

地球上に存在しつづけてきた放射性元素 岩石と放射線I

佐野 俊一

本稿は 岩石の物性に関する講座の一部として企画された。しかし 岩石の放射能については 現在では おもに地殻のなかの放射性元素の分布と移動に関する地球化学の研究としてとりあげられている。一方 放射性元素からの放射線はいろいろな作用を物質におよぼし とくに 熱の発生は地球の内部構造をかたちづかった原動力であったときえかんがえられるようになった。

また 人工の放射線を利用して地層の物理的性質を測定する技術もすすんでいる。そこで 本稿は岩石と放射線に関するいろいろな現象についてひろくとりあげて 解説することを目標にしてかきはじめた。放射能や放射線に関する知識は 断片的にしる 今日ではかなりひろまっているとおもわれる。まず 原子核や放射線についての基本的なことがらを整理することからはじめよう。

ガイガー・カウンタのバックグラウンド

放射能というと まずガイガー・カウンタを連想するが ひとくちにガイガー・カウンタといってもいろいろな型がある。カウント数をしめすのにメータのはりがふれるもの ランプが明滅するもの 数字がしめされるもの あるいはおとだけがきこえるものもある。いずれにしても 放射性物質をちかづけると はげしい反応をしめすが それをとおざけても わずかながらカウントしている。このわずかなカウント数は おもに地球のそとからとんでくる放射線 すなわち宇宙線によるものであって バックグラウンド とよぶと説明するのがふつうである。

ところで 携帯用のガイガー・カウンタでバックグラウンドをていねいにはかると 場所によってずいぶんちがうことがわかる。第2図は岐阜県恵那郡の苗木地域で 道路ぎわに岩石が露出しているところにカウンタをおいてはかったあたいをしめしたものである。測定値はかなり変化しているが 岩石の種類ごとにまとめると 黒雲母花崗岩のうえでは 花崗斑岩や石英斑岩のうえよ

り大きなあたいがえられたことがわかる。

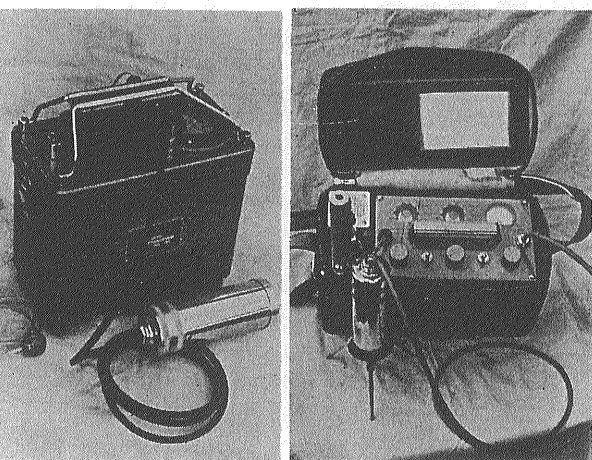
一方 宇宙線のつよさはわずかな場所のちがいによってかわらないから バックグラウンドのカウント数には宇宙線のほかに カウンタをおいた場所のちかくの物質にふくまれている放射性元素の影響があることがわかる。このように ふつうの岩石でも微量の放射性元素をふくんでいる すなわち わずかながら放射能をもっているのである。そして岩石の種類や性質によって放射能のつよさがちがうのである。

岩石にふくまれている放射性元素としてウラン トリウムあるいはラジウムなどがよく知られている。こういう天然に存在する放射性元素には どんなものがあるかを調べてみよう。

原子と原子核

さて 物質の化学的な要素は 元素 であるが 元素に対応する物質的な要素は 原子 である。原子は 原子核 とそのまわりをまわっている 電子 とからなりたっている。原子の大きさは電子の運動の軌道のひろがりであって だいたい1億分の1センチメートルである。原子核はそれよりずっとちいさく 原子の10万分1のぐらいの大きさである。しかし 原子の質量は大部分原子核に集中している。

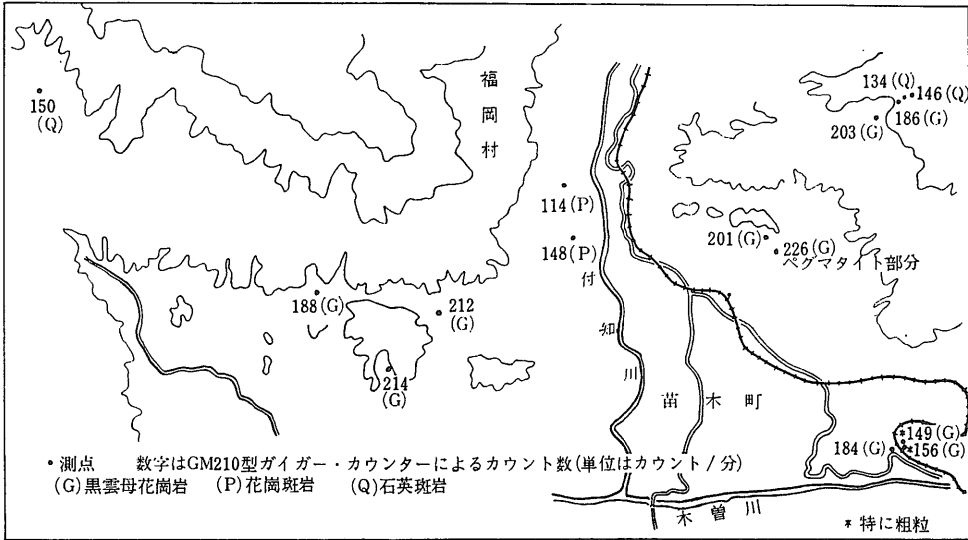
原子核は陽電気をもっており 電子は負の電気をもっていて ふつうの原子は全体として中性である。元素としての性質は原子核のもつ陽電気の量 したがって原子が中性の場合の電子のちがひによってきまる。中性の原子からいくつかの電子がひきはなされたり ぎやくにひきつけたりして 電気をもっている状態をイオンという。イオンになっても原子核の状態にはなんらの変化もない。



