

資 料

550.495 : 550.835 : 539.128.4

鉱床現場における元素定量に関する γ -線 エネルギー分析の若干の問題*

M. M. Sokolov & A. A. Fedorov

鹿島光雄訳

概 要

孔井を掘って鉱石中の元素および鉱体の各種データの定量測定（また検層に関する各種のデータをとるため）に γ -線スペクトル測定法は多くの利点をもっている。このためには、高度な要求を満たすための精密な装置（機器）が必要である。多くの方法では、いくつかのデータの同時記録をどうしても行なわなければならない。これらの要求をもつとも良く満たすものは、数個の記録系統をもつシンチレーションスペクトロメーターである。

こゝにちいくつかのスペクトル測定法が発展している。すなわち、 γ - γ 法、スペクトル測定 γ 検層、中性子の捕獲の際の γ 線スペクトル測定法、放射化法その他である。

これらの方法は広く応用され、孔井中のいくつかの元素および各種データの定量測定のために利用されている。例えば、鉛・水銀・雲母・錫・鉄・カリウム・ウラン・トリウム・マンガーン・銅・ニッケル・アルミニウム・その他の各種データ：鉱物の有効原子番号、密度、石炭の灰分、鉱体の成層元素、地崩れ地帯等についてである。

地球核物理学および一般的な地球物理学的方法を用いた孔井の総合的研究はコアないしボーリングの適用を可能にし、また孔井の相関関係はボーリングのための作業量を軽減している。報告の基礎的データはグラフおよび図表に示される。

序 論

地質調査に γ -スペクトル測定法を応用することは、地球物理学的方法の今後の発展にとつて望ましい方向である。地球核物理学の γ -スペクトル測定法は2つの方向に発展している。すなわち研究室的方向としては、サンプルの分析、現場での実際的な方向としては、自然的条件にある鉱物および鉱石のいくつかの元素および各種データ測定である。

ここでは実際的な（鉱床における） γ -スペクトル測定法のみを検討しよう。

こゝにち次のような方法が広く用いられている。

- (1) 孔井、発破孔および地表面のウラン・トリウム・カリウムの分離測定のための γ -スペクトル法。
- (2) 鉱石中の重い元素同定のための鉱体の有効原子番号と密度の測定のための γ - γ スペクトル法。
- (3) 鉱体および鉱石を形成する元素による中性子捕獲の γ -線スペクトル法。
- (4) 鉱石 (Al, Mn, Cu その他) 中のいくつかの元素の定量測定のための放射化法。

いまのところ、唯一の可能な野外用の γ -スペクトロメーターは、シンチレーションスペク

M. M. Sokolov, A. A. Fedorov : Некоторые вопросы спектрометрии гамма-излучения для количественных определений элементов "IN SITU", Ядерная Геофизика, Труды Конференции Ядерных Геофизиков, 24-30, Сентябрь, 1962, Краков, Польша

鉱床現場における元素定量に関する γ 線エネルギー分析の若干の問題 (鹿島光雄訳)

トロメーターであり、これはより完全な形で現在の要求に応えることができる。

得られた拡大スペクトルは、対応するモデルから得られた同様なスペクトルと対比して解釈される。これはもつとも簡単な方法の一つである。

最初の3つのスペクトル測定法のいくつかの可能性およびシンチレーションスペクトロメーターの最適データの選択を検討しよう。

I. 天然鉱体におけるウラン・トリウムおよびカリウムの分離測定

文献(1~6)では γ 線スペクトルの分析および鉱石中におけるウラン・トリウムの分離測定のための、また鉱体中におけるウラン・トリウム・カリウムの分離測定のための測定最適条件選択に関する問題が述べられている。

本報告では、発表された研究のなかでは充分解明されていない問題が検討される。

実験の基礎には γ 線スペクトルの測定にとつてもつとも有利な部分がとりだされ、また測定器のエネルギー分解能、安定度、シンチレーターのサイズその他の要因の分離測定の精度に対する影響が考慮された。

自然条件におけるウラン・トリウム・カリウムの定量測定 γ 線スペクトル法の基礎としてウラン・トリウム系列および K^{40} の γ 線の各種スペクトルがある。

ウラン系列における基礎的な γ 線は RaB および RaC, トリウム系列では $MsTh_2$, RdTh, ThB, ThC' および ThC'' である。

周知のようにウランとトリウム自身の放射線は α -線であり、それゆえ、ここではトリウムの分離測定法は間接的方法である。ウランの真の測定のためにはウランとラジウム間の放射平衡のずれを訂正する必要がある。一般に自然物のなかに存在するトリウム系列の核種の間では放射平衡は破られないことが認められている。しかしこのことは、常にそうである訳ではない。

第1表にはもつとも強いウラン・トリウム系列の γ 線が示されている(7, 8)。

K^{40} の崩壊に対して $E\gamma=1.47$ MeV をもつ単一 γ 線がある。 K^{40} の半減期は 1.3×10^{10} 年であり、カリウムアイソトープ混合物におけるその含有率は 0.012% である。

γ 線でウラン・トリウム・カリウムの定量分析の可能性についての研究は、平衡状態にあるウラン・トリウム鉱およびカリ塩の層を模倣したモデルで行なわれた。モデルのサイズは $70 \times 70 \times 50$ cm, 混入鉱物の物質組成の、分離測定精度に与える影響を評価する際、有効原子番号を変化させる不純物として鉛塩および水銀塩を使用した。

第1表 ウラン・トリウム系列のおもなガンマ線

ウ ラ ン 系 列			ト リ ウ ム 系 列		
MeV	100 崩 壊 に 対 する 量 子 数	核 種	MeV	100 崩 壊 に 対 する 量 子 数	核 種
0.241	11.5	RaB	0.184	1.0	$MsTh_2$
0.294	25.8	RaB	0.238	40.0	ThB
0.350	45.0	RaB	0.582	31.0	ThC''
0.607	70.0	RaC	0.726	7.1	ThC'
1.12	20.9	RaC	0.859	5.3	ThC''
1.76	23.0	RaC	0.907	24.0	$MsTh_2$
2.20	6.2	RaC	0.964	13.3	$MsTh_2$
			1.587	12.0	$MsTh_2$
			2.620	35.0	ThC''

