

【解説】

トリチウム

～ その物理と化学 ～

工藤博司

東北大学名誉教授

〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 放射線教育フォーラム

E-mail: forum@ref.or.jp

(2024 年 2 月 19 日受理)

1. はじめに

本稿では、昨年 (2023 年) 12 月 10 日に当フォーラムがオンラインで開催した「トリチウム学習会」における標記題目の講演を元に、「トリチウムとは何か」を知るための基礎知見を紹介する。中学校の理科担当教員が授業設計の裏付け資料として役立つことを念頭に、専門用語の使い方にまで踏み込んで解説する。本稿の構成は下記のとおりであるが、A に力点をおき、B については筆者の専門領域 (放射化学・核化学) を外れることもあり、ALPS 処理の概要と海洋放出の現状紹介にとどめる。なお、〔 〕 内に注釈を付した。

A トリチウムとトリチウム水

- ・物理学的、化学的性質
- ・自然界での生成と存在
- ・原子力施設での発生
- ・生物学的挙動
- ・利用 (核融合炉燃料、自発光塗料、電池、 ^3He 調製)

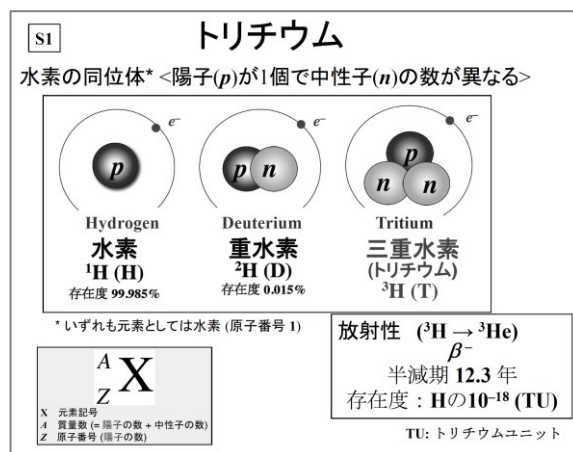
B 福島第一原子力発電所 ALPS 処理水の海洋放出

- ・多核種除去設備 (ALPS) のしくみ
- ・処理水の海洋放出
- ・海洋放出後のトリチウム水濃度の監視

2. トリチウム と トリチウム水

2.1. 物理学的、化学的性質

トリチウム (Tritium) は水素 (H) の同位体 (isotope) で原子番号 (Z) [原子核の陽子数] が 1、質量数 (A) [陽子数と中性子数の和] が 3 の元素である。その記号は ^3H と記すが、学術論文では T と記すこともある (図 S1)。質量数は元素記号の左肩に上付数字 (整数) で付すが、水素 (^1H : Hydrogen) は H と記すだけでよい。元素記号の左下に ${}_1\text{H}$ のように Z を付けることがあるが、元素記号と Z は常に同調するので、元素記号に



Zを付す必要はない。水素の同位体には重水素 (^2H : Deuterium) も存在し [Dとも記す]、水素 (H) を他の水素同位体と区別する際にプロチウム (Protium) と称することもある。本稿では、これらの水素同位体の元素記号を H、D および T と記す。なお、地球上における H と D の同位体存在度はそれぞれ 99.985% と 0.015% である。自然界には極微量ながら T も存在し、その割合は H 原子 10^{18} に対し 1 個程度であり、この比をトリチウムユニット (Tritium Unit: TU = 10^{-18}) ということがある。^{1, 2, 3)}

水素の同位体の中で T が他の二つと大きく異なるのは、T が放射性核種 (radionuclide) であることである。核種 (nuclide) とは Z に関わらず原子核の構成や状態が異なる元素であり、H、D および T はそれぞれが“個々に”核種である。現在、約 3,000 核種が知られており、その大半は放射性核種であり安定核種 (stable nuclide) は 271 種である。なお、同位体とは同一原子番号 (Z) で質量数 (A) の異なる核種のことであり、H、D および T はそれぞれが“水素の”同位体である。

トリチウムはベータ線 (β^- 線) を出してヘリウム-3 (^3He 、安定核種) になる [反応(1.1)]。



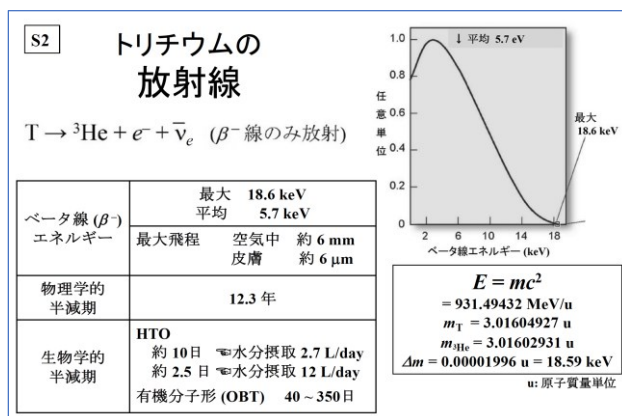
反応(1.1) の e^- (電子) が β^- 線であり、原子核から放出される電子のことを β^- 線と称する。ただし、ベータ線という用語には β^+ 線 [原子核から放出される陽電子 (e^+ : positron) ; e^- の反粒子] も含まれるので、使い方に気を付けなければならない。

トリチウムの原子核の中に二つある中性子 (n) の一つが反応 (1.2) によって陽子 (p) になるので、原子番号 (Z) が 1 つ増えて $Z=2$ のヘリウム原子になる [生成直後は $^3\text{He}^+$ イオンの状態にあり真空中ではその状態にとどまるが、物質中では周りにある電子を取り込んですぐ ^3He 原子になる]。ここで、中性子数と陽子数の和 [質量数 (A)] は 3 と変化しないので壊変生成物は ^3He ということになる。

