

抄 録

553.495 : 550.835(203) + 539.164

空中放射能探査によるウラニウム・トリウム鉱床の探査と
ガンマ線異常の解釈について*

V. I. Baranob

小 西 善 治 訳

本論文はジュネーブで開かれた原子力平和会議の席上で発表されたソ連の空中放射能探査による鉱床探査方法である。

岩石中に含まれている放射性元素は、透過性のガンマ線を放出するとともに、ガス状エマネシオン、すなわちラドンとトロンを大気中に発散することが知られている。

ソ連では飛行機で放射性鉱物を探査する場合には2つの方法が使用されている。1つは空気中のイオン化測定 (areo-ionigation法) であり、他の1つはガンマ線測定方法 (areo-gamma法) である。第1の方法の物理的前提では、大気中のイオン化要因中で本質的な意味をもつものは、放射元素の放出する放射線であると仮定されている。地表附近のイオン化総数は次の成分からなっている。

$$\Sigma q = q_{\alpha+\beta} + q_{\gamma} + q_{Rn} + q_{Tn} + q_k + q_a$$

$q_{\alpha+\beta}$: 土壤中に存在する放射元素の α と β 線によるイオン化数; q_{γ} : 岩石の γ 線によつて発生するイオン化数; R_n と T_n のエマネシオンによるイオン化とそれの崩壊産物; q_k : 宇宙線によるイオン化数; q_a : 土壤の表面に附着する放射性沈澱物によるイオン化数;

飛行機の高度では、3イオン化要因、すなわち q_k , q_{γ} , q_{Rn} だけが顕著な影響を与える。

例えば、ソ連のある山嶽地域では次のイオンの平均値が求められている。この値は地表附近のイオン化の各要因の相対的値を特徴づけている。たゞし観測点の高度 150mとする。

イオン成分 (%)	q_k	q_{γ}	q_{Rn}	q_{Tn} その他
地 表	3.9	30.8	42.3	23
高 度 150 m	6.5	24.0	69.5	—

このようにして高度を増すと、イオン化要因中で最も問題となるのは q_{Rn} であつて、飛行高度における大気中のイオン化の変化はラドンの濃度変化を反映しているはずである。したがつてイオン化方法は、大気中の放射能を決定する単純な方法である。

土壤および大気中におけるラドンの拡散、準拡散分布の機構を考慮に入れると、種々の厚さをも

沖積層の厚さ (m)	2	5	8	10	11.5
大気中のイオン化の倍増を招くウラン濃度の%	1.510^{-3}	1.10^{-2}	0.1	0.3	1.0

つ脆弱な堆積物で覆われている岩石中のウランが次の濃度を示す場合には、大気下層のイオン化が倍増するのが観察されるはずである。

イオン化測定法によれば、ガンマ線測定法と異なり、含ウラン鉱石の全放射線量ばかりか、そのエマネシオンの能力も測定できる。

大気中のイオン化測定器具としては、導電流で作動する aspirant condenser を使用している。導電流は増幅後、自動記録テープに記録される。

イオン化測定法の実験によれば、既知のウラン鉱床に対して明確な放射能異常が求められることを示している。しかしこの測定法は、イオン化源の構成状態と大気中の空間電荷によつて放射能の(偽)異常値が大きくなる。そのほかにラドンとその崩壊産物が空気流で運ばれるので、異常値を正確に測定するのは困難である。イオン化測定法は現在特定の場合に使用され、一般に用いられて

* 原子力平和会議に発表

いる空中探査法はガンマ線測定法である。

ガンマ線放射法の観測対象は地表附近の大気層における岩石の放出するガンマ線である。上位の地層を構成する岩石中の放射性元素の含有量とその放射線とを直接結び付けることが空中探査法の出発点となる。

ガンマ線測定は、測定器械の面においてもまた使用方法について最も発達している測定法である。地上および地下のガンマ線探査によれば、調査結果の量的解釈、すなわち岩石中に含まれている放射能の含有量を地球物理学的測定器の指標によつて直接決定することが可能である。飛行機で探査する場合には、空気中におけるガンマ線の吸収、散乱と種々の特殊な障害とに関連して、地球物理学的解釈が困難となる。

実際の条件下では“延長をもつ物質の層”と初期ガンマ・光子の多重性スペクトル構造とが与えられているから飛行機の放射能測定に記録される放射線効果の計算には、周知のガンマ放射線の一般的な法則を利用するのが合理的である。

最も重要な要因は、延長をもつ地質学的媒質の測定点における強度（放射線）の変化とスペクトル微構造の変形（deformation）である。実際上の目的では多くの場合、吸収のある種の有効係数を考慮に入れた指数分布法則で満足されるようである。この吸収係数は、初期ガンマ線のスペクトル構造によつて異なってくる。

