

表題：放射線のための物理化学基礎（2）

副題：壊変と放射線の放出

筆者：SCE-Net 環境研究会 郷 茂夫

（化学工学会 会員）

2021年7月3日作成

1. 壊変と放射線

前回連載では、**核種と核種図**（前回の図4，図5）についてお話ししました。核種図で核種の帯が存在する領域は右上がり弓なりに曲がっていることもお話ししました。p数に対して、n数が適切範囲を超えて多すぎるか、逆に少なすぎる核種が存在する領域が不安定核種のある場所です（図5で黄色，空色の部分の核種です）。図4では，ちょっと見にくいですが，核種図の右上り帯の中心付近にある黒色四角が安定核種を示しています。

不安定な核種という意味は，原子核を構成するpとnの数の比が最適範囲から離れてアンバランスで，その核内エネルギー状態が不要に高すぎる（エネルギーを外に放出したくてムズムズしているような）ので，その余分のエネルギーを「放射線」として発して，不安定核種は，自発的に，より安定核種に変化して壊れる（原子核の**壊変**，または**崩壊**という；英 Decay）ということです。これが放射線が原子核の中から出てくるという根源的な所以です。人間がこの自発的壊変を中止させることは基本的に出来ません。

放射線として放出する余分なエネルギーにはいろいろなレベルがありますが，一般的に放射線は高いエネルギーを持って原子核から出て来ます。

不安定な核種は1回の壊変で終わりとは限りません。2回，3回またはもっと多数回の壊変を繰り返し，その度に放射線を放出して，より安定な核種に変わっていきます。例えば，よく話題に出る ^{137}Cs はβ線を発して $^{137\text{m}}\text{Ba}$ （mの意味は，p=56のバリウム原子核ではあるが，まだ不安定な遷移状態にある場合を言う）となり，次にγ線を発して， ^{137}Ba と言う安定核種になります。 ^{137}Ba とは皆さんが胃検査で飲むバリウム泥水です；放射性セシウムは怖がられていますが，放射線を出した後 ^{137}Cs はもうそこには居らず，何の毒性もない普通のバリウム白色粉末に変わるということです。全部が白色粉末になるには時間がかかりますが，不安定核種は壊変しますが，それはその核種が壊れてこの世から消えるという意味ではありません。別の名前の原子核種に変化するという事です。

そして、何回かの壊変を経て、最後に行き着く先が安定な核種（図5の黒色の四角）と
言うことであり、それで放射線放出の旅は終わるわけです。安定な核種となれば、文字通り
安定に地球上に普通に存在する物質であり、もう放射線は出しません。

2. 壊変の方式

余分のエネルギーを放射線として放出して、より安定な核種に変わっていくという流れ
はお分かりになったと思いますが、核種図で帯の中心の安定核種領域から離れた領域の不安
定核種はどのようなルートで安定核種に行き着いていくのでしょうか？その答えは、壊変
の方式によるということです。方式は1つではなく、5通りがあり、それに応じて放射線
の種類も複数あり、その異なる壊変方式が核種安定化への道筋を与えてくれるのです。

まずその対応関係を表1で見てください。p, n の数が変わる変化は上の4つです。

表1 壊変方式, 放射線の実体, 元の核種の変化

壊変方式の名前	放出放射線	放射線の実体	元の核種の変化結果
アルファ壊変, α-Decay	α 線	ヘリウム He の原子核 (p 2, n 2) 粒子の高速な流れ, 放射 線の中で最も重い粒子.	質量数: 4 減少, p: 2 減少→原子番号-2 n: 2 減少
(β 壊変には以下の3つがある; β-Decay)			
ベータマイナス壊 変, β-minus decay	β- 線	マイナス電子 e- 粒子の高速な 流れ	n→p 変換, 原子番号+1 質量数変わらず
ベータプラス壊 変, β-plus decay	β+ 線	プラス電子 e+粒子の高速な流 れ(電子はマイナスばかりでな く, プラスもある)	p→n 変換, 原子番号-1 質量数変わらず
電子捕獲壊変, EC; Electron Capture	放射線は出 さない	ちょっと変わった壊変方式で, 原子核の周囲の近い軌道電子を 核に引き込むやり方です.	p→n 変換, 原子番号-1 質量数変わらず
核異性体転移, IT (γ遷移の1つ) Isomeric Transition	γ 線,	γ線は電磁波です(質量はゼロ) 波長=エネルギー値はいろいろ あります.	n, p の変化は無し, 質量数も変わらず, 核内が励起状態 (m をつ ける)から安定状態へ
内部転換, IC (γ遷移の1つ)	γ線の代り に電子	γ線の代わりに軌道電子を放出	n, p の変化は無し,
X線は壊変には関わらない。(次回連載参照)			

