

表題：放射線のための物理化学基礎（４）

副題：自然／人工放射性元素，原子について

筆者：SCE-Net 環境研究会 郷 茂夫
（化学工学会 会員，放射線影響学会 会員）

2021年7月15日作成

今回は、今地球上にある天然の放射性物質とウラン，トリウムなどの壊変系列の不思議と放射性カリウムなどについて、また人間が合成した人工放射性原子についても触れたいと思います。

1. 地球上の天然の元素と原子

地球上に昔から自然に存在している元素は、原子番号1番水素 H から92番ウラン U までですが、このうち43番 Tc テクネチウムと61番 Pm プロメチウムの2つは、地球上に今は存在していません。この2つを「欠員元素」と言います。この2つの元素には安定核種がなく、地球のずっと昔には存在したかもしれませんが、半減期が短く、とっくに壊変で消滅したということです。連載（2）で言いましたが「消滅した」と言うのは原子がこの世から消えたということではなく、放射線を出して他の元素に変わってしまったということです。従い、今の地球上の天然の元素の数は、 $92 - 2 = 90$ 種とということです。

上述は元素の数ですが、自然の原子の核種の数で見ると、もちろんずっと多くなります。その数は340種くらいです（完全に正確な数字は難しいと言います、というのは地球上に在るとか無いとかの基準が決まりにくいからです（地球上に、1個だけ特殊な原子があったとするとどうしますか？））。

このうち、天然の安定原子核種の数：280弱、

天然の不安定（＝放射性）原子核種の数：61（次項で詳しく言います）

地球上に昔から自然に安定に存在した安定元素は、周期表（連載（1）の図3）で言えば、原子番号82番 Pb 鉛までです。

もう1つ用語を追加します、周期表を見てください。原子番号82番鉛 Pb までの元素には天然安定原子が「常に」存在するわけですが（前記2つの欠員元素は除く）、次の原子番号83番ビスマス Bi 以降の元素では、その同位体原子のすべてが放射性核種なの

です（安定核種が1つも無い）。それを「**皆放射性元素**」と言います。つまり、ビスマスからウランまで全部の原子が放射性核種なのです。83～92番で、10元素が天然の皆放射性元素ということです。後で言いますが、93番ネプツニウム以降の人工元素もすべて皆放射性です。

2. 天然の放射性物質を詳しく

前項のように、今でも地球には、自然の放射性物質（元素，原子）が結構たくさんあります。皆様の身の周りにもいろいろの天然放射性核種があるということです。

量の多いのを上げれば、ウラン（ ^{235}U , ^{238}U ）、トリウム（ ^{232}Th ）、カリウム（ ^{40}K ）の3つとその娘核種や子孫核種（次項を参照下さい）群です。これらは主に地殻中に土や岩石に混在しており、海水中にも溶けています。ウランは原子力発電所や原子力爆弾のもとになっており、カリウム ^{40}K は我々が食べる食塩の中に少量含まれています。Thは、今は利用は少ないですが、原子力関連での今後の展開が注目されています。下表に、天然の放射性物質（元素）とその存在理由の分類についてまとめます。（放射性物質の「利用」については、後日の連載で詳しく述べます。）

表1 天然の放射性物質，元素

表1 放射性核種の分類：天然と人工

放射性核種	現在,約1520種(うち 61種は天然 ;含む一次および二次放射性核種, 残りが人工放射性核種) の放射性核種が知られている。	
皆放射性元素 欠員元素	Z:43 Tc, Z:61 Pm および Z:83 Bi 以降の元素;安定な同位元素が存在しない。(Tc 最初の人工放射性元素, Pm:短半減期で消えた)	
超長半減期	232Th, 83Bi (半減期=2000京年とか) はほぼ安定体	
天然放射性核種 (NORM) :61種	一次放射性核種:地球創世の時から存在 →長半減期:壊変系列の元	^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th
	二次放射性核種:上記とその娘核種,壊変系列の生成物	Ra, Rn, Ac, Po など
	系列を作らない長半減期放射性核種	^{40}K , ^{115}In , Rbなど
	誘導放射性核種:主として宇宙線との核反応により生成する,短半減期	^3H , ^7Be , ^{14}C など
人工放射性核種 (NORMIに比べて比較的短寿命) <i>どこで造るのか?</i>	RI 全般	原子炉, 加速器, 研究・医療関連施設
	核分裂生成物 Fission Products	原子力発電所, 核関連施設, 他
		核兵器製造, 核実験, 原子力潜水艦等

