定結果によるとこれらの塊状岩は石油の貯溜層と区別される。かくして、ИННК のデータによつてもしくは、ИННК と中性子・中性子検層 (中性子ガンマ検層) とのデータを併用して、油層を検出することができる。ガスと液体との接触面の決定は、物理探査の重要な課題である。ИННК はその解決にも有望である。ガスを含む地層の水が塩分を含む場合、ИННК の測定結果は中性子・中性子検層による検出の際に、すでに考察した測定結果と同じものである。この場合、もつと明瞭な結果が期待できる。なぜなら、ガスを含む砂岩と水を含む砂岩とでは、熱中性子の寿命の差がもつと大きいものだからである。

例えば、計算によれば、孔隙率 20%、ガス飽和率 50% のガスを含んだ砂岩 (地層には鉱物塩は無い) を、同じ孔隙率と 200 g/l NaCl の水を含んだ砂層と較べてみると、ИННК のデータでは、 $t=1000 \mu \text{ sec}$ で熱中性子の寿命の差は 20 倍も違う。また、ガス飽和率 100% の砂層と較べると 25 倍も違う。

第 7 図に、孔井 No.9 においてガスと水との接触面を決定した例をあげる。第 7 図には、ИННК のデータによると鉱床の開発中、接点の移動することが認められる。この場合、ガ



第7図 INHK のデータによるガスと水との接触面の移動の決定

1. 粘土, 2. 砂, 3. 含ガス砂岩, 4. 砂岩,
5. 石灰岩, 6. 含水砂岩

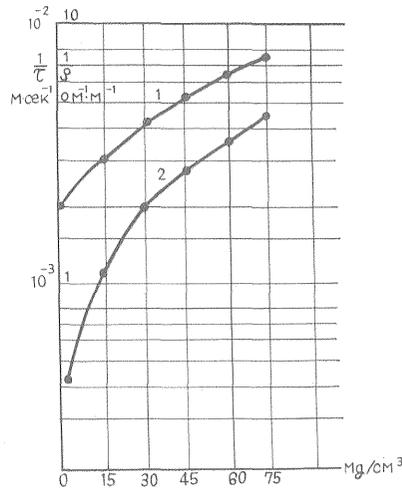
飽和層に対する示度は水を含んだ地層に対する示度より10倍も大きい。中性子ガンマ検層によるとこの孔井では接触面は認められない。

熱中性子の捕獲断面積の大きい鉱物（硼素・リチウム・カドミウム・希土類等）もしくは捕獲断面積の小さい鉱物（石炭）の鉱床を発見したりその定量研究を行なう場合にも、INHK法を使用することができる。

INHKと物理探査で有名な比抵抗法による電気検層（略称 KC）との間には多くの共通点が存在するという事は INHK の油層工学への導入を助成するに相違ない。事実、導電液体を含有する岩石の電気抵抗と岩石中の熱中性子の寿命との間にはある相関関係が存在するはずである。ごくまれにみられる混入物——導電性の鉱石・石炭・グラフアイト等——を除いて、堆積岩の導電性は岩石中の空洞もしくは亀裂の中に、塩の水溶液が存在するために生ずるということは良く知られているところであろう。この場合、すべての溶解した塩は導電率に影響を与える。大部分の石油鉱床やガス鉱床の地層水の塩分は主として塩素の塩に基因しているがゆえに、岩石の導電率を塩素イオン含有量の関数としてみる事ができる。INHKにおいても τ の値は上述したように根本的には、岩石中の塩素含有量によつて決定された。なるほど、岩石の電気抵抗とは別に、 τ の値には岩石が形成される鉱石の成分たる元素がかなり影響しているが、岩石の成分元素の影響は塩素の影響と較べると小さいのである。それゆえ、 τ と ρ との岩石の塩素含有量への依存性の結果、地層のこれら物理的パラメータの間に相関関係が生ずるのである。第8図中に熱中性子の吸収率パラメータ $\left(\frac{1}{\tau}\right)$ と導電率との、いろいろな孔隙率の石英砂（ SiO_2 ）からなる地層の NaCl 含有量への依存性を計算した曲線を示す。この場合、 τ を算出する際の H_2O と SiO_2 の影響ならびに当然のことであるが ρ を算出する際に構造係数を考慮している。

第8図の曲線によつてパラメータ $\frac{1}{\tau}$ と $\frac{1}{\rho}$ （もしくは $(\tau$ と $\rho)$ ）との間に強い相関関係の存在することが分る。ここから INHK と電気検層図において単位容量当り多量の NaCl を含有する地層（水を含んだ地層）は極小として区別され、単位容量当り比較的少量の NaCl

中性子パルス検層法 (岩島箕亀男訳)



