

地球化学の話

⑥

同位体地質学〔2〕

とくにU・Th・PbおよびRb・Srについて

倉 沢 一

II 同位体地質学の基礎

1. 同位体とは

原子 はあらゆる固体 液体および気体の構造上の単位である。これは物理的な要素であるが これに対応する化学的な要素が 元素 である。

1805年イギリスのドールトン(John Dalton, 1766—1844) はすべての物質が微粒子から成り立っているという仮説を出した。彼はこの微粒子をギリシア語で不分割のことを意味する atomos という語からとって 原子 (atoms) とよんだ。化学反応にあずかる物質の重量については その当時までにすでに 2, 3 の関係が知られていたがよく説明できなかった。彼の仮説はこのことについて非常に簡単な説明を与えることができた。その後多くの物理的・化学的研究によっていろいろ証明されるにつれて 原子仮説は原子説となった。原子の実在は今日では事実として認められている。

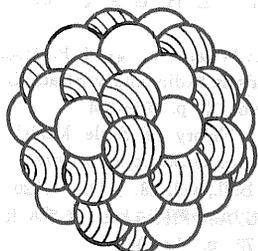
そして物質の究極の粒子を素粒子 (fundamental particle) と呼んでいるが 最近ではそれらしいものまでを含めると 200 個以上にも及び 素粒子とはいったい何なのかが問題になっている。原子核 (nucleus) は陽子 (proton) と 中性子 (neutron) という二種類の素粒子からできている。極端ない方をすれば 原子核には陽子と中性子があるというだけで その他は何もわかっていないといってよいぐらいである。陽子と中性子を結びつけ 原子核がバラバラにこわれないようにしている強い力が核力 (nuclear force) で この核力にとまなり粒子として湯川博士は中間子 (meson) を考えた。大きな加速器で加速した陽子や重陽子 (deuteron) などを原子核にぶつけて原子核のこわれ方から 核力の性質を調べることは この分野ではもっとも基礎的な研究である。原子核はもっとも簡単な陽子 1 個の水素原子核から 陽子と中性子の合計が 300 個近

い超ウラン原子核までたくさんの種類がある。原子核の多様な性質を 核力の基本的な性質から あますところなく説明するのが原子核研究の究極の目標である。そして1997年9月7日から13日まで 東京において原子核構造国際会議が開かれた。

よく知られているように 原子の大きさは直径 $2 \text{ \AA} \sim 5 \text{ \AA}$ でしかない。この大きさは実に小さいもので たとえばどこにでもある岩石を直径 2 cm ぐらいとってこれを地球の大きさに拡大すると それを構成している原子の大きさはゴルフの球ぐらいの大きさになるだろう。また 1 億個の原子をつぎつぎ一列にならべると 2~3 cm ぐらいの長さになる。つまり数 cm 立方の固体物質は約 $(10^8)^3$ すなわち 10^{24} 個の原子をふくむわけである。

記号 \AA は長さの単位でオングストローム (Ångström) とよばれ 微小な長さをあらわすのに用いられる。この名はスウェーデンの物理学者 A. J. Ångström (1814—1874) にちなんで名づけられた。1 Å は 1×10^{-8} cm すなわち 1 cm は 10^8 \AA である (1 cm = 100, 000, 000 Å)。

原子はすべて 1 個の原子核と 1 個またはそれ以上の電子とからなる。原子核の大きさは非常に小さい粒子であるが 重さは原子の質量の大部分を占めている。原子核の荷電は正であって その荷電の大きさは電子 1 個の荷電に等しいか またはその整数倍である。電子の荷電は負である。通常の物体は電氣的に中性であって同数の正の荷電と負の荷電をもっている。原子核の大きさは非常に小さく その直径はだいたい 1×10^{-12} cm または $1 \times 10^{-4} \text{ \AA}$ である。すなわち原子自身の大ききの 1 万分の 1 ぐらいの直径しかもっていないし 体積にすると原子核は原子自身の大ききの 10^{-12} すなわち 100 万分の 1 のさらに 100 万の 1 ということになる。電子の質量ははるかにかるく 一番かるい原子核の $1/1,845$ ぐらいである。水素原子では電子は原子核から 0.529 \AA のところを運動していると考えられており またその実際の運動から約 1 \AA の半径内の全空間をしめているといわれその結果水素原子の有効直径は約 2 \AA となっているわけである。またその電子の速度も一定ではないがその平均値は 2.18×10^8 cm/sec とされている。



第 1 図
原子核の模型
電子は原子核の周りを回っているか 原子核を組み立てている陽子や中性子はより集まっていて 小さな水滴が集まって大きな水滴を作る様子に似ている (佐野淡一: 岩石と放射線 1967)



陽子



中性子

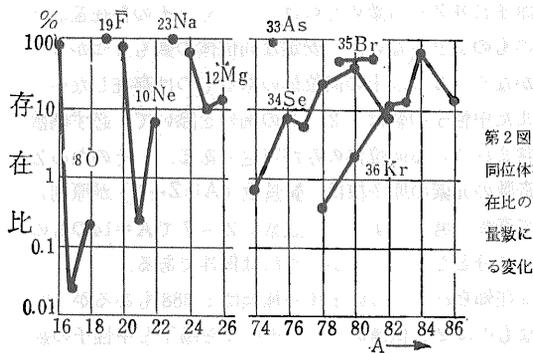
1.1. 同位体と原子核の構造

原子の質量を問題にする時は 1.660×10^{-24} g という非

常に小さな原子質量単位 (atomic mass unit) が用いられる。1個の陽子と1個の電子とから成り立っている水素原子の質量は原子量単位で1.0078である。ふつうの水素はほとんど大部分このものからなっているがこれら以外に5,000分の1ほど重い水素原子を含んでいる。この重い水素原子 (heavy hydrogen atom) すなわち重水素原子 (deuterium atom) は原子量単位で2.0143である。重水素原子の原子核は重陽子 (deuteron) とよばれている。この原子核は陽子と同様に正の荷電を1単位もっているが質量は陽子の倍である。重陽子は1個の陽子と1個の中性子 (陽子とほとんど同じ質量の約1.0090単位をもつ) からなる原子番号1、質量2の原子核であるといえる。重水素も軽い水素も水素の安定な同位体 (isotope) である。今日ではすべての原子核は陽性と中子とからなるものであってある元素の同位体というのは同一数の陽子をふんでいて (すなわちその元素の原子番号に等しい数) 中性子の数の異なったものであると考えられている。

