

# 地球上でつくられる放射性元素

## 岩石と放射線 II

佐野 浚一

### 放射性炭素をつくる核反応

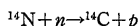
考古学の進歩に炭素の放射性同位体である炭素14による年代の測定が大きな貢献をしていることは 多くのかたがたがごぞんじであろう。炭素14は半減期約5600年でベータ壊変をして安定な窒素14になる。

炭素14はもちろん人工的につくることができる。天然の窒素の大部分は窒素14で これに中性子をあてると原子核に中性子はいりこみ かわりに陽子がおいだされて 炭素14ができる。原子核に中性子 陽子 アルファ粒子などの流れやガンマ線などを原子核に衝突させ原子核に変化をおこさせることができる。このような変化を **核反応** という。

原子核は陽電気をもっているので 陽子やアルファ粒子をなかなかよせつけないが 中性子は電気をもっていないので エネルギーがひくくても核反応がおこる。だから 実用的にラジオアイソトープをつくるには中性子による核反応が多くもちいられている。原子炉は大量に中性子を発生するので ラジオアイソトープを製造するためにも大切な装置である。

さて 炭素14が天然に存在するのは 宇宙線による核反応でつくられるからである。地球にむかつてとんでくる **宇宙線** の大部分は 壊変の場合に放出される放射線のエネルギーの数千倍から数万倍という大きなエネルギーをもつ裸の(核外電子をとまわらない)原子核で 大部分は水素原子核 つまり陽子である。これらの粒子はさらに核反応をくりかえしながら地表に達し 高いエネルギーをもっている成分は地下 あるいは水面下かなりの深さまで貫通する。このように 宇宙線によつて中性子が発生し 空気中の窒素の原子核と反応して炭素14ができる。

核反応は 化学反応のように



というかたちであらわすか



のように 衝突させる粒子と生成する粒子のうち かるいほうとを括弧のなかにいれてあらわす ここで  $n$  は中性子  $p$  は陽子である

### 炭素14の分布と年代測定

こうして おもに大気圏のうへのほうでできた炭素14

は空気中の酸素と化合して炭酸ガスのかたちになり ふうの炭酸ガスとまじつて地表におりてくる。地表におりてきた炭素14は植物に吸収されたり 海や川や湖の水にとけこんで自然界を循環しているが そのあいだに壊変して窒素14にもどる。しかし 一方では宇宙線から新しく炭素14ができていて 全体としてみれば地球上に存在する炭素14の量は一定であつて やく81トンすなわち3.7億キュリーとみつめられている。このうち空気中には約1.2トンふくまれていると考えられる。

地球上のいろいろな物質のなかの炭素にふくまれている炭素14の量はほとんど一定である。生物のなかには炭素1グラムにたいして毎分15.3回の壊変がおこるだけの炭素14がふくまれているが 海水中の貝殻や炭酸塩沈澱物にふくまれている炭素14は7パーセントぐら多い。このちがいはふうの炭素(質量数12)と炭素14との原子の質量がわずかにちがうためにおこるので **同位体効果** といわれる。

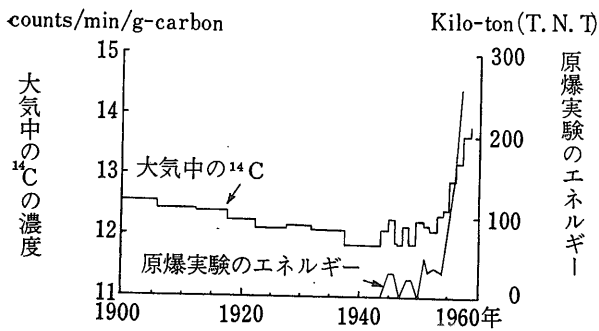
生物がいきているあいだは炭素の新陳代謝がおこなわれているから炭素の放射能は一定であるが 生命がうしなわれると大気や海水から炭素14が供給されなくなるので 放射能は半減期にしたがつて減衰する。したがつて 地層のなかにふくまれている木材 骨あるいは貝殻などのなかの炭素の量にたいする炭素14の放射能の比をはかれば それらの試料が生活していた時代から現在までの時間が計算できる。したがつて それらの試料をふくんでいる地層の年代がもとめられる。

炭素14の半減期は約5600年であるから この方法で測定できる年代は数百年から数万年 つまり洪積世の後期までぐらいである。

炭素14による年代測定がウランやナリウムの壊変による方法とちがう点は 炭素14が地球の上空でいつもおなじわりあい生成され 半減期にくらべてずつとみじかい時間に地球上に一樣に分布するという点であつて 炭素の一定量にたいする放射性の同位体の量がずつと一定不変であつたということを仮定しているのである。

### 人類の活動と宇宙線の嵐

しかし 人類の活動がさかんになるとともに この仮定がなりたたなくなった。石炭や石油の消費が年々増



第1図 大気中の<sup>14</sup>Cの濃度の変化—Suess 効果(燃料使用の増加による減少)と核兵器実験の影響

えからいままでのあいだに ほんとうに一定のわりあい  
で炭素14がつくられてきたであろうか。宇宙線嵐と  
いって短時間のあいだ宇宙線の強さが急激にふえる現象  
が観測されている。非常にはげしい宇宙線嵐が続いて  
宇宙線のつよさがながいあいだ大きくなって 炭素14が  
生成される量に影響をあたえたことはなかっただろうか  
という疑問がうまれる。

