

# 福島原発事故による放射能汚染の広がり： 13年目の報告（トリチウム水の海洋放出）<sup>1</sup>

大井万紀人

専修大学自然科学研究所<sup>2</sup>

**要 旨** トリチウムという物質は放射能物質である。したがって、原子炉の冷却などに利用した水がトリチウムを含んでしまったならば、その汚染水を自然環境に捨てることは禁止しなくてはならないはずである。セシウム137などはある程度除去できる処理技術は存在するものの、東京電力が保有する工学技術の現水準では、放射能汚染した水からトリチウムを除去することはできない。このような理想と現実の間にありながら、「これ以上は保管できない」という理由で、2023年8月、日本政府は2011年3月の福島原発事故以来溜め込んできたトリチウムを含む「処理水」を、太平洋に海洋投棄することを決定した。「処理水」には大量のトリチウムのみならず、セシウム137やストロンチウム90、それにプルトニウムなど多様な放射能物質が残留しているため事実上の「放射能汚染水」である。実際、「処理水」1リットル当たり約14万ベクレルの放射能があることが公表されている。これまでに3回の海洋投棄が行われたが、それぞれの海洋投棄には約3週間で費やされ、1.1兆ベクレルの放射能汚染水が放出された（合計で3.3兆ベクレル）。放出に時間がかかるのは、濃度の高い汚染水を1000分の1程度にまで薄めなければならないためである。これほどの苦労にもかかわらず、「薄めた」汚染水の濃度でも、（水爆実験の最中の）1960年代における汚染された地球の水に含まれるトリチウム濃度の2-3倍以上もあって、その安全性を疑問視する科学者もいる。しかし、トリチウムの自然界の濃度は様々な要因が絡み合っており、なかなかその全貌を知るのは厄介である。今回の報告では、自然界におけるトリチウムの濃度について調べた結果をまとめ、太平洋に海洋投棄され続けている「薄めた処理水」が果たして「問題ない水準」になっているのかどうかを判断するための材料を提供したい。

## 1. トリチウムとは何か？

トリチウムは放射能物質である。その原子核(T)は半減期12.3年でベータ崩壊し、ベータ線( $e^-$ )と反ニュートリノを放射する。



放射線を出した後、トリチウムはヘリウム3に壊変し安定化する。

<sup>1</sup> "Environmental contamination by radioactive materials originating from the Fukushima nuclear accident: the thirteenth-year report (discharges of the tritium-contaminated water to the Pacific ocean)"

<sup>2</sup> Makito Oi, Institute of Natural Sciences, Senshu University

ベータ線のエネルギーは反ニュートリノとの分け合いになるため、一定の値をもつわけではないが、エネルギーのスペクトル分布は知られており、その平均値は 5.7keV、最大でも 18.6keV にとどまる。このエネルギーで飛び出してくるベータ線は紙 1 枚程度で遮蔽できてしまうほど「弱い」。

福島原発事故で一般にも知られることになったセシウム 137 やセシウム 134、それにストロインチウム 90 といった、典型的な放射能物質から放射されるベータ線は 500-2000keV 程度のエネルギーをもち、紙一枚程度ではこのようなベータ線を遮蔽することはできない。アルミニウム板など薄い金属でようやく止めることができるほど「高い」エネルギーをもつ。

つまり、トリチウムが発するベータ線のエネルギーは例外的に弱く、人間の表皮どころか、その上の垢の部分で止まってしまうという [1]。したがって、外部被曝の影響はあまり深刻ではないと（多くの原子力関係者に）考えられている。とはいえ、（後述するが）体内に入りやすい性質をもつため、内部被曝の影響は無視できないとも考えられている。

## 2. 2023 年 8 月の「処理水」の海洋投棄

2023 年 8 月 24 日から 9 月 11 日までの約 3 週間にわたり、東京電力はトリチウムやその他の放射性物質を含む「処理水」を太平洋に投棄した。海洋投棄された放射能物質（主にトリチウム）は 1.1 兆ベクレル相当であり、体積にして 7800 立方メートル、つまり約 780 万リットルである。水の質量密度 1.0kg/L を使って推算すると、これは 7800 トンの重量となる。保存タンクに 10 年ほど溜め込まれてきたこの「汚染水」の放射能濃度を計算すると、

$$\frac{1.1 \text{ 兆ベクレル}}{780 \text{ 万リットル}} = \frac{1.1 \times 10^{12}}{7.8 \times 10^6} \text{ (Bq/L)} = 1.41 \times 10^5 \text{ (Bq/L)} \quad (2)$$

となる。つまり 1 リットルあたり 14 万ベクレルという強い放射能であって、そのまま海洋投棄することは違法である。国の基準では、海洋投棄できるトリチウム汚染水の濃度は 180Bq/L であって、約 780 分の 1 の濃度まで下げないといけない。したがって、7800 トンの汚染水にその 780 倍の水を加えて薄める必要がある。つまり、1 回分で 6,084,000 トンほどの「放射能汚染水」が太平洋に流し込まれたのである。これまでに 3 回投棄しているので、太平洋にはこの数字の 3 倍の放射能が捨てられたことになる。2024 年度にも海洋投棄は計画されていて、おそらく 10-20 回ほど実施されるだろう。そして、この作業は少なくとも 30 年間続ける計画が（東京電力により）示されている。

「莫大な量」のトリチウムが太平洋に放出されるというニュースは、世界中の人々に否定的に受け止められた。特に、中国や韓国の人々の反応は厳しく、日本の農産物の輸入制限や買い控えが起きた。SNS には真っ黄色の不気味な液体が福島原発の配管から「ダダ漏れ」状態で流される「フェイクニュース」が流されるなど、人々の混乱は極まった。

### 3. トリチウムのイメージとは？

一般の人々が感じる、放射能物質トリチウムを含む「汚染水」のイメージとはどんなものであろうか？ 案外、フェイクニュースで流れた「真っ黄色の不気味な液体」と大差がないのではないだろうか？ ここでは、「トリチウムだけを含む汚染水」が人間の目にどう映るか確認しておこう。

トリチウムの説明として「トリチウムは水素の同位体である」という形のをよく見かけるが、実は「トリチウム」が何を意味するかについては微妙な点がある。それは「同位体」とはなにか、「核種」とはなにかという別の専門用語の定義にも関係しているのだが、突き詰めると「原子」と「原子核」の違いに帰着される。つまり、「同位体」とか「核種」という言葉の定義が、教科書や論文、あるいは科学の分野（物理が化学など）によって何故かまちまちとなっていて、トリチウムが「原子の種類」を意味する用語なのか、それとも「原子核の種類」を意味する用語なのか不明瞭なときがあるのである。

原子核物理学における定義に従うと [2]、「同位体」は陽子の数は同じだが中性子の数が異なる原子核を意味するし、「核種」は陽子と中性子の数によって分類される原子核の種類を意味する。しかし、医療や考古学など日常生活で「同位体」という用語が使われる時、異なる同位体を核にもつ原子のことを「同位体」の意味で使うことがある。また、化学の分野でも「同位体」を原子核ではなく、原子に対して適用している場合があるようである。実は、wikipedia で与えられている「同位体」の定義も、原子に対して定義されている（日本語版も英語版も）[3]。したがって、wikipedia では「トリチウム」という用語を「原子」の種類として説明している。この論文では、「同位体」の概念自体については原子核物理学における定義を適用するものの、その用法については化学における定義を採用したいと思う。特に、「トリチウム」に関しては原子の種類を区別する名前として使うことにしたい。その理由を下に述べる。

原子核物理では、トリチウムの原子核のことを「トライトン」あるいは「トリトン」と呼ぶ。つまり、陽子1つと中性子2つから構成される「原子核」がトライトンである。したがって、トライトンが「水素の同位体」であって、トリチウムは「水素の同位体であるトライトンを核にもつ原子」となる。とはいえ、このような言い回しをその度に使うのは不便である。したがって、この論文では次のような区別をつけることにする。すなわち、陽子数は同じだが中性子数が異なる原子核のことを「同位核」と呼び、異なる同位核を原子核にもつ2種類の原子の関係を「同位体」と呼ぶことにする。つまり、トリチウムは水素原子の同位体であるが、トライトンは水素原子核の同位核である。この用法を用いれば、原子核の定義を採用しても、その他の分野の定義を利用しても、「トリチウム」が意味するのは原子の種類となる。