陽子も中性子も原子質量単位に非常に近い値の質量をもっているので原子の質量に最も近い整数 (質量数) はその原子核中の陽子と中性子の数の和に等しくなる。すなわち原子番号はその原子核中の陽子の数に等しく、質量数は原子核の陽子と中性子との和になる。現在では核子 (nucleon) ということばが陽子と中性子とを含めて原子核構成粒子を表わすために用いられておりその核子の数は原子核の質量数に等しいといわれる。現在知られているすべての元素は2個以上の同位体をもっている。ベリリウム Be 弗素 F ナトリウム Na アルミニウム Al 等のようなものでは自然界には1個しか同位体をもっておらず他はすべて不安定である。元素の中で最大数の同位体が知られているのは錫 Sn とテルル Te であってその数は15種におよんでいる。

同じ元素に属するすべての同位体の化学的性質は本質的には同一であるがそれは化学的性質というものは原子核の原子番号で定められるのであって質量によって定められるのではないからである。元素の化学的性質は原子核の正の電荷 (e を単位として) できるから原子番号 Z の元素の原子核はかならず陽子を Z 個含んでいるはずである。この原子核に含まれる中性子の数はどんな数にもなり得るわけであるが核子との間の結合力は化合物をつくるときの原子間の力と同じように特定の粒子 (核子) の間で特定の数の粒子があるときとくに強くなる性質をもっている。これをいわゆる飽和性という。そのため陽子数 Z に対して特定の数の中性子 N 個が結合したとき安定な原子核をつくる。それ



第2図
同位体存在比の質量数による変化

以外の数の中性子のはいりこんだ原子核は不安定なものとなり安定な Z と N の組み合わせになるように原子核が壊変していく。

原子番号 Z の安定な原子核に含まれている中性子の数 N は特定の数が1つしかない場合もあるが数種類以上もあることがある。後者の場合 Z は同じであるからどの原子核も同じ化学的性質を示し元素の周期表 (periodic table of the elements) の中では同じ位置にくる原子であるのでこれらを互いに同位体であるという。それぞれの元素にどのような安定な同位体がありどのくらいの割合で存在しているかはよくわかっている。

安定な原子核の質量数 (Z と N の和) は軽い元素では Z の約2倍、重い元素になると次第に大きくなって約2.6倍にまで大きくなる。つまり N の値は Z が小さいときはほぼ Z に等しく Z が大きくなると 1.6 Z に近づくように大きくなる。与えられた Z に対して一番安定な原子核をつくる N の値がありそれを中心にして安定に存在しうる原子核の N の値が分布している。その中心から離れるに従って不安定な原子核へと移行していく。存在量の大きさと原子核の安定さはだいたい比例すると考えてよい。2, 3の元素の同位体の存在比と質量数との関係を第2図に示す。すなわち偶数の原子番号の元素は多数の安定な同位体があるがその存在量は最も安定な質量数のものが頂上となる山形の分布を示している。中性子が偶数 (質量数が偶数) のものが奇数のものより安定なために一般に多量に存在する。そのために山形は図のようにジグザグになるが全体的には Z が小さいものでは山の頂上は左側にあり、すそを右側にひいている。いいかえればもっとも安定な軽いものよりさらに軽くなると不安定となって存在しなくなるがそれより重いものは多少存在する。Z が大きくなると山の右側のすそが短かく切れて左側のすそがのびている。

原子番号Zが奇数のものはもともとその存在量が偶数のものより少ないが安定な同位体の数も1つか2つしかなく3つ以上の同位体のあるものは存在しない。

また中性子の数は2, 3の例外を除いて必ず偶数個含まれている同位体のみが安定である。そのためZが奇数の元素の原子核は質量数(A=Z+N)が原則として奇数と考えてよい。窒素はZ=7でA=14のものが主成分となっているがこれは例外である。

現在知られている原子核の種類は1,388もあるが安定なものは272種類ある。そのうち陽子と中性子の数が偶数のものと奇数のものを数えると次のようになる。

陽子も中性子も偶数のもの	160
陽子が奇数 中性子が偶数	55
陽子が偶数 中性子が奇数	49
陽子も中性子も奇数	5

つまりAもZも偶数である場合がもっとも結合力が強いことがわかる。安定核種をつくるAとNの組み合わせと異なった組み合わせで構成された原子核は放射性となる。この場合もZとNとがいずれも奇数のものももっとも不安定でありZとNとが共に偶数のものは比較的安定で壊変しにくい上に半減期が長くなる。さらに不安定な原子核のAとNとの組み合わせが安定なものからかけはなれていけばいほど不安定になり半減期が短くなる。不安定な原子核は原子核内の陽子が中性子に変化したりあるいは中性子が陽子に変化することによりZとNとの組み合わせが安定なものになるように変化していく。

