

## 資 料

543.5.064 : 553.43+553.48 : 550.822

### 岩石の化学組成研究における捕獲 $\gamma$ 線および放射化スペクトル測定の応用\*

A.I. Kholin, K.I. Yakubson & G.A. Nedostup

新 宮 洋 彬 訳

#### 要 約

熱中性子による放射化、捕獲 $\gamma$ 線スペクトル研究に基づいた岩石の化学組成研究の核物理学的方法の確立に関する研究結果が N. M. グブキン記念石油化学およびガス工業モスクワ研究所核地球物理学実験所によって報告された。

1. 岩石の $\gamma$ 線の測定スペクトルは、個々の励起核によって放射された $\gamma$ 線の重ね合せとして考えることができる。各岩石のスペクトル特性を概測するために、おもな鉱石組成物 (Al, Na, Mn, Cu, Fe, Ni, S, Ca, Si) およびその化合物の放射化および捕獲 $\gamma$ 線スペクトルが特殊な模型で測定された。

岩石は2つのグループに分けることができる。第1グループには、同定すべき元素をもった岩石の $\gamma$ 線スペクトル中でもっとも硬い線を出す (鉄鉱石・ボーキサイト・耐火粘土・石灰岩-Fe, ケイニッケル鉱-Ni) 元素をもつ鉱石が含まれる。

第2グループは探査しようとする元素のスペクトルが岩石を構成する他の元素のスペクトルを背景として認められる有用鉱物からなる。

硫化ニッケル鉱 (Fe および Cu のバックグラウンド上の Ni)、含チタニウム (黒色磁)、鉄鉱 (Fe のバックグラウンド上の Ti)、クロム鉄鉱 (Fe のバックグラウンド上の Cr) 等も第2グループに加えることができる。

2.  $\gamma$ 放射線スペクトル測定の大きな能力と高い効率性はニッケル銅鉱およびボーキササイトの産地の孔井における研究によって実証された。

ニッケル銅鉱鉱床で捕獲 $\gamma$ 線スペクトル測定の適用は、以前には地球物理学 (核地球物理学を含む) によって行なわれ得なかった孔井中の鉱床準の決定という大きな問題を實際上明瞭に解決することを可能にした。

孔井の地質調査に地球物理学上のデータを付加することは有用埋蔵物の見落しを防ぐばかりでなく、本質的にその厚さと位置を正確ならしめる。

ボーキサイト鉱床でのスペクトル測定の適用は連続放射化検層のデータに関し稼行層準の検出効果を著しく高めたし、放射線を用いる方法によってボーキサイト中に測定される元素のグループを拡大させた。ボーキササイトの主要有用成分 Al のほかに Mn, Na, Mg, Fe および Ti もその中に加えられる。

3. 実験および孔井研究は (その結果は報告された) МИНХ および ГП 核地球物理学実験所で作られた孔井用 $\gamma$ スペクトロメータを用いて行なわれた。スペクトロメータは比較的構造が簡単でかつ操作が確実であることがすぐれている。プローブの吊下げと地表への信号送信には普通の3芯探鉱ケーブル“KTO”が使用されており、そのこともまたすぐれた点のひとつである。

4. 報告の結論として、地球物理学の実験に $\gamma$ 線スペクトル測定の利用が、孔井中にある鉱石の化学組成の問題解決にもっとも重要なことであると述べている。

\* A. И. Холин, К. И. Якубсон, Г. А. Недоступ (1962): Применение спектрометрии гамма-лучей захвата и наведенной активности для исследования вещественного состава горных пород. Труды конференции ядерных геофизиков, 24-30 сентября, Краков, Польша, p. 781-811.

## I. 捕獲 $\gamma$ 線の利用

最近、核地球物理学にとって鉱石の化学組成の測定に使用される原子核の特性を組み合わせることがめだつようになった。もっとも著しい特徴のひとつは、鉱床から孔井に放射する $\gamma$ 線スペクトルの組成に関するデータを利用することである。

励起核によって放射される $\gamma$ 線スペクトルは原子核構造の各特性を映しだし、またそれを同定する確実な方法である。

鉱石の $\gamma$ 線スペクトル測定はガンマ検層や中性子ガンマ検層、放射化検層のようによく知られた核地球物理学的方法のより発展したものとして正式に認められている。一方 $\gamma$ 線の測定スペクトルの解釈に関する多くの専門的な問題や標準的方法に較べ、原理的に新しい、スペクトル検層がもっている方式は核地球物理学の独自の分野にしたがってわかれている。

$\gamma$ 線スペクトル測定は核地球物理学の普通の方法と同様、パッシブおよびアクティブな方法に分けることができる。鉱石の天然 $\gamma$ 線スペクトル測定はパッシブである。鉱床にそれを用いて各種天然放射性元素のみ同定することができる。この方法によって解決される問題の範囲はおもに原子燃料の探査にある。一方この方法は、とくに有用埋蔵物が別の放射性元素と結合している場合の非放射性有用埋蔵物の化学組成の研究に大いに役立つ。

鉱床の化学組成研究のもっとも有効な方法は、中性子による鉱床照射の際放射化される励起核の $\gamma$ 線スペクトルに基づいたアクティブな測定である。

鉱石の放射化スペクトルの相対的単純性、すなわち各放射性同位体に関連した明瞭な線がスペクトル中に現われることが放射化 $\gamma$ 線スペクトル測定を特徴づけている。

一方捕獲 $\gamma$ 線スペクトル測定を検討してみる。孔井中および地層模型で得られる捕獲 $\gamma$ 線スペクトルは通常各元素に関連した明瞭な最大値を含まない、またゆるい減少曲線の形をしている。このことは励起核によって放射される $\gamma$ 線の一次スペクトルの合成によって説明できるし、スペクトルの記録に使われるスペクトロメータのシンチレーションカウンタに生ずる過程によっても説明できる。

多くの場合鉱石で実際に測定される捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの見かけ上の無信号はこの有用埋蔵物の化学組成研究方法の利用に悲観的な関係を生じた。しかしこの見解には応ずることはできない。捕獲 $\gamma$ 線スペクトルは鉱床の組成成分を評価するための十分な信号をもっている。

