

ちなみに、将来の核融合炉では大量のトリチウム (1 基当たり 5~10 kg) を燃料として用いる。その量は地球上の現在のトリチウム存在比 (5~10 TU) と同程度であり、万が一にも炉外に放出されることがないように、取り扱いには細心の注意を払わなければならない。

3.3.2 核融合炉燃料トリチウムの製造と貯蔵

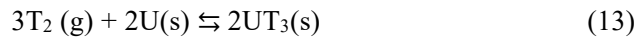
ITER の運転開始時に必要とされる初装荷トリチウム (3~5 kg) は CANDU 炉から回収したトリチウムを大量に保管しているカナダから供給される予定であるが、一般的には反応 (10) によって製造する。その一例として、1980 年代に日本原子力研究所 (原研) で開発した核融合燃料トリチウムの製造法を簡単に紹介する (図 7)。^{2, 13)}

リチウム含有物質 (ターゲット) を原子炉で照射するが、反応 (10) は発熱反応であり照射中に高温になるため、ターゲットの健全性が保たれる物質として熱除去の容易なリチウム-アルミニウム (${}^6\text{Li-Al}$) 合金を用いた。 ${}^6\text{Li}$ の天然存在比は 7.6% であるが、製造効率を上げるため ${}^6\text{Li}$ を 95% にまで濃縮したリチウムを用いて ${}^6\text{Li-Al}$ 合金の板状ターゲット (2 mm × 50 mm × 20 mm) を調製した。

そのターゲットを大洗研究所の材料試験炉 (JMTR) の冷却水に浸けた状態で 80 日間照射した後東海

研究所に移送し、アイソトープ製造棟に設置したトリチウム製造装置 (Tritium Extraction System; TREX、図 8) の真空電気炉に装填して約 700°C にまで加熱して合金中に生成した気体状のトリチウム T_2 とヘリウム ${}^4\text{He}$ [反応 (10) で T と同時に生成] を抽出した。ウランゲッター-1 (精製用) に導いて T_2 と ${}^4\text{He}$ を分離した後にウランゲッター-2 に捕集し、貯蔵する。

ウランゲッター容器 (ステンレス鋼製) には粉末化したウラン金属 (数 g) が充填されていて、容器内のトリチウムガス $\text{T}_2(\text{g})$ は反応 (13) によって金属ウランと結合して固体のトリチウム化ウラン $\text{UT}_3(\text{s})$ になる。



反応 (13) は可逆反応であり室温で平衡は右辺に傾くが、400°C 以上に加熱すると $\text{UT}_3(\text{s})$ は解離して (右辺から左辺への反応) トリチウムは $\text{T}_2(\text{g})$ として気相に遊離する (トリチウムガスの平衡蒸気圧は 20°C で 1 千万分の 1 気圧、400°C でほぼ 1 気圧)。したがって、ゲッター容器の温度を調節することにより容易にトリチウムガスを出し入れすることができる (粉末ウランは空気に触れると自然発火するので取り扱いには注意が必要)。

なお、図 8 の左端のグローブボックス内に設置されているトリチウム除去装置とは、TREX からトリチウムガスが鉛セル内に漏洩した場合にセル内の空気からトリチウムガスを取り除く装置である。鉛セル内の空気を常時循環し、トリチウムガス T_2 を酸化触媒でトリチウム水 T_2O に

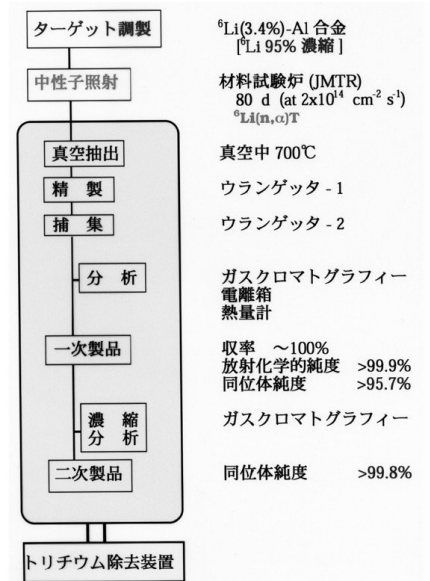


図 7 原研のトリチウム製造 (40 TBq/回)