これが原子の壊変である。もっとも原子の壊変はこのような型のものばかりでなく重い原子核からヘリウム原子核が放出される α 崩壊および原子核のエネルギーの状態だけが変化する特異体転移もある。ところで原子核の質量は陽子と中性子との質量の総和にならないでそれより少し小さい。この違いを質量偏差(mass deviation)という。陽子と中性子とが結びついて原子核をつくるとき何かの形でエネルギーを外へ出してエネルギーの低い安定な状態に移る。一方質量と光の速度の自乗との積はエネルギーに等しい(Einstein アインシュタインの式 $E=mc^2$) 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。

以上いろいろ細かいことを述べてきたが同位体とは原子番号(Z)が同じで質量数(A)が異なる原子核をいうといえる。

多くの原子核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続けているものといつかは自分自身がこわれてほかの種類原子核になり限られた時間しか存在できないものがあり前者を安定な原子核あるいは安定同位体(stable isotope) 後者を準安定な原子核または放射性原子核あるいは放射性同位体(radioisotope)という。一般にラジオアイソトープということは人工的に生成され実用に供されるものを指す場合が多い。

同位体と同位元素とは英語のアイソトープ(isotope)の訳語であり最近では同位体ということばが用いられているようである。これと同じような意味で核種(nuclide)ということばがよくみられるがこれは陽子数および質量数によって決まるそれぞれの原子核を表わすことばであって原子核の性質のみに注目するならば適当な呼び方である。

ほとんどの元素の同位体組成(異なる同位体の割合)はその元素の産地に無関係である。しかし同位体地質学ではこの定義にしたがえば例外のものを扱うことになる。後に詳しく述べるがその例外の1つとして鉛をあげるとトリウムThの放射性崩壊によってつくられた鉱物では原子量205.96 ウラニウムUからつくられた鉱物では原子量208.0であり普通の鉱物である方鉛鉱(galena)PbSでは207.21である。同位体を区別するためにはその原子質量の近似値を元素の記号の添字にしてつける。いいかえれば核種あるいは同位体を表わすには陽子数(原子番号)Zによって元素の種類がきまるからそのようにするのである。すなわちH¹は軽い水素 H²は重水素である。また鉛の場合Pb²⁰⁴を²⁰⁴Pbとあらわすこともあるが筆者は前者を用いている。核反応を記述するときにはそのほかに原子番号を左下に添字としてつける。たとえば放射性同位体コバルト60は⁶⁰Coあるいは₂₇Co⁶⁰とあらわす。

放射能の単位:キュリー

放射能の単位はキュリー(Curie)とよばれる。任意の放射性物質1キュリーとはその物質中の 3.71×10^{10} 個の原子が1秒間に放射性崩壊を起こすような物質の量である。キュリーは比較的大きな単位である。ラジウム1キュリーはこの元素約1gである。キュリーは最初ラジウム1キュリーが1gになるように定義されたが技術の改良によってその代りに上に述べたように定義するのが便利であると考えられた。

1.2. 原子の壊変と半減期

放射性原子核つまり不安定な原子核が別の安定な原子核(核種)にかわる原子核内の現象(壊変 disintegration または崩壊(decay))はエネルギーの世界が前に述べたように分子のエネルギーの世界とはかけはなれているためにまわりの分子の世界からの影響をほとんど全く

第1表 電磁波の波長およびエネルギー

電磁波名称	波 長	エ ネ ル ギ ー
ラジオ波	~500 m	$2.46 \times 10^{-9} \mu\text{eV}$
超短波	~1 m	$1.23 \mu\text{eV}$
マイクロ波	80~0.1 cm	~10 μeV
赤外線	500~1 μ (10^{-4} cm)	~ 10^{-2} eV
可視光線	8000~4000Å (10^{-9} cm)	1.5~3.1 eV
紫外線	3650~80Å	3.4~154 eV
X線	10~0.1Å	2.4~240 KeV
γ 線		KeV~10 MeV

うけない。すなわち 温度や圧力などによっては そのある原子核の数の時間による一定の減少率を変えることはできない。

今1つの不安定な原子核をみると これがdt秒間に壊変する確率 (Probability) を p とすると dtが短いときは p は非常に小さく ほとんど壊変はおこらない。いま非常に多数の N 個の同じように不安定な原子核について考えると dt秒間に壊変するものの数を測定し m 個の壊変が認められたとすると p は m/N の値に等しいことになる。

$$p = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{m}{N}$$

同じ放射性的原子核が N_0 個あるとき どの1つをとっても 壊変の時期を予言することは不可能であるが その原子核が今からdt秒間に壊変する確率 p はかなり正確に知ることができる。この p は その原子核の経歴に無関係である。dt秒が短くなれば当然 p は小さくなるが 非常に短くなれば p は時間 dt に比例するようになる。

$$p = \lambda dt \quad \lambda: \text{壊変定数}$$

(壊変定数: disintegration constant または decay constant)

原子核が壊変せずに残っている確率 q(t) は

$$q(t) = (1-p)^n \text{ となり}$$

$p = \lambda dt = \lambda/n$ であるから

$$q(t) = \left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n = e^{-\lambda t} \text{ となる}$$

壊変する確率は $p(t) = 1 - q(t)$ で示される

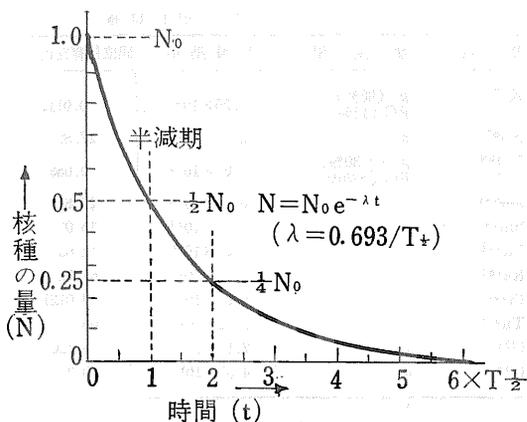
そこで 最も確からしい t 秒間の壊変原子核数 M は

$$M = N_0 p(t) = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \text{ となる}$$