地球物理学の課題はわれわれが測定しようとする個々の元素に対応した放射線を総合スペクトルから検出する研究としてみなすべきで、これらスペクトルの解釈の方法論にある。

鉱石の $\gamma$ 線スペクトルは、鉱床に含まれている個々の核によって放射された $\gamma$ 線の重ね合せとしてみることができる。

第一段階としてこのスペクトルの重ね合せの方法は重要鉱石の構成元素の $\gamma$ 線の実測スペクトルの研究を前提としている。

各元素の実際に測定される $\gamma$ 線スペクトル型は多くのファクターの総合作用によってきまる。ファクターは2つのグループに分けることができる。第1グループには、まず $\gamma$ 線源の空間分布に基づき次に $\gamma$ 線の地層物質との相互作用で一次スペクトルの歪みに基づく、鉱石の中性子線特性および $\gamma$ 線特性に関連したファクターが含まれる。

ファクターの第2グループはシンチレーションスペクトロメータの計数の際生ずる。とくに機器効果に関連している。

孔井測定の条件に応ずる実際の検出器によるスペクトロメータの分解能の算定方法は現在のところ存在しない。それゆえその実験的測定の必要性が生ずる。

同じ研究例としては、検出される元素 (Fe, Ni, Cu, Ca, Na, S, Si) のはいったガラス管を同心円状に均等に入れた水を含む容器 ( $1.5 \times 1.2 \times 1.2 \text{ m}^3$ ) からなる不均等模型中における若干の鉱石構成元素のスペクトル測定がある。

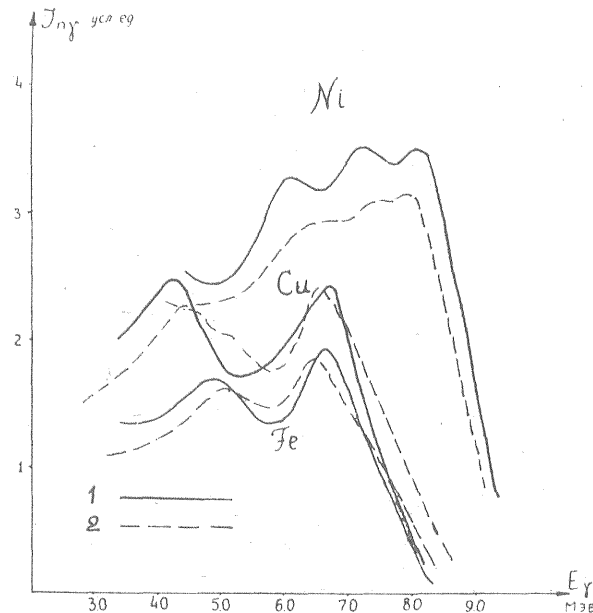
スペクトル測定は単一のシンチレータをもつスペクトロメータによって行なわれる。シンチレーションカウンタ (シンチレータ NaI (Tl)  $40 \times 50 \text{ mm}$ ), 鉛製遮蔽 (20 cm) それに中性子源

は模型の中心にあるプラスチックスリーブにとりつけられた注1)。

模型の構造は測定されるスペクトルの次のような固有な特性を条件づけている。これらスペクトルは測定器の周囲の薄い層 (厚さ 10~15 cm) にある励起核の一次非散乱 $\gamma$ 線スペクトルとして測定することができる。

第1図に掲げた捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの測定では核の励起レベルを示す各単一エネルギーの不明瞭性が注目される。

核の基底状態への移行のもっとも確率の大きい過程に相応する強い線のみが明瞭な最大値として現われる。このような線とは例えば、Fe のスペクトル中の 7.6 MeV や 6.026+5.92 MeV, Cu のスペクトル中の 7.9+7.63 MeV, Na のスペクトル中の 6.40 MeV がある。Ni の実測スペクトルにとって一次スペクトルで高エネルギーのグループとなって示される 8~6 MeV のエネルギー区間で広った極大部分が特徴である。



第1図 a Ni, Cu, Fe 核による熱中性子捕獲 $\gamma$ 線スペクトル  
1—実験スペクトル  
2—算定スペクトル

捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの個別の線の不明瞭さを示す原因のひとつは、軟 $\gamma$ 線範囲におけるシンチレーションカウンタの分解能が比較的低いことである。

上記のごとき実験は鉱床からきた $\gamma$ 量子の拡散した流れに対するスペクトロメータの分解能を評価することを可能にする。

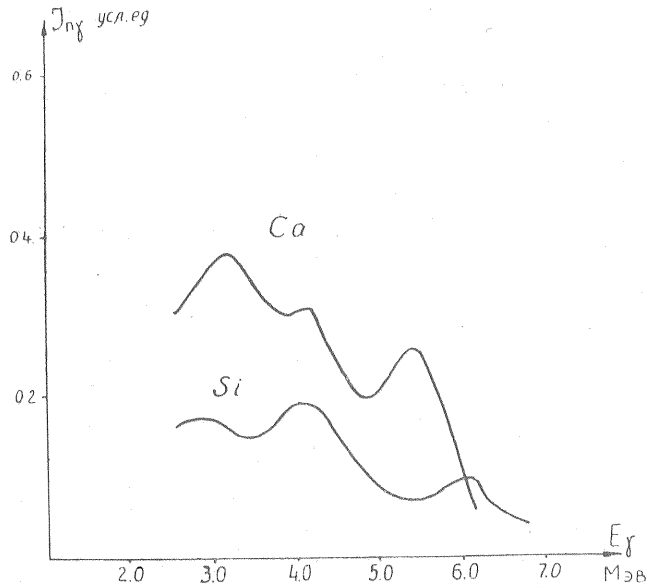
この場合、各種元素のスペクトル中のもっとも硬い線で示された分解能は約 17~20% であった。

実験および算定スペクトルの比較に基づき (第1図 a) 捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの形が、放射線源の構造によってあまりかわらないという重要な結果を得ることができた。