γ 線スペクトル測定は、シングルチャンネル型の半自動シンチレーション γ 線スペクトロメーター AN-5 およびポータブルタイプ野外用スペクトロメーターを使用して行なわれた。シンチレーターとしては NaI (Tl) を用いた。

スペクトロメーターには光電増倍管 Φay-13 が使用された。デスクリミネーターのチャンネル幅に微分スペクトル測定の場合 40 KeV にとられた。測定中の計器不安定度は 0.7% より悪くはない。一回の測定の平均二乗誤差は、スペクトルの初めでは 1%，最後では 3% 以下である。

分離測定のために選択されたスペクトルのチャンネル位置で、測定は数回繰返された。

ウランおよびトリウムの分離測定

分離測定の 2 つの場合を検討してみよう。第 1 の場合はウランおよびトリウムの品位は 0.07% 以上あり、第 2 の場合は 0.01% 以下である。

第 1 の場合はカリウムの γ 線の影響は無視できる。第 2 の場合、カリウムの影響は決定的な役割をもっている。

第 1 の場合、分離測定の課題は、2 つの等式を解くことに帰する。

$$\begin{aligned} a_1 n_1 + b_1 n_2 &= N_1 \\ a_2 n_1 + b_2 n_2 &= N_2 \end{aligned} \quad (1)$$

a と b は、単位濃度のウランとトリウム標準 (モデル) からのエネルギーの選択された一定のチャンネル位置におけるカウント数。

n_1 と n_2 はウランとトリウムの求められる品位。

N_1 と N_2 はウランとトリウムの品位が不明の鉱石からのエネルギーの一定の選択されたチャンネル位置におけるカウント数。

(1) 式から n_1 と n_2 に関して次式が得られる。

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{b_2 N_1 - b_1 N_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} = A_1 N_1 + A_2 N_2 \\ n_2 &= \frac{a_1 N_2 - a_2 N_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} = A_2 N_2 + B_2 N_1 \end{aligned} \quad (2)$$

a, b, A, B の係数は、ウランおよびトリウムの品位の明らかなモデルで測定器を標準化する際に必要な精度に決められる。

ウランの品位測定における相対二乗誤差は次式で表わされる。

$$\frac{\Delta n_1}{n_1} = \frac{\sqrt{b_2^2 (a_1 + P b_1) + b_1^2 (a_2 + P b_2)}}{\sqrt{n_1 t (a_1 b_2 - a_2 b_1)}}$$

$$P \equiv \frac{n_2}{n_1} \quad : \quad \text{測定された品位比}$$

$$t \quad : \quad \text{測定時間}$$

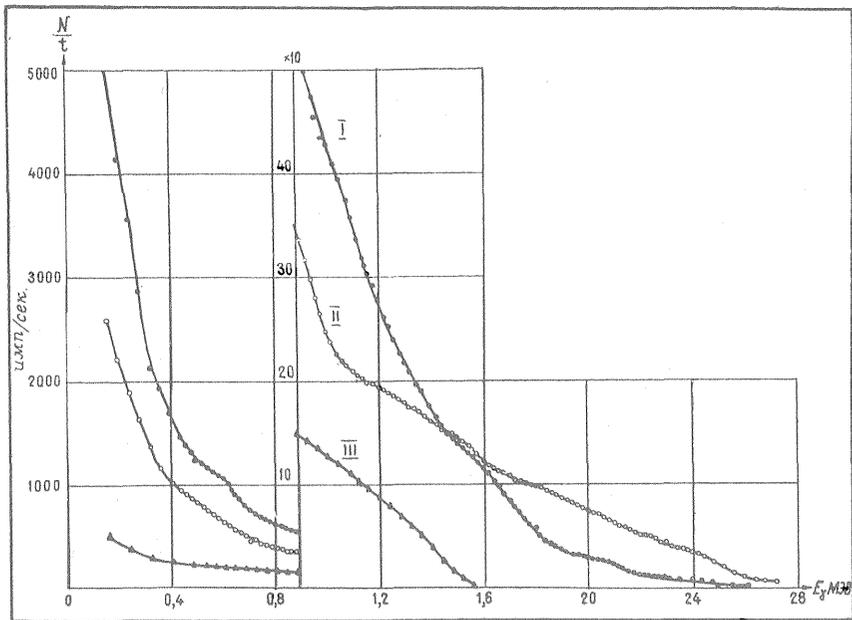
式がひとつの解をもつためには、 $a_1 b_2 \neq a_2 b_1$ の条件を満たすことが必要である。すなわち、第 1 の等式は他式の結果 (帰結) であってはならない。このほかに分離の精度を示している。

等式 (1) の安定度は値 $\frac{b_1/a_1}{b_2/a_2}$ (スペクトルの 2 つの領域におけるトリウムのウラン等量比) がより大きく 1 から離れた数であればよい。