第1図 携帯用のガイガー・カウンタ

④毎分のカウント数がメータでしめされる 日本無線理医学製 DC-P10

⑧カウント数をデカトロンで示す精密測定に適す 日本無線理医学製 DC-P3型



第2図 岐阜県苗木地方に露出する岩石の放射能一大型ガイガーカウンタによるカウント数

原子と原子とが結合して 分子 をつくるときは 原子核からはなれたそとのほうにある電子の作用によってむすびつく。したがって 分子をつくった場合でも原子核のあいだの距離はその大きさの1万倍ぐらいであって 原子核は変化をうけない。化学反応で元素が不滅であるのはこのためである。

原子のなかで電子が原子核のまわりを運動している場合には ある特殊なエネルギーの状態だけが実際に存在し どんな状態にもなるというわけにはゆかない。原子のエネルギー状態が変わると 前後の2つの状態の差のエネルギーが電磁波 つまり光として放出され あるいは吸収される。光の振動数はエネルギーに比例し 原子のエネルギー状態は元素によってきまるから 原子が放出したり吸収したりする光のスペクトル線は 元素によって一定である。

原子のエネルギー状態の変化が大きくなると 光の振動数は大きくなる。つまり波長がみじかくなり 目にみえる光よりちがった性質をしめすようになる。これを X線 といい 原子核にちかい うちがわの電子の状態の変化にともなって放出・吸収がおこる。

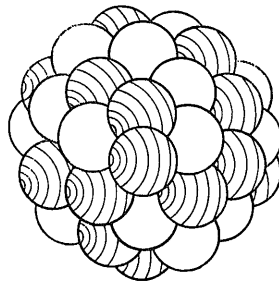
原子核のくみたち

ところで 原子核は 陽子 および 中性子 という2種類の粒子からできている。陽子は陽電気をもって その電気量は電子とおなじであるが 質量は電子の1,840倍である。中性子は電氣的に中性で 質量は陽子とほとんどおなじである。だから原子核は全体として陽電気をもって そとがわの電子をひきつけているのである。

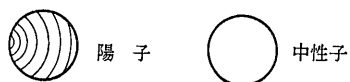
ある原子核の陽子のかずをZとすると Zはそとがわをまわっている核外電子のかずにとひとしく 全体としての原子の性質はZできまる。たとえばZが1の原子核は水素の原子核で これは陽子そのものである。Zが16の場合は酸素である。だからZを 原子番号 という。つぎにある原子核の中性子のかずをNとすると 陽子と中性子の総数AはZとNとの和で 原子核の質量にはほぼ比例する。電子の質量はずっとちいさいから 原子の質量に比例するとかがえてもさしつかえない。Aを 質量数 とよぶ。

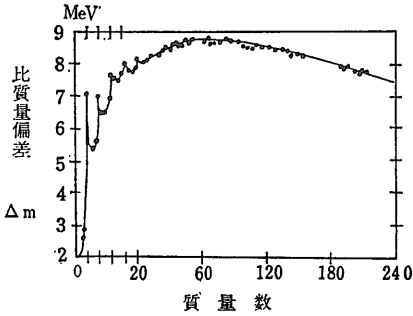
ところが 原子核の質量は陽子と中性子の質量の総和にならないで それよりすこしちいさい。このちがいを 質量偏差 という。ばらばらになっていた陽子と中性子がむすびついて原子核をつくるとき なにかのあたりでエネルギーをそとへだして エネルギーのひくい状態にうつる。一方質量と光の速度の自乗との積は エネルギーにひとしいという関係があるので 結合によって放出されるエネルギーに相当する質量偏差が生ずることになるのである。

原子がむすびついて分子をつくるときも おなじこと



第3図 原子核の模型 原子の場合電子は原子核のまわりを回っているが原子核をくみたちしている陽子や中性子はよりあつまって小さな水滴が集って大きな水滴を作る様子に似ている





第4図 安定な原子核の比質量偏差
 (質量偏差を質量数で割ったもの) 質量数との関係
 比質量偏差は核子(陽子または中性子)1個あたりの結合エネルギーに対応すると考えられる

がおこるのであるが 結合のエネルギーがちいさくはかることができない. ところが たとえばリチウムの原子核に陽子が結合して リチウムの原子核が2つできる場合に生ずるエネルギーは ヘリウム1モルについて約18ミリグラムに相当するので 十分測定できる. またイオンのながれを電場や磁場のなかにおして そのまがりかたから原子の質量を精密にはかることができる.

質量偏差はこの方法によって発見されたのである. このように 原子の質量を詳しく測定することは 原子核の構造をしらべるために大切なことである.

同位元素と核種

原子核の種類は陽子と中性子のかずで定められる. しかし 原子核の種類をあらわすには陽子のかず Z すなわち電荷に比例する量と質量数 A とをもちいる. 現在しられている原子核の種類は 800 をこしているが それらの原子番号 Z は最高 102 までで Z がおなじで A がちがう原子核がいくつかある. こういう原子核を **同位体** といい 同位体からなる元素を **同位元素** というのである. たとえば 天然に存在するコバルト

は A が 59 で これと A が 60 のコバルト 60 とは同位体であり いずれも Z は 27 である.

