

<連載 1> 「原子力問題のイロハ（基礎）にホヘト（応用）」

<2010.10.6 了>

原子力（発電）問題を考える場合、“主役”とも言うべき「ウラン」や「プルトニウム」といった元素名や、放射能・放射線、プルサーマル・核燃料サイクル・再処理・高速増殖炉などの様々な用語が飛び交い、なかなか頭の整理がつかないこともあるかと思います。

そこで、今回から数回の連載で、そのような原子力問題の基礎的な話（イロハ）や応用的な話題（ホヘト）のいくつかをご紹介します。「なるほど！」と理解を深めていただけたら幸いです。また、「〇〇についてもっと知りたい。」というリクエストがありましたら、どんどんお寄せ下さい(分かりにくい、という感想もどうぞ)。

1 『元素の周期表』を見直してみると…。

理科室の壁に必ずと言っていいほど貼られていて、中学・高校の理科・化学の教科書の見返しなどにも必ず載っていた『(メンデレーエフの) 元素の周期表』に、“悪い・苦い” 思い出を持っている方も少なからず（大半？）いるかと思います。でも、子供の頃には苦手だった食べ物（ピーマン、ニンジン、エトセトラ…）が大人になってからは食べられる・好きになることもあるのと同じように、いま改めて『周期表』を“味わって”みると、（最初はちょっぴり苦さを感じるかもしれませんが）新しい発見があるのではないのでしょうか。<ここでは、高木仁三郎「新版 元素の小事典」(岩波ジュニア新書 1999) の『元素の周期表』を転載しますので、“味わって” みて下さい。>

私たちの身の周りには、物質は、「原子」という非常に小さな粒からできています。そして原子は、化学的な性質の違いにより約100種類（おそらく40代以降の方は103と記憶しているのでは。それより若い世代は104以上では。*増加理由は次回）のグループ＝「元素」に分けられ、その名前（元素名）はアルファベット大文字1つか大小2文字の「元素記号・化学記号」で略記されます。そのおかげで、いくつもの原子の粒からできている物質は、原子の元素記号とくっついている個数（右下に小さく添記）で簡単・正確に表わされ（化学式），“誰もが正しく？” 理解・区別できるようになります。

アルファベットの元素記号がズラッと並んでいる“おなじみ”の『周期表』は、身の周り（＝地球上）に存在する様々な物質を構成するいくつもの元素（単体）が分離・発見・整理された19世紀に、メンデレーエフ（1869）が、元素を「重さ（原子量）順」に1番、2番…と軽い方から番号（原子番号）を付けて並べると、化学的性質の似た元素が周期的に現れる（例えば、9フッ素と17塩素、10ネオンと18アルゴン、11ナトリウムと19カリウム、など）ことを手掛かりにして、性質の似た元素が同じ縦の列に並ぶように工夫したものです。最も軽い原子番号1番の「水素H」から、横書き文書と同様、左から右へ、右端になったら1つ下の段の左端へ戻るように並べられ、一般的に各欄には「原子番号・元素記号・元素名・原子量」が書かれています。でも、メンデレーエフが表を作成した当時は、まだ発見されていない元素も少なからずあったので、表には空欄がいくつもありました。しかし、逆に言えば、周期表という強力な情報源を手掛かりに、未知の元素の性質を予測し対象を絞って探すことが可能となり、空欄は徐々に埋められてゆきました。

さて、ここで問題です。原子番号順に並んだ元素は、重さ（原子量）の順にもなっているはずが、でもよく見ると、前の元素より次の元素が軽くなっているものがあります。それは、どれとどれでしょうか。〈…… 5分間 “間違い探し” をどうぞ……〉

例えば 18 アルゴンと 19 カリウムです (27・28、52・53、90・91、92・93、100・101 も)。

その主な理由は、同じ元素 (=原子番号) の原子の中に、「重さ (質量数) の違う原子」がいくつかあるからです (それらを「同位体」と言います)。例えば、原子番号 1 の「水素」には、質量数 1 の原子 (通常の水素 H) と、質量数 2 の原子 (重水素 D) と、質量数 3 の原子 (三重水素 T) の三種類の同位体があります。そのような重さの違う同位体が多数集まった時の平均的な元素の重さが「原子量」で、一般には“自然界にある” (安定) 同位体の組成と質量数 (厳密には「同位体質量」で、小数点以下の端数があります) によって決まります。例えば、11 ナトリウムは質量数 23 の同位体が 100% なのでそのまま「原子量約 23」ですが、17 塩素では質量数 35 の同位体が 75%、質量数 37 のものが 25% あるため、その平均で「原子量約 35.5」になります。そして、18 アルゴンは質量数 36, 38, 40 の同位体のうち 40 の同位体がほぼ 100% で、19 カリウムは 39, 40, 41 の同位体のうち 39 が 93% 以上のため、原子番号と原子量の逆転が起こるのです。

2 「化学の世界」と「原子核の世界」

そして、ここからはいよいよ「原子核の世界」が登場します。

原子という粒は、さらに小さな「電子 (マイナスに帯電)」「陽子 (プラスに帯電)」「中性子 (電気なし)」という三種類の素粒子からできています。

原子を“梅干オニギリ”とすれば、外側の“のり (海苔)”の部分には「電子」という非常に軽い粒 (質量数はほぼ 0) が 1 個～最大 100 個程度存在しています。そのため「電子」は、比較的簡単に原子の外へ飛び出したり (減少)、他所から飛び込んできたり (増加) しやすく、「電子の数」が元素の化学的性質・周期性を左右しており、また複数の原子同士を安定的に結合させる“のり (糊)”の役目を果たしていたりして、いわば“化学の主演・物質世界の立役者”となっているのです。

一方、真ん中の“梅干”部分にあるものが「原子核」で、質量数 1 の「陽子」と、同じ質量数 1 の「中性子」が、1 個～最大 300 個程度 (うち陽子は 1 個～最大 100 個程度) 互いに密にくっついて球状・梅干状になっています。このように、「原子核の世界」では、陽子と中性子が“主演”ですが、通常は電子の“のり (海苔)”に厳重に覆われており、直接姿を現すことはほとんどありません (次回説明しますが、「放射線」こそ「原子核の世界」が私たちの日常世界へ姿を現したものと、割り込んできたものです)。

