

地下水探査のための ガンマスペクトルとパルス中性子の検層技術

小 鯛 桂 一 (環境地質部)
Keiichi KODAI

1. ま え が き

地層中に天然に存在する放射性核種としてカリウムトリウムとウラニウムがある。地層中のこれらガンマ線スペクトルのエネルギー分布形態はある一定傾向をもつことが部分的に知られているのでこれを指標として検層により未知の地層や流体の性質を推測できる。

ガンマスペクトル検層はこれらの他に同じ検層プローブ内に中性子線源を装着することにより中性子と地層物質の原子核反応で生じた比較的に高いガンマ線スペクトルのエネルギー分布を原位置で連続的に測定できる。これにより地層の構成物質・間隙率・塩分などを見積れる。

原子核の分散理論から熱中性子の壊変率と地層物質の巨視的捕獲断面積は逆比例関係にあることが知られているがこれら両値はいずれも地層の化学的構成・間隙率とその中の流体性質に関係する。そしてこれらは時間制御が自在で比較的に高い中性子エネルギー(14MeV)を放射できる中性子パルス発生装置や小型汎用電算機を含む解析装置類が組み入れたパルス中性子検層機を用いることにより測定できる。

ガンマスペクトル検層とパルス中性子検層は油層探査に関する情報を最も多く与えてくれる検層法であるために近年その技術的進展が著しく構造的に複雑・高度なものになってきている。これら検層による油層探査には各種の地層判別と共に油・ガス・水の区分をするための多くの情報が必要であるが地下水探査目的にこれらの技術を利用する場合は水だけをおもな対象にすればよいのであるから比較的に単純であり限定した情報解析で済むことになる。

本報はガンマスペクトル検層とパルス中性子検層の発展経緯・検層機構と情報取得面の特徴・理論と解析法などについて調査・検討し地下水探査への応用の可能性を評価している。

2. 検層技術の発展経緯

検層技術を歴史的にみると19世紀の後半にそれらしきもの(温度検層)が試行されたのを除けばガンマ線検層が最も古く1909年にすでにこの原形なるものが開発

されこれを用いて地層中の放射線変化を測定した記録がある。1930年代に入って電気検層が使われだすとガンマ線検層はおもにこれの補助として定性的解析に役立てられた。他方放射性線源のプローブ内蔵を必要とするガンマ・ガンマ検層や普通中性子検層の野外における実際使用は1940年代に入ってからのことである。

その後1950年代に入ってガンマ線検層の進展技術であるガンマスペクトル検層に関する研究も幾つか出はじめてきた。そして中性子検層もまた油層開発の必要性からめざましい技術進展がみられパルス中性子検層(1965年に初めて市販された)といった高度の機構をもつ検層機を産むに至った。

1960年代には前述の各種放射能検層法のうちガンマ線検層・ガンマ・ガンマ検層と普通中性子検層のような比較的に単純な機構の検層法は普通電気検層法(比抵抗と自然電位)と共にこれら情報取得面での経済性が認められて地下水探査目的にも応用され出した。しかしガンマスペクトル検層とパルス中性子検層は構造的に複雑で大装置となるため地下水探査目的の検層法として使用されるまでにはまだ至っていない。

3. ガンマスペクトル検層

放射線線源を用いないガンマスペクトル検層からは地層中に天然に含まれるカリウムトリウムとウラニウムの放射性核種のガンマ線スペクトルが測定できこの間の関係をもとに粘土層中の有機物質の指標としての利用法が確立できる。そして中性子パルス線源を装備したスペクトル検層からは中性子と地層中の原子核との間の反応による非弾性と捕獲両方のガンマ線スペクトルが測定でき上述の3核種よりも高いガンマ線エネルギーを放射するH, Si, Ca, Fe, Clなどの地層核の分布を知ることができ地層区分・砂分量・間隙率・水中塩分などの情報検知に役立つことが期待できる。

3-1 天然ガンマ線スペクトルの検出

地層中に天然に含まれる放射性核種にはカリウムトリウムとウラニウムがある。これらは第1表に示すようなそれぞれ特有のガンマ線エネルギーを放射してい

る。ガンマスペクトル検層はこれら放射性核種のスペクトルを弁別し その計数率を測定できる。そしてその計数率は最終的に%またはppmのどちらかに換算する。すなわち 地層中に含れるトリウムとウラニウムの含有率はカリウムに比べて通常微量なので カリウムは% そしてトリウムとウラニウムは ppm で表わされる。これらトリウムとウラニウムの微量値の分布形態を知ることは地質研究上のよい指標となるため古くから調査研究されている。例えば 花崗岩はトリウムとウラニウムに富みこれらの間の比が線形的に一定の指示傾向をもち 石灰岩はカリウムをあまり含有しないが通常 100 ppm の限度内で比較的の高いウラニウム分を含有することなどが世界的によく知られている。

上述の例は比較的古い年代の地層を対象にした研究であるが 地下水探査目的の場合はもっと若い年代の粘土や砂・礫の地層がおもな対象となる。

第2表 岩層・鉱物中のカリウム トリウム とウラニウムの分布 (Fertl, 1979)