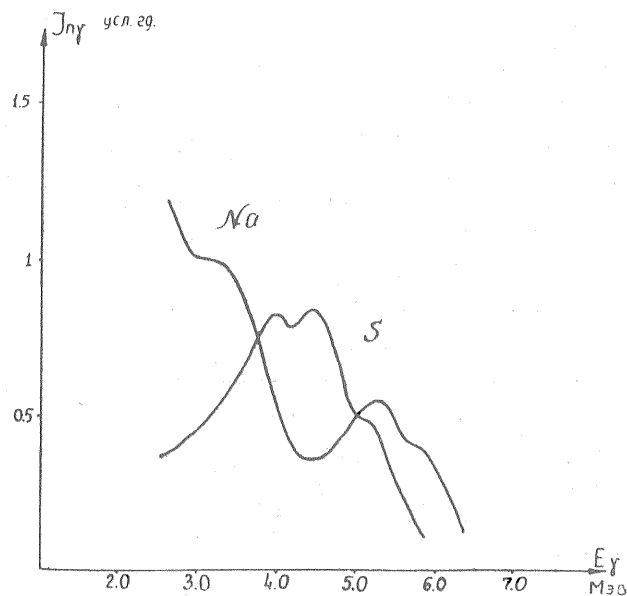
算定スペクトルの計算資料として点状単色放射線源による実測線の形に関するデータが使用された。それらデータは [1] に掲げられ、スペクトロメータの実際上の分解能の算定により変形されたものである。

模型では各元素の $\gamma$ 線スペクトルのほかに測定器のスリーブ、スペクトロメータの金属部分、

注1) 測定は3芯ケーブル KTO-1, 長さ1キロメートルをつけた現存の検置器で行なわれた。



第1図b CuおよびSi核による熱中性子捕獲 $\gamma$ 線スペクトル

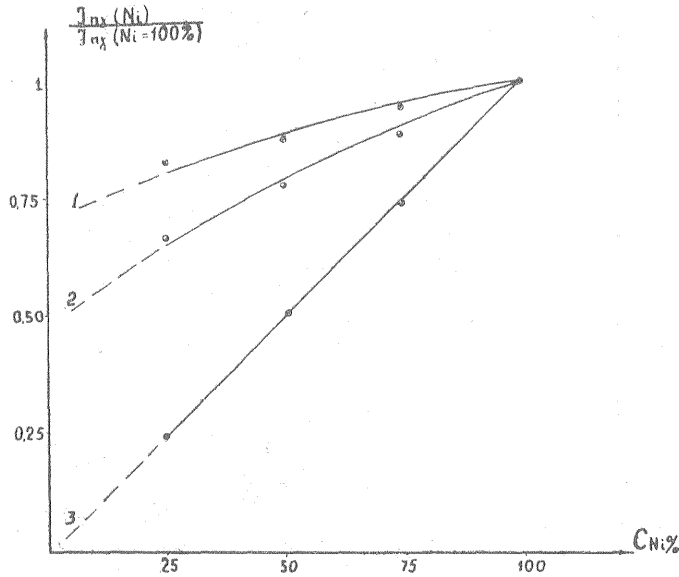


第1図c NaおよびS核による熱中性子捕獲 $\gamma$ 線スペクトル

回路部分、シンチレータ、マンドレルによる中性子の捕獲の結果起るバックグラウンド $\gamma$ 線スペクトルの形が研究された。

バックグラウンド放射線の存在は、捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの解釈には邪魔になる。第2図には、模型中のNiの濃度に対する各種エネルギー範囲の捕獲 $\gamma$ 線強度の依存性を示すグラフが示されている。バックグラウンド放射線の影響を無視できるもっとも硬い放射線の領域においてのみ実験直線は座標の基点を通過する。

模型中での測定の結果得られるバックグラウンド放射線スペクトルの形状は孔井状況に移しても維持されることが正確に知り得る。このことは実際に孔井で得られたスペクトルの解釈を容易にする。



第2図  $J_{\gamma}, \gamma = f(CNi)$  の関係  
 1 -  $E_{\gamma} = 4.7 - 5.7$  MeV  
 2 -  $E_{\gamma} = 6.2 - 7.0$  MeV  
 3 -  $E_{\gamma} = 8.6 - 9.0$  MeV

模型中で測定された個々の捕獲 $\gamma$ 線実測スペクトルを利用して、複雑な化学構造をもつ鉱床の $\gamma$ 線スペクトルの形をほぼ評価することができる。

各元素を検出するという見地から鉱石の捕獲 $\gamma$ 線スペクトルは2つの型にわけられる。第一の型には次の鉱石が含まれる。すなわちその $\gamma$ 線スペクトル中でもっとも硬い線が同定すべき元素の放射線(例えば、石灰岩・ボーキサイトのスペクトル中のFe線)と一致する鉱石である。

この型のスペクトルの解釈法は簡単でそのエネルギーがある一定の限界を越す $\gamma$ 線が記録される。

閾エネルギーの量を決定する際と他の元素の放射線の影響を見積るために上記の各元素の実測スペクトルが使われる。第一型のスペクトルを解釈するときにはバックグラウンド放射線のあり得べき影響を勘定する必要があることに注意しなければならない。バックグラウンド放射線の影響があれば、分析されるスペクトルを第二型に移しその解釈に適した方法を取らねばならない。

捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの第2型——もっとも一般的なものである——の特徴は2つの元素を分離できるような放射線のピークが存在し得るところのエネルギー範囲がないということである。その場合、捕獲放射線の合成スペクトルの中の元素の数量は通常そのエネルギーの減少につれて増大する。捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの見かけ上の“無信号”について述べられるとき、ほかならぬこの第2型スペクトルが考慮されているのである。実際に2種類の成分からなる混合物(Ni, Fe)のもっとも一般的な場合でさえ総合スペクトル型による元素の同定は困難である。(第3図)