数千年前までの宇宙線のつよさの変化は たとえば  
ふるい樹木にふくまれている炭素によって年代決定をお  
こない 一方その年輪をかぞえることによってしらべる  
ことができる。現在のところ過去数千年のあいだに年  
代の測定値に影響するほどの宇宙線のつよさの変化はな  
かったであろうといわれている。

地層にふくまれている化石の種類は地質時代によつて  
かわり 大昔の動物のあるものは急に絶滅し ある時代  
以後の地層にはその化石がまったくふくまれていない。  
たとえば やく6千万年まえに大型の爬虫類が急にす  
たをけたのである。こういう現象がはげしい宇宙線  
のあらしが続いて 中性子の雨がふったためにおこつた  
とかんがえられないだろうか。こういう仮説をたんに  
空想科学小説の材料にするだけでなく こういう事件に  
ともなういろいろな現象 すなわち鉱物の放射性損傷安  
定同位元素の存在比の変化 あるいは地磁気の変化など  
についてしらべてみてもよいのではなかろうか。

加したため それらの燃焼によって炭素14のすくない炭  
素が空气中に炭酸ガスとして放出され 1900年頃をさか  
えとして空气中の炭素14の量が相対的にへつてきたので  
ある。ところが 1950年頃からはぎやくに大気中での  
核兵器の爆発実験のため 空气中の炭素14の量がいちじ  
るしく増加した。1963年 部分核実験停止条約がむす  
ばれたので 空气中の放射性核種の量はしだいに減少す  
るであろうが このように核爆発によって生ずる死の灰  
は成層圏までふきあげられ 徐々に落下しつづあるので  
相当長期間にわたって地上に落下するのであろう。ま  
た ラジオアイソトープの利用や 原子力発電 原子力  
動力の開発にともなって 放射性廃棄物が大量にうまれ  
その一部が地表や水圏に分布する可能性がないとはい  
えない。これらの天然に分布する人工放射性核種は気圏  
や水圏を汚染して生物に有害であるからできるだけす  
くなくしなければならぬ。

さて 人類の活動による炭素14の量の変化は 年代測  
定にさしあたり影響しないけれども はたして数万年ま

第1表 天然における核反応で生成する放射性核種

核種	記号	壊変型	半減期	核反応
トリチウム(三重水素)	<sup>3</sup> H(T)	$\beta^-$	12.262y	宇宙線の作用による $^{14}\text{N}(n, t)^{12}\text{C}$ , $^{14}\text{N}(n, spall)^3\text{H}$
炭素14	<sup>14</sup> C	$\beta^-$	5568y	宇宙線の作用による $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
ベリリウム7	<sup>7</sup> Be	EC	53.61d	大気中のN <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> に対する宇宙線の作用
ベリリウム10	<sup>10</sup> Be	$\beta^-$	$2.5 \times 10^6$ y	
ナトリウム22	<sup>22</sup> Na	$\beta^-$	2.6y	
珪素32	<sup>32</sup> Si	$\beta^-$	~700y	
燐32	<sup>32</sup> P	$\beta^-$	14.30d	大気中のArに対する宇宙線の作用
燐33	<sup>33</sup> P	$\beta^-$	25.4d	
塩素36	<sup>36</sup> Cl	$\beta^-$	$3.08 \times 10^5$ y	および $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$
ウラン233	<sup>233</sup> U	$\alpha$	$1.62 \times 10^5$ y	$^{232}\text{Th}(n, \gamma)^{233}\text{Th} \xrightarrow{\beta^-} ^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{233}\text{U}$
ネプツニウム237	<sup>237</sup> Np	$\alpha$	$2.20 \times 10^6$ y	$^{238}\text{U}(n, 2n)^{237}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{237}\text{Np}$
プルトニウム239	<sup>239</sup> Pu	$\alpha$	$2.436 \times 10^4$ y	$^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Pu}$
核分裂生成物				$^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ または $^{232}\text{Th}$ の自発核分裂または中性子核分裂

### トリチウム(三重水素)

天然における核反応によってつくられる放射性元素に  
は炭素14のほかいろいろのものがしられている。

(第1表) これらには宇宙線の作用によって大気中でつ  
くられるものと 放射性鉱物中でウラン系列やトリチウム  
系列からの放射線などによってつくられるものとに 大  
別される。トリチウムあるいは三重水  
素(水素3)は宇宙線の作用でできる放  
射性元素として 炭素14とならんで重要  
なものである。

大きなエネルギーをもつ一次宇宙線が  
空気の原子核と衝突すると 原子核は多  
数の粒子に分裂することがある。これ  
を 破砕反応 という。トリチウムは  
大気圏の上部で破砕反応によってできる。  
また 窒素14に中性子があたって炭素14  
と陽子になるかわりに トリチウムと安  
定な炭素12にもなる。トリチウムは  
半減期12.3年でベータ壊変をして安定  
なヘリウム3になる。

