

環境トリチウム 一起源と被ばく一

一般財団法人九州環境管理協会 理事長 百島 則幸

要 旨

トリチウムは水素の放射性同位体で天然起源と人工起源がある。トリチウムには有効な除去法がないためほぼ全量が原子力発電所等から環境へ放出されている。放出されたトリチウムは環境中の水素循環に組み込まれて挙動するので水や有機物中に広く見出される。私たちは飲料水や食事で摂取したトリチウムで被ばくを受けているが、現状の被ばく量はわずかである。二酸化炭素を放出しない原子力発電は、地球温暖化防止対策に有効なエネルギー源として利用拡大が世界的に見込まれることから、人工トリチウムの環境への放出が増加することが予想される。トリチウムは危険性が低い放射性核種であり、生物濃縮もないことから大きな被ばく線量の増加には繋がらないと考えられるが、環境影響評価による安全性の確認は不可欠である。

1. はじめに

私たちに馴染みの深い元素である水素は、水として環境中に広く分布し、植物はその水を光合成で利用するので水素は有機物としても分布している。食物連鎖に取り込まれた有機物は、動物の組織を構成し、そしてエネルギー源として利用され水と二酸化炭素として排出される。有機物(植物)は朽ちると地面に堆積し微生物により分解されて再び水と二酸化炭素に戻る。人体の60%は水であり、残りの40%は組織である。組織を構成する元素のなかで炭素が最も多く50%を占めているが、水素は10%を占めている。環境中の水素には3つの同位体が知られている。水素(^1H)、重水素(^2H)およびトリチウム(^3H)である。水素と重水素は安定同位体であり、トリチウムは放射性同位体であるが、同位体の化学的性質は同じなので、重水素やトリチウムは水として存在しているし、有機物としても存在している。

2. トリチウムの起源

トリチウムは半減期 12.3 年でエネルギーの弱いベータ線を放出してヘリウム-3(^3He)に壊変する。半減期に相当する時間が経過すると放射能は半分になるので、10 半減期分の 120 年が経過するとトリチウムの放射能は 1000 分の1になる。常に環境中にトリチウムが見いだ

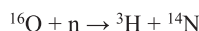


図 1 トリチウムと炭素-14 の生成反応。n は中性子

されるという事実は、トリチウムの供給源が環境中に存在することを示唆している。環境トリチウムには天然起源と人工起源が知られている¹⁾。

天然起源のトリチウムは大気上層で生成し、地表面に降下して水循環に組込まれる。地球に降り注ぐ銀河宇宙線は大気に衝突し2次粒子を生成しているが、2次粒子の一つである中性子は大気構成元素の窒素や酸素と核反応を起こしてトリチウムを作り出している(図1)。核反応による生成と放射壊変による消滅は平衡状態で釣り合っているため、地球上のトリチウム量はほぼ一定で、その存在量は $1-1.3 \times 10^{18} \text{Bq}$ と推定されている。炭素-14(^{14}C)も宇宙線と大気成分との核反応(図1)で生成している放射性核種の一つで、二酸化炭素として大気中に存在している。地球大気に侵入する銀河宇宙線の強度は変化するのでトリチウムの生成量も変化する。例えば太陽活動は11年周期で変動することが知られているが、活動期は太陽プラズマの拡大で地球に到達する銀河宇宙線の数が減少する。従って、この時期はトリチ

ウムを含めて核反応により生成する放射性核種の生成量は減少する。半減期 50 日のベリウム-7(^7Be)の大気中濃度には明確な 11 年周期が確認されているが、ボーリングで得られた氷柱コアに含まれるトリチウムには明確な変動は確認されない。水は環境中を循環(蒸発、降水)して混ざりやすいこととトリチウムの半減期が長いことが変動を確認できない原因と考えられている。