ここで、上記の三種類の素粒子と『周期表』との関係を見ると、「原子番号」の正体は「陽子の個数 (=中性原子の持つ電子の個数)」で、また、「原子量」を左右する個々の同位体の「質量数」の正体は、「陽子と中性子の合計数」です。例えば、原子番号 1 番の水素は「陽子を 1 個」持っている原子のグループのことで、通常の水素 H (質量数 1) の原子核は陽子 1 個 (中性子 0 個) からなり、重水素 D (質量数 2) は陽子 1 個・中性子 1 個、三重水素 T (質量数 3) は陽子 1 個・中性子 2 個からなっています。また、原子力で問題の 92 番「ウラン U」は、主に「質量数 235 (核分裂する)」と「質量数 238 (核分裂しない)」

の二種類の同位体があり(一般に、質量数を元素名の直後につけ、「ウラン235」とか「ウラン238」と呼び、同位体を区別します)、前者は陽子92個と中性子143個、後者は陽子92個と中性子146個からなっています。このように、同じ元素に属する同位体の違いは、中性子の個数の違いによるものです。

さて、次回までの宿題です。『周期表』を見ると、原子量の値が小数点以下まできちんと書かれているものと、整数値がカッコ書きされているものがあります。カッコ書きされている元素で、原子番号が若い元素2つは何と何ですか。また、原子量の値がきちんと書かれているもので、原子番号が最大の元素はどれでしょうか？

<以下、次号へ続く。>

<連載2> 「原子力問題のイロハ（基礎）にホヘト（応用）」

3 原子は“不変・安定”ではなかった…（『周期表』の元素探し）

前回述べたように、原子量は“自然界にある”（安定）同位体の組成と質量数によって決まります。ところが、『周期表』で原子量がカッコ書きされている43番や61番は、実は（安定）同位体が“自然界には存在しない”ので、地球上の物質を分析しても見つからず、長い間（～1936）それらの場所は空欄だったのです。また、75番や84番～90番の元素は、“自然界に微量しか存在しない”ため、見つかりにくかったのです（75番は極微量のため1925にようやく発見）。そして、『鳴り砂』読者にはおなじみの92番「ウランU」こそ、自然界に比較的多量に存在する最も重い元素だったのです。

『周期表』の空欄は、19世紀末（1895）にレントゲンによって発見されたX線に始まる「放射線・放射性物質」に関する20世紀の研究により埋められ、さらに、自然界に存在しない93番以降の元素（超ウラン元素）が“発見”されてゆくこととなります。<以下、カッコ書き元素のうちどれが見つかりどれが未知のままか、チェックしてみてください。>

その端緒として、蛍光塗料として使われていたウラン化合物からも未使用の写真乾板を感光させる「放射線」が出ていることをベクレルが発見し（1896）、それを手掛かりに（マリーとピエールの）キュリー夫妻は放射線を発する新たな物質（放射性物質）として84番ポロニウム、88番ラジウムを発見しました（1898）。翌年には89番アクチニウムが発見され、その後も既知の元素についても多くの放射性同位体が発見されました。

また、放射性同位体から発せられる放射線には「 α （アルファ）線、 β （ベータ）線、 γ （ガンマ）線、中性子線」などの種類があり、 α （アルファ）線の正体は、プラス2の電荷を持った「原子番号2・質量数4のヘリウムの原子核（陽子2個・中性子2個）」であることや、 β （ベータ）線の正体は、マイナス1の電荷を持った「電子」そのもので、 γ （ガンマ）線の正体は、光やX線と同じ「電磁波」であることなど（もちろん、中性子線の正体は、電荷を持たない「中性子」です）が、解明されました。

さらに、88番ラジウム226は、 α 線を放出すると、陽子2個・中性子2個が減るため、原子番号が2・質量数が4小さい86番ラドン222に変化します（ α 崩壊）が、この時、 α 線＝「ヘリウムの原子核」が出てくる可能性のある場所は、唯一ラジウムの「原子核」ですから、陽子・中性子が密にガッチリと固まっていると思われていた原子核が、“必ずしも不変・安定ではない”ことが分かったのです。

同様に、90番アクチニウム227は、 β 線（電子）を放出すると、91番トリウム227に変わります（ β 崩壊）が、原子の外側にある電子（＝化学の世界の主演）が飛び出すならアクチニウムの「イオン」になるだけで、トリウムに変化するはずはありません。“原子番号が1増えた＝陽子が1個増えた”ことから、 β 崩壊では「電子と陽子」がペア（対）で生み出されたこととなりますが、一方で質量数は変わりませんから、“中性子が電子と陽子に変化した（中性子 \rightarrow 電子＋陽子）”と考えるしかなく、それで「質量数」も「電荷のプラス・マイナス」もつじつまが合います。このように、 β 線の電子は、実は「原子核」から、より正確には物質の根源＝素粒子の「中性子」から飛び出していたのです。

このように、放射線は、長い間不変・安定と思われていた「原子（元素）」の変化や、「原子核」や「中性子」の変化とも関係するもので、私たちの身の回り・地球上の物質世界（化

学の世界)の“安定性・秩序”とは相容れないものだと思います。

1934年の(イレーヌとジョリオの)キュリー夫妻の人工放射能の発見に始まり、放射性物質から放出される中性子や α 線などの粒子・放射線を既知の原子(原子核)に衝突させたり、様々な原子核を人為的に加速して(高エネルギーにして)他の原子核に激しく衝突させる装置(サイクロトロンなどの粒子加速器)を用いることで、新たな原子・同位体を人間が“創造・合成する”ことが可能となり、その結果、43番テクネチウム(1937年)や、85番(1940年)、87番(1939年)、93番(1940年)の元素や、ウランと並び原子力の世界では“有名な”94番プルトニウム(1940年)や、1944年からは95番以降の元素が、続々と“発見・合成”されました。それで、前回触れた『周期表』の元素の種類が、学校で習った年代(=元素の合成・公認年代)によって、103だったり、104だったり、109だったりしたのです(『理科年表 H19』では118種類です)。

【小休止問題：さて、まだチェックされていない未発見の元素は何でしょうか。】

4 “放射能時計”から見えてくるもの

放射性物質・放射性同位体(=放射能)のように、不変・不滅のはずの原子が“生まれたり(生成)、変わったり(崩壊)”するということは、原子にも「寿命」があることを意味します。例えば、88番ラジウム226は、1600年経つと半分が α 崩壊します。また、そこで生まれた86番ラドン222は、僅か3.8日で半分がなくなります(α 崩壊)。その結果生じた84番ポロニウム218は、3分で半分が消滅します(α 崩壊)。

