

中性子検層

①

中井 順二

1. はじめに

1920年中性子なる概念が はじめてラザフォードによって提唱され 1932年チャドウィックによってその存在が発見された。以後わずか10年足らずのうちに もはや中性子物理は 諸産業の実際面にはなばなく応用されるに至った。

油井構造の地球物理学的調査に放射線測定法利用の可能性に注目したのは ソビエトの地球物理学者であるゴルシュコフ グランマコフ シュパークらで1933年に孔井内のガンマ線測定法を提案しその方法を研究した。これが放射能検層利用の始まりであり 1941年物理学者ブルーノ・ポンテコールボが 中性子による油層のガンマ線測定法を提案して 油層の物理的パラメータの測定に大きく貢献したのが 中性子検層の始まりである。

この後数年間に油井調査技術の分野において ガンマ線の散乱の測定 中性子照射によって誘導される放射能に基づいた測定法が研究された。このように中性子検層法は石油調査技術を媒介として発展したものである。

以後 中性子検層は現在に至るまで石油鉱業はもとより 農業 土木工業方面に至るまで広く導入されている。

諸外国ではフランス アメリカ等が盛んで なかでもフランスのシュランベルジャ会社においてはこの技術の開発が進んでおり わが国の油井調査も最近この会社によって数多く行なわれている。アメリカでは土壌水分測定 地下水測定等 農業 水文学等への利用に関する報告が多いようである。一方ソビエト ポーランド等の東欧諸国においても 近年すばらしい進歩発展がうかがわれ 石油鉱業の他に金属鉱物資源開発への利用に関する基礎的研究および応用的研究に関する論文が多くみられる。

2. わが国における中性子検層の歴史と現況

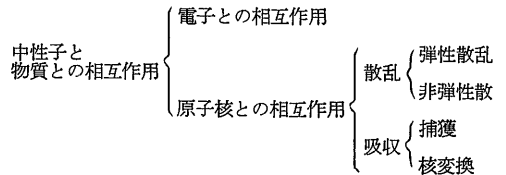
わが国においては 1954年帝国石油株式会社アメリカのウェル・サーベイ会社より 中性子検層機を輸入し旧油井の調査を初めたのが中性子検層のはじまりとされている。当時古い油層の若返りの試みや 二次回収の計画が採油技術の進歩発展を基礎として打ち出された。このため古い油井の調査を必要としたが 鉄管挿入後の孔井調査では従来の電気検層法では不可能なため 鉄管による影響の少ない検層法としての放射能検層法 なか

でも中性子検層法が大きくクローズアップされた。その後この検層機はガス田孔井のガス層位置確認等各種の目的に使用されている。しかし 最近ではフランスのシュランベルジャ会社による調査が占める比率が大きくなっている。

一方 1958年頃よりこの技術は市販を目的とする生産会社の出現等により 中性子水分計という機器として開発されその利用は 地下水調査 土木工業における各種の調査 製鉄原料の水分調査等広範囲にわたっている。とくに1962年11月 日本放射性同位元素協会主催のもとにラジオアイソトープの野外使用に関する討論会が開かれこれを契機として中性子水分測定技術の開発の機運は加速度的に高まっている。とくにガンマ・ガンマ密度検層に比較して技術上の問題点が少ないので多く利用されている。しかし中性子検出器としてのBF₃計数管の国産化のおくれ等により中性子検層技術の基礎的研究開発利用度は一般に諸外国の水準と比較して相当おくれしているとみるのが正しい。

3. 中性子検層

中性子を利用した検層は最近種々開発されているが いわゆる中性子検層と称しているものは 中性子—中性子検層 中性子—ガンマ線検層の二つである。本文ではこれらに加えて中性子放射化検層について述べる。さて 中性子—中性子検層および中性子—ガンマ検層は共に中性子と物質(地層)との相互作用を利用し 主として地層中の水分を測定するものである。この相互作用は次のように区分される。



ここでは原子核との相互作用が重要である。原子核との相互作用のうち弾性散乱は 中性子が核と衝突して弾性球の衝突と同じような運動量と運動エネルギーのやりとりを行なう現象であって しばしばビリヤードボールの衝突にたとえられる。非弾性散乱は衝突に際して相手の原子核は高い励起状態になって 内部エネルギー

を増し 中性子はその分に相当するだけの運動エネルギーを失うような衝突である。1MeV 以下の中性子が原子核と衝突する場合にはこのような事態がおこるのが普通である。数 MeV の中性子では 弾性 非弾性散乱は同程度におこり 物質との相互作用のおもな部分を占めている。