こんなことでは、一般の人々が原子と原子核とを混同して考えてしまっても仕方ないだろう（言葉自体も似ていて紛らわしい）。そもそも「原子爆弾」よりも「核爆弾」、「原子力」発電よりも「核

力」発電の方が正しい<sup>1</sup>。物理的な観点に立つと、原子と原子核とでは大きな違いがあり、混同するのは避けなければならない。ここで今一度、原子核と原子の違いについて整理しておきたいと思う。

原子は電子と原子核とから構成されるので、そもそも原子核の方が原子よりもずっと小さな存在である。水素原子の場合を例にとってみよう。水素原子は、一つの電子が水素の原子核の周りを回っているモデルによって、しばしば説明される（ボーアモデル）。水素の原子核は、種々の原子核の中でもっとも軽く、陽子と呼ばれる「素粒子」一つのみからなる<sup>2</sup>。水素の原子核の大きさはおよそ 1fm、つまり  $10^{-15}$ m 程度である。一方で、水素の原子は 1Å、つまり  $10^{-10}$ m 程度の大きさである。両者の大きさの比はおよそ 1 : 100000 となるから、もし水素の原子核の大きさがテニスボール程度だとすると、水素の原子の大きさは山手線程度となる<sup>3</sup>。いうなれば、原子と原子核では、原子核の方が圧倒的に小さく、原子の中に含まれている存在なのである（「核」なのでその真ん中にある）。

実は、人間の感覚というものは、原子のサイズに対して知覚するように進化してきた。逆に、原子核はあまりにも小さすぎて、人間の五感を追いついていけない。たとえば、天然の放射性物質の代表であるウラン（ウラニウム）にはいくつかの同位核があり、よく知られているものにウラン 238 とウラン 235 の二種類がある。どちらのウランの原子核にも陽子は 92 個含まれているが、中性子の数が異なっている。ウラン 238 には 146 個、ウラン 235 には 143 個の中性子が含まれている。たった 3 個の中性子数の違いがその物理的な性質（例えば放射性崩壊の半減期）において大きな違いをもたらす一方、これらの同位核に電子を纏わせて原子として見た時、人間には両者を化学的に区別することができない。つまり「同じ化学物質」に見えるのである。また、人間の五感が感じる物質の色や匂い、質感などといった「物質の性質」は化学的な性質によるものであるから、人間の目（や鼻）にはウラン 238 とウラン 235 の区別はつかない。

さて、トリチウムは水素原子の同位体であるから、化学的、つまり人間の五感には「同じもの」として映るのである。マクロな観点では水素分子は無色無臭の気体であるから、トリチウム分子も無色無臭の気体である。放射能を持つといっても、毒々しい色をした「毒ガス」には見えないのである。

福島原発から海洋投棄された汚染水に含まれているトリチウムとはどのような状態にあるのだら

<sup>1</sup> 英語でもこのような混同はあり、"atomic bomb"よりも"nuclear bomb"、"atomic power generation"よりも、"nuclear power generation"の方が正確な表現である。

<sup>2</sup> ちなみに、通常の炭素の原子核は水素の原子核の約 14 倍の質量を持っているし、酸素の場合は 16 倍である。つまり、原子核の内容は物質によって異なる。

<sup>3</sup> 山手線は閉曲線だが、円形ではなく南北に細長い。ただ、東西の差し渡しを東京駅と新宿駅間で測るとおよそ 5 km となり、テニスボールの直径 (5cm ほど) の 10 万倍となっている。つまり、水素の原子核と水素の原子の比率に近い値となる。

うか？水素ガスのような気体状態のトリチウムが「水」に溶け込んでいるわけではない。「水」そのものに化けているのである。

ミクロな視点で水を見ると酸素と水素の化合物、つまり水分子となっており、化学式で $H_2O$ と表されることは周知のことと思う。この水分子を構成する水素原子(H)が、その同位体であるトリチウム(T)に置き換わったとき、「水分子」はHTO、あるいは $T_2O$ という分子構造になる。これが福島原発から海洋投棄された汚染水に含まれる「トリチウム」の正体である。化学的な観点からすると、 $H_2O$ も、THOも、 $T_2O$ も「水分子」である。人間にとっては、透明で無味無臭の、水道栓から出てくる馴染みの液体にしか見えない。

THOや $T_2O$ のことを「トリチウム水」と表現する人が時々いるが、「食塩水」のようなニュアンスをもってしまい、水の中にトリチウムというものが溶けていると誤解される可能性がある。「水」自身が化けてしまって放射能をもつようになるのがTHOや $T_2O$ であるから、「放射能化水(ばけみず)」あるいは「トリチウム化水(ばけみず)」などと呼んだ方が(科学的には適切とはいえないが)まだましな感じがしないでもない<sup>4</sup>。

化学的には区別のつかない水素原子とトリチウムであるが、物理的には明確な違いがある。放射能の有無である。水素の原子核(つまり陽子)は放射能を持たない。しかし、トリチウムは半減期12.3年でベータ崩壊する放射能物質である。トリチウム等の放射能物質を含む汚染水(放射能化け水)を太平洋に海洋投棄することに懸念をもつ人が多いのは、この「放射能」という物理的性質に起因しているのはいうまでもない。

トリチウムを「正しく」イメージする試みを一つ紹介したい。それは年末の冬の宵に雑踏で行き会う無数の「人間」の中に混じるドラキュラのようなものであろう。外見からはまったく見分けがつかない上、滅多に出会うこともないが、ニヤッと笑うと牙が二本ちらっとだけ見えるのである。

#### 4. 原子炉でのトリチウム生成

福島第一原子力発電所の敷地内にこれまで保管されてきたトリチウムは、原子炉の中で生成してしまった「人造原子」である。どのようにして発生するのだろうか？日本原子力学会誌の論文[4]をみると、3つの過程を経て原子炉でトリチウムが生成されてしまうとある。その3つとは(1)核燃料の三体核分裂、(2)中性子制御材との核反応、そして(3)冷却水に含まれる重水の中性子捕獲である。以下で、それぞれを詳しく見てみる。

##### 4.1 ウランやプルトニウムの三体核分裂

<sup>4</sup> 英語では"tritiated water"という。直訳すれば「三重化水」あるいは「トリチウム化水」となるだろう。

原子炉で行われるのは連鎖反応という核分裂である。核燃料であるウラン235やプルトニウム239といった超重元素に遅い中性子を当てると、超重元素は核分裂を起こし通常は2つの別の原子核（セシウム137やストロンチウム90など）に分割する。このとき2、3個の中性子も同時に飛び出してきて、次の核分裂の引き金となる。飛び出した中性子による核分裂の発生回数が指数関数的に増加すると「連鎖反応」となる。連鎖反応を制御しないまま放置すれば原子爆弾となり、制御して臨界状態に留め置けば原子炉となる。

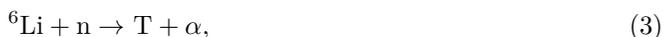
ウランやプルトニウムが核分裂する際、稀に3つの原子核に割れることがあり「三体核分裂」と呼ばれる。3つ目の核生成物がトリチウムとなるのは、連鎖反応の核分裂1万回に対して1回程度だというのが、1年間原子炉を運転し続けると「大量」のトリチウムが生成されることになる<sup>5</sup>。その量は1GW級の原子炉一つにつき、年間で $6 \times 10^{14}$ Bq/year だという。他の2つのトリチウム生成過程と比較した時、これが最も主要なトリチウム生成過程となっているようである。

#### 4.2 制御材との核反応

原子炉と原子爆弾はウランの連鎖反応を利用した「デバイス」という意味では同じであるが、原子爆弾（核爆弾）では中性子数が鼠算式に増殖することが重要で、爆弾に威力を持たせる決め手となる。これに対し、原子炉では連鎖反応が暴走しないように制御し、臨界状態から遠く離れないよう留め置く仕組みが考案されている。原子炉のタイプによって制御方法は少し異なるようだが、福島原発の場合はBWR（沸騰水式原子炉）と呼ばれるタイプの原子炉で、その連鎖反応の制御には炭化ホウ素 $B_4C$ をステンレスで被覆した制御棒が利用されている。また、事故を起こした後、東京電力は臨界状態を突破しないようにホウ酸を大量に注入した。炭化ホウ素やホウ酸に含まれるホウ素原子核は中性子の吸収率が高く、中性子が連鎖反応で鼠算式に増えないよう制御するために利用される。裏を返せば、ホウ素は中性子と核反応を起こしやすいということであるが、その副産物としてトリチウムが生成されてしまう。