天然起源のトリチウムは、1950 年に液体空気製造施設の排ガス(水素やヘリウムなどの非凝縮性大気成分)中に発見されたが、発見直後に大気圏内核実験が始まり、環境中に人工起源のトリチウムの放出が始まった。大気圏内核実験は 1950 年代から 1960 年代中頃まで活発に行われ、その間に環境へ放出されたトリチウムは天然起源の存在量の 200 倍以上と推定されている。特に大気圏内核実験禁止条約が締結された 1963 年の直前に数多くの核実験が行われ、雨のトリチウム濃度は 1960 年代前半に高い値を示した(図 2)²⁾。大気圏内核実験禁止条約締結から 50 年以上経過した現在、核実験起源のトリチウムの大部分は放射壊変で消滅したが、それでも天然起源の 9 倍程度のトリチウムはまだ地球上に残っている計算になり、それらのトリチウムのほとんどは世界中の海に広く薄く分布している。

人工起源のトリチウムとして、トリチウム生産施設(主に水爆の原料としてのトリチウム生産)、原子力発電所や核燃料再処理施設からの放出がある。トリチウム生産施設は軍事施設であることから詳細は不明であるが、施

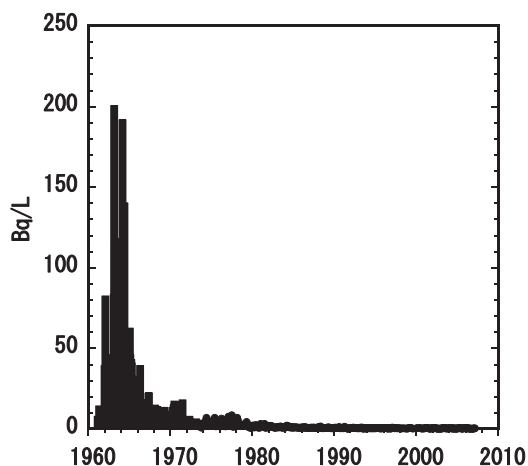


図 2 雨のトリチウム濃度の経時変化(東京と千葉)

設は元素状でトリチウムを取り扱うことから、トリチウム水及びトリチウムガスとして環境放出が知られている³⁾。核エネルギーの平和利用にかかる原子力発電所や核燃料再処理施設からはトリチウムは水として環境へ放出される。これらの施設には放射性物質の除去設備があるが、トリチウムには有効な除去法がないため全量を環境に放出している。沸騰水型原子炉(BWR)と加圧水型原子炉(PWR)では環境への放出量が異なり、加圧水型原子炉からの放出が多い(図 3)。核分裂で生成したトリチウムの大部分は核燃料体に保持された状態で核燃料再処理施設に持ち込まれ、せん断処理の過程でトリチウム水として環境へ放出される。原子力発電所からの放出量に比べると核燃料再処理施設からのトリチウムの環境への放出量が多い(図 3)。

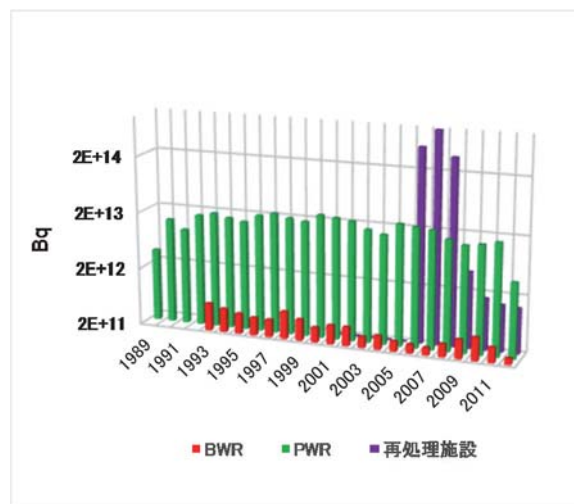


図 3 原子力発電所と核燃料再処理施設から環境へ放出されたトリチウム。BWR(浜岡発電所)とPWR(泊発電所)は 100 万 kW あたりに換算した放出量。核燃料再処理施設(六ヶ所村)は年間放出量。現在、再処理施設はアクティブ試験期間中なので、本格操業が始まると放出量は増加する