上記の実在する放射性核種についての補足と話題を若干記しますと、

- ✓ 実は、 ^{209}Bi （金属類に分類され、この核種しか地球上には存在しない）は、10年ほど前までは安定原子と見られていましたし、工業品や宝飾品に使われていました。しかし、放射能測定が進歩し、かすかな放射能も検知できるようになったのです。 ^{209}Bi の半減期は千九百京年（ 1.9×10^{19} year）とかで気の遠くなるような長さであり、放射能はほんの微々たるものであり、準安定物質です。怖さは全くありませんが、「放射性」の名にアレルギーを持つ人は多く宝飾品は消えました。（計算は後日の連載で行いますが、腕輪くらいではほとんど放射線は出ません。）
- ✓ 欠員元素の放射性テクチニウム $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は、いま医療分野で大いに活躍しているものですが、それはモリブデン ^{99}Mo から人間が合成したものです。
- ✓ Po ポロニウムは、従来あまりなじみのない元素でしたが、2017年ICRPが日本人公衆の自然放射線平均被ばく量を見直し、日本人は魚をよく食べるので、魚に比較的多く含まれている ^{210}Po および ^{210}Pb による被ばくを 0.6 mSv 加算し、合計 2.1 mSv としました。しかし、ほんの微量ですが、あったのに知らなかったと言うようなレベルの話ですが、日本人だけが特別に魚を食べるわけではないでしょう。ICRPが言うことを鵜呑みにしてはいけないと思います。
- ✓ カリウム K は、我々が日常消費する食塩の一成分であり、毎日食べています。その中に ^{40}K が少し含まれています。60kgの人で、5,000ベクレルくらいの放射能が常時体内にあります。食品放射能基準は今 100Bq/kg ですが、その1kgの食品を一日で食べた後は、体重は 61 kg となり、放射能は 7,100 Bq になりますが、それがなんなのでしょう。100Bq/kgのお米と聞くと尻気味するのは意味ないですね。RIを含む食品の健康影響の計算は後日行います。
- ✓ トリチウムの話は、後日の連載で行います。
- ✓ ^{14}C は古代発掘物などの年代測定に使われているのは有名です。半減期は 5,730 年で、数万年前までの生物の遺骸、文化財、地下水・海水などに溶存する有機物などの年代はかなりの精度で推定できると言います。

3. 自然の放射性物質の壊変系列

表1では、天然放射性核種は 10 数個しか表示していませんが、この地球上に、全部では 61 種の放射性核種があるのです。その多くが、自然の「放射性物質壊変系列」と言われている一群の中にあるのです。壊変系列には、4 つあります；ウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列、ネプツニウム系列です。しかし、最後のネプツニウム系列ははじ