また、ホウ酸は冷却水に溶かして使用するが、酸性度が上がり、原子炉の金属部分の腐食が進んでしまう。これを防ぐため、水酸化リチウムを添加するという。リチウムの同位核のうち ${}^6\text{Li}$ は中性子捕獲の断面積が大きく、その結果トリチウムが生成される。

連鎖反応の制御が関連するトリチウム生成にはいくつかの反応過程があるようだが、ここでは2つの例を挙げておく。



<sup>5</sup> 「大量」の意味について吟味するのがこの論文の目的である。

Tがトリチウム(トリチウムの原子核)、 $\alpha$ がヘリウム4である。

制御材に関連する物質と中性子の間の核反応によるトリチウム生成の総量は、1 GWのBWR型原子炉一基につき $1.15 \times 10^{14}$  Bq/yearだという。ただし、福島原発の場合は事故によって壊れている上に、緊急的な対処も実施されているので、おそらくはこの数字よりも上の値になっていると思われる。

### 4.3 冷却水中の重水への中性子捕獲反応

水素にはトリチウムのみならず、ドューテリウムという同位体も存在する。自然界に存在する水素の同位体のうち、存在比の99.985%を占めるのがプロチウムであるが、これはいわゆる「普通の水素原子」、すなわち陽子とその周りを回る電子一つからなる原子のことである。2番目に多いのが存在比0.015%のドューテリウムで、これは陽子一つと中性子一つからなる原子核(ドューテロン)の周りに電子が一つ回っている原子である。プロチウムとドューテリウムの存在比を足すと100%となってしまう。つまり、「トリチウムは自然界に存在する」といってもその量は無視できるほど少ない。日本原子力機構の資料[5]によれば、その割合は $10^{-17} - 10^{-15}$ %に過ぎないという。

冷却水として原子炉に流し込む水の中には、したがってわずかながらドューテリウムが含まれている。これに中性子が捕獲されるとトリチウムに変化してしまう。原子核物理では、この過程(中性子捕獲)を $(n, \gamma)$ 反応と呼ぶ。



Dがドューテロン、 $\gamma$ はガンマ線(光子)を意味する。

この過程によって生成されるトリチウムは、1 GW級の軽水炉1基につき $2 \times 10^{11}$  Bq/year程度だという。

## 5. 人造トリチウムの排出量

### 5.1 世界中の原子炉が生成するトリチウムの年間総量

以上の3つの原子炉中のトリチウム生成過程を合わせると、1基の原子炉が1年間に生成するトリチウムの量は、おおよそ $10^{14} - 10^{15}$  Bqとされる。福島原発のような軽水炉の場合は、最初の2つの過程である、核燃料の三体核分裂と中性子と制御材との核反応による副産物によってトリチウムは主に生成されていることになる。

文献[4]によると、世界中の原子炉で生成されるトリチウムの年間総量は $10^{17}$  Bq程度だといい、それは自然界に存在する量のおおよそ10%程度だという。この数字をみて「多い」と感じるか、「まだ少ない」と感じるかは意見が分かれるところであろう。しかし、それは次に示すデータを見れば、簡単に結論が出るだろう。

## 5.2 大気中核実験で放出されたトリチウムの総量

核爆弾がトリチウムを生成するプロセスは、ほぼ原子炉内でのトリチウム生成と同じ過程であろう。ウランやプルトニウムの三体核分裂や、大気中の水蒸気や雨水に含まれる重水に対する中性子捕獲である。原爆の場合には、ホウ素やリチウムとの核反応によるトリチウム生成は考えなくていいだろう（連鎖反応を制御しないので）。水爆の場合には、原爆が「起爆装置」なので上記の影響もある上に、トリチウム自体が「爆発源」として封入されている。水爆のエネルギー源は次の核融合反応によるものである。



核融合できなかつたトリチウムの余剰分が飛び散ることが考えられる。また水爆の中にはわざわざリチウムを混合し、核融合で生成した中性子線を利用してトリチウムを生成させる場合もある。この反応については上式 (3) 参照。

1963年8月に、当時の核保有国が「部分的核実験禁止条約」を実効に移すまでは、原子爆弾と水素爆弾の爆裂により、トリチウムは地球環境にばら撒かれ続けた。最初の原子爆弾は、我々日本人はよく知っている通り、1945年のこと<sup>6</sup>である。原子力学会の論文 [4] のデータに基づけば、その20年たらずの間に  $2.4 \times 10^{20}$  Bq のトリチウムが地球環境に拡散されたそうだが、それは自然界に存在する量の100倍に相当する。

1963年から2023年に到るまで60年が経過しているので、ベータ崩壊による減少により  $2^{-60/12.3} \approx 0.034\dots$ 、つまり3%ちょっとまで減少しているが、それでも  $8 \times 10^{18}$  Bq の（核実験由来の）トリチウムが残留していることになる。これは自然界に存在するトリチウムの10倍程度に相当するから、明らかに「大量」といえるだろう。

つまり、現在の地球に存在しているトリチウムのほとんどが「人造トリチウム」なのである。この状態に対して、世界中の原子炉から毎年、自然界に存在する量の10%程度のトリチウムが追加されることになるわけである。今、地球にあるトリチウムは「人間が作ったトリチウムが大半」だといっても過言ではないだろう。

## 6. 地球の自然環境で生成されるトリチウムの量

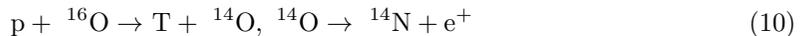
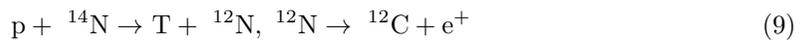
日本原子力学会誌の論文 [4] で紹介されている「自然界のトリチウムの量」は、およそ  $10^{18}$  Bq である。これは、半減期12.3年のベータ崩壊による減少と、大気高層で宇宙線と大気分子の核反応による生成との間の「平衡状態」として計算された推測値で、原典は1993年の Okada, et al. による研究論文である [6]。核実験によって環境に放出された総量の1/100程度である。

<sup>6</sup> 実戦に投入された2発（リトルボーイとファットマン）と、実験段階の1発（トリニティ）が爆裂した。

宇宙線といってもトリチウム生成に関与するのは、高エネルギーで大気に飛び込む陽子、あるいは中性子の放射線が主である。もっともよく知られた反応 [5] は、中性子 (n) と大気中の元素である窒素や酸素との反応によるトリチウム生成である。



この反応の断面積が大きくなるのは、4MeV 以上の高エネルギー中性子線 (速い中性子) に対してである。陽子と大気中の窒素や酸素との反応も起きる可能性もあり [8]、おそらく下のような 2 段階反応になると思われる。



${}^{12}\text{N}$  と  ${}^{14}\text{O}$  は不安定核であり (放射能をもつ)、どちらもベータ+崩壊して安定化する。その半減期はそれぞれ 11ms と 70s である。クーロン障壁の影響を考えれば、陽子が関連する上の 2 つの核反応は、速い中性子と同等あるいはそれ以上の高エネルギーをもつ陽子線に対して有効だと思われる。大気中の元素の密度は高度と相関があるので、トリチウムの生成量は高度との相関も持つ。

また、地球に降り注ぐ宇宙線の強さや頻度は、太陽活動の 11 年周期と関係があり、地球の自然環境におけるトリチウム生成量が時間変動することも知られている [8]。太陽活動が活発になると、その表面には黒点と呼ばれる強磁場領域が増える。観測的には、黒点の数の増加と巨大化という形で確認できる (Fig.1 参照)。太陽活動の活発化に伴い、表面ではフレアなどの爆発現象が頻発するようになり、吹き飛ばされた荷電粒子は宇宙空間に飛び出してくる。「太陽嵐」とも呼びたくなる、このプラズマ状の粒子集団は地球の周辺を覆って付加的な磁場を形成する。この磁場は恒星間あるいは銀河間の宇宙線 (陽子線) を遮蔽するので、地球大気でのトリチウム生成が減少するという説明である [8]。

地球に降り注ぐ宇宙線が荷電粒子である場合 (陽子) は地球の磁場によって高緯度地方へ誘導され、そこで高層大気と核反応する。一方、低緯度地方の高層大気では中性子による核反応が起きやすい [8]。トリチウムの生成量が緯度にも依存するのはこれが理由である。

