

中性子検層

②

中井 順二

中性子を使用した2,3の検層法について
 中性子と地層中の種々の原子核との相互作用は その反応の断面積が元素によって違うこと 反応の結果発生するいわゆる二次ガンマ線のエネルギー 時間的要素が介入した反応の種類による二次ガンマ線のエネルギー 中性子発生源近傍の熱中性子の非定常的な分布の時間的な変化を測定することなどによって かわった検層法が行なわれているので 簡単に紹介する。

塩素検層

塩素検層は 地層中の塩素含有量を推定する方法として 約10年前から研究されている検層法で Chlorine log あるいは Salinity log と称されている。 今日まで行なわれてきた一般的な方法では 2トラックの検層曲線を同時に記録させている。 一方は塩素含有量によって決まる塩素検層曲線本来のものであり 他方は多少塩素含有量とは関係の小さい普通の中性子検層曲線であって

表1. おもな元素の熱中性子捕獲断面積

元 素	捕獲断面積 (バーン)
H	0.33
C	0.0032
N	1.88
O	0.0002
Na	0.505
Al	0.230
Si	0.13
Cl	31.6
Ca	0.43

水素含有量を示すものであり 同時に地層の孔隙率の大小を示すものでもある。 これら二つの曲線を比較し その偏向度により塩素含有量の多寡を測定している。

塩素検層は 次のような二つの現象を根拠としている。 第一は 塩素の熱中性子の捕獲断面積が地層を構成する他の元素に比較して非常に大きいこと 第二は この熱中性子の捕獲過程において 塩素の原子核が特徴的なガンマ線を発生することである。 すなわち その一部は十分に高いエネルギーを有し 他の元素の捕獲ガンマ線の大部分から分離して検出できることである。

たとえば 砂岩は珪素 酸素 水素 ナトリウム 塩素などの元素を含有しているが このうち酸素 ナトリウムの熱中性子捕獲は無視することができる。 それゆえ珪素 塩素 水素のみによる捕獲を考えればよい。

砂岩の種々の孔隙率と孔隙をみたす地層水の塩素含有量 元素の捕獲断面積について J. T. Dewan らが検討している。

それによると 孔隙率が大になるに従って捕獲の大部分は塩素によって占められる。 とくに塩素含有量が大きくなるとこの傾向がよくなる。 図1 2においてこれらの各々の和は100%に満たないが 不足分は水素の捕獲によるものである。 したがって孔隙率が大となり孔隙をみたす地層水の塩素含有量が小さくなると水素による捕獲の割合が大きくなっていく。 塩素は捕獲断面積が他の元素と比べてはるかに大きいがこのよう

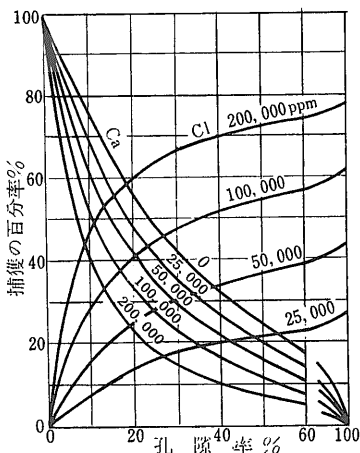


図1 砂岩中の地層水の種々の塩分に対する Si Cl による熱中性子捕獲の百分率 (J. T. Dewan による)

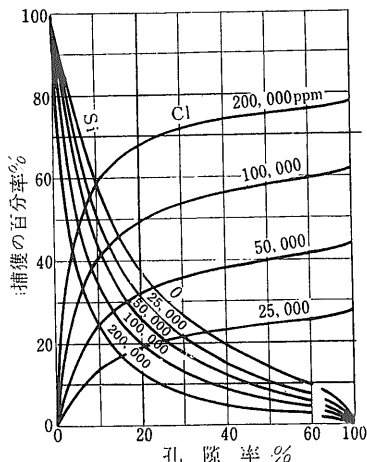
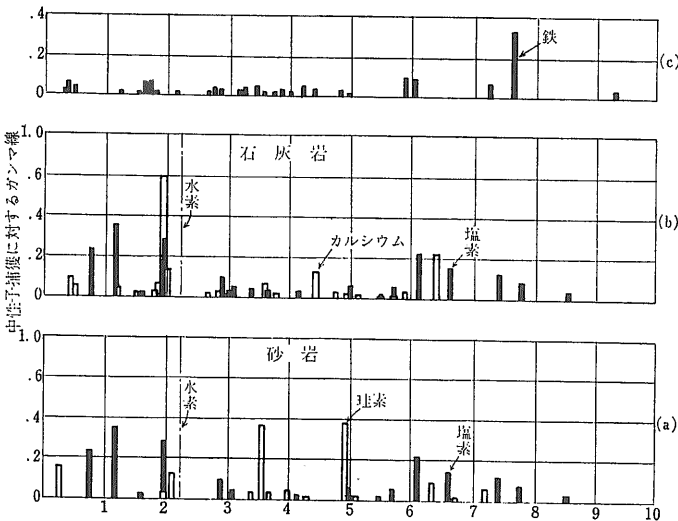


