

# 原子力発電の問題点：そもそも原子力とは何か

天竺 堯義\*

はるにれ会 \*tamano@384.jp

2026 年 9 月 27 日

## 1 はじめに

これまでに、何回か話をしてきましたが、今回は、原子力発電の短期的長期的な問題点について、科学的観点から考察します。問題を理解するためにあった方が良い基礎知識として、原子力とは何かを、解説します。原子力発電とか原子爆弾と聞くと、これらは、何か、原子が関わっている現象を利用しているものというのは容易に想像できます。また、しばしば、核反応とか核エネルギーという言葉聞きます。しかし、普通日常的に核とは何か、議論されることはほぼありません。まず、原子そして核の話から始めましょう。

## 2 原子・原子核とは

原子の概念に人類が初めて到達したのは古代ギリシャ時代（日本では弥生時代と言われている時代）のことでした。ギリシャの哲学者デモクリトス (Democritus c.460-c.370 BC) が物質の最小単位として原子というものがあるに違いないと考えました。我々の周りにある物質を細かく細かく砕いていくと、もうそれ以上細かくはできないものに到達すると考えました。それを原子と名づけました。しかし、この考えは近代の実証に基づいた理論ではありませんでした。むしろ哲学的推論の域を出ていませんでした。

今は、原子とは何か明確に科学的に理解されています。一番簡単な原子は水素原子です。H と書きます。水素原子の中心には原子核があり、その周りを一個の電子 (electron) が回っています。水素の原子核は陽子 (proton) という粒子です。陽子は正の電荷を持っています。電子は負の電荷を持っていて水素原子全体は電氣的に中性です。陽子と電子の電荷の大きさは全く同じで、符号が違うだけです。陽子の質量は電子の質量の約 2000 倍

です。原子の質量は大部分原子核が担っています。我々の体重の大部分は原子核の重さです。60 kg の体重のうち電子は約30 g くらいにしかありません。

原子の大きさは大体  $1 \text{ \AA}$  くらいです。 $1 \text{ \AA}$  (1 オングストロームと言います) という長さは  $1 \times 10^{-8} \text{ cm}$  です。書き直すと  $0.00000001 \text{ cm}$  です。原子の中心にある原子核はさらに小さく、僅か  $1 \times 10^{-13} \text{ cm}$  程度です。 $0.00000000000001 \text{ cm}$  です。原子の大きさの10万分の1程度です。原子核を直径1cmのパチンコ玉とすると、原子の大きさは1kmにもなります。 $1 \times 10^{-13} \text{ cm}$  という長さは1 yukawa と呼ばれることもあります。核力の解明に大きな貢献があり、1949年にノーベル物理学賞をもらった湯川秀樹(1907-1981)にちなんでつけられた長さの単位です。

### 3 水素原子とその同位体

1931年にアメリカの化学者ユーレイ(H. Urey, 1893 - 1981)とその共同研究者によって水素原子核の約2倍の質量をもつ粒子が発見されました。化学的性質は水素と同じなので、この粒子は重水素と名付けられました。しかし、水素原子核の約2倍の質量をもつ重水素の原子核はどんなものかは全くわかりませんでした。ところが、その翌年、1932年にイギリスの物理学者、チャドウィック(J. Chadwick, 1891 - 1974)が実験的に陽子とほぼ同じ質量を持ち電氣的には中性の粒子を発見しました。この粒子は中性子(neutron)と名付けられました。それで、ユーレイが発見した重水素原子核は陽子1個と中性子1個が結合したものであることがわかりました。水素にはもう一つ三重水素というのがあります。三重水素はトリチウム(tritium)とも呼ばれます。三重水素の原子核は陽子1個と中性子2個からできています。陽子の数が同じで中性子の数が異なる原子核を同位体あるいは同位元素と呼びます。重水素、三重水素は普通の水素(軽水素と呼ばれることもあります)の同位体です。