なお、原子核を構成する n と p のことを核子 (nucleon) と呼び、両者は素粒子であるクォーク (quark) 3 個からできている。中性子はアップクォーク (u) 1 個とダウルクォーク (d) 2 個、陽子は u が 2 個と d が 1 個から成る [便宜的に、それぞれ n (udd) および p (uud) とも記す]。 u の電荷は $+2/3$ 、 d の電荷は $-1/3$ なので、3 個のクォークの電荷を合算して n の電荷は 0 (中性)、 p の電荷は $+1$ となる。また、 n の質量 (m_n) は 1.008664 u、 p の質量 (m_p) は 1.007276 u と m_n が m_p よりやや大きいので反応 (1.2) は発熱反応であり容易に β^- 線を放出する [u: 原子質量単位]。

トリチウムが出す β^- 線の最大エネルギーは 18.6 keV であるが図 S2 のように分布し、平均値は 5.7 keV となる [β^- 線のエネルギーがこのような分布するのは壊変の際に反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) が運動量の一部を持ち去るため]。ベータ線の最大エネルギーはアインシュタインの特殊相対性理論から導かれる $E=mc^2$ に基づいて計算することができ、トリチウムの質量

[$m_{\text{T}} = 3.01604927$ u (原子質量単位)] と β^- 壊変生成物である ^3He の質量 [$m_{^3\text{He}} = 3.01602931$ u] の差 [$\Delta m = 0.00001996$ u] から 18.59 keV と求められる。この β^- 線の最大エネルギーを高い精度で実測することはかなり難しく、現在でも精密測定が続けられていて、理論値と実測値の比較からニュ



ートリノ (ν) の質量を求めることは現在も進行中の最先端の研究課題の一つである。⁴⁾

トリチウムの β -線の最大エネルギーはカリウム-40 (^{40}K) の 1,320 keV [1,460 keV のガンマ線も放出] やセシウム-137 (^{137}Cs) の 1,176 keV [661 keV ガンマ線も放出] に比べてかなり低く、 β -線の飛程 (移動距離) は空気中で約 6 mm、ヒトの皮膚 (あるいは水中) で約 6 μm と短く外部被ばくの心配はない (図 S2)。ただし、大量のトリチウムを体内に取り込んだ場合には内部被ばくに気を付けなければならない。

トリチウムの β -壊変の物理学的半減期は 12.3 年であるが、生物学的半減期はトリチウム水 (HTO) の化学形で口から摂取した場合には成人で 10~12 日である。この値は水分摂取量に依存し、1 日あたり 2.3 L (成人の平均) の水分を摂取した時の値であり、もし 1 日に 12 L の水分を摂取すると 2.5 日に短縮される [誤って大量のトリチウムを体内に取り込んだ時には、ビールやスポーツドリンクを飲んで排尿を促すとよい]。有機分子の化学形のトリチウム (OBT: Organically Bound Tritium、組織結合トリチウム) の生物学的半減期は約 40~350 日とされている [組織により異なる]。⁵⁾

ヒトの体内でのトリチウムの挙動については後述するが、トリチウムが放出する β -線のエネルギーが低いことと、HTO の化学形にあるトリチウムの生物学的半減期がヨウ素-131 (成人で 80 日) やセシウム-137 (成人で 90 日) などに比べて短いことを考慮すると、トリチウムが人体に及ぼす生物学的影響は ^{131}I や ^{137}Cs に比べて小さい。図 S3 に示すように実効線量係数 [1 ベクレル (Bq) あたりの実効線量 (mSv : ミリシーベルト)] を比較してみるとそれが分かる。トリチウムの値 (0.018 mSv/Bq) は ^{40}K のほぼ 1/340、 ^{90}Sr の 1/1500、 ^{137}Cs の 1/700 である。⁶⁾ 実効線量 (effective dose) とは放射線被ばくの生物学的影響を評価するための指標の一つで、異なる種類の放射線 (α 線、 β 線、 γ 線など) が生体組織 (臓器) に与える損傷の相対的な影響を考慮して、被ばくした個体に対する総合的な影響を評価するための線量である。

比較のため図 S3 にカリウム-40 の値を載せたのは、 ^{40}K (半減期 13 億年) は地球が誕生した時から存在し、人類は大昔から食物を通して常に体内に取り込んできた放射性核種だからである。カリウムは人体に欠かせないミネラルであり、神経伝達、筋肉収縮、水分バランスの調節などさまざまな生理機能に関与している。体重の約 0.2% を占めるカリウム原子の 1 万分の 1 は放射性の ^{40}K [同位体存在比 0.0117%: β -線と γ 線放出] なので、体重 60 kg のヒトの体内には約 4,000 Bq の ^{40}K が存在し、私たちは常にその放射線受けている [内被ばく : 年間 0.17 mSv]。それでも、そのせいで健康被害を受けた人はいない。毎日の食事によって取り込まれ、定常的に体内に存在する放射性核種は他に ^{14}C (2,500 Bq)、 ^{87}Rb (500 Bq)、 $^{210}\text{Pb}+^{210}\text{Po}$ (20 Bq) などがあり、トリチウムも 100 Bq ほど含まれる [放射能の値 (Bq) は体重 60 kg あたりに換算]。これらの核種から受ける内部被ばくの総計は 1 年間で約 1 mSv と見積られている。いずれにせよ、トリチウムがヒトの健康に与える生物学的影響は他の放射性核種に比べると小さい。