また、宇宙線の中には太陽風に由来する陽子線や中性子線もあるはずである。太陽風とは、太陽を構成する荷電粒子 (水素原子核つまり陽子、そして電子など) が宇宙空間に飛び出す天体現象である。高温のプラズマ状態の太陽大気 (コロナ) がもつ熱運動と、太陽の複雑な磁場が原因となっているらしいが、詳細はいまだに不明である。ただ、金星探査衛星の「あかつき」の太陽風観測の説明資料 [9] によると、地球軌道における太陽風の速度は 400-800km/h だというので、これは低エネルギー陽子線に相当する。太陽風に起因する陽子によるトリチウム生成反応は起きにくいと思わ



FIG. 1: 2014年10月25日に筆者が撮影した太陽の巨大黒点。3周期ぶりの巨大さだったという。

れる。生成の目安は陽子の入射エネルギーが4MeVに届いているかどうかだが、

$$E_p = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{mc^2}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \simeq \frac{1\text{GeV}}{2} \left(\frac{800}{3 \times 10^5}\right)^2 \quad (11)$$

を計算すると3.5keVを得る。これは基準値4MeVの1/1000以下であり、トリチウム生成には不十分と思われる。

一方で、太陽表面の陽子は、宇宙空間に飛び出す前にもう一つの恒星主成分であるアルファ粒子（ヘリウム4）と核反応を起こしたり、少数成分である炭素、窒素、そして酸素といった原子核との衝突することがある。このときに生成された中性子線は高エネルギー中性子線となって宇宙空間に（陽子同様に）飛び出し「太陽風」の成分となる場合がある [7]。しかし、中性子の単体は半減期15分でベータ崩壊するので、遅い中性子からなる太陽風は地球まで到達できない。この点を考慮して、どの程度のエネルギー  $E$ (MeV) をもつ中性子が1天文単位 ( $D$ ) を移動できるか、その所要時間  $T$  を概算してみる。非相対論的な運動エネルギー  $E$  を用いると、

$$T_{au} = \frac{D}{c} \sqrt{\frac{mc^2}{2E}} \simeq 1.5 \times 10^4 E^{-1/2} \text{ (sec)} \quad (12)$$

という式で表せる。 $D$  は1天文単位をkmに換算した距離(1.5億km)、 $c$  は光速、 $mc^2 \simeq 1\text{GeV}$  は中性子の質量エネルギーである。 $D/c$  は太陽から地球まで光がどのくらいで到達できるかを示すよく知られた時間スケールで、8分ちよつとである。

$T_{au}$  が 15 分 ( $15 \times 60 = 900$  秒) より短いという条件から、 $E \gtrsim 400\text{MeV}$  を得るが、これは「速い中性子」というよりは、「かなり速い中性子」といえるだろう。文献 [7] によると、太陽から飛んでくる中性子を観測した結果、最大で  $2\text{GeV}$ 、 $100\text{MeV}$  以上の中性子線も頻繁に検知されている。しかし、その発生は太陽表面での大規模爆発（フレア）の時であり、フレア 1 回における中性子検出時間は数十秒程度に限られていた。またフレアという天体現象自体が頻度の低い現象であり、太陽由来の中性線によるトリチウム生成は存在はするものの、主要な過程とはなっていないと思われる。ただ、11 年周期の太陽活動の最活発期にはそれなりの寄与が期待できるだろう。

## 7. 地球環境に排出されるトリチウム化水の形成

原子炉であれ、地球の高層大気であれ、トリチウムを生成する核反応は単体の原子を発生させる。化学的には、水素原子は単体で不安定であり、2 原子分子を形成して安定化するか、他の原子と化学反応を起こし化合物として安定化する。前者がいわゆる水素分子であり、後者の代表例が水分子である。

トリチウム原子が 2 つ存在すれば、トリチウムガスとして 2 原子分子  $T_2$  を形成するだろう。しかし、宇宙線由来のトリチウムの濃度は一般には低いので、そのような化学反応の発生確率は低いと思われる。メルトダウンした原子炉中では、燃料棒を覆うジルコニウムが高熱になると水を分解し、水素が発生する（福島第一原発の 1 号機と 2 号機は水素爆発した）。この水素分子とトリチウム原子が反応する可能性はそれなりにあるだろう。



日本原子力研究所 (JAEA) が行なったシミュレーション [5] でも、気体状の HT（シミュレーションの資料には「水素ガス」と表記されている）の拡散を想定している。

しかし、何と言っても環境中でのトリチウムの動態としてもっとも重要なのは、トリチウム化水（この論文で「トリチウム化け水」と呼んでいる状態）、すなわち HTO や  $T_2O$  である。原子炉内や高層大気で発生したトリチウム原子は、水分子と接触すると HT 交換を起こして HTO となる [8]。



HTO の生成に比べて、トリチウム密度が小さな状況では  $T_2O$  の発生は稀な事象であると思われる。

このように、水蒸気あるいは液体の「水」の状態をとって、トリチウムは環境へと漏れ出していくのである。

## 8. 生命を生み出した「水」中のトリチウムの量

地球は「水の惑星」とよく言われる。生命体が見つかったいる太陽系の天体は（これまでのところ）地球のみであるが、それは海を持つ天体が地球に限られることと無関係ではないはずである。生命の存在にとって水、そして海は必須であるとの認識は科学者のみならず、多くの一般人も認めるところであろう。

水の中には極微量ではあるが一定の割合でトリチウムが含まれている（その大半が「人造」であることはすでに上の考察で確認した）。したがって、海の中で誕生し、体の成分のほとんどが水分からなる地球生命体の体内には、トリチウムも一定量含まれていることになる。次に、その量についての考察を行ってみたい。

まずはトリチウムの存在比（同位体存在比）について考察してみる。すでに触れたが、もっとも多いのが「プロチウム」つまり通常の水素原子である。これは（中性子を持たず）陽子1つだけで原子核を構成するタイプで、その同位体存在比は99.985%と圧倒的である。次に多いのが「デュテリウム」（中性子1個を持つタイプ）となり、その存在比は0.015%である。プロチウムとデュテリウムの存在比を足すとぴったり100%となるので、一見すると、水素に関しては他の種類の同位体が存在しないことになってしまうが、これは有効数字のトリックである<sup>7</sup>。つまり、トリチウムの同位体存在比は、少なくとも小数以下4桁以下の小さな数字になっているということである<sup>8</sup>。日本原子力研究開発機構（JAEA）の研究者が発表した資料 [5] には、 $10^{-17} - 10^{-15}\%$ 程度、という概算値が紹介されているが、3桁にわたる不確定性がある。

一方で、様々な物理データを用いて算出した、宇宙線生成の寄与による「トリチウム存在量の平衡値」はおよそ  $10^{18}$  Bq であった [6]。これは大気中の分子を構成する窒素や酸素の原子核と、宇宙線の成分である中性子や陽子とが核反応する生成確率や、半減期 12.3 年でベータ崩壊して消滅する割合などを考慮して計算した値である。この値については、複数の文献でほぼ同じ桁の数字が与えられており、信用度は高いと思われる（Table I 参照）。ただ、トリチウムの放射能強度（ベクレ

| JAEA[5]                    | 小出裕章氏 [15]                  | 高田兵衛氏 [16]         | 環境省 [17]           |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| $(1 - 1.3) \times 10^{18}$ | $(6.3 - 10) \times 10^{17}$ | $1 \times 10^{18}$ | $7 \times 10^{16}$ |

TABLE I: トリチウムの自然界存在量の推定値のいろいろ。単位は Bq。

ル）として与えられていて、JAEA の値（%）と直接比較できない。換算してどの程度の値になる

<sup>7</sup> 同位体比率は安定核（つまり放射能を持たない核種を核にもつ原子）の間だけで計算する、というルールもあるらしい。そうだとすると、これは「有効数字のトリック」ではない。

<sup>8</sup> 「アルコール度数 0.00% のノンアルコール飲料にはアルコールはまったく含まれていないのか？ それとも、0.001% 入っている可能性はあるのか？」という問題、あるいは画面に「バッテリー残量 0%」という表示が依然として表示され続けているスマートフォンの問題と同じである。