### 4 同位元素

原子核中の陽子の数は同じで中性子の数が違うものを同位体と言います。ほとんどすべての元素は同位体を持ちます。例外はフッ素です。原子核中の陽子の数を原子番号と言います。陽子の数と中性子の数を足した数を質量数と言います。原子核を表すのに、質量数と原子番号を用いて、(軽)水素ならば、 ${}^1_1\text{H}$  と書きます。左肩上の数字が質量数で下の番号が原子番号です。重水素原子核ならば、 ${}^2_1\text{H}$  と書き表します(Dと書き表されることがあります)。三重水素(トリチウム)は ${}^3_1\text{H}$  です(Tと書き表されます)。重水素も三重水

素も電子の数は一つで電子の状態は同じです。化学的には、重水素も三重水素も普通の水素（軽水素）と同じように振る舞います。

## 5 放射性同位元素

原子核はすべてが安定ではありません。ある種の原子核は自然に崩壊します。崩壊の速さは千差万別で、一秒以内のものもあれば数10億年というものもあります。このような原子核は放射性同位体（ラジオアイソトープ）と呼ばれます。あるものは自然に存在し、あるものは原子核反応によって人工的に作られたものです。自然由来の放射性同位体を表1にまとめておきます。実験室や原子炉で人工的に作られる放射性同位体は、例を挙げると、 ${}^3_1\text{H}$ （トリチウム）、 ${}^{85}_{36}\text{Kr}$ （クリプトン-85）、 ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ （ストロンチウム-90）、 ${}^{131}_{53}\text{I}$ （ヨウ素-131）、 ${}^{133}_{54}\text{Xe}$ （キセノン-133）、 ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ （セシウム-137）などです。

表 1.  
自然由来の放射性原子核

|                                    |                                     |                                     |                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ${}^3_1\text{H}$ （トリチウム）           | ${}^{14}_6\text{C}$ （炭素-14）         | ${}^{40}_{19}\text{K}$ （カリウム-40）    | ${}^{87}_{37}\text{Rb}$ （ルビジウム-87）  |
| ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ （ラドン-222） | ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ （ラジウム-226） | ${}^{235}_{92}\text{U}$ （ウラニウム-235） | ${}^{238}_{92}\text{U}$ （ウラニウム-238） |

## 6 トリチウム

トリチウムは福島原発の溶け落ちた放射性燃料の冷却水中に含まれ、その海洋放出で問題になっている放射性原子核です。自然由来のトリチウムは極めて僅かで、大部分がすでに述べたように原子力発電から出る避けられない副産物です。トリチウムは放射性で原子核中の中性子が陽子と電子になって、その電子は外に放出されます。その結果、原子核は陽子が一つ増えて中性子が一つ減ります。この新しい原子核はヘリウム-3の原子核です。



この式は、トリチウム（ ${}^3_1\text{H}$ ）の原子核中の中性子1個が陽子に変換し、余った電子（ $e^-$ ）とニュートリノ（ $\nu_e^-$ ）という素粒子を放出してヘリウム-3（ ${}^3_2\text{He}$ ）になることを表しています。電子を放出する放射壊変を $\beta$ （ベータ）崩壊と言います。いわゆる放射能と呼ばれるものは3種類あり、 $\alpha$ （アルファ）線、 $\beta$ （ベータ）線、 $\gamma$ （ガンマ）線の放出能力のこと

を指します。 $\alpha$  線はヘリウム-4 の原子核です。 $\beta$  線は電子です。 $\alpha$  線は紙一枚で遮ることができ、 $\beta$  線は紙は透過しますが、アルミ箔やプラスチックのシートで遮蔽でき、外部被曝の危険性は大きくはありません。しかし、大量に内部被曝した場合は有害です。紫外線の浴びすぎは体に良く無いことは実感として知っています。X 線は紫外線よりも波長の短い（エネルギーの大きい）電磁波です。医療用として広く使われていますが、人体への照射量は厳しく制限されています。 $\gamma$  線は X 線よりも更に波長の短い（エネルギーの大きい）電磁波です。人体が晒されると、遺伝子に異常をきたすどころか、細胞をも破壊し、死に至ります。トリチウムは  $\beta$ （ベータ）崩壊し、放出された原発の処理水は、ガブガブと飲まなければ、問題ありません。問題は、それ以外の長寿命放射核が本当に無害のレベルまで除去されているかということです。一度できてしまった長寿命放射核はどんな処理をしても場所と形態が変わるだけで、なくなりません。