このように、今ある量の半分が崩壊する時間を「半減期T」と呼び、それを放射能の「寿命」の指標とします。例えば、上記ラジウム226(T=1600年)は、 $t=1600$ 年経つと半分(1/2)に減少し、さらに1600年(最初からは $t=3200$ 年)経つと、残った半分(1/2)のさらに半分(1/2)が消えて最初の1/4に減り、さらにもう1600年(最初からは $t=4800$ 年)経つと、最初の1/8しか残りません。即ち、半減期Tの放射能は、時間tが経つと、「2の(t/T)乗」分の1に減少します。

すべての放射性同位体が決まった半減期Tを持ち、それぞれが“固有の時を刻む”ことを利用すれば、その同位体が生まれてから現在まで、どれだけの時間tが経っているかを調べることが可能となります。それが放射性同位体を利用した「年代測定法」です。

例えば、宇宙・太陽から降り注ぐ宇宙線(高エネルギー粒子)により絶えず地球上空で放射性的「炭素14(半減期5730年で β 崩壊)」が作られますが、それが地球中に降下・拡散して、天然にある「炭素12」と化学的性質は変わらないため、生きている動植物(有機物)内に一定の割合で取り込まれますが、生物が死ぬと炭素14だけが減少してゆくことから、その減少量(12と14の割合の変化)を測定すれば、生物が死んでから=人が伐採・採取してから=遺構が作られてから、何年経過したかが推定できるわけです。

でも、例えば「半減期Tの10倍」の時間が経つと、放射能は「2の10乗(1024)=約1000」分の1に減少して、測定は困難となるため、「炭素14年代測定法」では半減期を挟んだ数百年から数万年までが測定範囲とされています。ちなみに、生物・有機物より著しく“寿命”の長い岩石・隕石など(無機物)の年代測定には、半減期がより長い天然放射性同位体(37番ルビジウム87:T=47.5億年、62番サマリウム147:T=106億年、19番カリウム40:T=12.8億年、など)が使われます。

さて、放射能の半減期（＝原子の寿命）を考えることで、『周期表』の空欄の謎が解けます。例えば、「43番テクネチウム」には数種の同位体があることが判明していますが、“最も長生き”のテクネチウム98でも半減期は420万年のため、仮に哺乳類が誕生した2億年前に存在していたとしても、19世紀の科学者がどんなに努力しても、2の48乗＝300兆分の1にまで消滅しており、発見は不可能だったのです。

では、次回の宿題です。「ラドン温泉」という言葉を聞いたことがあると思いますが、半減期が僅か3.8日のラドン222は、 $t = \text{半年}$ で（ $182.5 / 3.8 = 48$ より）2の48乗＝300兆分の1に減少・消滅しているはずですが、どうして現在もこの地球上にあるのでしょうか？

【小休止問題の答え 61番プロメチウム】

<以下、次号へ。>

【1回・2回の参考文献（連載全体の基本資料）】

- ・高木仁三郎「新版 元素の小事典」岩波ジュニア新書 1999
- ・常石敬一「原発とプルトニウム」PHPサイエンス・ワールド新書 2010
- ・「理科年表」丸善および「理化学辞典」岩波書店

<予習？したい方へ：連載を読まなくなると困りますが…。入手困難？の古いものも。>

【3回の参考文献】（単独で読んでも非常に面白く、特に後者は読み易い）

- ・W.S.ブロッカー「なぜ地球は人が住める星になったか？」講談社ブルーバックス 1988
- ・池内了「自然を解剖する」NTT出版 2008

【4回の参考文献】（ちょっと専門的）

- ・谷畑勇夫「宇宙核物理学入門」講談社ブルーバックス 2002

【5回の参考文献】（幅広い情報・資料が満載）

- ・原子力資料情報室「原子力市民年鑑 2010」七つ森書館 2010

【6回の参考文献】（テーマに関心がある方はどうぞ）

- ・黒田和夫「17億年前の原子炉」講談社ブルーバックス 1988
- ・川上紳一「地球と生命の共進化」NHKブックス 2000
- ・日本化学会編「化学総説No.30 物質の進化」学会出版センター1980

他にも部分的に参照した文献はありますが省略。関心がある方はお問合せ下さい。

<連載3> 「原子力問題のイロハ（基礎）にホヘト（応用）」

5 ラドン温泉はどうしてあるの？

仙台近郊の熊ヶ根温泉や全国的に有名な三朝温泉（鳥取県）は「ラドン温泉」とされています。では、「宿題」の‘ラドン222が現在も存在する理由’ですが、それは、消滅・崩壊する一方で、次から次へと‘ラジウム226から（ α 崩壊で）生まれてくるから’です。では、半減期1600年のラジウム226は、どうして消滅しないのでしょうか。それは、半減期8万年のトリウム230から生じているからです。ではどうしてトリウム230は……、とラドン222の起源を遡ってゆくと、なんとそこに「ウラン238」が登場するのです（ちなみに、鳥取県・人形峠には日本唯一のウラン鉱山がありました）。

前回「3」で述べたように、初代キュリー夫妻がポロニウム・ラジウムを発見したのはウラン化合物からでしたが、実は、自然界にある「ウラン238」は半減期45億年の放射性同位体で、その一部が少しずつ崩壊して、新たな放射性同位体（娘核種）を生み出し、それがまた崩壊して次の娘核種を生み、またそれが崩壊して…、ということを繰り返し、最終的に安定な82番の鉛206に至るのです（生じる娘核種の一連の流れを「ウラン系列」と呼びます）。その途中で、前述のトリウム・ラジウム・ラドンなどの娘核種を、絶えず生み続けている・供給しているのです。また、その中に、短命な85番アスタチン218も微量ながら生じていることが分かりました。

同様に、「ウラン235」も半減期7億年で徐々に崩壊し、最後は安定な鉛207に至りますが（一連の娘核種を「アクチニウム系列」と呼びます）、その途中で半減期22分の87番フランシウム223が生まれていることが分かりました。

しかし、アスタチンやフランシウムも含め84番から90番までの娘核種は、半減期が短く微量しか生成せず、分析・分離が困難だったため、実際には“地球上に大昔から存在”していたのに、その大半が長く“未発見”となっていたのです。（他に、半減期141億年の長寿なトリウム232を起源とする「トリウム系列（やはり最後は安定な鉛208に至ります）」もあります。）

ただし、“未発見”でも放射性の娘核種は実際に存在し続けていたため、ウラン鉱山の労働者や周辺住民（大半がインディアン（ネイティブアメリカン）・アボリジニーなどの先住民）やキュリー夫妻が、放射線被曝による深刻な被害・死を被ることになります…。