N_0 は t 秒のはじまり つまり t=0 のときの原子数であるから t 秒後の原子核の数 N は $N_0 - M$ となる。そこで $N = N_0 e^{-\lambda t}$ が求められる。 N_0 ははじめの (t=0) 放射性原子核の数 N は t 秒後の数である。その関係を第3図に示した。

上図と上式は時間と共に減少する放射性原子核の量をあらわしている。ここで導入された時間は p が dt に比例するという仮定に立っているから 上式の時間の尺度は 地球の運動 (公転や自転) に無関係である。

原子核の種類によって それぞれ壊変の速さ (λ) は異なる。 λ の逆数は時間の単位ではかられる量で その時間を 平均寿命 (average life, mean life) という。



第3図 半減期 $T_{1/2}$ の放射性核種の時間による減少

つまり平均寿命 (τ) は壊変定数 (λ) の逆数である。

平均寿命は1つの原子核についていうときは具体的なわかりやすい数字であるが 放射性原子核が多数 (N_0 個) 集まっているときは 壊変によってその核種が減少してゆく現象とは直接つながりをもたない。このような場合には 同位体の集まりである原子核の数が半分になる時間をあらわす 半減期 (half life) $T_{1/2}$ が用いられる。いいかえれば 半減期とは 初め (t=0) にあった量 (N_0) が半分に減少するまでの時間をいうのである。つまり $N = \frac{1}{2} N_0$ となる時間 t が $T_{1/2}$ に相当する (半減期 $T_{1/2}$ を単に T と表わす場合もある)。

上の関係から 前出の式 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ は両辺の対数をと

$$T_{1/2} = \log 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

となる。平均寿命を τ とすると

$$\tau = \int_0^{\infty} t \times \lambda N dt / N_0 = 1 / \lambda = 1.44 T_{1/2}$$

となり 半減期の1.44倍が平均寿命をあらわす。

1.3. 壊変系列

地球の年令はいろいろな方法で測定されているが 現在約45.5億年という数字がえられている。この数字がどういう意味をもっているかということについては 最近議論が盛んになっている。詳しいことは追って説明したい。また地球の生成期あたりの話はすでに地質ニュース No.158 に掲載されているので省略する。

元素が作られたとき数多くの放射性核種ができたはずであるが 半減期の短いものはこわれてなくなっている。そこで私たちが利用しようとする放射性核種は その半減期が地球の年令と同じくらいか あるいはそれ以上に長いものか 天然の原子核反応で生成されたものかに限られてしまう。また近年は分析技術の進歩にとま

第2表 おもな一次天然放射性核種

核種	壊変型	半減期(年)	同位体存在比(%)
K ⁴⁰	β ⁻ (88%) EC (12%)	1.25×10 ⁹	0.0119
Rb ⁸⁷	β ⁻	5 ×10 ¹⁰	27.85
La ¹³⁸	β ⁻ (~30%) EC (~70%)	1.0 ×10 ¹¹	0.089
Nd ¹⁴⁴	α	5 ×10 ¹⁵	23.87
Sm ¹⁴⁷	α	1.3 ×10 ¹¹	15.07
Lu ¹⁷⁶	β ⁻	2.4 ×10 ¹⁰	2.60
Re ¹⁸⁷	β ⁻	5 ×10 ¹⁰	62.93
Pt ¹⁹⁰	α	5.9 ×10 ¹¹	0.0127
Th ²³²	α	1.39×10 ¹⁰	100
U ²³⁵	α	7.1 ×10 ⁸	0.720
U ²³⁸	α	4.51×10 ⁹	99.276

第3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)
ウラニウム 238	U ²³⁸	α	4.5×10 ⁹	99.28	3.0×10 ⁻⁶
ウラニウム 235	U ²³⁵	α	7.5×10 ⁸	0.71	2.1×10 ⁻⁶
トリウム 232	Th ²³²	α	1.4×10 ¹⁰	~100	11.4×10 ⁻⁶
カリウム 40	K ⁴⁰	β ⁻ , EC	1.3×10 ⁹	0.0119	3 ×10 ⁻⁶
ルビジウム 87	Rb ⁸⁷	β ⁻	5.0×10 ¹⁰	27.85	7.5×10 ⁻⁵
白金 190	Pt ¹⁹⁰	α	5.9×10 ¹¹	0.0127	
レニウム 187	Re ¹⁸⁷	β ⁻	4 ×10 ¹²	62.93	10 ⁻⁹
ルテチウム 176	Lu ¹⁷⁶	β ⁻	2.4×10 ¹⁰	2.60	10 ⁻⁸
サマリウム 147	Sm ¹⁴⁷	α	1.3×10 ¹¹	15.07	10 ⁻⁶
ネオジウム 144	Nd ¹⁴⁴	α	5 ×10 ¹⁵	23.87	
セリウム 142	Ce ¹⁴²	α	5 ×10 ¹⁵	11.07	
ランタン 138	La ¹³⁸	EC, β ⁻	7 ×10 ¹⁰	0.089	10 ⁻⁸
インジウム 115	In ¹¹⁵	β ⁻	6 ×10 ¹⁴	95.77	10 ⁻⁷

* α: アルファ壊変 β⁻: ベータマイナス壊変 EC: K 壊変

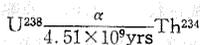
** Adams による

で中性子やその他の放射線による核反応で放射性核種を作り 生成した放射線の測定によってもそとの核種や元素を分析する放射化分析などによる研究も進んでいる。

さしずめ このシリーズでは U・Th・Pb および Rb・Sr 系列の話に焦点をしばっているので 半減期の長い放射性核種の表を第2,3表に示した。

天然の放射性物質は写真乾板に作用しうる3種の線を放射することが見出された。α β および γ 線というその3つの線は 磁界による影響が異なるが これはつまり異なった電荷をもっていることを示すものである。