図2 石灰岩中の地層の種々の塩分に対する Ca Cl による熱中性子捕獲の百分率 (J. T. Dewan らによる)

に他の元素の含有の割合によって その占める役割りが大きく変化する。水素の捕獲ガンマ線は2.2 MeV であるので まずこの影響をのぞくには 2.2 MeV 以上のガンマ線を測定の対象にすればよい。自然ガンマ線のエネルギーはさらに低いので考慮する必要はない。水素を除く他の元素による捕獲ガンマ線のスペクトルは 0 ~ 8 MeV の幅ひろいエネルギーを有する。

珪素やカルシウムからの捕獲ガンマ線は塩素の捕獲ガンマ線と交錯する。それ故塩素によるつよいガンマ線をとりかかむなるべくせまいエネルギー幅のみ 感じやすい検出器が必要である。しかしこれは坑井内の測定でもあり非常に困難な問題である。一般には 1 MeV より小さいエネルギー幅での測定はむずかしいとされているほどである。現今では塩素以外のカルシウム 珪素による妨害が最も小さい高エネルギー部分での適当なエネルギー幅を使用した測定がなされている。しかし完全に塩素以外の元素からの妨害ガンマ線をさけることは不可能であって 塩素検層においては多少とも地層の構成元素の影響をうける。

塩素検層において鉄のケーシングが熱中性子を捕獲することは重要な問題であるが これをさけることはむずかしい。すなわち鉄からの一番つよい捕獲ガンマ線は残念にも塩素による捕獲ガンマ線スペクトルの高エネルギー部にあって これらを分離して測定することはきわめて困難である。鉄ケーシングの熱中性子捕獲はかなり大きいので 塩素検層においてバックグラウンドとしての妨害をする一方 地層中の塩素の捕獲の対象となる中性子の数を減少させる。このように鉄ケーシングは塩素検層における大きな妨害要素となっている。



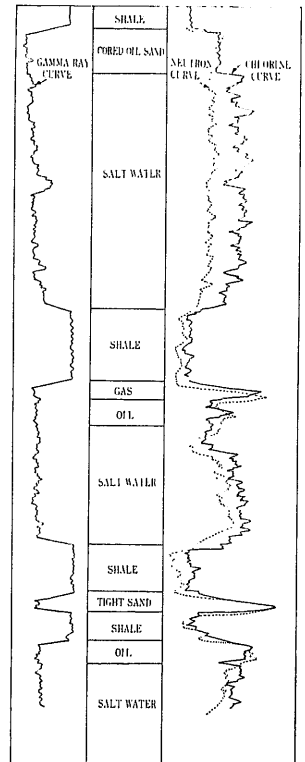
塩素検層法の特徴の一つは 普通の中性子検層曲線を平行して行なうことであるが これらの測定は一つの検出器で同時に測定し記録させるものである。測定方法はその坑井の塩素含有量の最小のところで感度を調整し二つの検層曲線が等しい偏向を示すようにしている。実際には 堅固な石灰岩層やドロマイト層において調整する。

塩素検層によって一般に得られる結果としては 真水層 油層では塩素含有量が小さいので 塩素検層曲線と中性子検層曲線との間の“ひらき”が小さい。一方塩水層ではその間に大きな“ひらき”が生じる。これによって塩水層を識別することができる。また油層と塩水層との区別も可能である。わが国においては塩素検層の開発はあまり進んでいないようである。

