

福島第一原子力発電所からのトリチウム水放出

古屋 信明 (2023年11月)

1. はじめに

私は防衛大学校勤務時代、福島事故以前に日本の電力の 1/3 を供給していた原子力発電の仕組みや放射線、その健康影響などの知識が防大生には必要だと考え、独学によるものであったが、ある教養科目で2コマの講義をしていた。拙稿タイトルの出来事ゆえに、独学の一端を千葉高同期会の皆さまにお話してみたい。

2. トリチウム(三重水素)

2.1 原子、原子核および同位体

私たちの体を含めて身近な生物・無生物、さらには地球や太陽系の諸天体、太陽系外の星々までみな「原子」でできている。自然界に存在する原子は「原子番号」1の水素から始まり、2のヘリウム、3のリチウム、・・・と昇順でその構造を複雑にしてゆき、最後は92のウランに至る。途中の重要で身近な原子としては、例えば原子番号6の炭素、8の酸素、26の鉄などがある。

物理的・化学的性質を抽象して考察する場合には、「元素」と呼ぶ。一番大きな元素はウランだと述べたが、人工的にはもっと大きな「超ウラン元素」が合成されていて、例えば原子番号94のプルトニウム(主な用途は核兵器、副次的には原子力発電)、113のニホニウムなどがある。ニホニウムは日本の研究者が発見(というより創り出した)・命名した、22年現在で元素周期表に記載されている最大・最新の元素である。

図1(『化学の小事典』、岩波書店)はヘリウム4原子(4は原子量~後述)のイメージを示す。中心には、プラス1の電荷を持つ「陽子」2個と、電荷ゼロの「中性子」2個から成る「原子核」があり、その周囲をマイナス1の電荷を持つ「電子」が2個飛び回っている。本当の原子の直径は 10^{-10} m程度であり、原子核はさらにその 10^{-5} 程度であるから、この図の核は非常に大きく描かれている。原子1個を東京ドームの大きさに拡大したとすれば、原子核はピッチャーズマウンドの砂粒1つでしかない。

原子番号とは実は核内に存在する陽子の数であり、これが元素の化学的特性を決める。何故なら、原子は

電氣的に中性であるから、陽子数に等しい数の電子が核外を回っていることになり、その電子の軌道や近傍他原子との電子のやり取りが、化学的性質や反応を支配するからである。

今回の話題の中心である(普通の)水素の原子核は、陽子1個のみで形成されていて中性子は無しなのだが、他の原子核は全て中性子を持っている。その一般性を表現するために、ここではヘリウム原子の図を引用した。太陽は水素原子4個を核融合させてヘリウム原子1個を作り、その時に質量が減る。その質量減 Δm で発生するエネルギー $E(E = \Delta m \times C^2, C$ は光速で毎秒30万km)で我々を温め続けてくれている。

狭い原子核の中にたくさんの陽子が密集していて、そのプラス電荷で互いに反発し合うから、原子核は分裂しがっているはずである。それを防ぐのが中性子の大切な役目である。

原子核内に存在する陽子と中性子の数の和を、「原子量」という。両者の質量がほぼ等しいために、単純に足し合わせることができる。原子量は、水素=1、ヘリウム=4、リチウム=7、・・・炭素=12、酸素=16、鉄=56、ウラン=238と、飛び飛びに増えていく。核内の陽子数が増える(原子番号が大きくなる)と相互の反発力が強くなるので、それを抑えるためにより多くの中性子が必要になるからである。原子量と原子番号の差が、核内に存在する中性子の数ということになる。

しかし同一元素であっても、中性子数が異なる原子が多数あって、これらを「同位体」と呼ぶ。約110の元素に対して、原子核別(これを核種と呼ぶ)に数えると3300に達する。原子番号が大きな原子ほど、多数の同位体を持つ傾向にある。中性子は電氣的に中性である

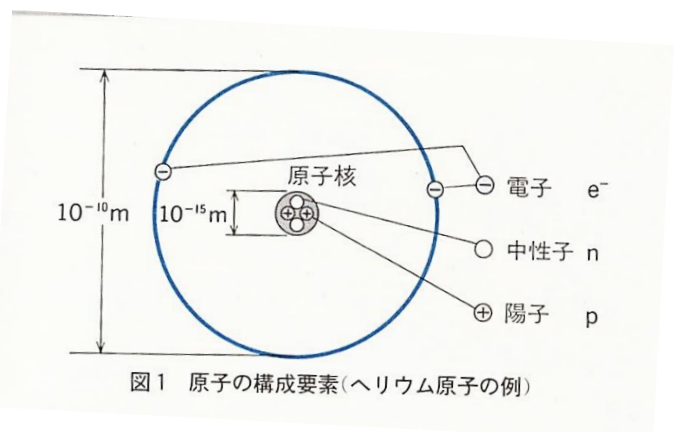


図1 原子の構成要素(ヘリウム原子の例)