吸収現象のうち捕獲は主として遅い中性子（エネルギーの小さい中性子）によっておこり 中性子は相手の原子核にとらえられる。このときガンマ線を放射する。捕獲の断面積（起る確率）は各の原子核に特有な中性子エネルギーにおいて共鳴的に増大する。遅い中性子以外では 捕獲は一般に散乱に比較すると無視しうる程度に小さい。核変換は中性子を吸収してガンマ線や陽子アルファ線などを放射する現象や 原子核が二つに割れる核分裂現象などをいい 断面積は散乱現象のそれにくらべると一般に小さい。

ここで中性子のエネルギーによる分類をして今後の参考としよう。中性子はその速度（またはエネルギー）によって多くの種類に分けられる。その名称は必ずしも明確に定義されておらず 便宜的に使われることが多い。

それらの呼び方の一例を示すと

- 0~1000 eV 低速中性子（遅い中性子）
- 1~500K eV 中速中性子
- 0.5~100 MeV 高速中性子（速い中性子）
- 50 MeV以上 超高速中性子

また遅い中性子は 次のようにも呼ばれる

- 0.002 eV以下 低温中性子
- ~0.025 eV 熱中性子
- ~1~100 eV 共鳴中性子
- 0.5 eV以上 エピサーマル中性子

含水率測定などのための中性子検層に使用されるのは主として高速中性子および 低速中性子のうちの熱中性子およびエピサーマル中性子である。熱中性子は比較的吸収の小さな軽い元素からなる物質中で 散乱をくり返すときに得られるものである。

中性子—中性子検層はプローブに中性子源を取付け 地層中の水素原子核によって散乱減速されて岩石と熱的平衡を保っている低速中性子 すなわち熱中性子をプローブの一端で計数し 標準の含有率を有した模型地層での計数率と比較することによって 地層中の含水率をもとめるものである。

中性子—ガンマ検層では中性子が線源近傍の地層内で散乱ののち 中性子—中性子検層と同じように減速の結果 高速中性子が熱中性子に変わり その一部は地層中に拡散する。地層中の水素原子は熱中性子捕獲能力がす

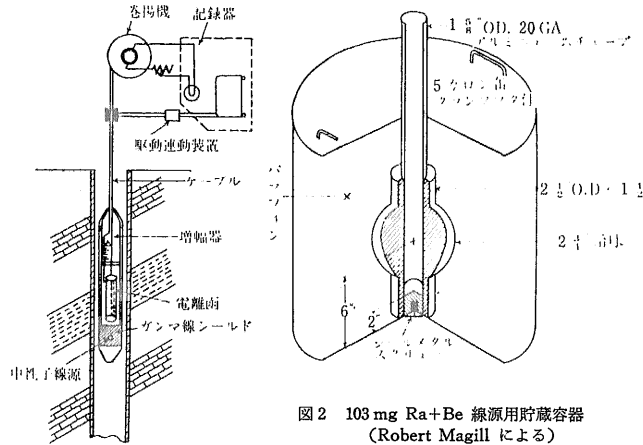


図2 103 mg Ra+Be 線源用貯蔵容器 (Robert Magill による)

図1 中性子検層機の構成 (Robert. F. Bush による)

ぐれており その際ガンマ線を放射する。ガンマ線検出部は中性子源と一定の距離に保たれているので 水素原子の多いところではガンマ線はよわく 逆に水素原子の少ないところではつよい。したがって中性子—中性子検層におけると同様にあらかじめ較正曲線を作製しておけば地層の含水率が決まる。

i) 中性子源と中性子の検出

中性子は短い半減期でベータ線を放射して崩壊する性質があるので天然の形では存在しない。中性子を発生させるためにはもちろん原子核の変換を利用する以外には途はないのであって 核変換の種類はきわめて多いが強度その他の関係で中性子源として利用されているものは限られている。