誘導核反応検層

従来の中性子検層法では 油層と水層とを区別することが困難であった。炭素と酸素を検出することによって これらを区別するために考え出されたのがこの誘導核反応検層 (Induced Nuclear Reaction Logging) である。塩素検層においては 塩素の熱中性子に対する大きな捕獲断面積と それによる二次ガンマ線の高エネルギー部を利用することができた。しかし炭素や酸素の熱中性子捕獲断面積は 他の元素と比較して非常に小さ

↓ 図3. 捕獲ガンマ線エネルギースペクトル (a) 砂岩 (b) 石灰岩 (c) 鉄 (R.L. Caldwell による)



→ 図4. 塩素検層の例 (Mc Cullough Tool Company による) 深度は不明

表2. おもな元素の非弾性反応の断面積

元 素	断面積 (バーン)
Ca	0.07
C	0.357
Cl	?
H	0
Fe	0.859
Mg	0.485
O	0.104
Si	0.13
Na	?
S	0.173

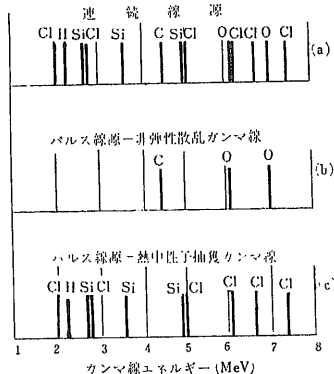
いので 捕獲ガンマ線による検出は不可能である。

このため ここでは非弾性散乱反応(Inelastic Scattering Reaction)を利用する。この反応を利用すると炭素および酸素の検出ができる。水素 塩素 珪素の存在は中性子捕獲ガンマ線のエネルギースペクトル分析によって決定され得る。他のたとえば炭素 酸素等は熱中性子を捕獲しにくいが しかし高エネルギー中性子の非弾性反応からの特色のあるガンマ線を生じる。それ故この反応は 炭化水素を同定する方法としては とくに

興味があるといえる。

誘導核反応検層法を理解するためには 中性子が放射されてから地層中で消失するまでの過程について知

図5 石油 塩水層に高速中性子を衝突させたとき生じるガンマ線 (J. Tittman による)



らなければならない。中性子が発生すると主として二つの方法でガンマ線が生じる。一つは高速度で飛び出した中性子は 線源をはなれて間もなく地層中の原子核と非弾性衝突をおこす。すなわち高速の中性子は原子核をつらぬき きわめて短時間の後 (10^{-8} sec 以内) よりひくいエネルギーを有してふたたび原子核の外に放射される。原子核には中性子が失っただけのエネルギーがのこり 直ちに (10^{-7} sec 以内) ガンマ線を放射してエネルギー的に安定状態にもどる。放射された二次ガンマ線のエネルギーは原子核に特有のものである。

一方高速中性子は 原子核との衝突によってエネルギーを失い 最終的にはそのエネルギーが原子核によって捕獲されるに十分なほどひくくなる。減速された中性子は原子核に捕獲される。この時捕獲ガンマ線を放出する この時間は $10^{-6} \sim 10^{-9}$ sec である。ここで油と塩水を含んだ砂岩に高速中性子を衝突させたときに発生するガンマ線とそのエネルギーを示すと 図5のごとくである。

- (a)は高速中性子が連続的に かつ定期的に発生している場合に発生する二次ガンマ線である
 - (b)は炭素 酸素による非弾性散乱によるガンマ線である このとき塩素によるガンマ線はみられない
 - (c)は熱中性子の捕獲によるガンマ線である 塩素 水素 珪素によるものである
- したがって(a)は(b)と(c)とを重複させたものである