アルファ線(α-rays)は正に荷電しており さらにこれは高速で動いているヘリウム原子核である。天然に存在する元素で最も原子番号の大きいものはウラン(92)である。ウランの同位体で 天然に存在する大部分(99.27%)はウラン238である。ウラン238の原子核は陽子2個と中性子2個とが結びついた粒子を放出して Zが2 Aが4だけ少ないトリウム234の原子核になる。周期律表で2列左の元素になるわけである。この粒子はヘリウム4の原子核であり 前述のようにアルファ粒子(α-particle)と呼ばれ また高速で運動している状態をアルファ線という。アルファ線を放出して原子核がこわれる現象をアルファ壊変(α-decay)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等しいが 原子核とアルファ粒子の実際の質量との関係が成立していない。これらのことを表わすには $U^{238} \rightarrow Th^{234} + \alpha$ または



とする。4.15×10⁹ yrs は半減期を示す。壊変によって生成された原子核を娘核(daughter nuclide) もとの原子核を親核(parent nuclide)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わずかに小さいのは 両者の運動エネルギーとして与えられたためである。

さて トリウム 234 は陽電子である ベータ粒子が核から放出されると 質量数は変化せずに 核荷電は1単位増加する。この元素は周期律表で1列右側のプロトアクチニウム Pa である。その運動状態をベータ線といい この型の壊変をベータ壊変という。ガンマ線の放出では原子番号および質量数はなんら変化を受けない。この線は可視光と同様な電磁波であるが 非常に波長の短いものである。またこれは非常に高電圧で働かせたX線管から出るX線と同じである。

次頁に 鉛の同位体である Pb²⁰⁶ Pb²⁰⁷ Pb²⁰⁸ の親であるウラニウムの U²³⁸ トリウムの Th²³² ウラニウムの U²³⁵ のそれぞれの壊変系列を示す。

すなわち ウラニウム系列(4n+2)では U²³⁸ がアルファ粒子を放出して分解し Th²³⁴ になる。このトリウム同位体はβ放射によって分解を起こしてプロトアクチニウム Pa²³⁴ を形成し これが変じて U²³⁴ となる。これから徐々に5つのα放射が起こって Pb²¹⁴ となり 最終生成物として安定な鉛同位体 Pb²⁰⁶ で壊変が終る。つまり ウラン238の原子1個は結局8回のアルファ壊変でできる8個のヘリウム原子と最後の安定な核種の鉛206の1個の原子にかかわるのである。

アクチニウム系列(4n+3)は 天然においておよそ0.71%産するU²³⁵からはじまり 7つのアルファ粒子と4つのベータ粒子の放射によって安定な同位体Pb²⁰⁷に至るものである。

トリウム系列(4n)は 天然に産する寿命の長い Th²³² にはじまるもので 鉛の安定同位体 Pb²⁰⁸ に至るのである。これらの核種の原子数は壊変の法則に従っ

て変化する。そのために外からの作用を受けず しかもその鉱物などの中の成分が逃げ出していないものについて 減少する放射性核種と それに伴って増加する安定な核種との量比を測定することにより 岩石を構成する鉱物が結晶してから現在までの時間を知ることができるのである。

一方 ルビジウム—ストロンチウム系列では



ータ壊変によって Rb⁸⁷ から Sr⁸⁷ に変わる簡単な系列がある。一般にルビジウム元素にはおよそ 27.85% の Rb⁸⁷ が含まれている。ルビジウムの半減期が長い ため 年令の若い試料では Rb⁸⁷ の壊変でできた Sr⁸⁷ は微量である。もともとそこにあった Sr⁸⁷ と比べて あまりにも少量の放射性源 Sr⁸⁷ であるので 測定は困難である。古い年令のものでも同じようなもので 微

第4表 U²³⁸ (ウラニウム) 系列

放射性元素	核種	壊変型	半減期
Uranium I	U ²³⁸	α	4.51×10 ⁹ y
Uranium X 1	Th ²³⁴	β ⁻	24.10 d
Uranium X 2	Pa ^{234m}	β ⁻	1.175 m
Uranium Z	Pa ²³⁴	β ⁻	6.66 h
Uranium II	U ²³⁴	α	2.48×10 ⁵ y
Ionium	Th ²³⁰	α	8.0×10 ⁴ y
Radium	Ra ²²⁶	α	1622 y
Radium emanation, radon, niton	Rn ²²²	α	3.8229d
Radium A	Po ²¹⁸	α, β ⁻	3.05 m
99.98% 0.02%			
Radium B	Pb ²¹⁴	β ⁻	26.8 m
Astatine	At ²¹⁸	α, β ⁻	1.5 s—2 s
99.9% 0.1%			
Radium C	Bi ²¹⁴	β ⁻ , α	19.7 m
0.04% 99.96%			
Radon	Rn ²¹⁸	α	0.019 s
Radium C'	Po ²¹⁴	α	1.64×10 ⁻⁴ s
Radium C''	Tl ²¹⁰	β ⁻	1.32 m
Radium D	Pb ²¹⁰	β ⁻	19.4 y
Radium E	Bi ²¹⁰	β ⁻ , α	5.013 d
5×10 ⁻⁵ % 99+%			
Thallium	Tl ²⁰⁶	β ⁻	4.19 m
Radium F	Po ²¹⁰	α	138.401 d
Radium G	Pb ²⁰⁶	stable	—

y: 年 d: 日 h: 時間 m: 分 s: 秒
 (第4 5 6表は K. Rankama: Progress in Isotope Geology 1963 から)

量を正確に定量する技術の進歩の必要があった。また Rb⁸⁷ の壊変定数は β 線スペクトルが低エネルギー領域をもっているの で 非常に薄い測定試料でも β 線吸収の