ここで、ベクレル (Bq) という単位に触れておきたい。これは放射能の単位であり、1 Bq は放射性核種の 1 秒あたりの壊変数と定義されている。この数値から放射性核種の原子数を算出することができ、トリチウム 1 Bq の T の原子数は 5.6×10^8 個になる。このように、“放射能”とは放射性核種の“量”を表す学術用語であるが、定性的には「原子が放射線を出す性質あるいは現象」という意味もある [ベクレルとキュリー夫妻が *radioactivité* と唱えた]。放射能とは「放射線を出す“能力”」と説明されることが多いが、それは必ずしも正しくない。歴史を

S3 実効線量係数 (成人、経口摂取) mSv/Bq	
T (^3H)	0.018
^{40}K	6.2
^{90}Sr	28
^{137}Cs	13

振り返ってみると radioactivité (英語では radioactivity) を「放射能」と和訳した際の“能”に能力の意味はない。⁷⁾

水素原子 (H) が酸素原子 (O) と結合すると水分子 (H₂O) ができるのと同様に、トリチウム原子 (T) が O と結合するとトリチウム水 HTO ができる。化学形が DTO と T₂O のトリチウム水も存在するが福島第一原子力発電所の ALPS 処理水に含まれるトリチウム水はほぼ HTO と考えてよい。図 S4 に示すよう

に水の同位体分子 (isptopomer) には他に HDO と D₂O を加えて 6 種類存在する。この図には水素分子 (H₂) の 6 種類の同位体も含め、水素同位体分子のいくつかの熱力学的性質を示す。³⁾

H₂O も HTO も水分子であり化学的性質に違いはない。しかし、H 原子の質量 (m_H) は 1.07825 u、D 原子の質量 (m_D) は 2.014101 u、T 原子の質量 (m_T) は 3.016049 u なので、水素同位体を含む水の質量 (分子量) はかなり異なるので、熱力学的性質に大きな違いが現れる (同位体効果)。この効果を利用すると実験室での HTO と H₂O の分離はそれほどむずかしいことではない。蒸留、電気分解、クロマトグラフィーなどの手法を使ってトリチウムの分離・濃縮は可能であり、その一例として、6 種類の水素分子同位体 (気体) のガスマロマトグラムを

図 S5 に示す。⁸⁾ 条件にもよるが、30 分程度で 6 種類の同位体をきれいに分離することができる。ここで興味深いのは、トリチウムの壊変製生成物である ³He ガスのシグナルも検出されることである [T₂や DT ガスの貯蔵容器中には敢えて分離しない限り常に ³He ガスが共存する]。

ALPS 処理水からの HTO 分離は困難と伝えられている。実験室規模では可能とはいえ、130 万トンもの膨大な量の ALPS 処理水から希薄なトリチウム水 (HTO) を分離するためには莫大なエネルギーと時間を要することを考慮すると現実的とはいえず、安全を確保した上で、微量の HTO を含んだまま処理水を海水放出することは合理的な施策と考えてよい。

2.2. 自然界での生成と存在

天然に存在するトリチウム (T) は、大気上層で宇宙線 [二次宇宙線に中性子 (n)、陽子 (p)、重陽子 (d)、 μ 粒などが存在する] と空気中の窒素や酸素との下記核反応によって生成する。



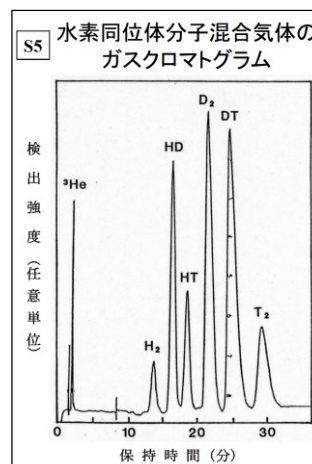
生成した T は大気中の水蒸気分子 (H₂O) の H との交換反応によりトリチウム水 (HTO) となり、降雨によって地表に降下する。自然界における河川水のトリチウム濃度は元々 0.4 Bq/L ほどであったが、1954 年から 1963 年までの大気中核実験で 240 EBq [E: エクサ (=10¹⁸)] ものトリチウムが放出され、河川水の濃度は一時 250 Bq/L に達した。1963 年に締結された部分的核実験禁止条約 (Partial Test Ban Treaty: PTBT) で大気中核実験が禁止されて以来その量は半減期 (12.3 年)

S4 水素同位体分子の熱力学的性質
(同位体効果)

水素	H ₂	HD	D ₂	HT	DT	T ₂
分子量 (u)	2.016	3.022	4.028	4.024	5.030	6.032
沸点 (K)	20.39	22.13	23.67	22.92	24.38	24.91

水	H ₂ O	HDO	D ₂ O	HTO	DTO	T ₂ O
分子量 (u)	18.015	19.032	20.028	20.023	21.029	22.031
密度 (g/mL)	1.000	—	1.105	(1.10)*	—	1.215
融点 (°C)	0	—	3.79	(3.7)*	—	4.49
沸点 (°C)	100	—	101.4	(101.4)*	—	101.5

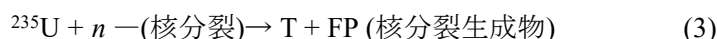
* 推定値



に沿って減少し、今では 5~10 EBq/L [全地球の総量は 52 EBq] になっている。⁹⁾

2.3. 原子力施設での発生

現在では、原子力事象にともなって反応 (3) ~ (5) によってトリチウムが発生し、世界中の原子力施設 [各国の原子力発電所と英・仏の核燃料再処理施設] から放出されており、その総量は年に 20 PBq [P: ペタ (=10¹⁵)] と見積もられる。