誘導核反応検層法は(b)を分離して記録するようにしたものである。そのためには従来の Ra + Be Po + Be

図6 検層器の時間関係

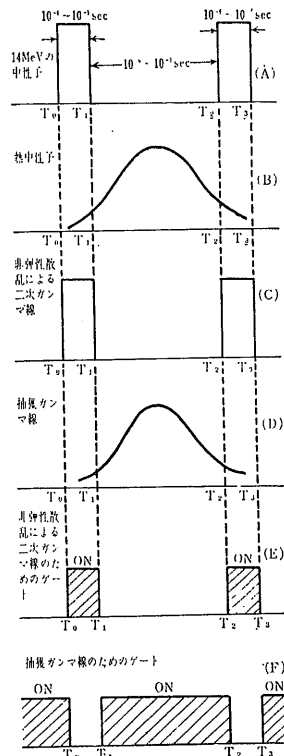
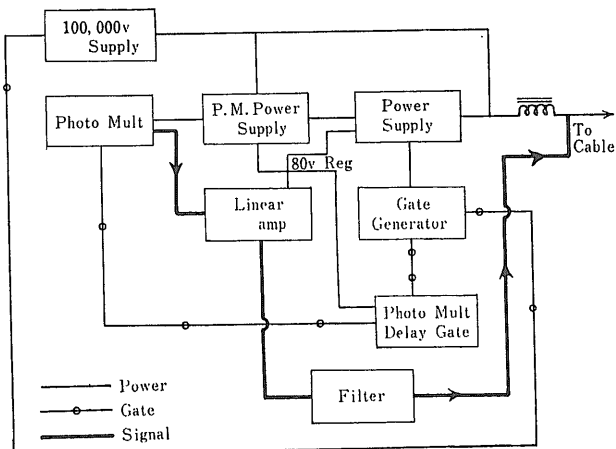


図7 誘導核反応検層における測定回路の一例 (W. A. Hoyster による)



等のカプセルに入った中性子源では 熱中性子の捕獲ガンマ線というノイズが大きくなるため 実際上非弾性散乱にともなうガンマ線を検出することは不可能である。しかし高速中性子をパルス状に発生させることによってこの不都合を除去することができる。これを模式的に図で示すと 図6になる。この場合検出器からの信号は 中性子の発生と同期させてゲートをひらくことによって計数される。もし塩素 水素等による捕獲ガンマ線だけを計数しようとするればこれらと逆にしてゲートを開閉すればよいことになる。中性子のパルス幅は 10^{-6} sec 程度持続させ パルスとパルスの間隔は その間に生じた熱中性子がほとんど完全に消滅してしまうようにえらぶ ($10^{-6} \sim 10^{-3}$ sec) ことが必要である。測定回路の一例を図7に示す。地上からは400サイクル 250Vの交流を供給しており光電増倍管からの信号に対するゲートは 中性子パルス発生時のピークと同期させてある。

このように誘導核反応検層ではパルス状の中性子発生装置を必要とするので 一般の中性子検層のように簡単に試みるわけにはいかない。従来中性子検層に比較的多く用いられてきた Ra+Be の中性子源は安価で入手しやすくまた小型であるが パルス中性子が得られない外に単一エネルギーの中性子が得られない。中性子のエネルギーが低い Ra からのガンマ線が伴うので エネルギースペクトル分析の妨害となる などの問題があった。ここでは使用できない。この検層法で使用される中性子発生装置は 次のような条件を満たしていなければならないだろう。

すなわち

1. 発生する中性子が 7MeV

1. 以上の高エネルギーを有すること
2. 中性子の数が多いこと 反応の断面積が大であること
3. 単一エネルギーを有すること
4. 入手が簡単で比較的安価な物質が用いられていること

などである。

一般に使用されているのはいわゆるT-D型中性子発生装置であって その量をコントロールできる重水素を100 kV の電場に供給して加速させ ターゲットの三重水素に衝突させるものである。このとき三重水素から中性子を発生する。高圧電源は特別に工夫されたトランスによって発生させるようになっている。

T-D型中性子発生装置としては 次のような利点がある。

1. 小型化することができるので 坑井内での使用に適している
2. 出力が大きいこと
3. 連続出力 パルス出力の両方に使用できる
4. 操作を停止した場合 残留放射能が少ないので安全である
5. 比較的高温でも使用できる

などである。しかし しいていえば寿命が比較的小さいのが欠点のように思われる。この発生装置は諸外国においてすでに盛んに使用されており わが国においても この装置による石油坑井調査の基礎研究がなされている。

誘導核反応検層の実例を図9 および図10に示す。これらの結果は W. B. Nelligan らによって模型地層を使用して室内実験的に得られたものであって 塩水および燃料用石油を使用したものである。検層曲線の一つは連続的な中性子発生によるガンマ線スペクトルであり