	K (%)	Th (ppm)	U (ppm)
安山岩	1.7	1.9	0.8
玄武岩	<1.0	3.4	<0.8
はいれん層 (芳鉄質火成岩)	0.46-0.58	2.7-3.85	0.84-0.9
花崗岩 (珪質火成岩)	2.75-4.24	19-20	3.6-4.7
砂岩	0.7-3.8	0.7-2.0	0.2-0.6
石英岩・珪岩	<0.15	0.2	<0.4
浜砂	<0.63	2.0	1.9
粘土	1.4-4.2	8-18	1.5-6.5
粘土鉱物			
ボーキサイト		10-130	3-30
グロコナイト	5.08-5.3		
ペントナイト	<0.5	6-50	1-20
モンモリロナイト	0.16	14-24	2-5
カオリナイト	0.42	6-19	1.5-3
イライト	4.5		1.5
雲母			
パイアタイト	6.7-8.3	<0.01	
マスカバイト	7.9-9.8	<0.01	

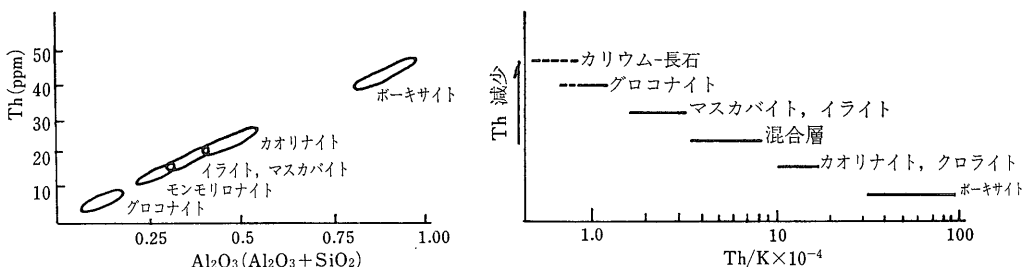
第1表 カリウム(K) トリウム(Th) とウラニウム(U)のガンマ線スペクトル

	K	Th	U
ガンマ線エネルギー (MeV)	1.46	0.58 0.98 <u>2.62</u>	0.61 1.12 <u>1.76</u> 2.20

Hassanら (1976) は第1図に示すように数種類の粘土鉱物中のカリウムとトリウムの比に線形関係のあることを証明した。また Fertl (1979) は第2表に示すように岩石鉱物中の前述3種類のエネルギー分布表を多数の野外データを室内分析することにより作成した。この表中 粘土と粘土鉱物中の3核種の各エネルギー分布形態を他のそれと比べてみると ウラニウムは低いがカリウムとトリウムは比較的の高い分布を一般に示すことがわかる。例えばペントナイトは高いトリウム分布を示し しばしば成層時間マーカーの役割を果たす他 雲母と長石は比較的の高いカリウム分布を示す。

前述のように Hassanら (1976) は第1図の各種粘土鉱物のトリウムとカリウムの比の間に線形関係のあることを示した。このうちのボーキサイトとカオリナイトはトリウムに富み グロコナイト イライト とマスカバイトは特にカリウムに富む。これは Fertl (1979) による第2表のそれらとよく一致する。しかし両値を比較するために作成した第4表がらわかるように イライトとマスカバイトのトリウム そしてモンモリロナイトのカリウムはともに大きな値差がある。これはそれらがたとえ同じ鉱物でも地域性により値が広い分布幅をもつことを示している。したがって トリウムとカリウムの比はある程度の相関性をもつが 鮮明な比例関係はなく 粘土のスペクトルエネルギー分布から各種粘土鉱物の割合を正確に推定することは難しい。

他方 粘土と砂のガンマ線エネルギーの差から透水性を推定することは可能である。すなわち 粘土の平均



第1図 粘土鉱物中のカリウムとトリウムの変化 (Hassanら, 1976)

第3表 中性子反応による非弾性と捕獲の断面積と捕獲ガンマ線スペクトル (Baker, 1957 と Hoyer, 1961)

	H	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	Na
非弾性断面積 (バーン)	—	0.353	0.104	0.485	—	0.13	0.173	—	0.07	0.859	—
捕獲断面積 (バーン)	0.330	0.0042	0.0002	0.06	0.22	0.13	0.49	31.6	0.43	2.53	0.505
ガンマ線エネルギー (MeV)	2.23	4.95 4.05 3.05		8.16 3.92 3.45	7.72 3.02 2.84	6.40 4.20 2.69	5.43 4.84	7.77 6.12 5.01	6.42 5.89		
照射確率	1.0	0.49 0.15 0.36		0.09 0.83 0.39	0.35 0.16 0.13	0.19 0.19 0.65	0.84 0.20	0.10 0.06 0.04	0.83 0.11		

スペクトルエネルギー分布はカリウム2% トリウム12 ppm ウラニウム6ppmであり 砂のスペクトルエネルギー分布は3核種ともおよそ粘土のその $1/3 \sim 1/60$ の範囲であるから 値差の割合から砂中の粘土分を推定できる。

3-2 核反応によるガンマ線スペクトルの検出

高エネルギー中性子(速中性子)が地層物質中の核に衝突するとき その中性子は2つの異なる核反応によりガンマ線を産出する。

- i) 中性子が線源を離れ初期的に高速を維持している間のみ地層中の原子核を励起し生じる非弾性ガンマ線。このガンマ線の活動時間は地層性質に依存するが 通常約10 μsec 以内の非常に短寿命で迅速に壊変する性質をもつ。
- ii) 上記の速中性子はその後 熱中性子の速度に低下しながらなお地層中を弾性的に散乱し続け最後に地層核に捕獲され その代りに発生するガンマ線。

