

小特集

施設起源トリチウムの移行モデルと 環境トリチウム分布

Tritium Distribution in the Environment and Transfer Model of Tritium Released from Nuclear Facilities

1. はじめに

百島則幸

九州大学アイソトープ総合センター

(原稿受付：2009年6月8日)

人間活動によるトリチウムの環境放出が始まる前は、天然トリチウムの環境分布は、宇宙線と大気構成元素の核反応による大気上層での生成、対流圏を経由した地表面への降下、気圏・水圏・陸圏・生物圏における移行と放射壊変に支配された定常的な状態にあったと考えられる。1940年代から活発化する人類の核エネルギー利用により生成されたトリチウムは、天然トリチウムの環境分布の様子を一変させた。天然トリチウムの環境分布に大きな変化を与えたものは、1950年から1960年代に実施された大気圏内核実験でグローバルフォールアウトとして世界中に降下したトリチウムである。大規模な大気圏内核実験が行われなくなった現在でも、1950-60年代に実施された核実験で環境に放出されたトリチウムの影響を、地下水や深海水などに見ることができる。核実験によるトリチウムの環境放出が今後なければ、やがて、以前の天然トリチウムの分布に戻ると考えられるので、現在の分布は天然分布に戻る途中の状態ともいえる。しかし、原子力発電所や核燃料再処理施設などから、人為起源のトリチウムが環境へ放出されているので、環境トリチウムが天然分布へ戻ることはないであろう。したがって、人為起源トリチウムと天然トリチウムが形成する新たな状態へ移行する途中にあるのかもしれないが、人為起源トリチウムの生成は今後も増加すると予想されることから、供給と放射壊変が釣り合った平衡状態に環境トリチウムがなる可能性は少ないと考えられる。核実験によるグローバルフォールアウトのトリチウムと異なり、原子力発電所や核燃料再処理施設はローカルな発生源であり、その影響が及ぶ地域は限定される。一方、核融合施設では想定されるトリチウム使用量が多いことから、高度な

トリチウム閉じ込め技術を取り入れても、その影響はローカルではなく広範囲に及ぶであろう。核融合施設を含め、既存の施設から放出されるトリチウムの環境影響を、すべて実験で評価することは不可能である。したがって、適切なモデルを用いる環境分布評価が必要になる。いずれにしても、モデルの初期条件は現状のトリチウム分布であることから、その意味においても現在の環境トリチウム分布を明らかにしておくことは重要である。

現状の原子力発電所や核燃料再処理施設から、トリチウムは主に水として環境へ放出されている。わが国の商業用原子炉は国内電力の約30%をまかなっている。トリチウムの環境放出についてはPWR (Pressurized Water Reactor) がBWR (Boiling Water Reactor) より圧倒的に多く、PWRは100万kWあたり年間11~28 TBq ($T=10^{12}$) のトリチウムを放出している[1]。PWRの100万kWあたりのトリチウム放出量を20 TBqとすると、わが国のPWR23基の総出力は1,930万kWであることから、年間386 TBqのトリチウムを環境へ放出していることになる。一方、青森県六ヶ所村の核燃料再処理施設から平成19年度は気体として9.8 TBq、液体として1300 TBqのトリチウムが環境中へ放出された[2]。大きなコストを必要とする希薄なトリチウム水の回収は、原子力発電所と再処理施設では行われていないことから、これらの施設周辺環境ではトリチウム水の環境動態が最も重要である。トリチウムの生物への取り込みでは、その化学形が重要な因子として作用することが、トリチウムラベル化合物製造工場周辺の環境分析から示されている[3]。トリチウムは生態系の営みである物質およびエネルギーの流れに組み込まれ、環境中で多様な化学形に

Tritium Distribution in the Environment and Transfer Model of Tritium Released from Nuclear Facilities

1. Introduction

MOMOSHIMA Noriyuki

author's e-mail: momorad@mbx.nc.kyushu-u.ac.jp

変換されて存在することが、環境影響評価におけるトリチウム解析の重要性を示している。モデルによる移行解析に必要なパラメータや環境事象について必ずしも十分な知見が得られているわけではなく、トリチウムは低エネルギー β 線を放出する核種で被ばくへの寄与は少ないので環境動態の知見が不十分でも構わないということにはならない。