6 原子力で問題の「ウラン」はどうしてあるの？

では、“長寿”といってもやはり寿命のあるウラン238・ウラン235やルビジウム87・カリウム40などの（天然）放射性同位体は、どうして地球上にあるのでしょうか。

実は、前回「4」で述べた「放射性同位体」を利用した太陽系隕石の年代測定などにより、太陽系・地球は約46億年前に誕生したことが解明されていますが、上記のような（天然）放射性同位体は、その長寿ゆえに、地球誕生時から現在まで“減少しつつも消滅せず生き残っている”からなのです。

でも、太陽系・地球が誕生した時点で、どうして上記の“長寿”同位体が、さらに言えば『周期表』記載の様々な元素（安定同位体）が、存在していたのでしょうか。

その理由は、さらに遡って、「私たちの宇宙の歴史」に起因することが解明されています。

約137億年前にこの宇宙が誕生し（ビッグバン）、超高温・超高密度の宇宙が急激に膨張（インフレーション）して冷えてゆく中で、 10^{-5} 秒（10万分の1秒）後には陽子（＝原子番号1番の水素Hの原子核）・中性子・電子などの“物質”が生まれ（陽子・中性子を作る「クオーク」が固まり）、さらに宇宙の膨張が続いて温度・密度が下がる中、1～1000秒で陽子（＝水素）がいくつも衝突し・くっついて（＝核融合して）2番元素「ヘリウム」の原子核（陽子2個・中性子2個）が、数にして水素の1/10程度作られました。ところがその後は宇宙の温度・密度が（膨張を続けて）下がりすぎて、ヘリウムより重い元素を生み出す衝突＝核融合は起きませんでした。宇宙誕生から10万年後にはさらに温度が低下して、それまで激しく自由に飛び回っていた電子（マイナス）が、プラスの原子核に引き付けられ、その外側を回るようになって、この宇宙に「原子」が誕生しました《*宇宙の晴れ上がり》。ですから、宇宙の初期には、元素といえば「水素とヘリウムだけ（+微量のリチウム?）」でした（これなら誰も『周期表』を嫌いにならなかったのでは?）。

《*宇宙の晴れ上がり：電子は光を吸収するため、電子が高密度で自由に飛び交う初期の宇宙では、光は電子と直ぐ衝突するため、遠くまで進むことができませんでした。ところが、電子が原子に取り込まれると、霧が晴れたように、光は初めて宇宙の隅々に自由に進むことが可能となったのです。その光（の名残のマイクロ波＝電波の一種）は、現在でも「宇宙背景輻射」として観測されています。》

その後、宇宙誕生から2億年くらいで、水素とヘリウムが重力によって集合・収縮して（密度にムラができて）「銀河」が形成され、その中で誕生した「初代の星（恒星）」の中で重力によりさらに温度・密度が上がり（ギュウギュウ詰めとなって）、宇宙初期と同様に水素の核融合が生じてヘリウムが作られたほか、その後も重力により高温高密度状態が維持されるため、さらにヘリウム3個から原子番号6番の炭素（陽子6個・中性子6個）や、ヘリウム4個から8番酸素（陽子8個・中性子8個）が作られ、炭素や酸素からマグネシウムが、ケイ素が…とより重い元素が作られてゆき、26番鉄までの“軽い”元素が合成（核融合）されたのです。ただし、この段階でも、『周期表』は4段目の半分＝約1/4しか埋まっておらず、金・銀・プラチナなどはまだ宇宙に存在していませんでした。

次の段階は、核融合の原料（鉄以下の軽い元素）がなくなり、星が燃え尽きて（＝寿命を迎えて）「超新星爆発」した直後で、それまでに作られた様々な原子核や中性子が互いに激しく衝突する中で、鉄以上の“重い”様々な元素が一気に作られ、宇宙空間にばら撒かれました。その結果、『周期表』の約90種の元素が宇宙に揃ったわけですが（『周期表』が複雑なのは、メンデレーエフのせいではありません。また、爆発直後には93番以上の超ウラン元素も生成したはずですが、半減期が短く不安定で、直ぐに消滅。よかった?）。

こうしてばら撒かれた様々な元素が、宇宙空間に漂っていた水素・ヘリウムを寄せ集めて「二代目の星」となり、初代の星と同様の核融合・超新星爆発を繰り返し、元素の合成・ばら撒きを行なったせいで、（おそらく三代目の星と考えられる）太陽や太陽系惑星・地球が形成された時点で、金・銀・プラチナやウラン・トリウムを含む『周期表』に記載されている様々な元素（安定同位体・長寿命放射性同位体）が存在していたのです（ただし、短寿命で、ウランなどの娘核種に属さない43番・61番元素は、やはり不存在）。

このように、(この3回で“おなじみ”となった?)『周期表』は、“地球上に存在する”元素を記載しているだけでなく、実は“この宇宙に存在する”元素をリストアップ(網羅)しているのです(スゴイと思いませんか?)。実際に、太陽や他の恒星の光を観測すると、地球と同じ様々な元素を含んでいることがわかりますし、また、超新星爆発の残渣の光の中に、生まれたての ^{43}Tc の発する光が見つかっているのです。

でも、前回「3」から『周期表』をチェックしていた方は、全ての元素が出揃っていないことにお気づきでしょうか。そう、まだ61番プロメチウムは登場していません。

それが発見されたのは1947年で、また、前回「3」で述べたような加速器などによる人工合成によるものでもありませんでした。さらに驚くべきことに、「過去の地球」には存在していたと考えられるのです。でも、上述のように、地球誕生時に存在していなかったものが、どうして地球の歴史の途中で突然出現するのでしょうか。

<以下、次号へ続く。>

<連載4>「原子力問題のイロハ（基礎）にホヘト（応用）」

7 地球で鉄文明が栄えた“宇宙史的”理由

連載2の「3」で、放射性同位体の不安定な原子核から放射線が飛び出し、一定の半減期で崩壊（壊変）することを説明しましたが、安定同位体と放射性同位体とを分ける「原子核の安定性・不安定性」とはどのようなもののでしょうか。