延長をもつ媒質—岩石から構成されている地域—を探査する場合には、飛行機の放射計の計数管（receiver）に及ぼすガンマ線の作用効果は次の函数関係を基礎において決定されるであろう。

$$I = K \epsilon \alpha^{-1} \int_{\Omega} e^{-\frac{\alpha F(z_0, \varphi, \theta)}{\cos \theta}} d\Omega \quad (1)$$

1 : ガンマ線の強度 ; ϵ : 放射性物質の集中度 ; z_0, φ, θ : 円錐座標

$$F(z_0, \varphi, \theta) = \int_0^{z_0} \rho(z, \theta, \varphi) dz$$

ρ : 媒質密度 ; μ : 有効吸収係数 ; $\alpha = \frac{\mu}{\rho}$; K : 常数初期ガンマ線の性質と測定単位とによつて異なる ; $d\Omega$: 立体角成分 ;

土壌表面のガンマ線の場の強度が地表上の放射線異常に対して I_0 に等しい場合には、次のようになる。

$$K \epsilon \alpha^{-1} = \frac{I_0}{2\pi} \quad (2)$$

吸収媒質—空気—の測点におけるガンマ線の強度を計算するには、境界面上における I_0 分布に基づいて、強度の分布と吸収媒質の密度とを知れば足りる。

(1)式によれば、飛行機の飛行高度のガンマ線強度について、類似の計算が多くの場合可能である。しかし求められた函数関係は、実際上において利用するには不適當である。

ガンマ線の場の地表上の任意の異常配置に対して、(2)式を考慮に入れて(1)式を積分するには、ノモグラフを利用すれば簡単にできる。實際上重要な場合では、肝要な線異常は、測定器に及ぼす影響の積分効果と異常の単位（長）当りの放射性物質の総量 Q との組み合わせで表わされる。これは次のように示すことができる。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} I(x) dx = \alpha Q \vartheta(\mu h) [\sin \varphi]^{-1} \quad (3)$$

$I(x)$: ガンマ線強度、または、高度 h 上のガイガー計数管または Scintillation counter の入力パルスの読み取り速度（計数值） ;

$\vartheta(h)$: 延長性をもつ同質の平坦な地域に対する $I(h)$ 値の変換函数 ;

φ : 飛行機の進行方向と線異常方向との間に生ずる角度 ;

α : 係数単位の選択によつて異なる ;

実在効果は、飛行機の放射能測定器によつて記録される。しかし多数の妨害要因、例えば空気中に存在する宇宙線、放射性エマネシヨンのガンマ線等が back ground に存在している。この back ground のイオンを除去するには、いわゆる 高度曲線をとることが重要な意味をもつてくる。h 高度におけるガンマ線の計数管の総計数値が既知であるならば、高度によつて変わる宇宙線の強度に関する既知のデーターを利用して、岩石が放出するガンマ線で生ずる計数値を明瞭に区別することができる。

妨害イオンが多数存在しているときには、岩石に固有なガンマ線の測定精度が著しく低下する。岩石の放出するガンマ線測定の平均自乗誤差は次のように表わされる。

$$\epsilon = \frac{\sqrt{(I_y + I_{\text{飛行機}} + I_{\text{Rn}}) \bar{q} + N_{\text{宇宙線}} + N_{\text{汚染(大気)}}}{\sqrt{2RC} I_y q} \quad (4)$$

q : ガンマ線の計数管の感度;

RC: 測定器具の時定数 [R-C 結合回路] characteristic;

観察誤差を減らすには種々の方法によつてゐる。宇宙線の影響を減らす目的で、ガイガー計数管の電圧を高くしてイオンが再結合を起して生じた電子を中心線に集める回路様式が利用されている。

(4)式からみられるように計数装置の密度が妨害放射線より有効放射線に対して遙かに高い場合に本質的にみて好ましい結果が求められる。これは Scintillation counter と重金属陰極 Gaseous counter を使用すれば得られる。

$I_y = I_y(h)$ が既知であるならば、高度補正では容易に計算される。

空中ガンマ線探査法を実施する際には、高度は連続的に高度指標を記録する Sound-ranging altimeter によつて測定される。高度補正は次の方法で行われる。

(1) 飛行高度の曲線記録によつて計算 (ノモグラフ) する。

(2) 起伏に富む地形の飛行度ならびに海面上の飛行機の位置を考慮に入れられている特殊の電子回路によつて飛行中に自動的に補正を行う。

Scintillation counter を利用すれば、1 高度曲線ではなく、曲線系列が求められる。したがつて各曲線系は Scintillation counter の読みの識別に役立つ。このようにして有効放射線が決定され、高度補正が行われ、妨害要因も上述の探査法と同様に除去される。飛行機の放射能測定計 (ガイガー計数管 Scintillation counter の蛍光体) のガンマ線の計数回路で発生する入力パルスを記録する経過は、本質的にみて影響のあるのは飛行機の放射能測定器の慣性抵抗である。この慣性抵抗の計算は、急速に変換されるガンマ線の場を記録する際に特に重要となつてくる。

