



ストロンチウムのやさしい話

— その1 原子核と放射線 —

市原千博

この文を読んでいただいている方は、われわれが乳歯の中のストロンチウム-90 を測るために提供を呼びかけていることをすでにご存じでしょう。では、なぜ乳歯か、ストロンチウム 90 って何が悪いのかなどにつながる「原子核物理」の話をしてみたいと思います。わかりにくいところはどんどご質問ください。

1. 原子核と放射能と放射性物質

最初に放射能や放射性物質とは何か、どうしてできるのかをお話します。

a. 放射線の由来

物質を細かく分けていくと分子になります。空気も水も私たちの体もいろんな機械もすべていろいろな分子からできています。分子のレベルで変化が起こると、たとえばものが燃える、酸に溶けるといった化学反応が生まれまます。物質の最小単位は分子ですが、この分子はさらに原子からなりたっています。原子と分子は同じもの場合がありますが、たいていは複数の原子が分子を構成しています。例をあげてみます。炭素分子と酸素分子がある条件になれば図-1のような燃焼反応が起きます。Cは炭素分子、O₂は酸素分子(2つの原子で1つの分子)で、これが化合すると二酸化炭素と熱になることを表します。



このあたりからマイクロの世界になっていきます。さらに原子はというと、原子核とその周りにある電子から作られています。原子と原子核は大きさが全く違い、水素分子の直径が1億分の1mなのに対して、水素原子核はそれをさらに10万分の1にした程度となり、10万倍の違いがあります。これほど小さい原子核ですが質量のほとんどは原子核がもっています。

図-2 のイラストのまん中、黄色い部分が原子核、まわりの青が電子です。実際はもっともっとスカスカで、

原子核ですよろしく！

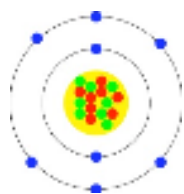


図-2 原子核

原子核は原子の大きさの数万分の1程度です。原子核が1円玉(直径 2cm)だとすると原子の大きさは直径数百μm、ナゴヤドームの何倍にもなります。

原子核は小さいのですが、これによって物質の性質が決まります。原子核は実に単純で、陽子と中性子の2種類の素粒子というものからできています。原子核を構成する陽子と中性子はほぼ同じくらいの数になることが多いのですが、いろんな条件で取り得る組み合わせが決まります。原子核の陽子はプラスの電荷を持ち、この

数が原子の種類つまり元素を決定します。陽子の数を原子番号と呼び、陽子1個なら原子番号1で水素、2個ならヘリウム、3個ならベリリウムなどです。「すいへいりーべ」を思い出す方も少なくないでしょう。ちなみに、ストロンチウムは原子番号が38、セシウムは55、天然にある最も原子番号の大きい元素はウランで92番です。天然にはなかった人工の元素プルトニウムは94です。

ほとんどのヘリウム(He)という物質は陽子2個、中性子2個のヘリウム4という原子核を持ちます。陽子と中性子はほとんど質量が同じなので、陽子の数と中性子の数を合わせて質量数といいます。ヘリウム4原子核は、原子番号2、陽子と中性子の数を足した4の質量数となります。ヘリウム4の4という数が質量数に当たります。原子核の記号では ${}^4_2\text{He}$ と表されます。セシウム137は ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ 、ストロンチウム90は ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ 、代表的な核分裂性物質、ウラン235は ${}^{235}_{92}\text{U}$ です。

中性子とはいうと、こちらの数が変わっても、違った質量数を持つ同じ元素の原子核ができるだけです。このように質量数の違う元素を同位元素(または同位体)と呼びます。陽子と中性子のバランスが崩れた同位元素は、多くの場合不安定な原子核になります。不安定な原子核の方が高いエネルギー状態になり、安定な原子核に変わるとき、放射線という形で余分なエネルギーを出すことがあります。このように放射線を出すようになった同位元素が放射性同位元素(または放射性同位体)です。やっと放射線までたどり着きましたね。放射線を出すことのできる原子核をもった物質は放射性物質とよべれます。放射性物質と放射線の違いに注意していただきたいと思います。

