

天然の状態における鉍石組成測定のための放射能探査法の応用*

Yu. P. Bulashevich & I. N. Senko-Bulatnyi

鹿 島 光 雄 訳

要 旨

1) コペンハーゲン会議で行なわれた, Bulashevich Yu. P., Voskobojnikov G. M. および Muzjukina L. V. の, “地下水および炭田調査における放射能探査” の報告で, 1960 年における問題の概要が述べられた。

報告は主として, スタンダードな, 中性子あるいはガンマ線源および二次ガンマ線の積分記録による, 放射能検層法の効果的な応用について行なわれた。それ以来, 微分スペクトル記録法が研究され, 効果的に応用されてきたが, これは鉍石の元素組成に関する情報量を増大し, 孔井断面の研究効果を高めるのに役立った。

ソ連邦科学アカデミーウラル支部地球物理研究所による, 孔井への新しい選択および放射化スペクトル測定法開発に関する研究成果もまた, その応用の経験とともに, この報告のおもな内容をなしている。

2) 報告では, 連続 ГГК (ガンマ-ガンマ検層) および選択ガンマ-ガンマ検層 (СГГК) の物理的基礎について簡単にふれられている。普通の三芯ケーブルを用いた, 30 チャンネルの孔井スペクトロメーターの原理も述べられている。重元素鉍床で得られた微分 СГГК 検層図は, 光電吸収の K-吸収端で異常を引起す元素の原子番号を分析できることを示している。

СГГК の微分法と積分法を組み合わせることによって異常の性質を解明し, 位置的に正確な; 鉍石元素の内容についての定量的評価を与えることができる。

3) スペクトル測定による中性子放射化検層は (AK), 多芯ケーブルを用いた, 二系統の孔井ガンマスペクトロメーターで行なわれた。ボーキサイトに適用される判別限界値と, 比較的高エネルギーのガンマ線測定によって, 天然放射能のバックグラウンドノイズに対する有効シグナルの比を高めることができた。これらの結果, ボーキサイト化層検出の信頼度と高性能測定を可能にする連続 AK (放射化検層) による金属含有量評価の精度が高められた。

スペクトロメーター記録によりスポット放射化の際の, アルミナの定量測定の精度もまた向上している。

測定系統のエネルギー値を適宜選択して, 短寿命の銅アイソトープ Cu^{66} の放射線により, 孔井断面における銅鉍生成を明らかにすることができる。この場合, アルミニウムおよび Mn^{56} の影響が除かれており, このことは塊状鉍床の探査, および鉍床賦存範囲の決定に重要な意義をもっている。

4) 報告の結語では, 鉍床孔井の地質断面研究のために, 他の地球物理学的方法との組合わせの必要なことが指摘されている。

序

核地球物理学は, 最近の地球物理研究のなかでも, とりわけ急速に発展している部門であ

* Ю. П. Булашевич, И. Н. Сенько-Булатный: Применение ядерно-Геофизических методов для определения состава руд в условиях естественного залегания, Труды Конференции Ядерных Геофизиков 24-30 сентября 1962 г. Краков, Польша p. 201-231

る。その応用範囲はきわめて広く、中性子放射化法による天然の同位元素存在比の変化の研究から、大気中および地殻表層における人工放射性アイソトープの分布、移動の研究にまで及んでいる。核地球物理学的方法が、探査探鉍に果たす役割は益々大きくなっている。この場合天然放射能と同様に、多くの人工放射線源も用いられている。豊富な鉍物資源に対応して、鉍床核地球物理学の課題、方法も多種多様である。放射能検層法の制約は、ただその作用半径が小さいということである。というのは中性子ガンマ量子の鉍化帯における平均飛程は、よくて数10 cm の範囲内にあるからである。したがって有用鉍物が、孔井のなかで、直接放射線源、あるいは検出器と接触するような放射能検層法がとくに大きな発展をみているのである。

ある場合、工業用鉍物資源開発の際の放射能検層の探査深度は、鉍床による散乱で大きくすることができる。

一般に探査深度が小さいなかで、例外は透過宇宙線である。地表面および探掘鉍物を測定して放射線吸収を知り、相当の厚さの鉍化層の平均密度、あるいは観測輪廓に対するその異常分布等を計算することができる。

核地球物理学的方法の第2の特徴は、化合物態にある元素、あるいはその同位体を、それとはかかわりなく検出できることである。だがこれはある場合には致命的な制約ともなる。例えば、選択ガンマ-ガンマ検層の場合、鉄は十分な密度をもつとき鉍物磁性体であるにもかかわらず、それとは関係なく検出されるが、鉄の磁気特性を知ることが、鉍石の性質、鉍床の経済的評価にとって不可欠のことであり、この点から検層には磁気的方法を用いることが必要となってくる。

一般に地球物理学上の前提、解決すべき地質学上の課題等によって、放射線応用法と、普通の地球物理学的方法をうまく組み合わせることが望ましい。

鉍床物理探査における放射線応用に関する文献は非常に多い。それゆえここでは、主として2つの問題、放射化検層 (AK) と、選択ガンマ-ガンマ検層 (CFTK) にしぼる。その他の放射線応用検層法については、付随的に、あるいはとくに興味あるものについて述べることにする。

最近では、AK, CFTK およびその他の放射能検層法に積分法が行なわれてきた。この場合、誘起、散乱ガンマ線からの総合的な効果が記録され、主として放電計数管が用いられた。この方法の概要は、ソ連国民経済におけるラジオアイソトープおよび核放射線応用に関するリガ会議 (1960年) の報告書 [1] に、また物理学および工業におけるラジオアイソトープ利用に関するコペンハーゲン会議 (1960年) の報告書 [2] に述べられている。

それ以後、孔井シンチレーションガンマスペクトロメーターおよび AK と CFTK の微分法が開発された。以下ソ連邦科学アカデミーウラル支部地球物理研究所で行なわれた、この方法の応用に関する幾つかのデータについて述べるとともに、他の核物理探査の問題も検討する。

