

「トリチウムとは？ その化学と科学と社会学」

宮本霧子* §

1. はじめに

宇宙・太陽系の中で存在が確認されている元素の種類は、水素HからオガネソンOgまで118種類あるが、それらの存在する原子の全個数の90%以上は水素の原子であり、地球にも水分子H₂Oとして最も身近にある。水素原子の原子核には陽子が1個だけあるので原子番号は1だが、中性子の個数が0, 1, 2個と異なることによって質量数が異なる3種類の同位体が存在し、どれも水素として化学的には同じ性質がある。まず99.9%以上は原子核に中性子がない軽水素（プロチウム）と呼ばれる同位体であり、中性子が1個ある同位体は重水素（ジューテリウム, ²H, D）と呼ばれ、そして中性子が2個ある同位体が三重水素（トリチウム, ³H, T）である。トリチウムは原子核から最大18.6 keVのβ線を放出する性質があり、半減期が12.3年の放射性同位体であり、他の元素にも多数ある放射性核種の1つである。

大気中に存在する窒素や酸素の原子核が、宇宙線から発する中性子と核反応を起こし、トリチウムの原子核が生成するため、地球の周りの大気圏で毎年10¹⁶Bqも生成しており、太古より地球上に常に一定量存在していた。しかし自然界でのその存在が知られ始めた頃、まもなく原水爆の核実験が始まり、米国・ソ連・英国等による1945年以来の2,000回以上の核実験によって、他の多くのフォールアウト放射性核種と共にトリチウムも大気圏に放出され、1960年代のピーク時には地球上の濃度レベルが100倍に増加したこともあった。部分的核実験停止条約が1963年に調印され減り始めたものの、フランス・中国などが継続したこと、また地下核実験もあり、1980年までに10²⁰Bqのフォールアウトトリチウムが地球上に放出された。その後は原子力産業の発展で副産物として引き続き生成されてきたが、同時に核融合炉の燃料として期待される存在ともなった。トリチウムに対するそれらの懸念や期待を巡って、世界で行われてきた研究成果の一端と共に、国際社会がトリ

チウムとの合理的な付き合い方を議論してきた経過を紹介したい。

2. 自然界の観測による環境研究

トリチウムは水素ガスとして水として、環境中で拡散が早く、分離や除去が困難であるため、早期から環境汚染の懸念があったが、それだけではなく気象学や水理学に役立つことも期待されて濃度が盛んに測定された。1960年代から国際原子力機関IAEA（International Atomic Energy Agency）は世界気象機関WMO（World Meteorological Organization）との共同事業で世界150か所以上の地域から降水を受取って自らも測定しつつ、測定値を集めてデータベース化してきた（IAEA, 1960）。世界中どこかの降水も1960年代に濃度ピークがあったが、大気中水蒸気に希釈されて減少し、海面から供給される水蒸気で薄められ易い地域では降水中トリチウム濃度の減少が早かったことなども早々に情報共有されている（岩倉, 1975）。

核兵器工場や原子力施設のある国・地域では、降水ばかりでなく、大気水蒸気・地表水・地下水・温泉水・海水などのモニタリングも熱心に行われたが、その目的も環境汚染に対する懸念からだけではなく、トリチウムが地球上の水や水蒸気の移動についての目印、追跡子（tracer）として利用できる、地下水の年代測定もできるのではないか、などの期待が大きく、また水は他の放射性核種が環境中を移動するときの媒体となるため、トリチウムを検出することにより更なる環境汚染を事前に想定するための前駆体（precursor）の役割を果たすとして、世界ばかりでなく日本国内でも1960年代から多くの大学や研究機関で測定を始めている。そのために水試料を電気分解して測定濃度を高める濃縮技術の普及も早く、また弱いベータ線のみを放出するトリチウムの放射線計測法は、最初は水素ガスなどの気体に変えて行う気体計数法から始まったが、1970年代には水のまま測定できる大容量低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタが放射線医学総合研究所で技術開発され、ALOKA社でLSC-LB1として製品化されて、IAEAに1台寄付するまでになった（Iwakura *et al.*, 1979）。

日本からIAEAに毎月送っていた降水は東京大

* 公益財団法人海洋生物環境研究所 事務局（〒162-0801 東京都新宿区山吹町347番地 藤和江戸川橋ビル7階）
§ E-mail: miyamoto@kaiseiken.or.jp