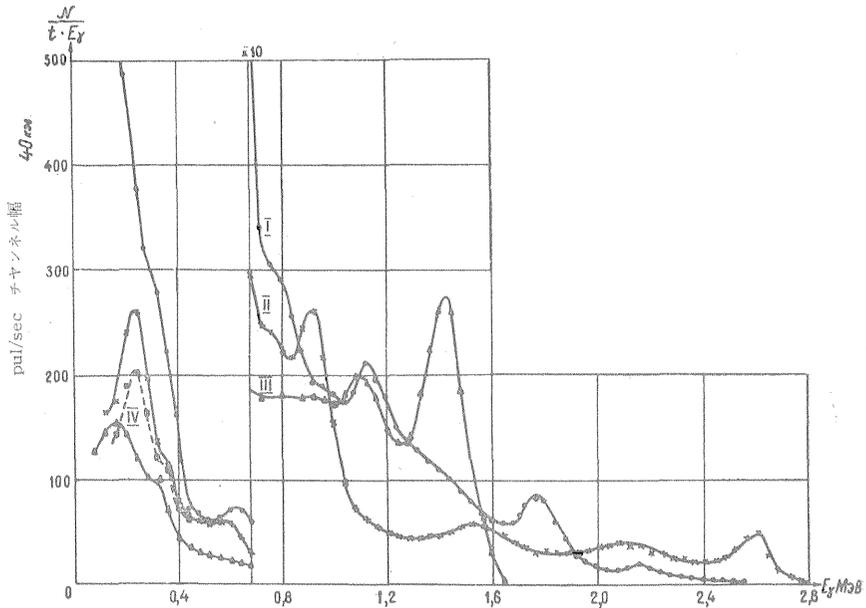
この条件はウランおよびトリウム系列の γ 線密度 (強さ) の差がもつとも大きいような 2 つのスペクトル領域を選ぶときにもつともよく満たされる。

第 1 図および第 2 図では平均濃度 0.1% とみられるウラン・トリウム鉱および 100% のカリウムの微分および積分ガンマ線スペクトルが示されている。測定は径 70 mm, Cs-137 ガンマ線について、13.5% の分解能をもつ結晶 NaI (Tl) を用いて行なわれた。

ウラン鉱の微分 γ 線スペクトルでは 0.609 MeV, 12 MeV, 1.76 MeV, 2.2 MeV のガンマ線が分離されている。



第1図 平均したウラン (I), トリウム (II) 釷およびカリウム (III) の γ -線微分スペクトル。スペクトルはウランおよびトリウムの濃度 0.1%, カリウム 100% から得られたもの。NaI (TI), 径 70 mm



第2図 平均したウラン (I), トリウム (II) 釷およびカリウム (III) の γ -線微分スペクトル。スペクトルはウラン、トリウムの濃度 0.1% およびカリウム 100% から得られたもの。結晶 NaI (TI), 径 70mm。チャンネル幅 $\Delta = 40\text{KeV}$, (IV) 0.1% のウラン, 2% の鉛を含むウラン釷のスペクトル。

トリウム鉱の微分ガンマ線スペクトルには 0.238 MeV, 0.582 MeV, 0.907 MeV, 1.56 MeV および 2.62 MeV が分離されている。結晶の分解能が 13.5% の場合、 γ 線スペクトルは、トリウム鉱では 2.7 MeV, ウラン鉱では 2.5 MeV, またカリウム鉱では 1.6 MeV のエネルギーで實際上終つている。ウランとトリウムの濃度が同じで 70 mm の結晶を用いた場合、ウラン・トリウム鉱の γ 線の積分スペクトルとは約 1.45 MeV のエネルギー領域で交差している。したがつて、1.45 MeV に相当する選別レベルの場合、カウント数はウランとトリウムの濃度の比には関係なく、総合的な濃度の値としてのみ決定される。

ウランとトリウムの分離定量測定は微分選別と同様、積分選別を用いて行なうことができる。

積分選別の場合 (第1図, 第2表) 等式 (1) の安定度の観点から良好な選別閾値は 1.0~1.3 MeV (トリウムのウラン当量 0.6) および 1.8~2.0 MeV (トリウムのウラン当量 1.6~2.7) の範囲にある二組の閾値である。

しかし測定器の不安定性を考慮して、閾値 $E_{\gamma_1} = 1.2$ MeV および $E_{\gamma_2} = 2.0$ MeV を選択

第2表 ウラン・トリウム・カリウム鉱に対する
積分微分選別の際のカウント数

選別レベル MeV		カウ ン ト 数 Pulse/sec			トリウムの ウラン当量
		ウ ラ ン 鉱	ト リ ウ ム 鉱	カ リ ウ ム	
下	上	(0.1%)	(0.1%)	(100%)	
1	2	3	4	5	6
0.05	—	6000	2900	550	0.48
0.5	—	1250	830	220	0.66
0.6	—	1070	650	210	0.61
0.7	—	750	480	190	0.64
0.8	—	620	400	170	0.65
0.9	—	510	335	145	0.66
1.0	—	425	246	127	0.58
1.1	—	355	208	105	0.59
1.2	—	274	192	87	0.70
1.3	—	214	177	65	0.83
1.4	—	172	160	40	0.93
1.5	—	138	144	12	1.04
1.6	—	113	122	—	1.08
1.7	—	63	105	—	1.67
1.8	—	53	96	—	1.80
1.9	—	35	85	—	2.40
2.0	—	27	73	—	2.70
2.5	—	2	20	—	10
2.7	—	—	3	—	—
0.5	0.8	630	430	50	0.68
1.0	1.6	312	124	127	0.40
1.0	1.9	390	161	127	0.41
1.1	1.3	141	31	40	0.22
1.2	1.6	161	70	87	0.44
1.3	1.5	76	33	53	0.44
1.9	2.7	35	82	—	2.35
2.0	2.7	27	70	—	2.60

すべきである。なぜならここではカウント数の変化 $dN/dE\gamma$ (あるいは積分スペクトルグラフの勾配) は他の選別閾値および選択されたインターバルより若干小さく、閾値の変化には関係ないからである。

上記の二組の選別閾値は唯一のものではない。結晶の大きさに応じて他の選別閾値を選択することもできる。例えば $E\gamma = 0.6 \text{ MeV}$ および $E\gamma_2 = 1.8 \sim 2.0 \text{ MeV}$ の分離のためには $0.5 \text{ MeV} \sim 1.2 \text{ MeV}$ の範囲からウランの選別閾値の任意の二組を選択するのがよい。というのはこの場合、(1) の等式は互いに差が小さく ($a_1 b_2 \approx a_2 b_1$) そして測定誤差は非常に大きくなる可能性があるからである。