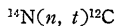
地球上でトリチウムがつくられる速度

は1平方センチメートルあたり毎秒0.75原子と推定されている。空気中にはわずしか存在せず 気圏全体で2グラム原子ぐらいにすぎない。しかしこれも核爆発の影響で最近増加している。

トリチウム原子はふつうの水素原子の3倍もの質量をもっているから 原子の質量の差がきいてくる物理的または化学的現象では たとえおなじ水素だからといって も2つの同位体のあいだで差がおきる。すなわち同位体効果が大い。したがって 炭素14の場合とちがい ふつうの水素にたいするトリチウムの比は地球上のどこでもほとんど一定であるというわけにはゆかない。

しかし 水のゆくえを追跡するトレーサーとしてトリチウムをつかえば ほかのラジオアイソトープや薬品をつかうよりも 水のみちすじでの沈澱やほかの物質による吸着などの影響がほとんどなく たしかな結果がえられるはずである。したがって 核爆発でできたものをふくめて天然に存在するトリチウムの分布を観測することによって 地下水や海水の移動が研究されている。人工的につくったトリチウムももちろんトレーサーとして利用されている。

トリチウムが天然に生成される反応は



または破砕反応(spallation)で  $t$  はトリチウム( $^3\text{H}$ )粒子をあらわす 元素または静止した状態は  $t$  のかわりに T であらわす 破砕反応の場合にはいろいろのわかれたががあって 反応をあらわす式の括弧のなかを  $(n, \text{spall})$  とあらわすこともある

### 中性子を発生する装置

トリチウムは中性子を発生する装置にも利用されている。つよい電場によって重水素(水素2)をイオンの流れにして数百キロ・エレクトロンボルトのエネルギーをあたえ トリチウムに衝突させてやると 14ミリオン・エレクトロンボルトという高いエネルギーをもつ中性子を発生し 安定なヘリウム4になる。

この反応を利用するとわりに小型の装置ができるばかりでなく 電気的な制御によってパルス状にみじかい時間だけ 中性子線を発射する操作をくりかえすことができる。

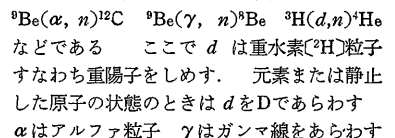
トリチウムをつかった装置や原子炉が発明されるまえには 中性子線源として ベリリウムとラジウムの化合物をまぜあわせたり ラジウムを金属ベリリウムでつつんだりしたものが中性子線源としてつかわれた。現在でも目的によってはこれらの線源がつかわれる。ベリリウムの原子核はアルファ線やガンマ線による核反応によって中性子をだしやすいからで リチウム ホウ素 フッ素 あるいは炭素などの軽い原子核もこのような性質をもっている。だから 放封性鉱物がこれらの元素を適当にふくんでいると 一種の中性子線源となっている。こうして 鉱物のなかで中性子による核反応がおこる。

ウラン系列やトリウム系列から放射されるアルファ線はもうすこしおもい核種の原子核とも反応する。たとえば 塩素35にアルファ線をあてるとアルゴン38と陽子またはカリウム38と中性子となる。

天然に中性子ができるもう1つの原因は 核分裂 である。これは質量数が約200以上のおもい原子核が中性子によって2つの原子核に分裂し いくつかの中性子を発生する現象で原子炉や原子爆弾の基礎となっている。

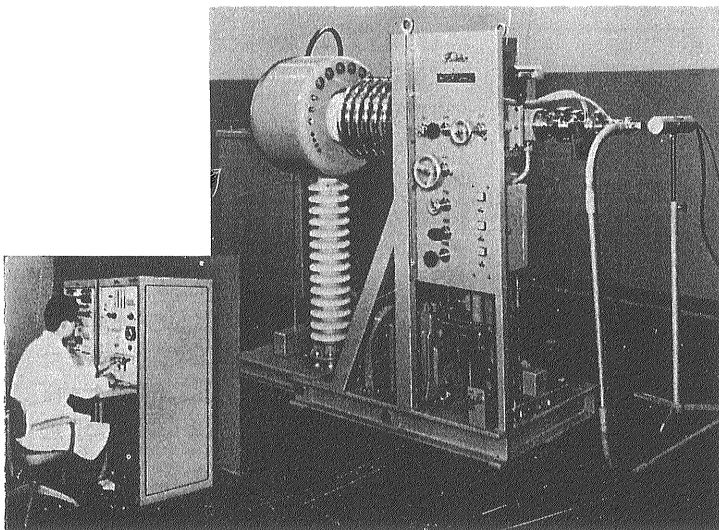
天然に発生する中性子がもとになって放射性鉱物のなかで核分裂がおこる。また そとからの刺戟がなくても自然に核分裂がおこることもある。これを 自発核分裂 という。

