

3. 万物の根源となる原子核の無常の変化

同位元素は重さだけが異なる原子

中性子と陽子と電子の3種の粒子が集合して原子やイオンを構成し、原子やイオンの集合により分子が出来上がっています。さらに、分子やイオンの集合の仕方が変化すれば物質の性質や機能が変化しますから、中性子と陽子と電子の3種の粒子の集合の仕方の変化により万物を構成する物質の性質や機能は変化すると考えられます。このような種々の段階の集合の仕方の変化の中で、中性子と陽子と電子の3種の粒子の間の変化は最も根本的な段階ですから、本章ではその変化の仕方を調べてみましょう。

万物を構成する物質は約90種の元素で構成されていますが、それらの元素は電子と中性子と陽子の3種の粒子が組み合わせられて出来ています。質量の小さな電子は 9.1×10^{-31} kgで負電荷を帯びていますが、その電子の1839倍の質量を持つ中性子は電氣的に中性で、電子の1836倍の質量を持つ陽子は正電荷を帯びています。原子の中心には陽子と中性子が緊密に強く結び付いて原子核を構成していますが、その周囲に陽子の正電荷を打ち消すように同じ数の電子が分布しています。電子と比較して、このように陽子と中性子の質量が格段に大きいために原子の質量はこの2種類の粒子の数にほぼ比例しますから、陽子数と中性子数の和を質量数と呼び原子の質量を意味しています。しかし、原子核は周囲を広く取り巻いている電子の雲に覆われていますから、原子の性質は原子核の周囲に分布する電子の数に大きく影響を受けています。そのため、中性子の数の異なる元素はいろいろとありますが、同じ陽子の数を持つ原子は電子の数も同じになりますから、これを互いに同位元素と呼んで非常に良く似た性質を示します。化学者は陽子数の異なる原子にそれぞれアルファベットの1~2文字を元素記号として割り当て、質量数をその記号の左に上付きの数字で示して同位元素まで表すようにしています。例えば、水素の同位元素の中で高い割合で存在する水素原子は陽子と電子が1つずつで中性子を含んでいませんから、 ${}^1\text{H}$ と表すことができます。ヘリウム原子(${}^4\text{He}$)は陽子2、中性子2、電子2で出来ています。

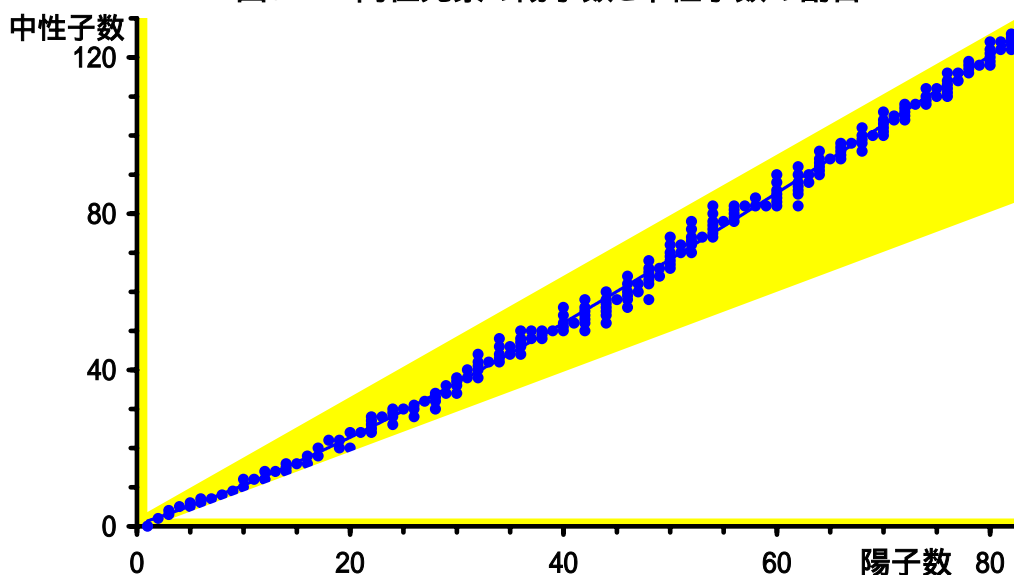
陽子や中性子を研究対象とする素粒子物理学は化学の知識しか持たない著者にとっては遠くかけ離れた領域ですから、その本質はほとんど理解できませんが、陽子と中性子に関する特徴的な2つの挙動を示す現象だけは理解しています。第1の挙動は中性子が電子を放出して陽子になり、陽子が電子を受け取って中性子になる可逆的な変化です。この中性子と陽子の間の可逆的な変化は極めて高い活性化自由エネルギーを要しますから、温和な環境の地球上ではほとんど進行しませんが、不安定な原子核の中では中性子から陽子への変化がまれに進行します。これに対して非常に過激な太陽内部の環境では、非常に大きなエネルギーを放出しながら、陽子から中性子への変化が進行しています。