## 7 半減期

ある物質の量、ここでは放射能、がある規則に従って時間と共に減っていきますが、元の量の半分になる時間のことを半減期と言います。自然界に多くみられる現象です。トリチウムの放射能の半減期は約 12.3 年です。12.3 年経つと最初の量の半分になります。更に、12.3 年経つと全部無くなると思うのは間違いです。1/4 になります。減衰の様子をグ

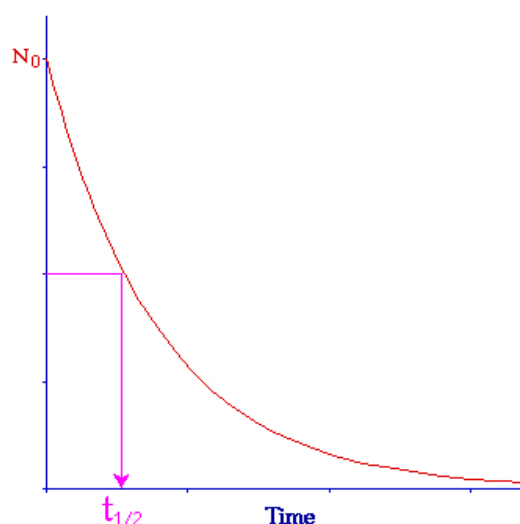


図 1 放射能の減衰。最初の濃度  $N_0$  が半分になるまでに要する時間が  $t_{1/2}$  でこれを半減期と言います。

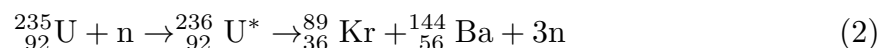
ラフにすると、図1のようになります。このような減衰を指数関数的減衰と言います。このような振る舞いをする自然現象は多く見られます。例えば、熱いお湯が室温にまで冷える時の温度変化も指数関数的減少の一例です。体内に取り込まれたトリチウムも指数関数的に減少し、その半減期は約10日です。水として排泄されるためです。

## 8 ウラン

ウラン（正式にはウラニウム Uranium）は地球上には、三つの同位体が存在しています。ウラン-234、ウラン-235、ウラン-238です。これらは、いずれも陽子92個を持っていますが、中性子の数が違います。地球上での存在度は、ウラン-234 (0.0054 %)、-235(0.71%)、-238(99.28%)です。いずれも放射性原子核で、半減期は、それぞれ、 $2.48 \times 10^5$  年（24万8000年）、 $7.13 \times 10^8$  年（7億1300万年）、 $4.51 \times 10^9$  年（45億1000万年）です。これらの原子核はすべて、太陽系ができて地球が誕生した時に、それ以前にあって死んでしまった星の塵から取り込まれたものです。ウラン-238の半減期はほぼ地球の年齢くらいですから、地球誕生の時は現在の存在量の倍くらいはあったことになります。

## 9 核分裂反応の発見

1938年に核分裂という現象がハーン(O. Hahn, 1879 - 1968)とマイトナー(L. Meitner, 1878 - 1968)によって発見されました。ウラン-235に中性子を衝突させると、ウラン-236になりこれは直ちに質量の小さい原子核に分裂することを見つけたのです。分裂の仕方は多様ですが、一例を挙げると、



です。ここで、nは中性子です。ウラン-235に中性子を照射すると、一時的に、ウラン-236ができます。これは不安定で、直ちに、分裂します。多種多様な分裂の仕方がありますが、この例では、クリプトン-89とバリウム-144が生成します。ここで注目すべきは、中性子が3個放出されることです。つまり、中性子の数が増幅することです。この反応の模式図みたいなものを図2に示します。