§ 1. 放射化検層の前提

Po-Be あるいは他の中性子線源を用いた AK の場合、孔井中の鉍化帯に放射能が誘導される。続いて放射化された元素の濃度に比例したガンマ線が測定される。

ある時間における放射化は、飽和の法則に従って起こる。

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (1.1)$$

ここで、 N_0 は、 $t = \infty$ で放射化された原子の数、

λ は、壊変定数

半減期に等しい時間に $\frac{1}{2}N_0$ が放射化される。

このように放射化時間は、生ずる放射性同位体の壊変速度に相応ししなければならない。

かりに、放射化すべき元素が、濃度 ν で均一に分布しているとすると、この元素の放射化

された原子の全量は、線源の回りの中性子分布関数にはかかわりなく、

$$N = \frac{Q_0}{\lambda} \frac{\nu \sigma_{akm}}{\nu \sigma + \sum \nu_i \sigma_i} [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (1.2)$$

に等しい。

ここで、 Q_0 は中性子線源出力

σ と σ_{akm} は全吸収断面積および該元素の放射化断面積

ν_i と σ_i は i 番目の元素の濃度および吸収断面積 (検討されるものを除いた全元素について合計が行なわれる)。

t は放射化時間

二次ガンマ線の計算には、放射化中性子の分布関数を知ることが必要である。熱中性子による放射化は基礎的な意義をもっている。最も簡単な熱中性子密度の指数関数型分布の場合、放射化点におけるガンマ線の強さは、近似的に次のようになる。[3]

$$J = \frac{KN}{2} \frac{1}{L^2(1+\mu L)} \exp(-\lambda t_1) \quad (1.3)$$

ここで、 K は強さの測定単位に関する係数

N は (1.2) と同じ

L は減速パラメータ (距離)

μ はガンマ線の線吸収係数

t_1 は放射化停止からの時間

固定線源による放射化の場合、放射化される原子の分布は球対称をとるだろう (孔井中にある機器の影響を0とする)。線源が孔井中を一定の速度で移動する連続 AK では、周辺分布は変形される。さらに放射化された原子密度の極大値は、線源から、動きに対して逆方向に転位する。理論的分析によって、固定およびパルス中性子線源による連続 AK の基本的法則性が明らかにされた [3]。

捕獲放射線の影響を除くために、連続 AK では、普通、 $r \gg L$ の条件を満たす大きなプローブが使用される注1)。この条件で、検層速度 $v \gg L\lambda$ の場合、孔井回りの放射化された原子の密度は非常に簡単な式で表わされる。

$$\frac{n}{n_0} = \frac{2L\lambda}{v} \exp\left(-\frac{\lambda r}{v}\right) \quad (1.4)$$

ここで、 n_0 は固定線源の場合の飽和放射化密度、

(1.4) から上記のプローブを使用する場合、最大の放射化を保証する最適の速度は、

$$v = \lambda r \quad (1.5)$$

ということになる。

この関係は、放射化中性子の分布関数には関係なく、総合的な判断から求めることができる。ボーキサイト鉱床での孔井実験では、(1.4) と (1.5) 式の、定性的のみならず定量的な正しさも実証された。この場合、(1.4) の比は、二次ガンマ線の強さの比に等しいとされた [4]。

上述された関係式 (1.1)~(1.5) により、合理的な AK 法を行なうに当たっての初歩的な問題である、孔井中における放射化の結果に対する各種要素の影響を分析することができる。

次の点についてはとくに強調する必要がある。

1) 鉱床における放射化検層は、有用鉱物含有量の量的評価が最終目的であること。AK 応用の対象を選ぶ場合に、中性子断面積の分布を検討し、放射化の異常に大きい断面積をもつ元素を選択し、また工業用鉱物においては、元素の平均、最小濃度や、さらに具体的な鉱床の地質条件の特質を考慮しなければならない。

AK 検層図の定量的解釈は複雑である。これは油田における AK 応用の豊富な経験からも

注1) r : プローブの線源—検出器間距離

いえることである [5, 6, 7]。

水と石油の接触状態は、充分信頼性のある測定ができるが、地下水に溶解している Na および Cl の放射化、またケーシングパイプに入っている Mn の放射化によって、油層とは別にある液体の性質を測定することは難しく、こんにちまで空隙率を定量的に測定するという課題を同時に解決するには至っていない。

2) AK の際に記録されるガンマ線の強さは、(1.3) から明らかのように、放射化領域の有効サイズに左右される。水素含有量の増大に伴い、すなわち、減速距離が短くなるとともに、放射化帯域は、線源に向かって小さくなり、AK 検層図の異常は急に大きくなる。このため、AK データとコアの化学的分析結果との間の較正関係を定めるための断面領域の綿密な選択が必要になる。

3) AK の場合、実際には対象となる元素からの有効シグナルは、他の放射化された元素および天然のガンマ線からのノイズバックグラウンドに記録される。例えば、銅鉱床 AK の場合、アイソトープ Cu^{66} ($T=5.1 \text{ min}$) のほかに、 Al^{28} ($T=2.3 \text{ min}$) および Mn^{56} ($T=2.6 \text{ h}$) もガンマ放射体でありうる。さらにマンガンは、相当大きな放射化断面積に関連して、本質的な影響をおよぼすこともある。長寿命アイソトープ Cu^{64} ($T=12.8 \text{ h}$) の放射化の場合 [8]、ほぼ同じ半減期をもつ、 Na^{24} からのノイズもありうる。時間による選択以外に、有効シグナルノイズ比は、適当なスペクトル測定領域を選択することにより高めることができる [9]。

4) 連続 AK の場合、プローブの長さは、放射化捕獲ガンマ線の影響を小さくするため、相当大きくしなければならない (n, γ)。したがって、連続 AK に最適の条件においてさえも、記録される放射線の値は飽和のため小さくなる。例えばボーキサイトでは、この値はおよそ 7% である [4]。

アルミナ測定の精度は、感度を高め、天然ガンマ線を相当程度識別できるシンチレーションスペクトロメータを使用することで高められる。

5) 元素濃度と AK 効果間の関係は直線的ではない。(1.2) および (1.3) からわかるように、放射化された元素の大きなマクロ断面積、 $\nu\sigma \gg \sum \nu_i\sigma_i$ の場合、所定の放射化時間の下で濃度の飽和が始まる。そして発生した放射性原子の量は一定の値、

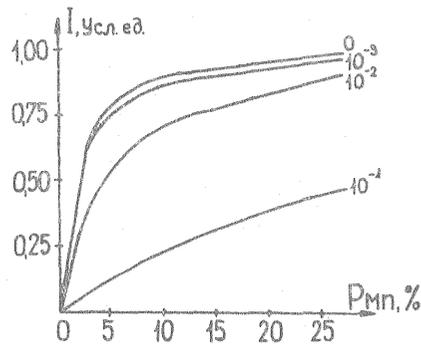
$$N = \frac{Q_0}{\lambda} \frac{\sigma_{akm}}{\sigma} [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (1.6)$$