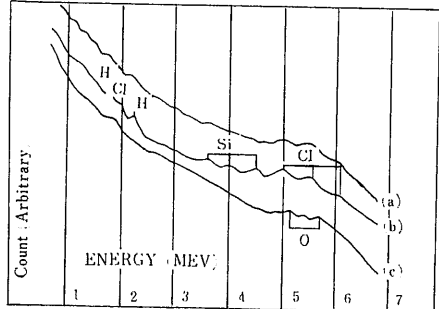
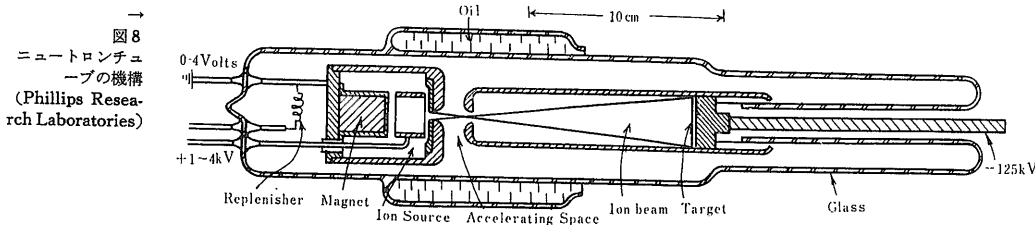


図9 40%の孔隙率を有した Salt Water Sand のシンチレーションスペクトル
 a. 連続中性子発生によるもの
 b. 熱中性子捕獲ガンマ線
 c. 非弾性散乱ガンマ線

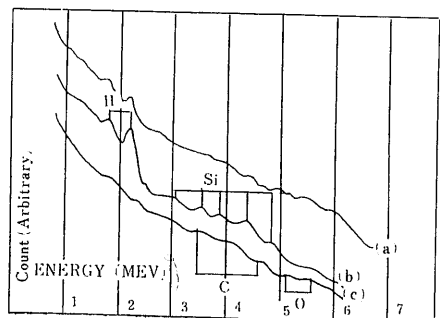


図10 40%の孔隙率を有した Oil Sand のシンチレーションスペクトル
 a. 連続中性子発生によるもの
 b. 熱中性子捕獲ガンマ線
 c. 非弾性散乱ガンマ線

その他は熱中性子捕獲 非弾性散乱の結果生じたガンマ線のスペクトルである。線源のつよさが一定値に標準化されていないので 縦軸は任意単位となっている。

塩水砂層は孔隙率40% NaCl 15%の塩水が飽和している。非弾性散乱によるガンマ線では酸素によるエネルギーピークが表われているが これは真水の場合と同じである。この場合ナトリウム 塩素による影響はない。熱中性子捕獲ガンマ線スペクトルでは 塩素と水素によるエネルギーピークが生じている。塩素の影響で水素のピークは多少不鮮明となっている。塩素によるスペクトルは5~6 MeV で非常に目立っている。石油を含んだ砂では 熱中性子捕獲によるスペクトルは真水を含んだ砂の場合と一致していて 水素と珪素のみによるスペクトルが表われている。

非弾性散乱によるスペクトルでは酸素 炭素によるスペクトルが表われている。とくに炭素によるピークが顕著に表われていて 前者の塩水の場合と明らかに区別される。連続した中性子発生による場合は すべての場合のスペクトルを示し 所々でこれらのスペクトルが重ね合わさっている。これを見ただけでは構成元素を一意的に区別することは はなはだむずかしい。一般には熱中性子によるスペクトルと非弾性散乱によるスペクトルとを比較して 地層の構成元素を結論することが可能である。

非弾性散乱の場合炭素によって生じるガンマ線のエネルギーは 酸素によって生じるガンマ線のそれよりもいくい。したがって酸素によって生じるバックグラウンドは炭素によるスペクトルに大きく影響を与えている。

図11において塩水層と石油層とのスペクトルの違いは一見判然としていないが W. A. Hoyer はこれらを区別する方法を指摘している。それによると酸素によるバックグラウンドを標準化させるために 炭素による4.5 4.3.5 MeV におけるピークの高さと5 MeV における酸素によるピークの高さをプロットしている。