原子核には複数の陽子が含まれていますが、非常に近い距離で存在するそれらの陽子はそれぞれ正電荷を帯びていますから非常に強い静電的斥力が当然働きます。これらの静電的斥力に打ち勝って陽子と中性子が原子核を構成していますから、第2の挙動として陽子と中

性子の間は非常に強い力で結び付いていると考えることができます。陽子と中性子の数の種々の組み合わせにより異なる同位元素が無限に考えられ、陽子の数が 83 以下の元素の原子核は安定に存在できます。しかし、陽子の数が 84 以上の元素では静電的斥力が強くなり、陽子と中性子を結び付ける力が相対的に弱くなりますから、その原子核が不安定になり、徐々に壊れてゆきます。また、自然界に存在する元素の陽子と中性子の数の割合は図 3-1 の黄色で示す 1~1.5 の範囲で一定しており、陽子に対して中性子の割合がこの範囲から大きく外れた同位元素も不安定で壊れてしまいますから自然界には存在できません。

このように陽子と中性子は非常に大きな力で緊密に結び付いていますが、原子核が一度壊れて分解するときには、壊れた破片と共に今まで陽子と中性子を結び付けていた大きな力がエネルギーとして放出されます。これらの壊れた破片やエネルギーは放射能と呼ばれ、その原子核の分解の仕方は主に α 壊変と β 壊変と γ 壊変と核分裂の 4 種類の型に分類することが出来ます。 α 壊変は高いエネルギーを持つヘリウム原子 (^4He) が破片となって放出される変化ですが、このとき原子核の中の 2 個の中性子と共に陽子が 2 個減りますから、ウラン (^{238}U) からトリウム (^{234}Th) へのように陽子が 2 個減り原子の種類も変わりますが同時に質量数も 4 減少します。 β 壊変は不安定な原子核が持つ大きなエネルギーを活性化自由エネルギーとして受けて、中性子が陽子に変化する時に発生する電子を放射しますから、中性子が 1 個減り陽子が 1 個増えます。結果としてトリウム (^{234}Th) からプロトアクチニウム (^{234}Pa) へのように陽子の数が 1 増えて原子の種類が変わりますが質量数は変化しません。 γ 壊変は原子核の中に残った歪みや余分のエネルギーを波長の極めて短い電磁波として放射する変化で、陽子の数も中性子の数も変化しませんから、原子の種類も質量数も変わりません。核分裂は地球上では自発的には全く起こらない変化ですが、高いエネルギーを持つ中性子が衝突する時に原子核がバラバラに小さな破片の原子や陽子や中性子に壊れる変化で、

図3 - 1 同位元素の陽子数と中性子数の割合



大きなエネルギーを同時に放射能として放出します。

万物を構成する物質は約 90 種の元素で構成されていますが、それらの元素は陽子と中性子の結び付いた原子核が中心に座り、その周囲に電子が広く分布しています。その原子核は中性子と陽子の間に働く極めて大きな力で結び付いて集合していますから、この中心に据わる原子核の分解する時には極めて大きなエネルギーの放射を伴います。そのとき原子核はエントロピー変化の支配的な活性化自由エネルギーにより式 2-21 に沿って活性化しますから、原子核はほとんど温度に無関係に変化します。