か確認してみよう。

まずは放射能強度  $B$  と放射能物質の数  $N$  の関係式を導く必要があるが、放射能の半減期モデルを採用すると、これはすぐに手に入る。半減期モデルは次の微分方程式によって定義される。

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\log 2}{\tau_{1/2}} N. \quad (16)$$

$\tau_{1/2}$  は半減期と呼ばれ、このモデルを特徴付けるパラメータである。 $t = 0$  における放射能核の個数を基準にすると、 $t = \tau_{1/2}$  でその数が半分減少するという物理的な意味を持つ。

1 ベクレルとは 1 秒間に崩壊する放射能核の個数であるから、放射能強度  $B$  をベクレルで表すとき、 $\Delta t = 1$  秒、 $\Delta N = B$  とおける。したがって、上の微分方程式より

$$N = \frac{\tau_{1/2}}{\log 2} B \quad (17)$$

という関係式を得る。ただし、半減期は秒の単位を持たせて計算する点に注意する。またモデル中の負の符号に関しては物理的に「減少」の意味合いを持たせていただけなので、ベクレルを用いるときは不必要である。

トリチウムの半減期は 12.3 年なので、これを秒に換算すると  $12.3 \times 365.25 \times 24 \times 60^2$  となる。この値をつかって係数を最初に計算しておく

$$\frac{\tau_{1/2}}{\log 2} \simeq 5.6 \times 10^8 \text{ 秒} \quad (18)$$

となる。さて、地球におけるトリチウムの平衡値として総量は、おおよそ  $10^{18} \text{ Bq}$  と与えられているので、これを原子の個数に換算すると

$$N_{\text{THO}} \simeq 5.6 \times 10^8 \times 10^{18} = 5.6 \times 10^{26} \quad (19)$$

という値を得る。

次に地球に含まれる水素原子の数を推定する。文献 [18] によると、地球に存在する水素原子のほとんどが化合物として存在しており、しかも炭水化物とか DNA などに含まれる水素原子の個数は、水分子に含まれる水素原子の個数に比べれば、無視できるほど少ないという。この論文では、この近似を採用することにし、地球における水の総量から、水素原子の個数を概算してみたい。まず、wikipedia[19] をつかって地球の水の総量の推定値を調べてみると 14 億  $\text{km}^3$ 、すなわち  $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$  だという。(ただ、この数値に関してはどのような根拠に基づくのか把握しきれていないため、もし最終結果に誤差があるとするならばこの数値に原因がある可能性は高いだろう。) 水の密度はおおよそ  $10^3 \text{ kg/m}^3$  だから (温度依存性や海水密度との差異は無視)、地球上での水の総質量は  $1.4 \times 10^{24} \text{ g}$  と見積れる。したがって、水分子の個数は

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1.4 \times 10^{24}}{18} \times 6.0 \times 10^{23} \simeq 4 \times 10^{46} \quad (20)$$

と見積もることができる。H<sub>2</sub>O の中に含まれる水素元素は2つ、HTO の中に含まれる水素原子は1つだから、水素原子とトリチウムの個数の比は

$$\frac{N_{\text{HTO}}}{2N_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{HTO}}} \simeq \frac{1}{2} \frac{N_{\text{HTO}}}{N_{\text{H}_2\text{O}}} \sim \frac{5.6 \times 10^{26}}{2 \times 4 \times 10^{46}} = 7 \times 10^{-21} = O(10^{-20}) \quad (21)$$

と見積れる。ただし、T<sub>2</sub>O の個数は HTO に比べて無視できるほど小さいと仮定した。上の近似式では  $N_{\text{HTO}} \ll N_{\text{H}_2\text{O}}$  が想定されている。この数字が大雑把な意味での「トリチウムの同位体比率」に相当する（重水の寄与も無視した）。すなわち

$$\frac{N_{\text{T}}}{N_{\text{H}}} \simeq 10^{-18} (\%) \quad (22)$$

である。

## 9. GNIP との比較

Global Network In Precipitation, すなわち GNIP[10] とは、国際原子力機関 (IAEA) が世界中に配置した放射能物質のモニタリングポストのネットワークである。雨水や海水に含まれるトリチウム濃度などの時間変化を記録し、そのデータは公開されている。

環境科学や地球物理学、あるいは気候学においては、気流による大気中の水分の移動や、海流による海水の移動についての情報が重要である。地球温暖化による気候変動などの研究でも必要となる。トリチウム化水は放射能をもつ「水」であるので、その動きを追跡することができる。

まずは、文献 [11] に示された、GNIP による世界のトリチウム濃度の実測値の分布を見てみよう (Fig.2)。全般的に、高緯度地方で高く、低緯度地方で低い値が出ているのは、上述したように地球

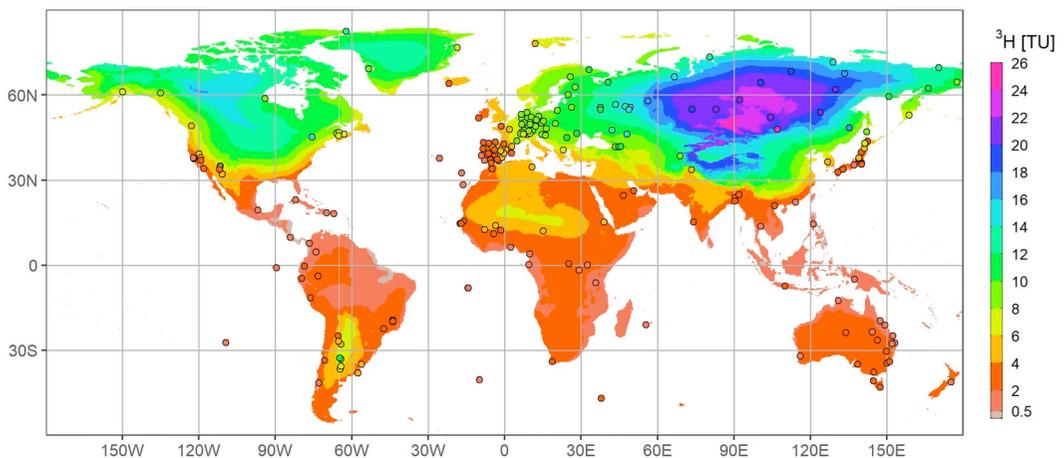


FIG. 2: GNIP で公開されている世界のトリチウム濃度分布。文献 [11] に掲載された図を引用したもの。

の磁場による効果と思われる。日本近傍における値はおおよそ 2-4TU 程度と示されているが、この単位については説明が必要である。

GNIP のデータにおけるトリチウムの濃度は TU(Tritium Unit) という単位によって記述されている。しかし、この単位の定義が論文によって異なるため、若干の混乱がある。たとえば、論文 [11] には、HTO と H<sub>2</sub>O との分子数比、すなわち  $N_{\text{HTO}}/N_{\text{H}_2\text{O}}$  で定義されているのに対し、国立スイス連邦水生科学技術研究所の文献 [12] では、トリチウム原子 (T) とプロチウム原子 (H) の原子数比  $N_{\text{T}}/N_{\text{H}}$  として与えられている。両者にはおおよそ因子 2 の差があるが、我々の考察結果に適用すると、どちらも同じオーダーとなっているので、厳密な区別は必要ないと思われる。

$$\frac{N_{\text{HTO}}}{N_{\text{H}_2\text{O}}} \simeq 2 \frac{N_{\text{T}}}{N_{\text{H}}} \simeq 10^{-20} \dots \text{この論文での結果} \quad (23)$$

どちらの定義において、H 原子 (あるいは H<sub>2</sub>O 分子) 10<sup>18</sup> 個の中に、T 原子 (THO 水の分子) が 1 個混合している「水」の濃度を 1TU と定義している。つまり、 $N_{\text{THO}}/N_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-18}$  のとき、あるいは  $N_{\text{T}}/N_{\text{H}} = 10^{-18}$  のとき、この水の濃度は 1TU となる。例えば、5TU の水の中には H<sub>2</sub>O が 10<sup>18</sup> 個と THO が 5 個含まれている。

我々の計算結果にこの単位を適用すると、自然界で生成されたトリチウムの平衡濃度は 0.01TU に対応する。地球の水のトリチウム濃度については、幅があることが示唆されており、文献によって様々な値が提示されているが、おおよそ 1-10TU の間にあるとされている。つまり、我々の計算結果は標準的な値よりも 2 桁も小さい値になっている。これは先にも述べたが、地球全体の水の量について wikipedia の値を単純引用したところに責任を追わせたいところであるが、安易な解決法に飛びつく前にできる限りの分析を行って他の可能性を追求してみたい。