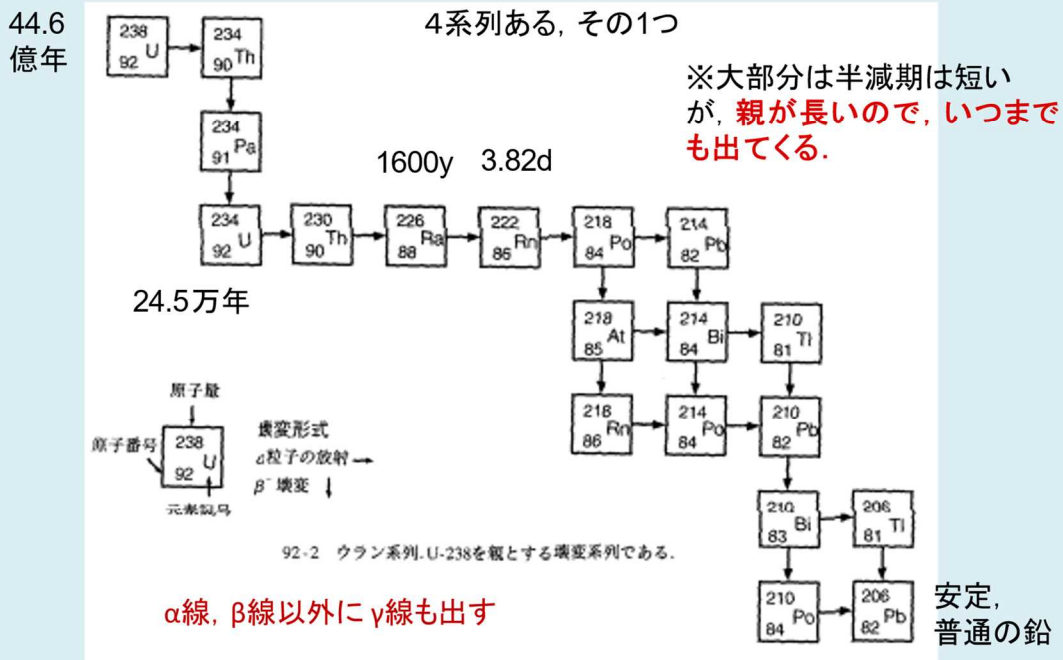
めの NP ネプツニウムの半減期が比較的短く、他の「娘核種や子孫核種」*)も半減期が短く、今は地球上には事実上存在しません。

*) 娘核種とは；壊変については先にお話ししました。このとき壊変前の核種、壊変後の核種はそれぞれ「親核種」、「娘核種」と呼ばれます。これも連載 (2) で述べましたが、放射性物質によっては、壊変後も原子核がエネルギー的に不安定な場合があります、これは放射性核種から別の放射性核種へ変化したことを意味します。このような核種は、壊変を繰り返すことでエネルギー的に安定な核種へと変化します。娘核種が壊変した接種を(親接種から見て)孫核種と呼ぶことがあり、娘核種と併せて子孫核種と呼びます。

放射性物質壊変系列の3つを図示します。

この系列の最初の核種は、見てのとおり、非常に長い半減期を持った核種であり、地球の歴史に匹敵する長さです。と言うことは、この壊変系列は、地球始まって以来ずっと続いているのです。昔の方が、これらの放射性物質もずっと多かったのです。