手町の気象庁屋上で採取されていたが、大気汚染が懸念されて1970年代に採取場所を岩手県大船渡市三陸町綾里の大気環境観測所に移していた。しかしその送付事業も今ではやめているとのことである。従って日本の降水中濃度の連続データとしては、千葉市で放医研が1970年代から毎月測定して2007年からは日本分析センターが継続しているものが、原子力規制庁の環境放射線データベースからダウンロードできるようになっている（原子力規制庁, 2023）。

1970年代には国内各地域の地下水や河川水の濃度観測値報告が多いが、飲料水源ともなっていた河川水の濃度は数10Bq/Lのレベルを超えていた。また地下水や河川水の濃度が降水の濃度よりも高いことがままあって、地下水のトリチウム濃度から単純に地下滞留時間を求められない、という問題に突き当たっていた。温泉水水源調査においても、地下深くから汲み上げられ期待通りにトリチウム濃度がほとんどゼロのものもあるが、降水の濃度よりも高いものもたくさん見つかると、大いに悩ませられた時代であった。結局その現象は地下水の帯水層を3層あると仮定したモデルを立てることで解決することができた。即ち降水が表面の地層に浸透してもすぐに地表に流出せずに2層目の帯水層に浸透するものがあり、10年程度（関東平野であれば）遅れて地表に出れば、1960年代の濃度が高い降水の影響が河川水に遅れて観測される。一部の地下水は更にもっと深部の3層目の帯水層に浸透して温泉水や井戸水として利用されるものもある。この仮説は地下帯水層を三段のボックスに見立て、降水によるトリチウムの供給量と河川水や地下水の濃度の変化を年毎の逐次計算を行うことによって証明された。関東平野全体については、浅層は約3年、その下層は約10年、最下層に30年の平均滞留時間を仮定すると、トリチウム濃度の実測値の変化を再現することができる（Miyamoto *et al.*, 1995）。

地下帯水層の規模が大きく河川の流域も広い大陸とは異なる日本では、半減期が12年余のトリチウムの核実験が盛んな時期の濃度ピークを有効に利用することができたと言える。フォールアウトトリチウムが崩壊して少なくなった現在では、極微量のトリチウム濃度の変動を利用した研究は困難であろうと思われるが、今でも長半減期放射性核種を利用した水理学研究は続いている。

3. 原子力施設モニタリングによる環境研究

1950年代から始まった核爆弾の製造、その後のエネルギー産業によって、核分裂の副産物としてトリチウムが世界各地の原子力施設で多量に生成した。事故と評価されたものには限らず、大気圏や水圏に定常的に放出され拡散したため、モニタリング観測が行われ濃度分布や環境移行について報告が多い。特に炉の冷却水に重水HDOを利用するCANDU型原子炉（Canadian Deuterium Uranium）を開発したカナダでは、重水素が中性子を吸収してトリチウムができ易い懸念から研究に熱心であった。炉の開発時期には施設敷地に廃棄物を埋設したことなどにより敷地内の湖のトリチウム濃度が数千Bq/Lにも達していた。

1986年チェルノブイリ事故が起こった後、IAEAが放射性核種の環境中での移行や拡散について、より正確な予測を行うためモデル開発を支援する国際協力プロジェクトを始めたが、特に2003年からのEMRAS（Environmental Modelling for Radiation Safety）事業ではトリチウムにも特化したワーキンググループを作った（IAEA, 2003）。国際協力で核融合開発計画が開始される機運の下で、燃料となるトリチウムに対する懸念からである。カナダ、英国、ドイツ、フランス、ルーマニア、日本などが、自国の観測値データ群を汚染シナリオとして提供して、参加国が自国の移行モデルを使って予想した計算値と比較議論するモデル検証活動が行われたが、カナダは終始まとめ役リーダーとして活躍した（宮本, 2008）。

カナダから提供された観測値はCANDU炉開発地のオンタリオ州チョークリバ研究所の敷地にあるパーチ湖の湖水濃度で、各国の参加者はそこに生息する藻類、魚貝類の組織自由水型トリチウム濃度TFWT（Tissue Free Water Tritium）と有機結合型トリチウム濃度OBT（Organically Bound Tritium）を自国のモデルを使って計算し、後で初めて明かされる実際の観測値と比較してモデルの妥当性を議論した。その結果、TFWTとOBTの実際の観測値は、両者の関係がほぼ1:1でありトリチウムはOBTに濃縮されていないことが明らかにされた（IAEA, 2006）。計算参加者の中には多少ともOBTの濃度がTFWTよりも高めの計算結果を報告したものもいたが、与えられた湖水の濃度は平均値・固定値ではなく、採取場所や季節によっても変動しているため、生息する生物の移動・代謝特性などを考慮したモデルを使うことに