固定式放射計では、入力パルスの平均計数値は、R-C 結合回路の時定数を積分して求められる。この場合測定器具の慣性抵抗の補正は、次の函数関係から求められた特殊のノモグラフを利用して行う。

$$KN = i_R + RC \frac{di_R}{dt} \quad (5)$$

N : 入力パルスの平均読み取り値;

i_R : R 抵抗を通過して流れる平均電流値;

K : 係数; 測定装置の固定と単位の選び方により異なる。

ある種の実験放射測定器では、測定器具の慣性抵抗の影響を少なくするために、R-C 結合の時定数が自動的に変化する方法を利用している。この場合に $\frac{di_R}{dt} \cong d$ となると、R-C 結合回路が自動的に close される。したがつて局部異常 (d —与えられた大きさ) が、さらに適時に、かつ明確に区別できる。

山嶽地帯での空中探査では、ガンマ線の場の本質的な歪みは、土地の起伏によつて発生する高度 100m の場合には、浅い谷と 10~20m 級の丘陵地帯ではガンマ線の場の変形が存在しないものといえよう。したがつて円錐体状の隆起地塊では、ガンマ線の場 AI の増加級数は、近似的に次のように表わされるであろう。

$$\Delta I = I_0 \left\{ \phi(\mu h_1) - \phi(\mu h) - \cos\theta \left[\phi\left(\frac{\mu h_1}{\cos\theta}\right) - \phi\left(\frac{\mu h}{\cos\theta}\right) \right] \right\} \quad (6)$$

ϕ : King の函数; 高度 $h_1 = 100\text{m}$, 丘陵の高さ $h = 50\text{m}$, その頂上の傾斜角 $\theta = 45^\circ$, 相対的増加は 6~7% である。

土地の起伏の影響を決定するすべての近似計算には特殊のノモグラフによって行っている。飛行機の放射測定器と Sound ranging altimeter との方向図表が手近にある場合には、起伏の影響の計算は上述の高度補正法の一つを利用して行う。ソ連の飛行機およびヘリコプターで利用している Sounding ranging altimeter では、土地の起伏の傾斜角度が $45 \sim 50^\circ$ を超えない場合には、起伏の影響の類似の計算は充分満足な結果が求められている。複雑な山嶽地域の空中探査作業では、起伏影響の計算はきわめて困難である。この場合には、起伏の型態によって特殊の途中着陸航法を用いている。

放射性鉍石を探査する際の重要な課題は、飛行機でウランとトリウム異常を直接識別するにある。この方向における作業には種々のスペクトル指標を測定する装置をもつガイガー計数管が、discriminator 回路をもつ Scintillation Counter を利用して行っている。

研究対象が飛行高度で充分強度のガンマ線の場合が形成される場合には鉍床の性質の決定は確実に行える。

空中探査・探査法の組織

飛行機によって放射性鉍石を探査するために見込みのある地域を選ぶ際には、地体構造の解析、鉍床の成因研究と古地理解析が基礎に置かれる。

探査にあたっては、熟練せる地質家と地球物理学者が空中探査班を組織し、3階梯にわたって行われる。(1)異常探査。(2)異常帯に沿った鉍床の調査。(3)鉍床の評価。

空中探査隊は地質家が主宰し、そのなかに地上班、飛行班が入る。前者の数は、すべて明らかにされた異常帯の評価を、有効期間内に探査隊の力で完遂できるように計算して決められる。

空中探査隊には、軽量の boring machine と compressor とが備付けられている。これらの機械は自動車上で組み立てられる。

空中探査を遂行する以前に、飛行機で概査を行う。これは、地形・地質の観察を行うとともに、探査地域に特徴的な種々の岩石の放出する放射能 (back ground) の水準を決定しておくのが目的である。飛行機の進行方向は、地質要素の延長と、現場および地図上に存在する目標物の位置とをにらみ合して選ばれる。

種々の地域で行われている主要探査網方式は、高度約 50m, 長さ 20~40 km, 測線 [間隔] 平均 250m である。起伏が山嶽地域では地質学的観点からみて必要な方向に水平探査を行うことを阻む。したがって計画的に空中探査を行うのには、まず第1に、起伏の特性を知り作業高度を維持することが必要である。この条件を充すためにヘリコプターが用いられる。異常地帯とその位置とを正確に知るために航空写真測量が利用される。

飛行機によって求められたデータ (測定器具記録テープ) は、地球物理班で纏められる。纏めあげる際には、飛行高度、異常地帯の起伏、測定器具の抵抗補正について補正が行われる。このようにしてできあがった地球物理学データは地質図に投影される。