この発見を知って物理学者は直ちにこれが大きなエネルギー源になることを理解しました。出発点のウラン-235の質量と、核分裂した後の原子核の質量を比べると、分裂後の物質の質量が減っていることがわかります。アインシュタイン(1879-1955)の特殊相対論

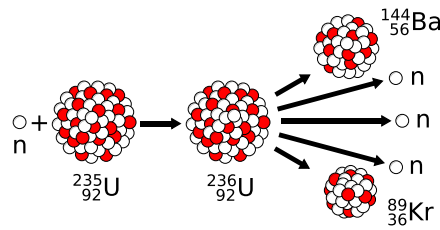


図2 ウラン-235 の核分裂反応の模式図

によれば、質量とエネルギーは同等で、変換できることを意味しています。有名な数式

$$E = mc^2 \quad (3)$$

がそのことを示しています。ここで、 $E$  はエネルギー、 $m$  は質量、 $c$  は光の速さ ( $c = 299792458\text{m/s}$ ) です。核反応の後で質量が減っている分だけエネルギーに変換しているということを意味しています。

もし、1g の物質が完全にエネルギーに変換したとすると、そのエネルギーは  $8.99 \times 10^{13}\text{Joules}$  になります。Joules (ジュールと言います) はエネルギーの単位で我々が日常使っているワット (Watt) という単位と密接に関係があります。ワットというのは、電力の単位で単位時間 (例えば、1 秒) に消費するエネルギーです。数式で書くと、わかりやすくなります。

$$J/s = W, \quad J = Ws \quad (4)$$

この式で、 $J$  はエネルギー、 $s$  は時間、 $W$  は電力 (ワット) です。1ワットの電力を1秒間使ったときのエネルギーが1ジュールです。1kW のトースターを使って1分間パンを焼いた時の消費エネルギーは  $1000W \times 60s = 60000J$  ジュールになります。電力会社からのお知らせで、月毎の電力使用量は「キロワット時」(kWh) という単位で測られています。例えば、100 キロワット時ならば、 $100 \times 1000 \times 60 \times 60 = 360000000 = 3.60 \times 10^8$  ジュールになります。年間では、 $12 \times 100\text{kWh} = 12 \times 3.60 \times 10^8 = 4.32 \times 10^9$  ジュールになります。先ほどの、1 g の質量の等価エネルギー、 $8.99 \times 10^{13}$  ジュール  $\sim 1 \times 10^{14}$  ジュール、というのはどれくらいのエネルギーになるのでしょうか。一軒当たりの年間電力消費量で割り算をすると、 $2.08 \times 10^4$  ですから約 20000 戸の家庭の1年間の電力を賄うことができます。原子力というのは、事ほど左様に莫大なエネルギーを生み出します。

## 10 原子力発電

ウラン-235 に中性子を衝突させると、ウラン-236 になります。ウラン-236 は不安定で、直ちに分裂してより小さい原子核になります。その時重要なことは、最初に入射した中性子よりも多くの中性子が放出されるということです。したがって、放出された中性子が更にウラン-235 と反応してねずみ算式に原子核反応が持続します。この現象を連鎖反応と言います。自然にあるウランは大部分ウラン-238 ですから、最初の反応で出た中性子は大部分がウラン-238 に衝突して反応が止まってしまいます。そのため、原子力発電として実用になるためには、ウラン-235 を 3% ~5% に濃縮する必要があります。原子爆弾にするためには、85~90% に濃縮する必要があります。イスラエルやアメリカがイランのウラン濃縮に目くじらをたてているのは、原発用途として必要な濃縮度以上に濃縮している可能性があるからです。日本の原発用のウランはほとんど全て輸入で、オーストラリア、カナダからの輸入です。