よっては、その変化を鋭敏に捉える計算結果が得られることになる。もとより湖のような閉じられた環境とは異なり、濃度が変化し易い自然界の水環境で、TFWT濃度が環境水の濃度と同じになり、それがOBTへと代謝されるうちに、環境水の濃度の方が減少して、TFWT濃度がつられて減少すると、そのときに採取・測定された生物のOBT濃度はTFWT濃度よりも高くなり、濃縮が起こっているように見えることになる。生物による取り込みや代謝が早い水素原子として、トリチウムのモニタリング結果の評価には、環境の変化や生物の特性を考慮に入れた、総合的な洞察が必要であるということになる。

トリチウムの環境モニタリングにおいて、考慮に入れるべきもう1つの厄介なことは、医薬・生化学分野の調査研究の目的で、トリチウムで標識された多種類の人工有機化合物が作られ利用されていることである。バイオ事業の分野でも生化学反応、薬物動態の試験研究のために使われてきた。本来生体に取り込まれやすい化学形なので、もし適正な廃棄物処理が行われずにそのまま環境中に出された場合には、環境にいる生物が体内有機物に好んで取り込む可能性があり、OBT濃度が環境水のHTO濃度よりも高く、生物濃縮が起こっているように見える。イギリスやフランスでは、その影響とみられる観測結果が報告され、一時心配されたことがあったが、河川・海洋は除染されて、より厳しい廃棄物規制が行われるようになってきている (Eyrolle *et al.*, 2018)。また最近のバイオ事業ではなるべく放射性核種を使用せず、安定同位体即ち放射性崩壊をしない同位体を使った研究も増えているとのことである。

4. 放射線防護のためのしくみ

放射線利用における防護のための国際基準設定の枠組みは国際組織の連携によって作られている。まず国際放射線防護委員会ICRP (International Commission on Radiological Protection) は放射線科学の専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行う国際的な学術組織で、X線やラジウムの医学利用が盛んになった1928年にその母体が英国に成立した。放射線防護方策の基礎となる基本原則を検討し、ICRPの後に番号を付した出版物シリーズを順次発行して、世界に向け勧告を行っている。詳細な項目別に議論するための日本人も参加するタスクグループがあり、毎年会合も開きなが

ら常に新しい学術的な知見やデータ群を集めて評価し、規制基準のための数字や技術的手法などについて、必要なパラメータなどを改訂して勧告し直す。

原子放射線の影響に関する国連科学委員会UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) は、核実験と原子力の平和利用が始まる中で1955年に国連で立ち上げた科学委員会で、放射線の線源とその影響について国連加盟国からデータの提出を求め、それらを科学的に評価したものを加盟国向けに報告書とする。今ではICRPの勧告やUNSCEAR報告書はWebからダウンロードでき、随時日本語訳もある。またIAEAは、加盟している国々が、国際的に調和の取れた安全基準に基づいて、国内法令の整備を行えるよう支援するため、ICRPやUNSCEARが収集し、評価した知見や防護のための技術的な方針などを基本安全原則、国際基本安全文書などにまとめ公表している。

日本国内では、「放射性同位元素等の規制に関する法律」の下で放射線を利用しているが、ICRP勧告やIAEAの基本安全文書が発せられると、その内容の国内法令取入れについて、原子力規制庁放射線審議会で審議し必要な場合は法律の改訂を行っている。

5. トリチウムの放射線防護

トリチウムの環境中拡散への懸念から、環境観測が始まると共に、動物実験や疫学調査など放射線影響の研究も始まった。1960年代には、トリチウムが時計文字盤や信号の蛍光塗料に工業的に利用されて、工場の作業者が大量摂取する被ばく事故が起こり、原子力施設から漏れ出る事故も起こっている。1970年代にはICRPやIAEAなどの国際組織から、人を防護し環境中の濃度を規制するための勧告や出版物が次々と出された。日本でも1950年代に原子力利用についての法律が整備されると共に、日本放射線影響学会や日本原子力学会などの研究者も集まってきた。そして1980年代になると、核融合炉開発への期待から燃料となるトリチウムの大量取り扱い技術開発が進む中、改めて生体への影響が懸念され、科学研究費助成事業によるものなども含めて、哺乳動物個体や組織細胞、DNAを利用した実験研究が盛んに行われた。2000年代には国際熱核融合実験炉ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