表2 壊変系列／ウラン



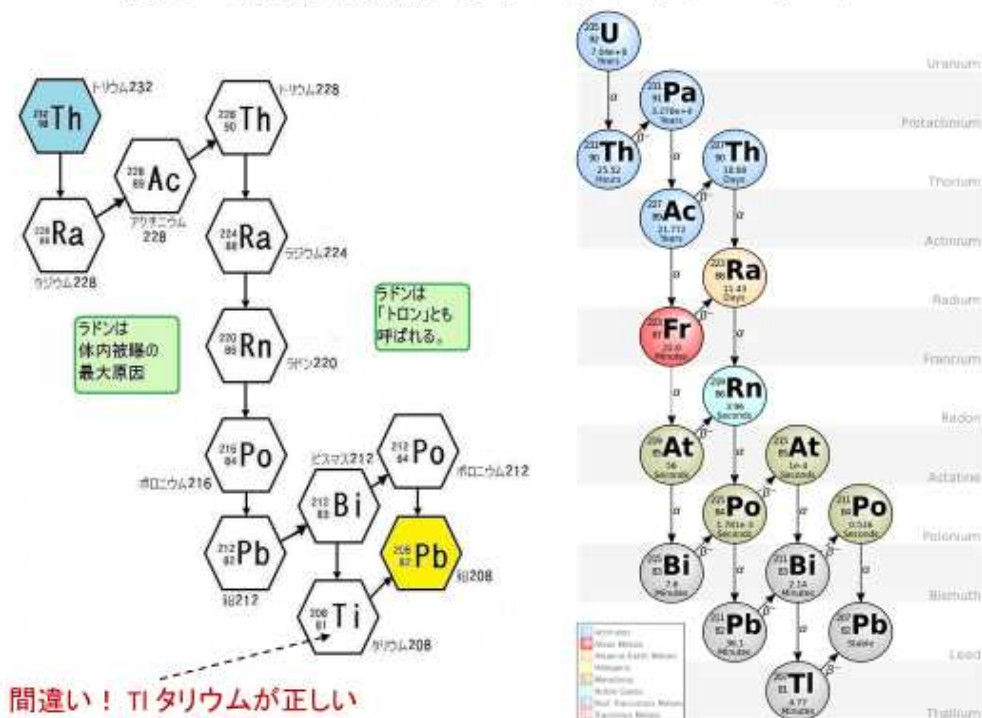
上記の存在する放射性核種の系列についての話題を若干記しますと、

- ✓ 前項で書いたカリウム 40, 上記のトリウム, ウランなどの放射性元素は寿命が非常に長く（後述の半減期と関連する）, 今までそのかなりの部分は放射線を出して安定化しましたが, 地球上には, まだ相当部分が残っていて放射線を出しては壊変を続けています, 徐々に元の核種は減ってはいますが, まだまだ何十億年と続くようです.
- ✓ これらの3つの壊変系列には, Ra, Rn, Po が必ず系列に入っています. ただ, それぞれ中性子数が異なる同位元素です. 放射線の出す種類と半減期を以下に書きます.

	Ra ラジウム	Rn ラドン; 気体	最初の Po ポロニウム
	質量数, 線, 半減期	質量数, 線, 半減期	質量数, 線, 半減期
ウラン系列	226, α, γ, 1600y	222, α, 3.8d	218, α, β, 3.1m
トリウム系列	224, α, 3.7d	220, α, 55s	216, α, 0.15s
アクチウム系列	223, α, γ, 11.4d	219, α, γ, 3.9s	215, α, β, 0.0002s

- ✓ ご覧のように, 全体として半減期が短いので, 親核種から生成しても, すぐにその生成物は半減期で消えていくのですが, 親がいつまでも存在し壊変しているのです, 上流からどんどん流れて来ますので, これらの核種が消失することはありません.

表3 壊変系列;トリウム, アクチウム



- ✓ **ラドン (^{222}Rn)** はウラン系列 (上記の表 1 ; ^{238}U の壊変系列) の放射性核種の一員で、親核種であるラジウム (^{226}Ra) のアルファ壊変で生成します。 ^{222}Rn もアルファ線を放出して壊変し、順次、連鎖的に壊変を繰り返す、最終的には安定な ^{206}Pb になります。ここでは、特に断わらない限り、ラドン (^{222}Rn) をラドンと呼んでいます。周期表でも、元素記号はすべて「Rn」で統一されています。
ラドン (Rn) の同位体的一种**トロン (^{220}Rn)** は、トリウム系列 (表 3 ; ^{232}Th の壊変系列) の一員です。 ^{220}Rn の半減期は 54.5 秒で、 ^{208}Pb になるまで順次、連鎖的に壊変します。以下、トロン (^{220}Rn) をトロンと呼ぶ場合もあります。
- ✓ ラドン Rn の半減期は day, sec 単位で特に短いです。また、気体です。壊変系列の核種は殆ど重い元素ですので、岩石の中から外に流出することはありません。しかし、ラドンは不活性気体であるため、岩石の中から外へにじみ出て来ます。そして換気が悪ければ、空間中に滞留することになります。
Rn は日本ではあまり話題に上りませんが、西欧では石造りが多い家屋内のラドン濃度が長年議論になっています。これについては別途連載を見てください。
- ✓ Ra はラジウム温泉が有名ですが、多少の良い効果があるのでしょうか。
- ✓ Po は魚介類にやや濃縮されやすいと言われ、魚介類を多く食べる日本人の体内放射能が数年前に ICREP により若干上げられました。ほとんど影響はないわずかな修正なのですが。

4. 地球の内部熱の源泉

原始の地球は煮えたぎった灼熱の球だったといわれますが、やがて海ができ、生命が生まれました。その頃には、地球表面温度は、現在とほぼ同程度だったでしょう。そう多細胞生物の誕生は 6~7 億年前と言われ、その後も、温暖期や寒冷期があり、巨大隕石が衝突したりして地球の表面温度はいろいろ変動があったと言われますが、それでも少し長期に見れば平均気温で地球の表面温度は各場所の現状より + / - 10 °C を超えたことはなかったでしょう。