中性子源に利用されるおもな核反応は

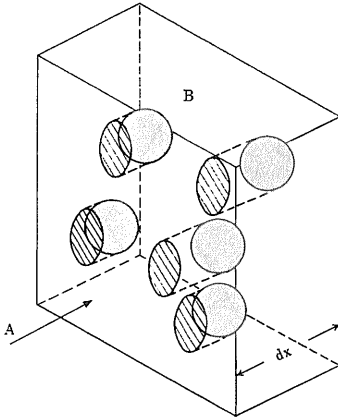


### 核反応のおこりやすさ—断面積

壊変という現象のおこりやすさをあらわすめやすは半減期である。それでは 核反応のおこりやすさをあらわすにはどうすればよ



第2図 トリチウムを利用する中性子発生装置 (東芝製 NT-20改良型)(東芝提供)



第3図 核反応の起こりやすさをあらわす断面積の概念を示す

ベリリウム リチウム 炭素などのかるくて中性子とほかの核反応をおこしにくい原子核であって これらをふくんだ物質を中性子の **減速材** としてもちいる。減速材 のなかで弾性散乱をくりかえした中性子のエネルギーは その物質の分子の熱運動のエネルギーまでさがる。このような中性子を **熱中性子** といひ エレクトロンボルトの単位ではかって100分の2.5ぐらいのエネルギーをもっている。

弾性散乱も一種の核反応と考えて そのおこりやすさを断面積であらわすことができる。散乱断面積は水素の場合がもっとも大きい。だから 地層のなかに中性子線を通させたとき熱中性子が多くつくられるほど水素が多くふくまれているということになる。地層中の水素の量は含水量に比例する。これが **中性子水分計** の原理である。また 含水量は孔隙率に比例する。中性子線の地層による散乱を測定して孔隙率を求めようというのが石油や天然ガス鉱床にたいする **中性子検層** の出発点であった。

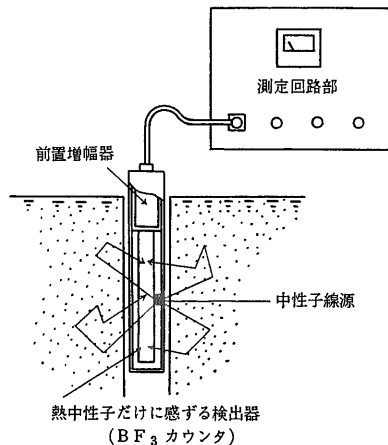
粒子Aが単位体積に  $n$  個ふくまれている原子核Bと核反応をおこす確率を  $P$  とし その反応の断面積を  $\sigma$  Bのふくまれている厚さを  $dx$  とすると

$$P = \sigma n dx$$

である  $\sigma$  の単位 **1barn** は  $10^{-24} \text{cm}^2$  にひとしいある試料に粒子を衝撃したりガンマ線を照射して放射能を生成させるとき えられる放射能を  $A$  (毎秒の壊変数 dps) 試料中の問題の核種の原子数を  $N$  粒子の線束密度を  $f$  (粒子数 /  $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ ) おこる核反応の原子断面積を  $\sigma_{\text{atm}}$  ( $\text{cm}^2$ ) 生成する放射性核種の半減期を  $T$  試料に衝突させた時間を  $t$  衝撃後経過した時間を  $d$  とすると

$$A = N f \sigma_{\text{atm}} \left( 1 - e^{-\frac{0.693}{T} t} \right) e^{-\frac{0.693}{T} d}$$

$$= 6 \times 10^{23} \times f \times \frac{W}{M} \sigma_{\text{atm}} \left( 1 - e^{-\frac{0.693}{T} t} \right) e^{-\frac{0.693}{T} d}$$



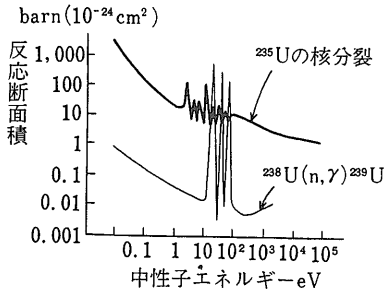
第4図 中性子水分計の原理

いだろうか。

いまAという粒子または原子核がBという原子核と反応をおこすためには たがいに接近しなければならない。Bという原子核が分布している物質のうすい層を考え Aという粒子がこの層に突入してゆくとする AのうちのあるものはBと反応をおこし のこりはその層をつきぬけてゆく。反応をおこす確率はその層の単位表面積あたりにふくまれているBのかずとに比例し 比例常数すなわち確率とBのかずとの比は反応がおこりやすいほど大きい。

ところで 核反応が純粋に衝突によっておこるとすると 反応がおこる確率はBをふくむ層の表面に平行な面でBをきった断面積とBのかずとの積である。つまりうえにのべた比例常数はBの断面積をしめている。もちろん これはあくまで一種のイメージであって 比例常数はAの種類やエネルギーによってかわる。しかしこの比例常数を **断面積** とよび 面積の単位または **バーン** という単位ではかる。バーンは実際の原子核の断面積に相当する程度の大きさである。