第5表 U²³⁵ (アクチニウム) 系列

放射性元素	核種	壊変型	半減期
Actinouranium	U ²³⁵	α	7.1×10 ⁸ y
Uranium Y	Th ²³¹	β ⁻	25.64 h
Protactinium	Pa ²³¹	α	3.43×10 ⁴ y
Actinium	Ac ²²⁷	β ⁻ , α	21.6 y
1.2% 98.8%			
Actinium K	Fr ²²³	β ⁻ , α	22 m
~6×10 ⁻³ % 99+% Radio-actinium	Th ²²⁷	α	18.17 d
α β ⁻			
Astatine	At ²¹⁹	α, β ⁻	0.9 m
~97% ~3%			
Actinium X	Ra ²²³	α	11.68 d
α β ⁻			
Bismuth	Bi ²¹⁵	β ⁻	8 m
Actinon	Rn ²¹⁹	α	3.92 s
Actinium A	Po ²¹⁵	α, β ⁻	1.83×10 ⁻⁵ s
99+% 5×10 ⁻⁴ %			
α β ⁻			
Actinium B	Pb ²¹¹	β ⁻	36.1 m
Astatine	At ²¹⁵	α	~10 ⁻⁴ s
Actinium C	Bi ²¹¹	α, β ⁻	2.16 m
99.7% 0.3%			
α β ⁻			
Actinium C''	Tl ²⁰⁷	β ⁻	4.79 m
Actinium C'	Po ²¹¹	α	0.52 s
Actinium D	Pb ²⁰⁷	stable	—

第6表 Th²³² (トリウム) 系列

放射性元素	核種	壊変型	半減期
Thorium	Th ²³²	α	1.39×10 ¹⁰ y
Mesothorium I	Ra ²²⁸	β ⁻	6.7 y
Mesothorium II	Ac ²²⁸	β ⁻	6.13 h
Radiothorium	Th ²²⁸	α	1.910 y
Thorium X	Ra ²²⁴	α	3.64 d
Thorium emanation, thoron	Rn ²²⁰	α	51.5 s
Thorium A	Po ²¹⁶	α	0.158 s
Thorium B	Pb ²¹²	β ⁻	10.64 h
Thorium C	Bi ²¹²	β ⁻ , α	60.5 m
36.2% 63.8%			
α β ⁻			
Thorium C''	Tl ²⁰⁸	β ⁻	3.10 m
Thorium C'	Po ²¹²	α	3.04×10 ⁻⁷ s
Thorium D	Pb ²⁰⁸	stable	—

わかる。天然現象においてどこかに時計がしかけられ人間がそれを見出して利用する可能性があることを示している。放射能で働く時計は示す時間は正確であるが目的とする時間の長さに応じてそれぞれちがったスケールの時計を用いなければならないのが欠点である。それは時間のスケールが普通の時計のように等間隔になっていないためである。

放射性核種の量が崩壊で減少してゆくにつれてその量が半分に減少する時間は常に一定(半減期 $T_{1/2}$)であるが実際に減少する量そのものは減少するために測定がむずかしくなってくる。したがって時間の推定はただ長いというだけで正確な数字は求められなくなってしまう。半減期が $T_{1/2}$ 年のものは $T_{1/2}$ 年後には初めの $1/2$ に $2 \times T_{1/2}$ 年後にはその半分である $1/4$ に減少し $n \times T_{1/2}$ 年後には初めの量の $1/2^n$ に減少する。したがって半減期の数倍の年数が経過すればその放射性核種はほとんど消滅してしまい時計としての機能はなくなってしまう。そのために長い年代を測定するためには $T_{1/2}$ の長いものを用いる必要がある。しかし必要以上に長い半減期のものを用いると測定された年齢の精度が悪くなる。これは半減期の長いものはゆっくり崩壊するために短期間では少量しか減少を示さず測定にかかってこないためである。そこで測定したい年代に応じてできればその年数の10倍から数分の1程度の範囲の半減期を示す核種を時計として使用することが望ましいのである。現在では測定の方法あるいは精度の向上によってこの範囲はまだまだ広げられるようである。とくに長寿命の核種を利用して短い時間を測定することはその精度からいって半減期の10万分の1の程度にまでおよぶ測定が可能となりつつある。

1.5. 壊変定数が長い年代にわたって一定であったか
地球の年齢とか元素の年齢を論ずる場合に10~100億年というような長い時間をあつかっていることはよくご存知のことと思う。いってみればたとえば地球の年齢(誕生してから今までのこと)を45.5億年といっているがこの地球の年齢を私たちの時間の感覚に近づけて1年とすると人間100歳まで生きるとしてもこの人間の年齢(寿命)は1秒にしかならない。このような長い時間をはかるのに用いた放射能の時計が現在用いている時計と同じ目盛でうごいているかどうか疑問に思うのは当然であろう。

放射能壊変についてその壊変定数 λ を用いて表わした式 ($N = N_0 e^{-\lambda t}$) が私たちの日常用いている時間を用いて正確に成立する。このことは数十年より短い半減期のものまでについて多数のものについてい

るのであるが半減期が長くなると放射能が発見されてから日も浅いということのために直接確かめたいとはいえない。しかも原理的に放射能の時計の正しさを疑う余地はいくつもある。以下その点について少々触れておこう。

