

7. 自然放射線と放射能鉱物

[目的] 身の周りに放射線があることを学び、その放射線の種類を区別する方法を考える。

[解説]

1. 同位体

原子は、原子核とそのまわりを取り囲む電子とからなる。原子核は、正の電荷をもつ陽子と、電荷をもたない中性子とからなる。電子の質量は原子核に比べて非常に小さい。また、陽子1個と中性子1個の質量は、ほぼ等しい。よって、その原子の質量は、原子核を構成している核子（陽子と中性子）の数にほぼ比例する。この陽子と中性子の個数の和を質量数といい、同じ元素でも質量数の違う原子を同位体と呼ぶ。同位体を区別して表すために、元素記号の左上に質量数を書く。原子番号も表示したい場合は、

元素記号の左下に示す。例えば、 ${}_{92}^{238}\text{U}$ は、質量数 238 のウラン原子（原子番号 92）を表す。

表 1. ウランの同位体の存在比と半減期

同位体	存在比(wt%)	半減期	崩壊生成物のうち自然放射線への寄与の大きいもの
${}^{234}\text{U}$	0.0055	24.5 万年	α 線源： ${}^{222}\text{Rn}$, ${}^{218}\text{Po}$, ${}^{214}\text{Po}$, γ 線源： ${}^{222}\text{Rn}$, ${}^{214}\text{Pb}$, ${}^{214}\text{Bi}$
${}^{235}\text{U}$	0.72	7.04 億年	
${}^{238}\text{U}$	99.27	44.7 億年	

2. 放射線

ある特定の原子の同位体は、自発的に分裂し、その際に粒子や電磁波を放出する。これらの放射線の中で α 線、 β 線、 γ 線が代表的なものである。 α 線はヘリウムの原子核、 β 線は電子、 γ 線は波長の短い電磁波である。 γ 線は、通常のレントゲン写真に使う X 線よりは波長が短く、物質に対する透過性が高い。

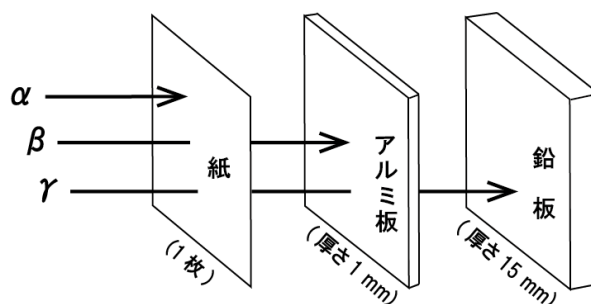
α 線は物質に入射すると、その一部は物質中の原子核との反発によって弾性散乱されるが、大部分は直進する。 α 線は電荷をもった質量の

大きい粒子であり、物質中を通過する際に、原子の電子を引きはがしたり、励起したりする。それに伴い、運動エネルギーが急速に減少する。 α 線は通過力が弱くて空気中を 3~4 cm 程しか進めない。 α 線の到達距離（これを飛程という）は、物質の密度に反比例して短くなるため、空気に比べて、液体あるいは固体中の飛程は 3 桁ほど小さくなる。このため、 α 線は薄い紙 1 枚でほとんど遮断される。

β 線も、物質中の原子の核外電子と静電的な相互作用を起して、電離や励起を引き起こすが、 β 線は質量が小さいため、進む方向が曲がり、ジグザク運動となる。空気中の飛程は数 m 程度である。 β 線は運動エネルギーの異なる電子からなり、それが物質に入射すると、エネルギーの低い電子から順に遮断されていく。物質による β 線の吸収は、実際に単純な指数関数で近似できることがわかっている。入射線の強度を I_0 、厚さ x の物質（線吸収係数 μ ）を通過した後の強度を I とすると、次のように書ける。

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

物質の厚さを非常に小さくて Δx としたときは、次のように近似できる。



※アルミ板の代わりに、プラスチック板（厚さ数 mm ~ 1 cm）でもよい。

図 1. 放射線の遮へい

$$I/I_0 = \exp(-\mu \Delta x) \approx 1 - \mu \Delta x \quad (2)$$

図1において、 β 線はあたかも紙を素通りしているかのように見えるが、幾分減衰している。(2)式より、紙による β 線の強度減衰の程度は紙の枚数に比例すると推定できる。 β 線を紙で遮断するには本1冊の厚さが必要となるが、そのかわりにアルミ板(厚さ1 mm)かあるいはプラスチック板(厚さ数 mm から1 cm)でもよい。