中性子によって核分裂をしやすい原子核はウラン 235 である。核分裂の断面積とエネルギーとの関係を見ると 第5図のように 一般的にいてエネルギーがひくいほど分裂しやすい。核反応で発生する中性子のエネルギーはミリオン・エレクトロンボルトのオーダーで。このくらいのエネルギーのところでは 核分裂の断面積はずっとちいさい。さて中性子が原子核に衝突しても単にエネルギーをあたえて速度がおそくなるだけで 核種の変化がみられない場合がある。ちょうどゴムボールをぶつけたようなもので **弾性散乱** という。この現象を利用して低エネルギーの中性子をつくることのできる。弾性散乱をおこしやすい原子核は水素 重水素



第5図 ウランの核分裂とウラン・238の(n $\gamma$ )の反応の断面積

である。ここで 問題の核種の属する元素の重量を  $Wg$  その元素の原子量を  $M$  とし  $t$  および  $d$  はおなじ単位であらわす。また原子断面積  $\sigma_{atm}$  は同位体断面積と同位体存在比との積である、

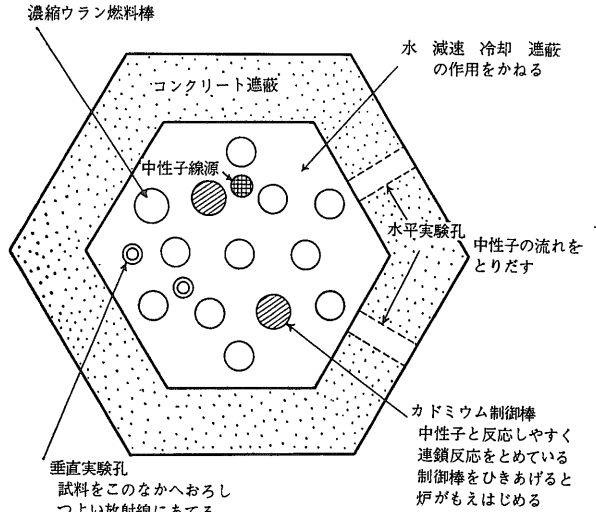
### 発熱反応と吸熱反応

ベリリウムにガンマ線をあてると中性子を発生する核反応はベリリウムの検出や分析にもつかわれる。つまり試料がベリリウムをたくさんふくんでいるほどよけいに中性子も発生するからである。ところで この反応のできる中性子とベリリウム8の原子核の質量の和はもとのベリリウム9の原子核の質量より酸素原子の質量の約100分の2だけすくない。したがってこの質量に相当するエネルギー1.66ミリオン・エレクトロンボルト以上のガンマ線をあてないと反応はおこらない。だから ガンマ線を利用するラジウム-ベリリウム中性子線源は 実はずラジウム226の娘のポロニウム214のガンマ線的作用によっているのである。ベリリウムの分析をする装置では ふつうアンチモン-124をつかっている。

つぎに ベリリウムにアルファ線をあてて中性子線を放出する反応について考えてみよう。ベリリウム8の原子核とアルファ粒子との質量の和はそれから発生する炭素12の原子核と中性子との質量の和より大きい。したがって 反応がおこるまえの粒子系はあとの状態の粒子系より 静止状態においても 高いエネルギーをもっているから アルファ粒子の運動のエネルギーが小さいくても核反応をおこすことが不可能ではない。このような場合を **発熱反応** という。

一方 ベリリウムにガンマ線をあてる場合のように反応のあとの状態の粒子系の質量の和のほうが大きい場合を **吸熱反応** という。吸熱反応のときは 衝突する粒子のエネルギーが **しきい値** とよばれるあるあた以上にならないと反応がおこらない。

たとえば 窒素14に中性子がぶつかって炭素14と陽子



第6図 簡単な原子爆の組立てを示す模式図 (うえからみたところ)

になる反応は発熱反応であるが 炭素12とトリチウムとになる反応は吸熱反応で 約4ミリオン・エレクトロンボルト以上の中性子でないとおこらない。

つまり 化学反応とおなじように 核反応にもなつてエネルギーの発生または吸収がおこる。しかし化学反応の場合とことなり エネルギー不滅の法則と質量不滅の法則とをいっしょにかんがえなければならない。

### 原子爆弾と原子炉

さて ウラン235が核分裂をおこすと平均して2.5個の中性子を放射する。もし この中性子の1個以上がふたたび核分裂をおこすようにすると **連鎖反応** がおきる。ウラン235をウラン238から分離した純粋なかたまりがあつたとする。このかたまりが小さいと中性子はそとへでてしまふが 十分な大きさがあれば 核分裂で発生した中性子がつぎつぎと分裂をおこし大爆発をおこすであろう。これが **原子爆弾** の原理である。

ウラン235をウラン238から分離することはたいへんむづかしい技術であるから **原子炉** には天然ウランかウラン235をふくむわりあいを数パーセントぐらいにまで濃縮したものでもつかうようにしたい。この場合には核分裂をおこりやすくするために 減速材をつかって中性子のエネルギーをひくくし 核分裂の断面積が大きいところへもつてくるようにする。