今日において大規模な製造に適しているのは原子炉であるが 中性子検層に使用できるような実験的で小規模に得られるものとしては $^{226}\text{Ra}-\text{Be}$ $^{210}\text{Po}-\text{Be}$ 源が利用される。ついでながら 最近では安価に入手できる ^{124}Sb をガンマ線源とする $^{124}\text{Sb}-\text{Be}$ 中性子源が市販されているが 地質調査所ではベリロメータを使用して岩石中のベリリウム資源の探査を行っており それにこの反応を利用している。 ^{124}Sb のガンマ線をベリリウム鉱床に照射した時放射する中性子を計数して鉱床を評価するわけである。 ^{124}Sb の半減期が60日であるので一年に少なくとも二回ぐらいは原子炉に入れて照射し放射化のやり直しをしなければならない。さて この中性子は低速中性子であり ベリロメータには適しているが中性子検層にはあまり使っていない。もっともソビエトでは中性子—中性子検層における地層の孔隙率の影響を小さくするため この中性子源を使用する研究がなされているという情報を得ている。中性子生成量あたりの価格や半減期 さらには後述するようになりエ

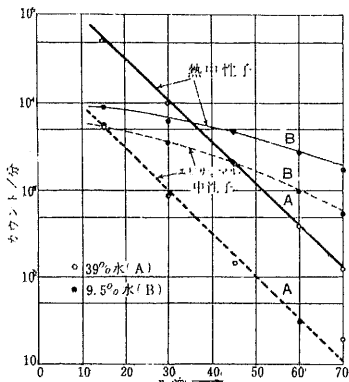


図3 砂による中性子分布 (CW. Tittle による)
r: 線源-検出器距離

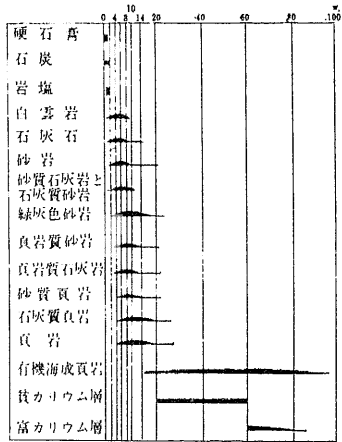


図4 堆積岩のガンマ線強度 (W.L. Russel による)

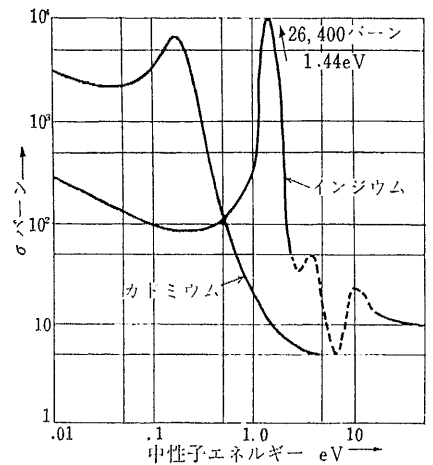


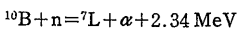
図5 カドミウム・インジウムの中性子吸収断面積 (Geldsmith による)

エネルギーの高いガンマ線を放射する人が多いので その遮蔽にも関連して 一般には $^{226}\text{Ra}-\text{Be}$ 源を使用する。最近では $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ を使用している生産会社もあるが ^{241}Am のガンマ線が弱いので 検出器への影響の小さいこと 放射線防護の点から考えても適当であり 今後はこの線源の使用がおそらく多くなるであろう。代表的な実験室規模の中性子源から得られる中性子束の密度エネルギー等を表1に示す。中性子源を遮蔽する場合にはそのガンマ線を鉛で防ぎ さらにパラフィンで中性子を遮蔽する。

表1 実験室規模の中性子源

線源	核反応	半減期	中性子エネルギー (MeV)	発生する中性子数 (数/秒/キュリー)
$^{239}\text{Pu}-\text{Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n) ^{12}\text{C}$	24,400年		1.4×10^7
$^{226}\text{Ra}-\text{Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n) ^{12}\text{C}$	1,622年	~13	1.3×10^7
$^{210}\text{Po}-\text{Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n) ^{12}\text{C}$	138年	~11	2.6×10^6
$^{124}\text{Sb}-\text{Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n) ^{18}\text{Be}$	60日	0.024	3.2×10^6

中性子は電荷をもたないために それを直接検出することは困難であるが 中性子のおこす種々の核反応を利用していろいろの検出方法が用いられている。中性子-中性子検層で使用されているのは 中性子による核反応からのアルファ線を測る方法である。硼素は低速中性子に対して (n, α) 反応をおこす。



この場合硼素の中性子吸収断面積は1KeV まではその速度の逆数に比例するいわゆる $1/V$ 法則に従う。したがって低エネルギーの中性子に対しては 感度が高く中性子-中性子検層の場合のように熱中性子を測定するのは都合がよい。天然の硼素中には ^{10}B は約18%しか含まれていないので 中性子に対する感度を上げるた