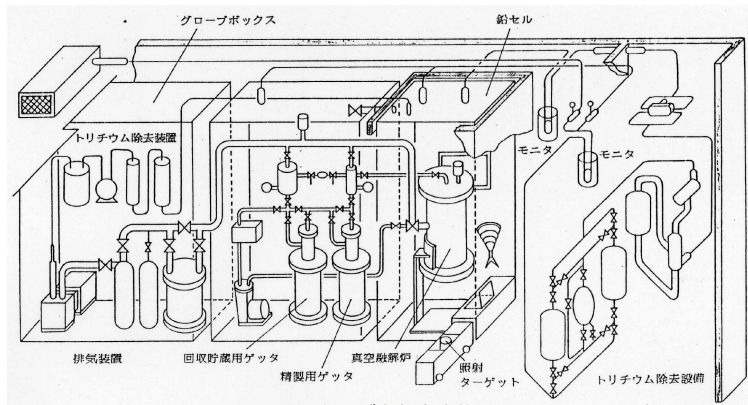


図 8 トリチウム製造試験装置 (TREX)

変換して液体窒素で冷却したモレキュラーシーブに吸着させる。¹⁴⁾

最終的には、放射化学純度 99.9%以上、同位体純度 95.7%以上の T₂ を 1 回当たり 36 TBq (常温で 380 mL) の試験製造に成功し、将来の核融合燃料製造の道を開いた。^{2, 15)}

4. トリチウムの物理、化学、安全取り扱い

前節でトリチウムの自然界での存在、核融合燃料としての役割などについて述べたが、本節ではトリチウムの緒性質と安全取り扱いについて述べる。¹⁶⁻¹⁸⁾

4.1 物理学的性質

トリチウム (³H、Tとも記す) は重水素 (²H、Dとも記す) とともに原子番号 1 の水素 (H) の同位体であり、原子核に 1 個の陽子 (p) をもつ (図 9)。違いは原子核中の中性子 (n) の数にあり、D は 1 個、T は 2 個の n をもつ (H は全ての元素の中で唯一 n をもたない)。

水素と重水素は安定同位体であるが、トリチウムの原子核は中性子を 2 個有するため不安定であり、中性子の一つが電子 (e⁻) を放出して p になろうとする。これが反応 (14) であり、この結果生ずる元素では p が 1 個増えるので原子番号 2 のヘリウムになる。



その際、原子核から放出される電子がベータ線 (β⁻) である。トリチウムから放出される β⁻ 線はゼロから最大 18.6 keV の連続するエネルギー分布をもち、その平均値は 5.7 keV である。トリチウム原子 (T) および分子 (T₂) の主な物理学的性質を表 1 に示す。^{16,17)}

4.2 化学的性質

トリチウム (T) の化学的性質は、同位体である水素 (H) や重水素 (D) とほとんど変りないので全く同じような化合物をつくる。しかし、T の質量 (3.016 u [原子質量単位、¹²C 原子 1 個の質量を 12.0 u と定義]) が H (1.008 u) の 3 倍、D (2.014 u) の 1.5 倍と大きいため化学反応速度や平衡定数に比較的大きな違いが現れる。また、水素分子にはこれらの三つの同位体の組み合わせによって 6 種類の同位体分子 (H₂、HD、D₂、HT、DT、T₂) が存在する。同じ分子でありながら同位体の組み合わせが異なる分子のことをアイソトポマー (isotopmer) という。水素分子のアイソトポマーの熱力学的性質を表 2 に示す。

比較的大きな“同位体効果”がみられるので、それを利用すると同位体の相互の分離や濃縮が可能になる。例えば、通常の水 (H₂O) にトリチウム水 (HTO) が含まれていて、そこから HTO を除去したい場合、その水 (H₂O + HTO) を電気分解すれば発生する H₂ と HT (T₂)