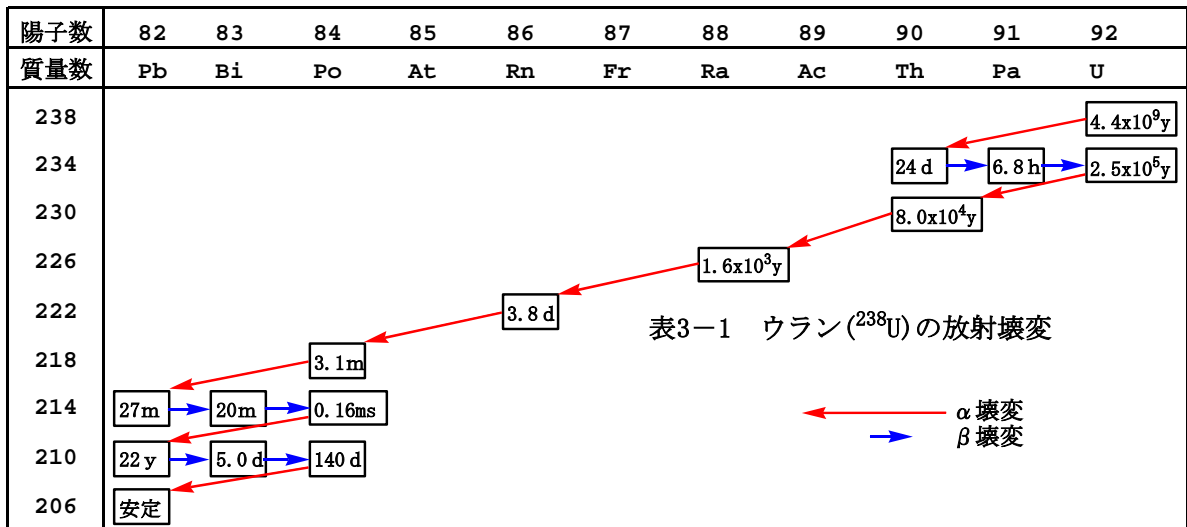
太く短くもあり細く長くもある原子核の一生

陽子と中性子が集合して形作られている原子核はほとんど温度に無関係な単純な別れの反応で分解してゆきますから、式 2-6 に従って図 2-2 の青色線のように変化してゆきます。反応の速さは反応速度定数 k で比較することができますが、感覚的に捉え難いため、しばしば式 2-6 を変形した式 3-1 により変化が半分進行するために要する時間 τ (半減期) で比較します。特に、原子核の崩壊の速さは半減期で表して比較しますが、その半減期の 10 倍の時間では半分になる変化を 10 回繰り返すことになり $(0.5)^{10}$ まで減少しますから、この値を計算しますと約 0.1% しか残らないことになり、その原子核がほとんど壊れてしまう原子核の寿命に相当します。自然に存在する最も陽子数の大きな元素は陽子数 92 のウランですが、陽子数が 93 以上の全ての元素は極めて寿命が短く、例えどこかで生成したとしても、きわめて短い年月で全て消滅してしまいますから、地球上で性質を知ることの出来る陽子の数の違う元素は 90 種類に限られています。

$$\tau = \ln(0.5) \times \left(-\frac{1}{k_A} \right) = \frac{0.6931}{k_A} \quad \text{式 3-1}$$

大きな陽子数を持つウランには 230~239 の質量数を持つ 9 種の同位元素が存在しますが、いずれも不安定で放射能を出しながら自壊してゆきます。その中で天然存在比が 99.28% の ^{238}U の原子核は半減期 4.51×10^9 年のゆっくりした速度で、種々の放射能を発生しながら安定な鉛の同位元素 ^{206}Pb に変化して行きます。この変化は単純な別れの反応に見えますが、陽子が 10 個と中性子が 22 個減っていますから、 α 壊変と β 壊変が複雑に組み合わされた多段階反応と考えられます。表 3-1 に示すように ^{238}U の原子核は α 壊変により ^{234}Th に変化しますが、この ^{234}Th の原子核は極めて不安定で非常に短時間に β 壊変を 2 回繰り返して ^{234}U に変化します。さらに、このウランの同位元素も不安定で安定な ^{206}Pb まで 7 回の α 壊変と 4 回の β 壊変を次々に繰り返します。表 3-1 の四角で囲った数字で各同位元素の半減期を表しましたが、中間に経過する一連の壊変の反応が格段に短い半減期を持っているから、この一連の壊変反応は半減期 4.51×10^9 年の ^{238}U の壊変反応を律速段階とし 13 種の同位元素を経る多段階反応で、中間の 13 種の同位元素はほとんど存在しないと考えられます。

この一連の反応の律速段階の半減期はおよそ地球の年齢に相当する非常に長い期間で



すが、中間段階に生成する ²¹⁴Po は格段に短時間な 0.00016 秒の半減期で壊変します。このように ²³⁸U と ²¹⁴Po では異なる半減期を示しますから、同じ α 壊変でもそれぞれ異なる性質を示すことを意味しています。放射壊変における不安定な原子核の寿命は半減期の 10 倍程度と考えることができますから、²³⁸U の寿命は地球の寿命よりも長いと考えられますが、²¹⁴Po の寿命は一瞬に過ぎません。福島原発の事故以降に新聞を賑わしているベクレル (Bq) は不安定な原子核が 1 秒間に発する放射能の量を表す単位ですが、放射能の強さが半減期に反比例するように変化しますから、1g の純粋な ²³⁸U と ²¹⁴Po はそれぞれ 1.23 x 10⁴Bq と 1.19 x 10²⁵Bq の放射能を発すると算出することができます。半減期の短い ²¹⁴Po は非常に強い放射能を発しますが極めて短時間に消滅してしまいます。反対に半減期の長い ²³⁸U は比較的弱いながら極めて長時間にわたり放射能を発します。放射壊変をする不安定な原子核には太く短い一生も細く長い一生もあります。