に近づく。その結果、大きな含有量に対して AK 検層図の定量的判断はいまいなものになる。これに関連して興味あるのは、水成源や変成源のマンガン鉱床で、礫素が不純物元素でありうることである。後者はきわめて大きな捕獲断面積をもっている (752 barn)。

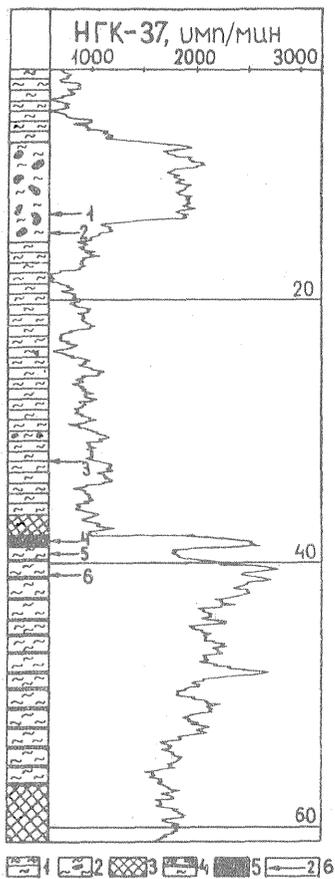
第 1 図には、礫素の各種不純物を有する褐マンガン鉱放射化の際の、マンガン含有関数における放射線強度の理論的計算が示されている。

第 2 図には、あるマンガン鉱床で行なわれた中性子-ガンマ検層法による孔井断面中での褐マンガン鉱検出の例が示されている。異なった大きさの HFK 異常の断面領域で放射化点が選択された。周知の方法で行なわれた [10] AK データとコアの化学分析結果との比較では、第 3 図にみられるように、直線的な関係が得られた。この場合の直線性は、ほぼ一定の礫素含有量によって保証されている。

上述の一般的な考察と検討された例は、多くのファクターが総体として、AK 定量デー



第 1 図 ガンマ線強度と、異なった濃度の礫素を有する場合の褐マンガン鉱中の Mn 含有量との理論曲線。曲線上の数字は礫素含有量のパーセンテージを示す。



1. 珪質粘板岩 2. 珪質粘板岩を含む巨礫マンガン鉱 3. Omanganese 板岩 (訳注1)
4. 一部褐マンガン鉱 (訳注1) の挟みを含む珪質粘板岩 5. 褐マンガン鉱 (訳注1)

第 2 図 マンガン鉱床における HGK 検層図、孔井は水で充された。

§ 2. ボーキサイト鉱床におけるスペクトル測定連続 AK

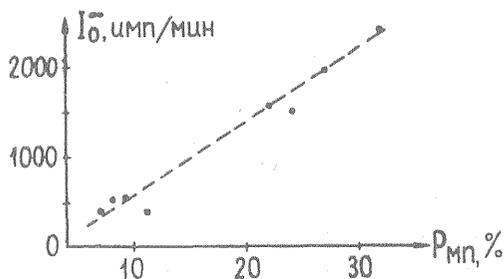
スペクトル測定 AK に関する最初の研究 (1960 年) では、1 系統ガンマスペクトロメータが使用された。3 芯ケーブルでプローブと連絡している地上装置には、波高分析器がセットされた。またプローブには中性子線源、シンチレーション検出器-NaJ (TI)、光電子増倍管- $\Phi 3V-11B$ および電源安定整流コンバータ付広帯域パルス増幅器がある [11]。プローブを孔井に入れる際のケーブルの電気特性の変化は、特別な研究で示されたとおり、実際上、パルス波高スペクトルには現われなかった [19]。スペクトロメータの分解能は、 Co^{60} (1.33 MeV) で 8%、 Cs^{137} (0.66 MeV) で 18.2% であった。

第 4 図には、hydrargillite ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) 組成の、中生代ボーキサイト鉱床で得られたいくつかの、それぞれ異なった検層図が示されている。

見かけの電気抵抗 (KC) の増大は、石状ボーキサイトの帯域と一致しているが、完全に合致しているわけではない。ガンマ検層は区別なくすべての鉱物帯域を高い強度値で分離している。HGK の 52 cm プローブでも、捕獲放射線の最小値で全帯域が分離されている。このことは大量の水素含有によって説明される。

第 5 図の曲線 9 および 10 は標準的な測定方法で放電計数管を用い、スポットでとられたガンマ検層 (TK) および AK 検層図である。放射化点間の距離は 0.5 m である。検層速度は

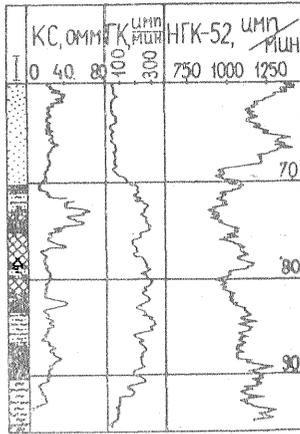
訳注 1) 直訳、ブラウン鉱のことか？



第 3 図 出力 10^6 中性子/sec の線源で飽和放射化がみられたガンマ放射線 Mn^{56} の強さとマンガン含有量との実験曲線。

タに対して影響していることを物語っている。

各種元素鉱床の地質条件によって、個々のファクターと影響力をあらかじめ知ることは理論的に可能である。重要なことは、AK 値から有用成分含有への換算率を正しく選ぶことである。そのためには、探査される鉱床におけるいくつかの、もっとも典型的な鉱物領域について、所定のサンプリングと、AK との比較検討が必要である。このようにして決定された比率によって、普通のサンプリングと較べて劣らない、統計誤差の範囲内での定量的測定が可能となるだろう。コアサンプルと放射化有効量の多種多様性からみて、小さな孔井領域での比較は、一般に放射線分析と地質学的分析との間に著しい食い違いをもたらす可能性がある。



1 2 3 4 5

1. 砂
2. ポーキサイト質粘土
3. Аллиты (不明)
4. 硬質ポーキサイト
5. マントル粘土 訳注2)