閾値のひとつとして積分カウントを用いる場合、混入鉱物の物質組成や密度の相違からウランとトリウムの濃度測定において大きな誤差が生ずることがある。

分離測定の際、微分選別を使用することでよい結果が得られる。なぜならこの場合、両方の等式とつてトリウムのウラン当量の比は積分選別の場合よりもよく選択され(第2表) また実際に宇宙線のバックグラウンドはない。

ウランとトリウムの分離測定の精度の観点から γ -線スペクトルの最適領域は全分離係数 10 以上の $\Delta E\gamma_1 = 1.1 \sim 1.3 \text{ MeV}$ (トリウムのウラン当量 0.22) および $\Delta E\gamma_2 = 2.0 \sim 2.7 \text{ MeV}$ (トリウムのウラン当量 2.6) の範囲である。

上記エネルギーのインターバルでは積分選別の場合と同様、唯一のものではない。機器特性に応じて(結晶の径、また不安定度の大きさその他)、他のインターバルの二組を選択することがある。例えば $1.0 \sim 1.9 \text{ MeV}$ (トリウムのウラン当量 0.41) および $1.9 \sim 2.7 \text{ MeV}$ (トリウムのウラン当量 2.35) などである。

ウラン・トリウムおよびカリウムの分離測定

ウランおよびトリウムの濃度が小さい場合、分離測定の精度はカリウムの存在によつて影響される。この場合分離測定の問題は次の3つの等式を解くことにある。

$$\begin{aligned} a_1 n_1 + b_1 n_2 + c_1 n_3 &= N_1 \\ a_2 n_1 + b_2 n_2 + c_2 n_3 &= N_2 \\ a_3 n_1 + b_3 n_2 + c_3 n_3 &= N_3 \end{aligned} \quad (3)$$

a, b, c, n および N は等式(1)における場合と同一の値を表わす。ウラン濃度は次式から決定される ($c_3 = 0$ の場合)

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{-N_1 b_1 c_2 + N_2 b_3 c_1 + N_3 (b_1 c_2 - b_2 c_1)}{b_3 (a_2 c_1 - a_1 c_2) + a_3 (b_1 c_2 - c_1 b_2)} \\ &= A_1 N_1 + B_1 N_2 + C_1 N_3 \end{aligned} \quad (4)$$

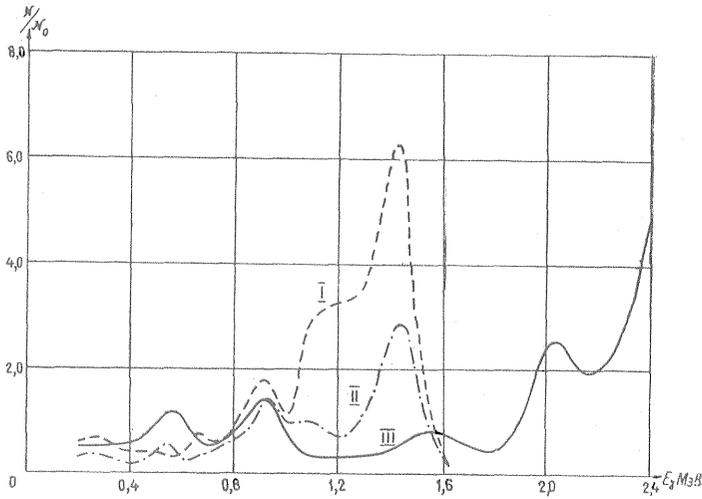
ここで、 A_1, B_1 , および C_1 の係数はウラン、トリウムおよびカリの濃度が既知のモデルで測定器を標準化するとき計算される。

クラークナンバーおよびそれ以下の濃度の場合のウラン・トリウム・カリウムを分離測定するためには、以下に述べるとおり容積の大きい結晶を用いる必要がある(径 70mm 以上)。

微分選別の場合、3つの γ 線スペクトルの領域を選択しなければならない。 γ 線スペクトル領域のひとつとして、カリウムの γ 線を無視できる場合の分離測定の際と同様、トリウムの大きなウラン当量およびカリウムの γ 線からの寄与の欠如によつて特徴づけられる範囲 $\Delta E\gamma_1 = 2.0 \sim 2.7 \text{ MeV}$ をとることができる。他の領域 $\Delta E\gamma_2 = 1.3 \sim 1.5 \text{ MeV}$ はウランおよびトリウムの最大のカリウム当量によつて特徴づけられている(第3図)。

この領域におけるカリウムの影響は他のスペクトル領域におけるよりも強く現われる。 γ 線スペクトルの第3の領域として、 $\Delta E\gamma_3 = 0.5 \text{ MeV} \sim 0.8 \text{ MeV}$ の範囲を選ぶことができる。この範囲は、トリウムの大きなウラン当量でも $\Delta E\gamma = 1.1 \text{ MeV} \sim 1.3 \text{ MeV}$ の範囲よりも大きなカウント数によつて特徴づけられている(第2表)。

濃度がクラークナンバーに近い場合のウラン・トリウム・カリウムの分離測定の可能性を示



第3図 1000倍に拡大されたトリウム(I)およびウラン(II)の微分カリウム当量および結晶径70mmについてのトリウム(III)の微分ウラン当量。

第3表 ウラン測定のための平均二乗誤差

ウラン 0.001%		ウラン 0.001%	
カリウム 1%		カリウム 0.001%	
Th/u	$\pm \frac{\Delta n_1}{n_1}, \%$	K/u 10^{-3}	$\pm \frac{\Delta n_1}{n_1}, \%$
10.0	54.2	10.0	23.2
5.0	39.6	5.0	22.1
1.0	21.1	1.0	21.1
0.5	17.5	0.5	21.0
0.1	14.0	0.1	21.0
0.0	13.0	0.0	20.9