したがって速中性子照射約10 μsec 後から捕獲ガンマ線は発生しはじめ 少なくとも200 μsec 後(水中の場合)までにほとんどの熱中性子は捕獲されてしまうことになる。

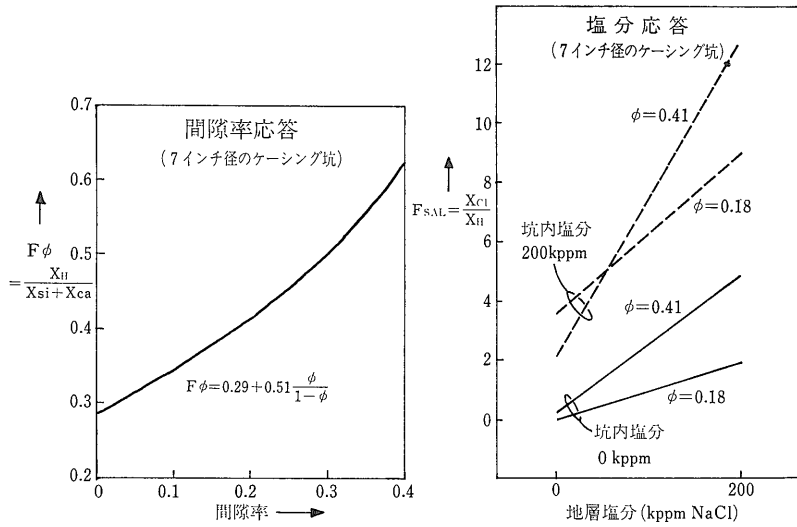
地層中に多くみられる元素は O, H, Si, Ca, Al, C, S, Fe, Mg, Cl, と Naである。これら元素の地層中における最も一般的な形は次のようである。水素は水酸化水素または硫化水素の形で 酸素は水または砂(SiO₂) 石灰岩(CaCO₃) 粘土中のアルミナ(Al₂O₃)などの形で 炭素は炭化水素と炭化岩の形で 塩素は塩水層中の溶解形(NaCl)として 珪素とカルシウムは砂や炭化岩中に部分的に そして鉄は各種岩石中に部分的にそれぞれ存在する。

第4表 Fertl と Hassin の分析値比較

	Fertl, 1979		Hassin, 1976	
	K %	Th ppm	K %	Th ppm
ボーキサイト	—	10-130	0.5-1.3	40-50
カオリナイト	0.42	6-19	1-2	20-29
イライト, マスカバイト	3.9-9.8	<0.01	6.7-10	15-20
モンモロナイト	0.16	14-24	13-17	12-16
グロカナイト	5-5.3	—	6-10	3-8

第3表はこれら地層元素核の非弾性と捕獲の中性子反応による断面積と捕獲ガンマ線スペクトルのエネルギー強度を示す。この表から知れるように 非弾性と捕獲の両断面積は異なる。そして捕獲反応は全核種で生じるのに対して非弾性反応は H, Cl, と Naの各核では生じない。しかし CとOは捕獲断面積に比べて非弾性断面積の方が100倍近く大きい。このため検層による炭素と酸素の非弾性ガンマ線スペクトル検出は油層工学におけるソース岩指標として用いられている。他方 H, Si, Cl, と Caの捕獲断面積は地下水探査にも深い関係をもつ。すなわち 水素 珪素 とカルシウムのガンマ線スペクトルの計数率は間隙率の決定に そして塩素と水素のそれは塩分決定にそれぞれ用いられる。いま指示するスペクトル量比をF そしてそのスペクトル成分量をXとすると 間隙率応答は $F_{\phi} = \text{水素分}/(\text{カルシウム分} + \text{珪素分}) = X_H / (X_{Ca} + X_{Si})$ となる(第2-1図参照)。この間隙率応答は $\phi = 0.17 \sim 0.36$ の範囲の $\phi / (1 - \phi)$ を推算できる。そして塩分応答は $F_{Cl} = \text{塩素分}/\text{水素分} = X_{Cl} / X_H$ となる(第2-2図)。ただし図と式から知れるように間隙率と塩分の応答は水素を介して相互に影響し合う他坑井条件の関数でもある。

従来 普通の中性子検層(熱中性子と熱外中性子の両検層)にはステンレス鋼でカプセルされた化学粉体 (Pu-Be,



第2図
 左：間隙率と $F\phi [=X_H/(X_{Si}+X_{Ca})]$ の関係 (Hertzog, 1980)
 右：塩分と $F_{SAL} (=X_{Cl}/X_H)$ の関係 (Hertzog, 1980)

Am-Be, やCf-252など)の各種放射性同位元素線源が使用されてきた。しかし非弾性と捕獲ガンマ線のスペクトル検出には中性子放射を自由に制御できしかも高エネルギーの線源であることが必要なので人工的に中性子のパルスを生ずる装置をもつパルス中性子検層機が用いられる。