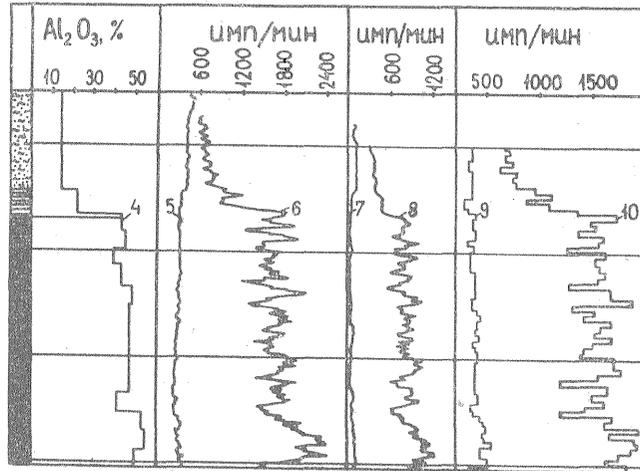
第4図 中性代ポーキサイト鉍床におけるおのおのの孔井の検層データ

20 m/h. 上記曲線の差は純粋な放射化効果を示す。5および6はスペクトロメータを用い、弁別下限 0.83 MeV, プローブの引上げ速度 40 m/h (プローブ長さ 2 m) で得られた検層図である。ここでは、2倍の速度で検層が行なわれたときにも、スポット放射化の場合と同じ感度が得られた。

エネルギー領域 0.83~1.36 MeV で測定した場合、天然ガンマ線のバックグラウンドは無視できるほど小さく、カウントレートは定量的な判断を行なうには充分である (検層図7および8)。

検層図とサンプリングデータ (Al_2O_3 の平均含有量 46%) と比較すると、換算率 K, すなわち、線源 10^7 中性子/sec の場合、1% の Al_2O_3 に対するパルスカウントレートが得られる。

$q = (AK - GK) / GK$ という量の数値から、それぞれの検層法での有効シグナルノイズ比を知ることができる。このデータは下表に示され、ポーキサイト鉍床での孔井断面研究に、スペクトル連続 AK の応用の



1 2 3

1. 砂質粘土
2. Чеганские 粘土 (訳不明)
3. 硬質ポーキサイト
4. 化学分析データ
- 5, 6. 連続 GK および AK, 判別限界 0.83 MeV
- 7, 8. 連続 GK および AK, 記録エネルギー領域 0.84~1.37 MeV
- 9, 10. スポット GK および AK, 検出器 BC-9

第5図 ポーキサイト鉍床の一つの孔井における放射化検層図

妥当性を証明している。

AK の際のアルミニウムの放射性同位体 Al^{28} は、起こり得る2つの反応 $Al^{27}(n, \gamma)Al^{28}$ および $Si^{29}(n, p)Al^{28}$ の結果生ずる。最初の反応は熱中性子により、第二の反応は高速中性子により生じ、4.2 MeV に限界を持っている。ポーキサイト鉍床における Po-Be 線源を用いた AK の際の珪素から放射化される成分は理論的にも実験的にも評価されている [12, 13]。この場合、間隙水を含まない。珪素モジュラス $\frac{Al_2O_3}{SiO_2} > 2$ の hydrargillite ポーキサイトでは、珪

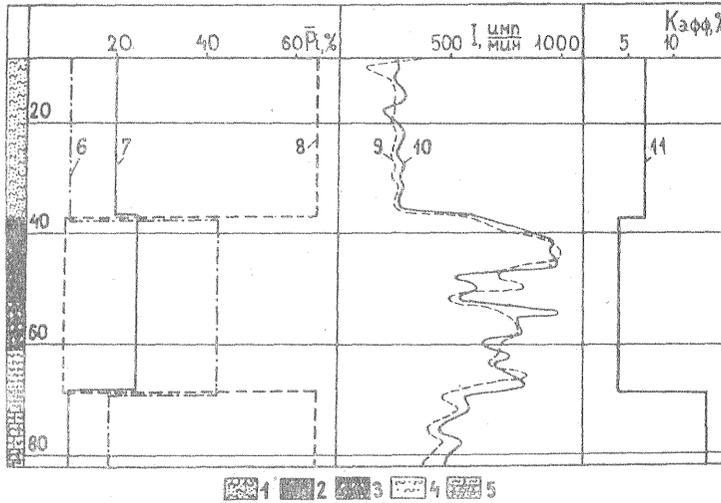
訳注 2) 直訳, 表土のことか?

	測定法	K	q
1	スポット検層	23.3	2.4
2	判別レベル 0.83 MeV におけるスペクトロメータを用いての積分測定	32.5	5.0
3	0.83~1.36 MeV の領域における微分測定	17.0	15.0

素の放射化の相対的な影響は10%以下である。

実際に珪素の放射化は、水素と全然衝突しない高速中性子によってのみ行なわれるので、割込み水はこの影響を低下させる。

第6図には Po-B および Po-Be



1. 砂質粘土 2. 硬質ポーキサイト 3. 脆弱ポーキサイト 4. ポーキサイト質粘土
5. マントル粘土 6. 平均アルミナ含有量 7. 鉱化帯の自然水分 8. 平均珪素含有量
9. AK 曲線, 線源-Po-B 10. AK 曲線, 線源-Po-Be 11. K 量の平均値-高速中性子による珪素放射化効果に関して

第6図 湖沼源のポーキサイト鉱床孔井断面に典型的なアルミナ含有鉱化層における高速中性子による放射化の影響の実験的測定結果

線源による AK 結果が示されている。

Po-B 線源は、4 MeV 以下のエネルギーの中性子をだし、珪素の放射化を引起こさない。したがってこの線源を使用した場合、平均化された二次ガンマ線の強さは次のように求められる。第6図では、これは珪素含有の増大に伴って大きくなる係数によって特徴づけられている。

$$K = \frac{J_{Po-Be} - J_{Po-B}}{J_{Po-Be}}$$

このように、アルミニウムと珪素間の関係について定性的知見を得る幾つかの可能性がある。しかしながら検層図における差異は僅かであり、かつ不明確でもあるので、このポーキサイト鉱床では珪素モジュラス K について定量的な断定を行なうことはできない。