## 11 放射性廃棄物

ウラン-235 に中性子を当てると、約 85% の確率で核分裂反応が起こり、残りの約 15% の確率で中性子を取り込む反応が起こります。核分裂反応から生じる放射性原子核は多岐にわたりますが、ある規則性があります。質量数 235 のウランが分裂すると、質量数 90 くらいの原子核と質量数 140 くらいの原子核に分裂する確率が大きくなります。ここで注意していただきたいことは、いろんな種類の放射性原子核が原発から生成するということです。目先の数百年間の「強烈な放射線と危険度」で言えば、セシウム-137 とストロンチウム-90 が突出しています。超長期（数百年から数万年以上）の放射性原子核が中性子捕獲反応で生じます。数万年以上にわたって「人類の環境に関わる潜在的な毒性」で言えば、約 15% の確率で起こる中性子取り込み反応で生じるアメリシウム-241 やプルトニウム-239 などのアルファ線を出す重い原子核が最も有害とされています。ウラン-235 の核反応は極めて「汚い」反応です。自然にほっておけば無害であるウラン-235 をかき集めて、中性子を衝突させて、核分裂を引き起こし、非常に有毒な放射性原子核をウラン 1 個に対してほぼ 2 倍生み出します。しかも、それらは処理の仕様がなない代物です。

原発は核爆弾（原子爆弾および水素爆弾）とは違います。原発は爆発することはありませんが、何か事故があれば、多量の放射性物質を大気中、更には、土壤に撒き散らします。福島第一原発の事故処理はほとんど進展していません。現存している原子力発電所の諸問

題は誰にでもわかる短期的な問題です。福島原発事故は、直接的には津波による浸水の結果、電源を失ったことにより引き起こされました。しかし、予測されていたにもかかわらず、十分な対応を怠っていたという人災の面は否定できません。溶け落ちた放射性物質をいつ回収できるかは全然目処がついていません。百年以上かかるでしょう。ここで強調したいことは、福島の溶け落ちた燃料はもとよりのこと、通常運転の原子炉からの燃え滓の処理はほとんど不可能です。これは中長期的問題です。

燃え滓は単なる灰ではありません。高放射性物質を高濃度で含んでいます。英語で“spent fuel”と言いますが、日本語訳は「使用済み燃料」です。より正確には、「使用済み核燃料」です。意図的か意図的で無いかは分かりませんが、しばしば、「核」が抜けています。発電には使えなくなっていますが、依然として放射性原子核が大量に残っていて、核分裂反応は進行中という代物です。高熱を発生するので、水の巨大なプールの中で保管します。短寿命の放射性原子核濃度が「十分」減少するまで、数年間冷却プールで冷やしてから、金属容器に移し替えられて、原発敷地内、あるいは、青森県六ヶ所村の貯蔵施設で保管されます。その後、恒久的な保管場所に移されて、高放射性残渣の放射能が無害になるレベルに到達するまで6万年、あるいはそれ以上閉じ込めておく必要があります。原子核の半減期は変えることはできません。物理法則です。

## 12 終わりに

約6万年前この地球はどうなっていたのでしょうか。北海道は当時大陸と陸続きだったと考えられています。我々の祖先（現人類）がようやくこの地球上に現れてきた頃で、まだネアンデルタール人と共存していました。6万年後には人類は絶滅している可能性もあります。それまでどうやって核の塵を安全に保管できるのでしょうか。小泉純一郎元首相は2013年8月にフィンランドを訪れ、オルキルオト島にある世界初の使用済み核燃料の地下処分場「オンカロ（ONKALO）」を視察しました。「排泄物（核のゴミ）をどう処理するか決まっていなのに原発を動かしている」と指摘。日本国内に最終処分場がない現状では「処分場のめどをつけるのは楽観的で無責任」と語り、脱原発・即時原発ゼロを強く主張する契機となりました。小泉純一郎元総理は核のゴミをこれ以上出してはいけないことを明確に認識した数少ない政治家です。原発は直ちに全廃しなければなりません。これは科学的な根拠のある結論で政治的経済的考慮の入る余地はありません。これくらいのことは、国の政策決定に関与している政治家や官僚に知っておいて欲しいことです。目先にぶら下がっている人参に食らいついてはいけません。