表 1 を見ながら、放射線の実体的な姿、安定化への道筋を例を挙げながら解説しますと、

- ① α線は ヘリウム原子核からなり、放射線中では最も重いわば「剛球」で、 $p=2$ 、プラス 2 の電荷を持っています。ある RI が、α壊変すると、その RI は、ヘリウム原子核が飛び出すわけですから、質量数を 4 つ失い、原子番号は 2 減ります。核種図で核種変化の移動方向を示せば、45 度左下へ 2 つ移動です（連載（1）の図 5 参照）。典型例は地下にたくさんあるウランやトリウムです。α線をたくさん放出しています。皆様の家の庭の地面の下にもウランはあります。量は少ないでしょうが、

ウランの中で最も多い RI： ^{238}U を見ると、次式をご覧ください；

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$ (α線) で放射線発射時の核種の核反応変化を表せます。質量数は $238=234 + 4$ でピッタリ、U から Th になり原子番号は 2 減っています。出来た ^{234}Th は次いで β壊変しますが、つづきは下の⑧の記述を参照ください。

- ② 一方、壊変で出てきた α線の方はどうなるのでしょうか。α線は ヘリウム原子核で、物質にぶつかるとその原子の電子に何回もぶつかりエネルギーを与えて自分は弱まり、最終的にはもはや α線ではなくなります。そうなった普通のヘリウム原子核はその辺にたくさん居る自由電子 2 つを取り込んで（自分はプラス電荷ですから、マイナス電荷の電子をあっという間に取り込みます）、結局普通のヘリウム原子（気体）になります。風船に入れて飛ばすヘリウムガスです。

ちょっと話が飛びますが、現代ではヘリウムはいろいろな産業で需要が高く貴重資源です。ヘリウムは軽いガスなのに地下に眠っており、主に天然ガス採掘同伴で分離生産されます。何故に地下に眠っているのでしょうか？それは、膨大な量の RI ウランとトリウムが地下に在り、まさに地球誕生以来 40 億年以上ずっと α線を出し続け、今も α線を発射しています。そして その α線は最終的にヘリウムガスとなり地下の密閉区域に閉じ込められてきたのです。おそらく一部は地下から漏れ出て大気に拡散したと思われるですが、かなりの部分は長い間地下に閉じこめられていたわけです。つまり、ヘリウム資源は α線と言う放射線の賜物なのです。人間がヘリウムを他の原料から製造することは今はできません。

- ③ β線は「原子核から出てくる電子の高速な飛翔体」と言うわけですが、連載（1）で述べましたように、原子核は陽子と中性から成っており、電子はその周囲を回っているということであり「原子核の中から電子が飛び出してくる」と言うのはおかしいことと思われるでしょうが、不思議な現象が起こっているのです。それを以下⑥と⑦と⑧で説明します。その前に +/- 電子の性質について少し書きます。

④ β線は「電子という相当軽い（陽子の質量に比べれば 1/1,800）微小球」でマイナス電荷又はプラス電荷をもっています。前者を通常「電子」と言い、後者を「陽電子」と言います。陽電子は電子の「反粒子」であり、実世界にはほとんど存在しませんが、今回のように +β壊変の時に発生します。陽電子の寿命は短く、発生後ただちに周囲にたくさん居る電子の1つと引き合っただけで合体し、陽電子と電子は質量も電荷も消滅します。（2つの電子の姿は消滅します；それが物質と反物質の宿命と言うものでしょうか）。しかし、2つの電子の質量分に相当するエネルギーが γ線として放出されます（質量がエネルギーに転換したという事）。