の国際共同プロジェクトが本格的に始まり、放射線影響についても国際的な膨大なレビューやデータ解析が行われ、その結果はUNSCEARが詳細なデータブックとも言える報告書をまとめ(UNSCEAR, 2016；環境科学技術研究所, 2021)、また日本でも放射線影響学会が、生物影響のレビューを出版したところである(日本放射線影響学会, 2019)。

放射性核種を飲んだり食べたりしたときに、どのくらいの内部被ばく線量を受けることになるか計算して、摂取量を許容できる範囲に制限するための防護の仕組みがトリチウムにもある。食品中の濃度にそれを体内に摂取する重量をかけ算して、調理で減少する割合なども補正し、最後にその放射性核種の影響する程度、危険度ともいえる線量係数というものをかけ算して、体内被ばくすることになる放射線量を求める。線量係数とは1Bq(ベクレル)を摂取した時に何Sv(シーベルト)の線量を受けたことになるかの基本定数であり放射性核種毎に決まっていて、この線量係数こそがICRPが長年努力して世界に向け勧告してきた基準値である。その放射性核種が生物に影響する特質について、実験観測や疫学調査されて学術論文等に発表された情報を評価し、まとめ上げて放射性核種別に定義した数字である。

放射性核種が生物に影響する特質としては、まずその核種が放出する放射線の種類やエネルギー、半減期などの物理的性質があり放射線加重定数として数値化される。またその核種が環境中や食品中でどのような化学形でいるものなのか、その化学的性質とともに、生物が体内に取り込んだ後、吸収、循環、分布、集積、濃縮、排泄などの代謝における生物学的性質についても、多くの動物実験や疫学調査のデータ発表を評価する。またその核種を体内に取り込んでから排泄するまでの典型的な運命を代謝モデルという数式に表す。

トリチウムのICRP代謝モデルは、まず水として取り込まれた場合は97%は水として10日間の生物学的半減期で体外に排出し、3%は体内で蛋白質、炭水化物、脂肪などの有機物に代謝されるが、それらも総計として40日間の生物学的半減期で体外に排出するとしている。一方有機物の化学形で体内に取り込まれたものは、半分は水に代謝されるので半減期10日間で体外に出るが、残り半分は体内の有機物代謝経路に乗って、40日間の半減期で体外に出るとしている。

こうして学術情報の評価結果から放射性核種ごとに1Bqを体内に摂取した時に何Svの線量を受けたことになるかの定数、線量係数を定めるが、トリチウムについては水素としての特質が考慮された結果として、トリチウムの化学形別に、また摂取する人間の年齢別に線量係数を勧告している(ICRP, 1995)。成人が水HTOを取り込んだ場合の線量係数は 1.8×10^{-11} Sv/Bq、有機物OBTを摂取した場合は 4.2×10^{-11} Sv/Bqである。 ^{137}Cs の 1.3×10^{-8} Sv/Bqと比較するとトリチウムは3桁小さい。トリチウムが他の核種に比べて、世界の原子力施設から環境水中に多く放出することが許されてきたのは、水から除去することが困難だからではなく、水として拡散し濃度が薄まり易いことと、生物への放射線影響が小さいからである。

現在国内の法律では、一般の人が接する液体のトリチウム濃度は60,000Bq/L以下でなければならないとされているが、この数字は生まれてから70歳になるまでこの濃度の水を毎日飲み続けたときに、その人の内部被ばく線量が年間1mSvに達するものとして導き出された数値であり、人がその濃度の水と共存していてもよいとの基準を意味する。そしてこの限度を守るために、各原子力施設は環境中に放出してよいトリチウムの総量や濃度の目標値を決め、それを守るために環境のモニタリングが行われている。