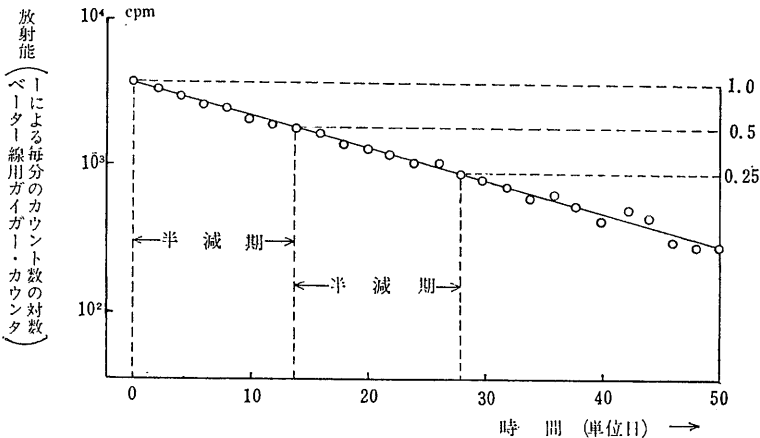
多くの原子核のなかには 外部から大きな刺激が作用しなければいつまでも存在しつづけているものと いかは自分自身でこわれてほかの種類原子核になり あるかぎられた時間しか存在できないものがある. 前者を安定な原子核 後者を準安定な原子核あるいは放射性原子核という. これを原子核のあつまり つまり元素の性質としてみれば 前者に対応するものを **安定同位元素** 後者に対応するものを **放射性同位元素** というのである.

同位体と同位元素とはどちらも英語のアイソトープの訳語であって 本質的な意味のちがいはない. これとおなじような意味で **核種** ということばがあつて 専門的な文献でよくつかわれている. 核種とは陽子数および質量数によってきまるそれぞれの原子核をあらわすことばであつて 原子核の性質のみに注目するならば まったく適当なよびかたであろう.

核種をあらわすには 陽子数 Z によって元素の種類がきまるから 元素の記号をもちい その肩に質量数 A をつける. たとえば コバルト 60 は ^{60}Co とかく. また ^{60}Co ^{59}Co あるいは Co^{60} とかくこともある. 原子核はふつう核外電子をともなっているから これらを原子の記号 あるいは同位元素の記号とみてもよい.

放射核種の寿命——半減期

放射質原子種は こわれてべつの核種にかわるから ある核種の原子核のかずは時間とともにへってゆく. そのへりかたは核種ごとに一定で 温度や気圧などをかえても変化しない. そして原子核がへるはやすさは現在存在しているかずに比例しその比例常数を **壊変常数** という. また 同位体の集団のなかの原子核のかずが半分になる時間を **半減期** といい 半減期ながいほ



第5図
 崩壊 32 の放射能の減衰の測定(半減期 14.3 日)

ど壊変常数がちいさい。半減期のながいものは数百億年以上であるし みじかいものには百万分の1秒というようなものもある。

放射性原子核は有限の時間しか存在しないから 寿命をもつということが出来る。寿命という半減期をさすこともあるが 厳密なかんがえかたをすると 半減期の1.44倍が 平均寿命 になる。

もし1個の原子核に注目すると それはまったく偶然にこわれる。そして半減期はそれがいきのこっている確率とこわれてしまう確率とがひとしくなる時間である。

たとえば ガイガー・カウンタで 原子核がこわれて発生する放射線をカウントするおとをきいていると その間隔はけっして一定でなく ながくなったりみじかくなったりする。いろいろな核種のなかで 半減期がみじかいものほどはげしくこわれて放射線をだすわけであるから 半減期がみじかいほど放射能がつよい。放射能のつよさは一定時間にこわれる原子核のかずであらわし 1秒間に370億個がこわれるような放射能を単位として 1キュリー とよんでいる。1キュリーはラジウム226の1グラムにほぼひとしい。

壊変常数をλとし N個の放射性原子核がつぎのdt という時間にdN個こわれるとすれば

$$-dN = \lambda N dt \quad (1)$$

である。t=0のときのNのあたいをNoとして(1)をとくと $N = No e^{-\lambda t}$

となる。半減期を T とすると 上式で $N = No/2$ のとき t=T であるから 両辺の対数をとる

$$T = \log 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \quad (2)$$

である。平均寿命をτとすると

$$\tau = \int_0^{\infty} t \times \lambda N dt / No = 1/\lambda = 1.44 T \quad (3)$$

である。

キュリーとそれからみちびかれる単位の記号はつぎのとおりである。

$$1c = 10^{10} mc = 10^9 \mu c (= 3.7 \times 10^{10} \text{ disintegration})$$

質量数Aの放射性核種の1cあたりの重量 wg は半減期を T day アボガドロ数をNoとすると

$$w = (A/No) \times (T/0.693) \times 3.7 \times 10^{10} = 7.66 \times 10^{-9} AT \quad (4)$$

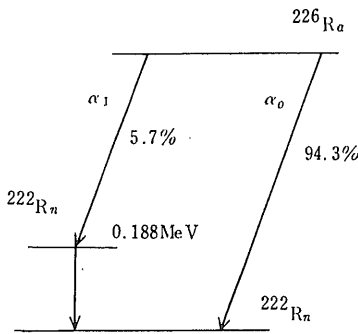
である。たとえば ^{60}Co は $T = 5.24 \text{ year}$ で $w = 8.8 \times 10^{-4} \text{ g}$ であるが ^{238}U は $T = 4.51 \times 10^9 \text{ year}$ で $w = 3 \times 10^9 = 3t$ である。

アルファ壊変

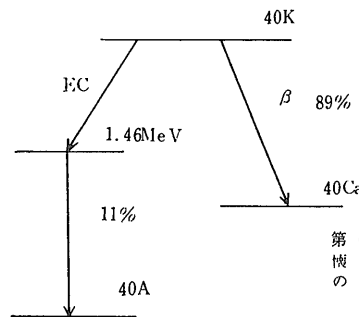
天然に存在する元素でもっとも原子番号の大きいものはウランで そのあたいは92である。ウラニウムといったほうがしたしみやすいかもしれないが 学問的にはウランということになっている。