から、プラス電荷を持つ原子核に近づいても反発力を受けることがなく、容易に核の中に入り込むことが可能なので、このように多くの同位体が形成されるのである。

水素の同位体には、普通の水素(原子核は陽子1個のみ)、重水素(核は陽子1個+中性子1個)、三重水素(陽子1個+中性子2個)の3種類がある。水素の元素記号は「H」(hydrogen)であるが、原子量の区別が必要な場合には、元素記号の左肩に記すことになっているため、上記の順に「 ^1H 」、「 ^2H 」、「 ^3H 」ということになる。

同位体区別で最も有名なのは、燃えるウラン235と燃えないウラン238であろう。燃えるとは核分裂反応を起こしやすい、という例えである。ウラン238は燃えないが、原子炉内で中性子を吸収した後にベータ崩壊(2.2で述べる)して、プルトニウム239に変わる。これは核分裂をするから、原子力発電量の約1/3は実は炉内で生成されたプルトニウムの寄与である。

2.2 原子核から放出される放射線

3300もある核種の多くは、陽子数と中性子数のバランスが悪い。陽子か中性子が過剰気味あるいは不足気味であって不安定であり、エネルギーを捨てて安定核に変わらなければならない。この時に捨てられるエネルギーこそが「放射線」である。3300のうち、放射線を出さない(つまり放射能がない)安定核は約270しかない。放射線を出すとは別な元素に変わるから、「放射性崩壊(壊変とも)をする」という。

19世紀の終わり頃(マリイ・キュリー夫人の時代)、原子から出る得体の知れないエネルギーが発見され、発見の順にアルファ線、ベータ線、ガンマ線と名付けられた。これらを解明の手掛かりにして、2.1で述べたような原子の構造が人類に見えてきたのである。

① アルファ線: プラスの電荷を持ち、割合に重い粒子線であって、ヘリウム4の原子核であるとわかった。陽子過剰気味の原子核が、プラス電荷を捨てるために放出する。放出すると原子番号が2、原子量が4減るから、別な元素になってしまう(アルファ崩壊という)。

② ベータ線: マイナスの電荷を持つ、非常に軽い粒子線。電子が高速で飛び出してくるものとわかったが、これは核外を周回していた電子ではなく、核内の中性

子が陽子1個と電子1個に分解すること(ベータ崩壊という)によって生じた電子である。ゆえに中性子過剰気味の原子核から発せられることになる。ベータ崩壊の結果、核内に陽子1個が増えるから原子番号が1つ大きな元素に変わることになるが、飛び出した電子は非常に軽いために原子量の変化はない。

③ ガンマ線: エネルギーが高い(波長が短い)電磁波。アルファ崩壊やベータ崩壊をした後に、まだ核に残っているエネルギーの清算のような形で出る。原子番号、原子量の変化はない。

2.3 トリチウムの生成

^1H (普通の水素)は、飛んできた中性子1個を何かのはずみで取り込んで、 ^2H を作る。 ^1H の原子量は1なのに対して ^2H は2であり、物性が異なるためにデュートリウム(重水素)という名前を与えられている。 ^1H の自然界における存在比は99.985%、 ^2H は0.015%である。つまり我々は、微量ながら毎日に重水(重水素による水: $^2\text{H}_2\text{O}$)を飲んでいることになるが、 ^2H は安定核であるため放射線を出すことはない。

現在の多くの原子炉では、ウランの核分裂反応によって発生した熱を炉外に取り出して利用するための冷却材として、また核分裂で飛び出してくる中性子の速度を下げて連鎖反応を維持するための減速材として、水を用いている。ほとんどの原子炉では普通の水($^1\text{H}_2\text{O}$)を使用しているが、重水を使っている炉もある。前者を「軽水炉」、後者を「重水炉」と呼ぶ。日本の全ての発電用炉と、米海軍の原子力推進艦(空母と潜水艦)も軽水炉を用いている。

軽水炉では、核分裂時に発生する中性子の一部が水を構成している陽子に捕獲されてしまうため(その結果、重水素ができる)、0.7%のウラン235と99.3%のウラン238の混合物である天然ウランのままでは連鎖反応が継続しない。そこで、前者の濃度を3~4%程度(発電用炉の場合)に高めた低濃縮ウランを使用する。