§ 3. 銅鉱床におけるスポットスペクトル測定法による AK

銅鉱床における AK にも、ポーキサイト鉱床で使用したのと同じスペクトロメータが使用された。第7図には、黄銅鉱を含む石英-緑泥石-絹雲母化帯における誘導ガンマ線強度のスペクトル構成研究結果が示されている。放射化された孔井部分における銅の平均含有量は~1.5%、マンガンは 0.1%、珪素は~10% である。出力 1.5×10^7 中性子/sec の Po-Be 線源を用い、放射化時間は 10 分であり、またスペクトルの記録巾は 200 MeV である。

それぞれの系統で、時間によるスペクトルの変化が記録された。続いてグラフで、 Al^{23} 、 Cu^{66} および Mn^{56} に属するそれぞれの組成部分が、半減期で分離された。第7図のカーブは放射化停止直後にとられた。この3つの元素の放射線を分離するためには、エネルギー軸上の

チャンネル端の位置を、0.69, 1.02 および 1.36 MeV にとることが便利である。これらの位置のうち、初めの2つの最初の強度比、 $Mn^{56} : Cu^{66} : Al^{28}$ は、それぞれ、1:7.5:12.5 および 1:2.3:5.5 である。

放射化された石英-緑泥石-絹雲母化帯のガンマススペクトル全体の時間による変化は第8図に示される。アルミニウムのより速い壊変を考慮し、放射化の時間と、測定開始までの時間とを変化させながら、銅含有量測定の精度を高めること。もし混入元素の量が少なくなれば、測定はより簡単になる。例えば、塊状黄鉄鉱にはアルミニウムはないが、高速中性子による鉄の放射化によって、マンガンのある程度の影響はあるだろう。

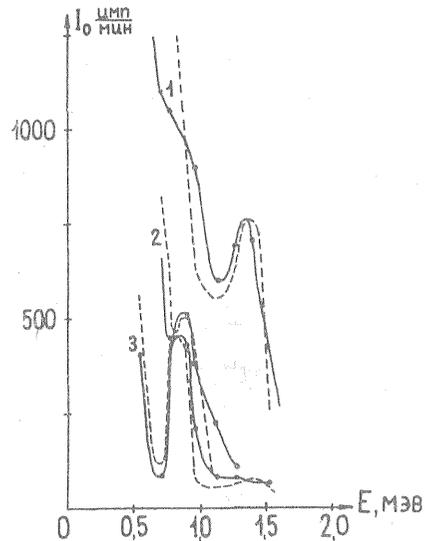
第9図では、AK 結果が鉱染タイプの鉱化作用を有する銅接触交代鉱床における一つの孔井のサンプリングデータと比較されている。

AK では出力 1.5×10^7 中性子/sec の Po-Be 中性子線源が使用された。誘導ガンマ線の強度測定は、0.96~1.27 MeV のエネルギー領域で行なわれた。これで Mn^{56} および Al^{28} のガンマ線強度を著しく弱めることができたが、 Cu^{66} のガンマ線記録には最良の条件とはいえない。AK 速度は放射化点で20分である。AK の結果明らかになった孔井断面における鉱化帯の状態は、ボーリングデータとは若干異なっており、電気検層データによって完全に確認された。所定の鉱化作用領域についてのサンプリングと AK データの比較によって、 10^7 中性子/sec の線源を用いた飽和放射化の際の換算率、銅 1% に対し、440 cpm が得られる。

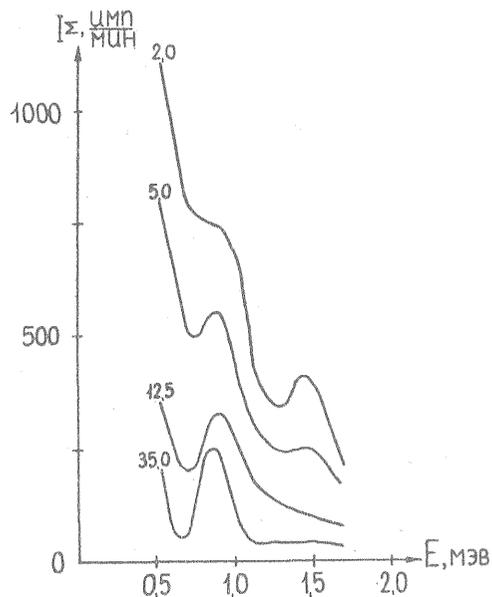
現在、スペクトル測定による AK のために、マルチチャンネルスペクトロメータが使用され始めた。

§ 4. 炭田における放射能検層

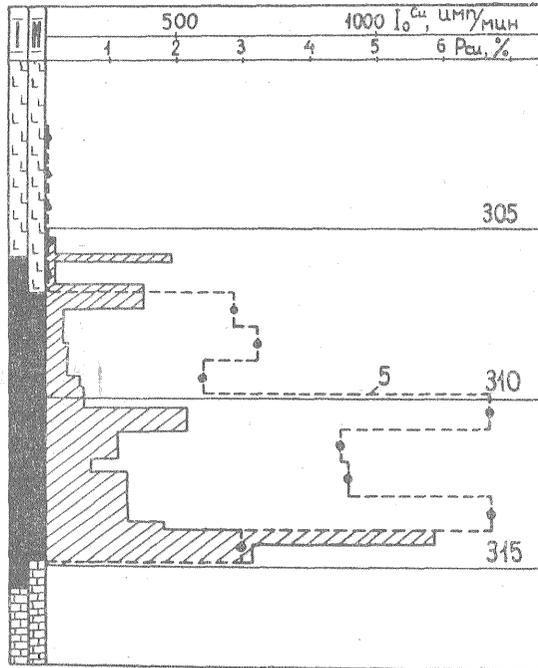
数多くの検層法のなかで、孔井中における褐炭と石炭層の検出のもっとも信頼度の高い方法は、連続ガンマ-ガンマ検層である (ΓΓK) [14, 15]。線源、検出部を有するプローブを使用することによって、空洞からのノイズを少なくでき、またガンマ-ガンマ検層の選択方式を用いることで、さらに明確な炭層の区別が得られ、石炭の灰分測定に見通しを開いている。原則として、すでに明らかにされているように [16, 17]、炭層は大型プローブを用いた ΓΓK 検層図



第7図 黄鉄鉱を含む石英-緑泥石-絹雲母化帯の放射化過程で形成されるガンマ線 Al^{28} (1), Cu^{66} (2) および Mn^{56} (3) のスペクトル
銅スカルン鉱床 点線曲線—計算 実線曲線—実験