反応 (3) はウラン (²³⁵U) の三体核分裂であり、軽水炉 (BWR、PWR) ではこの反応により核燃料の中にトリチウムが発生する。重水 (D₂O) を減速材と冷却水の両方用いる重水炉 [カナダ製 CANDU 炉など] では、反応 (3) に加えて反応 (4) によって冷却水中にも多量の T が発生する。BWR の制御棒として使われる B₄C 中でも反応 (5) により T が発生する。使用済みの核燃料は最終的に再処理施設に移して処理するので、再処理施設からはかなりの量のトリチウムが HTO として海洋に放出される (図 S6)。この図には、物質量を実感できるように、放射能 (TBq=10¹² Bq 単位) から求めた HTO のグラム数も示す。原子炉からの海洋放出に比べて、再処理施設からの放出量が桁違いに多く、カナダの重水炉 (CANDU 炉) からの放出量が軽水炉に比べて多いことがわかる。

人為的にトリチウムをつくる際には次のような反応を利用する。



将来、D-T 核融合炉の初装荷燃料として用いる大量のトリチウムを製造する際には反応 (6) を利用し、核融合炉ブランケットでのトリチウム増殖には反応 (6) と (7) が関与する [D-T 核融合反応では速い中性子 (14 MeV) が発生するのでまず反応 (7) が起きて T が 1 個生成する。この時生じる中性子 (n') がブランケット内で運動エネルギー失って熱中性子 (0.025 eV) になると反応 (6) を起こし T をもう 1 個生成する。すなわち、D-T 反応で T を 1 個消費しても T が 2 個生じるので増殖につながる]。¹⁰⁾

実験室でトレーサーとして使う微量のトリチウムの製造には反応 (6) に加え反応 (8) もよく使われる。ヘリウム-3 (³He) ガスを石英アンプルに充填し、研究用原子炉で熱中性子を照射すると容易に得られるが、大量製造には向かない。ちなみに、物理実験などで使う市販の ³He は、大量に製造した T の壊変生成物として得られる [地球上の ³He の存在比は 0.0001% 程度と非常に小さいが、月には大量に存在することが知られている]。

2.2 節と 2.3 節の記述をトリチウムの環境動態の観点でまとめると図 S7 のようになる。⁹⁾ 自然界で発生するトリチウム

S6 原子力施設からのトリチウム放出

年間海洋放出量		
事 象	TBq	g (HTO)
日・全原子力発電所 55 基 (2010 年)	380	7.1
加・ダーリントン原子力発電所 4 基 (2012 年)	190	3.5
日・六ヶ所再処理工場試験運転 (2007 年)	1,800	33.5
仏・ラアーク再処理施設 (2015 年)	13,000	242
福島第一原発処理水中の存在量 (2021 年 4 月)	780	14.5
海洋放出量 (年間最大、2023 年 8 月開始)	22	0.4

TBq (テラベクレル=10¹² Bq)

は主に宇宙線と大気との反応でつくられ、大半は降雨として地表に降下し河川水として海洋に移行する。それに加え、地殻の中に存在するウラン (^{238}U) やリチウム (^6Li) に中性子が当たって発生するトリチウムもわずかながらある。

これらのトリチウムの総計は 1~1.3 EBq であり、ほぼ平衡状態にある〔宇宙線による生成と壊変による減衰 (半減期 12.3 年) が均衡〕。ただし、過去の大気中核実験 (1954~1963 年) によって発生したトリチウム (総量 240 EBq) が 60 年を経た現在でもまだ 5.7 EBq ほど残存しており、平衡状態にあるトリチウムの量 (1~1.3 EBq) を上回っている。

全世界の原子力施設〔主に原子力発電所と核燃料再処理施設〕から放出されるトリチウムの総量 (約 0.02 EBq) は自然界のトリチウムの全量〔前記の平衡量と大気中核実験由来の量の和 (約 7 EBq)〕に比べると 2 桁以上少ない。ただ、図 S7 の右下にあるように、将来のエネルギー源として期待される核融合発電で最初に実現するトリチウム (T_2) と重水素 (D_2) を燃料とする D-T 核融合炉では、1 基あたり 3~5 kg (1~2 EBq) のトリチウムが燃料として装荷されることになり、その量は自然界で平衡状態にあるトリチウムの量に匹敵する。核融合炉の実現は 20 年以上先のことになるだろうが、大量のトリチウムを扱う安全技術の確立は当然のこととして、大量のトリチウムの使用を受け入れる社会になっていなければならない。¹⁰⁾