3-3 スペクトルエネルギーの検層値について

地層を構成する各元素の分布はこれを反映するものといえるが坑井内で実際に検層して得られるスペクトル性状はコア試料を室内の実験装置で試験したものと同一ではない。すなわち検出部に到達する多くのガンマ線は全体的にみてオリジナルなスペクトルとは幾分異なったエネルギーを示すことになる。それは地層中に生じたガンマ線が地層坑内水そしてプローブハウジングを通過した後に検出部に到達する間コンプトン散乱によるエネルギーの低下または消失をまねき結果的にオリジナルなスペクトルの一部を退化させる。これは低エネルギーレベルである天然放射線の範囲で特に顕著になるとみられる。

いま K_G ; 幾何学係数 として K_I ; ガンマ線エネルギー変換率の機械的係数 とすると次のようなガンマ線エネルギー式が成り立つ。

$$I_y = I_0 \cdot \gamma \cdot K_I \cdot K_G \text{ または } I_0 = \frac{I_y}{\gamma \cdot K_I \cdot K_G}$$

ガンマスペクトル検層の最近の著しい技術進展は後述するような誤差軽減のための努力の積み重ねでもある。

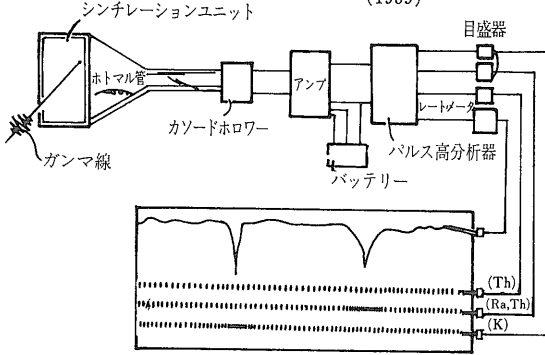
3-4 特許面からみたガンマスペクトル検層技術の進展 (第3図参照)

地層中の天然ガンマ線を全て測定するガンマ線検層に代って地層中の原子核のガンマ線を分離的に測定するガンマスペクトル検層までの歴史的発展経緯を特許面からみると1956年にLunbergら(米国特許no.281, 956)が側壁窓と積分器を使用したスペクトル空中探査装置を考案した技術(ThとU+K, 2つの信号の商か差で解析処理する技術)が基礎となって1963年にGuittonら(米国特許,no.3, 105, 149)が複数の弁別器を用いてカリウムトリウムとウラニウムの各ガンマ線エネルギー量を分離記録したのが最初であった。その後10年を経た1973年にScott(米国特許, no.3, 739, 171)がパルス中性子検層機を用いて検出したH, Si, Ca, Cl, とFeの中性子捕獲ガンマ線スペクトルを電算機でリアルタイムに最小自乗原理に則って標準スペクトルデータ源から供給されたスペクトル標準との比較により定量値を算出記録する装置を考案した。第2図にはその概要が示してありスペクトル曲線適合技術と呼ばれている。そして1976年にDeunisら(米国特許, no.3, 940, 610)はカリウムトリウムとウラニウムの3核種のガンマ線のエネルギー帯を弁別するのに弁別器とレートメーターを各3箇所セットし測定上各核種のエネルギー間の相互干渉を較正するための新技術であるスペクトルストリッピング回路にこれらを接続し上述3核種を定量的に記録する装置を考案した。同じ1976年にChevalierら(米国特許no.3, 976, 878)は前述のScottの技術をさらに進展させた。すなわち未知の放射性物質を求めるための基本理論は同じだがエネルギー弁別窓を5つに区分することにより連続的に分析できるようにした。そして1978年に

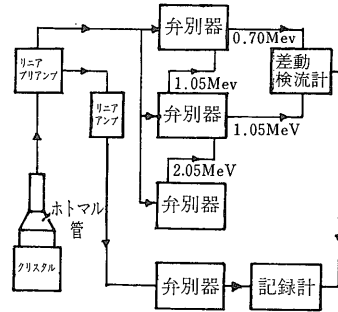
Supernaw ら (米国特許, no.4, 071, 755) はソース岩の原位置評価を目的として上述の各種特許を総括するかたち

をつくりあげた。それは放射性主要3核種を分離するために3つ以上のエネルギー窓をもうけ これら弁別さ

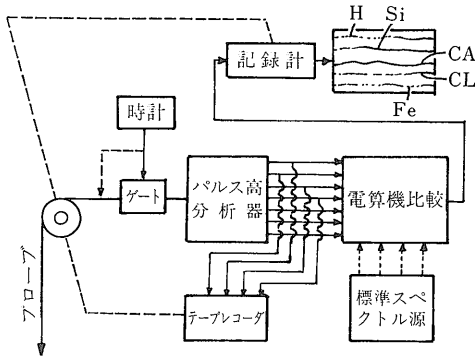
米国特許 no. 2,897,368 (1959)



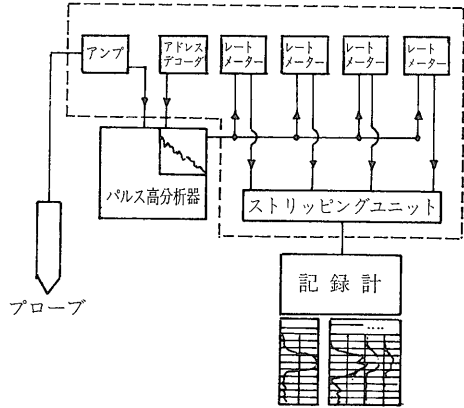
米国特許 no. 3,105,149 (1963)