γ 線の場合、そのエネルギーに応じて、物質に対する線吸収係数 μ が決まってくる。物質を通過したことによる強度減衰は、式(1)で表せる。一般的に物質の原子番号が大きい程、そして γ 線のエネルギーが小さい程、 γ 線が物質を透過しにくくなるといえる。 γ 線は透過力が強いので、それを防ぐには厚さ数 cm の鉛板が使われる。

ガイガーカウンターは、放射線がガイガー管を通過するときに、電流のパルスが発生することを利用して、放射線の数を計測する。インスペクター(商品名)では、 α 、 β 、および γ 線をすべて合算して検出する(P18)。 γ 線のみを検出したい場合、鉄板で受光窓をふさぐ。なお、ガイガーカウンターの一般的な傾向として、 α 線と β 線に比べ、 γ 線の計測効率は非常に低い。これは、ガイガー管に封入されている気体と γ 線との相互作用が弱いので、ほとんどの γ 線が素通りしてしまうからである。

放射線の発生の原因は、原子核の崩壊などであり、それは一定の確率で起こっている。たとえば、放射線を5分間、まったく同じ条件で測定をくり返しても、カウント数は統計的な変動を示す。計測したカウント数をNとすると、その統計誤差は \sqrt{N} で表される。つまり、N=100のときの誤差は10%、N=10000のときは1%であり、強度が強いほど、測定データの精度が高くなる。なお、空気による吸収などの影響を無視すると、一般的に放射線の強さIは放射線源からの距離dの二乗に反比例する。

3. 自然放射線

自然の状態微量に存在する放射線を自然放射線という。日本での自然放射線量は1年間で約0.5~1.1 mSv(世界平均のおよそ2/3)である。これを1時間あたりに直すと、 $1.1 \times 10^3 / (365 \times 24) = 0.13$ (μ Sv/hr)となる。ただし、線量計で測定できるのは、外部被曝の部分だけである(表2)。なお、シーベルト(記号Sv)とは、放射線が人間や生物に与える影響の大きさを表す単位である。国際放射線防護委員会は、一般公衆が受ける放射線(自然放射線および医療目的以外)の限度を1年間に1 mSvと定めている。インスペクターの測定モードで μ Sv/hr単位を選んだときに表示される値は、放射線が ^{137}Cs からの γ 線であると仮定してカウント数を換算しているだけなので、相対的な放射線の強さの目安にしかすぎない。

表2. 自然放射線源による被ばく(世界の平均値)

分類	原因	自然放射線による被ばく線量(mSv/年)	線量計で測定できる部分
外部被曝	宇宙線	0.38	○
	大地等	0.46	○
内部被曝	空気中のラドン等の吸入(*)	1.28	
	食物摂取	0.24	
	合計	約2.4	

(*) 自然放射線の約半分は、空気中のラドン(^{222}Rn)が壊変して生成した核種の吸入による。

4. 自然における放射性元素

地球誕生時から、ウランは天然に存在する。花崗岩や玄武岩などの岩石中にはカリウム(^{40}K)および微量のウラン(^{238}U)やトリウム(^{232}Th)が含まれており、それらが放射線を出す。カリウムの同位体 ^{40}K の存在比は0.01%であり、カリウムを多く含む食品として乾燥昆布が知られている。

原子核が、自然に粒子あるいは電磁波を出して別の元素に変わる現象を、放射性崩壊という。主要な型に、 α 崩壊、 β^- 崩壊などがある。 α 崩壊では、 α 粒子が1個放出されることで、原子番号が2、質量数が4だけ減少する。 β^- 崩壊では、中性子が陽子に変る際に電子が1個放出され、原子番号が1だけ増加する。 α 崩壊や β^- 崩壊の結果生じた原子核の多くはエネルギーが高い状態にあり、引き続いて γ 線を出すものが多い(γ 線を放出しても、原子番号と質量数は変わらない)。出発物質が徐々に別の物質に変わっていくときに、始めの量の半分になるまでの時間を半減期という。放射性元素の壊変は一定速度で起こるため、それをもとに岩石などの年代を調べることができる。

表3. カリウムの同位体の存在比と放出される放射線

同位体の存在比 (および半減期)*1)	壊変形式 (および比率)	放出される 放射線	生じる 核種*2)
^{39}K 93.2581%	—		
^{41}K 6.7302%	—		
$^{40}_{19}\text{K}$ 0.0117% (1.277×10^9 年)	β^- (89.28%)	β^-	$^{40}_{20}\text{Ca}$
	EC (10.72%)	γ	$^{40}_{18}\text{Ar}$