まずは、GNIP は「実測」値であるので、核実験の影響も込みであるという点に着目したい。核実験由来のトリチウムの総量は 10<sup>20</sup>Bq 程度と見積もられているが、核実験停止条約以来の減衰により現在は  $8 \times 10^{18}$ Bq 程度になっているだろうことをすでに考察した。この残留「人造」トリチウムの量を 10<sup>19</sup>Bq 程度と見なすことにする。一方、宇宙線由来の天然トリチウム平衡量が 10<sup>18</sup>Bq であることは多くの文献により指摘済みである。前者の方が一桁大きな値をもつということは、GNIP が測定しているのは天然トリチウム平衡量というよりも、残留「人造」トリチウムの方ではないだろうか？もし、GNIP の世界平均値が 1TU 程度だというのであれば、天然トリチウム平衡量については 0.1TU 程度になるはずである。次に着目したいのが、GNIP の測定限界が 0.1TU であるという点である。GNIP ではシンチレーションカウンターを用いてトリチウムの数を推定しているため、発光物質の種類により検出限界値が変わるはずで、現在の技術水準では 0.1TU 程度が限界なのであろう。3つ目の注目点は、地球の水の循環が熱力学的平衡状態に達していないという点である。もし、熱力学的平衡状態に達していれば、トリチウムの濃度は地球全域で均一となるはずであるが、Fig.2 に示されているように、その値は場所によってかなり分散している<sup>9</sup>。したがっ

<sup>9</sup> この結果は、J.Lovelock が NASA による火星探査「バイキング計画」において編み出したラブロックテスト [13] を思

て、モニタリングポストが置かれている場所に、トリチウムがたまたま局所的に集中してしまう可能性は排除できないだろう。GNIP は IAEA が主導するプロジェクトであるから、その測定地点は必然的に原子炉の周辺となる傾向が強いはずである。実際、Fig.2 を見ると、モニタリングポストの位置は世界の人口密集地にかたまわって設置されており、海洋上や大陸の中心部分（砂漠やジャングルなど）にはほとんど設置されていないのがわかる。こういった場所で測定限界である 0.1TU 以下の値が頻発すれば、測定平均値は下振れする可能性は十分にある。

つまり、GNIP のデータに基づいた我々の考察が正しければ、「地球がもつ自然のトリチウム量」が

$$\frac{N_T}{N_H} \simeq 10^{-18} - 10^{-17} (\%) \quad (24)$$

程度になる可能性は十分あると思われる。

## 10. JAEA との比較

JAEA が示した値 [5] は  $10^{-17} - 10^{-15} \%$  であったが、おおよそ GNIP の結果と合致している。3 桁の不確定性は、GNIP における低緯度地方の測定値と高緯度地方の測定値にほぼ対応しており、統計上の誤差というよりは、場所による変動の影響を取り込んでいるように思える。

先に、原子力学会誌 [4] で発表された核実験からの寄与が  $10^{20}\text{Bq}$  であることを見たが、この値は自然界における平衡値より 2 桁大きい。つまり、この数字を用いると地球の水のトリチウム濃度が 100-1000TU もの高水準だった時代があったことになる。

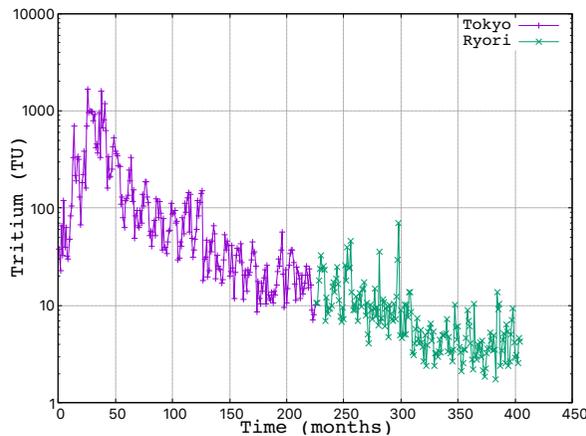


FIG. 3: GNIP に登録されている東京 (1961.1-1979.12) と岩手県綾里 (1979.1-2005.12) における降水中のトリチウム濃度 (TU) の月毎の測定値。縦軸の単位は TU で対数スケール。

い起こさせる。ラブロックテストとは、探査先の惑星における生命体の有無を見極めるための初期検査のことであるが、望遠鏡によって惑星大気のスเปクトル分析を行い、その状態が平衡か非平衡かを見極めるものである（つまり、探査船で惑星に着陸して生命探査をする必要がない）。生命の存在は大気を非平衡状態にするというのが Lovelock の仮説であり、実際パイキング計画を指揮したカールセーガンはラブロックテストを事前に行なって「生命が存在する可能性は低い」と認識した上で、火星に探査船を送って「生命が存在しない」と結論した。

GNIP から現在入手可能なデータセットのうち、1961.1-1979.12 の期間における東京、および 1979.1-2005.12 の期間における岩手県大船渡市にある気象庁大気環境観測所(綾里)での観測値を Fig.3 に示した。予想した通り、1963 年と 1964 年に東京で 1000TU を超える値を 3 回記録している。また、1961 年以降、東京(と綾里)で 100TU 以上を記録したのは 71 回(綾里では 0 回)であり、その最後の記録は 1979 年 7 月の東京で 150.5TU であった。

日本から参加している GNIP のモニタリングポストで、21 世紀以降の最近のデータが継続的に投稿されているのが熊本大学である。そのデータを見ると 2012 年 3 月から 2022 年 1 月までの 10 年間の平均値は 2.58TU である(最小値 1.15TU, 最大値 6.36TU であり、初夏に大きくなり、秋に小さくなる傾向がある)。2000-2005 年における綾里の測定値の平均値が 4.6TU であるので、半減期 12.3 年で着実に放射能が半分に減衰していることが確認できる(ということは、まだ核実験の影響が残っているということである)。

## 11. 人体に含まれるトリチウムの量

成人男性の平均体重程度として 60kg を想定し、この人物の体内に含まれるトリチウムの量を概算してみよう。

人体の約 60 % が水分(より正確には男女差や年齢差もあって 50-70% の範囲にあるらしい)[14] といわれるが、この割合が「質量比率」を意味すると仮定すると、想定しているケースについては体内中の水の量(質量)が 36kg となる。これを水分子( $H_2O$ )の個数に換算すると

$$\frac{36 \times 10^3}{18} \times (6.0 \times 10^{23}) = 1.2 \times 10^{27} \quad (25)$$

となる。この数字にトリチウムの同位体比  $r$  をかければ、人体中に含まれるトリチウムの分子数を得る。

我々の結果では 0.01TU となったので  $r = 10^{-20}$  である。一方、GNIP の現在の測定値の下限値は 1TU 程度だったから、 $r = 10^{-18}$  となる。一方、経済産業省などの資料で散見される値の上限値は 10TU 程度となっており、 $r = 10^{-17}$  に対応する。それぞれの場合について計算すると、人体に含まれるトリチウムの個数はおおよそ  $10^7, 10^9, 10^{10}$  となる。一見、これらの数字は大きな数に見えるが、人間の体の大きさに比較すると分子は圧倒的に小さいことに留意すべきである。人体中のトリチウムの個数を、式 (17) を使って放射能強度に変換すると

$$B \simeq \frac{10^{7,9,10}}{5.6 \times 10^8} \sim 0.02, 2, 20 \text{ (Bq)} \quad (26)$$

となる。つまり、我々の考察では、核実験を行う前の地球、つまり自然界で作られ出されるトリチウムだけの場合、人体に含まれるトリチウムは(ノンアルコール飲料風に書くと) 0.0Bq である。一方、大気中での核実験が停止されてから 60 年経過した現在の水準の場合は 2Bq 程度と推測さ

れる。経済産業省などが大きめに見積もる場合、その値は現在の推定値の10倍ほどであるから、 $10 \sim 2^4 = 16$ と近似すると（かなり大雑把だが）、 $12.3 \times 4 \simeq 50$ となって、約50年前の「汚染レベル」の値を適用した「上限値」とみなすことができるだろう。