④ 放射壊変の速さが外界の影響を受ける可能性
分子の世界と原子核の世界とがエネルギー的にかけはなれていることは前にも述べたとおりである。このことは現在の地球上では確かにあてはまる。太陽の中とかその他核反応(nuclear reaction)の進行している星の中などでは私たちのあつかっている年齢測定に用いるような長時間にわたる壊変よりはるかに急速におこる核反応がおこっている。核反応の起こっているような極度の高温状態の下では放射能時計は役立たない。つまり太陽の中などで行なわれている核反応が現在観測されている太陽表面の非常に高温をもたらしめているのである。しかし地球内部の数千度数万度程度の温度では時計への影響はない。原子核の状態に変化を与えうるほどの大きなエネルギー現象はたとえば地上でも放射性物質から出される放射線(radiation)や宇宙線(cosmic rays)などから受ける影響があるがそれはきわめて少数であるから無視されうる。低いエネルギーの現象でも原子核の状態に影響を与えたとえば半減期をわずかながらかえる場合のあることも報告されてはいる。しかし実際の年齢測定の結果に影響をおよぼすほどの効果はないといえる。

⑤ 相対論から導かれる時間の問題

相対論(relativity)によると測定する系(A)に対して速度 v で運動する系(B)における時間間隔 t_B はAから測定すれば $t_B / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ だけ長い時間間隔として測定される。従って同一寿命の核種でも高速度で運動していれば寿命は長くなる。この効果は当然おこることであるが通常の年齢測定では問題とならないであろう。

⑥ 現在の一定の定数は遠い過去にもあてはまるか
元素のつくられた時代といった大きな年代をさかのぼって考えたとき現在一定の定数と考えられているものが変化していたために年齢測定値が狂ってくるのが考えられる。たとえば重力の定数 G が宇宙の年齢の逆数に比例する可能性がある。 G の変動を考えたとき放射能による年齢測定値の狂いが生ずるということである。 G を年齢の関数(function)とすれば素粒子の荷電量・質量も年齢の関数となりもちろん放射性核

第7表

重力定数G の1年あた りの減少率	鉛法による 年代 ×10 ⁹ 年	カリウム・ア ルゴン法によ る年代 ×10 ⁹ 年	ルビジウム・ス トロンチウム法 による年代 ×10 ⁹ 年	真の 値 ×10 ⁹ 年
0	4.5	4.5	4.5	4.5
1×10 ⁻¹¹	4.5	4.4	4.0	4.2
2.5×10 ⁻¹¹	4.5	4.3	3.5	3.8
5×10 ⁻¹¹	4.5	4.2	2.8	3.3

種の壊変定数も年令の関数となる。壊変定数の年令による変化は壊変のエネルギーの年令による変動から計算される。その変化はそれぞれの核種によって異なる。

Gが変動すれば同じ事件の年令を別の方法で測定したとき結果に差がうまれる。たとえば鉛-鉛法で4.5×10⁹年の年令が測定されたとき他の方法のカリウム-アルゴン法やルビジウム-ストロンチウム法で同じ年令を測定したときどのようになるかを第7表に示す。

Gの変化率は現在から過去にさかのぼって毎年増加

第8表 Rb, Sr の原子質量および同位体天然存在率

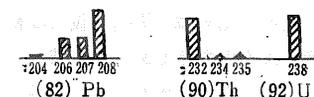
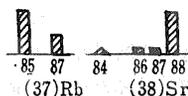
元 素	同位体	原子質量 (au)	同位体天然存在率	
			相対測定値(%)	
ルビジウム	⁸⁷ Rb ⁸⁰	79.921900±500	<0.0007	
	⁸⁷ Rb ⁸¹	80.919010±100	<0.0007	
	⁸⁷ Rb ⁸²	81.917959±33	<0.0007	
	⁸⁷ Rb ⁸⁴	83.914352±7	<0.006	
	⁸⁷ Rb ⁸⁵	84.911710±60	72.2 72.5 72.15*	
	⁸⁷ Rb ⁸⁶	85.911160±90	<0.005	
	⁸⁷ Rb ⁸⁷	86.909180±80	27.8 27.5 27.85*	
	⁸⁷ Rb ⁸⁸	87.911190±110	<0.003	
	⁸⁷ Rb ⁸⁹	88.911220±110	<0.007	
	⁸⁷ Rb ⁹⁰	89.914400±140	<0.007	
ストロンチウム	⁸⁸ Sr ⁸⁴	83.913376±11	0.56* 0.55 0.55	
	⁸⁸ Sr ⁸⁵	84.912900±60	<0.002	
	⁸⁸ Sr ⁸⁶	85.909260±80	9.86* 9.75 9.87	
	⁸⁸ Sr ⁸⁷	86.908890±80	7.02* 6.96 7.02	
	⁸⁸ Sr ⁸⁸	87.905610±90	82.56* 82.74 82.56	
	⁸⁸ Sr ⁸⁹	88.907010±90	<0.0008	
	⁸⁸ Sr ⁹⁰	89.907330±90	<0.0003	
	⁸⁸ Sr ⁹¹	90.909780±100	<0.0003	
	⁸⁸ Sr ⁹²	91.910520±130	<0.0003	

* A. O. Nier によって最適値として採用されたもの



第5図

元素の同位体比図
各元素はその同位体比最大の同位体を基準(100)として棒グラフで表わしている。この基準で同位体比が1%以内のものは△で表わしてある。正確な数値については第8, 9, 10表を参照のこと。