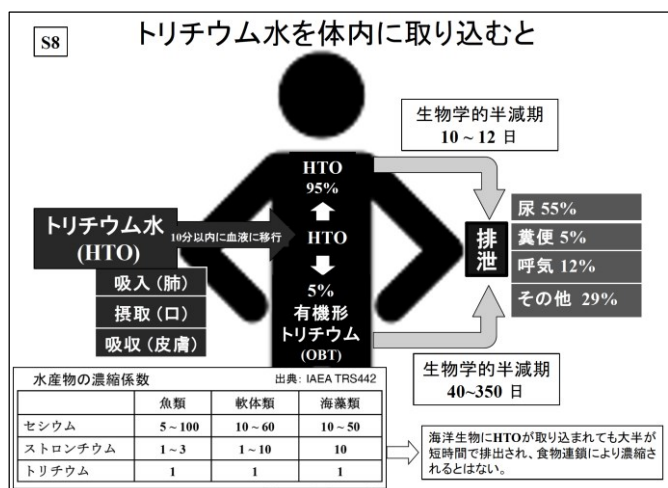
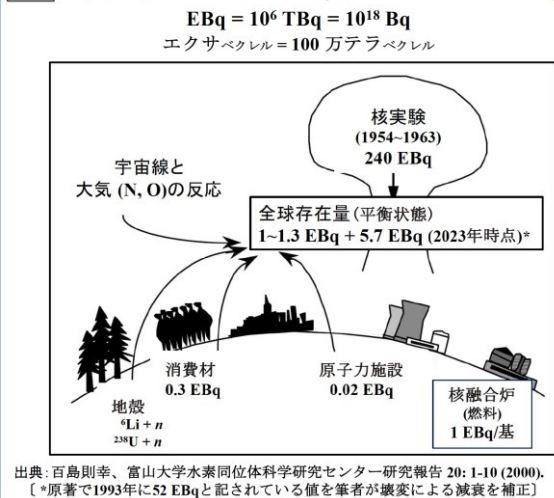
2.4. 生物学的影響

体内に取り込まれたトリチウム水 (HTO) の挙動を図 S8 に示す。肺や口あるいは皮膚からトリチウムが HTO 化学形で取り込まれると、10 分以内に血液中に移行し全身を巡る。その 95% はそのまま HTO として体内を循環し、1 日に 3~4 L の水分を摂取 (成人の平均) する通常の生活では 10~12 日の生物学的半減期で尿、糞便、呼気として体外に排出される。一部 (約 5%) は体内で有機分子形の組織結合トリチウム (OBT) になるが、この化学形のトリチウムの生物学的半減期は結びつく部位 (臓器) などによって異なり、40~350 日と幅がある。いずれにしても、最後は体外に排泄される。¹¹⁾

海洋生物に取り込まれた HTO も人体と同じような挙動を示し、大半が比較的短時間で排出されるので、食物連鎖で生物体内に濃縮される恐れはない。図 S8 の左下の表に水産物の濃縮係数を示すが、トリチウムの濃縮係数は 1 とあり濃縮されないことが分かる。

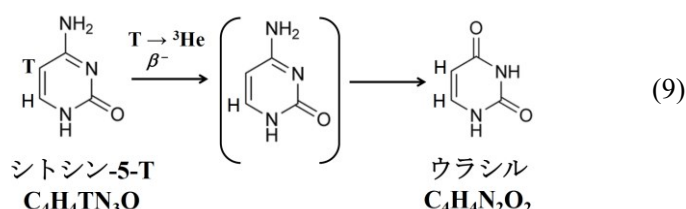
この図には、ヒトがトリチウムを HTO の化学形で取り込んだ場合の挙動を示したが、気体のトリチウム (T_2 、HT) を肺から取り込んだ場合、その大部分はその

S7 環境中のトリチウム (発生源と年間発生量)



まま呼気として排出され、わずかに 0.1~ 5%が体内に残留して HTO になる。HTO になったトリチウムは取り込み後 20 分ほどで尿中に検出される〔誤って取り込んだ場合には尿検査で内部被曝の有無を確認できる〕。トリチウムガス (HT) が HTO と同程度の内部被ばく線量を与えるためには HTO の 1500 倍の量の HT が必要であり、法令による規制も 1500 倍緩く設定されている。

組織結合トリチウム (OBT) については、 β -線による内部被曝だけではなく、元素が水素からヘリウム (^3He) へと変化することにもなる影響も研究されている。¹²⁾ 水素原子〔あるいは水素イオン(H^+)〕は反応性に富む化学種であり、生体内の炭素や酸素と容易に結合するが、壊変生成物である ^3He は不活性元素である。そのため、分子内で C-T 結合している T が ^3He になるとその位置の C-T 結合がなくなる。その結果、分子内で水素原子の再配列が起きて別の分子になることがある。一例として次のような興味深い知見が得られている。DNA の構成要素であるアミノ酸をトリチウムで標識した〔分子内のある位置の H を T で置き替えた〕トリチウム標識シトシン (cytosine-5-T) が β -壊変後にウラシル (uracil) に変化する反応 (9) であり、核変換効果 (transmutation effect) と呼ばれる。



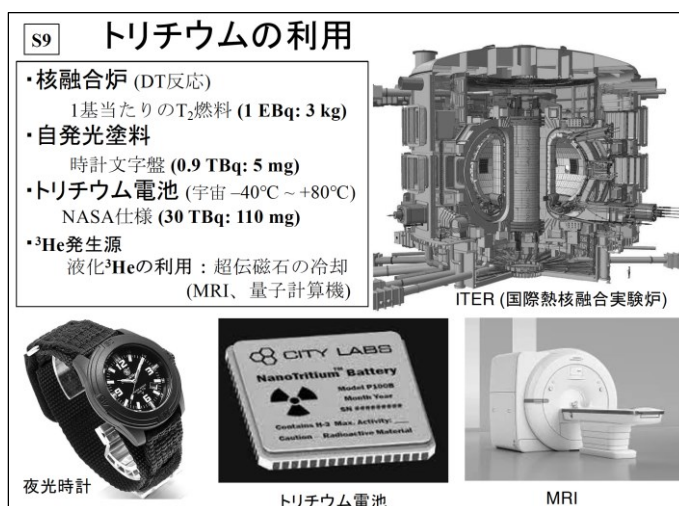
このような反応が DNA で起きると遺伝情報が書き換えられる恐れがあるが、50 兆個ともいわれる人体の細胞のほんの一つか二つでこのようなことが起きても何ら問題はなく、多量の HTO を摂取しない限り心配する必要はない。