## 12. 経済産業省や東京電力による説明

2023年8月24日から始まったトリチウムの海洋放出だが、その数ヶ月前からテレビ報道などで「トリチウムは自然界にも広く存在し、人体にも含まれているものであり、安全である」という報道がしきりになされるようになった。たとえば、7月10日前後にフジテレビで全国向けに放映された「トリチウムは水素の仲間！自然界に広く存在している」という報道があった。5月の終わりに福島テレビで福島県民に向けて放映されたものを再利用したものらしい。テレビ放映で、画面の右隅に小さな文字で書かれている、情報の出典について情報を読み取るのはほぼ不可能であるが、その後オンラインで動画公開[20]された際に確認すると、「経済産業省出典」[21]とあった。この出典に基づく報道は、フジテレビのみならず、7月4日にNHK[22]や、7月15日の東京新聞[23]でも同様になされた。

これらの報道や政府のPublic relations活動において共通するのは、具体的な数字がほとんどないという点である。「広く自然界に存在」とか「人体にも含まれている」といった文言をみると、渋谷駅や新宿駅でよく見かけるドブネズミのように、「結構な量が身の回りの環境に存在しており、私たちに身近なもの」という印象を持つ人がおおいのではないだろうか？しかし、すでに上で確認したように、「自然界に広く存在し、人体にも含まれる」といっても、宇宙線由来の「天然トリチウム」に限るならば、それは「0.0%のアルコールフリー」飲料に含まれるアルコール量のようなものである。また、政府の引用する「自然界の値」は核実験で汚染されてしまった「自然界」の値である。

一般向けの情報にはみつからないので、もう少し専門家向けの資料には書いてあるかと思い、これまでの考察でも参照してきた経済産業省の委員会で提示された資料[5]をみると、「海水のトリチウム濃度は1Bq/L」とあった。NHKの報道を見返してみるとやはりこの数字が引用されていた。またwikipediaの日本語版[24]をみると、「体重60kgの人の体には50ベクレル程度のトリチウムが含まれている」と書いてあり、その情報の出典をみると「核融合科学研究所」という国立研究所<sup>10</sup>の資料[25]であった。そこには「自然環境中の水は1Bq/L」と明示されている。よく調べると、経済産業省の委員会の資料[5]をつくったのは、この核融合科学研究所の所長であった。

これまでの考察を応用すれば、この1Bq/Lという数字と、人体に含まれるトリチウムが50Bq

<sup>10</sup> 正確には大学共同利用機関法人自然科学研究機構といい、文部科学省の研究機関である。国立天文台もこのグループに属する。

であるという2つの事柄がどう関係しているかは簡単に確認することができる。まず、人体の水分量は60%程度だから、体重60kgの人は36kgの水を持つことになる。水の密度としては理想的な値である $10^3\text{kg/m}^3$ を使う。この密度は単位を変えると $1\text{kg/L}$ であるので、人体には36Lの水が含まれていることになる。もしトリチウムの濃度が $1\text{Bq/L}$ であるなら、 $36\text{Bq}$ となる。ちょっと無理はあるが、おおよそ $50\text{Bq}$ と書いてもまあいいだろう(桁が一致している)。この結果が正しければ、人体にはトリチウムが「結構たくさん入っているね」という印象になるだろう。しかし、我々の考察では $0.0\text{Bq}$ だったことを思い出してほしい。「 $1\text{Bq/L}$ 」という数字はちょっと過大評価気味になっているのではないだろうか？

ちなみに、国のトリチウム放出基準は $180\text{Bq/L}$ である。(1Bq/Lと考えた場合における)人体に含まれる濃度の180倍に相当するが、「高い」と感じる人と「まあいいかな」と思う人で意見は割れるだろう。しかし、我々の計算では人体に含まれるトリチウムの放射能は $0.01\text{Bq}$ 以下であったから「1万8千倍」である。「まあいいかな」という人の割合はかなり減るのではないだろうか？

これまでの考察で得た結果を応用し、地球の水の「放射能強度」が(トリチウムによって) $1\text{Bq/L}$ となっているかどうか計算して確認してみよう。まずは同位体の比率から出発しよう。通常の水素であるプロチウムとその安定同位体であるデューテリウムの同位体存在比はそれぞれ $p = 0.999855$ ,  $d = 0.000145$ である。合計すると $p + d = 1$ である。同位体存在比を安定核に対してだけ適用するという定義に基づけばこれは当然の結果である。しかしながら、地球には平衡状態として存在するトリチウムが一定量存在していて、それはプロチウムとの存在比によって $N_T/N_H \ll 1$ であるという結果をこの論文で得た。その分の「同位体存在比」を $\epsilon \ll 1$ として勘定することにしてみよう。つまり、有効数字小数以下6桁の精度で $p + d = 1.000000$ であるが、小数以下20桁の精度まで引き上げると $p + d < 1$ であり、 $p + d + \epsilon = 1$ であるとする。 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{HDO}$ 、 $\text{HTO}$ の質量数はそれぞれ18, 19, 20であるから、「水分子」の有効質量数は $18p + 19d + 20\epsilon = 18.000145 + 20\epsilon$ となるが、これをあえて

$$\begin{aligned} 18p + 19d + 20\epsilon &= 18(p + d + \epsilon) + d + 2\epsilon \\ &= 18 \left( 1 + \frac{d + 2\epsilon}{18} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

と書き表すことにする。1Lの水の質量を理想的な値である $1\text{kg}$ とすると、そこに含まれるトリチウム「化け水」 $\text{THO}$ の個数 $N_{\text{THO}}$ は

$$\begin{aligned} N_{\text{THO}} &= 10^3 \frac{20\epsilon}{18 \left( 1 + \frac{d + 2\epsilon}{18} \right)} \frac{1}{20} N_A \\ &\simeq \frac{6 \times 10^{23+3}}{18} \left( 1 - \frac{d + 2\epsilon}{18} \right) \epsilon \end{aligned} \quad (28)$$

となる。 $N_A = 6.0 \times 10^{23}$ はアボガドロ数。最後に放射能強度 $B$ と個数の関係式(17)を適用し、

微小量  $(d + 2\epsilon)/18 = O(10^{-6})$  を無視すると、

$$\epsilon \simeq 1.68 \times 10^{-17} B \quad (29)$$

をえる。

もし  $B = 1\text{Bq/L}$  であるならば、 $\epsilon \simeq 10^{-17}$  となるが、我々の考察では自然由来のトリチウムの量は  $10^{-20}$  程度であるという結果が出ているので、経済産業省や核融合科学研究所などは、地球の水の放射能強度として3桁も大きな値を選んでしていることになる。我々の得た結果と整合性を持たせるためには、地球の水1L当たりの放射能強度は  $B \simeq 10^{-3} \text{Bq/L}$  でなくてはならない。また、核実験の影響が残る「現在の地球のトリチウム濃度」としては1TU、つまり  $\epsilon \simeq 10^{-18}$  程度であるが、この値を採用すれば  $B \simeq 0.1 \text{ (Bq/L)}$  となる。

興味深いことに、東京電力が公表しているデータ [26] を見ると、

「地球の水の放射能の値は 0.1–1 Bq/L」

と（少しだけ）控えめの値を示している。

実は、日本沿岸の海水中のトリチウム濃度を測定した結果は、原子力規制庁<sup>11</sup>が業務委託した財団法人日本分析センターによって公開されている [27]。このデータベースで公開されている海水中のトリチウム濃度に関するデータは、原子炉周辺の海域に限られたものが多いが、それはデータ収集の主体が原子力規制委員会であるからであろう。したがって、自然界のトリチウム濃度、というよりは、原発周辺の海水のトリチウム濃度であることを念頭に置いてデータを読む必要がある。

参照したデータは2010年1月から2023年1月までの13年間のデータである。全部で8984の測定値データが取得できた。「全国」でのデータを選んだが、原発がない場所や海がない場所での陸水のデータは含まれていない。8984のデータのうち、67.5%が「検出限界以下」であった。検出されたケースは小数以下3桁の精度で記録されているので、検出限界は小数以下4桁であると思われる。つまり、検出限界以下の値としては0.0001Bq/Lとみなすことにする。5Bq/L以上の値を記録したのは50件(0.6%)に過ぎないが、最大値は340Bq/L、ついで180, 120Bq/Lであった。3桁を記録したのはこの3ケースのみで、いずれも福島原発周辺の海域での測定である。最後の2つは2012年の夏、最大値が観測されたのは2014年8月であった(貯蔵タンクからの大規模な漏水などの事故は特に報告されていない)。2桁の値が観測されたのは10Bq/Lから71Bq/Lの23件で、若狭湾を初めてとする関西電力の原子炉が多い印象である(23件)。残りは福島が8件、北海道