第 8 図 熱中性子の寿命と電気比抵抗との地層水の塩分への依存性の比較

を含む地層（孔隙率の少ない塊状の水を含んだ地層、石油飽和係数またはガス飽和係数の大きい油層またはガスを含む層）は極大として区別されるという結論が容易に出る。後者の結論は第 6 図に示した電気検層図と放射能検層図によつて確認される場所である。第 6 図では INHK と比抵抗の検層図において、地層の石油を含む部分とガスを含む部分が極大として区別され、水を含む部分は極小として区別されてある。

電気検層図によつて、地質を区別することができる。なぜなら、岩石の電気比抵抗ははなはだしく広範囲に変化するからである。導電性の鉱石や無煙炭・グラファイトを大量に含む地層を除いて、堆積岩の比抵抗は $0.4\text{M}\Omega\text{-m}$ から $10^{12}\sim 10^{14}\text{M}\Omega\text{-m}$ まで変化する（近海性陸成堆積岩では $0.4\text{M}\Omega\text{-m}$ から $5\times 10^8\text{M}\Omega\text{-m}$ まで変化する）。しかしながら、岩石の比抵抗と泥水の比抵抗との比が 5×10^3 以上であるときには、電気検層図は實際上、岩石を区別することはできないということに注意しなければならない。かくして比抵抗曲線によつて比抵抗の大きい岩石を岩石学的に区別できる可能性はきわめて限られているわけである。同時に、岩石の τ の比較的小さな変化にもかかわらず、 τ を決定することによつて ρ の大きいいくつかの地層、たとえば、岩塩、石膏、無水物、石灰岩、塊状岩、塊状砂岩等の岩石を区別することができる。このことは、とくに炭酸塩質堆積層や陸成化学的沈積層の岩石学の研究において INHK の役割を本質的に高めるものである。

INHK 法は断層を岩石学的に検出する点では電気検層法に劣る。なぜなら堆積岩に対する τ は ρ よりも著しく狭い範囲で変化するし、探査領域の深度の点でもそうであるから。

しかしながら、INHK の特徴は地層の生産性に関する補助データを提供する以外に、電気抵抗のきわめて高い岩石の地層をより明確に区分でき、ケーシングを挿入しない孔井においても、鋼鉄のケーシングを挿入した孔井においても探査を行なうことができるということである。このため、石油ならびにガス鉱床の開発のための孔井探査の貴重な方法となつている。ケーシングを挿入しない孔井の探査において INHK が、そのえられる結果が重要であるという点で電気検層に次いで 2 番目の地位を占めることは明らかであり、孔井中の有用な地層部分の探査にとつて、重要な補足的の方法となつている。

有用な地層に対する INHK と電気検層の結果の比較および熱中性子の寿命と電気比抵抗との間に相関関係の存在とは有用な地層の石油ガス飽和率を決定するためのパラメータ利用の基礎となるものである。

アメリカの学者と同様、われわれは、パルス中性子源の影響下におけるガンマ放射線の非定常場の研究を有望と考える。中性子の減速と捕獲の過程に現われるガンマ量子やまた放射性同位

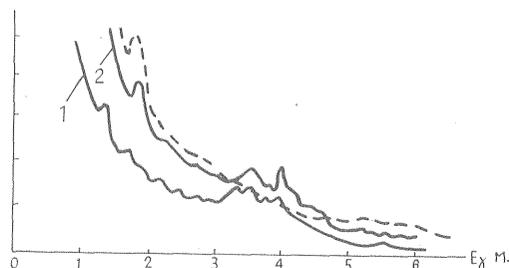
元素の放射も考えられている。

周知のように、中性子減速の最初の段階では岩石中の原子核に中性子の非弾性散乱が起り、それは特異なガンマ量子の放射を伴なう。炭素 C^{12} の核における中性子の非弾性散乱——その際 4.5MeV のエネルギーをもつガンマ線が放射される——ははなはだ興味がある。14.1MeV のエネルギーをもつ中性子の非弾性散乱の有効断面積は、約 $0.25 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ である。(文献「8」)

岩石を構成する他の元素の核は中性子の非弾性散乱に際して C^{12} のガンマ線とはエネルギーの点でははなはだしく異なるガンマ線を放射する。例外は珪素と鉄であり、そのガンマ放射は 4.5MeV に近いエネルギーを有する。しかしながら断面積の大きさとこれら元素の核レベルの構造を分析することにより、また文献「9」の実験データによつて、珪素を含む岩石のうち、炭素 C^{12} (例えば石炭や石油の形で) を含む岩石を孔井の条件下で、検出することは全く可能であると推論する根拠が与えられる。デテクタとしては波高分析器を組合わせたシンチレーションカウンタが用いられる。