すものとして、3つの範囲 $\Delta E\gamma = 2.0 \text{ MeV} \sim 2.7 \text{ MeV}$, $1.3 \sim 1.5 \text{ MeV}$ および $0.5 \sim 0.8 \text{ MeV}$ について、トリウムと異なつた相関関係 ($0 \sim 0.01\%$ および $0.1 \sim 10\%$) におけるウラン測定の平均二乗誤差の値が第3表にあげられている。

第3表のデータは径70mm, 高さ50mm, 分解能13.9%の結晶で得られた。

ウラン測定の相対的な平均二乗誤差は、本領域 $\Delta E\gamma: 1.1 \sim 1.3 \text{ MeV}$, $1.3 \sim 1.5 \text{ MeV}$ および $2.0 \sim 2.7 \text{ MeV}$ で同一条件の場合第3表に示されたものより1.5倍大きい。

鉱脈の密度および物質組成の分離測定の精度に対する影響

ウラン濃度測定のための式(2)に入れられる標準化された係数 A_1 , B_1 および C_1 は、ウラン・トリウム・カリウムの既知の濃度と混入物質の一定の密度をもつ鉱体の標準モデルで測定を行なつて得られる。

自然条件において、ウラン・トリウム・カリウムの分離測定を行なう場合の鉱脈はさまざまな密度、物質組成をもっている。

したがつて、鉱脈の密度、物質組成の分離測定の精度に対する影響を研究することは意味深

いことである。

鉱脈密度の影響から検討する。

ウランおよびトリウム系列およびカリウムの γ -線にとつて、0.5 MeV のエネルギーをもつ散乱ガンマ線の寄与は半空間上の γ -線全体の強さで、あまり大きくないとみなすことができる (1, 3, 5)。

二次ガンマ線を考慮しない γ -線の強さは次式で表わすことができる。

$$I = \frac{2\pi A}{\mu}$$

μ は γ -線吸収の線吸収係数

A は単位容積あたりの強度

多くの場合、それから鉱脈が構成されている元素との相互作用の際に、0.5 ~ 0.2 MeV のエネルギー領域では、 γ -線は主として、コンプトン散乱を受ける。

この場合 [8] μ/ρ の比 (ρ は鉱脈密度) は実際上常数值であるとみなすことができる。とすれば $A = q\rho$ (q は放射性物質の重量、濃度) を考慮に入れて、

$$I = \frac{2\pi q\rho}{\mu} = 2\pi q \cdot \text{const.}$$

と表わすことができる。すなわち検討された結果は γ -線の強さは鉱脈密度に関係なく、標準化された係数はモデルの鉱石の密度には関係ない。

光電吸収がめだつた働きをし、また散乱ガンマ線が著しくなる軟かい γ -線の領域では (0.5 MeV 以下) 標準モデルと周囲の鉱体との差を無視することはできない。

γ -線スペクトル分布と鉱体の物質組成との関係は鉛塩および水銀塩の不純物を含有する放射性鉱物のモデルで研究された。

第2図から (カーブ IV) 物質の有効原子番号 (Z_{eff} は13から22まで変化する) は、 γ -線スペクトルの軟かい領域、すなわち 0.5 MeV に対してのみ影響することが明らかである。

同様の結果は、他の研究でも計算であるいは実験で得られている。2.0 MeV から 2.7 MeV までのウランおよびトリウム鉱石、 γ -線エネルギー領域における入念な測定で Z_{eff} が13から22まで変化する場合、電子対創生の効果によつて影響をうけるこのエネルギー領域において γ -線強さの変化はきわめて僅かである。

このように 0.5 MeV 以上のエネルギーの γ -線スペクトルの差によつて、ウラン・トリウム・カリウムの分離測定を行なう場合、鉱脈の物質組成および密度は実際上測定精度に影響を与えない。

測定器不安定性の分離測定に対する影響

標準化の係数 A_1 , B_1 および C_1 (4) は γ -線スペクトルの厳密に限定された領域で計算される。この原因で γ -線スペクトロメーター全体の増幅度および選別閾値の不安定性は測定結果に附加的な誤差をもたらす。積分選別の場合、誤差は終局的に選別閾値のずれから生じ、微分選別閾値のずれおよびチャンネル幅の変化から生ずる。

野外におけるスペクトロメーターの安定性に対して何が要求されるかを研究することは興味あることである。

選別閾値 $\pm 10\%$ 以下、領域 ΔE : 0.5 MeV ~ 0.8 MeV, 1.3 MeV ~ 1.5 MeV および 2.0

第4表 選別閾値の不安定性の影響

選別閾値の相対的变化, %	-1.0	+1.0	-3.0	+3.0	-5.0	+5.0	-10.0	+10.0
$\frac{\Delta n_1}{n_1}, \%$	+1	+10	-2	+8	-5	+19	+8	-22

MeV ~ 2.7 MeV, 結晶 NaI (Tl) 径70mm, 分解能13.5%で測定を行なった場合, トリウムおよびカリウムが存在する場合のウラン測定相対誤差が第4表に示されている。

ウラン・トリウムの濃度は0.01%, カリウムは1.0%とされた。

第4表から上記スペクトル範囲では±10%以下の選別閾値の不安定性から生じた誤差は, 放射性元素の濃度がクラークナンバーに近い場合, 揺動誤差と同じオーダーであることが明らかにされている (第3表)。

結晶分解能の分離測定精度に対する影響

結晶 NaI (Tl) の分解能の分離測定精度に対する影響を評価するために, ウランおよびトリウム鉱のモデルで, 径70mm, 分解能13.5%, 17.5%, 25%および45%の結晶を用いて測定が行なわれた。