さて ウランの同位体はいろいろあるが 天然に存在するものの大部分 つまり99.7パーセントはウラン238である。天然に存在する元素においては同位体のわりあいはほとんど一定で それらの比率を 同位体存在比 という。しかし 放射性同位体はこわれてだんだんなくなるから 厳密には存在比は一定ではない。ウランの場合にはおもな同位体は半減期が非常にながいので 一定とかんがえてさしつかえないのである。

ウラン238の原子核は陽子2個と中性子2個とがむすびついた粒子を放出して Zが2 Aが4だけすくないトリウム234の原子核になる。この粒子はヘリウム4の原子核にほかならないが たかいエネルギーでとびだしてくるので アルファ粒子 とよばれる。また高速で運動している状態をさして アルファ線 といひ アルファ線を放射して原子核がこわれる現象を アルファ壊変 という。ところで 壊変によってできた原子核とアルファ粒子の質量数の和はもとの原子核の質量数にひとしいが 原子核とアルファ粒子の実際の質量については こういう関係がなりたっていない。壊変によってできた原子核を 娘核 もとの原子核を 親核 という。娘核とアルファ粒子の質量の和は親核の質量よりすこしちいさい。この質量の差は 娘核とアルファ粒



226Raのアルファ壊変



40Kのベータ壊変

第6図 変換の図式

子に運動のエネルギーとしてあたえられたのである。

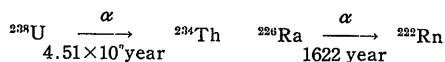
放射線のエネルギーをあらわす単位として **ふつう** **ミリオン・エレクトロンボルト** がもちいられる。ラジウム226もアルファ懐変をしてラドン222になる。この場合うえにのべた質量の差に相当するエネルギーは約5ミリオン・エレクトロンボルトであるが、娘核はおもいので大部分はアルファ粒子にあたえられる。実際に4.8ミリオン・エレクトロンボルトというエネルギーをもつアルファ粒子が放射されるのである。

ところがアルファ粒子のあるものは4.6ミリオン・エレクトロンボルトのエネルギーしかもってなくて0.2ミリオン・エレクトロンボルトのエネルギーが娘核によけいにあたえられている。娘核はそれをただちに電磁波として放出する。この放射線は一般に光やX線より波長がみじかいだけであるが **ガンマ線** とよばれている。このようにエネルギーがうつりかわるようすからみるといくとおりかのみちすじをとおるものが多く、これらのみちすじをまとめてあらわすのに **懐変図式** というものをつかう。

α (アルファ)懐変のあらわしかたはふつう



で



とかくこともある。矢じるしのしたのかずは半減期をしめす。1eV(エレクトロンボルト)は電子が1Vの電位差で加速されたときにあたえられる運動のエネルギーである

MeV(ミリオン・エレクトロンボルト)などとの関係は

$$1\text{MeV} = 10 \text{ keV} = 10^6 \text{ eV}$$

である。また質量などとの関係は

$$1\text{MeV} = 1.78 \times 10^{-27} \text{ g} = 1.34 \times 10^{-3} \text{ amu} = 3.71 \times 10^{-14} \text{ cal} \\ = 1.60 \times 10^{-6} \text{ erg}$$

である。ここでamu(原子単位)は ${}^{16}\text{O}$ の原子の質量を16とする単位である。

ベータ懐変

さてウラン238の娘核トリウム234も放射性であるが電子を放出してZが1多くAがかわらないプロトアクチニウム234になる。この場合になぜ原子核のなかから電子がでてくるのかということ、中性子は独立に存在しているとき約13分の半減期で陽子と電子とニュートリノ(中性微子)とに懐変するという性質をもっているからである。

陽子はふつうはきわめて安定であるが原子核のなかから中性子と陽電子とニュートリノとに懐変すること

がある。陽電子は電子と質量がおなじで陽電気をもっている粒子でこれにたいしてふつうの電子を陰電子ということもある。こういう過程によってある核種は陽電子を放出してZが1だけすくなくAがおなじ核種にかわる。この場合陽電子はしだいに運動のエネルギーをうしないついに電子とむすびついて消滅する。このさいおのおのの粒子の質量に対応するエネルギーをもつ電磁波が発生する。だから核外電子が1個へることになり懐変による原子番号の変化に対応する。

これらの型の懐変を **ベータ懐変** という。アルファ懐変とおなじように懐変の前後での質量の差がほとんど電子の運動のエネルギーとしてあたえられる。このように原子核のなかから高速でとびだしてくる電子または陽電子を **ベータ粒子** といいその状態を **ベータ線** という。

ベータ懐変がアルファ懐変と大へんちがっているもう1つの現象はベータ線のエネルギーがアルファ線のように孤立した線スペクトルをしめさないであるあたから0まで連続して分布していることである。これは懐変のエネルギーがニュートリノにもあたえられニュートリノのエネルギーが0のときベータ線のエネルギーが最大になりニュートリノのエネルギーが最大るときベータ線のエネルギーが0になるからである。ベータ線のエネルギーをあらわすには最大エネルギーかあるいは平均エネルギーをもちいる。

ベータ懐変の場合も娘核がまずエネルギーの高い状態になりガンマ線を放射することが多い。

β (ベータ)懐変のあらわしかたはふつう



である。ここで左は電子を放射する β^- (ベータマイナス)懐変、右は陽電子を放射する β^+ (ベータプラス)懐変の例である。

天然カリウムの放射能

カリウムは天然にひろく存在する元素で生物体にもかなり多量にふくまれている。天然に存在するカリウムの同位体の大部分は安定であるが1万分の1.2だけ放射性をもつカリウム40がふくまれている。その原子核のあるものは電子を放射するベータ懐変によってカルシウム40になるが、あるものはアルゴン40になる。あとの場合はZが1つへってAがおなじだから結果として陽電子が放射される場合とおなじであるが原子核にもっともちかい核外電子が吸収され原子核のなかの陽電子とむすびついて消滅するのである。その結果吸収された電子の軌道へそとがわの電子がおちてきてX