それに引き換え、地球の地殻の下は、マグマが存在するので、数千度の温度があり、地球中心部は高温で溶融した鉄の 6 千度に達する高温です。5.5 千度と言うと太陽の表面がそのくらいと言われますので、非常な高温です。

さて、地表温度は 10 億年とかの間、多少の上下はあったものの、上記のとおりです。そして地下は数千度です。ならば、地下から表面へ熱は一方向的に伝わり続けます。太陽が地球を暖めると言っても、数千度の温度源を地下に供給できるわけではなく、地表の熱バラ

ンスに影響を与える程度のことです。つまり、地表では、太陽からの熱供給+地下からの熱供給=地球外への放熱（空気などの温室効果を含めて） ということ。この式の左右が、長い間大体バランスしてきたということです。ならば、地下の熱はどんどん地表に送られ、地下で熱の発生がなければ、だんだん地下の温度は冷えてくるはず。しかし、長い期間をとってみても、地下が徐々に冷えて来たというような事実は無いように見えます。とすれば、地下に大きな発熱源があるはずであり、それは科学的に確かめられています。

地球の地下の発熱源としては以下が指摘されています。

- (1) 全体の 60%程度を占めると言われる最大の熱源であり、地下の放射性物質が出す放射線のエネルギーが熱に転換したものです。上記のように、地下にはウランやトリウムを出発点とする放射性壊変系列があり、その系列に属する放射性原子はすべて放射線を出すので、合計では膨大なエネルギー/熱量になります。また、⁴⁰Kも長期に存在し発熱があります。この放射性物質の発熱量などは後日計算してみたいと思います。
- (2) 地表近くの固定固体部を除き、その下は、マグマ、プレートなどが流動しているため、その摩擦熱があります。
- (3) 地下には不規則な大電流が走っており、そのファラデー効果による発熱があります。
- (4) その他の小さな要因もあります。

このように、地下の U, Th, K など、また壊変系列の多くの放射性核種のような物質の存在は、地球環境を快適にしてくれている中の 1 因なのです。これから何億年、何十億年と経てば、地下の放射性物質は目に見えて減少してゆきます。その時はどうなるのでしょうか？

5. 人工元素と人工放射線物質

原子番号で 92 番のウランの次は、93 番 Np ネプツニウムですが、Np を含んでそれ以降の原子番号の元素は、大昔の地球のことはいざ知らず、地球上には事実上存在しません。仮に、宇宙から飛んできたりして、少量地球上に存在したことがあったとしても、Np 以降の元素は半減期が短く（地球の十億年単位の歴史の長さと比べてと言う意味）、放射性ですから、壊変して安定な原子に変わってしまったということです。

しかし、ここ百年程度で、人間にとって、原子の世界は急展開してきました。人間が新元素、新原子を合成できるように技術は進歩したのです。つまり、ウランの次の Np 以降

の元素，原子はすべて人工（人間が生成を意図しない副生物を含みますが）だということです。これを「**超ウラン元素**」と呼んでいます。

そして，**1.** で言いましたように，これらの原子は「皆放射性」原子で，安定な原子核種は存在しません。表 1 の下段に，人工放射性原子の分類と，その合成手段について記載しておきました。

現在，平和の脅威である原子爆弾の原料は，主にプルトニウム ^{239}Pu であり，それはウランから誘導されます。ウランを原料とする原発炉内で生成されます。原発の話は後日の連載で解説します。

ウラン以降の重元素には中性子を吸収して核分裂を起こしやすい核種がいくつかあり，それを人間は利用できるようになりました。それが原発であり，原爆です。核分裂現象は自然にも極わずかですが存在しますが，それは連鎖反応には至らないために 1 回の分裂で終わりです。核分裂は，主に 2 つに分裂し，さらに数個の中性子を放出して飛び散ります。2 つに分裂するといっても 1 回の核分裂で分裂の仕方は多様であるため，結果として様々大きさの分裂片ができます。その分裂片（**FP**; Fission Product という）はほぼ全部が放射性物質であり，後始末がまことに大変です。今の原発の核廃棄物などはその典型例でしょう。

(連載 015 終わり)