第2型のスペクトル解釈の方法は、鉱石を組成する各元素の放射線の重ね合せの原理に基づいている。

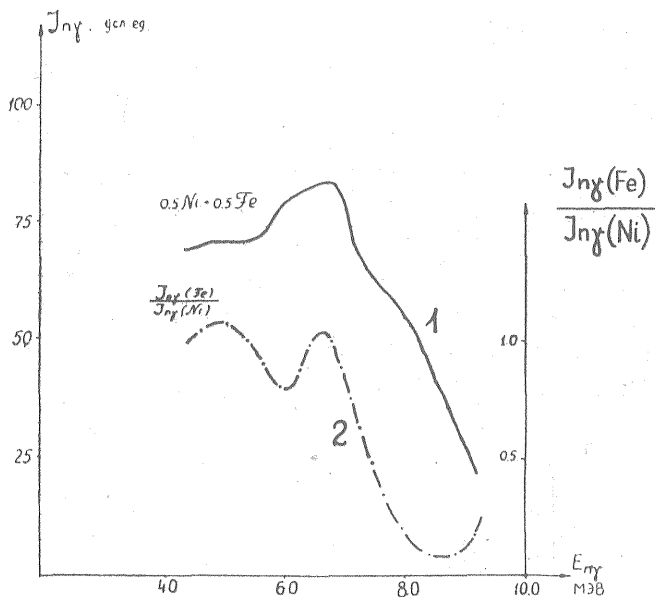
任意に選ばれたエネルギー  $E_i$  の捕獲 $\gamma$ 線の強度は、各元素と関連した放射線の総計として示される。

$$J(E_i) = J(E_i)_q + J(E_i)_k + \dots + J(E_i)_j + J(E_i)_r$$

この場合添字  $q, k, \dots, j$  は放射性元素であり、 $r$  はバックグラウンド放射線である。

$J(E_i)$  の総合強度を各成分に分離するにはエネルギー領域を限った  $m$  個の捕獲線の強度を測定する必要がある。(  $m$  は放射性元素の数と同じである)。

エネルギー ( $E_i$ ) の領域中での鉱床の構成元素の $\gamma$ 線強度と、他のエネルギー領域の個々の中



第3図 Ni および Fe の同重量のものからなる媒体の捕獲 $\gamma$ 線実験スペクトル (1)  
Fe および Ni の放射線のエネルギー分布の合成 (2)

にある同一元素の放射線強度をプラスした係数の値がわかっている場合においてのみこの測定の結果得られた  $m+1$  の方程式から元素の含有量が決定できる。

方程式の正確度は、捕獲 $\gamma$ 線強度の測定のためエネルギー領域がどれだけうまく選ばれたかということに大きく依存している。

主要な鉱床の構成元素の実測スペクトルを利用して、有用埋蔵物の各種別ごとに最良の測定条件を示すことができる。すなわち Ni, Fe (第3図) の混合物では、(Fe 放射線より大きい)  $E_{cp}=6.6$  MeV と (Ni 放射線より大きい)  $E_{cp}=8.4$  MeV 等のエネルギー領域中の捕獲 $\gamma$ 線の解釈を行なうことがもっとも合理的である。

このように第2型の捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの解釈は鉱床の組成をなす各元素の放射線実測スペクトルの形を示す係数の大きさを測定することに帰結する。不均質模型で測定されたスペクトルをもとにして得られた係数は定性的評価のためにのみ使用される。

実際の孔井状況に一致する係数の値は、同じ原理にしたがう模型実験で、あるいは孔井測定と、コアの化学分析との比較の結果得られる。捕獲 $\gamma$ 線スペクトルの解釈方法の全体的な状況は有用埋蔵物のいろいろなタイプの化学組成の研究の際示される。硫化ニッケル銅鉱石の探査のための捕獲 $\gamma$ 線スペクトル測定の特徴を、実例としてみてみよう。

こんにちまでニッケル銅の鉱床で掘さくされた孔井の多くはコアの調査によって記録されていた。稼行層準のみならず鉱床の硫化物の鉱化作用のなかで、電気検層の標準型方法 (MЭП, МСК) は孔井断面をはっきりと区分することや、ニッケル銅鉱化作用の範囲を区別することができない。そのため $\gamma$ 検層 (ГМ および ГГМ) を使用するという試みも大きな成果はなかった [2]。

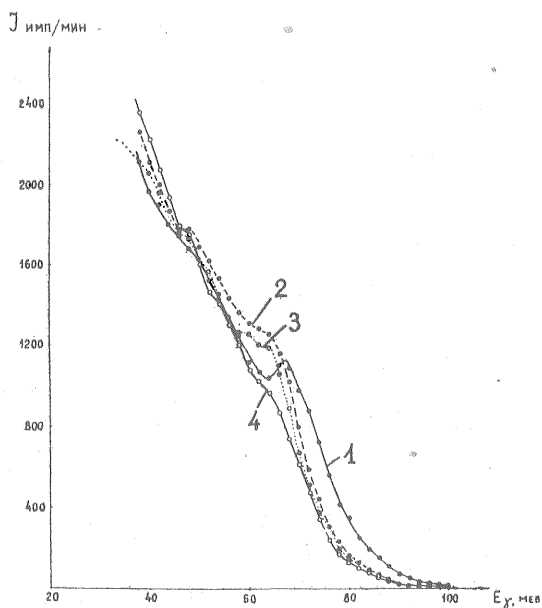
ニッケル銅鉱床探査に捕獲 $\gamma$ 線スペクトル測定を使用するための物理的な前提は、鉱石その他鉱床を組成する元素のコアの分析値との比較に基づいている。鉱床の構成元素の実測スペクトルの形の見積りによって与えられた数字は、ニッケル銅鉱石の捕獲 $\gamma$ 線スペクトルが第2グループに属することを示した。エネルギーの広い範囲では、総合スペクトルに多数の元素が記録される。スペクトルの高エネルギー部分 ( $E_{\gamma}=8.0+9.0$  MeV) でのみ励起核 Ni の放射線は放射線の全計数の半分以上を構成する。