第8図 黄鉄鉱を含む石英-緑泥石-絹雲母化帯における誘導ガンマ線強度のスペクトル構成。曲線上の数字は照射時より測定開始までの時間



LL 1 ■ 2 ▨ 3 ▩ 4 -○- 5

- I. ボーリングデータによる断面
1. 輝緑岩, 2. 鉱床, 3. 石灰岩
- II. 検層データによる断面 (KC, GK, AK)
4. 化学試験データ, 5. AK 曲線

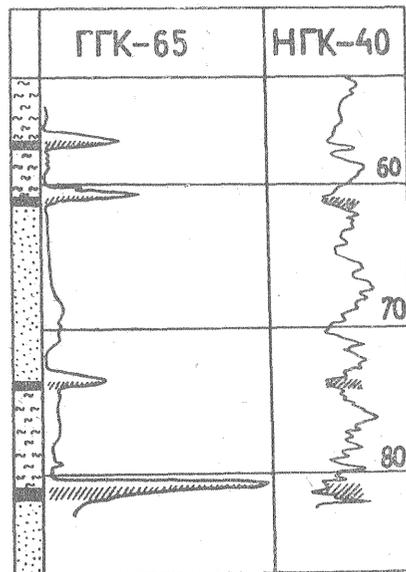
第 9 図 銅鉛床のスペクトル測定 AK 結果

では、極小として検出される。だが記録される HGK 異常の振幅は、20~30% を越えず、したがってこの方法は、正異常を数百%のオーダーで記録し、またより明確に複雑な炭層の区別を記録する ΓGK に対抗することはできない [18]。それでも異常がとらえられる限りで、炭田における HGK 応用の試みはこんにちでもなお続けられている [19]。(〔7〕の S. Pleva の論文参照)。

これに関連して、もう一度 ΓGK 法の高い性能と、炭田探査の際に、それを検層手段の一つに含めることの合目的性に注目する必要がある。

第 10 図には、東部ウラル褐炭田の孔井の一つで行なわれた典型的な ΓGK と HGK の検層図の比較が示されている。

この炭田で行なわれた電気検層法では、孔井断面はほとんど区別されていない。任意のプローブを用いた HGK ではあまり明確な結果は得られず、連続 ΓGK が明確に炭層を分離している。



褐炭田, 1. 砂, 2. 粘土, 3. 石炭

第 10 図 ΓGK と HGK の検層図

§ 6. 選択ガンマ-ガンマ検層異常のスペクトル測定による分級

ガンマ-ガンマ検層法は（ΓΓK）、孔井中にあるガンマ線源の、鉱床による散乱放射線を測定する方法である。ΓΓK 検層法はこゝに著しい発展をみている。これには、重元素鉱床で、選択 ΓΓK データの定量的知見を経験的に基礎づけること（放電計数管による散乱放射線強さの積分記録）、また同様に、検層シンチレーションガンマスペクトロメータを用いて異常の性質を測定することも含まれる。

ガンマ量子の拡散としての散乱放射線分布についての記述 [20, 21] から、実験的に充分証明された [22, 23] 散乱放射線強度の式（ガンマ量子流れの比例密度）が得られる。

$$J = \frac{A}{r} \rho \exp(-k\rho r) \quad (6.1)$$

ここで、 k は質量吸収係数

ρ は鉱化層密度

r はプローブ長さ

もし質量吸収係数が一定なら、(6.1) から密度による断面の区別が得られる。この場合の連続 ΓΓK は、まだ光電吸収で減衰していないガンマ量子の流れを記録する際に実際に実現される。このためには、検出器の軟放射線（エネルギー 0.1~0.2 MeV 以下）に対し低感度をもっていなければならないが、 Co^{60} タイプの線源は比較的硬い放射線をだす。地質条件としては、孔井中に重元素の集中がないことである。

選択 ΓΓK は逆の場合であり、 Se^{75} タイプの放射線源を用いる際に、検出器は、量子分布が本質的に重元素 p に左右される散乱放射線スペクトルの軟部分に対して高感度をもたねばならない。この場合吸収係数は、 p の関数になる。濃度が小さい場合は（1ケタ%のオーダー）一次関数に限定して分解することができる。

$$k(p) = k(0) + \alpha p \quad (6.2)$$

ここで、 $k(0)$ は母岩である。

密度が一定の場合、(6.1) から、

$$\ln \frac{J_0}{J} = \alpha \rho r p = \beta p, \quad (6.3)$$

が得られる。ここで、

J_0 は母岩中の強度

J は鉱化帯における異常の強度

(6.3) の関係は、放電計数管をもつ測定器による散乱放射線の積分記録の際の、CGTK データの定性的解釈の基礎となった [24]。

原子番号とともに急速に増大する光量子吸収によって決定される CGTK 異常の大きさにより、元素は3つのグループに分けられた。

1. 原子番号 $Z \sim 80$ （モリブデン、水銀鉛、ビスマス）の重元素。
2. $Z \sim 50$ （錫、アンチモン、バリウム）の中程度の重元素。
3. $Z \sim 30$ （クロム、マンガン、鉄、ニッケル、亜鉛）の比較的重い元素。

第一グループの元素は、0.2% オーダーのもっとも低い濃度のときに孔井断面で CGTK により分離される。経験的なデータから、3つのグループの元素の当量の、すなわち同一異常を生ぜしめる濃度比は 1:2:12 である。

孔井断面の一定の密度および鉱物元素の比較的均一な分布は解釈の信頼度を高める。地質学的にこれは第1および第2グループの金属鉱床で起こり得る。連続および選択効果の組合せは第3グループ（鉄、マンガン、クロム）のいくつかの金属鉱床にとって特徴的である。

下記の表で、[24] に関して、地質サンプリングデータと CGTK 結果とが比較されている。研究は CGTK 応用のための同一前提をもつ第1および第2グループの金属鉱床で行なわれた。

測定法	鉍化帯の総体厚さ (m)	平均含有量 (%)
地質サンプリング	373.1	2.32
CGTK 結果	438.5	2.14

金属含有量は、鉛の当量 % で得られた。

CGTK 検層図では、含有量は若干少ないが、サンプリングで見過された鉍化帯が検出されていて、鉍化帯全体の厚さと、全埋蔵鉍量が大きくなっている。

いくつかの鉍化帯について、コアの検査サンプリングを行なった結果、CGTK と地質サンプリングとの相関関係は、第 1 と第 2 サンプリングの間のそれと同一オーダーであることが明らかにされた。