一方 ウラン238は中性子と反応してウラン239になる。この反応の断面積が10ないし100エレクトロンボルトのところ非常に大きいので この部分をさげなければならない。逆に 連鎖反応がどんどんすすんで原子炉が制御しきれなくなつてはこまる。原子炉の構

第 2 表 自 発 核 分 裂 の 半 減 期

核 種	記 号	半 減 期
ト リ ウ ム 230	<sup>230</sup> Th	1.5×10 <sup>17</sup> y ないしそれ以上
ト リ ウ ム 232	<sup>232</sup> Th	10 <sup>20</sup> y 以上
ウ ラ ン 234	<sup>234</sup> U	1.6×10 <sup>16</sup> y
ウ ン ン 238	<sup>238</sup> U	8×10 <sup>15</sup> y
プルトニウム 239	<sup>239</sup> Pu	5.5×10 <sup>15</sup> y

造や大きさはこのような条件と ウラン 235 の濃縮度や減速材の種類などによって決定される。

核分裂のさいに放出されるエネルギーは分裂する原子核の質量から生成する 2 つの原子核の質量の和をさしひいたものにほぼひとしいわけで やく 200 ミリオン・エレクトロンボルトに達する。このエネルギーは大部分が分裂した原子核の運動エネルギーとして放出され 続いてガンマ線 中性子 ベータ線 ニュートリノなどのかたちで放射される。

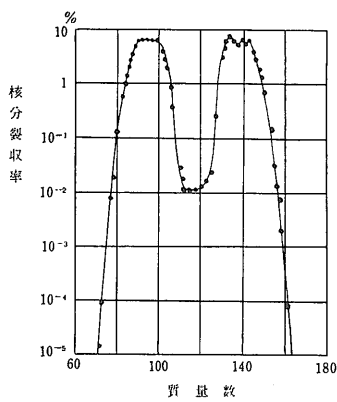
1 グラムのウラン 235 が核分裂をすることによって放出するエネルギーはやく 8 百億ジュール すなわち 2 千万キロカロリーになる。石炭 1 グラムが発生する熱量を 8 キロカロリーとすると 2 トン半の石炭がウラン 235 の 1 グラムに相当する。しかし 品位 0.1 パーセントのウラン粗鉱 1 グラムに換算すれば そのなかのウラン 235 の発生するエネルギーは石炭 18 グラムに対応するわけで ウラン鉱床は相当大規模に採掘しなければ経済的になりたないことが 了解されるであろう。

**天然で起こっている核分裂**

そとからの刺激なしでおこる自発核分裂は 壊変とおなじように そのおこりやすさを半減期であらわすことができる。そのあたいは 現在天然に存在しているものについては 非常にながい。つまり ふつうの壊変にくらべてたいへんおこりにくい現象である。

中性子核分裂にしる 自発核分裂にしる 分裂によってできる核種が つねにきまつているわけではない。しかし ある核種の原子核がたくさん分裂したときにできる核種のかずのわりあいはい定であって これを核分裂収率という。核分裂収率の大きい核種は もとの原子核の質量数の半分 すなわち 120 ぐらいのものでなく 質量数 130 および 90 ぐらいのものである。

核分裂によってできる核種には放射性であるものが多い。そして それらの大部分が 1 個ないし数個の娘核をもつ壊変系列をつくる。原子炉や原爆の灰はこれらの核分裂生成物をふくみ 有害な放射能をもっている。もっとも ストロンチウム 90 やセシウム 137 など



第 7 図 熱中性子によるウランの核分裂の場合の質量数収率曲線

核分裂収率の大きいラジオアイソトープは原子炉の灰から精製されることが多い。

さて 自発核分裂や天然における中性子核分裂の結果 放射性鉱物のなかには測定できるくらいの核分裂生成物が存在するであろう。実際に カナダのグレートベア湖地域のピッチブレンドのなかにウラン 1 グラムあたりやく 1 億分の 1 マイクロキュリーのストロンチウム 90 が検出された。ところで 質量数 90 および 130 ぐらいの安定な原子核としてそれぞれクリプトンおよびキセノンの同位体がある。これらは不活性気体で安定な核分裂生成物として 天然におこる核分裂を研究するために利用される。

たとえば キセノン 129 はウラン 238 の自発核分裂ではほとんどできないが ウラン 235 の中性子核分裂ではかなり発生する。ウラン鉱物中のキセノン 129 をしらべてみると 非常にすくないものもあり わりあい多いものもある。鉱物中のウランの量 不純物の種類や量

第 3 表 熱中性子による核分裂と自発核分裂の場合の生成核の収量の比較

核 種	記 号	<sup>238</sup> U の自発核分裂の場合の収量 (%)	<sup>235</sup> U の熱中性子核分裂の場合の収量 (%)
キセノン 136	<sup>136</sup> Xe	6.00 *	6.00 *
キセノン 134	<sup>134</sup> Xe	4.99 ± 0.07	8.0
キセノン 132	<sup>132</sup> Xe	3.57 ± 0.06	4.1
キセノン 131	<sup>131</sup> Xe	0.455 ± 0.06	2.8
キセノン 129	<sup>129</sup> Xe	< 0.012	0.2
クリプトン 86	<sup>86</sup> Kr	0.75 ± 0.11	2.1
クリプトン 84	<sup>84</sup> Kr	0.199 ± 0.04	1.1
クリプトン 83	<sup>83</sup> Kr	0.036 ± 0.01	0.53