*1) ^{39}K と ^{41}K の半減期は ∞ (つまり安定な核種)。

*2) β^- 壊変では原子番号が1つ増え、EC (電子捕獲) では原子番号が1つ下がる。

5. 放射能鉱物標本

ユークセン石はウラン-トリウム混合鉱物である(表4)。モナズ石やベタフォ石にもウランやトリウムが含まれている。なお、同じ種類の鉱物であっても、産地によって化学組成が違ってくる。アウトドア用品であるランタン(ガスなどを燃料とするランプ)のマントルには、微量のトリウムが含まれているものもある。これは、放射線の電離作用を利用して炎を白っぽくみせるためである。トリウム(^{232}Th)は α 崩壊してラジウム(^{228}Ra)になり、さらに順次壊変して最終的に鉛(^{208}Pb)となる(表5)。

表4. 放射能鉱物標本

鉱物名	産地	化学成分
ユークセン石	Arendal, Norway	(Y, Ca, Ce, U, Th) (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆
モナズ石	Bahia, Brazil	(Ce, La, Nd, Th)PO ₄
ベタフォ石	Betafo, Madagascar	(Ca, Na, U) ₂ (Ti, Nb, Ta) ₂ O ₆ (OH)

表5. トリウムの放射性同位体系列*)

No.	核種の半減期	壊変形式 (および比率)	放出される 放射線	生じる核種
1	$^{232}_{90}\text{Th}$ 1.405×10^{10} 年	α (100%)	α , γ	$^{228}_{88}\text{Ra}$
2	$^{228}_{88}\text{Ra}$ 5.75 年	β^- (100%)	β^- , γ	$^{228}_{89}\text{Ac}$
3	$^{228}_{89}\text{Ac}$ 6.13 時間	β^- (約 100%)	β^- , γ	$^{228}_{90}\text{Th}$
4	$^{228}_{90}\text{Th}$ 1.913 年	α (100%)	α , γ	$^{224}_{88}\text{Ra}$
5	$^{224}_{88}\text{Ra}$ 3.66 日	α (100%)	α , γ	$^{220}_{86}\text{Rn}$
6	$^{220}_{86}\text{Rn}$ 55.6 秒	α (100%)	α , γ	$^{216}_{84}\text{Po}$
7	$^{216}_{84}\text{Po}$ 0.145 秒	α (100%)	α , γ	$^{212}_{82}\text{Pb}$
8	$^{212}_{82}\text{Pb}$ 10.64 時間	β^- (100%)	β^- , γ	$^{212}_{83}\text{Bi}$
9	$^{212}_{83}\text{Bi}$ 60.6 分	β^- (64.1%)	β^- , γ	$^{212}_{84}\text{Po}$
		α (35.9%)	α , γ	$^{208}_{81}\text{Tl}$
10-1	$^{212}_{84}\text{Po}$ 0.299×10^{-6} 秒	α (100%)	α , γ	$^{208}_{82}\text{Pb}$
10-2	$^{208}_{81}\text{Tl}$ 3.053 分	β^- (100%)	β^- , γ	$^{208}_{82}\text{Pb}$
11	$^{208}_{82}\text{Pb}$ ∞ (安定)	—		

*) トリウムの同位体の存在比は、 ^{232}Th が 100%。

[実験]

1. バックグラウンドの測定

何もないときの放射線の強さをインスペクター (P18) で測定する。鉄板なしで 5 分間計測し、cpm 単位に直す。¹⁾ 同様に、鉄板ありでも測定してみる。

2. 放射線の判別

身の回りにあるもので、放射能がバックグラウンドよりも高いものをさがしてみる。例としては、昆布など (カリウムを多く含む)。この場合、放射線は比較的弱いことがわかっているので、インスペクターには鉄板はつけず、また、検出窓を汚さないために 1 cm 幅のスペーサーを用いる (図 2)。測定モードを“CPM”にし、塩化カリウム KCl の粉末からは、昆布に比べて強い放射線が放出されていることをクリック音などから確認する。また、計測されている放射線が α 、 β 、 γ 線のうちのどれが主であるのか、実験操作を工夫して判別する。すなわち、対象物からインスペクターまでの距離を一定に保った状態で、間に遮へい物を入れたときの強度変化を調べる (図 3)。遮へい物として、アクリル板 (厚さ 2 mm)、アルミ板 (厚さ 0.5 mm) および紙がそれぞれ何枚か用意してある。遮へい材を 1 枚 2 枚と増やしたときに、遮へい物がないときと比べて、強度がかなり減少した場合、放射線の特定の成分がその遮へい物によって遮断されたことがわかる (図 1 を参照)。²⁾ 同じように、マントル (微量のトリウムを含む) から比較的強い放射線が出ていることを確認し、その検出されている主要な成分が α 、 β 、 γ 線のどれであるのかを判別する。