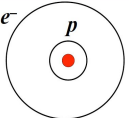
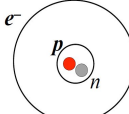
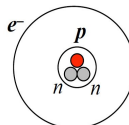
軽水素 (Hydrogen) 存在比 99.985%	¹ H (H) 陽子 (p) 1 中性子 (n) 0	
重水素 (Deuterium) 存在比 0.015%	² H (D) 陽子 1 中性子 1	
三重水素 (Tritium) 放射性 (半減期 12.3 年) 存在比 5 ~ 10 T.U. (1 T.U. : 水素の存在比の 10 ⁻¹⁸)	³ H (T) 陽子 1 中性子 2	
同位体分子 (アイソトポマー、Isotopomer) H ₂ , HD, D ₂ , HT, DT, T ₂ H ₂ O, HDO, D ₂ O, HTO, DTO, T ₂ O		

図 9 水素の同位体

表 1 トリチウムの物理学的性質

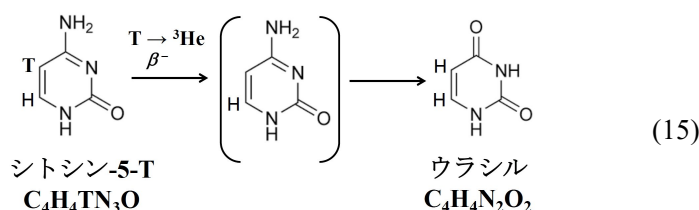
質量	3.0160493 u (u: 原子質量単位)
核スピン	1/2
磁気モーメント	1.5046 x 10 ⁻²⁶ Am ²
イオン化エネルギー	13.55 eV (T → T ⁺ + e ⁻)
解離エネルギー (T ₂)	4.59 eV (T ₂ → T + T)
ベータ線放射核種	T → ³ He + e ⁻ + ν̄ (β ⁻ 線のみ放射)
β ⁻ 線エネルギー (連続)	最大値 18.6 keV, 平均値 5.7 keV
半減期	12.3 年
放射熱	911 aW/Bq (= 911 × 10 ⁻¹⁸ W/Bq)
比放射能 (T ₂)	355 TBq/g (= 355 × 10 ¹² Bq/g)
比容積 (T ₂ , 標準状態)	10.3 fL/Bq (= 10.3 × 10 ⁻¹⁵ L/Bq)

表 2 水素分子同位体 (アイソトポマー) の熱力学的性質

	H ₂	HD	D ₂	HT	DT	T ₂
分子量 (u)	2.0158	3.0220	4.0282	4.0239	5.0301	6.0321
臨界温度 (K)	32.99	35.41	38.96	37.13	39.42	40.35
臨界体積 (m ³ /mol)	65.5	62.3	60.3	62.4	57.8	57.1
臨界圧力 (MPa)	1.30	1.48	1.65	1.57	1.77	1.91
三重点温度 (K)	13.96	16.60	18.73	17.62	19.71	20.50
三重点圧力 (kPa)	7.20	12.37	17.14	14.66	19.42	20.98
沸点 (K)	20.39	22.13	23.67	22.92	24.38	24.91
解離エネルギー (eV)	4.476	-	4.533	-	-	4.59
イオン化エネルギー (eV)	15.42	-	15.46	-	-	15.55

トリチウムは半減期 12.3 年で低エネルギーのベータ線を出す (表 1)。この放射線を追跡子 (トレーサー) として利用すると、水素化物や有機化合物など様々な物質の反応の様子 (速度や反応機構) あるいは物質の構造を調べることができるので化学実験や創薬研究などで広く利用されている。¹⁸⁾ 分子中の狙った位置の H を T で置き換えた化合物 (標識化合物、labeled compound) をつくり、化学反応と T から出る放射線 (β^- 線) の検出 (液体シンチレーション検出器などを利用) を組み合わせることによって反応の様子を解析する。

トリチウム標識化合物は分子自身が出す放射線 (β^- 線) にさらされるので、トリチウム濃度 (比放射能) が高い試料は長い間に分解し、放射線分解生生物 (ラジカルやイオン種など) を生成するので、トレーサー利用にあたっては注意を要する。また、トリチウムは β^- 線を出すと化学的に不活性なヘリウム (³He) に変化するので、分子内で T が結合していた位置の水素が失われる。その結果、分子内で構成原子の再配列が起き別の分子になることがある。例えば、DNA の構成要素であるアミノ酸をトリチウムで標識したとき、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 (15) が知られており、核変換効果 (transmutation effect) と呼ばれる。¹⁸⁾