硫化ニッケル銅鉱産地の孔井の一つで記録されたニッケル銅鉱その他千枚岩の捕獲 $\gamma$ 線スペク

トルは第4図に示されている。これらスペクトルの特徴は捕獲 $\gamma$ 線スペクトルが見かけ上現われないことを確認することにある。鉄分を40%まで含む大量のニッケル銅鉱の放射線スペクトルでは7.6 MeVの鉄の線を示す明瞭な最大値が検出される。このことは、鉄鉱石中の鉄含有量の測定に、捕獲 $\gamma$ 線スペクトル測定が大いに役立つことを示している。

孔井スペクトルと計算によるものと比較して、後者が質的には正確に、高いエネルギー範囲( $E_\gamma > 7$  MeV)におけるスペクトルの様子を示すことに注意しなければならない。さらに低い領域においてスペクトルの比較をよくするためバックグラウンド放射線量の計算が必要であり、それは、孔井の中心の熱中性子の密度の測定を利用して行なわれるであろう。

ニッケル銅鉱とその他、鉱床のスペクトルの比較は高いエネルギーの捕獲 $\gamma$ 線の記録の際、双方間のもっとも大きな差異が予測されることを示している。4.5 から 5.5 MeV のエネルギー領域でこれらの鉱床は捕獲 $\gamma$ 線の強度では実際上僅きりしないが、4.5 MeV 以下のエネルギーの際他の鉱床は鉱石よりも高い示度で示される。



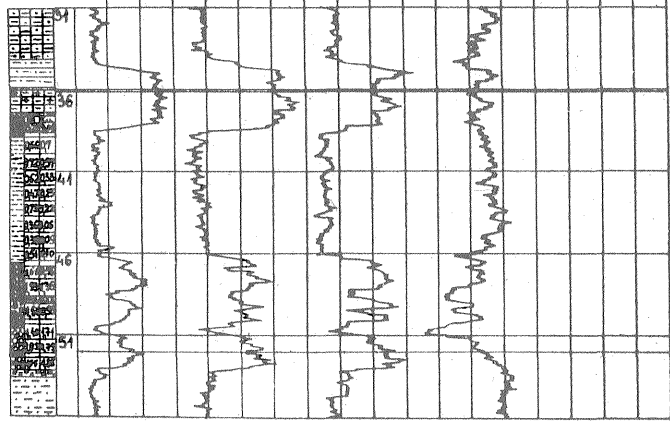
第4図 孔井中で測定された捕獲 $\gamma$ 線スペクトル  
 1—大量のニッケル銅鉱石  
 2, 3—ニッケル銅混入鉱物  
 4—千枚岩

3種の鉱石がある孔井でいろいろな捕獲 $\gamma$ 線の強度測定の結果が第5図 a, b (省略) に掲げられている。3.5+4.3 MeV エネルギー領域での放射線記録の際この産地の鉱床の典型的なスペクトル特性は第4図のとおりに鉱床は実際上検出できない(あるいは低い示度によってしか示されない)。また記録放射線エネルギーの増加の場合は正の異常となつてでてくる。鉱床差別の記録エネルギー領域区分への依存性は第5図 c に示される。ここでは捕獲 $\gamma$ 線エネルギーの関数として、鉱床中の鉱石の相対的検出効果の値  $I_r = \frac{J_{rx}}{J_{r, BM}}$  が示されている。もっともはつきりした差異は 8.6~9.0 MeV のエネルギー中で得られ、そこではニッケルからの放射線の相対的量がもっとも多い。

深さ 102.9~104.5 m にある鉱化千枚岩層の異常を述べねばならない。この層の硫化物鉱化作用は主として黄鉄鉱に関係している。捕獲 $\gamma$ 線スペクトル中で Fe の  $\gamma$ 線が優勢である 6.3+7.1 MeV 区域においてこの層は 1.5-2.0% のニッケルを含むニッケル銅層(深さ 108.6-116.0 m)と同じ示度で示される。スペクトルの高エネルギー部分へ移行するほど鉱石による異

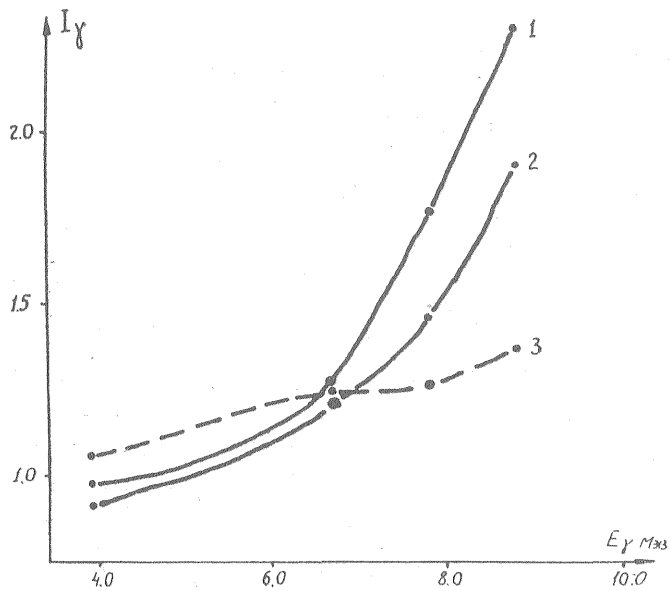
НГМ-ЛС-40  
 NaJ-40x50 P= $\frac{10 \text{ mev}}{100 \text{ ka.H}}$  M 1:50

$\tau = 24 \text{ сек.}$   $U_0 = 74 \text{ V}$   $U_0 = 63 \text{ V}$   $U_0 = 35 \text{ V}$   
 $U_0 = 86 \text{ V}$   $\Delta U = 8 \text{ V}$   $\Delta U = 8 \text{ V}$   $\Delta U = 8 \text{ V}$   
 $\Delta U = 4 \text{ V}$   $\tau = 18 \text{ сек.}$   $\tau = 18 \text{ сек.}$   $\tau = 18 \text{ сек.}$



- |  |       |  |           |  |        |
|--|-------|--|-----------|--|--------|
|  | 石英千枚岩 |  | 含黄鉄鉱千枚岩   |  | 緑泥石千枚岩 |
|  | 千枚岩   |  | 鉍石        |  | 方解石    |
|  | 石英角礫岩 |  | 有用成分を含む鉍石 |  | 鉍化変化鉍床 |