孔井測定という条件下で通常の中性子源の存在の下に非弾性散乱のガンマ線を検出することは、遅い中性子の捕獲放射のガンマ線によるノイズが著しく大きいために、実際問題として不可能である。中性子源をパルスとして働かすことによつて捕獲ガンマ線の影響を免れることができる。この場合、デテクタは中性子の発生とともに働いたり止つたりするはずであり、中性子パルスの長さは中性子の減速時間と較べて短い時間 (μsec) であろう。

非弾性散乱に関し 14MeV の初期エネルギーをもつ中性子の平均寿命は 10^{-8}sec 以下であり、炭素 C^{12} の核の励起状態の半減期は 10^{-14}sec であり(文献「10」)、ガンマ量子の形成の場所からデテクタまでの通過時間は 10^{-10}sec 以下である。それゆえ、非弾性散乱のガンマ線をそのほかガンマ放射線から検出することは完全に可能である。



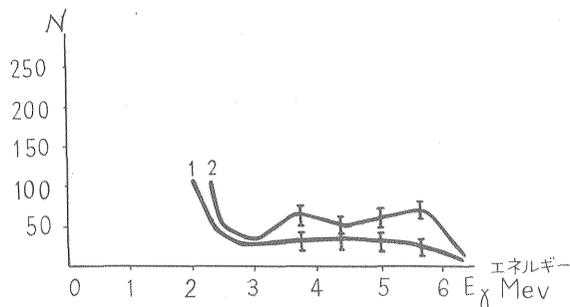
第 9 図 灰分含有率 5% と 40% の石炭ならびに砂岩における中性子の非弾性散乱の結果生ずるガンマ放射のエネルギー・スペクトル
イオンパルス接続時間—60 μsec 記録間隔時間—35 μsec
1. 純粋の石炭 2. 石炭+30%珪素, SiO_2 (重量%) ……純粋の SiO_2

第 9 図にいろいろな灰分含有率 (SiO_2 濃度) の石炭層の模型において測定した折に得られたシンチレーションカウンタからのパルスの波高分布を示す (中性子パルスの持続時間は 60 μsec 記録間は 35 μsec であつた)。石炭層の模型に明瞭に検出されている 3.5~4.5MeV のエネルギー領域における示度の最大値は炭素核の中性子パルス発生に対応するものである。砂岩の模型にはこの極大値は存在しない。

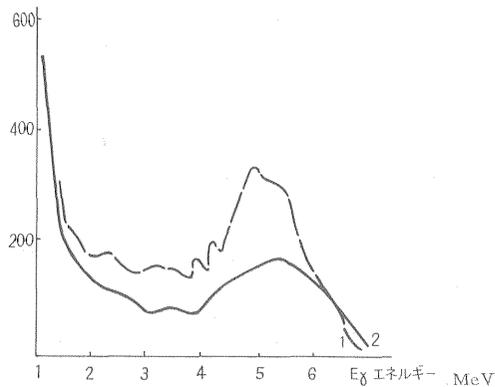
純粋の石炭の模型では炭素含有率は、灰分を含む石炭のそれよりも高いにもかかわらず、純粋の石炭の模型に対する 3.5~4.5MeV の領域における曲線は灰分を含む石炭の模型に対する曲線よりも低く配列されている。これにはいくつかの要因が与つている。第一に、灰分を含む石炭の模型には珪素と酸素の核に中性子パルス発生 (ГИНП) が現われ、それは 6~8MeV まで広がっている複雑なエネルギー・スペクトルを有している。第二に、所与の実験における中性子パルスの持続時間と記録間隔時間とが珪素における熱中性子の発生を完全に除くにはあまりに小さすぎる。かくして、炭素の中性子発生エネルギーに対応するエネルギー領域における

計数率は調査対象たる媒質中における炭素の有無を知らせる望ましい徴候となりえない。このような結論は、充分広いエネルギー間隔 (例えば 2.5~5 MeV) での中性子発生エネルギー・スペクトルの研究を基礎にしてのみいえることである。5~6MeV の極大値は酸素における中性子の非弾性散乱によるものである。酸素含有率の増大の際、すなわち、純粋の石炭から灰分を含んだ石炭へ、次に砂岩へと移行するに従つて、6 MeV のオーダーのエネルギーをもつガンマ放射の強度が一貫して増大して行くのが見られ、このことにより、酸素における中性子発生強度によつて石炭の灰分含有率を決定する可能性が考えられる。灰分の少ない石炭を連続的に決定して得られた結果は (熱中性子の密度が小さく、炭素核による熱中性子の捕獲断面積が小さいということにより) パルス記録の過程で得られた曲線と大差はない。連続記録の場合に、高い灰分含有率の (SiO_2 濃度の高い) 石炭において得られた曲線では、炭素における中性子発生強度の最大値は明らかに弱くでている。通常の岩石における中性子発生研究の場合、パルス記録法の優位性は明らかである。