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。

4.3 生物影響と環境動態

トリチウムはベータ線 (β^-) のみを出す放射性核種であるが、 β^- 線の平均エネルギーは 5.7 keV (最大 18.6 keV) と低く外部被ばくの影響はほとんどない (この β^- 線が皮膚を透過する距離は最大 6 μm)。ただし、トリチウムを含む物質を呼吸や摂食、あるいは身体に付いた HTO が皮膚から浸透して体内に移行すると内部被ばくの影響は避けられない。とはいえ、特定の位置 (細胞) に固定される割合は小さく、通常の水 (H₂O) や有機物と同様に代謝によって比較的短時間で体外に排出される。表 3 に示すようにヒト (成人) の生物学的半減期 (biological half-life: T_b) は 10~12 日と物理学的半減期 ($T_{1/2}$: 12.3 年) に比べてかなり短い。誤ってトリチウムを含む水 (HTO) を飲み込んだ場合には、水あるいは利尿効果の高いスポーツドリンクやビールを摂取すれば T_b はさ

らに短くなる。

トリチウムガス (HT) を呼吸によって吸い込んだ場合、大部分 (95%以上) は呼気に排出される。体内に残留した HT は HTO に変化して血液中に移行し、20分ほどで尿中に出てくる。このようにトリチウムガスは体内に留まる時間が短いので、HT による内部被ばく線量は同じ量の HTO の 1500 分の 1 と見積もられる。国が定めた排気中の濃度限度は、トリチウムガス (HT) については 20,000 Bq/cm³

と水蒸気 (HTO) の 0.005 Bq/cm³ に比べて 18,000 倍ほど緩く設定されている。

核融合炉で発生する高レベル放射性廃棄物の量は核分裂炉 (原子炉) に比べると格段に少ないが、大量のトリチウム (数 kg) を燃料として使用するの、その取り扱いには細心の注意が必要である。

事故等で大量のトリチウムガス (T₂) が大気中に放出されると、空気より軽いトリチウムガスは大気上空 (成層圏) に拡散するので、直接生態系に影響を及ぼすことはない。しかし、上空での光化学反応などによってトリチウムガスの多くは水蒸気 (HTO) やメタン (CH₃T) に変換され、HTO は降雨によって地表に戻る。トリチウム水 (HTO) は河川水や地下水として一時的に陸域に保持されるが、やがて海へ移動する。HTO は植物の根から取り込まれ、植物体中では含有水トリチウム (Tissue Free Water Tritium; TFWT) と組織結合トリチウム (Organically Bound Tritium; OBT) として存在する。植物中の TFWT の半減期は短く、環境水のトリチウムレベルの変動に対応してその濃度は素早く変化する。一方、OBT は植物体が HTO を取り込んだ時点の濃度を反映するので、樹木の年輪ごとのトリチウム濃度を調べることにより過去に遡って環境中のトリチウム濃度を追跡することができる。¹²⁾

海洋に移行した HTO は莫大な量の海水で希釈されるので生態系への影響は限定的と考えられるが、局所的に高い濃度のままの場所 (入江や港湾など) が存在する可能性はある。その場合でも、食物連鎖により魚介類に濃縮されることはなく、生態系に与える影響は原子力発電所の事故で放出されたセシウム-137 [¹³⁷Cs: 物理学的半減期 30 年、ヒト (成人) の生物学的半減期 70~90 日] のような核分裂生成核種に比較するとそれほど大きくない。セシウムは生体に取り込まれると骨や筋肉に蓄積されるので、食物連鎖により濃縮されることがある。それに対し、トリチウムは代謝により比較的短時間で生体外に排出されるので生体内に蓄積することはなく、食物連鎖による濃縮の可能性は低い。

5. おわりに

核融合発電は究極のエネルギー源と期待されるが、実現までにはまだ多くの工学的課題を乗り越えなければならない。実用化は 2050 年以降とみられるが、昨年末に米国のレーザー核融合実験 (NIF) で大きな進展がみられ、わが国が幹事国の一つとして南フランスに建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER) の完成も近い (運転開始目標 2025 年)。また、欧米や日本のスタートアップ