2.5. トリチウムの利用 (核融合炉燃料、自発光塗料、電池、 ^3He 調製)

図 S7 で消費材をトリチウム発生源の一つとして挙げているが、これは主に夜光時計の文字盤などに使われる自発光塗料の製造に由来する。海外では軍隊用の腕時計や航空機の計器用の自発光塗料の励起源としてトリチウムが用いられており、その製造過程では数百ミリグラム (100 TBq ほど) の T が使われているが、日本では 1960 年代後半以降使用されていない。

トリチウムは他にも様々な分野で利用されている (図 S9)。その一つがトリチウム電池であり、トリチウムから出る β -線 (e^-) を直接電流に変換する半導体を組み込んだ電池 (betavoltaic battery: 0.8 ~ 1.1 V) である。¹³⁾ 電流密度は低いが (150 nA/cm²) 過酷な宇宙環境 (-40°C ~ +80°C) でも長期間使用可能な手頃な電池として NASA の依頼により米国で製造されている。この電池は医療でも使われていて、心臓ペースメーカーなどの健康維持装置の電源として体内に埋め込まれ、10 年間交電池交換なしで使えるので重宝されている。

まだ先のことになるが、大量のトリチウムを必要とするのが核融合炉であ



る。前節でも述べたが、電気出力 1 GW の発電用の D-T 核融合炉を想定すると、1 基あたり 3~5 kg (~2 EBq) のトリチウム (T_2 ガス) が燃料として必要になる。実際には重水素 (D_2 ガス) と容量比 1:1 で混合して使用する。重水素は海水中に無尽蔵に存在するので海水から取り出して使えばよいが、トリチウムは反応 (6) を使って製造しなければならない。そのためには 6Li のアルミニウム合金などを原子炉で長時間照射し、合金中に生成した T_2 と 3He を分離し、純度の高い T_2 に精製するのが一般的である。⁸⁾ 他に、重水炉で反応 (4) によって生成するトリチウム (DTO) から T_2 を分離・精製することも有力な手段である。実際、カナダのダーリントンにあるオンタリオ原子力発電所 (OPG: Ontario Power Generation) に備えられているトリウム除去設備 (Tritium Recoval Facility) は年間 2 kg (0.7 EBq) のトリチウム回収能力をもち、かなりの量を T_2 ガスとして蓄えている。¹⁴⁾ フランスに建設中の国際熱核融合実験装置 (ITER) における D-T 核融合実験で使用する燃料トリチウム (約 3 kg) はカナダからの供給を想定している。¹⁰⁾

トリチウムの壊変生成物であるヘリウム (3He) は貴重な資源である。現今、MRI (Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴画像) は医療に欠かせない検査手段になっているが、その装置は超伝導磁石を液体ヘリウム温度 (4 K) に冷却して使用する。通常は 4He を液化して用いるが、わが国にヘリウム資源はなく、主に米国から輸入している。ちなみに、 4He は地殻にあるウラン (^{238}U) やトリウム (^{232}Th) から放出される α 粒子 (4He) が地下に溜まったものである。世界の生産量の 34% を占める米国でも最近、資源の枯渇が問題視されている。その対応策の一つとして 3He の利用が検討されていて、カナダ政府に 3He の供給を依頼しているほどである。前述のダーリントンにあるトリチウム除去設備では、年間約 7,000 L (標準状態) の 3He ガスを調製していると伝えられている [1 年間で T (半減期 12.3 年) の 5.6% が 3He になる]。¹⁴⁾

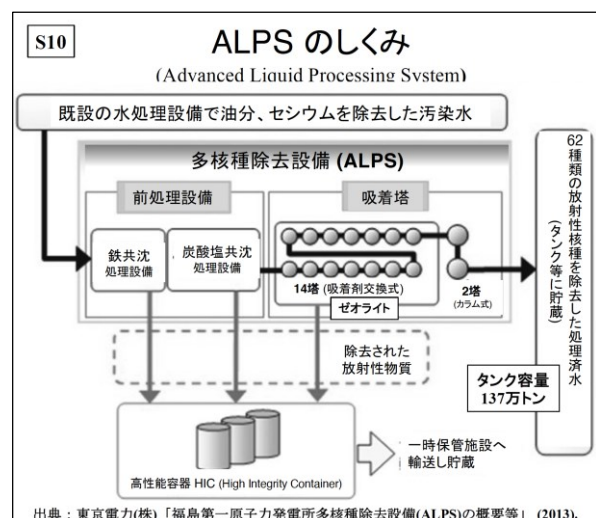
3. 福島第一原子力発電所 ALPS 処理水の海洋放出^{15, 16)}

福島第一原子力発電所の敷地内では、事故で破損した原子炉を通過する水には多種類の放射性核種が含まれる。この汚染水から多核種処理設備 (ALPS: Advanced Liquid Processing System) で 62 核種を取り除いた“処理水”をタンク (容量 137 万トン) に貯蔵しているが、その量は既に 133 万トンに達したことから、政府は昨年 (2023 年) 8 月 22 日の廃炉・汚染水・処理水関係閣僚会議で ALPS 処理水の海洋放出を決定した。