線が放射される。

カリウム40の場合にこのX線のエネルギーは 1.46ミ
リオン・エレクトロンボルトで ほかの懐変にともなう
ガンマ線のエネルギーとくらべてみても たかいほうで
ある。 ガンマ線もX線も電磁波で 原子核からでてく
るか原子核のそとでの現象によるものであるかのちがい
であるから 実際には区別できない。 だから ミカリ
ウム40はガンマ線をだしてアルゴン40になる、という表
現も通用しているのである。

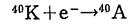
このような懐変のしかたを **K懐変** とか **K電子補償**
などとよんでいる。 核外電子の軌道はうちがわからそ
とにむかってK・L・M・……という記号で区別されて
いるからである。 K懐変は当然ベータ懐変の1種類で
あって ベータ懐変には3つの種類があることになる。

これまでのべてきたように 放射性核種の懐変にはアル
ファ懐変とベータ懐変とがあつて 核種によって半減
期 放射線の種類とエネルギーがきまっている。 ぎゃ
くに これらを測定して核種をきめることができる。

アルファ懐変をする核種は 特殊な例外をのぞいて原
子番号の大きいものにかざられるが ベータ懐変をする
核種は原子番号に関係しない。 ただし 陽電子を放射
するベータプラス懐変は軽い原子核だけにおこる。 な

お 原子番号が83以上の元素には安定な同位体がなく
すべて放射性である。

K懐変のあらわしかたはふつう

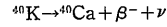


である。 ここでeは核外電子をあらわす。

なお 陽子を p 中性子を n ニュートリノを ν であらわす。
したがつて



で たとえば β^- 懐変のとき



のように ν を式にあらわすこともある。

大昔から存在している放射性元素

宇宙に存在する元素は 太陽やそのほかの恒星の燃焼
つまり原子核の融合反応によって 水素からヘリウムへ
さらにおもい元素へと順にできてきたものとかがえら
れている。

地球は太陽からふきだしたガスがかたまつたものだと
いわれ またちかごろでは 宇宙にちらばっているこま
かい粒子や隕石などが太陽のまわりにとらえられてでき
たものだといわれている。 これらのどちらがただし
いはまだはっきりしていない。 しかし いろいろな元
素ができてから現在までの時間にくらべると わりにみ

第1表 地球の年齢と同程度またはそれ以上の半減期をもつ放射性核種

核種	記号	壊変型*	半減期(年)	同位体存在比(%)	岩石圏中の** 存在量(g/g)
ウラン 238	²³⁸ U	α	4.5×10^9	99.28	3.0×10^{-6}
ウラン 235	²³⁵ U	α	7.5×10^8	0.71	2.1×10^{-8}
トリウム 232	²³² Th	α	1.4×10^{10}	~100	11.4×10^{-6}
カリウム 40	⁴⁰ K	β^-, EC	1.3×10^9	0.0119	3×10^{-6}
ルビジウム 87	⁸⁷ Rb	β^-	5.0×10^{10}	27.85	7.5×10^{-5}
白金 190	¹⁹⁰ Pt	α	5.9×10^{11}	0.0127	
レニウム 187	¹⁸⁷ Re	β^-	4×10^{12}	62.93	10^{-9}
ルテチウム 176	¹⁷⁶ Lu	β^-	2.4×10^{10}	2.60	10^{-8}
サマリウム 147	¹⁴⁷ Sm	α	1.3×10^{11}	15.07	10^{-6}
ネオジウム 144	¹⁴⁴ Nd	α	5×10^{15}	23.87	
セリウム 142	¹⁴² Ce	α	5×10^{15}	11.07	
ランタン 138	¹³⁸ La	EC, β^-	7×10^{10}	0.089	10^{-8}
インジウム 115	¹¹⁵ In	β^-	6×10^{14}	95.77	10^{-7}

このほか テルル130 釷鉛209 バナジウム50 アンチモン123 ネオジウム150 およびタングステン178 あるいは180などが 半減期
の長い放射性元素であるといわれている ※ α : アルファ懐変 β^- : ベータマイナス懐変 EC: K懐変
※ J.A.S. Adams "Radioactivity of the Lithosphere" Handbuck der Physik による

じかいあいだに地球ができたと考えてよいらしい。

地球の年齢は いろいろな方法で推定されているが 50億年とか30億年とかであるといわれている。 元素がつくられたとき 多くの放射性の核種ができたはずであるが 半減期のみじかいものはこわれてなくなってしまった。 それで 現在天然に存在している放射性核種は半減期が地球の年齢とおなじくらい またはそれ以上にながいのものか 天然におきた原子核の反応でつくりだされたものかである。

それでは大昔から存在していた半減期のながい放射性核種にはどんなものがあるだろうか。 第1表をみていただきたい。 これらのなかでわりあい多量に存在して天然の放射能 たとえばガイガー・カウンタのバックグラウンドにあたえる影響が大きい核種はウラン 238 トリウム 232 およびカリウム40である。 そのほかウラン235 ルビジウム87 サマリウム147 およびルテニウム 176 などは比較的是やくからしられていた。 測定技術の進歩とともに さらにいくつかの天然に存在する核種が放射性をもつことがわかってきたのである。

ところで 第1表のなかには天然の鉱石から最初に分離されたポロニウムやラジウムという放射性核種ははいっていない。 これらは地球の年齢に比べて半減期がみじかいのにウラン鉱石にふくまれていた。 まえにウラン238の娘であるトリウム234が 懐変してプロトアクチニウム234 になることを述べたが この原子核も懐変しさらにその娘も懐変し つぎつぎに懐変がつづく。 このように2つ以上の放射性核種が懐変の親娘の関係でつながっていることを 懐変系列 をつくるという。 ラジウムやポロニウムは ウラン 238 にはじまる懐変系列の一員であったのである。