情報の本質的な増大は、散乱放射線のスペクトル測定法によって得ることができるが、まず問題は、選択 GTK の異常を生み出す元素の同定にある。

重元素の混入は、母岩-鉍化層形成元素に相応するスペクトル分布を変化させる。光電吸収はおもに重元素の K-電子殻で生ずる。したがって測定スペクトルにおいては、K-電子結合エネルギーの軟放射線側から制約された極小が現われる (鉛については 88 KeV, バリウムでは 37 KeV)。この極小のエネルギーポジション, より正確には、K-吸収端は元素性質の判定にも役立つ。

均一に分布した重元素の混入したモデルで行なった実験では、その可能性が確認された [25]。だがこの方法を鉍床で利用することには、現実には鉍床作用が不均一であるため大きな疑問がある。

重元素鉍床で、特殊孔井用 30 チャンネルガンマスペクトロメータを用いて行なわれた研究では、CGTK 異常の分級にこの方法が有効であることが証明された [26]。

うまく行なうためには、測定器は様々なノイズに対して高い感度をもたねばならず、またとくにパルス波高分析器は孔井プローブに装着された。地上への信号送達には、200 kc でパルス波高に比例する変調周波数をもつ周波数変調の形で行なわれた。これにより、三芯ケーブル特性に関係する歪みが取除かれた。孔井および孔井壁空洞の影響は、プローブの線源、検出器の特殊な構造で著しく少なくなった。

第 1 グループの重元素によって生ずる K-吸収領域は鮮明にスペクトル検層図に分離され、このようにして CGTK 異常を、第 2, 第 3 グループの高濃度の元素によって生じた異常のなかで、第 1 グループの金属をもつ鉍床を分離しつつ、スペクトル測定によって分級することができる。実際にこのような分離は、K-吸収端のおおの側におかれたスペクトロメータの 2 つのチャンネルで得られたスペクトル比の図を描いて行なわれる。

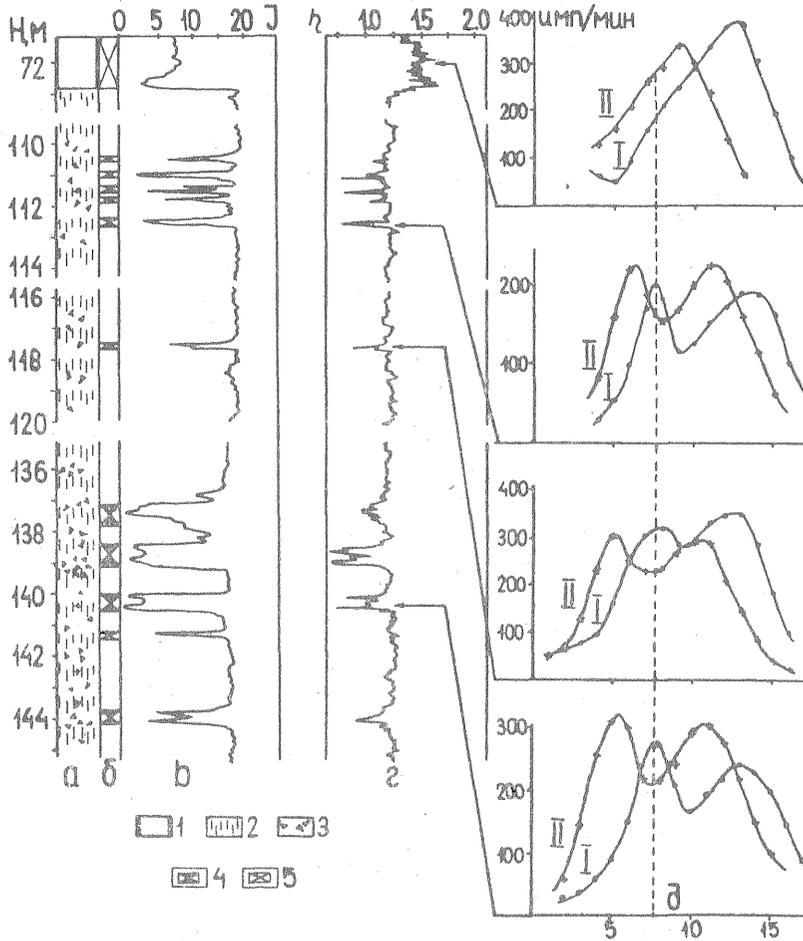
生産用として、積分強度とスペクトル比を同時に記録する 2 系統のガンマスペクトロメータが開発された (V. I. Utkin, U. B. Burdin, ソ連邦科学アカデミーウラル支部, 1961 年)。

スペクトロメータの特徴は、判別電流が変化した時、同時にエネルギーチャンネルを移動できるように、エネルギーレベルが結合してあることである。

もし第 1 系統でスペクトル強さ J_1 が、 E から $E+\Delta E$ までのエネルギー領域に相応しているとするれば、第 2 系統 J_2 では、 $E+\varepsilon$ から $E+\varepsilon+\Delta E$ までの領域になる (ΔE -チャンネル幅, ε -チャンネル間距離)。

スペクトル比カーブ $\eta = \frac{J_2}{J_1}$ 記録の際、一つの系統は極大に、他は K-吸収端に近く極小に置かれる。

第 11 図には、V. I. Utkin および U. B. Burdin により、2 系統スペクトロメータを用いて鉛鉍床の一つで得られたデータが示されている。積分強度の検層図には、鉛鉍化作用から、バリウム高濃度から、また孔井ロケーシングパイプからの異常が分離されている。スペクト



第 11 図 鉛鉱化作用帯域のガンマスペクトル測定による検層結果
 a. 地質柱状図 b. 検層データ検討結果 c. 選択検層図 d. スペクトル比検層図
 e. 散乱ガンマ線のスペクトル測定図
 I. 第 1 系統測定 II. 同じく第 2 系統
 1. ケーシングパイプ 2. 石英斑岩 3. 鉛鉱部および方鉛鉱岩枝 4. 検層データ
 による鉛鉱化作用帯域 5. 検層データによる 2 および 3 グループ元素含有帯域

ル比検層図には極小値 η で鉛異常が分離されている。第 11 図にはそれぞれの系統で得られたスペクトル検層図が示され、点線で、スペクトル比が記録されたときの判別電流が示されている。

散乱放射線のスペクトル測定は、新しい可能性を開き、地質学上の情報量を増大させている。とくに重元素濃度をスペクトル比で定量的に測定する可能性について大きな期待がもたれている。

文 献

1. БУЛАШЕВИЧ Ю. П., ВОСКОВОЙНИКОВ Г. М., МУЗЮКИН Л. В.: Каротах на рудных и угольных месторождениях с применением источников гамма-лучей и нейтронов. Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве СССР, т. 1 у. Поиски, разведка и разработка полезных ископаемых. Гостоптехиздат, М., 1961 г.