めに ^{10}B を95%程度まで濃縮したものを使用することが多い。

次に中性子検層について多少詳しくその原理 野外調査への適用等について述べよう。

ii) 中性子-中性子検層

今高速中性子の点線源を考え その周囲に無限に広がる物質があるとする。物質は原子量が A^1 原子番号が Z である単一の元素から成っていると考える。線源から放射された各の中性子は周囲の物質の原子核と相互作用をおこす。その反応は前述のごとくである。この場合非弾性散乱と捕獲に対する断面積はわれわれの対象とする物質では小さいとし さしあたり弾性散乱のみを考える。衝突前の中性子の運動エネルギーを E_0 衝突後のエネルギーを E とする。衝突によって失われるエネルギーの平均値のとり方については単に算術平均をとることが考えられるが ここでは次のような対数的エネルギー変化の平均値 ξ を用いるほうが一層便利である。

$$\xi = \overline{\log E_0 - \log E}$$

ξ は計算により

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \log \frac{A-1}{A+1}$$

となり 初めの中性子のエネルギーには無関係となり散乱体の A の値のみで決まる。堆積岩に直接関係のある元素 あるいは孔井ケーシングに関係のある元素についてこの式でえられる ξ 高速中性子から熱中性子になるまでの平均衝突回数を表2にのせる。

それ故中性子は陽子との数少ない回数の衝突で そのエネルギーの大半を失う。しかし重い原子の核と弾性衝突を起す場合には 中性子の失うエネルギーの割合は非常に小さい。その結果ある一定数の衝突回数では

表 2. 散乱に対する原子核の特性

元 素	質 量 数	ξ	熱中性子になるまでの衝突数
H	1	1.000	18
C	12	0.158	114
O	16	0.120	150
Na	23	0.085	215
Mg	24	0.081	224
Al	27	0.072	252
Si	28	0.070	261
Cl	35	0.056	324
K	39	0.050	361
Ca	40	0.049	370
Mn	55	0.036	507
Fe	56	0.035	516

(中性子のエネルギーは2MeVとする)

水素を含む物質は中性子を減速させる物質として最も効果的な作用をする。

中性子—中性子検層では このような物理的背景のもとに 線源から適当な距離をへだてた位置に設けられた検出器に入る熱中性子の数は地層中の水素の含有率が高ければ小さく 含有率が低ければ大きくなる。線源—検出器の距離がある一定の距離より短いといわゆるプローブが逆転、をして熱中性子と水素含有率の関係は逆になる。中性子水分計ではBF₃計数管の近くに線源がおかれている場合が多く その場合にはこのケースとなる。

一般に孔隙性を有する地層中では 水 石油 ガス等の流体がその孔隙を満たしている。そしてこれらは多くの水素を含んでいる。それ故中性子—中性子検層による水素含有率の決定は孔隙率決定として解釈してよい。

中性子—中性子検層が野外調査に適用される場合考えられる欠点の一つに重力水 結晶水 吸着水 炭化水素中の水素の区別が出来ないという点である。したがってたとえば石膏はその結晶水として水素を含んでいるので 孔隙性の地層として間違って解釈される場合もある。またもし水素含有率だけが孔隙率測定に応用されるとすると 天然ガスを含む地層は孔隙率の小さい地層中の油や水として誤って解釈される危険がある。このような場合の判定の補助的手段として 中性子—中性子検層と天然ガンマ線検層とが併用される場合が多い。たとえば頁岩類は天然ガンマ線はつよく 孔隙率は大きくて熱中性子の強度は小さい。砂岩はこれに比較してガンマ線はよわく 孔隙率は小で熱中性子強度はつよい。

その他孔井水 ケーシングの外側のセメント等は水素を多量に含有するので 検層結果の解釈を困難ならしめ

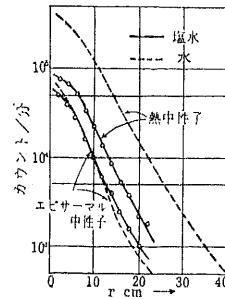


図 6 塩水 (98% NaCl) と水における中性子分布 r: 線源—検出距離 (C.W. Tittleによる)