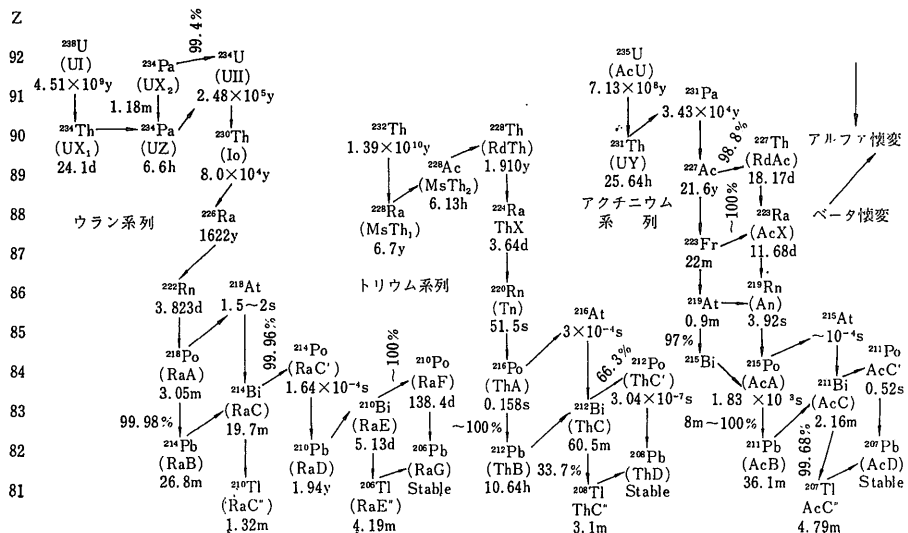
天然の懐変系列

懐変系列をかたちづくっている天然の核種には ウラン238 ウラン235 およびトリウム 232 を親とする種類があって それぞれ **ウラン（—ラジウム）系列** **アクチニウム系列** および **トリウム系列** とよばれている。

第7図にそれらの系列の懐変のようすがしめしてある。 この図には たとえば ウラン238 ウラン235 あるいはウラン 234 という核種の記号のほかにも それぞれU I（ウランI） AcU（アクチノウラン） あるいはU II（ウランII） というような別のなまえが括弧のなかにかいてある。 これらは歴史的なあらわしかたであって天然の懐変系列をつくるいろいろな核種が研究され 分離発見されたころは まだ同位元素についてはっきりした概念がなかったので——というよりこういう元素の発見とその研究をつうじて原子核の構造があきらかになったので——トリウムの同位体にウランIIと命名するような不合理な面があるわけである。 しかし 懐変の順序をよくあらわしている面もある。

ウラン系列のプロトアクチニウム234 には ウランX₂ とウランZ という2つの原子核として性質のちがうものがいられている。 ウランX₂はウランZよりエネルギーがたかい状態にあるが これが比較的ながいあいだつづいているのである。 このようにZもAもおなじで異なったエネルギー状態にある原子核を **異性体** という。 異性体は別の核種としてとりあつかっている。

系列をつくって懐変する結果として たとえばウランの原子1個は結局8回のアルファ懐変でできる8個のヘリウム原子と系列の最後の安定な核種鉛 206 の1個の原子とにかわる。 そしてそれらの核種の原子数は懐変の法則にしたがって変化する。 だから 外部の作用をう

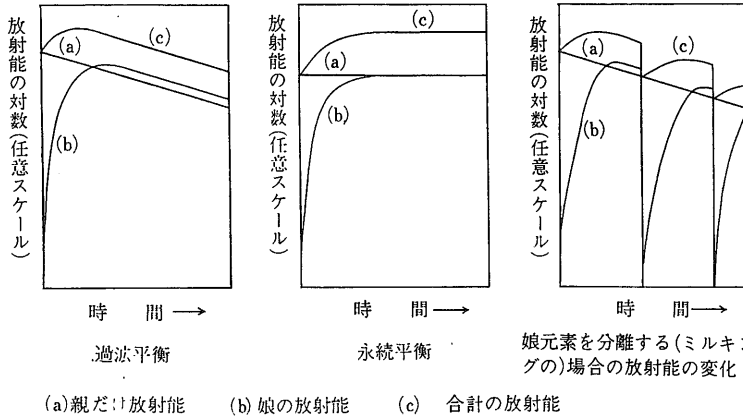


第7図 天然懐変系列

けないでそのなかの成分がにげだしていない鉱物について減少する放射性核種とそれとともに増加する核種とが含まれている量の比をしらべることによって、鉱物が固化してから現在までの時間したがってその鉱物をふくむ岩石がかたまってきた年代を絶対数でもとめることができる。

こういう放射性元素による年代測定は地質学にたいする放射能という現象の応用のうちで、もっとも大きな成果であるということができよう。

第 8 図 放射平衡とミルキング



核種がふくまれている。これは半減期がながくそのうえからだのなかにはいと骨に吸着されてなかなか排泄されないの、危険なアイソトープとしてよく知られている。ストロンチウム90は半減期28年でベータ壊変をしてイットリウム90になるが、これも半減期64時間でベータ壊変をして安定なジルコニウム90になるので、壊変系列をつくっているわけである。