興味の対象である異常地域に対しては、詳細な空中放射能異常図を作り、地表上の物理探査 (ガンマ線測定, エマネシオン測定), 地質調査, ボーリング作業に着手する。

ガンマ線異常の解釈

放射能地域で測定器械によって記録されるガンマ線の異常の場の強度と規模は多くの要因によって異なる。(1)ガンマ線の地表上の強度と異常地帯の分布状態。(2)異常地帯の規模と配置状態。

(3)放射源の性質。

空中探査の実際の作業は、異常地帯の大部分が、稼行対象となる鉍床と関連性をもっていないことを示している。したがってすべてのガンマ異常調査は、生産的な労働と資材の支出に導く。

異常現象の解釈にあたって第1になすべき課題は、地質学的、地球物理学的データを総合して

地上の調査研究を必要としないような見込みのない異常現象を送別することである。この課題は、経験的方法で確かめられる多数の局地インジケータを基にし、各地域の具体条件に応じて決定される。

例えば、見込みのない場合としては、同一岩石種の種々の構造、組織例えば粗粒、細粒花崗岩が存在するために発生する異常現象があげられる。さらにまた組成の異なる岩石が共存している場合(石灰岩中の珪長質斑岩脈)にも異常が認められる。

第1に注目する必要があるこの種の異常インジケータは、比較的容易に指摘される。

異常現象中で見込みのありそうなインジケータの1つは同一岩石型の **back ground** のある所での局地的に放射能の異常をきたす場合である。見込みのある異常現象は、ウランの存在で放射能の上昇を起している地域で認められる。平坦な地域かあるいはなだらかな丘陵地域では、その上を厚い沖積層で覆われ、そのために鉱体と基盤岩石とがきわめて小地域に露出している際でも、広範囲な地域でウラン鉱床を見附けることが可能である。このような地域では放射能が中位かときには低い場合でも鉱床が発見できる可能性がある。

基盤岩石が脆弱な岩石層で被覆されている地域では、放射能の著しい上昇を招く水源に注意すべきである。擾乱作用を受けている地帯および鉱化作用の行われている地帯で、特に炭酸塩質岩石と基性岩石型の発達している箇所で見られる異常は、見込みのあるインジケータとなる。さらにこれらの地帯では酸性の火成岩、火山岩が存在している場合でも放射能異常はインジケータとなる。特に興味のあるのは、調査地域の岩石の色調変化である。例えば漂白されているのは、アルカリ性の熱水溶液が働いたことを示し、赤色と褐赤色を呈しているのは、酸化鉄に富んでいることを示している。

ガンマ線の場の強度が著しく低い場合でも、堆積岩層中の含放射性鉱石層が地層学的にみて延長がきくときには、放射能異常は見込みのあるインジケータとなるであろう。

放射能異常の見透しを考える場合には、他の有用鉱物による放射能の上昇の可能性もまた考えにいれるべきである。

見込みのないことが十分に確かめられていない地域で異常を明確に区別するには、あらかじめ地表調査、まず第1に物理探査を行い、空中探査データと地質学的インジケータを基礎において識別すべきである。

空中探査の諸データを解釈して最終結論をだす前には、まず各放射能異常と鉱床の賦存とを結び付ける局地インジケータを確かめることが必要である。

飛行機でウランとトリウム鉱床の探査を実施した経験と、その結果に関する解釈からみて次のことがいえる。すなわち鉱床と母岩の放射能の上昇との連関性は必ずしも認められない。さらに岩石の放射能の上昇も、主要な探査の指針として役立つ。任意の放射能を広域にわたってみられる地域では、一樣に見込みのあることを示している。

したがってあらゆる物理探査、地質探査データおよび局地インジケータとを対比しないで、異常の形態とその強度とのみにたよって放射能異常を判断することは不可能である。空中放射能探査の解釈方法を完全にする研究が続けられている。

実際上では、地表面の放射能の強度とに関係なく、実際上問題となっているあらゆる地域の解明ができるような次の探査方法がとりあげられている。

(1) 空中放射能探査過程では、繰り返し飛行を行い、高度を低下させ、探査網の密度を細くすることによって異常地帯の精査を行うこと。

(2) 異常記録の解釈と地質学的結び付き。

(3) 放射能探査を含む異常地帯の地表探査、異常を裏づけるに足る試掘坑道探査とボーリング探査を行うこと。

これに関連して、破碎帯、種々の岩石の接触面、貫入岩系の分布地域等が空中放射能探査によって明らかに認められたときには、地質家はこれらの諸データを与えられた地域の地質構造を確認する資料として利用している。多くの地域では、空中ガンマ線探査法と空中磁気探査法とが、組み合わせられて探査が進められている。