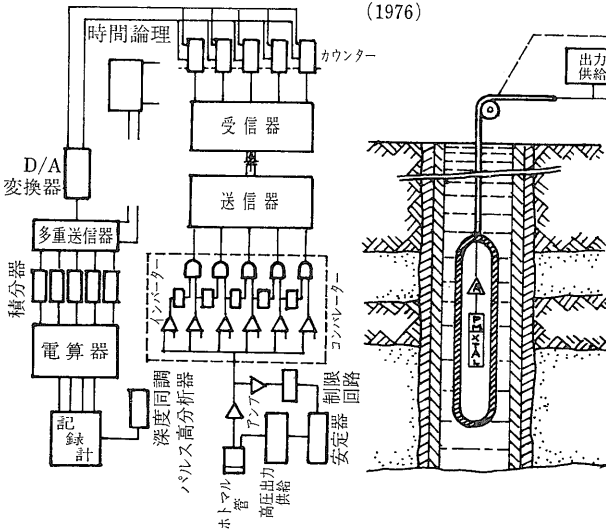
米国特許 no.3,739,171(1973)



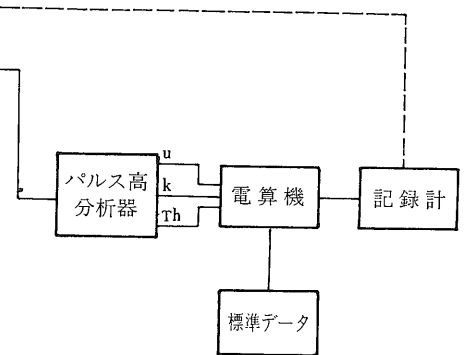
米国特許 no. 3,940,610(1976)



米国特許 no. 3,976,878 (1976)



米国特許 no. 4,071,755(1978)



第3図 スペクトル検層機に関係した米国特許の歴史

れたエネルギー信号を小型汎用電算機とスペクトルストリップングまたはスペクトル曲線適合どちらかの既用技術を用いて標準スペクトル曲線と比較し、ガンマ線スペクトル曲線を校正処理するシステムである。

4. パルス中性子検層

Pu-Be Am-Be や Cf-252 などの同位元素中性子線源に代って、電子の加速により生み出される数 μsec といった非常に短い時間の中性子パルス (14 MeV) を断続的に発生できるパルス中性子発生装置が開発され、これを含む新しい中性子検層 (パルス中性子検層) が油層探査に多く使用されている。

中性子パルス発生装置は同位元素中性子線源に比べ上記の特性以外に取扱い操作上の利点もある。

- i) 人への放射線被曝率を大幅に縮小できる。
- ii) 万一坑井内に抑留されても危険性は僅少である。
- iii) 比較的大きな中性子線強度が得られる。

パルス中性子検層は非弾性または捕獲のガンマ線が人工的に得られると同時に、これらの壊変率が計測できる。そして壊変率から地層や流体物質の核種の巨視的捕獲断面積 (Σ) を算定できる。

4-1 中性子パルス発生装置

検層用に用いる加速型中性子線源としての中性子発生装置はフィリップ社 シュランベルジャー社 カーマン社そして最近ではゼネラルエレクトリック社により開発されている。これらの装置は構造面でそれぞれ特徴をもつが、検層使用目的のため小型簡素化、そして耐熱性も加味した頑丈な構造に設計されている。今後これらは中性子出力と機器の耐用年数を増大させるための改良が一層進められていくものと考えられる。

中性子パルス発生機の機構的原理は重陽子を加速器で加速させ標的にあてることにより発生する中性子反応である。これには (d, n) (p, n) と (α , n) の3種があるが、このうちの (d, n) 反応が検層用として採用されている。すなわち、ガス充満または真空中の重水素 (^2H) とトリチウム (^3H) の負荷標的反応である $^3\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 作用により発生する。この反応は第2の同位元素と衝突するイオンを加速し、水素同位元素の一方をイオン化することでつくられる ($^3\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow n + ^4\text{H}$)。

検層用中性子発生ユニットは線源部とその制御部からなる。そして線源部はまた高圧発生部、加速部と標的部 (中性子発生管の高圧端) に別れる。

高圧ガス発生部；このベースに熱伝導体がいられ、ケーシング間を雲母、セラミック、またはプラスチック製の絶縁壁膜でおおっている。この中に閉塞された高圧ガス源はトリチウムの標的に重水素を浴びせることによりイオンを沸湯させ、それによりアークを発生させ中性子産出を助ける。ガス圧は加速部で最大になるようつくられ、これを一定保持するための再補給システムがガス高圧部防御などと共に組まれている。

加速部；加速操作される電圧ビームはトリチウムの標的に衝突する重水素を加速し高エネルギーの中性子を産出する。直流の加速電圧を得るための加速器にはそれぞれの目的に応じて幾つかの型式のうちの一つを選ぶことになる。