不安定な原子核から安定な原子核に変わることを「崩壊」とよび、1秒あたりの崩壊数をベクレル(Bq)という単位ではかります。崩壊には重要な性質があります。放射性の原子核が崩壊する割合は放射性同位元素によってそれぞれ定まっています。急激に減るものも長時間減らないものもありますが、この指標として「半減期」という値を使います。言葉としてはおなじみになってしまいましたが、「半分が減る」のではなく「半分に減る」時間が半減期です。たとえば代表的な放射性物質である ${}^{137}\text{Cs}$ は半減期が約30年です。あるとき1万ベクレルあったセシウムは30年で1/2の5000ベクレルに減少します。それに続く30年で残りの5000ベクレルがなくなり、60年たてば0になると思いがちですが、実際には、次の30年で残り5000ベクレルが1/2の2500ベクレルになり、さらに次の30年間で1/2の1250ベクレルになり、というのをくり返し、ほぼなくなったといえるまでには結構な時間を必要とします。私見ですが、「放射性物質の影響が減った」といえるのは元の1000分の1、「ほとんど影響を考えなくてもよい」のは100万分の1程度です。そうすると、1000分の1を下回るには1/2を10回繰り返す必要があります($1/2 \times \dots(10回) \dots \times 1/2 = 1/1024$)。30年 \times 10=300年でやっと目に見えて減少したということができ、100万分の1になるにはさらに30年 \times 10年の300年を要します($1024 \times 1024 = \text{約} 100万$)。

つまり、600年たたないと福島第一原子力発電所から漏れ出た ${}^{137}\text{Cs}$ を放免することはできないのです。600年さかのぼれば日本は室町時代です。私たちがどれだけ罪深いことをし、何世代か後の子孫に負担をかけるかがおわかりでしょうか。

b. 放射線の種類

安定な原子核になる道筋は多いのですが、そのときに出す放射線には3種類あります。お聞きになったことがあるでしょうが、質量の大きな順にアルファ(α)線、ベータ(β)線、ガンマ(γ)線です。 α 線はヘリウムの原子核、 β 線は高速の電子、 γ 線は電磁波(光の一種でエネルギーの高いもの)で、これに中性子を加えることもあります。これらに共通する性質は「物質を電離」できることです。電離とは物質中の電子をはじき飛ばすことを意味します。人の皮膚に普通の光があたっても多少暖かく感じるだけですが、放射線が当たれば体内ではじき飛ばされた電子が高速で動き、1個あたりの反応で測れば化学反応とは比較にならないエネルギーを受けてしまいます。やけどをしたり、眼の水晶体をだめにしたり、運が悪ければDNAを傷つけたりもします。

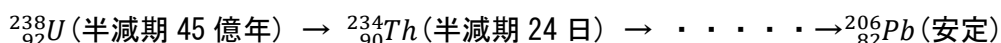
このような人の体に対する影響は放射線以外によって起こる場合もあります。しかし、放射線は他の反応に比べてごくわずかな数で影響を生むのが特徴です。

普通の光も電磁波で、物理的には放射線の仲間です。光には紫外線のようにエネルギーの高い放射線もありますが、紫外線には電離の能力はありません。電離をする能力を持つ α 線・ β 線・ γ 線を厳密には「電離放射線」、紫外線や普通の光のようなグループを「非電離放射線」と定義し、通常「放射線」といえば電離放射線をさします。