などによって中性子核分裂のおこりかたがちがうのである。放射性鉱物のなかのウランやトリウムの同位体の量とクリプトンやキセノンの同位体の量をくらべて 自発核分裂や中性子核分裂がどのくらいおこったかを推定し 鉱物の年代をきめようというところみもおこなわれている。

### 核燃料の増殖—プルトニウム

ウラン 238 に中性子がぶつかるとウラン 239 になる。これは半減期23秒でベータ壊変をしてネプツニウム 239 になり さらに半減期 2.3 日でベータ壊変をしてプルトニウム 239 になる。これは原子番号94番の元素の同位体で 半減期 2 万4千年でアルファ壊変をする。この反応は原子炉のなかでおこっているから 原子炉の灰にはプルトニウム 239 がふくまれている。

この原子核は容易に中性子核分裂をおこすので 原子炉の灰を精製してプルトニウムを分離し 原子爆弾や原子炉の燃料をつくることができる。ウラン 235 の核分裂では平均 2.5 個の中性子をだすから 連鎖反応をおこしながら平均 1 つ以上の中性子がプルトニウムをつくる反応をおこすようにすれば 消費したより以上の燃料をつくることができるわけである。この型の原子炉を **増殖炉** といひ 大型のものも試験的に建設されつつある。また 原子炉に天然トリウムをいれておけば トリウム 232 が中性子によってトリウム 233 になり 半減期23分でベータ壊変をしてプロトアクチニウム 233 になり さらに半減期27日でベータ壊変をしてウラン 233 になる。これは半減期16万年でアルファ壊変をするがやはり中性子核分裂をおこしやすい。したがって トリウムをもちいて増殖炉をつくることができる。

原子燃料は他のエネルギー源にくらべてきわめて少量

ですむから 輸送 貯蔵の費用がすくなく またながいあいだ燃料をとりかえるの必要がない。この特徴をいかして 極地での発電や特殊な船の動力につかわれているほか 従来の発電方法のコストがわりにたかい地域で実用的な発電所の計画がすすめられている。現在の段階では 一般的にいえば 原子力発電のコストは水力や在来火力よりたかくその経済性は 将来にわたって プルトニウムの利用につよく影響される。

ところが 現在ではプルトニウムを燃料とする原子炉は十分開発されていない。またプルトニウムをつくる増殖炉はたかいエネルギーの中性子による核分裂を利用する型式のものである。このような高速中性子炉は多量の濃縮ウランを必要とし ウランの濃縮技術は核兵器の生産につながる可能性をもっており プルトニウムの貯蔵もまたそうである。原子力発電につさまとう一抹の不安はこのような事情にもとずいているのである。

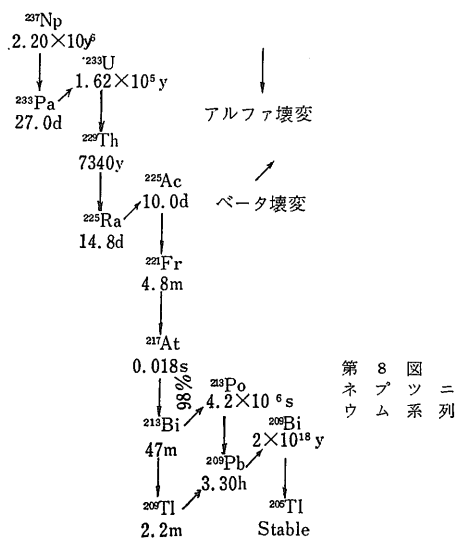
さて 天然でおこる核反応の問題にもどると ウラン鉱物のなかでプルトニウム 239 ができていることが当然予想される。実際に いくつかのウラン鉱物について測定がおこなわれたが プルトニウム 239 の原子数のウランの原子数にたいするわりあいは ピッチブレンドやモナズ石で 1 千億分の 1 ぐらいであった。一方 フェルグソン石やカルノー石ではこのわりあいより少なくこれらの鉱物中に中性子と反応しやすい原子核が存在するものとおもわれる。

### ネプツニウム系列

天然に系列をつくる放射性元素には 3 つの系列がある。ウラン系列に属する核種の質量数をアルファ粒子の質量数 4 でわると どれも 2 があまる。アクチニウム系列およびトリウム系列についておなじ計算をすると 前者では 3 があまり 後者ではわりきれぬ。とすると 1 があまる系列があつてよさそうである。

この系列の存在はむかしから予言されていたが 1947 年から48年にかけて人工的につくられ くわしく研究されるようになった。この系列のなかで もっとも半減期のながいものはネプツニウム 237 であつて ネプツニウム系列という。ウラン 233 もこの系列に属する。