中性子のパルス発生による酸素の核の放射化の大きさは、特に同一の石炭媒質について調査された。高速中性子による模型照射の充分な精度を得るために、誘導放射線の強度とエネルギー・スペクトルの測定を何回となく繰返し行なつた。照射時間中、シンチレーション・カウンタは、結晶と光電子増倍管を取囲む材料物質が放射化されないために、模型から除外された。照射時間、照射終了からカウント開始までの時間間隔および測定時間はそれぞれ 10sec, 5 sec, 10sec であつた。この場合 $\text{O}^{16}(\text{n}\cdot\text{p})\text{N}^{16}$ の反応が進行し、 N^{16} の半減期が 7.3 秒でありガンマ放射のエネルギーが 6 MeV であることは知られているところである。コントロールのため照射終了後 30sec して、誘導放射能を調べてみた。この場合、6 MeV のエネルギーをもつ放射は存在しなかつた。



第 10 図 石炭層 "1" と砂岩 "2" に対する孔井における酸素の誘導放射能の測定
照射終了後 10 秒経過 20 秒記録
1. 純粋の石炭 2. 石炭+30% SiO_2 (wt%)



第 11 図 孔井における石炭層ならびに砂岩層に対する酸素の放射化
1. 砂岩 2. 石炭

第10図に、大小の灰分含有率を有する石炭の誘導放射能のガンマ放射のスペクトル分析結果を示す。灰分を含む石炭のガンマ放射の強度は酸素の放射化のために高い。同様の結果は現実の条件下でも得られた。

第11図に石炭層ならびに砂岩層に対するケーシングを挿入した孔井における放射能調査の結果を示す。

かくして、ソ連邦では新しい効率の良い探鉱法——パルス中性子検層法が開発され、成功裡に実験された。研究は岩石調査に他のパルス法も有望であることを示している。

文 献

1. Г. Н. ФЛЕРОВ, Ф. А. АЛЕКСЕЕВ, Б. Г. ЕРОЗОЛИМСКИЙ.
Тр. Всес. Научно-техн. конф. по применению радиоактивн. и стаб. изотопов и излучений в нар. х-во и науке /4-12 апреля 1957 г./ Гостоптехиздат, 1958.
2. Б. Г. ЕРОЗОЛИМСКИЙ, Л. Р. ВОЙЦИК, Н. В. ПОПОВ, А. С. ШКОЛЬНИКОВ.
Нефт. х-во, № 11, стр. 21, 1953 г.
3. А. В. АНТОНОВ и др.
Матер. Межд. конф. по мирн. использованию атомной энергии /Женева, 1955 г./ т. 5 Из-во АН СССР, 1958 г.
4. Атлас нейтронный сечений. Атомиздат, 1959 г.
5. С. А. КАНТОР.
Диссертация на соискание уч. степени к. т. н. 1959 г.
6. Ю. П. БУЛАШЕВИЧ.
Известия АН СССР, серия геофизическая.
7. Б. Г. ЕРОЗОЛИМСКИЙ, А. С. ШКОЛЬНИКОВ.
Ядерная геофизика /с б. статей п/р Ф. А. Алексеева/, стр. 337, Гостоптехиздат 1959 г.
8. А. С. ШКОЛЬНИКОВ.
Нефт. х-во № 8, стр. 13, 1960 г.
9. Ф. А. АЛЕКСЕЕВ, Д. Ф. БЕСПАЛОВ, Л. Н. БОНДАРЕНКО, Л. Р. ВОЙЦИК, Б. Г. ЕРОЗОЛИМСКИЙ, Н. В. ПОПОВ, В. Н. РОМАНОВСКИЙ, А. И. ХАУСТОВ, Ю. С. ШИМЕЛЕВИЧ, А. С. ШКОЛЬНИКОВ.
Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых, отр. 3, Гостоптехиздат, 1960 г.
10. С. Л. АБРАМЯН, С. М. АКСЕЛЬРОД, Ф. А. АЛЕКСЕЕВ, С. А. АЛЬТШЕЛЬ, Д. Ф. БЕСПАЛОВ, А. С. ГАДЖИ-КАСИМОВ, К. А. ЖИЛИН, Б. М. ЛИСТЕНГАРТЕН, В. П. ОДИНОКОВ, Л. А. ПУТКАРАДЗЕ, Ю. С. ШИМЕЛЕВИЧ. Азер б айдж. нефт. х-во, № II, стр. 9, 1960 г.
11. CALDWELL, R. L.
World Petroleum, vol 27, 1956.
12. CALDWELL, R. L.
Nucleonics, vol 16, N 12, 1958.
13. TITTMAN J., NELLIGAN W. J.
Petr. Technol, 1960, 12 N 7.
14. MARDOCK B.
Geophysics, 1960.