第5図 a 鉍-ニッケル銅鉍石産地孔井で記録された $\gamma$ 線強度曲線



第5図 c 記録放射線エネルギーと鉍床の相対的検出効果  $I_\gamma = \frac{J_\gamma x}{J_\gamma b m}$

- 1—大量のニッケル銅鉍
- 2—混合鉍石
- 3—含黄鉄鉱千枚岩



常の相対値は急に大きくなる。

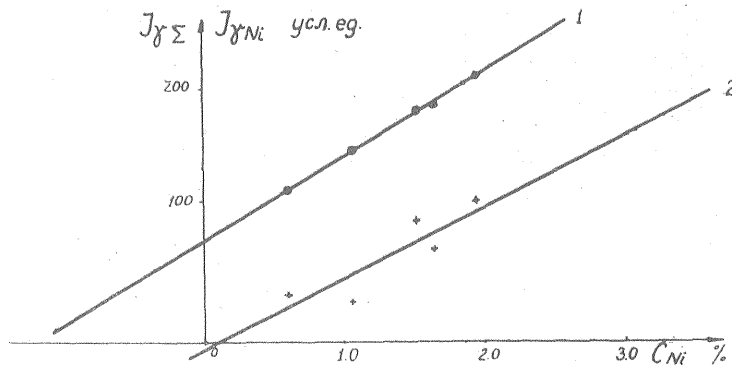
孔井断面でニッケル銅鉍化地帯の定性的分析の場合主要な問題となるのは、硫化鉍化した鉍床と鉍物体で示される異常の区分である。

含黄鉄鉍千枚岩層の選別とともに研究された事例はこのような異常の定性的識別方法を指示している。

一方捕獲  $\gamma$  線スペクトル測定の特徴は、鉍石中の有用成分—ニッケルの含有量をスペクトルを使用して評価できることである。

より硬い捕獲  $\gamma$  線の総合強度によるニッケル成分の測定は、この放射線の存在する部分が鉄の励起核によって放射されるかぎり満足な結論は得られない。このことは第 6 図の 1 のグラフではっきりと証明される。ここでは 8.6—9.0 MeV エネルギー領域における捕獲  $\gamma$  線強度と、採取されたコアで測定された鉍石層におけるニッケルの含有量が比較してある。

実測値が周囲に点在している直線は Ni 含有量が負の値の所で横軸を切る。



第 6 図 鉍床 (C<sub>Ni</sub>) 中のニッケル含有量と記録放射線強度との関係のグラフ  
 1— $J_{\gamma\Sigma} = f(C_{Ni})$   
 2— $J_{\gamma Ni} = f(C_{Ni})$

上にのべた第 2 タイプのスペクトル測定法に従って、捕獲  $\gamma$  線の総合強度を個々の単一元素の成分へ分離するためには、実際の孔井におけるこれら元素の放射線実測スペクトルの型を知る必要がある。すでに明らかな化学成分 (Ni と Fe 含有) をもった鉍床によって作られた、 $E_i$  に関する方程式を解くとすれば孔井中で測定された Ni と Fe のエネルギー間隔に対して Ni と Fe の放射線強度の相互関係を示す係数が得られる。単一元素成分への総合強度の算定の結果できたグラフ  $J_{\gamma Ni} = f(C_{Ni})$  (第 6 図-2) はニッケル含有量とその励起核の捕獲  $\gamma$  線の強度との関係の正確な特徴を、主として示している。グラフ中の中間直線  $J_{\gamma Ni} = f(C_{Ni})$  のまわりに散らばる実測値が多いのはバックグラウンド放射線の量が算定できないからであり、また 7.4—8.2 MeV エネルギー領域では明瞭な強度を示す Cu, Al の放射線も算定できないことによる。

## II. 放射化の利用

放射化スペクトル測定方法は、捕獲  $\gamma$  線スペクトル分析の上に述べたような方法と大きな関係がある。この際放射化スペクトルの解釈を著しく簡単にする二つの事柄を指摘しなければならない。第一に放射性アイソトープの壊変図式は、基底状態への励起核の放射遷移図よりも若干単純である。第二としては個々の同位体のエネルギー特性とともに放射化の複雑なスペクトルの分析では平均寿命ごとの区別が行なわれる。

各放射性同位体の  $\gamma$  放射線スペクトルの相対的単純さにもかかわらず、複雑な化学組成をもつ鉍石の大部分の放射化スペクトルはスペクトルの第二型 (捕獲  $\gamma$  放射線スペクトルについて述べた際われわれが行なった分類に従う) に属する。

照射, 冷却, 測定の適当な時間を選択することによって多くの場合、この問題を解く場合対照

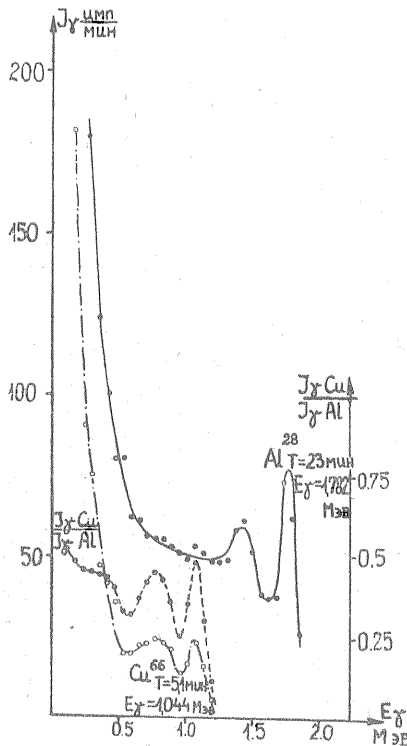
としないアイソトープの放射線の妨害作用を少なくすることができる。放射化された元素の半減期の適当な関係で、スペクトルの形を第一型のスペクトルへ完全に変化することができる。