この系列にはほかの 3 つの系列とちがう点があり たとえば ラドンの同位体がない。そして安定な鉛の同位体におわらないで 蒼鉛 209 になる。この同位体も実はアルファ壊変をするといわれているが 半減期がものすごくながく きわめて放射能がよわいので完全に確認されてはいない。



第 8 図  
ネプツニウム系列

第4表 超ウラン元素

原子番号	元素	最初につくられた核種	発見年
93	ネプツニウム	<sup>239</sup> Np	1940
94	プルトニウム	<sup>238</sup> Pu	1940
95	アメリシウム	<sup>241</sup> Am	1944
96	キュリウム	<sup>242</sup> Cm	1944
97	バークリウム	<sup>243</sup> Bk	1950
98	カリホルニウム	<sup>244</sup> Cf	1950
99	アインスタイニウム	<sup>253</sup> Es <sup>254</sup> Es	1954
100	フェルミウム	<sup>254</sup> Fm <sup>255</sup> Fm	1954
101	メンデレビウム	<sup>259</sup> Md	1955
102	ノーベリウム	<sup>259</sup> Noまたは <sup>257</sup> No	1957

ネプツニウムとプルトニウムとは天然におこる核反応による放射性鉱物中に存在することが認められた。すべての同位体が放射性で人工的にはじめて作られた元素として超ウラン元素のほかに テクネチウム(43番Tc)およびプロメチウム(61番Pm)がある

さて ネプツニウム 237の半減期は220万年であるから地球ができたとき存在していたネプツニウム系列はのこっていない。しかし ピッチブレンドからやく千億分の1グラムのネプツニウム 237が分離され天然にも存在することがみとめられた。これはウラン 238に中性子によってプルトニウム 239ができるほかウラン 237と中性子2個とになる核反応もありウラン 237がベータ壊変をしてネプツニウム 237になるからである。

天然に現在存在するネプツニウム系列は核反応によってできたものである。

天然に存在するもっともおもい元素として知られていたのは、原子番号92番のウランであった。さらに原子番号の大きい元素が存在するかどうかについては多くの議論と研究とがあったがネプツニウム系列がつくられるまえに1940年に93番のネプツニウム 239がつづいて94番のプルトニウム 238がつくりだされいわゆる**超ウラン元素**が不安定ではあるが存在できることがわかったのである。

超ウラン元素は現在102番くらいまでつくられている。それらのうちプルトニウムやアメリシウム(95番)などは原子炉によってわりあい多量につくることができるのでラジウムのかわりにベリリウムとアルファ粒子との核反応を利用する中性子線源に利用されるようになった。原子番号が100番くらいになると自発核分裂の半減期がみじかくなるので将来は中性子線源としてつかわれるであろうという。

消滅放射性核種と大気中の不活性気体元素

地球上に落下する隕石は現在のところわれわれが手にいれることができるほとんどただひとつの天体の試料である。隕石についての研究はかなりむかしから行なわれていたがその起源と成分とが地球や太陽系の起源や成分と密接な関係があることが強調されいろいろな同位体の存在量や年代の測定がさかんにおこなわれるようになった。

さてウラン 238やトリウム 232より半減期がいくぶんみじかく3億年から3千万年ぐらいの同位体がいつかある。たとえばヨード 129は半減期1億7千万年でベータ壊変をしてキセノン 129になる。空気中のキセノン 129の一部はヨード 129からできたものであると考えられている。

ヨード 129がかつて存在していたことは古い鉱物のなかにとじこめられているキセノンの同位体の比率をしらべれば証明できるだろう。地球上の鉱物についての研究ではまだ十分成功していないが最近隕石のなかのキセノンの研究によってヨード 129が含まれていたことがみとめられた。この結果地球上にもヨード 129が存在していたことはあきらかであろう。

このようにそれ自身は壊変しつくしてしまってもなんらかの方法で存在していたことを証明される核種を**消滅放射性核種**という。半減期5千5百万年のサマリウム 146もかつて存在していたことが証明されるであろうと期待されている。

さて空気中にふくまれているキセノンの同位体組成はほかの元素の同位体組成とくらべてキセノン 129が非常に大きい含有量をしめしている。空気中のアルゴン40がカリウム40の壊変の結果大気中に放出されネオンなどにくらべて多量のアルゴンが大気中にふくまれるようになったとおなじようにヨード 129の壊変の結果としてキセノン 129も多量に空気中に放出されたと考えられる。このように放射性核種の壊変の結果として存在する同位体をラジオジェニック(放射性起源)であるという。地球上のヘリウム4の大部分も天然壊変系列からできた放射性起源のものである。一方ヘリウム3はトリチウムの壊変によってできる。だから大気中ではヘリウム3が地殻のなかのガスに比べてヘリウム4よりずっと多い。壊変や核反応という現象は大気中の不活性気体の分布に大きな影響をあたえている。

(筆者は物理探査部)

訂正:  
No120 26頁下から3行目以降に出てくる換は欄の誤植につき訂正します