野外調査に大きな制限を加える。しかし何よりも水素含有率のインディケータとしての働きを阻害しているのは 塩素の熱中性子の捕獲現象であろう。中性子の減速の途中において捕獲の現象は考慮しなくてもよいが 熱中性子になると捕獲現象は重要な問題となる。一般に塩素を除く地層中の主要成分である水素 酸素 炭素 珪素 アルミニウム等の熱中性子捕獲断面積は相対的に小さい。これに対して塩素は大きい断面積を有しこの違いが熱中性子強度に大きく作用する。硼素 カドミウムはさらに大きい断面積を有するが普通の岩石中には余り多く含まれない。塩素のために熱中性子の減少がおこり従って水分含有率を過大に評価する。特に海岸近くでの調査や石油坑井内の含油部の下部の化石水を含む部分では水分測定値はあいまいなものとなる。中性子水分計についてであるが 大野氏は測定値の補正方法を提唱している。しかしこれは 地層水の中の塩素濃度を知る必要があり實際上相当むずかしい問題である。カドミウム インジウムは低エネルギーにおいて中性子に対する共鳴吸収を起こす。一般にBF₃中性子検出器は熱中性子をふくむすべてのエネルギー領域の中性子を検出する。しかしその感度は熱エネルギー領域で最も大きい。通常熱中性子の密度はより高いエネルギーを有する中性子の密度よりも大きい。その点BF₃中性子検出器は熱中性子の分布に一次的に依存している。そこで検出部を0.5ミリ程度の厚さのカドミウムでシールドすると熱中性子は吸収されて有感部分に到達出来なくなる。それゆえ検出される中性子の数はエピサーマル中性子密度の函数となる。検出感度は当然低くなるが これはより強い中性子源を使用することによって補うことができる。かくして中性子—中性子検層ではその妨害元素である塩素の影響を除外することが相当可能になる。ここでは便宜上これをエピサーマル中性子検層とよぶことにする。

図 6 には塩水と水が媒質である場合の中性子—中性子検層の結果が示されている。塩水中の熱中性子は普通の水と比較してはるかにその量が少ない。エピサーマル中性子の量は両者の値の相違が小さく 水分 したがって孔隙率のインジケータとしてのより正確な情報を与える。中性子—中性子検層曲線および天然ガンマ線強

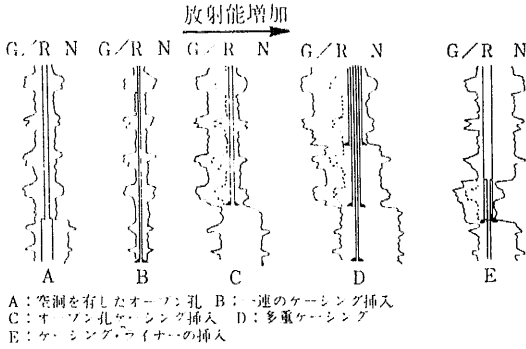


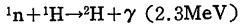
図7 坑井の物理的条件による中性子検層 天然ガンマ線検層の影響
G/R: ガンマ線検層 N: 中性子-中性子検層 (R.E. Bush による)

度におよぼす孔井の物理的幾何学的な条件による変化を図7に示した。

熱中性子の分布はケーシングの有無 空洞 あるいは孔径の変化に大きく影響されるが エピサーマル中性子検層は これと比較するとこれらによる影響が小さく都合がよい。 その上熱中性子密度とエピサーマル密度との比は塩素含有量に対して感度が強く これを利用して塩水中の塩素濃度を知る方法が研究されている。

iii) 中性子-ガンマ検層法

中性子-中性子検層法において 散乱減速後生じた熱中性子は 水素原子による捕獲断面積が大であり その際ガンマ線が発生する。



そしてその地層中に含まれる水素原子の含有量により中性子から一定の距離までの捕獲量が異なっていて 生ずる捕獲ガンマ線が変化する。 中性子源と検出器との距離を適当に保って捕獲ガンマ線強度を測定すると 水素原子核の多いところでは弱くなり 少ない所では強くなる。 したがって標準地層を用いて較正することにより含水率がもめられ 中性子-中性子検層の場合と同様に孔隙率も推定しうる。 捕獲ガンマ線の分布は距離に関して対数的になっていて 含水率の異なる物質中では 中性子源からある距離でこれらの曲線が交差し プローブの「逆転」をおこす。 検出器はこれより長い距離を保った位置におかれるが これは中性子-中性子検層の場合も同様である。 この距離は 中性子検層用プローブを設計する際重要であってもしこの「逆転」の位置に検出器がおかれると 水素含有率をシャープに区別することが不可能である。 この検層法も天然ガンマ線検層と併用して使用されることが多く 地層対比判定上あいまいな点を明らかにする。 たとえば 天然ガンマ線の最小値は砂岩とか石灰岩と推定されるが その位置での中性子-ガンマ検層曲線が最大を示すならば おそ