6. 終わりに

トリチウムも化学的には水素として、水として、動植物に取り込まれると、生化学的な代謝・同化・異化作用が起こり環境生態系に拡散する。また水であるから水から分離して除くことは容易ではない。しかし生体への放射線影響は少ないので環境中でトリチウムと安全に共存することが可能である。このような科学的な考え方で、過去から今まで他の放射性核種と比べて環境中の濃度規制値は高く、飲料水としての基準値も高い。しかし通常とは異なる新たな行為によって、環境中濃度を上昇させるときには、科学的に安全なだけでは社会で容認されない。なぜその行為を行うことが必要であり合理的なのかについて同意を得るためには、化学と科学だけで考察するのは不十分で、社会学の力を借りなければならないかもしれない。

ICRPの最も有名な基本勧告として1977年の防護の三原則(ICRP, 1977)というものがある。

まず個人は線量限度を決めて防護すべきこと、また放射線の利用や発生の行為はプラスの便益が得られることよってのみ正当化されるべきこと、という2つの基本的な内容と共に、放射線によるリスクを軽減し人を防護するための行為は、社会性と経済性の視点から合理性がなければならぬとされている。即ちICRPは放射線から人を防護する行為は、純粋なサイエンスへの理解と共に社会学的な承認が必要であることに我々の同意を求めている。過去にはチェルノブイリ事故によって被ばく線量の上昇した地域で生活する住民の防護方策のために、ICRP自身が当事者に働きかける社会学的な活動を実践しており、福島事故後にも関与してきた。将来にわたる環境中トリチウムとの共存についても、科学的・社会学的な課題解決の実践と多くの支援が望まれる。

引用文献

- Eyrolle, F., Ducros, L., Le Dizès, S., Beaugelin-Seiller, K., Charmasson, S., Boyer, P. and Cossonnet, C. (2018). An updated review on tritium in the environment, *J. Environ. Radioact.*, **181**, 128–137.
- 原子力規制庁 (2023). 環境放射線データベース. <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/data/database/>. (2023年10月12日アクセス).
- IAEA (1960). Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP). <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>. (2023年10月12日アクセス).
- IAEA (2003). Working Group on Modelling of tritium and carbon-14 transfer to biota and man. <http://www-ns.iaea.org/projects/emras/emras-tritium-wg.asp?s=8>. (2023年10月12日アクセス).
- IAEA (2006). EMRAS Tritium/C14 Working Group, THE PERCH LAKE SCENARIO Final Report, May 2006. <http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/emras/2nd-combined-meeting/scenario-twg-perch-lake-final.pdf>. (2023年10月12日アクセス).
- ICRP (1977). ICRP Publication 26, Recommendations of the ICRP. International Commission on Radiological Protection. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2026>. (2023年10月12日アクセス).
- ICRP (1995). ICRP Publication 72, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5, Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients. International Commission on Radiological Protection. https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_26_1. (2023年10月12日アクセス).
- 岩倉哲男 (1975). 一般環境におけるトリチウムの挙動とモニタリングのための予備知識. 保健物理, **10**, 131–140.
- Iwakura, T., Kasida, Y., Inoue, Y. and Tokunaga, N. (1979). A Low-Background Liquid Scintillation Counter for Measuring Low-Level Tritium. Behaviour of Tritium in the Environment (San Francisco, 16–20 Oct. 1978), Proceedings Series – IAEA, Vienna (1979), IAEA-SM-232/32, 163–171.
- 環境科学技術研究所 (2021). UNSCEAR2016年報告書科学的附属書C「内部被ばく核種の生物学的影響—トリチウム—」の日本語版. https://www.ies.or.jp/publicity_j/data/unscear_2016annex_v2.pdf. (2023年10月12日アクセス).
- 宮本霧子 (2008). IAEA EMRAS環境モデル検証プロジェクトトリチウム&炭素14作業部会の活動(トリチウム). 保健物理, **43**, 50–59.
- Miyamoto, K., Kimura, K. and Hongo, S. (1995). A Transfer Model of Tritium in a Local Hydrosphere. *Fusion Technology (Fusion Sci. & Technol.)*, **28**, 910–917.
- 日本放射線影響学会 (2019). トリチウムによる健康影響. https://www.jrrs.org/assets/file/tritium_20191111.pdf. (2023年10月12日アクセス).
- UNSCEAR (2016). SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2016, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, ANNEX C. BIOLOGICAL EFFECTS OF SELECTED INTERNAL EMITTERS—TRITIUM. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2016_Annex-C.pdf. (2023年10月12日アクセス).