⁴⁰K は地球の歴史を調べる時計

約 90 種の元素のなかでカリウムは万物を構成する代表的な元素ですが、質量数 39~41 の同位元素があります。その中で ³⁹K と ⁴¹K の 2 種の同位元素は原子核が安定で全く壊変しません、⁴⁰K は半減期 1.2x10⁹ 年のゆっくりした速さで γ 線を放射しながら β 壊変してカルシウムに変化します。このカリウムの 3 種の同位元素はそれぞれ 93.08% と 0.0119% と 6.91% の存在比で自然界に広く分布していますから、万物は弱いながら常に放射能を発散しています。海水中には 0.038% のカリウムイオンが溶けていますが、当然少量ながら ⁴⁰K も含まれていますから、1L の海水からは 12.5Bq の放射能が発せられています。因みに、飲料水や牛乳の摂取制限に関する放射能暫定規制値を放射性セシウムで 200Bq/L とする旨の通達が厚生労働省医薬食品局から出されています。人間の身体の中にも約 0.37% のカリウムが含まれていますから、弱いながらも放射能の体内被曝を続けていることとなります。しかし、生物が誕生した時から既にカリウムは放射能を発し続けていましたから、人間の身体は極弱

い放射能の体内被曝による損傷を織り込み済みにした組織になっているようです。

カリウムは地球上に普遍的に存在しますから、地殻を構成する岩石の中にも平均して約2.6%のカリウムが含まれています。マグマから形成される岩石は、マグマの流動性が低いために地中で固化した花崗岩や流紋岩と、流動性が高いため地上に噴出して冷やされて固化した安山岩や玄武岩や橄欖岩に大別できます。岩石の原料となるマグマの流動性はその元素組成により変化すると考えられ、表 3-2 に示すように流動性の低いマグマが固化した花崗岩や流紋岩は比較的にナトリウムやカリウムの含有率が高くなっています。逆に、安山岩や玄武岩はあまりナトリウムやカリウムを多く含んでいません。さらに、これらの種々の岩石が水の働きで風化した砂礫や生物の遺骸などが再度固化した砂岩や石灰岩などの堆積岩では、水に溶解しやすいナトリウムやカリウムは水に溶けて海水中に移動してしまいますから、堆積岩のナトリウムやカリウムの含有率は小さくなっています。花崗岩や流紋岩は他の岩石に比べてカリウムを約4倍多く含んでおり、当然⁴⁰Kも多く含まれますから放射能を多く発します。そのため、これらの種々の岩石1kgが発する放射能の強さを表3-2にあわせて掲げておきます。

この花崗岩が神戸市の御影地区から切り出されて御影石と呼ばれて多くの神社仏閣や城郭の重要な石材に使われてきましたが、神戸の北に横たわる六甲山はすべて花崗岩でできています。文部科学省が発表する放射能モニタリング情報によりますと、著者の住むさいたま市は富士山や浅間山の噴火に由来する火山性の土砂が堆積した土地ですから、環境放射能水準調査の2012年1月の月平均値は0.053 μ Sv/hでしたが、神戸市の同じ時期の月平均値は0.068 μ Sv/hで、花崗岩の露頭の影響を受けているために神戸市が比較的放射能の強い土地と考えられます。

表 3-2 代表的な岩石の元素組成

元素	花崗岩	流紋岩	安山岩	玄武岩	橄欖岩	石灰岩	砂岩
Si	33.68%	34.41%	25.32%	23.47%	20.34%	2.42%	36.60%
Ti	0.22%	0.13%	0.79%	1.22%	0.49%	0.04%	0.15%
Al	7.33%	7.12%	9.08%	7.44%	2.11%	0.43%	2.52%
Fe	1.90%	1.46%	6.70%	9.00%	9.40%	0.38%	0.98%
Mg	0.31%	0.19%	2.63%	3.82%	20.52%	4.76%	0.70%
Ca	0.95%	0.81%	5.66%	7.45%	2.47%	30.42%	3.93%
Na	2.29%	2.22%	2.72%	1.65%	0.42%	0.04%	0.33%
K	4.53%	4.44%	0.92%	0.68%	0.21%	0.27%	1.09%
Bq/kg	1489	1459	303	224	68	90	357