⑤ ここで有名な、エネルギー／質量等価原理のアインシュタイン式； $E = mc^2$ 、の登場です。Eはエネルギー(joule)、mは電子の質量(kg)、cは光速(m/sec)です。まさに、2つの電子の質量がこの式に従ってエネルギーに変わったわけです。

計算は掛け算、割り算だけで簡単なはずですが、桁を間違いそうです。

$$E = 9.11 \times 10^{-31}(\text{kg}) \times (3.0 \times 10^8(\text{m/s}))^2 \times 2(\text{個}) / 1.60 \times 10^{-19}(\text{eV/J}) \\ = 1.025 \text{ MeV} \text{ となる。}$$

ちょっと話が飛びますが、今日の原発の燃料は ^{235}U や ^{239}Pu です。これらは中性子を吸収して核分裂が起こし、原料単位当たり莫大なエネルギーを発生しますが、それは核燃料重量のごく一部が消滅してエネルギーに転換するという事です。原子炉に装着した核燃料が全部消滅してエネルギーに変わるというわけではありません。原発の話は、後日の連載でお話しします。

⑥ β壊変では不思議な現象が起こります。原子核内のpとnが相互に交替変化することが結構起こるのです。普通、電子は原子核の中にはありません。電子が原子核の中から出てくる理由は、この p, nの交替変化に伴って、電子が発生して、それが出てくる という事です。

⑦ あるRIが、β-線を発すると、そのRIは、原子番号を1つ増やし（pが1つ増えたと言うこと）、質量数は変わりません。と言うことは前の⑥に書きましたように、原子核の中のn1個がp1個に転換すると言う不思議な現象が起こったわけです。これで、原子番号が1つ増え（= pが1つ増え）、nが1つ減ったことになった（n→p）ので質量数は変わらないのです。核種図で核種変化の移動方向を示せば、45度左上へ1つ移動です。何故にこんな現象が起こるかは、素粒子論の話に入っていきますので、本連載ではやりません。

なお、発したβ-線は、物質にぶつかると、そのエネルギーを相手原子に与えて、自分は弱まり、最後には何の変哲もないただの自由電子になります。それで β線は

おしまいになります。

- ⑧ β^- 線の例を挙げますと、①の続きで、 ^{234}Th は β^- 線を2回出して $^{234\text{m}}\text{Pa}$ を経て、原子番号は2つ増え、 ^{234}U になり（ウラン元素にまた戻るのです）、そして、さらに壊変は続いていきます。これは自然界にある「放射線壊変系列」と言い、連載（4）でお話しします。

もう一つの例で、この地球にそして我々の身体の中にも多いRI ^{40}K です。原子番号19番のカリウムの安定体は ^{39}K 、 ^{41}K です。今の地球上にはこの3つの同位体しか存在しませんが、すべての人が毎日欠かさず食べている食塩です。食塩にもいろいろありますが、海塩(非加熱)では、成分としてNa 40%、Mg 1~2%、K 1~2%、Ca 残から成りますが、そのKの中で、0.012%が ^{40}K です。従い、数字を表面的に見て大した量ではないと思われませんが、地球に存在する原子数全体にすれば非常に大きな数字になります。

^{40}K は上記の2つの安定体に挟まれています。安定体の近くに居る核種なので、かなり安定に近いと言えるでしょう；証拠に、その半減期は非常に長く、12億5千万年です。半減期が長いと被ばくを長く受けるのでイヤだと思える人が多いですが、このことは理解しておきましょう。今、ここに、 γ 線を出す ^{137}Cs （半減期30年）と γ 線を出す ^{40}K （半減期は上記）が、自分の近くにそれぞれ100億個の同数の原子があったとしましょう。出て来る放射能は、 ^{137}Cs : 8 Bq、 ^{40}K : 0.00000003 Bqです。つまり、長半減期の方がゆっくり少なくしか放射線は出てこないということです。

- ⑨ あるRIが、 β^+ 線を発すると、その原子は、原子番号を1つ減らし、質量数は変わりません。これは、⑦と全く逆の現象が起こっているのです。 $p \rightarrow n$ です。核種図で核種変化の移動方向を示せば、45度右下へ1つ移動です。