らく水とか油を含有しない孔隙率の小さい石灰岩と判定してよいであろう。

中性子-ガンマ検層において検出器によって測定されるガンマ線は 次のものからなりたっている。

- 1) 中性子源と関連のある一次ガンマ線 (Po+Be, Ra+Be 等から直接くるガンマ線) およびコンプトン散乱ガンマ線
- 2) 中性子 主として熱中性子の捕獲によって二次的に放射されるガンマ線
- 3) 孔井の周囲の地層からくる天然のガンマ線

これらのガンマ線のうち測定の対象としたいのは 2) のガンマ線であって 1) と 3) との影響を最小にすることが必要であり プローブの設計上注意される点である。 孔径の大きい場合 とくに孔井水のない場合 あるいは非常に放射性の強い地層では 1) 3) の影響を除外することは困難になるであろう。 中性子源自身から直接くるガンマ線は ${}^{241}Am+Be$ を除くと一般にエネルギーが大きい。 Ra+Be 源からのガンマ線はそのほとんどが 1MeV 以下であるが 2.2 MeV のガンマ線も含んでいるので これらを完全に遮蔽することは立体的空間的に多少むずかしくなる。 Po+Be 源からのガンマ線は比較的低い強度のガンマ線で理想的であるが 半減期が短かく (180日) また 価格が高いため野外調査において使用されることは比較的少ない。 しかし核反応による人工ポロニウムの生産が将来この線源の価格を低くし 野外利用に役立つようになると思われる。

線源からのエネルギーの強いこれらのガンマ線のかんりの部分は周囲の岩石をつらぬいて散乱後検出器に入りあるいは孔径の大きい場合プローブと孔壁との間の水や空気によって散乱された後検出される量が多くなる。 しかし中性子源からの散乱ガンマ線は水素 塩素 鉄等の元素による捕獲ガンマ線と比較してエネルギーが小さい。 したがって検出器に適当な遮蔽をほどこすことによってこの影響を小さくすることができる。

3)の天然ガンマ線もエネルギーは低いので プローブの外筒部あるいはわずかの遮蔽を工夫することによって影響を少なくし得る。 大ていの場合には 砂岩 石灰岩は無視し得る程であるが 頁岩 泥岩はガンマ線検出への寄与が大きく無視し得ない場合がある。 これには強力な中性子源を使用するという手段がある。 しかし経済的にもまた作業従事者の健康管理に関する安全性からいっても限度があり Ra+Be 源では 2 キュリー以上使用するのはいずれも現実的でないといわれている。

図8 は落合氏が秦野盆地で測定した結果で孔隙率の大

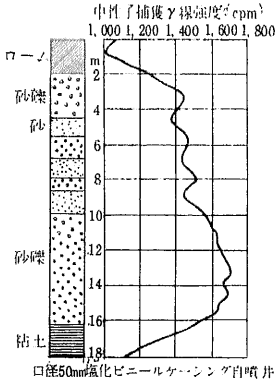


図8 秦野盆地におけるn-γ検層曲線 (落合敏郎による)

きいローム層および粘土層で低い中性子-ガンマ強度を示し、孔隙率の小さい礫層では前者に比べて高い計数率を示している。この検層法は捕獲ガンマ線のエネルギー分析をすることによって適用分野も広がるであろう。

ソビエトではすでに中性子-ガンマ検層を金属鉱床に適用している。

たとえばマンガン鉱床ではその含有度が低い場合でも中性子捕獲ガンマ線のつよさは、確実に記録されると考えられる。またボーキサイト胚胎位置では捕獲ガンマ線の最小値で示されている。このことは水素含有量によっても説明される。マンガン、アルミニウムの他にコバルト、タングステン、水銀の探鉱に対する中性子捕獲ガンマ線測定法も有望である。炭田調査に対しては現在までのところ放射能測定法はとくに発展はしていない。炭層における中性子-ガンマ曲線は一般には極小として指示されるはずであるが、しかしその異常はあまり顕著ではない。明確な異常を示し、炭層を完全に分離して指示するガンマ-ガンマ検層法にはるかにおよびない。