水は液体でよく混ざり合いますから、海水の中に含まれるカリウムの同位元素の割合は

ほとんど常に一定しています。しかし、岩石は種々の元素を取り込んで一度固化しますと、それ以降は岩石中の元素の入れ替わることが容易ではありません。花崗岩が固化した時には自然に存在する同位元素の割合でカリウムが取り込まれますが、 ^{40}K は半減期 1.2×10^9 年で γ 線を放射しながら β 壊変して ^{40}Ca に変化しますから、花崗岩を構成する他の元素と異なり ^{40}K だけはゆっくりした速さで減少してゆきます。カリウムの同位元素の割合をもとに花崗岩中で減少した ^{40}K の量を算出することができますから、式 2-6 により花崗岩が固化して元素が入れ替わらなくなってから現在までの時間が求められます。このカリウムの同位元素の比率の測定は岩石や化石の誕生からの年齢を測る時計になり、地球の誕生から現在までの歴史を調べる役に立ちます。しかも、この原子核の壊変の速度は温度などの環境の影響をほとんど受けませんから、正確に時間を測る時計になります。しかし、 ^{40}K の半減期が約 10 億年ですから、短時間の経過では誤差が大きくなり、考古学や古生物学などの対象となる比較的あたらしい時代の歴史を調べるためには適していません。

^3H で調べる地下水の流れ

太陽からは紫外線や可視光線や赤外線などの太陽光と呼ばれる電磁波と共に、宇宙線と呼ばれる電子や陽子や中性子などの多くの粒子が飛んできます。中性子は電荷を持たない小さな粒子ですから、原子核の周囲を囲んでいる電子の影響を全く受けずに直進し、原子核に衝突します。主に窒素分子からなる大気が地球を取り巻いていますから、中性子 7 個を持つ窒素の原子核 (^{14}N) が図 3-2 に示すように宇宙線の中性子 (^1_0n) と衝突して、質量の同じような ^1H や ^3H などの粒子を玉突きのように窒素の原子核から弾き飛ばします。結果として陽子の数が 1 個少ない ^{14}C や ^{12}C などの炭素の同位元素が取り残されます。水素には中性子を持たない ^1H のほかに、中性子を 1 個持った重水素 (デューテリウム、 ^2H) と 2 個持った三重水素 (トリチウム、 ^3H) の 2 種類、炭素には中性子 6 個を持つ ^{12}C と中性子 7 個を持つ ^{13}C と中性子 8 個を持つ ^{14}C の 3 種類の同位元素が自然界に存在します。

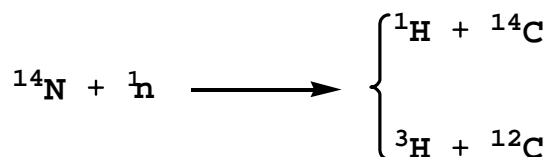


図3-2 宇宙線と空気の反応

自然界では水素は中性子を持たない ^1H ですし、炭素は中性子を 6 個持つ ^{12}C が大部分を占めています。ここで、 ^{14}N に 1 個の中性子が取り込まれますから合計 8 個の中性子がこの核分裂反応系に関与することになりますが、破片として中性子を放出しませんから、連鎖反応は起こりません。このとき水素と炭素に核分裂反応しますが、過剰の中性子が関与していますから、質量数の大きな ^3H と ^{14}C を破片として放出します。太陽は地球が誕生する以前から現在に至るまで高い温度で燃え続けており、太陽光と共に常に一定量の宇宙線を地球にも送り続けています。しかも地球の周囲を大気となって窒素が取り巻いていますから、窒素の中性子による核分裂反応が連続的に起こり、一定量の ^3H と ^{14}C が連続的に

生成し続けます。

他方、水素の3種類の同位元素のうちで ^3H は、陽子に対する中性子の割合が大きいため不安定で、 β 壊変により12.39年の半減期を持って分解して ^3He に変化してしまいます。 ^3H と同じように陽子に対する中性子の割合が大きいため、 ^{14}C も不安定ですから半減期5730年で β 壊変して ^{14}N に変化します。このように ^3H と ^{14}C は一定の速度で連続的に生成し、一定の半減期で分解し減少してゆきますから平衡状態に達して、地球の上空と循環して常時交換をしている水や二酸化炭素はそれぞれ一定の割合の ^3H と ^{14}C を含みます。これらの中性子の多い同位元素は約 $10^{-16}\%$ しか含まれて居ませんが、 β 壊変による放射能が容易に測定できますから、それらの同位元素の割合の増減は極めて容易に測定することができます。