<sup>11</sup> 原子力規制庁とは、原子力規制委員会の事務局である。原子力規制委員会は、福島原発事故を受けて新たに設立された政府内の独立組織とされるが、もともとは経済産業省の組織であった。事故の分析が甘かったことから批判され、現在は環境省の管轄下にあるというが、その独立性に関してはいまだに賛否の議論がある。

が1件であるが、50Bq/L以上のトップ5に関しては全てが福島原発での測定である。しかし、多くの場所では検出限界以下の値を報告している。

1 Bq/L未満の結果は8687件で全体の96.7%にも及ぶ。おそらく1Bq/L以上の値が検出されたときというのは、冷却水の漏れがあったとか例外的なケースに相当するのではないかと想像する。そこで、1Bq/L未満のケースについての平均値が、おおよそ原子炉周辺の海域のトリチウム濃度の平均値になっているのではないかと仮定し、計算してみることにした。その結果は0.07Bq/Lであった。一方で、全てのデータに対しての平均値を取ると0.286Bq/Lとなった。最初の値は、我々の考察から導出された「自然界のトリチウム濃度」と比べやや高めではあるが、同じ桁であるという意味では一致している。一方で、2つ目の値は、東京電力が公表している自然界の海水の放射能強度の下限值とほぼ同じオーダー（桁）である。

このデータの分析を通してわかったのは次のとおりである。おそらく、原子炉の周辺の海域は定常的な冷却水の投棄によって自然界の4から10倍ほど汚染が進んでいると思われる。ただ、そのレベルは0.1Bq/L程度であって、政府が想定している1Bq/Lよりは一桁も小さい。また、宇宙線由来の「天然トリチウム」による自然界の水の放射能は（やはり我々の考察通り）0.01Bq/L程度であって、政府の想定する1Bq/Lよりは圧倒的に小さいだろうということである。

### 13. 結論

宇宙線によって定常的に発生し、12.3年でベータ崩壊して消滅する放射能物質である「水」の一形態、「トリチウム化水」(HTO)の自然平衡状態における地球全体での総量は、通常の水(H<sub>2</sub>O)に対して、10<sup>-20</sup>程度であろうと推定される。また、この推定値は、水におけるその濃度としては0.01Bq/L程度に対応する。日本の、トリチウム化水の海洋投棄（環境放出）の基準値180Bq/Lに比べると、自然の値は4桁も低い値になっている。

小鳥でも買おうと思ってペットショップにあなたが立ち寄った時、店主から「冷たいものでもどうぞ」と言われてコップ一杯の冷水を差し入れてもらう状況を想像してみよう。そこへ、ペットショップに買われているマスコット的なインコが飛びよってきて、あなたのコップの中にポチャリと一滴「やってしまった」とする。店主は慌てて謝りながら、コップを取り上げて、コップの10000倍の体積を持つ大鍋の中に満たされた氷水の中に、あなたのコップの冷水を入れて希釈し、再びその鍋から水をコップにすくって、「十分に薄めておりますから健康に問題はありません。安全安心です。どうぞ」とあなたに手渡した。果たして、あなたはその冷水を美味しく飲めるであろうか？

トリチウムに汚染された水を太平洋に流すことに対する是非は、科学的な考察だけでは済まなくなってきている気もするのである。

## 謝辞

トリチウムに関する情報の提供、その性質や分布に関する議論や考察をしてくださった、熊本大学大学院（理学系）地球環境科学の一柳錦平准教授と、東京新聞福島特別支局長の片山夏子氏、そして専修大学自然科学研究所の水崎高浩教授に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] カナダ原子力安全委員会（カナダ政府）報告書 (INFO-0799), "Health Effects, Dosimetry, and Radiological Protection of Tritium", p.2 (2010).
- [2] 八木浩輔、「原子核物理学」、朝倉書店 (1971).
- [3] Wikipedia, 「同位体」, "isotope", (<https://ja.wikipedia.org/wiki/同位体>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Isotope>)
- [4] 羽多野雄治、日本原子力学会誌 Vol.63, No.10 「原子炉施設でのトリチウム発生」 (2021).
- [5] 山西敏彦、経済産業省トリチウム水タスクフォース会議第1回（資料4-1）「トリチウムの物性等について」, ([https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20131225\\_01.html](https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20131225_01.html))
- [6] S. Okada, N. Momoshima, Health Phys. 65, 595-609 "Overview of tritium: characteristics, sources, and problems" (1993).
- [7] 松岡勝、日本原子力学会誌 Vol.34, No.7 「太陽からの高エネルギー中性子の観測」 (1992).
- [8] J.E. Phillips, C.E. Easterly, Oakridge National Laboratory Report (ORNL/TM-6402), "Sources of Tritium" (1980).
- [9] JAXA, 東京大学共同プレスリリース, 「太陽風はどう作られるのか?金星探査機「あかつき」が明らかにした太陽風加速」, [https://www.jaxa.jp/press/2014/12/20141218\\_akatsuki\\_j.html](https://www.jaxa.jp/press/2014/12/20141218_akatsuki_j.html)(2014)
- [10] IAEA GNIP, <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>
- [11] S. Terzer-Wassmuth, et al., Scientific Reports 12:10271 "High spatial resolution prediction of tritium in contemporary global precipitation" (2022).
- [12] eawag, スイス連邦水生科学技術研究所（水資源および飲料水部門）, (<https://www.eawag.ch/en/department/wut/main-focus/environmental-isotopes/tritium-h3/>)
- [13] J. Lovelock, "GAIA" Oxford University Press (1979).
- [14] MSD マニュアル, 「体内の水分について」 (<https://www.msdmanuals.com/ja-jp/ホーム/12-ホルモンと代謝の病気/水分のバランス/体内の水分について/>)
- [15] 小出裕章, 小出氏講演会「汚染水はなぜ流してはならないか」 (<https://www.youtube.com/watch?v=nxpV00bL5X8>, 福島県三春町, 2023)

- [16] 高田兵衛, 北海道大学大学院水産学部集中講義「トリチウム(三重水素)について」(<https://repun-app.fish.hokudai.ac.jp/course/view.php?id=473>, 2022年現在開講中)
- [17] 環境省HP, 「トリチウムの自然界での存在量」(<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r4kisoshiryo/r4kiso-02-05-18.html>)
- [18] 桜井弘, 「元素111の新知识ー引いて重宝、読んでおもしろいー」<ブルーボックス>(講談社, 1997) pp.30-34
- [19] wikipedia 「水#水の分布」, <https://ja.wikipedia.org/wiki/水#水の分布>
- [20] FNN プライムオンライン(福島テレビ, 2023年5月30日), 「原発処理水に含まれる「トリチウム」は水素の仲間です。ヒトの体内にも 福島第一原発の処理水海洋放出【福島発】」(<https://www.fnn.jp/articles/-/534629>)
- [21] 経済産業省, 「ALPS処理水って本当に安全なの?」([https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/hairo\\_osensui/shirou\\_alps/no1/](https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/hairo_osensui/shirou_alps/no1/))
- [22] NHK(2023年7月4日), 「影響は?安全性は?福島第一原発の処理水 海洋放出【Q & A】」([https://www3.nhk.or.jp/news/special/nuclear-power-plant\\_fukushima/news\\_02/article/article\\_04.html](https://www3.nhk.or.jp/news/special/nuclear-power-plant_fukushima/news_02/article/article_04.html))
- [23] 東京新聞 (2023年7月15日), 「Q&A トリチウムって何?」(<https://www.tokyo-np.co.jp/article/263261/>)
- [24] wikipedia, 「三重水素」(<https://ja.wikipedia.org/wiki/三重水素>)
- [25] 核融合科学研究所 HP, 「海水から無限の力を取り出す核融合」, ([https://www.nifs.ac.jp/j\\_plan/j\\_004\\_002.html](https://www.nifs.ac.jp/j_plan/j_004_002.html))
- [26] 東京電力HP, 「身の回りにも存在するトリチウム」(<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/tritium/>)
- [27] 環境放射能と放射線 HP, <https://www.kankyo-hoshano.go.jp>