イットリウム90の半減期はみじかいため、親のストロンチウム90からひきはなされるとじきなくなつてし

第 2 表 (I) ウ ラ ン 系 列

核 種	慣 用 名	記 号	壊変型	半 減 期	放射平衡にあるときの重量比			
					²³⁸ U=1として	²²⁶ Ra=1として		
ウラン	238	ウ ラ ン I	²³⁸ U	UI	α	4.51×10 ⁹ y	1.00	2.78×10 ⁶
トリウム	234	ウ ラ ン X ₁	²³⁴ Th	UX ₁	β^-	24.1d	1.47×10 ⁻¹¹	4.08×10 ⁻⁵
プロトアクチニウム	234	ウ ラ ン X ₂	^{234m} P _a *	UX ₂	β^-	1.18m	5.00×10 ⁻¹⁶	1.39×10 ⁻⁹
		ウ ラ ン Z	²³⁴ P _a	UZ	β^-	6.6h	2.50×10 ⁻¹⁶	6.90×10 ⁻¹⁰
ウラン	234	ウ ラ ン II	²³⁴ U	UII	α	2.48×10 ⁵ y	5.51×10 ⁻⁵	1.53×10 ²
トリウム	230	アイオニウム	²³⁰ Th	Io	α	8.0×10 ⁴ y	1.80×10 ⁻⁵	50
ラジウム	226	ラ ジ ウ ム	²²⁶ Ra	Ra	α	1.622×10 ⁶ y	3.60×10 ⁻⁷	1.00
ラドン	222	ラ ド ン	²²² Rn	Rn	α	3.8229d	2.32×10 ⁻¹²	6.45×10 ⁻⁶
ポロニウム	218	ラ ジ ウ ム A	²¹⁸ Po	RaA	$\alpha, (\beta^-)$	3.05m	1.29×10 ⁻¹⁵	3.58×10 ⁻⁹
鉛	214	ラ ジ ウ ム B	²¹⁴ Pb	RaB	β^-	26.8 m	1.13×10 ⁻¹⁴	3.14×10 ⁻⁸
蒼 鉛	214	ラ ジ ウ ム C	²¹⁴ Bi	RaC	β^-, α	19.7 m	8.31×10 ⁻¹⁵	2.31×10 ⁻⁸
ポロニウム	214	ラ ジ ウ ム C'	²¹⁴ Po	RaC'	α	1.64×10 ⁻⁴ s	1.09×10 ⁻²¹	3.03×10 ⁻¹⁵
タリウム	210	ラ ジ ウ ム C''	²¹⁰ Tl	RaC''	β^-	1.32m	2.28×10 ⁻¹⁹	6.33×10 ⁻¹³
鉛	210	ラ ジ ウ ム D	²¹⁰ Pb	RaD	β^-	19.4 y	4.32×10 ⁻⁹	1.20×10 ⁻²
蒼 鉛	210	ラ ジ ウ ム E	²¹⁰ Bi	RaE	$\beta^-, (\alpha)$	5.13d	3.12×10 ⁻¹²	8.66×10 ⁻⁶
ポロニウム	210	ラ ジ ウ ム F	²¹⁰ Po	RaF	α	138.4 d	8.55×10 ⁻¹¹	2.38×10 ⁻⁴

まうが 親と一緒にいれば親がこわれてできる仲間が
ぎつぎとくわわって急にかずがへるということはなく
結局イットリウム90もストロンチウム90とおなじわりあ

いで減少することになる。これを親と娘とは 過渡
平衡 の状態にあるといい 親の原子数と娘の原子数と
の比は半減期の比の逆数になる。

第 2 表 (II) ア ク チ ニ ウ ム 系 列

核 種	慣 用 名	記 号	壊変型	半 減 期	放射平衡にあるときの重量比	
					²³⁵ U=1として	²³⁸ U=1として
ウラン 235	アクチノウラン	²³⁵ U AcU	α	7.13×10^8 y	1.00	7.15×10^{-3}
トリウム 231	ウ ラ ン Y	²³¹ Th UY	β^-	25.64h	4.07×10^{-12}	2.91×10^{-14}
プロトアクチニウム231	プロトアクチニウム	²³¹ Pa Pa	α	3.43×10^4 y	4.67×10^{-5}	3.34×10^{-7}
アクチニウム 227	アクチニウム	²²⁷ Ac Ac	$\beta (\alpha)$	21.6 y	2.87×10^{-8}	2.05×10^{-10}
トリウム 227	ラジオアクチニウム	²²⁷ Th RdAc	α	18.17d	6.85×10^{-11}	4.90×10^{-13}
ラジウム 223	アクチニウムX	²²³ Ra AcX	α	11.68d	4.38×10^{-11}	3.13×10^{-13}
ラドン 219	ア ク チ ノ ン	²¹⁹ Rn An	α	3.92s	1.17×10^{-16}	1.22×10^{-18}
ポロニウム 215	アクチニウムA	²¹⁵ Po AcA	$\alpha (\beta^-)$	1.83×10^{-3} s	8.00×10^{-20}	5.72×10^{-22}
鉛 211	アクチニウムB	²¹¹ Pb AcB	β^-	36.1 m	9.45×10^{-14}	6.76×10^{-16}
蒼 鉛 211	アクチニウムC	²¹¹ Bi AcC	$\alpha \beta^-$	2.16m	5.70×10^{-15}	4.08×10^{-17}
ポロニウム 211	アクチニウムC'	²¹¹ Po AcC'	α	0.52s	7.4×10^{-20}	5.3×10^{-22}
タリウム 207	アクチニウムC''	²⁰⁷ Tl AcC''	β	4.79m	1.26×10^{-14}	9.00×10^{-17}

第 2 表 (III) ト リ ウ ム 系 列

核 種	慣 用 名	記 号	壊変型	半 減 期	放射平衡にある ときの重量比
トリウム 232	ト リ ウ ム	²³² Th Th	α	1.39×10^{10} y	1.00
ラジウム 228	メゾトリウム1	²²⁸ Ra MsTh ₁	β^-	6.7 y	4.8×10^{-10}
アクチニウム 228	メゾトリウム2	²²⁸ Ac MsTh ₂	β^-	6.13h	5.05×10^{-14}
トリウム 228	ラジオトリウム	²²⁸ Th RdTh	α	1.910y	1.38×10^{-10}
ラジウム 224	ト リ ウ ム X	²²⁴ Ra ThX	α	3.64d	7.17×10^{-13}
ラドン 220	ト ロ ン	²²⁰ Rn Th	α	51.5 s	1.17×10^{-16}
ポロニウム 216	ト リ ウ ム A	²¹⁶ Po ThA	α, β	0.158s	3.61×10^{-19}
鉛 212	ト リ ウ ム B	²¹² Pb ThB	β	10.64h	8.76×10^{-14}
アスタチン 216	ア ス タ チ ン	²¹⁶ At At	α	3×10^{-4} s	6.85×10^{-22}
蒼 鉛 212	ト リ ウ ム C	²¹² Bi ThC	β, α	60.5 m	8.29×10^{-15}
ポロニウム 212	ト リ ウ ム C'	²¹² Po ThC'	α	3.04×10^{-7} s	4.56×10^{-25}
タリウム 208	ト リ ウ ム C''	²⁰⁸ Tl ThC''	β	3.1 m	1.43×10^{-16}