α 崩壊

α 線と β 線は電荷を持っていますので、これらが放出すると原子核の種類が変わります。 α 線はヘリウムの原子核と同じなので、 α 線を出して崩壊(α 崩壊)すると、陽子2個と中性子2個が元の原子核から減り別な元素になります。放射性同位元素から出る α 線は、 β 線や γ 線に比べてエネルギーが格段に高く、また、エネルギーを失いやすいので、生体に当たった(被曝)ときにすべてのエネルギーを与えてしまいます。そのため α 線を出す放射性同位元素は最も注意を要するものです。 α 崩壊する原子核はほとんど原子番号も質量数も大きいものに限られます。図-3は天然にあるウランのほとんどを占めるウラン238の α 崩壊の様子を示したものです。

α 崩壊の例



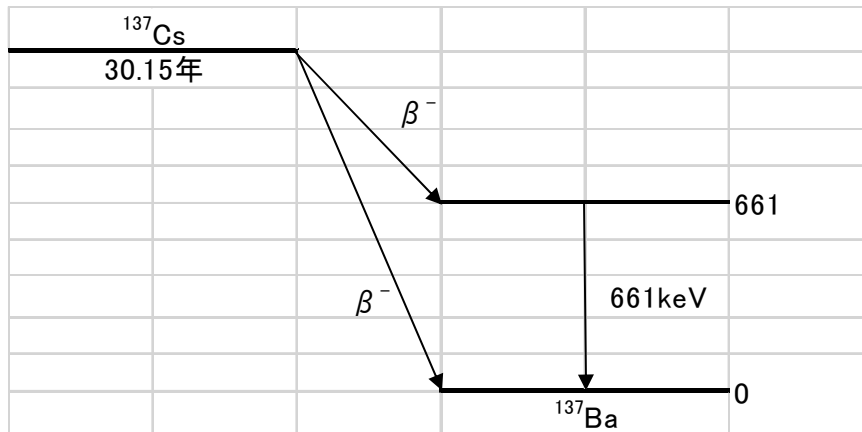
天然にあるウラン238が1回 α 崩壊して放射性トリウムになる。その後、紆余曲折を経て安定な鉛に落ち着く。

図-3 ウラン238の α 崩壊

β 崩壊

β 線を出して崩壊(β 崩壊*下の注参照)すると、 β 線は電子を放出するので質量数は変わりませんが、電荷がマイナスであることから、原子番号が一つ増えて別な元素を作ります。普通 α 線、 β 線を出して崩壊した原子核はまだ不安定さが残ります。さらに α 崩壊・ β 崩壊する元気があれば次々に崩壊していきます。そこまでの元気がない場合、不安定なままの原子核が残りますが、いつまでも不安定なままではいられないので安定になろうとして多くは γ 線を出します。したがって α 崩壊・ β 崩壊する放射性同位元素は崩壊後 γ 線を出すのがほとんどなのです。

図-4 に示すように、 ^{137}Cs は β 崩壊して ^{137}Ba (バリウム 137、安定核)に変わりますが、崩壊直後の ^{137}Ba はまだ不安定なまま(励起状態とよぶ)なので 661 keV(エネルギーの単位;キロエレクトロンボルトとよびます)の γ 線を放出してやっと安定な ^{137}Ba (基底状態とよぶ)になります。 γ 線は検出しやすいのでこの 661keV の γ 線が見つかれば ^{137}Cs の存在を証明することができます。

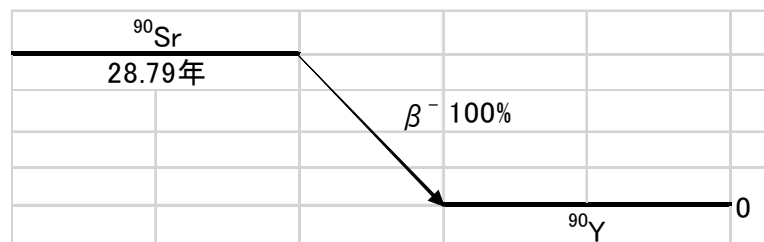


半減期が 30.15 年の ^{137}Cs は β^- 崩壊してそのうち 95%は ^{137}Ba の励起状態になり、661keV の γ 線を出して安定になる。5%は γ 線を出さずに、直接基底状態の ^{137}Ba になる。