表 3 トリチウムの放射線生物学的性質 (挙動)

◇ 生物学的半減期 (T _b) (物理学的半減期: 12.3年)	10~12日 (成人) ※ T _b は水分の摂取量の増加とともに短縮
◇ 人体への取り込み経路と化学形	
・呼吸器系	HTO、T ₂ 、揮発性物質
・消火器系	HTO、吸収性物質
・皮膚	主にHTO、ある種の有機化合物
・最も危険性の高い化学形	HTO
	$H [mSv] = 27 \times T_b \times B (B: kBq/L_{尿})$
◇ トリチウムガス (HT) の挙動	
・呼吸によって取り込まれたトリチウムガスの大部分は呼気中に排出 (0.1~5%が体内に残留しHTOに変化)	
・取り込み後20分ほどで尿中に検出される	
・HTOと同程度の内部被曝線量を与えるためには1500倍のHTが必要	
◇ トリチウム水 (HTO) の挙動	
・水蒸気として呼吸器系から取り込まれたトリチウムの99%は10分以内に血液中に移行	
・皮膚から吸収されたHTOは呼吸器系からの取込と同様の挙動	

企業が核融合炉開発への投資と技術開発に力を入れ始めた。¹⁹⁾

最初に実現する核融合炉では大量のトリチウム (5~10 kg) が燃料として用いられる。トリチウムが放射性核種であることを考えると、核融合発電が究極のエネルギー源として社会に受け入れられるためにはトリチウムの安全取扱技術の確立に加えて、トリチウムの使用についての市民の理解が欠かせない。まだ先のこととは言え、今のうちから多くの人が「トリチウムとは何か」を知り、理解を深めておくことが望まれる。本稿がその一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) Clery, A., With historic explosion, a long sought fusion breakthrough: National Ignition Facility achieves net energy “gain” with laser-powered approach, *Science* (News Online on 13 Dec. 2022).
- 2) Tanase, K. *et al.*, Test Production of Tritium in 3 TBq Level from Neutron-Irradiated ⁶Li-Al Alloy Target *J. Nucl. Sci. Technol.*, **22**, 147-152 (1985).
- 3) Nagamine, K., “Introductory Muon Science”, Oxford University Press, Oxford (2003).
- 4) *QST NEWSLETTER* No. 13, 量子科学研究機構 (2020).
- 5) Banks, M., Fusion energy record smashed by Joint European Torus facility, *Nucl. Fusion News* (9 Feb. 2022).
- 6) Gibney, E., Fuel for world’s largest fusion reactor ITER is set for test run: Nuclear fusion experiments with deuterium and tritium at the Joint European Torus are a crucial dress rehearsal for the mega-experiment, *Nature* (News online on 22 Feb. 2021).
- 7) Kenmochi, N. *et al.*, Preceding propagation of turbulence pulses at avalanche events in a magnetically confined plasma *Sci. Rep.* **12**, 6979 (2022): www.nature.com/scientificreports.
- 8) Woolsey, N., Self-heating plasmas offer hope for energy from fusion, *Nature* **601**, 514-515 (2022).
- 9) Zylstra, A. B. *et al.*, Burning plasma achieved in inertial fusion, *Nature* **601**, 542-548 (2022).
- 10) Berkowitz, R., Magnetic Field Heats Up Fusion, *Physics* **15**, 169 (2022).
- 11) Moody, J. D. *et al.*, Increased ion temperature and neutron yield observed in magnetized indirectly driven D₂-filled capsule implosions on the National Ignition Facility, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 195002 (2022).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) Yamagicji, K., *et al.*, Detritiation of Glovebox Atmosphere by Using Compact Tritium Removal Equipment, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **19**, 948-962 (1982).
- 15) 工藤博司、「トリチウムの製造と安全取扱」、*放射線*, **12**, 77-85 (1986).
- 16) 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).
- 17) IUPAC, “Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry”, 1st Ed., Blackwell Scientific Publ., Oxford (1988).
- 18) Evans, E. A., “Tritium and its Compounds”, 2nd Ed., Butterworth, London (1974).
- 19) Clery, A., With ‘smoke ring’ technology, fusion startup marks steady progress, *Science* (News Online on 8 Apr. 2021).