生きている植物は大気中の二酸化炭素と地中の水を吸収してブドウ糖を光合成し、さらにこのブドウ糖をでんぷんやセルロースなどに变化させて植物の根や幹や葉や花を形作っています。そのため生物の組織は主に水素と炭素を主体とする物質で構成されていますが、これらの組織は新陳代謝をしていますから、大気中の二酸化炭素や雨水と同じ割合で ^3H と ^{14}C が含まれています。さらに、これらの植物を食べている草食動物の身体も、草食動物を食べている肉食動物の身体もみな大気中の二酸化炭素や雨水と同じ割合の ^3H と ^{14}C を含む蛋白質や脂肪で構成されています。しかし、これらの生物が死に、新陳代謝が止まると、生物の身体を構成する水素と炭素はこの生物の遺骸には新たに補給されなくなりますから、 ^3H と ^{14}C は半減期がそれぞれ12.39年と5730年で減少してゆきます。法隆寺の金堂に使われている檜の材木に含まれる ^3H の割合を調べても ^3H の寿命を過ぎていますから何も情報を得られませんが、 ^{14}C の割合を調べれば大気中の割合より若干少なくなっています。同じようにツタンカーメンやマンモスの死んだ年代も推測することが出来ますから、古生物学や考古学などの研究対象になる数万年間を調べる化学時計にすることが出来ます。

水素と酸素でできている水は上空から雨になって地上に降り、山を流れ下って海に注ぎ、海で蒸発して雲になり、再び雨になって地上に戻ります。この間に上空で生成した ^3H も常に取り込まれますから、雨に含まれる ^3H の割合は一定しています。しかし、雨が地面に吸い込まれて地下水となり、長い年月をかけて移動する場合には短時間の水の循環から切り離されます。当然、水に含まれる ^3H が新たに補給されなくなりますから、12.39年の時間経過とともに半減してしまいます。井戸から汲み上げた水に含まれる ^3H の量を測定すれば、その水が何年間地下に留まっていたか逆算できますから、地下水の移動の様子を時間的に調べる化学時計にすることが出来ます。また、降り積もった雪が氷となって固まったままになる場合にも水の循環から取り残されますから、 ^3H の減少変化を用いる化学時計によりその氷が凍結した時間が逆算できます。しかし積もった雪が結晶化した南極の氷やカナディアンロッキーの大氷河の氷は極めて長時間の間にゆっくりと移動していますから、その移動速度と比較して短い半減期を持つ ^3H はあまり良い精度の化学時計にすることが出来ませんが、積雪の折に空気中から取り込まれた二酸化炭素の ^{14}C が南極の氷やカナディア

ンロッキーの大氷河の氷の年代測定に良い精度の化学時計として働きます。

生物の身体は主に水素と炭素を主体とする物質で構成されていますし、地球の表面の約70%は多くのカリウムを含む海の水で覆われていますから、万物を構成する物質には水素と炭素とカリウムの原子が多くの場合に満遍なく含まれています。そのため含まれている ^3H と ^{14}C と ^{40}K の割合をそれぞれ調べることで万物の変化を追跡する化学時計になりますが、それらの半減期が大きく異なりますから、万物の変化の速さにより時計に用いる同位元素は異なってきます。

原爆と原発は一字違いの同じ仲間

静電的斥力に打ち勝って強く結び付き陽子と中性子が原子核を構成していますが、陽子の数が84以上の元素では静電的斥力が強くなり、陽子と中性子を結び付ける力が相対的に弱くなりますから、原子核は不安定になり徐々に壊れてゆきます。また、自然界に存在する元素の陽子と中性子の数の割合は1~1.5の範囲で一定しており、陽子に対して中性子の割合がこの範囲から大きく外れた同位元素も不安定で壊れてしまいます。このように陽子と中性子の数が適当でない原子核は α 壊変や β 壊変により次第に自壊して安定な原子核に変化して行きます。