図-4 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 崩壊の様子 (崩壊図)

(注)実は、 β 線を出して安定になるルートには、普通の電子を出す場合(β^- 崩壊)、電子と反対の電荷を持つ陽電子を出す場合(β^+ 崩壊)、電子を出すかわりに原子核の外にある電子を取り込んで電荷のやりくりをする「軌道電子捕獲」の 3 種類があります。単に β 崩壊という場合は β^- 崩壊のことです。

図-5 に示すように、 ^{90}Sr はやはり β 崩壊して ^{90}Y (イットリウム 90、安定核)ができますが、たまたま基底状態の ^{90}Y ができるため γ 線を出しません。 γ 線に比べて β 線は測定がしにくいので時間もお金もかかります。



半減期が 28.79 年の ^{90}Sr は β^- 崩壊する。すべてが ^{90}Y の基底状態になるため γ 線は一切出さない。

図-5 ^{90}Sr の崩壊図

γ 線

以上の説明でおわかりと思いますが、α、β は崩壊ですが、γ 線は崩壊ではありません。また α 崩壊、β 崩壊ではほとんど γ 線を伴います。γ 線はきっちりエネルギーが決まっているため多くの方法で測定することができ、放射性核種の存在や定量が比較的簡単です。そのため ^{137}Cs の測定は市民測定所などでもできるようになりました。また、福島第一事故で漏洩した放射性物質のほとんどが ^{137}Cs でしたので、 ^{137}Cs を測ればとりあえず安心というような風潮が作られています。α 線や β 線をきっちり押さえることを軽視してはなりません。

c. 放射線のもと

2011 年の福島第一原子力発電所の事故以来問題になっているのは、原子炉の中で生成した放射性物質から出る放射線ですが、天然にも放射性物質があり、放射線を出しています。そもそも地球ができたとき(46億年くらい前)には今われわれが知っているよりもはるかに多くの物質があり、放射性物質もいっぱいあったものと思われます。すみやかに減る(半減期が短い)放射性原子核は死に絶えて、安定な我々になじみ深い物質に変わったか、放射性であっても半減期がきわめて長いものだけが残っています。半減期が 46 億年のウラン 238、12.8 億年のカリウム 40 など、長期間放射能を出し続けるものはたくさんあります。

天然放射線には宇宙線もあります。宇宙の彼方にある太陽系の外から飛んでくると考えられる放射線が宇宙線です。

常に作り続けられている放射性物質もあります。宇宙線はそれ自体が放射線ですが、非常にエネルギーの高いものが含まれるため、地球圏の物質とさまざまな反応を起こし、多くの放射性同位元素を作ります。

原子爆弾や原子力発電所で多量に作られる放射性物質の三重水素(トリチウム; ^3H)も、元々は水素の中にわずかに含まれる非放射性的の二重水素(^2H)と宇宙線の反応で生成され、ごくわずかに大気中に存在するものでした。

宇宙線の量はほぼ一定なので、宇宙線由来の放射性同位元素は半減期との兼ね合いで一定の量が常に存在し続けます。

(次号、「その 2. いろいろな放射性物質」につづく)

編集後記

岐阜県の飛騨高山では 11 月 10 日に初雪があり、紅葉をバックにした雪景色がテレビのニュースで流れていました。岐阜市内はまだ雪は降っていませんが、本格的な冬到来を予感させる寒い季節になりました。

乳歯保存ネットワークのメールマガジン「はは通信」第 5 号をお届けいたします。前号では、9 月に市原、星野、大沼(章)の皆さんが、スイス Basel 市の州立研究所を訪問して研修を受けた歯のストロンチウム 90 の微弱放射能の測定技術について詳細な報告をしました。皆さんお読みいただけただけでしょうか。私たちの活動は一步一步前に進んでいます。第 5 号と次号では、放射能・放射線に関する基本知識についてストロンチウムを中心に市原さんに解説していただきます。