ヴァンデグラフ型とコッククロフト・ワルトン型の加速器は静電起電式と高圧整流式との違いはあるがいずれも比較的低い電圧で直接加速する方式をとっており、重水素エネルギー 110KeV で $^3\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反応させ、 ^3H に関連した共鳴により大断面の単一中性子エネルギーを大量に得られるので検層に用いられている。

標的部；標的はチタンで固めたトリチウム棒からなり、この周囲にガスを充満させたイオン源内に加速溝による磁場をつくっておくのが普通である。これに用いる磁場は筒状を提しイオン源の中心部に置かれる。

他方、イオン源に磁場を要しないプラズマ管 (標的遮へい管) を用いる方法 (カーマン社) もある。これにより管動作は単純化され、管長は縮小されるが、得られるエネルギー出力は比較的に小さい。

4-2 n- γ 検出法とその検出器

坑井内での中性子パルスの発生によるプローブ周辺の地層中に分散する中性子は速中性子時点で地層核との非弾性衝突により、そして熱中性子時点で吸収・捕獲によりそれぞれガンマ線を人工的に生む。このような中性子壊変の測定は理論的にみて中性子とガンマ線のどちらの検出器を用いても同じ結果にならなければならない。

裸空坑中の均質地層に対してはその通り一致する。しかしそれ以外の坑井条件が加わるにより相違してくる。すなわち、中性子検出は中性子壊変曲線の指数的な時間範囲が狭い他、坑内水、ケーシング、セメント等の充添部分で中性子エネルギーの多くが吸収され、地層への浅い貫入分だけを測定する結果となる。これに対しガンマ線検出は坑径、検層プローブ位置、泥水濃度などの差に幾分影響されるものの後述の巨視的捕獲断面積の性状と非常に類似性があるので解析上支障ない。

したがって ガンマ線検出法を用いる方が有利である。

ガンマ線検出部の蛍光体として NaI (Tl) は通常最も多く使用されている。 蛍光体にはこの他に Ge (Li) CsI(Tl) CsI (Na) Cf₂ (Eu) CaI (Eu) などがある。 このうち Ge (Li) は NaI(Tl) に比べて約30倍も高感度であるが-150°C まで冷却する必要があるので大設備となり 約20倍も高価である。 最近 コンパクトに工夫され冷却後その装置からはずして一定時間独立的に使用できるタイプが市販されているが 操作面の繁雑さから検層機への利用にはまだ至っていない。 また Cs (Na) の物理的特性は NaI(Tl) のそれに近い他 耐震性・耐熱性などの点で安定しているが高価である。

4-3 熱中性子壊変と捕獲断面積

熱中性子の壊変率 (または寿命) は分散と吸収・捕獲の過程に影響される。 これはボルツマンの移動理論式から説明できるが 実際計算には次式のような速度処理の分散式が用いられ 広汎な試験とよい一致性が得られている。

$$\frac{1}{\tau} = V(\sum a - DB_0^2)$$

ここに

- τ : 熱中性子の壊変率 V ; 平均熱中性子速度
- $\sum a$; みかけの巨視的捕獲断面積
- D ; 分散係数 B_0 ; 幾何学的よじれ係数

上式から τ と $\sum a$ との間には相互関係があることがわかる。 τ と $\sum a$ の両値はいずれも地層の化学的構成間隙率とその中の流体含有率の3要素とおもに関係する。 したがって これら環境下の助変数変化を明確に示してくれる。 いま 検層で記録する熱中性子の測定壊変率を τ_{meas} とすると次式が成り立つ。

$$\tau_{meas} = \frac{1}{\sum a \cdot V}$$

また 均一媒体中の検層計数率は次式のような時間間数として説明できる。

$$N = N_0 e^{-\sum a V t} \text{ または } N = N_0 e^{-t/\tau_{meas}}$$

ただし 記録値である τ_{meas} は地層幾何学と坑井環境の影響が含まれている。 したがって 吸収・捕獲だけで生じた本質的な壊変率である τ_{int} 間には次のような関係がある。

$$\frac{1}{\tau_{int}} = \frac{1}{\tau_{meas}(r, t)} - \frac{1}{\tau_0(r_0, t)}$$

ここに r は位置を表す。

また 温度 293°K の環境下における熱中性子速度 $V = 0.22 \text{ cm}/\mu \text{ sec}$ を $\tau_{int} = 1/V \cdot \sum_{abs}$ 式にあてはめて τ_{int}

$= 4.55/\sum_{abs} \mu \text{ sec}$ の関係のあることがわかる。

地下水探査に関係ある水の分散係数 (D) は一般地層の $1/5 - 1/10$ であり 間隙率 水 と地層間には次式のような関係がある (Allen ら, 1975)。

$$\frac{1}{D_{混合}} = \frac{1-\phi}{D_{地層}} - \frac{\phi}{D_{水}}$$

熱中性子の平均壊変率はおよそ $50 \mu \text{ sec}$ の範囲であるのに対して 中性子エネルギーを地層中に照射する励起反応により生じる地層核からのガンマ線のそれはおよそ10倍大きい $50 - 500 \mu \text{ sec}$ の範囲にある。