研究される元素の半減期が、鉱床中の他の誘導放射性同位体よりも少ないときにもっとも簡単にこのような変態が起る。この意味において、ボーキサイトのアルミ成分を測るのに放射化 $\gamma$ 線スペクトル測定はすぐれている。 $Al^{28}$  (2.3 min) の小さな半減期は、アンプル入りの Po-Be および Po-B 中性子源を使つての連続放射化検層を可能にする。 $Al^{28}$  の測定スペクトル中の光電吸収のピークに応ずる放射線強度を記録しながら、他の元素の放射線の妨害を最低に押えることができる。

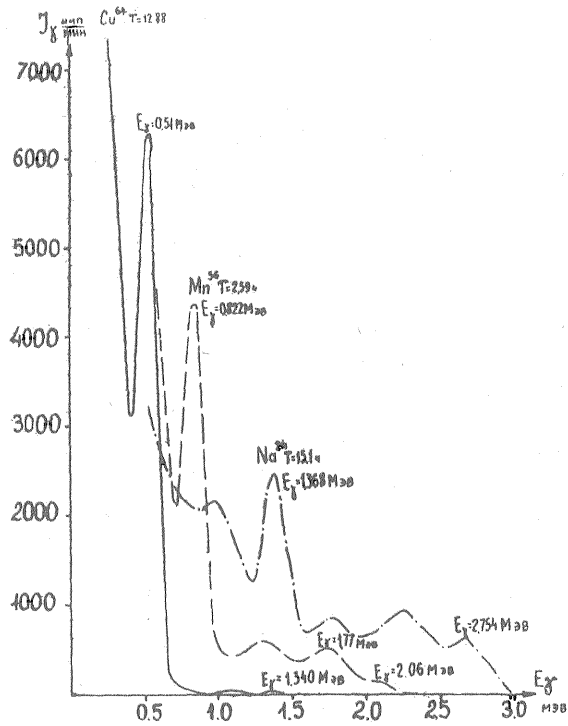
記録スペクトルに現われる後者の量は、放射化スペクトル中におけるいろいろなエネルギー間隔に応ずる放射化検層図の比較を基に示される。アルミニウムのさまざまな含有量をもつ層のもっともはっきりした差異は、エネルギー  $E_{cp}=1.79$  MeV をもつ $\gamma$ 線の強度変化を記録するカーブで示される。

放射化 $\gamma$ 線スペクトル全線の強度を表わす積分係数のカーブと較べると差異は 10-15% 増大する。

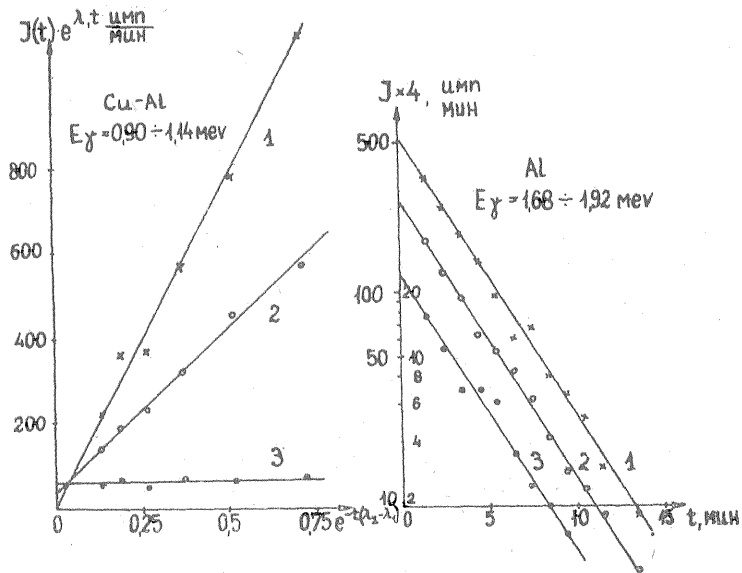
すべての場合妨害元素を無視できるほどにその放射能の影響を少なくすることに成功してはいない。このような場合には、単一元素成分を選別するのにもっとも正確である記録放射線エネルギーの選択が大きな意味をもつ。不均質モデルで測定された若干の放射性同位体の放射化 $\gamma$ 線実測スペクトルは第7図 a, b に示されている。これらスペクトルは、エネルギーのいろいろの領域において放射化される鉱床の組成元素の $\gamma$ 線の間係をしらべるのに利用することができる。放射化スペクトル中におけるエネルギー線の多くは光電吸収のはっきりしたピークとなって現われる。それとともにコンプトン最大値がはかられるが、多くの場合(比較的硬い $\gamma$ 量子にとっては)2つの過程の重なりが起る確率も計算しなければならない。(Na<sup>24</sup> スペクトル中の 2.75 MeV の2つのピーク: 第7図 b)



第7図 a  $Al^{28}$ ,  $Cu^{66}$  放射化 $\gamma$ 線の実験スペクトル



第 7 图 b Mn<sup>55</sup>, Na<sup>24</sup>, Cu<sup>64</sup> 放射化  $\gamma$  線の実験スペクトル

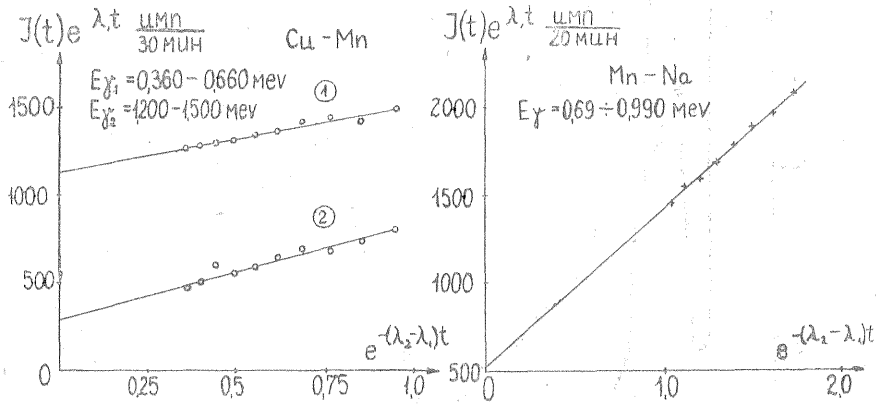


第 8 图 a ニッケル銅鉱と他の鉄床の誘導放射能の減少および短寿命同位体 Al<sup>28</sup>, Cu<sup>66</sup> の放射能曲線  
 1—大量の鉄石  
 2—混合鉄石  
 3—千枚岩