もし あるみじかい時間をとってかんがえろと ストロンチウム90の原子数は一定であるとみなしてもよい。したがってイットリウム90も一定であるとみてよい。こういう状態を **永続平衡** といひ 過渡平衡とあわせて **放射平衡** といっている。

この懐変系列のように娘の半減期が十分みじかいと娘の元素を親からはなしてしまっても 娘の半減期の10倍ぐらいの時間がたつと娘の原子がたまって放射平衡になるから 何回も娘の元素を分離してとりだすことができる。ちょうど乳牛からミルクをしぼりとっても翌朝になるとまたミルクがでてくるようなものであるから こうして娘の元素を分離する操作を **ミルクキング** といひ。天然の懐変系列では一番はじめの核種はそれぞれの系列のなかでとびぬけてながい。こういう場合にも系列のなかで2番目にながいの半減期の10倍ぐらいの時間がたてば その系列は放射平衡になる。第2表には天然の懐変系列が放射平衡にあるときの各元素の重量比をしめしてある。

2つの核種が懐変系列をつくるとき 親娘の半減期をそれぞれ T_1 T_2 ある時刻 $t=0$ での親娘の原子核の数を N_{01} N_{02} それから t 時間たったのちの親娘の原子核の数を N_1 N_2 とすれば

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{N_1}{T_1} \quad \frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_1}{T_1} - \frac{N_2}{T_2}$$

であるから

$$N_1 = N_{01}e^{-t/T_1}$$

$$N_2 = \frac{T_2 - T_1}{T_1} N_{01} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) + T_{02} e^{-t/T_2}$$

である。 $T_1 > T_2$ のとき t 大きくなれば

$$N_2/N_1 = T_2/(T_1 - T_2)$$

である。(過渡平衡) T_1 が十分大きいと

$$N_2/N_1 = T_2/T_1$$

である。(永続平衡)

n 個の核種が懐変系列をつくるとき おのおのの核種を添字 1, 2, ..., n で区別すると 永続平衡であれば

$$N_1/T_1 = N_2/T_2 = \dots = N_n/T_n$$

である。このとき おのおのの核種の放射能のつよさはひとしい。 n 番目の核種のはじめの核種にたいする重量比を w_n/w_1 とし 質量数の比を A_n/A_1 とすると

$$w_n/w_1 = T_n A_n / T_1 A_1$$

である。

放射能泉

ウラン238やトリウム232が懐変してできる系列のすべての核種がにげださないで 共存していれば 放射平衡にたつて それがそのままつづいている。この場合系列のなかの核種のどれかの量を測定すれば ほかの核種の量をもとめることができる。

ラドンは天然の懐変系列のなかでただ一種類の気体元

素であつて ほかの元素とめつたに反応しない希ガスにぞくしている だから 物理的な方法でわりあいかんたんに分離できる。1950年代になって微量のウランを分析する蛍光法が発達するまでは 岩石のなかにふくまれているウラン系列元素の量をはかるには 試料からおいだされた気体の放射能を測定して まずラドン222を定量するという方法がもちいられたのである。

天然の状態においてもラドンはそれができたところからにげだしやすいはずである。トリウム系列のなかの同位体であるトロンやアクチニウム系列のアクチノンは半減期が1分にもたりないので にげだしてもすぐなくなるが ウラン系列のラドン222は半減期が3.8日であるから 地下水にとけこんだり 断層破碎帯のわれめのなかの空気にまじったりすると かなりとおくまではこぼれる。

温泉や鉱泉の放射能はお湯や水のなかのラドン222の量で比較する。ラドン222の直接の親であるラジウムは放射平衡にある場合の相当量よりずっとわずかしかふくまれていない。ウラン238にいたつては 放射能泉でもふつうの地下水より多量にふくんでいることはめずらしいといわれている。しかし 放射能泉にふくまれているラドン222の量は減少しない。これは地下水のみちすじのどこかで半減期のながい親の核種をふくんだ物質から 連続的に供給されているからである。

一方 このようにラドン222がつねにとりだされていると もとの物質のなかではラドン222からあとの核種について放射平衡がなりたっていない。同時に 放射能泉の水のなかですくなくともラドン222からまえの核種について放射能平衡がなりたっていない。

懐変系列のなかのある核種が物理的あるいは化学的原因で移動すれば 放射平衡がくずれる。こういう元素の移動の原因が原子核自身の性質によることもある。

懐変の結果あたらしくできた原子がたかいエネルギー状態をもつため 物質の結晶構造の格子からとびだしやすくなつたり 化学的結合をこわしたり あるいは反応しやすい物質と化合したりする。この現象を **反跳効果** とか **ホットアトム効果** とよんでいる。

たとえば ウラン234がホットアトム効果によってウラン238よりもとの物質からとけだしやすいたことが最近指適されている。温泉がウランをふくんでいて

ウラン234がウラン238と平衡にある量より多ければ 温泉のみちすじで岩石や鉱物からそれらのウランがとけだしたのであろう。またウラン234とウラン238とが放射平衡にあれば 岩漿水とか熱水溶液から直接供給されたとかんがえられるであろう。(筆者は 物理探査部)。