さて、ウラン235原子核1個の核分裂で平均2.5個の中性子が放出されて炉内を飛び交うため、重水素が中性子をもう1個吸収して三重水素 ^3H (トリチウム)を作ることがある。つまりトリチウムは、福島事故ゆえに発生

した特殊な核種なのではなく、水を原子炉の冷却材および減速材として使用する以上、必ず生成されるのである。トリチウムは、普通の水素(H)と同様に酸素1個と結合して水分子(H_2O)を作る。

2.4 トリチウムから放出されるベータ線

トリチウムは、2.2で述べた不安定核の中では中性子過多グループに属しているから、ベータ線を出す。このことが、世を賑わせている福島第一原子力発電所からの処理水放出の議論の出発点である。しかし同期会ホームページに、古山明夫さんが寄稿し説明されていたとおり、トリチウムから出るベータ線は極めて弱いし、トリチウム水は生物の中で濃縮もしないから、危険性は極めて低い。少し昔までトリチウムは、夜光材料として時計文字盤や計器盤に用いられていたぐらいである(今は禁止)。ベータ線が蛍光材料を叩くから、暗闇の中でくっきりと光るのである。

さらに、トリチウムの放射能は半減期12.4年で減衰していくから、放出を待つ福島第一の貯蔵タンクの中でも、トリチウムの放射能は減っていく。半減期とは、放射線を放出済みの核の数が増えていき、放射能を残している核の数が最初の半分に減るまでの時間である。

2.5 トリチウム水の海洋への放出

トリチウムでできた水(T_2O)は、普通の水(H_2O)とほぼ同じだから、濾過などによって取り除くことは不可能である。そこで多量の海水で薄めて、ゆっくり放出するというのが国際標準である。放出後にはさらに膨大な海水に拡散されていくのだから、深刻な環境問題を国内外に引き起こすとはとても考えられず、問題が起きたこともない。だから、原子力発電所からのトリチウム水放出は、どこの国でも行われている。

読売新聞特集記事(23.8.25)によれば、液体の形でのトリチウム年間処分量は、韓国の古里原発49兆ベクレル、中国の陽江原発112、英国のセラフィールド再処理施設186、カナダのダーリントン原発190、フランスのラ・アーク再処理施設の1京ベクレルに対して、福島第1は22兆ベクレル未満の予定である。ここで「ベクレル」とは、1秒間に1個の放射線を出す能力を示す単位

である。また、「京」とは1兆の1万倍である。

今回の福島第一からの放出に関しても、その計画は国際原子力機関(IAEA)の審査を受けているし、定期的な協力を得つつ調査・監視を続けることになっている。福島では、放出口周辺の3km圏内で集中的に(もっと広域は測点を減らす)海水を採取し、ベータ線を測定しているが、計測限界の10ベクレル以下という結果がほとんどであった。

23年10月下旬の第2回放出には、根拠のない反対を執拗に続け(放出に反対する国は他にほとんどない)、日本の水産物を禁輸している中国もIAEA調査に参加した。中国の主張は、「福島トリチウム水は通常の原子炉運転に伴って発生したものではなく、事故によるものだから核汚染水だ」、である。トリチウム以外の核種は3段階の工程でしっかりと除去してあるのに、そこを無視した非科学的な言いがかりである。

2.6 トリチウム水の健康への影響

今回は、1500ベクレル/リットル以下に希釈し、海底パイプラインで沖合約1kmの地点にまで送り、そこから放出する。世界保健機関(WHO)が定めた飲料水の基準は1万ベクレル/リットルであるから、この1/7を放出の希釈基準にしたことになる。

もっと極端に、6万ベクレル/リットルのトリチウム水を毎日2リットル飲み続けるという仮定の試算でも、年間の被曝量は約1ミリシーベルトであり、多くの国の人が普通に浴びる自然放射線(宇宙線、大地、食事から)の2ミリシーベルト/年に足し算されても、いかなる健康被害も生じないであろう(読売新聞 23.8.25)。ここで「シーベルト」とは、人体に対する放射線の影響を評価するための量で、放射線源のベクレル数と放射線の種類、人体各臓器の放射線感受性などを考慮して計算される。通常はその1/1000の「ミリシーベルト」単位で議論される。

3. 放射線と健康

最後に、トリチウム水を離れて一般的なお話を少ししてみたい。放射線の健康への影響は、低線量の場合には年月が経過した後に確率的に生じるガン(発症しない可能性もある)、高線量の場合には直ちにかつ確