前節で見てきたように、窒素などの安定な原子核に中性子が衝突すると、玉突きの玉のように陽子などの小さな粒子を弾き出して安定化します。これに対して、ウランなどの不安定な原子核は陽子と中性子を結び付けている力が相対的に小さくなっていますから、中性子の衝突の衝撃により、原子核の不安定要素を一気に発散するように核分裂し、原子核は大きなエネルギーの発散を伴い多くの破片に壊れます。この破片の中に中性子を含まない時には、1個の中性子が衝突して壊れる原子核は1個に過ぎませんから、大量の中性子が衝突しない限り多くの原子核の核分裂は起こりません。しかし、この破片の中に複数の中性子が含まれる時には、図2-7の n が1以上の場合に相当しますから、1個の中性子が原子核に衝突すると複数の中性子が破片となり、さらにこの複数の中性子により複数の原子核が核分裂を引き起こすことになり、鼠算式に反応が加速する連鎖反応になります。結局不安定な原子核を持つ原子がすべて核分裂するまで連鎖的に続きますから、膨大なエネルギーを放出することになります。このような不安定な原子核を持つ原子を爆弾に詰めて、中性子を発生させる誘発装置を付ければ原子爆弾の完成です。

1945年8月に広島に投下された原子爆弾は質量数235のウラン(^{235}U)に中性子発生装置を付けたものでした。この爆弾で使用された ^{235}U は図3-3に示すように中性子の衝突により ^{87}Kr 、 ^{92}Kr 、 ^{90}Sr 、 ^{95}Y 、 ^{93}Zr 、 ^{99}Tc などの質量数80~100の元素と ^{129}I 、 ^{131}I 、 ^{139}I 、 ^{133}Xe 、 ^{133}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{136}Ba 、 ^{141}Ba 、 ^{147}Pm 、 ^{149}Sm などの質量数125~150の元素に2分しますが、同時に半端な破片として2~3個の中性子も生じます。この2~3個の中性子がさらなる核分裂を引き起こしますから、爆弾の中に装填された全ての ^{235}U が連鎖的に一瞬にして核分裂し、大きなエネルギーの発散を伴い多くの破片の元素を飛散させながら爆発します。

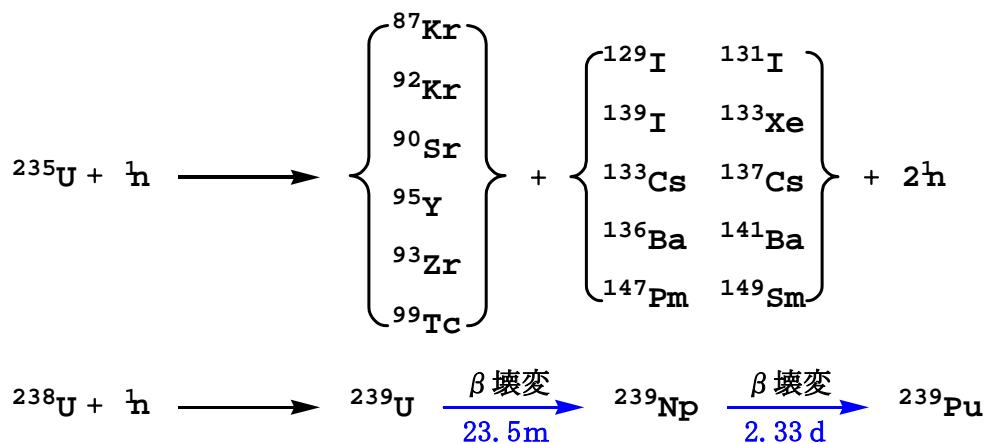


図3-3 ウランと中性子との反応

陽子を 92 個含んでいますから ${}^{238}\text{U}$ の原子核も不安定ですが、この ${}^{238}\text{U}$ に中性子が衝突しても核分裂することなくその原子核に飲み込まれてしまい、図 3-3 に示すように不安定な ${}^{239}\text{U}$ に変化します。しかしこのウランの同位元素は極めて不安定で、2 度の β 壊変が続けて進行して比較的長い半減期 24360 年を持つ質量数 239 のプルトニウム(${}^{239}\text{Pu}$)を生成します。この一連の反応では、超ウラン元素と呼ばれるウランよりも陽子数の大きなネプツニウム(${}^{239}\text{Np}$)や ${}^{239}\text{Pu}$ などの元素が人工的に生成してきますが、破片として中性子を二次的に放出することもなく外部から衝突した中性子を飲み込んでしまいから、連鎖的な反応が起こりません。天然に産するウランの ${}^{235}\text{U}$ と ${}^{238}\text{U}$ が競争的な出会いの反応により中性子と衝突しても、 ${}^{235}\text{U}$ の天然存在量は極少量で ${}^{238}\text{U}$ が大部分を占めていますから、外部からの中性子をすべて ${}^{238}\text{U}$ が飲み込んでしまい ${}^{235}\text{U}$ の核分裂はほとんど進行しません。そのため原子爆弾を作るためには ${}^{235}\text{U}$ を多く含むウランを調整しなければなりません。しかし、これらの同位元素は化学的に極めて類似した性質を持っており、同位元素の分離や濃縮には高い分離技術を要します。