2. БУЛАШЕВИЧ Ю. П., ВОСКОБОЙНИКОВ Г. М., МУЗЮКИН Л. В.: Ядерная геофизика при разведке рудных и угольных месторождений. Труды конференции по использованию радиоизотопов в физических науках и промышленности/г. Копенгаген, 1960/, МАГАТ, Вена, 1961 г.
3. БУЛАШЕВИЧ Ю. П., ШУЛЯТЬЕВ С. А.: Оптимальные условия непрерывного активационного каротажа, Изв. АН СССР, серия геофизическая, 2, 1960.
4. БУЛАШЕВИЧ Ю. П., СЕНЬКО-БУЛАТНЫЙ И. Н.: Экспериментальная проверка условий оптимальности непрерывного активационного каротажа, Изв. АН СССР, серия геофизическая, 4, 1961.
5. ШИМЕЛЕВИЧ Ю. С.: Методика активационного анализа горных пород в скважинных условиях. Разведка и разработка полезных ископаемых, Гостоптехиздат, М., 1958.
6. Ядерная геофизика/сборник статей/, Гостоптехиздат, М., 1959.
7. Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых, Гостоптехиздат, М., 1960.
8. ВОЗЖЕННИКОВ Г. С., МУЗЮКИН Л. В., РОВИНСКИЙ М. С.: Некоторые результаты по методу наведенной активности, Уральское геологическое управление, Информационный бюллетень №. 5-6, 1958.
9. БУЛАШЕВИЧ Ю. П., СЕНЬКО-БУЛАТНЫЙ И. Н.: Спектрометрический активационный каротаж, Изв. АН СССР, серия геофизическая, 9, 1962.
10. СЕНЬКО-БУЛАТНЫЙ И. Н.: Нейтрометрия скважин на месторождениях марганца и бокситов, Изв. АН СССР, серия геофизическая, 3, 1959.
11. ДЕЕВ Л. Л., СЕНЬКО-БУЛАТНЫЙ И. Н.: Одноканальный дифференциальный гаммаспектрометр на трехжильном кабеле. Труды Института геофизики УФАН СССР, Геофизич. сб. №. 3, Свердловск, 1962.
12. БЕЛЫХ В. А., СЕНЬКО-БУЛАТНЫЙ И. Н., ШУЛЯТЬЕВ С. А., ЯКУБ Л. И.: О влиянии активации кремния быстрыми нейтронами при активационном каротаже на месторождениях бокситов, Изв. АН СССР, серия геофизическая, 4, 1961.
13. ЛЕЙПУНСКАЯ Д. И., ГАУЭР З. С., ФЛЕРОВ Г. Н.: Нейтронный активационный анализ образцов горных пород и рудных концентратов, Атомная энергия, вып. 3, 1959.
14. ВОСКОБОЙНИКОВ Г. М., ДЕЕВ Л. Л.: Плотностной каротаж углеразведочных скважин. Разведка и охрана недр, 10, 1956.
15. БУЛАШЕВИЧ Ю. П., ВОСКОБОЙНИКОВ Г. М.: Гамма-гамма каротаж на угольных месторождениях Урала и возможность бескернового бурения части разведочных скважин, Изв. АН СССР, серия геофизическая, 1, 1957.
16. БУЛАШЕВИЧ Ю. П.: Теория нейтронного каротажа в применении к разведке нефтяных и угольных месторождений. Изв. АН СССР, серия геофизическая, 2, 1948.
17. БУЛАШЕВИЧ Ю. П.: К теории нейтронного каротажа, Изв. АН СССР, серия геофизическая, 3, 1951.
18. БУЛАШЕВИЧ Ю. П., ДИДЕНКО Е. П., СЕНЬКО-БУЛАТНЫЙ И. П., ФИСЕНКО А. П.: Радиоактивный каротаж на угольных месторождениях, Разведка и разработка полезных ископаемых, Гостоптехиздат, М., 1958.
19. МАКАРОВ А. Н.: О применении нейтронного-гамма-каротажа на угольных месторождениях, Ученые записи Ленинградского университета, серия физич. и

- геологич. наук, вып. П, 1959.
20. ДЯДЬКИН И. Г.: К теории гамма-гамма каротажа буровых скважин, Изв. АН СССР, серия геофизич., 4, 1955.
 21. ВОСКОВОЙНИКОВ Г. М.: Теоретические основы селективного гамма-гамма каротажа, Изв. АН СССР, серия геофизич., 3, 1957.
 22. ВОСКОВОЙНИКОВ Г. М.: Некоторые результаты экспериментальной проверки возможности практического применения селективного каротажа, Атомная энергия, т. 4, вып. 4, 1958.
 23. ВОСКОВОЙНИКОВ Г. М.: К вопросу о точности и границах применимости диффузионного приближения решения задач о распространении гамма-лучей, ЖТФ, т. XXX, вып. 1, 1960.
 24. ВОСКОВОЙНИКОВ Г. М., БУЛАШОВ В. Н., ГЛАВЧЕВ П. А.: К вопросу о количественных определениях содержания тяжелых металлов в руде по данным селективного каротажа. Труды Института геофизики УФАН СССР, Геофизич. сб. No. 3, Свердловск, 1962.
 25. СОКОЛОВ М. М., ОЧКУР А. П., ФЕДОРОВ А. А., КАРАБАНОВ Н. И.: Фотоэлектрическое поглощение рассеянного гамма-излучения, Атомная энергия, вып. 3, 1958.
 26. ВОСКОВОЙНИКОВ Г. М., УТКИН В. И., БУРДИН Ю. Б.: Спектральные методы определения природы аномалий селективного каротажа Изв. АН СССР, серия геофизич., 8, 1961.