事例として1つ挙げたいのは、がんなどの病気検査での画像診断法の一つとしてPET検査があります。PETは「陽電子放射断層撮影法」を表す、ポジトロン・エミッション・トモグラフィー(Positron Emission Tomography)の略です。

陽電子(ポジトロン)を放出する放射性薬剤を人の静脈に注射して、細胞の活動状態を画像化する検査です。放射性薬剤 ^{18}F -FDGはブドウ糖に似た物質で、 ^{18}F (フッ素のRI)は陽電子を放出する核種で、半減期は短く110分ですので、体内に入っても1日でほぼ消滅します。1回のPET-CT検査で、放射性薬剤とCTをあわせて、被ばく量は約4mSv(ミリシーベルト)と言われます。

- ⑩ あるRIが、電子捕獲壊変ECをすると、その原子は、原子番号を1つ減らし、質量数は変わりません。ならば、⑦と同じ現象が起こっているのでしょうか？ いいえ、

結果は似ていても現象は全く違います。ECは、原子核が近くの軌道電子1個を引っ張り込み、 $p \rightarrow n$ となる交替現象です。従って、原子核からは放射線が出ないので、ただ、引き込まれた電子の軌道空席に、エネルギーレベルの高い軌道の電子が落ちてきて、その時に上下電子のエネルギーのレベル差の電磁波を出します。しかし、その電磁波は、 γ 線よりずっと低いエネルギーです。下のPhotonとはこの電磁波です。事例としては、SPECT (Single photon emission CT) で、体内に ^{67}Ga や ^{201}Tl (いずれもEC壊変をする)を注入し、RIの体内分布状況を見る検査のことで、す。

- ⑪ γ 線とX線は粒子ではなく電磁波(光子とも言います、電荷は無い)です。あるRIが、 γ 線を発すると、元の核種の変化はありませんが、その原子核の中でエネルギー状態として励起状態から安定状態に変化します。 β 線により、いったん核種が変化してから、準安定状態を経て、励起状態からの転移で、 γ 線放出で安定化する場合を、核異性体転移と言います。二次的に軌道電子を追い出す場合もあります。「 ^mX 」という、X元素記号の質量数の後にmをつけて表します。

例として、核医学で最もよく使われる ^{99m}Tc は、 ^{99}Mo 出発から β^- 壊変で、 ^{99m}Tc となり、ミルキング手法で合成される。次いで γ 壊変で ^{99}Tc に変わります。

- ⑫ 内部転換とは、⑪と同様に、励起状態からの転移で、 γ 線を放出せずに、そのエネルギーを軌道電子に与えて転移する場合を言います。細かいことは省略します。

以上で不安定核種の壊変の方式と関連する放射線の事例をお話しましたが、各ケースの壊変の場合の核種の移動方向を示しました。核種図を見て、この移動方向と核種の変化のルートを確認しておきます。核種図を見てください(連載(1)の図4、図5)。

この右肩上がりの帯状核種図の中心に安定核種領域があります。この安定ゾーンは、原子番号が低い範囲はおよそ45度の傾きに近いですが、原子番号が高くなると傾きは寝てきます。この弓なりの安定核種領域の右下側が、 n が多すぎる不安定領域で、左上側が n が少なすぎる不安定領域です。従って、右下側では、 β^- 線放出で $n \rightarrow p$ 変換が起こり、45度左上へ1コマ移動します。左上側では β^+ 線放出で $p \rightarrow n$ 変換が起こり、45度右下へ1コマ移動します。ただ、左上側不安定領域では、もう1つの壊変が起きます；EC変換です。結果は同じく45度右下へ1コマ移動しますが、放射線は出さず、この現象が起こるのは、原子番号が50以上に大きい元素の領域です。それは原子番号が大きくなると周囲の電子の数もどんどん増えて、原子核が電子1個を引き込みやすくなるためです。

どうですか、こうして外側の不安定領域から中心の安定領域へ近づくことができました。なお、 α 線は、原子番号の高い領域（周期表で言うと 83 番 Bi 以上）の不安定核種が発するもので、それより低い番号の核種では α 線は発しません。

(連載 013 終わり)