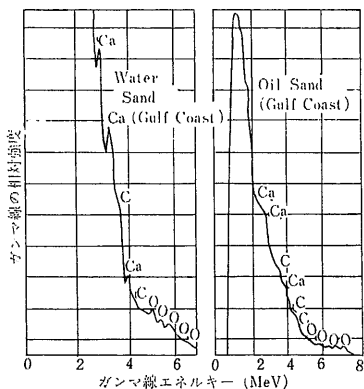


図11 同一坑井における Oil Sand と Water Sand によるガンマ線スペクトル (W. A. Hoyer による)

塩水層と油層を比較したとき 炭素の酸素に対するピークの相対的な高さについて これら2層の間に明らかな相異がみとめられている。このような方法でスペクトルのピークの相対的な高さの比較から 塩水層と油層を判別できるとしている。

中性子寿命検層

パルス状に発生させた中性子を利用したもう一つの新しい検層法として 地層の物理的パラメータを評価するために発展した中性子寿命検層がある。物理探査で広く使用されている中性子検層法は 中性子発生源近傍の中性子 あるいはガンマ線の定常的なエネルギー分布にその物理的基礎がおかれているが ここでいう中性子寿命検層は これらの定常的分布に対して 中性子の非定常分布の特殊性を利用するという考え方から始められたものであり すでにソ連では 1956年頃からこの研究が盛んでその研究成果が発表されている。

中性子寿命検層は 中性子が坑井内で発生したとき急速に発生源の周囲の岩石や流体の中で捕獲され 次第に消滅してその数が減少していくという事実にもとづいている。これについて測定するには周期的にパルス状中性子を発生せしめ パルスとパルスとの間に 前もって設置された2つの独立したある時間間隔に対して 検出器をはたらかせて各々を計数している。この2つの計数が比較されることによって 中性子の消滅の様子 すなわち平均的な寿命がわかる。この平均の寿命と地層の構成化学成分との関係をあらかじめ検討しておけば 2つの検層曲線の“ひらき”によって坑井地質の様子を知りうる。中性子の寿命時間Lは ある時間において存在する熱中性子の数が $\frac{1}{2}$ に減少するまでに経る時間と定義されている。これは放射性物質の崩壊に対して定義されている半減期と全く同一に考えてよい。

中性子パルス発生装置から発生した中性子は 非常に急速に熱中性子化されてゆき 熱エネルギーレベルにおちて行く。これらの熱中性子は 媒質中の原子核によって捕獲され消滅していく。この過程で時間 T_0 において N_0 の中性子が存在するとし T時間後に存在している中性子の数をNとすると

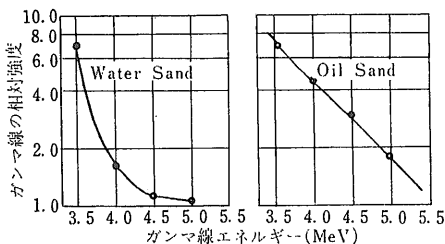


図12 ガンマ線スペクトルの比較 (W. A. Hoyer による)

$$N = N_0 e^{-\Sigma VT}$$

で表わされる。すなわち熱中性子の総数Nは 時間と共に指数函数的に減少している。また20℃において熱中性子の速度は 2200m/sec であること $N/N_0 = \frac{1}{2}$ のとき Tは中性子の寿命時間Lと定義したことから

$$L (10^{-6} \text{ sec}) = \frac{3.15}{\Sigma}$$

という式が得られる。もしある媒質中において中性子の数が時間と共に減少していく様子を測定したならばLは簡単に求めることができる。したがってΣも求められる。Σは巨視的捕獲断面積といわれている。中性子寿命検層は 地層の物理的パラメータであるΣを測定することになるので 巨視的中性子捕獲断面積検層あるいは単に中性子捕獲検層ともよばれる。このΣは特殊な岩石については知られているが 一般の物質についても計算しうる。すなわち

$$\Sigma = A_1 \delta_1 + A_2 \delta_2 + A_3 \delta_3 + \dots$$

で表わされる。ただし

A_i = 捕獲元素iの1cm³あたりの原子数

δ_i = 捕獲原子の断面積

ここでおもな物質の巨視的捕獲断面積をあげておく(表3)。

さて中性子寿命検層は その寿命時間Lを知ってΣを求めめるものであるが 前述のようにLを求めるためには中性子の時間的分布 すなわち減衰曲線を作製しても得られるが 今時間T₁とT₂で中性子の数を計数しN₁ N₂をえたとすると