冬のパチパチ静電気の経験などから、電気のプラスとマイナスは引き付け合い、同じもの同士は反発し合うことをご存知だと思います。だとすれば、原子番号2以上の原子核で、プラスの陽子同士が互いに反発せずにくっついていることは、実に不思議だと思いませんか。その謎を解明したのが湯川秀樹で、陽子と中性子との間に「核力」という「強い力」が作用するおかげで、原子核全体がくっついていられるのです。一般に、原子番号が小さい（＝陽子が少ない）元素の原子核では、陽子と中性子の個数が同数に近いほど安定で、陽子より過剰の中性子は「β崩壊（正確にはβ⁻崩壊）」して陽子となり（実は、陽子からプラスの電気を持った「陽電子」が飛び出して中性子になる「β⁺崩壊」もあります）、個数のバランスを保とうとします。また、原子番号が大きい（＝陽子・中性子の合計数が多い）原子核では、一般に中性子過剰の方が（陽子同士の反発を和らげ）安定しますが、それにも限度があるため、一度に陽子・中性子2個ずつを放出する「α崩壊」したり、「β崩壊」したりして、原子核のバランスを保つのです。そのような“バランスの限界”にある最も大きな原子核が「92番ウラン」なのです。93番以降の超ウラン元素は、原子核のバランスが最初から崩れているため、短寿命です。

原子核の安定バランスは、ちょっとしたキッカケがあれば崩れる可能性があり、ウラン235やプルトニウム239（半減期2万4000年でα崩壊）の場合は、中性子を1個吸収すると原子核が急減に不安定になり、直ぐに2～3個の分裂片に分裂してしまいます（例えば、「ウラン235」＋中性子1個から、「ストロンチウム90」＋「キセノン143」＋中性子3個とか、「モリブデン95」＋「ランタン139」＋中性子2個とか：連載読者なら『質量数の足し算』が成り立つことを検算してみてください）。これが「核分裂」で、生じた分裂片もやはり不安定で、放射性的「核分裂生成物＝死の灰」となります。（なお、プルトニウム242は、中性子吸収なしで、一定時間後に自発的に核分裂します。）

さて、連載3の「6」で鉄までの元素が星の中で作られることを述べましたが、それは「核融合」でエネルギー《*》を放出できるのが、鉄より軽い元素に限られるからです（元素＝安定原子核の「結合の強さ」の図参照：結合が強いほど安定）。例えば、太陽の熱・光の源は、水素がヘリウムになる際に放出されるエネルギーです。また、ヘリウムから炭素・酸素、最終的に鉄までが作られ、その間エネルギーが放出されますが、鉄以上の元素を核融合させるには逆にエネルギーが必要で星は冷えてしまうので、それ以上の核融合は進まず、星は鉄までを作ったところで死（超新星爆発など）を迎えるのです。このように、鉄は星の中での核融合の“最終生産物＝燃えカス”なので、地球にも宇宙にも豊富に存在し、だからこそ人類は長く鉄を利用できているのです。

一方、ウラン235やプルトニウム239などの重い原子核は結合が弱く、中性子を吸収して「核分裂」（結合の強い軽い原子核に変化）する際、大量のエネルギーを放出します。それで、原爆や原子力発電のエネルギー源・燃料として使用されることになったのです。

《*核融合や核分裂でのエネルギー：核融合後のヘリウム1個の質量は、水素4個の合計質量より“ほんの少し”軽くなっています。同様に、ウラン1個の質量より、核分裂後の分裂片の合計質量が“ほんの少し”軽くなっています。アインシュタインは、その「質量の減少分 (m)」が「膨大なエネルギー (E)」に変化することを発見 ($E = m \times c^2$ (イー・イコール・エム・シー自乗)：ここで、cは光が真空中を進む速さ(光速)で、 3×10^8 メートル毎秒 (m/s) という大きな値です)。そのため、核融合や核分裂では膨大なエネルギーが発生するのです。ただし、エネルギーを消費・発散するダイエット運動で体重が減るのとはちょっと違いますので、ご注意ください。》

8 宇宙にも稀な元素が、どうして地球にあるの？

ウラン235に中性子が吸収されると、非常に不安定な原子核(質量数236)ができ、核分裂することが、1938年に発見されました。一方、ウラン238に中性子が吸収されると、質量数239の不安定原子核ができますが、核分裂はせず、β崩壊を2回繰返して、原子番号が2つ上の94番プルトニウム239になることが、1940年に発見されました(この過程を、連載読者なら理解できるのではないのでしょうか：第2回「3」参照)。

しかし、「核分裂の発見」が直ちに原爆開発に結びつかなかったように、核分裂を連続させるには一定の条件が必要なのです。1個の中性子は1回の核分裂を起こし、それで終わりです。ポイントは、核分裂の際に2～3個の中性子が飛び出し(上記「7」の核分裂の式参照)、次の2～3の核分裂を起こし、それで生じた中性子が次のより多くの核分裂を引き起こし…と、ネズミ算式に「連鎖反応」を維持・拡大させる(臨界)ことでした。そのことで大量のエネルギー(破壊力)が生み出されるのです。でも、中性子は勝手に四方八方に飛び出しますから、ターゲット(ウランやプルトニウム)が少量だとぶつからずに散逸して終わりです。そのため、一定の「臨界量」(ウラン235は約10～20kg、プルトニウム239は約5～10kg)が必要で、しかも中性子が外に逃げ出しにくい(表面積が小さい)球や円筒形などの「臨界形状」に加工・配置する必要があります。ちなみに、1999 東海村JCO臨界事故では、18.8%の「中濃縮ウラン溶液」を均一化させる際、「細長い貯塔」を使っていれば臨界にはならなかったものの、寸胴(円筒形)の「沈殿槽」を使用したため臨界事故となったのです。

また、原爆では、外へ逃げる中性子を内部へ戻すため、ベリリウム金属が「反射材」として外側に配置されます。一方、上記JCO事故では、沈殿槽外側の冷却水(軽水)が反射材となり、臨界を長期化させました(そのため決死隊が水抜きして、ようやく臨界が終息)。通常の原因でも、炉心の周りを流れる冷却水が反射材の役目も果たしています。

また、ウランの場合、実際には臨界量の確保も簡単ではありません。これまでも述べたように、自然界にあるウランのうち「核分裂する235」は僅か0.7%でしかなく、「核分裂しない238」が99.3%を占めるため、「天然ウラン」に普通に中性子をぶつけても大半が238に吸収(無駄食い)され、臨界・核爆発には至りません。そのため、原爆には235を93%以上に濃縮した「高濃縮ウラン」が必要ですが、235も238も化学的性質は同じため化学分離はできず、ほんの少しの重さの違いを利用して物理的に分離するしかなく、エネルギーを大量に消費する濃縮工程(ガス拡散や遠心分離など)が必要となります。一方、プルトニウムは、前述のようにウラン238に中性子をぶつければ生じますから、「原子炉」で中性子を照射して「再処理工場」で化学処理してウラン(や死の灰)と分離すれば、94%以上の高純度プルトニウム239が簡単に取り出せます。