処理水には ALPS で除去されない放射性核種トリチウムが含まれており、その安全性についての政府の説明は必ずしも一般市民に伝わっていない。そこで、当フォーラムは昨年 12 月 10 日に「トリチウム学習会」をオンラインで開催し、「トリチウムおよびトリチウム水とは何か」について学ぶ機会を設けた。本稿の前半では「トリチウムとは何か」について詳しく述べたが、次節では「処理水海洋放出」の概要を簡単に紹介する

3.1. ALPS のしくみ

ALPS はその名の通り多核種処理設備であり、吸着材 (主としてゼオライト) を充填した 14 段の吸着塔に汚染水を通し 62 核種を取り除くが (S10)、トリチウム (HTO) を除去すること



はできない。2.1.節で述べたように実験室規模であれば HTO を除去する方法はいくつかあるが、130 万トンもの処理水中に微量に含まれる HTO を取り除くことは必ずしも得策ではなく、海洋放出を決めた政府の判断は間違っていないと考えてよい。

3.2. 処理水海洋放出の手順と濃度監視

海洋放出にあたって安全確保の観点から見逃せないのは、何よりもまず、処理水中にトリチウム以外の放射性核種が規制値を超えて含まれていないことの確認である。ALPS では 62 核種を取り除くことができるとされているが、

原子力規制委員会が法令基準未満に抑えるよう求めた 29 核種 (図 S11) の実測濃度は全て基準未満であった [ALPS では他に ^{59}Fe 、 ^{58}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{65}Zn 、 ^{81}Rb 、 ^{89}Sr 、 ^{91}Y 、 ^{95}Nb 、 ^{103}Ru 、 $^{103\text{m}}\text{Rh}$ 、 ^{106}Rh 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{113\text{m}}\text{Cd}$ 、 $^{115\text{m}}\text{Cd}$ 、 $^{119\text{m}}\text{Sn}$ 、 ^{123}Sn 、 ^{126}Sn 、 ^{124}Sb 、 $^{123\text{m}}\text{Te}$ 、 ^{127}Te 、 $^{127\text{m}}\text{Te}$ 、 ^{129}Te 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 ^{135}Cs 、 ^{136}Cs 、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 、 ^{140}Ba 、 ^{141}Ce 、 ^{144}Pr 、 $^{144\text{m}}\text{Pr}$ 、 ^{146}Pm 、 ^{148}Pm 、 $^{148\text{m}}\text{Pm}$ 、 ^{152}Eu 、 ^{153}Gd 、 ^{160}Tb 、 ^{241}Pu 、 $^{242\text{m}}\text{Am}$ 、 ^{243}Am 、 ^{242}Cm 、 ^{243}Cm を除去できる]。

トリチウム以外の放射性核種の濃度が基準値未満であることを確認した後、ALPS 処理水は 100 倍以上の海水で希釈して岸から約 1 km 沖の放出口から太平洋に放出する。その HTO 濃度は WHO (世界保健機関) が飲料水の基準としている濃度 (10,000 Bq/L) の 1/7 に相当する 1,500 Bq/L 未満と定められている。図 S12 に示すように、2023 年度には 31,200 トンの処理水 [トリチウムを約 5 兆ベクレル (5 TBq、HTO として約 93 mg) を含む] を 4 回に分けて、1 回に 7,800 トンずつ放出することになっており、第 1 回は 2023 年 8 月 24 日~9 日 11 日、第 2 回は 10 月 5~23 日、第 3 回は 11 月 2~20 日にわたって実施された [第 4 回は 2024 年 2 月に予定]。

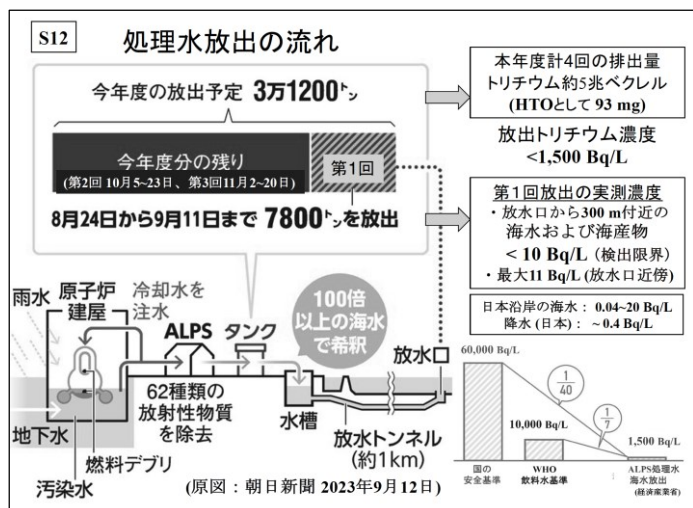
3.3 海洋放出後の HTO 濃度の監視

東京電力は放水口から 3 km 圏の 10 カ所で海水を採取し、海水中のトリチウム濃度を常時監視している。また、20 km 圏内で従来から続けていた魚介類中の放射性核種 ($^{134,137}\text{Cs}$ と ^{90}Sr) 濃度のモニタリングを強化するとともにトリチウム濃度の測定を加え、その結果を福島県の確認を経て随時公開している。^{15, 16)}

第 3 回までの海洋放出後の海水中のトリチウム濃度はほとんどが検出限界 (10 Bq/L) 未満であったが、10 Bq/L 前後の値を放出口近傍で検出したとの報告が 3 回あった [10 Bq/L (8 月 31 日)、9.4 Bq/L (10 月 7 日)、11 Bq/L (10 月 9 日)]。