得られたスペクトルを基礎にして, 領域 $4E_{\gamma_1} = 1.0 \text{ MeV}, 1.9 \text{ MeV}$; $E_{\gamma_2} = 1.9 \sim 3.0 \text{ MeV}$ ($t_1, t_2 = 2 \text{ min}$) について結晶 NaI (Tl) の分解能13.5%~45%の範囲で生じたウラン測定の相対誤差 (同一濃度のトリウムが存在する場合) の計算が行なわれた。これらの誤差は分解能13.5%に対して分解能17.5%, 25%および45%の場合, それぞれ+11.4%, +12.0%および+28.0%に等しい。

このことは, はばクラークナンバー濃度の分離測定の場合, スタンダードなサイズの, 異なつた分解能 (13.5%~25.0%) をもつ結晶の交換が, 分離測定の精度には何らの影響を与えずに行なうことができるという点で実際的な意味をもっている。

結晶サイズの分離測定精度に対する影響

分離測定の際に70mm以下の結晶を用いることができるか否かをみるために, 径20, 30, 40mmの結晶を用いて積分スペクトルをとつた。第5表には各種の径の分解能17.5%の結晶を用いて, 濃度0.1%の平均したウラン・トリウム鉱について積分選別閾値によるカウント数が示されている。

選別の最初のレベルで径20mmの結晶から径70mmの結晶へ移行する際のカウント数はほぼ15倍に増大する。選別レベルが増大するに従つてカウントの差も著しくなる。1.9 MeVのエネルギーでは, 径20と70mm結晶でのカウント数比は50に達する。カウント数の減少は

第5表 各種の径の結晶による濃度0.1% 鉱石によるカウント数

選別閾値 MeV	カウ ン ト 数, pulse/sec							
	φ 70 mm		φ 40 mm		φ 30 mm		φ 20 mm	
	U	Th	U	Th	U	Th	U	Th
0.05	6000	2900	2220	980	980	960	460	210
0.5	1400	880	394	266	130	90	48	33
0.8	670	430	174	124	56	40	22	15
1.0	476	272	129	83	38	27	14	10
1.2	315	210	79	59	22	20	8	8
1.4	203	172	44	53	14	16	5	6
1.6	172	132	29	38	7	12	3	4
1.8	70	106	14	31	3.5	9	14	3
1.9	40	94	10	24	2.3	7	0.8	2.4
2.7	—	14	—	1	—	0.2	—	0.03

第 6 表 各種の直径の結晶によるウラン濃度 0.01% の
混合鉱石に対するウランの平均二乗誤差

U/Th	$\pm \frac{\Delta n_1}{n_1}, \%$			
	ϕ 70mm	ϕ 40mm	ϕ 30mm	ϕ 20mm
0.1	8.5	20.5	41.0	72.0
0.5	6.4	15.0	28.2	51.0
1	3.7	8.5	15.5	28.2
5	3.2	7.2	13.2	21.2
10	2.8	6.1	10.5	17.0

放射性元素の濃度測定 of 誤差を増大せしめる。

第 4 表にはトリウムの濃度 0.1% ~ 0.001% の平衡トリウム鉱中の混合物中の平衡ウラン鉱 0.01% の濃度において、各種径の結晶に対するウラン測定の相対的な平均二乗誤差が示されている。

相対的平均二乗誤差の計算は下記の γ 線スペクトル範囲で行なわれた。

$$4E_{\gamma_1} = 1.0 \text{ MeV} \sim 1.9 \text{ MeV}$$

$$4E_{\gamma_2} = 1.9 \text{ MeV} \sim 2.7 \text{ MeV}$$

$$\text{測定時間 } t_1 = t_2 = 10 \text{ min}$$

ウラン濃度測定 of 相対的平均二乗誤差はほとんど径 20mm の結晶を径 70mm の結晶に換える際のオーダーに減少した。

径 70 ~ 80mm および 20 ~ 30mm の結晶を用いて同じ分離測定精度を得るためには後者の場合の測定時間を数 10 倍にしなければならない。径 70mm の結晶を用いてクラークナンバー濃度およびそれに近い濃度のウラン・トリウム・カリウムの分離測定を行なう場合十分な精度を得るためには測定時間は数分間でなければならない。この場合、小さい径の結晶を使用すれば測定時間を数時間にさげる必要がある。

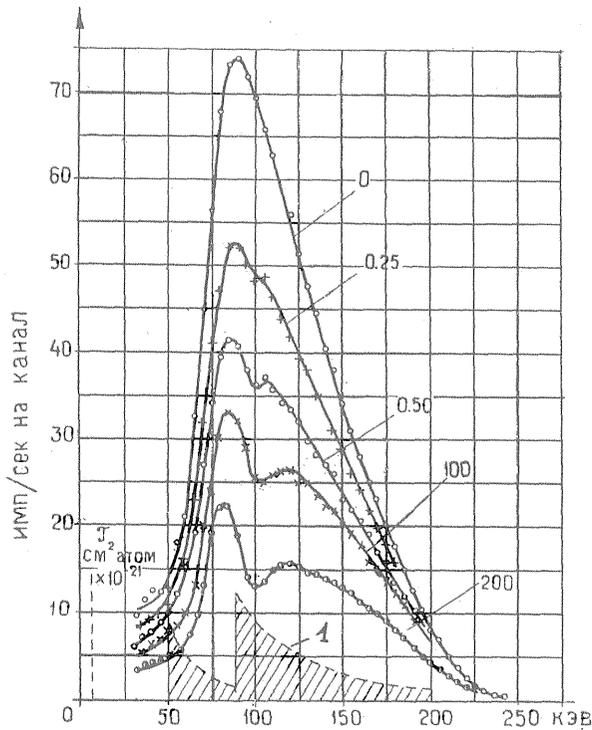
放射性鉱物のモデル鉱体で実験を行なうのと並行して、孔井モデルでも実験が行なわれた。孔井モデルにおける実験の基本的な結果は、上記結果と同様であった。