$$N_1 = N_0 e^{-\Sigma VT_1}$$

$$N_2 = N_0 e^{-\Sigma VT_2}$$

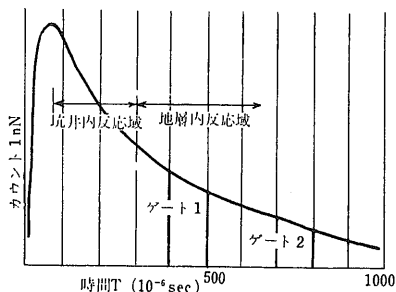
となる。ここでこれら2式より

$$\ln \frac{N_2}{N_1} = -\Sigma V (T_2 - T_1)$$

となる。T₂-T₁は適当にとられる時間でありこれをΔTとし またVを2200m/secとすると

$$\Sigma = \frac{10.5}{\Delta T} \log_{10} \frac{N_1}{N_2}$$

となり 巨視的捕獲断面積Σが2個のゲート回路を開閉



← 図13 時間と生存熱中性子との関係 (P. A. Wichmann による)

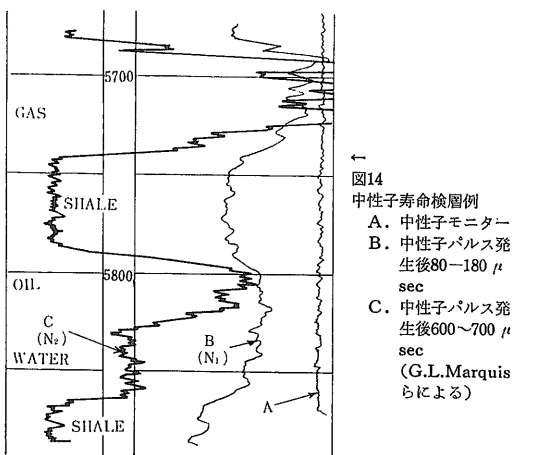
表3 種々の物質の巨視的捕獲断面積

(A. H. Youmans による)

物質 φ: 孔隙率	Σ 総計 10 ⁻³ cm ⁻¹	中性子寿命時間 10 ⁻⁶ sec
石灰岩 (CaCO ₃) φ=0	7	450
石灰岩 φ=10%		
NaCl 100,000 ppm	22.3	143
砂岩 (SiO ₂) φ=0	3.5	912
砂岩 φ=10%		
NaCl 100,000 ppm	8.9	354
砂岩 φ=30%		
NaCl 100,000 ppm	19.8	159
無水石膏 (CaSO ₄) φ=0	12.1	262
ドロマイト CaMg(CO ₃) ₂ φ=0	6.8	533
ドロマイト φ=20%		
NaCl 30,000 ppm	11.9	267
頁岩	20~40	80~160
真水	22.2	142
石油	22.2	142
塩水 30,000 ppm	31.7	100
塩水 100,000 ppm	56	56
岩塩 (NaCl)	726	4.3
Portland Cement	~13	~240
Pozzolanic Cement	>17	<185
鉄	200	15.7

することによって得られる。一般には2つの検層曲線N₁ N₂による“ひらき”でΣの大小を推定する 경우가多い。たとえば 塩水層では塩素の巨視的捕獲断面積が非常に大きいがこの場合N₁ N₂の比が大きくなって中性子の減衰が急激でその寿命時間が短いことを示す。

中性子寿命検層法では14MeVの高エネルギー中性子をパルス状に時間幅3×10⁻⁶sec. 周期10⁻³secで発生させている。検出器の位置が中性子発生源の近くになると中性子が検出器の近くで拡散し去るので非常に短い寿命時間を観測することになる。また一方もし検出器が線源から十分遠くはなれた位置におかれると 中性



← 図14 中性子寿命検層例
A. 中性子モニター
B. 中性子パルス発生後80~180 μ sec
C. 中性子パルス発生後600~700 μ sec (G.L. Marquisらによる)

子は検出器に向って拡散して行くので 見掛上中性子寿命は増加することになる。この2つの影響を打ち消す中間的なスペーシングがあるはずである。この最適の条件で検層が行なわれるようにしなければならない。図13においてもみられるように中性子発生後は坑井水の影響を大きくうけるので 第1のゲートはこの域を脱した領域で動作さすべきである。通常第1のゲートは固定しておいて 第2のゲートは地表で操作調整している。