S11 海洋放出前のALPS処理水中の核種
タンク10 基の水 (計約9,000 トン) の分析結果
(2023年9月21日 東京電力発表)

原子力規制委員会が定めた下記29核種の濃度は全て法令基準未満			
炭素-14	^{14}C (5.73 ky)	セリウム-144	^{144}Ce (285 d)
マンガン-54	^{54}Mn (312 d)	プロメチウム-147	^{147}Pm (2.6 y)
鉄-55	^{55}Fe (2.7 y)	サマリウム-151	^{151}Sm (90 y)
コバルト-60	^{60}Co (5.3 y)	ユロビウム-154	^{154}Eu (8.6 y)
ニッケル-63	^{63}Ni (100 y)	ユロビウム-155	^{155}Eu (4.7 y)
セレン-79	^{79}Se (65 ky)	ウラン-234	^{234}U (250 ky)
ストロンチウム-90	^{90}Sr (29 y)	ウラン-238	^{238}U (450 My)
イットリウム-90	^{90}Y (2.67 y)	ネプツニウム-237	^{237}Np (2.1 My)
テクネチウム-99	^{99}Tc (210 ky)	プルトニウム-238	^{238}Pu (87.7 y)
ルテニウム-106	^{106}Ru (1.0 y)	プルトニウム-239	^{239}Pu (24 ky)
アンチモン-125	^{125}Sb (2.7 y)	プルトニウム-240	^{240}Pu (6.56 ky)
テルル-125m	$^{125\text{m}}\text{Te}$ (58 d)	アメリシウム-241	^{241}Am (433 y)
ヨウ素-129	^{129}I (15.7 My)	キュリウム-244	^{244}Cm (18.1 y)
セシウム-134	^{134}Cs (2.1 y)	プルトニウム241	^{241}Pu (14.4 y)
セシウム-137	^{137}Cs (30.1 y)	※ 括弧内の数値は半減期 (d 日, y 年, ky 千年, My 百万年)	



4. おわりに

トリチウムは放射性核種であるが、放射線の安全取り扱いでよく検討対象になるストロンチウム (^{90}Sr)、ヨウ素 (^{131}I) あるいはセシウム (^{134}Cs 、 ^{137}Cs) などに比べて環境や生体に及ぼす影響はかなり小さい。2023 年 8 月に ALPS 処理水の海洋放出が開始されたが、原子力規制委員会が定めたトリチウム排出基準 (1,500 Bq/L) は WHO (世界保健機関) が飲料水の基準とする濃度 (10,000 Bq/L) を大きく下回っている。仮に、WHO の基準濃度のトリチウム水 (HTO) を含む水を 1 L 飲んだとしてもその内部被ばく線量は 0.00018 mSv であり、¹¹⁾ 私たちの身体に例外なく存在する放射性カリウム (^{40}K) による内部被ばく線量 [年間 0.17 mSv] に比べてはるかに低い。実際、海洋放出後の海水中のトリチウム濃度の実測値は 10 Bq/L 前後と報告されており、^{15, 16)} この放出基準が守られている限り、環境や生体への影響を心配するには及ばない。

トリチウムがさまざまな領域で利用されていることはあまり知られていない。まだ先のこととはいえ、核融合炉ではトリチウムが燃料として大量に使用される [T_2 として 1 基あたり 1 EBg 以上 (3~5 kg)]。将来、核融合発電が社会に受け入れられるためには、多くの人が「トリチウムとは何か」を知り、安全を確認できることが前提になる。本稿がその一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) Souers, P. C., “Hydrogen Properties for Fusion Energy”, University of California Press (1986).
- 2) IUPAC, “Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry”, 1st Ed., Blackwell Scientific Publ., Oxford (1988).
- 3) 工藤博司, 「トリチウムの物理化学的性質と同位体効果、トリチウムの化学 — 基礎から応用まで」, 日本原子力学会トリチウム化学研究専門委員会編, 26-32 (1982).
- 4) Beringer, J. *et al.* (Particle Data Group), *Phys. Rev.* **D86**, 010001 (2012).
- 5) 国際放射線防護委員会 (ICRP), Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4 Inhalation dose coefficients. *Annals of the ICRP*. 25 (1995).
- 6) 国際放射線防護委員会 (ICRP), *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60* (2012).
- 7) 工藤博司, 「用語『放射能』放射能を正しく伝えるために, 放射線教育フォーラムニュースレター No. 59 (2014).
- 8) 工藤博司, 「核融合炉燃料トリチウムの製造と化学」, *Radioisotopes*, **34**, 432-441 (1985).
- 9) 百島則幸, 「トリチウムの環境動態」, 富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 **20**, 1-10 (2000).
- 10) 工藤博司, 「核融合炉とトリチウム ～ 新エネルギーの利用に向けて ～」, *放射線教育* **26** (1), 3-12 (2022).
- 11) 志村勉, 山口一郎, 寺田宙, 温泉川肇彦, 牛山明, 「トリチウムの生体への影響と低線量放射線影響研究の課題」, *保健医療科学* **70** (2), 160-165 (2021).
- 12) Evans, E. A., “Tritium and its Compounds”, 2nd Ed., Butterworth, London (1974).
- 13) Colozza, A. J. and Cataldo, R. L., “Low Power Radioisotope Conversion Technology and Performance Summary”, NASA/TM-2018-219940 (2018).
- 14) *The Canadian Press*, January 4, 2011.
- 15) 東京電力 HP, <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/oceanrelease/>
- 16) 福島県 HP, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/moni-k.html>