誘導放射能 (あるいは天然) の $\gamma$ 放射線と一致するエネルギー領域のシンチレーションスペクトロメータの分解能は捕獲 $\gamma$ 線の記録の場合より高く約 15~17% である。

放射化による種々さまざまなスペクトルの解釈の際起るトラブルは硫化ニッケル銅鉱の例で説明される。銅の同定は2つの同位体の $\gamma$ 線  $\text{Cu}^{64}$  (T=12.8時) および  $\text{Cu}^{66}$  (T=5.15分) によってできる。一方この場合でもその他の場合でも放射性銅の放射線は、その中性子放射の際、鉱石中に起る他の放射性同位体の放射線を伴う。

放射化による銅成分の選別をするのに、定められたエネルギー範囲の放射線強度の短時間の測定に限ってはならず、時間に応ずる放射化効果の変化を示すカーブを取る必要がある(第8図a, b)。



第8図 b ニッケル銅鉱と他の鉱床の誘導放射能の減少および長寿命同位体  $\text{Cu}^{64}$ ,  $\text{Na}^{24}$ ,  $\text{Mn}^{56}$  の放射能曲線

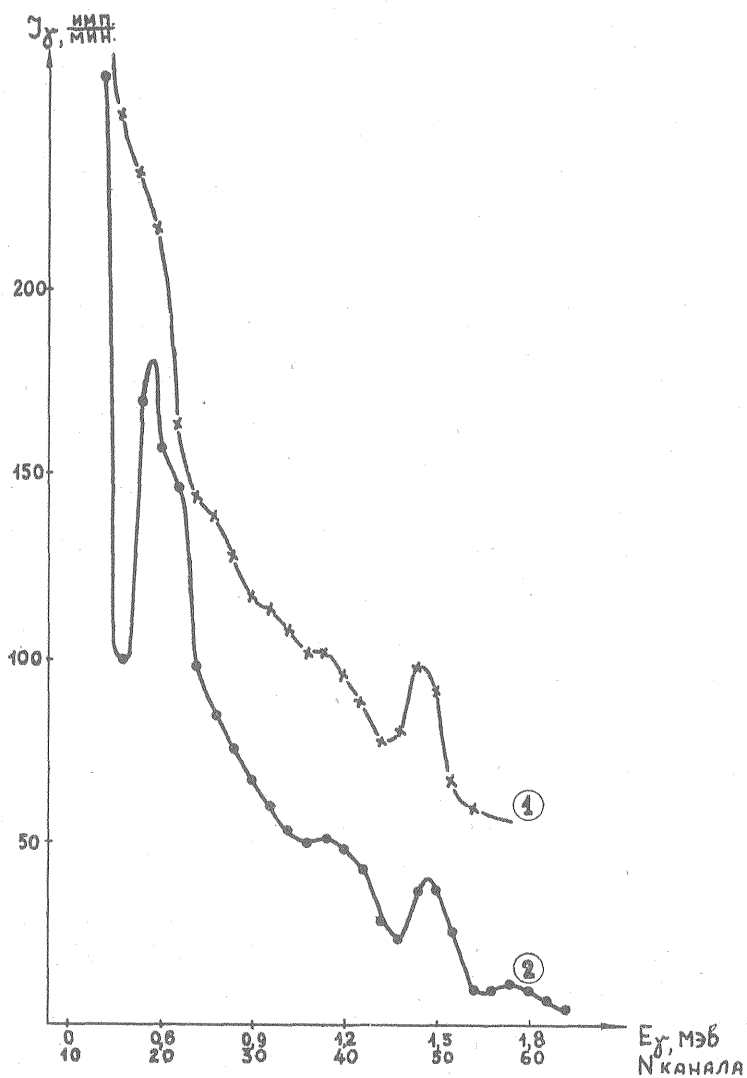
捕獲 $\gamma$ 線および放射化のスペクトルの測定を基礎に得られる鉱石の性質に関する知識は多くの場合天然 $\gamma$ 放射線スペクトルについてのデータを利用することによってさらに充実したものとなる。

とくに天然 $\gamma$ 線スペクトル測定は硫化ニッケル銅産地における他の鉱床の特性測定に利用された。第9図には2種類の鉱床—千枚岩変成橄欖岩—の天然 $\gamma$ 線スペクトルが示されている。 $\text{K}^{40}$ 放射線によって示される明瞭な最大値と RaC を示す最大値はいろいろな組成の混入鉱石を正確に同定することを可能にしている。

実際の孔井状況の天然放射性元素の $\gamma$ 線の実測スペクトル形の研究は、 $\gamma$ 線源の空間分布が多くの鉱石に等しく、非常な正確度で得られるということによって、著しく容易になった。このことは $\gamma$ 線の物質透過の近似測定の原理を使って、普通の鉱石の模型において、いろいろな密度あるいは成分の鉱床の放射性元素の標準 $\gamma$ 線スペクトルを得るのに役立つ。

ソ連邦の種々有用埋蔵物産地におけるスペクトル測定法の実験は鉱物の成分研究のため効果的に利用できることを実証している。

この方法の今後の基本的な問題は、鉱石の $\gamma$ 線の複雑で多量成分を含むスペクトルの測定(解読)方法を深めることにある。



第9図 ニッケル銅産地の鉱床の天然放射性γ線スペクトル  
 1—千枚岩  
 2—変成橄欖岩

文 献

1. Вяземский и др. - "Сцинтилляционный метод в радиометрии", Атомиздат, 1962 г.
2. Постельников А. Ф. - Опыт применения каротажа на месторождениях медно-никелевых руд Мончегорского района, Тр. МГРИ, т. 36, 1959 г.