得られた結果から次のような結論を導くことができる。

1. 行なわれた実験から、天然の地層において、移動シンチレーションスペクトロメーターを用いて、ウラン・トリウム・カリウムの定量分離測定が可能であることが示された。
2. エネルギー 0.5 MeV 以上の γ -線のスペクトル組成の差異から天然の地層におけるウラン・トリウム・カリウムの分離測定を行なう場合、實際上、鉱脈および鉱石の物質組成と密度の定量分離測定の精度に対する影響は取り除かれている。
3. 大きな径の結晶 (70mm 以上) を使用すれば、天然の地層における放射性物質のクラークナンバー濃度の定量測定を行なうことができ、またウラン・トリウム・カリウム間に量的比率を設定して弱いガンマ異常を取り除くことができる。
4. それぞれの形で選択された微分 γ -線スペクトルの範囲では分離測定精度は、結晶の分解能および測定器の不安定性 ($\pm 5\%$ 以下) にそれほど関係しない。

II. γ - γ 法における散乱 γ -線スペクトル測定

γ - γ 測定法には、理論的にも [9] 実験的にも明らかにされているように、鉱脈における散乱 γ -線の特殊性がある。しかしこの特殊性は必ずしも充分にまた完全な形で実際面で利用されていない。



第4図 各種濃度の鉛不純物を含む砂中線源の散乱 γ 線スペクトル 1—光電吸収係数のグラフ

鉛の不純物を含んだ砂でできた孔井モデルで得られた散乱 γ 線の拡大スペクトルを検討してみよう(第4図)。スペクトル全体の形についてはすでに良く知られている。

鉛の濃度が增大するに従ってスペクトルが変化することに注意しよう。50~200 KeVのエネルギーインターバルでは、カーブ下の面積は減少しているが、90 KeV付近では鉛の濃度が增大するに従って増大する傾向がみられる。この傾向は正確に88 KeVに対応する鉛での光電吸収K-端によつて説明される。

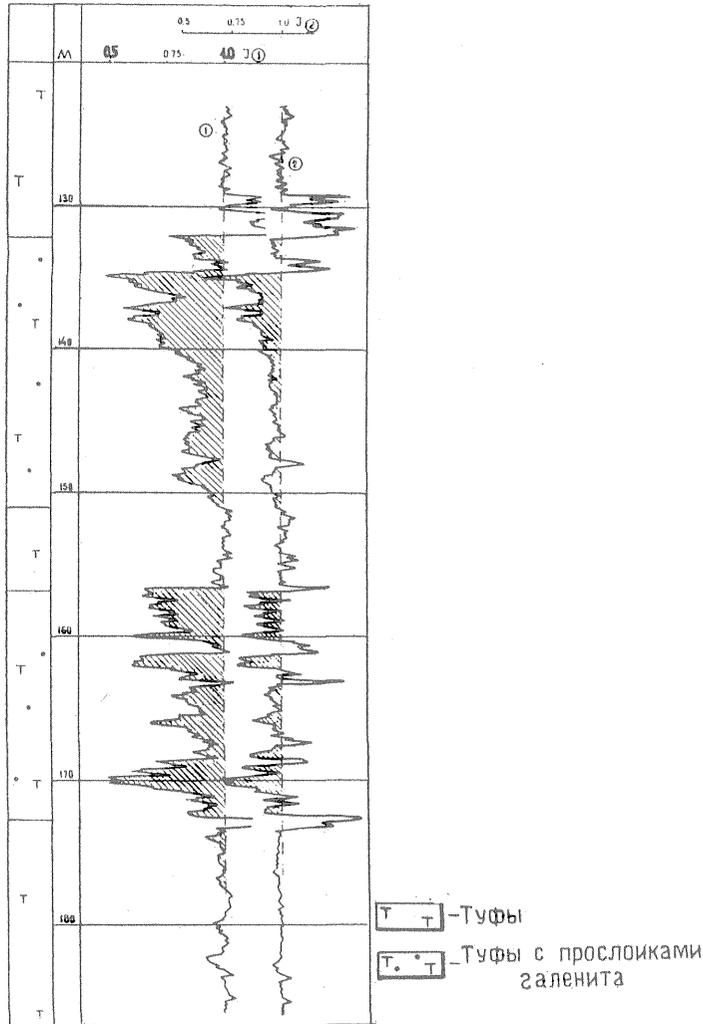
重元素にとっては、蛍光で放出されるエネルギーはほぼ完全に電子がLレベルからK-レベルへ移行するエネルギーに等しい。鉛については $E_K - E_L = 73$ KeVである。光電吸収のK-端および蛍光エネルギー放出はシンチレーションスペクトロメーターを用いて充分観察できる。この事実は複雑な鉱石、例えば鉛バリウム、水銀アンチモン鉱脈における重元素の同定〔II〕にとつて重要である。

K-端観察実験は孔井の実際的条件下で行なわれた。

実験と計算で、鉱体の有効原子番号 Z_{eff} の変化が0~200 KeVエネルギー領域で散乱放射線スペクトルを根本的に変化させるのに対して、鉱体および鉱物の密度変化は γ - γ 法で使用する散乱放射線エネルギーの全領域(0~1000 KeV)で事実上同一に現われることが示されている。それゆゑ2チャンネルのガンマスペクトロメーターで行なわれる孔井測定は同時に Z_{eff} と密度とを、すなわち鉱物および密度の異常を決定することができる。

測定はそれぞれ0~200 KeVおよび200~500 KeVの領域で行なわれた。

Z_{eff} を測定するためには、 γ 線の軟成分と硬成分との比 $\left(\frac{JM(軟)}{JK(硬)}\right)$ を利用することが便利である。2チャンネルスペクトロメーターを用いての測定は、孔井研究を早めるだけでなく、密度と Z_{eff} のグラフの相対的な結び付きの誤差も取り除く。第5図に示されているこのようなダブルグラフの例は凝灰岩と方鉛鉱の点在、および中層をもつ凝灰岩との密度と