パルス中性子検層機は シンチレーション計数器と周期的に同調する中性子パルス発生装置を含む。 この装置線源から 14 MeV 中性子エネルギーの強烈な爆発を約 $30 \mu \text{ sec}$ 断続的に放射する。 この放射の休止間 検出部は事前に選定した2つの独立間隔のゲートを電子的に作動させ 間隔間の計数差によりガンマ線捕獲断面積を計算する。 このようにして測定する巨視的捕獲断面積は次式のように表わせる。

$$\sum_{meas}(t) = \sum + \sum_{diff}(t) + S_{bh}(t)$$

式は測定断面積が線源から照射された中性子を測定する遅れ時間の関数であることを用いている。 測定断面積は中性子がある単位量の地層中に分散する中性子の正味の利得と損失を含む。 S_{bh} は測定した壊変率の坑井物質 (流体 ケーシング セメント等) や幾何学 (形や大きさ) の影響を表す。 しかし S_{bh} は中性子照射間の時間間隔を十分とることにより効果的に除去できる。 このようなことから 計数は中性子線源照射から $400 \mu \text{ sec}$ 後の $200 \mu \text{ sec}$ 間隔の平均をとる方法が最近多く実施されており 中性子照射とゲート間の時間遅れは實際上これで十分であることが実証されている。

中性子パルス発生器から出力される速中性子のエネルギーは 14 MeV なので 捕獲単位 (c. u.) である地層の $10^{-3} \text{ m}^2/\text{m}^3$ 単位の捕獲断面積算出には次式が用いられる。

$$\sum a = \frac{1.0500}{4t} \log_{10} \frac{N_1}{N_2}$$

ここに $N_1 \cdot N_2$ はゲート1とゲート2それぞれの計数率である。

いま1例として仮に中性子壊変率 $L = 300 \mu \text{ sec}$ が観測され ゲート1で $N_1 = 24,500 \text{ cpm}$ そしてゲート2で N_1 の丁度半分の計数率である $N_2 = 12,250 \text{ cpm}$ が測定されたとすると巨視的捕獲断面積は次のように算出される。

$$\sum = \frac{10.5}{300} \log_{10} \frac{24,500}{12,250}$$

$$\therefore \sum = 10.5 \times 10^{-3} = 10.5 \text{ c. u.}$$

第5表 地下水探査のための各種放射能検層法

方 法 名		同位元素線源	中性子パルス発生器	応 用
ガンマ線検層		—	—	砂層中の粘土分の定性的見積り
ガンマ・ガンマ検層		(ガンマ線)	—	校正曲線による容積密度と公式による全間隙率の見積り
普通中性子検層	熱中性子検層	(中性子)	—	ガンマ・ガンマと普通中性子の両検層値間のクロスプロット解析による有効間隙率と粘土分の見積り 地層水分と間隙率の見積り および熱中性子と熱外中性子 またはガンマ・ガンマと熱外中性子の両検層値の比較からの水中塩分の見積り
	熱外中性子検層			
ガンマスペクトル検層	天然 γ 線エネルギーの検出	—	—	カリウムとトリウム間のガンマ線エネルギー比から砂層中の粘土分を見積ること
	核反応の γ 線エネルギー検出	—	○	水素 珪素 とカルシウム間のガンマ線エネルギーの関係からの間隙率見積りと水素と塩素間のガンマ線エネルギー比からの水中塩分の見積り
パルス中性子検層		—	○	捕獲断面積または中性子壊変率の関係式の利用による岩相 粘土分 水分と塩分の決定

多くの試料から得た捕獲断面積の実値は 淡水；22 硬岩；7—10 (石英砂は7.5—8.0) 堆積層；2—12 (ただし粘土は水素を多く含むので淡水に準じて高くなる) そして比重 1.15 の塩水は塩素の大断面積が反映して 100 c. u. と なり水中の僅かな塩分増大が Σ 値を著しく変えることが予想される。

4-4 捕獲断面積と間隙率の関係

パルス中性子検層解釈の基礎は Σ が全化学元素を正確に予測できることにある。地層と水の混合で構成される帯水層の全捕獲断面積は間隙率中に水が 100% 充滿しているものと仮定すると次式で説明できる。

$$\Sigma = \Sigma_F \phi + (1 - \phi) \Sigma_{ma}$$

ここに Σ_{ma} と Σ_F は地層マトリックスと流体の各値である。上式を書き改めると

$$\Sigma_{ma} = \frac{(\Sigma - \Sigma_F \phi)}{(1 - \phi)}$$

そしてまた 検層から間隙率を求めるための式に書き改めると

$$\phi = \frac{(\Sigma - \Sigma_{ma})}{(\Sigma_F - \Sigma_{ma})}$$

この式の応用には Σ_{ma} と Σ_F を求める必要がある。 Σ_{ma} は検層から知ることのできる Σ_a から求められる未知数であり Σ_F は化学分析結果から十分に予測できる。

また上式はガンマ・ガンマ検層から知れる容積密度 ρ_b から間隙率を求める式 $\phi = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_f)$ によく対応することから $\Sigma_F = 22$ $\Sigma_{ma} = 8$ の仮定値 既知 ρ_b との間で作成した $\Sigma - \rho_b$ クロスプロット図か