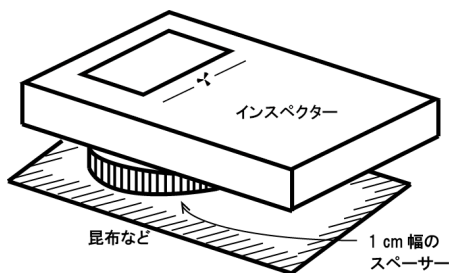


図 2. 身のまわりの物質の放射線チェック

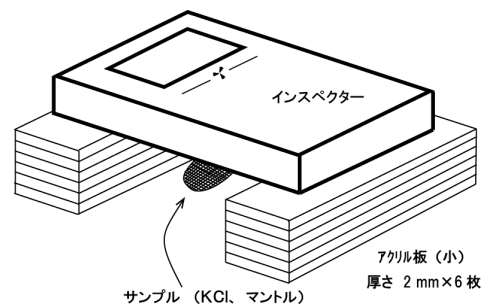


図 3. 遮へい材を間に入れるときの配置

3. γ 線強度の距離依存性

インスペクターに鉄板を (輪ゴムで) とりつけ、放射能鉱物標本の個々の種類と大きさや形を確かめながら、鉄板を通してインスペクターをあてがい、放射線の強さを大づかみに比較する。³⁾ 鉱物標本の中で放射線が最も強いものを選び、その γ 線の強さが距離の 2 乗に反比例するか調べる。距離は 10, 14, 18, 25, 35, 70 cm とし、1 分間づつタイマー測定を行う。⁴⁾

1) cpm は counts per minute (1 分あたり)、cps は counts per second (1 秒あたりの計測数)。インスペクターの“CPM CPS”測定モードでは、CPM 単位で表示するようにあらかじめ設定してある。

2) 紙 1 枚によって α 線だけでなく、 β 線もある程度減衰する。なお、遮へい材を差し込むときに、サンプルを押して位置を動かしてしまうと、そのためにカウント数が下がってしまうので気をつける。

3) 放射能鉱物標本はビニール袋に入れてあるが、それを取り出さずにそのまま使用すること。これは、破片の粉末が手や口から体内に入ることを防ぐためである。また、インスペクターのクリック音を強く鳴らし続けると電池が消耗する。音が不要なときは電源スイッチを“audio”から“on”に切り替えること。

4) インスペクターの検出窓を、きちんとサンプルの方向に向けること。また、近くに別の放射能鉱物標本があると、バックグラウンドが異常に高くなってしまうので遠ざけること。

4. 放射性元素の崩壊速度のシミュレーション

サイコロを使って、放射性元素壊変のモデル実験を行う（サイコロを放射性元素とみなす）。

- ①サイコロ 100 個を振って、1 の目が出たものを数えながら取り除く。⁵⁾
- ②残ったサイコロをまとめて振り、1 の目が出たものを数えながら取り除く（サイコロの個数が段々少なくなっていくが、この操作を 12 回くり返す）。
- ③ n 回サイコロを振った後に残っているサイコロの個数を Y_n とすると、その推定値は $Y_{n, \text{calc}} = Y_0 (5/6)^n$ と書ける。ここで、 $Y_0 = 100$ である。グラフの横軸に n 、縦軸に Y_n をとり、測定値をそれにプロットして、それを通る曲線を描く。
- ④ ^{238}U の半減期は 44.7 億年である。この壊変の様子を今回のグラフの曲線に対応させたとき、サイコロを 1 回振ることは、何億年経過したことに相当するか考える。⁶⁾

サイコロを振った回数, n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 の目が出た個数	—												
残ったサイコロの個数, Y_n	100												

[課題]

1. 光の強度は放射線と同様に、光源からの距離の 2 乗に反比例する。この理由を考えなさい。
2. 人体には体重の約 0.2% のカリウム K が含まれている。そのうちの 0.012% が放射性的 ^{40}K である（半減期 12.8 億年）。 ^{40}K は崩壊して、 β 線と γ 線を出す。何の原子に変わるのだろうか。

5) 最初にサイコロが 100 個あることを確認すること。

6) サイコロが半減して 50 個になるのは、サイコロを何回振ったときに対応するかをグラフから読む（整数とは限らない）。