3. 被ばく線量と法律による規制

わが国の放射線障害防止法は、放射性物質の使用施設、使用方法、使用者等に規制をかけることで周辺住民へ被ばくの危険が生じないように徹底した安全管理のもとで放射能を利用することを定めている。使用施設から一般環境へ漏れる放射線や放出される放射性物質による被ばくは、使用施設の敷地境界に人が 1 年間

立っていたとしても 1mSv を超えないこととされている。この基準は原子力発電所を含めた国内のすべての放射線施設に適用される。実際は、放射線施設ではたくさんの種類の放射性物質を管理するので、すべての放射性物質による被ばくを合計した線量が 1mSv を超えないようにしなければならない。

被ばくには外部被ばくと内部被ばくがあり、外部被ばくは透過性の高いガンマ線や高エネルギーのベータ線によるものであり、内部被ばくは体内に取り込んだ放射性物質から放出される放射線によるものである。トリチウムはガンマ線を出さず放出するベータ線のエネルギーも低いので、内部被ばくのみを考えれば良い。被ばくは放射線のエネルギーを体が受取ることであり、放射線の種類、放射線エネルギーの大きさ及び放射性物質の体内での代謝挙動で被ばく線量は決まる。1Bq の放射性物質を摂取した時の被ばく線量が実効線量係数として与えられている(表 1)⁴⁾。代謝挙動は摂取した化学形で違うので、例えばトリチウムであれば水で取り込んだのか、有機物として取り込んだのかで実効線量係数は異なる。また、実効線量係数は、1Bq を摂取後 50 年間に受けることになる線量として計算されている。人体における水の代謝時間は 10 日程度であるので、数十日経過すればトリチウム水のほとんどは体外に排泄されるので、被ばくは摂取後の短い期間に受けることになる。一方、排出されにくい元素、例えばストロンチウム-90 (⁹⁰Sr) などでは 50 年間に渡って被ばくを与えることにな

る。実効線量係数が小さいほど相対的に危険性は少ないので、トリチウムは危険性が少ない放射性核種といえる。トリチウムは生物濃縮がないので、その点においてもより危険性が少ないといえる。植物は光合成においてトリチウムを選択的に利用することはなく、水のトリチウム濃度(水素とトリチウムの比)がそのまま有機物に持ち込まれる。したがって、高濃度のトリチウム水は希釈すればするほど人への危険性は低くなる。

私たちは普段の生活において被ばくを受けている。毎日食事で摂取する飲料水や有機物に含まれるトリチウムは被ばくをもたらす。トリチウム以外に食事で様々な放射性核種を取込んでいるが、炭素-14 やカリウム-40 (⁴⁰K) は代表的な被ばく源である。一般環境に存在するトリチウムから受ける被ばく線量は 4.8×10^{-5} mSv/年と推定されている¹⁾。これは日本国民が自然放射線から受ける年間被ばく線量(2.09 mSv)⁵⁾の 0.0023%に過ぎず大変小さな値である。

放射線障害防止法では放射能としては規制対象にしない免除レベルを放射性核種ごとに定めている⁴⁾。基本的な考え方は、その放射性核種が環境に放出された場合、被ばくシナリオに基づく被ばく計算で線量が $10 \mu\text{Sv}$ を超えないレベルとしている。免除レベルは、国際原子力機関(IAEA)、国連の食糧農業機関(FAO)、世界保健機構(WHO)などが共同して刊行した「電離放射線に対する防護及び放射線源の安全のための国際基本安全基準」(BSS)に示されており、国際的な合意のもとで

表 1 1Bq を経口摂取した場合の実効線量係数

核種	化学形	実効線量係数 (mSv/Bq)
³ H	水	1.8×10^{-8}
	有機物	4.2×10^{-8}
¹⁴ C	有機物	5.8×10^{-7}
⁹⁰ Sr	チタン酸ストロンチウム 以外の化合物	2.8×10^{-5}
	チタン酸ストロンチウム	2.7×10^{-6}
¹³⁷ Cs	すべての化合物	1.3×10^{-5}