4. 中性子放射化検層

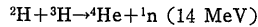
近年放射化学の分野において、放射化分析が盛んに行なわれている。試料に荷電粒子または中性子の衝撃ガンマ線の照射を行なって人工放射能を生成させ、その場合におきた核反応が明らかである場合には、生成した放射能の特性をしらべて定性分析を行ない、また放射能の強度を測定して定量分析を行なっている。

中性子による放射化に使用される反応は (n, α) (n, p) ($n, 2n$) などがあるが (n, γ) 反応がもっとも普通に使用される。放射化検層においてもこの反応を用いる。すなわち、中性子を衝撃させ、地層中の原子核に核変換を起こさせて生ずるガンマ線を測定して構成元素の分析を行なうのが中性子放射化検層である。熱中性子は (n, γ) 反応の断面積がとくに大きく、もっともよく使用される。物質中のある原子が中性子放射化反応によって放射性となった場合生ずる放射能 A は、次の式により算出することが出来る。

$$A = N f \sigma \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T} t} \right) e^{-\frac{0.693}{T} d}$$

ここに N は放射化される物質中の中性子束密度、 f は中性子束中の問題の元素の原子数、 σ は核反応の原子断面積、 T は生成する放射性元素の半減期、 t は物質を衝撃した時間、および衝撃後経過した時間を示している。したがって照射時間、照射中性子源の強さ等の条件、測定条件が同一の場合、放射能強度は物質中の問題とする原子の数に応じる。

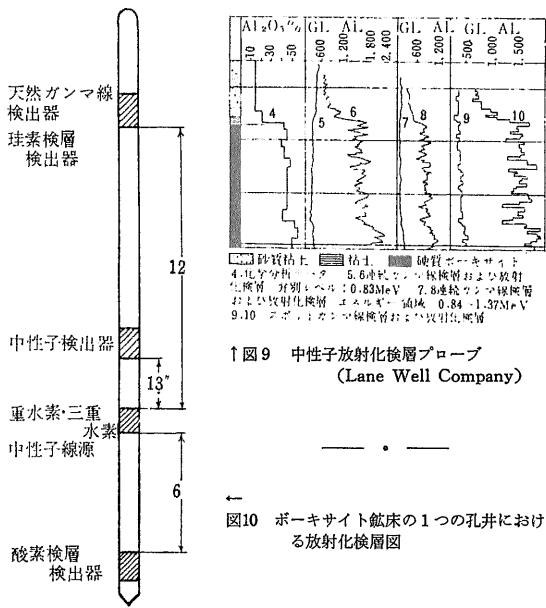
放射能検層の場合では、一般的には式(1)を検層中に一定に保つため、プローブを一定速度で移動すれば原理的には地層中の元素の濃度を知ることができる。この場合の中性子源としては中性子検層と同じく $Po+Be$ 、 $Ra+Be$ などを使っている。放射化検層ではより大きな中性子源を用いることが望ましい。近年高速荷電粒子の発生装置を使うことが開発されており、大きくクローズアップされている。これはトリチウムに加速された重水素を高速で衝撃し、発生する中性子を使うのである。これによると 14 MeV のエネルギーが得られる。



レーン・ウエル社では、現在この装置の小型化したものを放射化検層に利用し、野外試験中で、レーン・ウエルアクセラトロンとして有名である。この装置では中性子の数は (α, n) 反応によるよりもさらに大きい ($5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^8$ /秒) として、将来この装置の使用により現在の検層よりもさらに良質のものとなることが考えられている。実際において高エネルギーの中性子が得られるので、地層中の透過力が良く、よいサンプリングを与えるし、また電気的に操作されるので地表ではスイッチを切っておけば安全であるなどの利点がある。放射化検層に際しては種々の根本的な問題が生ずる。その一つは捕獲ガンマ線であろう。

中性子は地層中の種々な元素を放射化すると同時に捕獲されてガンマ線を放射する。この影響を除くためには線源-検出器の距離を中性子の拡散の程度と関連して十分な距離をとればよい。次に複雑な化学成分を有した地層を中性子で照射した場合、普通数種の安定元素が放射化され、これらの総合された結果が記録される。