定的に発生する障害、に分けられる。

3.1 低線量の場合

年間 100 ミリシーベルト以下ではまず影響はなく、100～200以上になるとガンの発症可能性が比例して高まるとされている。国立がん研究センターによると、100～200 ミリシーベルトで発癌リスクが 1.08 倍、200～500 で 1.16、1000(=1シーベルト)で 1.4 である。これらの根拠は、広島・長崎で被爆した人々へのその後の長い疫学的調査である。余談ながら、野菜不足の発癌リスクは 1.06 倍、塩分取り過ぎが 1.11～1.15、運動不足が 1.15～1.19、肥満が 1.22、毎日2合以上の飲酒が 1.4 だそう(同センター)。後になってガンになるかも知れない低線量放射線を心配するよりも、ストレスを溜めないようにした方が発癌リスクを下げるようだ。

なお、年間100ミリシーベルト以下ならば健康被害は生じないというのが、大方の研究者・医師が合意しているところであるが、「そうではない、100ミリシーベルト以下でもそれなりの悪影響がある」という主張がある。「LNT(Linear No Threshold)仮説」と呼ばれ、^{しきいち}閾値(例えば100ミリシーベルト)は存在せず、ゼロからでも比例して発癌リスクは増える、というのである。

LNT 仮説は、国際放射線防護委員会(ICRP)に 1958 年に提出された考え方で、1927年に行われたショウジョウバエの精子を用いた実験で極低線量からも比例して DNA が傷ついていた(この蓄積がガンになる)、という結果を踏まえている。しかし、多数の中から元気のよい1個が卵に突入すればよい精子にはもともと DNA の修復能力はないのに対して、通常の DNA は修復能力を持っているし、損傷の大きな細胞は自死(アポトーシス)して体を守ろうとするから、LNT 仮説は合理的でないとの批判が多いが、ICRP は考えを改めていない。

原発労働者やレントゲン検査技師などの健康を守るために、ICRP は緊急作業があった場合などの被曝制限を年間50ミリシーベルトとした(ただし5年間の合計では100)。一般公衆に対してはその 1/10 の5ミリシーベルトを限界としていたが、基準としては低い方が良く、1985年に何の科学的根拠もないのに1に引き下げた。これが、「一般の人が通常1年間に浴びてもよい1ミリシ

ーベルト」と、マスコミで報道される所以である。

だから1ミリシーベルトは安全・危険の境界ではなく、なんの制約もない時に達するべき理想なのである。ICRP は原発事故の後などには、20～1ミリシーベルトの範囲で、避難や生活再建の実効性を加味して合理的に決めよとしているが、福島事故後には、「1ミリシーベルト」が絶対の基準のように世の中に理解されてしまい、政府もマスコミもそれを正す努力をしなかった。今回、トリウム水放出を巡って風評被害の払拭に努力すると言っているが、私見では「放射線を正しく恐れる」ための啓蒙開始が10年以上遅かった。1ミリシーベルトに拘ったために、いかに避難の規模と期間が大きくなり(過剰な避難はストレスとなって発癌につながる)、いかに復興の足を引っ張ったことか・・・。

なお宇宙飛行士は、宇宙線への防護となる大気圏の外を飛ぶため 1 ミリシーベルト/日を浴びるが、皆さん健康そのものである。しかし、太陽面で大きなフレア(爆発現象)が発生した時には、宇宙線強度が上がるので特別な区画に避難するのだそうだ。

3.2 高線量の場合

障害は確定的に発生し(必ず症状が出る)、その重篤度は線量で決まる。短時間に全身に浴びた場合、200ミリシーベルト以下ではほぼ臨床症状が見られず、500で末梢血液中のリンパ球の減少、1000で悪心・嘔吐(10%の人に)、3000～5000で半数が60日以内に死亡、7000以上ではほぼ全員が死亡する。この根拠は、広島・長崎でのデータと、1986年にウクライナのチェルノブイリ原発で発生した原子炉暴走事故に緊急対応した要員の、被曝線量とその後の運命とから得られたデータである。

ただし、高線量に対しても人体の回復能力はある。あるロシア人科学者が、事故後のチェルノブイリ原子炉内に調査のために繰り返し入って、合計で半数致死量の2倍以上の被曝をしたが、その後も元気だったそう。高線量であっても時間間隔をあければ(線量率効果という)、その間に人体は回復するという具体的な証明である(高田純『核爆発災害』、中公新書)。本人は事前に、十分知っていたに違いない。 **以上**