単純な出会いの反応で ${}^{235}\text{U}$ と中性子が衝突すれば核分裂しますが、同時に半端な破片として 2~3 個の中性子が生じ、この中性子が近くに存在する ${}^{235}\text{U}$ に衝突して連鎖的な出会いの反応を引き起こして膨大なエネルギーの発散を伴い爆発します。 ${}^{235}\text{U}$ と中性子の衝突により 2 次的に生じる中性子を他の物質に飲み込ませてしまえば、連鎖的な出会いの反応が起こりませんから、膨大なエネルギーの発散も爆発も起こりません。他の物質を用いて 2 次的に生じる中性子を飲み込む量の調節ができれば、爆発を抑えながら膨大なエネルギーを連続的に発生させることができますから、大電力の発電が可能になります。天然存在比の高い ${}^1\text{H}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ 、 ${}^{23}\text{Na}$ 、 ${}^{24}\text{Mg}$ 、 ${}^{27}\text{Al}$ 、 ${}^{28}\text{Si}$ 、 ${}^{35}\text{Cl}$ 、などの元素は効率的に中性子を飲み込む性質を持っていますが、中でも ${}^1\text{H}$ を多く含む水は利用し易い物質ですから原子力発電の中性子の調節に用いられています。チェルノブイリの原子力発電所では、液状の水を用いて中性子を飲み込む量の調節をしていましたが、温度が上がりすぎて水が水蒸気になってしまい、中性子の調

節ができなくなって原子爆弾のように爆発してしまいました。福島の原子力発電所では水蒸気を用いて中性子の調節をしていましたが、水蒸気の発生のための水の供給が地震により止まってしまい、原子炉の調節機能が停止して爆発寸前の危険な状態まで陥りました。

このように原子爆弾でも原子力発電所でも、 ^{235}U と中性子の衝突により起こる核分裂反応で発生する莫大な熱エネルギーを利用していますが、同時に表 3-3 に掲げるような多くの不安定な原子核を持つ元素を生じます。定常運転時の原子力発電所ではこのような不安定な原子核を持つ物質は反応容器の中に閉じ込められて安全な状態に保管されていますが、事故が起こりますと原子爆弾と同じように核分裂による多くの破片の元素が撒き散らされます。不安定な元素の寿命が半減期の 10 倍程度ですから、半減期の短い破片の元素は短時間に消滅してしまいます。 ^{93}Zr や ^{99}Tc や ^{147}Pm の性質は人間の身体

を構成している元素の性質と似ていませんから、ほとんど体内に取り込まれることはありません。 ^{134}Cs と ^{137}Cs を含む物質は比較的水に良く溶けますから、体内に長時間留まることがないために内部被爆の危険が比較的少ないと思われます。 ^{90}Sr はカルシウムと類似した性質を示すために、骨の成分として体内に蓄積される恐れがあります。また、人間の成長に欠かせない甲状腺ホルモンはヨウ素を含む物質ですから、ヨウ素原子が甲状腺に局所的に取り込まれます。特に幼児や青少年の甲状腺には ^{131}I が蓄積させ易く、その放射能により内部被爆を起こして発癌する危険があります。東日本大震災の折に発生した福島原子力発電所の事故で多量の放射性物質が飛散してしまいました。事故後間もなく、 ^{131}I が東京都の水道水に混入したために、世界中に恐怖をもたらす大きな社会問題になりましたが、大震災後 100 日以上経過した現在では飛散した ^{131}I はすでに消滅してしまっていると考えられます。

不安定な原子核を持つ放射性物質は寿命の長短には違いがありますが、いずれも諸行無常の考え方に従い消滅してゆきます。寿命の短い物は潔く華やかに滅びますし、寿命の長いものは目立った変化もないままに徐々に消えて行きます。

表 3-3 ^{235}U の核分裂による主な破砕元素

核種	半減期	核種	半減期
^{87}Kr	78m	^{129}I	$1.72 \times 10^7 \text{y}$
^{92}Kr	3.0s	^{131}I	8.06d
^{90}Sr	28y	^{139}I	2.7s
^{95}Y	10.5m	^{133}Xe	5.27d
^{93}Zr	$9.5 \times 10^5 \text{y}$	^{134}Cs	2.3y
^{99}Tc	$2.12 \times 10^5 \text{y}$	^{137}Cs	30y
		^{136}Ba	
		^{141}Ba	18m
		^{147}Pm	2.6y
		^{149}Sm	