表 2 放射性核種の免除レベル

核種	数量 (Bq)	濃度 (Bq/g)
³ H	1×10^9	1×10^6
¹⁴ C(一酸化物)	1×10^{11}	1×10^8
¹⁴ C(二酸化物)	1×10^{11}	1×10^7
¹⁴ C(上記以外の物)	1×10^7	1×10^4
⁹⁰ Sr	1×10^4	1×10^2
¹³⁷ Cs	1×10^4	1×10^1

数量と濃度の基準が定められた。両方の基準を超える
と規制対象となるがトリチウムは危険性が少ない放射性
核種であることから免除レベルは大きな値となっている
(表 2)。原子力発電所の廃炉に伴う固体廃棄物につい
てクリアランス制度が法令に整備され、免除レベルの考
え方に基づくクリアランスレベルが放射性核種ごとに定
められている(表 3)⁶⁾。クリアランスレベル以下であれば
産業廃棄物としての再利用が可能になる。

表 3 発電用原子炉施設を対象とするクリアランスレベル

核種	濃度 (Bq/g)
³ H	100
¹⁴ C	1
⁹⁰ Sr	1
¹³⁷ Cs	0.1

4. 核融合とトリチウム

次世代のエネルギー源としてトリチウムを使用する核
融合炉の研究が進められている⁷⁾。核融合は太陽で営
まれている核反応で、高温プラズマ状態の原子核が融
合することで大量のエネルギーを放出している。太陽は
高温プラズマ状態を自分の重力で維持しているが、核
融合炉では磁場中に高温プラズマを閉じ込めて維持す
る。最も達成条件が低い核融合反応はトリチウムと重水
素を用いる場合で、核融合研究もまずは燃料としてトリ
チウムと重水素の使用を想定している。核融合で得られ
るエネルギーが高温プラズマを維持するために使用する
エネルギーを越えることができなければ、エネルギー
源としては成立しない。100 万 kW の原子力発電所と同
等のエネルギーを生み出す核融合炉を定常的に稼働
させるには、地球上に存在する天然起源のトリチウムに
匹敵するほどの量のトリチウムが必要と考えられている。
トリチウムは比較的危険性の低い放射性核種ではある
が、極めて大量のトリチウムが核融合炉施設には滞留し、
ハンドリングもこれまで人類が経験したことがない量とな
ることから、トリチウム閉じ込め技術と取扱技術の確立が
重要となる。そして周辺環境におけるトリチウム動態の
理解は、被ばく線量評価に基づく安全性の確認に不可

欠であり、更なるトリチウムの環境動態解明と関連する
知見の集積が求められる。

太陽光や風力等の自然エネルギー利用は増々拡大
していくであろうが、二酸化炭素を放出しない原子力発
電は地球温暖化防止対策としての有効性が高く、世界
的に利用拡大が見込まれている。原子力発電所が増え
ると人工トリチウムの環境放出も増え、それによる被ばく
線量の増加が懸念されるが、トリチウムは危険性が低い
放射性核種であり生物濃縮もないことから大きな被ばく
線量の増加には結びつかないと考えられる。しかし環境
動態モデルによる影響評価とそれに基づいた安全性の
確認が必要である。

参考文献

- 1) S. Okada, N. Momoshima, Overview of Tritium: Characteristics, Sources, and Problems, *Health Phys.*, 65, 595-609 (1993).
- 2) 核融合とトリチウムの安全, *Isotope News*, (2011).
- 3) Robert J. Kurzeja, Charles E. Murphy Jr. & Robert W. Taylor, Dispersion of HT and HTO Following an Unplanned Release of Tritium to the Atmosphere, *Fusion Technology*, 14:2P2B, 1111-1114 (1988).
- 4) 放射線を放出する同位元素の数量等を定める件 (平成十二年科学技術庁告示第五号) <http://www.nsr.go.jp/data/000045581.pdf>
- 5) 新版 生活環境放射線(国民線量の算定)、原子力安全研究協会、(2011).
- 6) 製錬事業者等における工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規則 http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=417M60000400112#93
- 7) 日本も参加した国際プロジェクトである国際熱核融合実験炉(ITER)の建設がフランスで進んでいる <https://www.iter.org/>