このように、原発の心臓部である「原子炉」や、核燃料サイクル施設の「ウラン濃縮工場」「再処理工場」は、「広島型ウラン原爆」「長崎型プルトニウム原爆」の製造に不可欠なものなのです（だからこそ、核兵器製造・核拡散防止の観点から、イランや北朝鮮の原子炉・濃縮工場・再処理工場が国際的に問題視されるのです。でも、日本にも原発は全国各地にあり、さらに大規模な濃縮工場・再処理工場も保有しているのですが…）。

さて、前回からの謎だった61番プロメチウムは、実は、第二次大戦後＝原爆の時代に入った1947年になって、ウランの核分裂生成物の中から初めて発見されたのです（これで『周期表』の空欄は全て埋まりましたが、なんとなく“スッキリ”としないのは、私だけでしょうか）。ここまでプロメチウムが見つからなかったのは、43テクネチウム同様、プロメチウムにも安定同位体はなく、最も半減期の長いプロメチウム145でもたった17.7年のため、超新星爆発などで生まれても短時間で消滅し、私たち人類が目にする機会はなかったのです。ところが、そのような宇宙でも稀なプロメチウムが、原爆後の地球には存在することとなったのです。

では、地球上に存在しないはずの43テクネチウムが、今ではイギリス北西のアイリッシュ海や茨城県沖に“当たり前”のように存在していますが、それはなぜでしょうか。（『鳴り砂』読者・連載読者には、もう答えがお分かりだと思いますが…。）

<以下、次号へ続く。>

<連載5> 「原子力問題のイロハ（基礎）にホヘト（応用）」

9 宇宙の青い宝石「地球」、その実態は…

前回宿題の答え:皆様ご想像のとおり、 ^{235}U が地球に存在している理由は、「原発・原子炉」内の“ウランの核分裂”によりかなりの量が作られ、それがイギリスのセラフィールドや茨城県東海村などの「再処理工場」で恒常的に環境に放出されているため、検出される「 ^{99}Tc 」は半減期が21万年と“宇宙では短命”ですが“人間の寿命・人類の歴史からすれば遥かに長い”からなのです。

いま日本では、老朽原発や再処理工場などの解体が計画され、生じる大量の放射性廃棄物（コンクリートや鉄くず）を“一般ゴミ”と同じように埋め捨てたり、最悪の場合はリサイクル！する計画が進められています。その分類基準（クリアランス・レベル＝すそ切りレベル）の放射能濃度に「 ^{99}Tc 」が記載されていることを、連載読者なら筆者と同じ“驚き”を持って受け止めてもらえるのではないのでしょうか。

ある意味、1発の原爆だけなら最大数kgの核分裂生成物を生み出して終わりですが（それでも広島・長崎などの多数の被爆者を生み出したのですが）、地球という星は、アラモゴード・広島・長崎の3発の原爆後にも（起爆装置として原爆を使用する「水爆（水素の核融合がエネルギー源）」も含め）多数の核実験を繰り返し、また主要核兵器保有国が核実験を停止してからも、大量のウランを核分裂させる「原発」を運転し続け、「再処理工場」を稼働させることによって、ウランからラドンなどの娘核種が絶えず生み出されるように（第3回「5」）、「宇宙でも珍しい」 ^{235}U ・ ^{238}U を含む様々な核分裂生成物・超ウラン元素が“恒常的に”存在する、「宇宙でも珍しい星」になってしまったのです。

宇宙では、自然にウラン ^{235}U が濃縮され臨界形状に集合したり、ウラン ^{238}U からプルトニウム ^{239}Pu が大量生産され単離されることなど考えられませんので、もしも宇宙人が20世紀の地球を観察していたなら、核分裂の連鎖＝臨界現象（原水爆実験や1986チェルノブイリ原発事故でむき出しとなった原子炉）に、非常に驚いたのではないのでしょうか。そして、青く輝く宝石のような星「地球」が、短期間のうちに、目に見えない様々な放射能により“宇宙で最も汚れた星”になったことを非常に悲しむに違いありません。

ところで、プロメチウムが、原爆後だけでなく「過去の地球」にも存在していた（第3回「6」）理由は、まだ述べていません。そのためには、原子炉・原子力発電の仕組みについて、少し詳しい説明が必要です（これが、本連載の趣旨？）。

10 危険で複雑な“湯沸し器”＝原子炉の仕組み

以下、前回「8」を参照しながら、ご理解下さい。

商業用原発（高速増殖炉などは除く）では、臨界量を遥かに超える50～60トンのウラン燃料（直径・高さが1cm程度の円筒形「燃料ペレット」を、4～5mの細長い「燃料棒」のさやに入れて両端を密封し、それを数十～百数十本束ねて四角い柱状にした「燃料集合体」数百体を「原子炉」の中心部（炉心）に円筒形の臨界形状に配置し、核分裂の連鎖反応を起こします。そして、炉心で発生したエネルギー（熱）を「冷却材」を循環

させて取り出し、(さらに熱交換して最終的に)水蒸気を作り出し、それでタービンを回して発電します(火力発電の湯沸し器=ボイラーに相当するものが原子炉です)。冷却材には、ポンプで循環・流量調節ができる液体か気体が使われますが、最も手軽で経済的な冷却材は「普通の水 (H_2O : 軽水)」で、他には「重水素Dを含む水 (D_2O : 重水)」や「炭酸ガス (CO_2 : 二酸化炭素)」も使われます。

「8」で述べたように、核分裂で2~3個の中性子(高速中性子)が飛び出しますが、名前の通りスピードが速すぎて、次のターゲット(ウランやプルトニウム)にぶつかっても吸収されにくい(=核分裂を起こしにくい)ので、連鎖反応を維持するには、遅い中性子(熱中性子)に減速させる必要があります。玉突きやおはじきのように、同じ質量の2物体がぶつかり、それまで動いていた方が止まり、止まっていた方が動き出す現象が見られます(運動量の交換)、それと同じ原理で、高速中性子を同程度の質量の物質(減速材)にぶつければ、効率よく減速できます。具体的な「減速材」としては、中性子と陽子が同じ質量数1だったことを思い出せば(第1回「2」)、「陽子=水素の原子核」にぶつけるのが最も簡単で、しかも水素Hは普通の水(H_2O)にタップリと含まれているため、冷却材と兼用で「軽水」を使用するのが便利です(それが日本で主流の「軽水炉」です)。