ら全体の Σ を推算することもできる。

パルス中性子検層のその他の応用として 砂層中の粘土分見積りに次式を利用できる。

$$\Sigma = \phi \Sigma_F + (1 + \phi) [A \Sigma_{sand} + B \Sigma_{clay}]$$

5. ま と め (地下水探査のための検層技術としての評価)

放射線計測技術はすべて統計にもとづいているのである地質試料の放射線性質を室内で試験する場合 できるだけ長時間かけて正確に測定するのが常である。しかし野外における検層の場合は地表から坑底まで (または坑底から地表まで) 検出部プローブを停止させないで連続的に一定速度で計測し 作業の都合上おのずとその低速化にも限度がある。レートメーターの時定数が 3—4 sec としたときの検層速度は普通 3—4 m/min の範囲を用いる。したがって統計的精度は比較的に低い。

しかし 検層による利点は原位置で連続的・垂直的にしかも迅速に放射線計測が行えることにある。

ガンマスペクトル検層機は小型電算機の組み込みと共に各種地層のスペクトルを弁別する際に生じる誤差の補正や標準スペクトルデータとのリアルタイムの比較計算などのシステムが考案され 統計的以外の誤差を極力縮小するような努力が払われている。

ガンマスペクトル検層のうち 天然ガンマ線スペクトルのエネルギーからは砂中の粘土分もしくは透水性がそして 中性子核反応によるガンマ線スペクトルのうち 水素 珪素とカルシウムのエネルギー分布からは 間隙率が 塩素と水素のエネルギー分布からは水中塩分がそれぞれ見積れる。

また パルス中性子検層機は中性子パルスの放射特性を測定原理に用いているため 中性子パルス発生装置の内蔵が不可欠であるが 複雑な機構に加えていまのところ耐久性に乏しいという難点がある。

このパルス中性子検層からは巨視的捕獲断面積または中性子衰変率の関係式を用いて地質 粘土分 水分 と塩分を決定できる。

各種の放射能検層法の地下水探査目的の応用面を比較するために ガンマスペクトルとパルス中性子の両検層の他に ガンマ線 ガンマ・ガンマ と普通中性子の各検層の特徴を表にまとめると第5表のようになる。

地下水探査に最も関係の深い粘土分 間隙率 塩分の見積りは 大装置のガンマスペクトルとパルス中性子の両検層を用いなくとも もっと単純な機構で経済的なガンマ・ガンマと普通中性子の両検層の併用によっても得

られる。しかし各検層は測定上の原理にもとづくそれぞれの特徴をもっており 特にパルス中性子検層は計数上坑井影響を無視することができ 1・2の室内実験値または妥当な仮定値を与えるだけで明確な定量値を算定できる魅力がある。

ガンマスペクトルとパルス中性子の両検層はいずれも非常に高価であり 日本における地下水探査用具として使用するには経済的採算に合わないことは明らかである。しかし 地下水障害などの環境管理面を厳密に考慮する場合や海外の乾燥国における稀重な地下水を探査する場合のように より詳細な情報が要求される時 これら検層機の応用拡大と多数の特許権の時間的解除にともなう価格低下に助けられて 将来頻繁に使用されだすであろう。

地学と切手

バクー油田
の切手

P. Q.



バクー油田はソビエト連邦アゼルバイジャン共和国にある油田で 地理的にはコーカサス地方に属する。第2次大戦でヒトラーが石油資源を手に入れるために占領しようとしてできなかった。この地方はもともとペルシャ領であったのだが 1804年から1813年の第1次ペルシャ・ロシア戦争 1826年から28年の第2次ペルシャ・ロシア戦争に敗れて 当時のペルシャがロシアに割譲したものである。この地方では 9世紀ごろもう石油の報告があったと伝えられる。何しろイランは現在でも石油の一大産出国として知られているが イスラムがイランに定着する以前から 紀元前6世紀の頃にゾロアスター教 一名拝火教と呼ばれる宗教があった。このゾロアスター教は火を崇拝し 神殿では日夜を別たずに火を燃しつづけた。その燃料が燃える水 すなわち石油であったといわれる。これとバクーの石油が関係があったがどうか さだかでないが 中近東地方で最初に商業ベースで石油の探鉱開発が行われたのがカピス海西岸のバクー アゼルバイジャン地域であった。

19世紀の末にこの地で探鉱にのり出したのは アルメニア人とタタル人であった。現地の労働者を酷使しこの地方の革命の種子をまいたと云われる。当時のカ

ピス海沿岸は石油成金の別荘が並び バクーは世界一派手な町であった。革命と反革命の争った土地になった理由があったのである。

カルスルーエの化学教授エングラ（Karl ENGLER 1842-?）は 魚油の実験から石油の成因を考察して「パーの油田」(1886)を著し この地域は初期の石油成因論の舞台となった。鉱床は背斜トラップで 産出地域は狭いが埋蔵量が豊富な油田であり 1950年までの約80年間で7億トンを生産した。

切手は

4 K： 1971年バクー油田開発100年記念

2 Kおよび5 K： 1921年アゼルバイジャン共和国通常切手

2 K： 1923年トランスコーカシア連邦共和国（革命後アルメニア・アゼルバイジャン・ジョルジア共和国は外国干渉の舞台となり 1922年に3共和国が統一されて トランスコーカシア連邦共和国となった。1936年に再び3共和国に分れた）通常切手。油井とアララトが画かれている。