第 5 図 2チャンネルスペクトロメーターで記録された検層図

Z_{eff} とを特徴づけている。

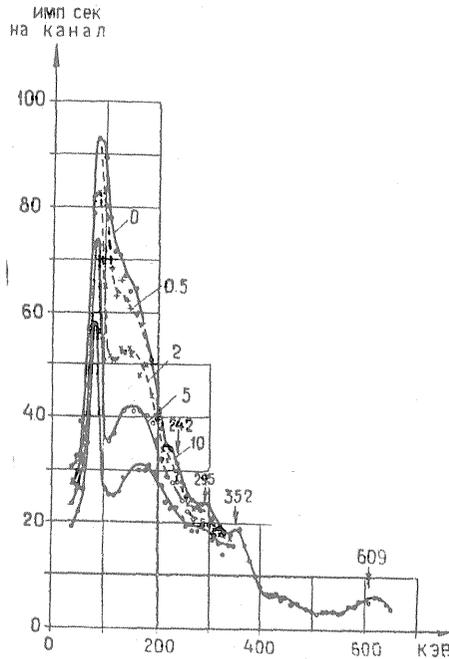
鉱体の天然放射能が高い場合、 $0 \sim 500$ KeV の領域において Z_{eff} と密度とを測定する際の γ - γ 法における同じスペクトルの処理方法を用いることができる。第 6 図には、さまざまな鉛濃度で鉱体の天然放射能のスペクトルを測定した実験結果が示されている。

スペクトルは第 4 図に示されたスペクトルと全く同様である。

III. 中性子捕獲の際の γ -線による元素の定量測定の可能性について

化学元素の原子核を熱中性子で照射した場合、 γ -線が発生するが、そのスペクトルはおのおのの核に特徴的な γ -ピークからなっている。 γ -線放射エネルギーの総体は核中の核子結合のエネルギーと等しく、平均 $7 \sim 8$ MeV である。中性子捕獲に伴う γ -線のこのようなスペクトルの分析でしばしば複雑な化学組成をもつ物質中におけるあれこれの元素の存在を知ることができる。

1956 年にわれわれが行なつた孔井中での実験によつて [12] 鉱体中の幾つかの元素を検出



第6図 各種濃度の鉛不純物をもつ砂中天然放射線の散乱 γ 線スペクトル

することができることが確認された。

中性子線源として放射能数キューリーの Po + Be プレパレートが用いられた。 γ 線スペクトルはシンチレーション γ スペクトロメーターで測定された。中性子線源は結晶から 10 cm 以上の距離におかれた。結晶の周りのケースの部分はテクストライトで作られ BC_4 でさらに保護されている。線源と結晶間にはビスマススクリーンが設けられた。 γ 線スペクトルはエネルギーが小さいとスペクトルは線源自体の γ 線のために歪むので 4~5 MeV 以上で測定された。線源は中性子減速の条件を良くするためにパラフィンで包まれている。上記方法で得られた鈳体の γ 線スペクトルの測定は、 γ 線の特徴的なラインで比較的明確に鈳層を区別している。例えば、おもに珪素および酸素からなる角石は珪素の 4.95 MeV に相当する 5 MeV の領域における極大によつて特徴づけられ、珪素と較べてきわめて小さい(およそ 10^{-3} 倍)熱中性子捕獲断面積をもつ酸素はグラフには現われていない。

閃緑岩の γ 線スペクトルにナトリウムおよびカリウムの γ ピーク (4.6 MeV)、アルミニウムおよび鉄の γ ピーク (7.6 MeV) に対応する追加的なピークが認められる。

この方法での研究には、遅い熱中性子の線源と性能の良い γ スペクトロメーターを用いることが望ましい。

γ 線スペクトル測定法を広く利用するために、またそのより一層の発展のためには、安定度の高いシンチレーション測定器と γ スペクトル研究の新しい方法の開発、および γ 線スペクトル解釈の改善が必要とされている。

文 献

1. Восковойников Г. Н., Карташов Н. П. К вопросу о спектрометрических исследованиях -излучения естественных излучений. Атомная энергия, т. 6, вып. 1, 1959
2. Назаров И. М. Раздельное определение естественных радиоактивных элемен-

- нтов с помощью лабораторных радиометрических методов. Атомная энергия, т. 9, вып. 8, 1957
3. Троицкий С. Г., Шашкин В. Л., Выкова К. И. Аппаратурные спектры γ -излучения бесконечных пластов урановых руд. Атомная энергия, т. 12, вып. 1, 1962
 4. Троицкий С. Г., Шашкин В. Л., Выкова К. И. О возможности отдельного определения урана и тория по данным измерений спектров γ -излучения руд в естественном залегании. Атомная энергия, т. 12, вып. 1, 1962
 5. Фридман Ш. Д. Об исследовании спектрального состава γ -излучения горных пород в естественном залегании, Изв. АН СССР, сер. геофиз., No. 8, 1960
 6. BRENNON H. R., ОСОВА I. S. Journal of Petroleum Technology, No. 2, 1956
 7. Сисигина Т. И. Спектральный состав γ -излучения элементов семейства урана и тория Изв. АН СССР, сер. геофиз. № 12, 1957
 8. Горшков Г. В. Гамма-излучение радиоактивных тел и элементы расчета защиты от излучений. Изд. АН СССР, 1959
 9. Восковойников Г. М. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 3, 351, 1957
 10. Соколов М. М., Очкур А. П. и др. Атомная энергия 4, вып. 3, 284, 1958
 11. Соколов М. М., Очкур А. А. и др. Труды Всесоюзного Совещания в г. Риге в 1960 г. "Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве в СССР" т. 4, стр. 146, 1961
 12. Федоров А. А., Соколов М. М., Очкур А. П. Атомная энергия т. 8, вып. 6, стр. 555, 1960