また、「液体の水」は H_2O 分子が密に存在するため減速効果が大=核分裂を促進しやすく、「気体の水=水蒸気の泡(ボイド)」では H_2O 分子密度が極めて低いため、減速効果がほとんど0=核分裂が抑制されます(負のボイド効果)。そのため、減速材に「水」を使った場合、核分裂が盛んになると、発生熱が大きくなり水蒸気が多くなって核分裂が抑制され、一方、核分裂が低下すると、温度が下がり泡が減少して核分裂が促進されることから、核分裂の変動を抑える(変化を打ち消そうとする)「負のフィードバック作用」が働きます。

他の減速材としては、同じく冷却材兼用で重水(D_2O)や(重水炉)、比較的軽い炭素C(黒鉛)があります(この場合の冷却材は軽水や炭酸ガスで、前者は「黒鉛減速軽水冷却炉」、後者は「黒鉛減速ガス冷却炉」です)。

ただし、減速材兼冷却材(兼反射材)の「軽水」は経済的ですが、中子を比較的吸収し易いため、臨界を維持するには、ウラン235の濃度を3~5%に高めた「低濃縮ウラン」が必要となります(日本で軽水炉が主流となったのは、アメリカが原子炉を売り込んだ際、核兵器に使い切れない余剰の濃縮ウランの供給を約束したからで、一般には濃縮ウラン製造は技術的にも経済的にも簡単ではありません)。一方、減速材が「重水や黒鉛」の場合、天然ウラン(235が0.7%)がそのまま使用できる利点があります(高純度の重水や黒鉛が核拡散防止上の輸出規制品・戦略物質になっているのは、天然ウランからプルトニウムが生産可能(インドの原爆開発で実証済み)だからです)。

なお、核分裂の連鎖反応を爆発・核暴走しないよう一定に維持したり、原子炉停止時・緊急時に終息させるには、発生する2~3個の中子を1個またはそれ以下に制御する必要があります、そのために中子を吸収しやすい物質(ホウ素やカドミウム、ハフニウムなど)を制御棒・制御材(ブレーキ)として炉心に挿入したりする必要があります。

お疲れ様でした。以上で原子炉のかなり詳しい説明を終えたいと思います。

では、いよいよ、宇宙でも稀な ${}_{61}^{243}\text{Pu}$ プロメチウムが「過去の地球」に存在した謎の解明に入りたいと思います。これには“宇宙人もビックリ”だと思いますが……、残念ながら

ら紙面が尽きましたので、次号に（意図的に引き延ばしているわけではないのですが）。

今回は（も？）説明ばかり多く、多少頭が痛くなったかもしれませんので、十分休養をお取り下さい。ただ、内容を忘れると、次回の楽しみ？が半減しますので、ご注意を。

最後に、頭休めの問題を一つ。宇宙人の子供が“宇宙にある元素探し・『周期表』の空欄埋め”を宿題に出されたら、どうすればいいのでしょうか。そうです、皆様お分かりのとおり、今の地球を観察すれば「100点満点」确实です。

<以下、次号へ続く。>

連載 6（最終） 「原子力問題のイロハ（基礎）にホヘト（応用）」

1 1 ウラン資源の確保はタイムマシンで？

第2回「4」記載のとおり、すべての放射性同位体は、半減期に従って自然に減少・消滅します。では、時計を逆回しにして過去に遡ればどうなるでしょうか。当然、放射性同位体は（半減期に応じて）現在よりも多量に存在していたはずで

第3回「5」記載のとおり、「ウラン238」は半減期が45億年、「ウラン235」は7億年です。すると、現在は組成0.7%の「235」が、時間を遡れば遡るほど量が多かった＝“濃縮されていた”ことが分かります。単純計算（%をグラムと考えると）で、21～23億年前には、「235」は半減期3回分で「2の3乗＝8倍」の5.6g存在していたはずで、一方、「238」は半減期の約半分で「2の1/2乗＝1.4倍（ルート2）」の140.4gでしかありませんから、「235」が「3.8%程度」もあったと推定されます。すなわち、現在の軽水炉で要求される低濃縮度（3%～）の燃料ウランが、16～17億年前より昔は「天然ウラン」として存在していたことになります。その意味するところは、当時の天然ウランが大量（＝臨界量を超え、かつ臨界形状）に堆積した「ウラン鉱床（の周辺や亀裂）」に水・雨が入り込むと、「軽水」の減速作用により、“自然に”核分裂の連鎖反応＝臨界が生じる可能性があった、ということです。

そして、1972年、アフリカ中西部のガボン共和国「オクロ」のウラン鉱床（水を透しやすい砂岩に挟まれていた）で、ウラン235含有量が他の鉱床より著しく低い（～0.44%）という“不思議な現象”が見つかり、その後の調査でウラン235の核分裂生成物が鉱床中に発見されました。それらの証拠から、約17億年前にそのウラン鉱床が、上下の砂岩に雨水が滲みこむ度に、「軽水」を減速材・反射材として、断続的に約50万年間も「天然原子炉」として臨界に達していたことが明らかとなったのです（1956年にその存在を予言したのは黒田和夫）。1942年12月2日に原爆製造目的で“人類史上初めて建造”された米・シカゴの原子炉CP-1は、“地球史上初の原子炉”ではなかったのです。そして、これこそが、61プロメチウムが「過去の地球」に存在したと考えられる理由です。

ただし、当然のことながら、プロメチウムは臨界終息後数百～数千年も経てば自然消滅しますし、同様に、半減期2万4000年のプルトニウム239も、ウラン238から作られたはずですが、臨界終了後1億年も経てば消滅しているため、約17億年後に現れた人類がそれらの元素を目にするには（20世紀まで）なかったのです。

1 2 放射線や死の灰は“危険”ではなかった？

実は、この「オクロの天然原子炉」について、2009.11.11の女川プルサーマルの「対話フォーラム」で推進派・奈良林直氏（北大）が言及していますので、聞き覚えのあった方もいらっしゃると思います。同氏は「（原発の）原子炉の炉心で発生するのと同様の核分裂生成物が岩の割れ目に閉じ込められていました」とか「（オクロの）原子炉が自然の摂理によって自ら出力調整運転を行っていたのです」と述べ、「プルサーマルを行なう女川3号は…非常に安全性の高い原子炉です」と宣伝すると同時に、暗に“高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性”をほのめかしていました。