このことはわれわれが目的とする元素の検出を根本的に困難にする。作られた放射性元素のガンマ線はおのおの特徴的なものであり、したがって元の元素に対して独特のものである。そこでこれらのガンマ線のエネルギーの差を利用し、シンチレーションカウンタやマルチチャンネル波高分析器を用いて、問題とするガンマ線を優先的に記録すればよい。ただし元素に独特なガンマ線が地層中を透過している間にエネルギーが減少して、それ以下の連続エネルギーによるスペクトルが観察され、また多くの元素に特定の一つ以上のガンマ線があり、こ



↑ 図9 中性子放射化検層プローブ (Lane Well Company)

← 図10 ポークサイト鉱床の1つの孔井における放射化検層図

核反応	ガンマ線エネルギー(MeV)	半減期
Si → ²⁸ Al	1.78	2.3min
O → ¹⁶ N	6.1	7.3sec
	7.1	

これらの反応は高エネルギーを持った中性子によってのみおこるので 加速装置を用いている。 弁別レベルは酸素に対しては2.5MeVでこれは酸素の放射化によるガンマ線エネルギーの大部分を数えることになる。そして他の線源からのガンマ線を十分カットオフしている。酸素の放射化反応では 高いエネルギーの放射線が放射されているし 珪素に対しては酸素が併存した場合1分も経過すれば放射化された酸素は崩壊してなくなるほどの状態になる。したがって珪素によるガンマ線のみを簡単に測定し得る。珪素に対する放射化分析の弁別レベルは低いところにおくので 地層からの天然のガンマ線の影響が入る。それ故このバックグラウンドをさしひいている。プローブ(図9)を下降させる場合は珪素の検層のために上部の検出器を働かせる。この場合放射化された酸素によるガンマ線の影響をうけないように、計数するまでに¹⁶Nの半減期7.3secに対して十分な時間が経過するようにプローブの移動をさせる。プローブを引き揚げる場合は 中性子-中性子検層のための 中性子検出器 天然ガンマ線検出器を働かせる上に酸素検層器を働かす。プローブは放射化された酸素の崩壊を考慮した上での最適の速度で引き揚げる。この速度V₀は

$$V_0 = \frac{0.639}{T_0} L$$

が適当である。ただしT₀は酸素の半減期(秒)であり Lは線源と検出器の距離である。以上のような装置の開発がレーン・ウエル会社によって紹介されている。

次に放射化検層の実例をあげる。図10に示したのはポークサイト鉱床地帯における孔井の放射能検層図の例である。検層曲線9、10は放電計数管を使用し スポットカウントのガンマ線検層および放射化検層である。これらの差は 完全な放射化の効果を示している。曲線5.6は弁別エネルギーレベルを0.83MeVとした場合のガンマ線検層および放射化検層の連続記録である。7.8はエネルギーレベルを領域0.84~1.37 MeVに制限し ²⁸Alによるガンマ線のコンプトン部の一部を測定したものである。この場合は 天然のガンマ線は非常に小さいため 放射化検層の計数率からアルミニウムの含有率を十分定量的に判断することができる。これらの結果は ポークサイト鉱床での孔井の調査に放射化検層の適用が可能であることを示している。

これらの条件が重なってガンマ線スペクトル分析を利用してもなおかつ地層の放射化分析はかなりにむずかしくなっている。

次に照射時間を考える必要がある。ここでは放射化後経過した時間dは考えないとする。Aを表わす式において $1 - e^{-\frac{0.693}{T}t}$ は放射化した時間を無限大にした場合すなわち飽和された放射能に対するパーセンテージを表わしている。たとえばアルミニウム(T=3.2分)とナトリウム(T=15.1時間)とを含む地層を3分間照射した場合 前者の放射能は最大値の50%となり 後者は0.2程度である。もし照射時間を15時間とするとアルミニウムの放射能はもちろん飽和され ナトリウムは50%となる。したがってアルミニウムの分析には照射時間を数分とするのが最適であり ナトリウムの場合には数時間が適当ということになる。この場合放射化後経過した時間d 放射性元素の半減期Tによって放射能強度が変る。Tの値が小さいと放射能強度の減衰が速くたとえば照射後ナトリウムの半減期15時間経過後では当然ナトリウムの放射能は初期の半分になり アルミニウムは非常に小さくなる。したがってナトリウムが実際上記録される。

よく工夫され 設計されて成果が比較的あがっている検層例をあげる。それはガンマ線エネルギーと放射化された不安定元素の崩壊速度を利用するもので 珪素と酸素とを分析の対象としている装置である。

放射化された場合 次のような反応がおこる。