第9表 鉛の原子質量および同位体天然存在率

元素	同位体	原子質量 (au)	同位体天然存在率	
			相対測定値(%)	
鉛	⁸² Pb ²⁰²	201.972190±220	<0.003	
	⁸² Pb ²⁰³	202.973400±50	<0.0004	
	⁸² Pb ²⁰⁴	203.973069±24	1.46*(方鉛鉱, Great Bear 湖) 1.37 1.37 1.32 1.37 ("common" 鉛) 1.40 1.56 (方鉛鉱, Ivigtut, グリーンランド)	
	⁸² Pb ²⁰⁵	204.974516±40	<0.001	
	⁸² Pb ²⁰⁶	205.974459±12	23.6*(方鉛鉱, Great Bear 湖) 23.15 26.26 26.7 25.0 ("common" 鉛) 25.2 22.50 (方鉛鉱, Ivigtut, グリーンランド)	
	⁸² Pb ²⁰⁷	206.975898±12	22.6*(方鉛鉱, Great Bear 湖) 22.11 20.82 20.5 21.2 ("common" 鉛) 21.7 22.61 (方鉛鉱, Ivigtut, グリーンランド)	
	⁸² Pb ²⁰⁸	207.976644±12	52.3*(方鉛鉱, Great Bear 湖) 53.4 51.55 51.5 52.4 ("common" 鉛) 51.7 53.33 (方鉛鉱, Ivigtut, グリーンランド)	
	⁸² Pb ²⁰⁹	208.981094±25	<0.00005	
	⁸² Pb ²¹⁰	209.984177±14	<0.000007	
	⁸² Pb ²¹¹	210.988803±39	<0.000007	
	⁸² Pb ²¹²	211.991896±16	<0.000007	
	⁸² Pb ²¹⁴	213.999760±60	試料の年代および起源により Pb 同位体存在率に変動がある	

第10表 U, Th 原子質量および同位体天然存在率

元 素	同位体	原子質量 (au)	同位体天然存在率
			相対測定値(%)
ト リ ウ ム	²²³ Th	223.020890±170	
	²²⁴ Th	224.021379±46	
	²²⁵ Th	225.023660±60	
	²²⁶ Th	226.024890±23	
	²²⁷ Th	227.027768±41	
	²²⁸ Th	228.028749±16	
	²²⁹ Th	229.031629±40	
	²³⁰ Th	230.033080±60	
	²³¹ Th	231.036350±42	
	²³² Th	232.038211±42	100
	²³³ Th	233.041428±42	
²³⁴ Th	234.043570±80		
ウ ラ ン	²²⁷ U	227.030920±220	
	²²⁸ U	228.031278±47	
	²²⁹ U	229.033200±60	
	²³⁰ U	230.033926±24	
	²³¹ U	231.036330±60	<0.003
	²³² U	232.037167±17	<0.00006
	²³³ U	233.039498±40	<0.00006
	²³⁴ U	234.040900±60	0.0057 0.00590 0.00557 0.0056*
	²³⁵ U	235.043933±43	0.714 0.7205* 0.722 0.7196 0.7204 0.718
	²³⁶ U	236.045733±40	<0.0002
	²³⁷ U	237.048581±41	<0.0001
	²³⁸ U	238.050760±80	99.280 99.272 99.276 99.274*
	²³⁹ U	239.054320±60	<0.0001
	²⁴⁰ U	240.056700±50	<0.00005

する割合を示したものである。Gが宇宙の年令の逆数に比例するとするとこの変化率は約 10^{-10} であって方法別による年令の差が大きく出るはずである。次号から述べてゆこうと考えている地球の年令など年令の測定値はいろいろな方法でもかなりよく一致しているから表の計算結果と比較するとGの変化はたとえあるとしても1年間の減少率は 2×10^{-11} 以下であろう。

このように現在行なわれている放射能による年令測定的基础について疑いの余地のある点をあげた。つまり放射壊変が現在測定されて確かめられている規則(一定の定数)に従って過去からずっと続いてきているという仮定に対する疑義である。しかし一応そうした点については年令測定の結果に明らかな影響を与える可能性はないとされている。

しかし以上のことがら以外にもまだまだ疑問点があり重大な要素がこれから後に見出されるかもしれない。現在までの多数の年令測定の結果が本質的にはそれぞれのあいだに矛盾がみとめられないという証拠が支えとなって年令測定法が発展してきているのである。

以上絶対年令測定(地質年令測定)あるいは同位体地質学・地球化学の基礎的なことを書いてきましたが力不足で十分な説明にならないで終わってしまった項目もあると思います。筆者のこのシリーズの最終目標は同位体地質学・地球化学であることは前にも述べました。しかしその前に年令測定の方法と考え方を紹介しその上で同位体地質学の話に入ってゆきたい。その途中において同位体測定法の解説もこころみたい。というのは同位体地質学・地球化学の発展にはそうした先人の才能と努力とによってひらかれた過程が基になっているからです。

(つづく)

(筆者は地球化学課)

訂 正

地質ニュースNo158-10「地球化学の話④」29頁第3図の引用文献は次のとおりです。「化学の領域」vol18 p11(1964)引用文献名脱落して申訳ありませんでした

新刊紹介

水質底質調査入門 理学博士 水野篤行

粒度分析はどのようにおこなえばよいか? 重鉱物の分離法は? 微化石の分離法は? 粘土鉱物の分離・処理法は? 化学分析法は? 水質分析法は? これらについての解答はそれぞれの専門書をその都度さがしださなければ得られなかった。それを一冊の本ですますことができたならという大方の要望にこたえるものが本書である。前半は野外における試料採取法と水質分析にあてられ後半は堆積物の実験室における諸処理法にページがさかされている。標題が示すように入門書的に解説されているが各項目ごとに詳細な方法とともに必要な計算表・計算図類・関係資料が掲載さ

れている。著者自身が述べているように本書にもりこまれている項目については実際の調査研究の際にこれ一冊があればいたい間にある。手軽な文字通りの「ハンドブック」であり非常に有用であろう。主要目次は次のとおり。

- I はじめに
 - II 野外調査の計画と準備
 - III 一般的観察
 - IV 採水と採水に伴う測定
 - V 採泥と採泥に伴う測定観察
 - VI 水の処理
 - VII 底質の処理
 - VIII 生物の処理
- 付録

新書版型 水質底質調査入門

発行 ラティス社(東京都豊島区雑司ヶ谷 2-25-4)

Tel. (03) 987-4748

発売 丸善株式会社

定価 480円