では、問題です。かなりの難問だと思います（筆者も正確な答えは知りません）。

Q 1：オクロの「天然原子炉」が（50 万年間断続的に）生み出した大量の核分裂生成物＝死の灰は、その当時どれほどの甚大な被害をもたらしたのでしょうか。

Q 2：さらに時代を遡ると（46 億年前の地球誕生直後など）、ウラン 235 の濃度はもっと高かったはずですが（235 は 64 倍・238 は 2 倍なので、約 18%）、どうしてオクロ以外に「天然原子炉」は見つかっていないのでしょうか。

Q 1 の答え（と筆者が考えるもの）：オクロの原子炉が稼動した 17 億年前の地球は、生命が爆発的に発生したとされる古生代カンブリア紀（5 億 4000 万～5 億年前）より遙か以前の、先カンブリア時代の原生代前期（25～16 億年前）で、存在していた生命は単細胞の原核生物（細菌や藍藻）やせいぜい単細胞の真核生物（褐藻、紅藻、緑藻）だけで、多細胞生物や動物はまだ誕生していませんでした。そして、光合成で酸素を放出する藍藻（シアノバクテリア）が、地球環境（海洋や大気）を、誕生直後からの二酸化炭素などが多い還元的な状態《*》から、現在のように酸素の多い酸化状態に少しずつ変え始めたばかりの段階で、現在は陸上生物を保護してくれている大気中の酸素から作られる「オゾン層」もなく、太陽からの有害な紫外線がそのまま大陸地表・海洋表面に降り注ぎ、原始的な単細胞生物が海洋中で生命活動を行なっていただけです。

ですから、大陸の浅い地下（地表付近）で大量の核分裂生成物＝死の灰が生み出され、岩の隙間から気体や水溶性の死の灰が漏れ出て放射能汚染しても、そもそも周辺に生命は存在していなかったため、「誰も被害を受けなかった」はずですが、だからといって、オクロ炉が“安全”だった、ということとはできないと思います。また、断続的臨界の際の温度変化による岩石の膨張・収縮を考えれば、ウラン鉱床に亀裂が全く生じなかったと考えるのは不自然で、希ガスを含めた「核分裂生成物が岩の割れ目に閉じ込められていました」と断言することはできないと思います（鉱床をくまなく観察して、亀裂が一切無いことを実際に確認したのなら、話は別ですが）。そして、仮にオクロでは核分裂生成物（の大半）がウラン鉱床中に長く閉じ込められていたとしても、オクロ周辺には地震や火山が全くなく（『理科年表』より）、世界有数の地震国・火山国である日本の「高レベル放射性廃棄物の地層処分候補地」と地学的条件・地層の安定性が全く異なることは明らかで、オクロ鉱床を地層処分の安全性の証拠にすることは不適切です。

《*：地球誕生時には現在のような酸素大気は存在せず、むしろ原初の生命体にとって酸素は“有毒ガス”でしかありませんでした。そのような還元的・嫌気的環境で生命が誕生したと考えられることから、酸素大気が無くても、かつて（または現在も？）液体の水が存在したと考えられる火星には、生命が誕生していた可能性があるわけです。追伸・本稿作成中の 2010. 10. 1 朝日の記事では、太陽系外で初めて、大気や液体の水が存在する可能性のある惑星が 20 光年離れた恒星の周囲に発見された、とのこと。》

Q 2 の答え（と筆者が考えるもの）：「地球が広くて、まだ見つけられないだけ…」、ではおそらくありません。その理由は、ウラン鉱床は地球誕生時から存在したものではないからです（宇宙でも自然には存在しないように）。「鉄文明」を長期間支えている鉄鉱床は、上記のシアノバクテリアによる酸素生産により地球が酸化になり始めた 35～19 億年前まで（ピークは 25 億年前頃）に形成されましたが、ウラン鉱床も 30～20 数億年前に形成されたものと考えられています。それは、海底から湧き出す地下マグマから

の熱水（鉱床）や地殻を構成する岩石中に含まれていた鉄やウランが、還元的環境の海水中には大量に溶けていられたものの、海水中で増えつつあった酸素により酸化されると溶けていられなくなり、大量に沈殿・堆積した（大規模な鉱床となった）と考えられているからです（その意味で“生命のおかげ”で作られたウラン鉱床が、人類によって“生命を脅かすもの”に変えられたのは、何かやりきれない思いがします）。

そして、その後ウラン鉱床を含む堆積部分が25億年前とか19億年前の巨大大陸形成の際に地上に現われ、数億年かけて水が徐々に抜けることにより（黒田の推論）ウランが密になる一方、水に吸収される中性子が減少（＝核分裂させる中性子が増加）し、中性子を吸収する不純物元素も少なく、“偶然”上下に堆積した砂岩層に浸透した水の量・配置が“偶然”中性子の減速・反射に最適な状態となって、地球初（宇宙初？）で一回きりの「オクロ天然原子炉」が出現したのだと思います。

このように、オクロ炉は、ウラン量は十分だったでしょうが、鉱床中の（中性子を吸収する）水分や不純物の量や分布、鉱床の微妙な形、砂岩中の水の量・配置などにより、“偶然に臨界条件が満たされた（だから断続的に臨界・終息を繰り返した＝出力調整された）”のです。一方、原発の原子炉は、最初から臨界条件が完全に整えられ、制御棒で中性子を吸収することで“臨界条件を崩している（核暴走を抑え込んでいる・出力調整している）”ものですので、奈良林氏が混同している「臨界状態の出現し易さ＝安全性」がオクロ炉と軽水炉とで全く違うことは、連載読者なら十分にお分かりだと思います。

以上で、『元素の周期表』の“見直し”から始めた今回の連載を終えたいと思います。

中には不正確な記述もあったかもしれませんが、それは参考文献のせいではなく、「原子力の専門家」でもない筆者の理解不足・誤解に起因するものですので、お許し下さい。

なお、原子力に関する話題は、今回の連載では詳しく取上げなかった、放射線の危険性、プルサーマル問題、高速増殖炉や核燃料サイクルの仕組み・危険性、地震問題、エネルギー問題等々、まだまだ沢山残っています。それらの各テーマについて、他の方が書いて下さるかもしれませんし、機会やリクエストがあれば筆者がまた…。

ということで、本連載のご了読ありがとうございました。