中性子寿命検層では中性子の数 N_1 N_2 を計数しなければならないが 実際面では捕獲ガンマ線の強度を計数している。それは中性子がある媒質中で捕獲される割合は 存在する中性子の数に比例し その結果発生する捕獲ガンマ線の数は 捕獲の数の函数となっているからである。中性子寿命検層器では これらの捕獲ガンマ線を計数し N_1 N_2 の比率を間接的に求めている。したがってシンチレーションカウンターを使用している。

中性子寿命検層法では 孔井条件による有害な影響を受けることが少ないとされている。たとえばプローブの坑井内における偏心度の影響 ケーシングの有無などによる影響はあまりないようである。ここで温度に関する問題に若干ふれたい。中性子の拡散が媒質の温度の影響をうけることはよく知られている事実である。それ故この検層法が地層の温度によって影響をうけるか否かの問題がおこる。しかし実験的あるいは理論的な研究の結果では著しい温度効果はないようである。熱中性子の平均速度は地層温度の上昇とともに増加する。ほとんどの元素の中性子吸収断面積は 高速の中性子に

対してより小さくなるものである。実際において一般の地層構成元素の中性子吸収断面積は 正確に中性子の速度の逆数に比例する。このように温度の上昇とともに捕獲断面積は減少する。一方相互作用は増大する。これらの2つの効果はいわゆる“ $1/v$ 吸収体”といわれる物質では相互に補償する。このことは石油坑井内においてみられるほとんどの岩石あるいはガス 石油 水等においてみとめられている。それ故測定された中性子寿命時間は 実質上地層の温度に無関係といわれている。

最後に検層の例を図14に示す。観測された検層図は一般に考えられる理論的予想を確証し 高い塩素含有量を示す含水層は ガス層 石油層より短かい中性子寿命時間を示す。すなわち含水層は $C(N_2)$ においてより低い応答を示しており 石油層と比較すると その特徴が明らかである。ガス層は塩素や水素の含有量がひくい そして $C(N_2)$ においてもっとも大きい偏向を示している。この検層曲線においてとくに興味のある事実は頁岩に対する応答である。これは短い中性子寿命時間を示しており 塩素を多量に含んだ含水層よりもむしろ短いほどである。頁岩中において中性子寿命時間が他の一般の堆積岩よりも短いという事実については種々な見方がある。その理由の1つとして 水素含有量の高いことにもよるがしかし水素の含有だけでここに観測されたような短い寿命時間を証明するのは不十分である。Goldschmidtは頁岩が平均約100 ppmの硼素を含有しているといっている。この場合 原子当り750パーセントの硼素の異常に高い熱中性子捕獲断面積が大きく影響するのであろう。(筆者は物理探査部)

新刊紹介

改訂新版 地史学 上巻

昭和29年刊行された「地史学」は斯界の待望久しかった良書であった。その後10余年が経過したが この間における学界の進歩は 国内外を問はず めざましいものであった。この情勢に対応して出版されたものが本書である。本書は旧版と同様に 一流の専門家によって各章が分担された。今回はさきの執筆者の一部が交代して 新進気鋭の士の労作が加わった。旧版の総論を充実させて 地史学の基本的原理や方法論についてのべ 新しい宇宙地質学の新分野を加え 日本を中心としてアジア東部や環太平洋地域などにおける具体的な記述に力を注ぎ 標準地域の層序区分に関して 最新の知識を紹介して

これに論評が加えられている。広い世界的な視野の下に地史を把握し 日本の学者側からみた地史観を示すように努力がなされている。旧版の基本的な方針はそのまま受けつがれているが 不備の点を補い 学界の進歩に対応して 内容は全面的に改めてある。上巻では 先カンブリア紀から古生代までを各論で取り扱われ 中生代以降の地史 鉱床生成史ならびに結論は下巻で予定されている。

本書は学生諸君の勉学用の参考書としては必読の良書であるばかりでなく 地質学の専門家といえども 地史の分野に関して 学会の趨勢を把握するには最も適した書物であらう。

発行

朝倉書店 東京都新宿区東五軒町55

Tel東京(03)260-0141代

A 5版 340頁 定価 1,600円