核実験起源のトリチウムの影響は、1980年代後半以降の雨では小さくなり近年はほとんど見られていないが、河川水や地下水にはしばしば比較的高い濃度のトリチウムが見出される。核実験トリチウムを利用する水の年代決定は水文学の分野では有用な手法として広く利用されている。施設起源のローカルなトリチウムも、やがてはその地域の地下水移動のトレーサとして利用されるときが来るかもしれ

ない。

この小特集では、水のトリチウムに焦点を当て、現在のわが国の陸域を中心とした環境トリチウムの分布、水文学的な利用および施設起源トリチウムが大気、河川、地下水へと広がる様子を記述する移行モデルとその実際について紹介する。

参考文献

- [1] UNSCEAR 1988, United Nations Report (1988).
- [2] <http://www.jnfl.co.jp/monitoring/discharge/content-cycle.html> (日本原燃ホームページ)
- [3] D. McCubbin, K.S. Leonard, T.A. Bailey, J. Williams and P. Tossell, Mar. Pollut. Bull. 42, 852 (2001).



小特集用語解説

*1太陽活動：

宇宙線には銀河宇宙線と太陽宇宙線があるが、大気上層における誘導放射性核種の生成には銀河宇宙線の寄与が大きい。太陽活動が活発化すると太陽プラズマが地球を覆うため地球大気に到達する銀河宇宙線の数が増加する。そのため、誘導放射性核種の生成量も増加する。太陽活動の強弱は黒点数で知ることができ、黒点数が多いとき太陽活動は活発であり、少ないときは弱い。黒点数には11年サイクルの増減が観測されている。http://sidc.oma.be/sunspot-index-graphics/sidc_graphics.php 参照。

*2T.U.：

Tritium Unit の省略形で環境中のトリチウム濃度の単位として用いられる。Tritium Ratio (T.R.) と呼ばれる場合も有り、水素原子 10^{18} 個あたりにトリチウム原子が1個存在する場合を1 (T.U.) と定義している。水の場合は1 TU = 0.118Bq/l である。

*3湧水比流量：

特定河川の1年間(365日)に渡る日流量を大きい順に並べた時に、355日目に当たる流量を湧水流量という。この湧水流量を流域面積で除して100km²あたりの流量に換算したものを湧水比流量という。年間の内の10日間はこれを下回る流量になるというきわめて少ない湧水時の流量に相当する。日本の平均湧水比流量は0.95 m³/秒/100 km²で流出高に換算すると1.1 mm/日になり、日本の山地における平均的な地下水涵養量に近いとされている。

*4CFCs 濃度：

CFC-11 (trichlorofluoromethane, CCl₃F), CFC-12 (dichlorodifluoromethane, CCl₂F₂), CFC-113 (trichlorotrifluoroethane, C₂Cl₃F₃) の3物質をCFCsと称し、化学的に安定で、毒性が低く不燃性という優れた特性から、1930年以降主としてエアコンや冷蔵庫の冷媒、スプレー缶の噴射剤、発泡剤の原料、また溶剤や洗剤として広く産業界で用いられてきた。CFCsは生産と同時に大気中にも放出され、生産量の増加に伴って大気中濃度も上昇したことで成層圏内のオゾン層の破壊に寄与する物質であることが明らかになり、オゾン層破壊の防止と温暖化規制物質の観点から、1987年のモントリオール議定書以降その生産・使用が制限された。このCFCs濃度の長期増加傾向は涵養域地下水に保存されるため、大気中のトリチウム濃度の減少傾向と反対のトレンドであることを長所に、1970年以降の地下水の涵養時期を示す年齢トレーサとして広く用いられるようになってきている。

*5バイパス流

帯水層中の地下水流れを考える時に、相対的に大きな連続亀裂や基盤岩中の空洞等を伝わってきわめて早い速度で流動する流れを、多孔質粒状媒体の帯水層を緩やかに流れる地下水流に対してバイパス流と言う。河川近傍斜面での大雨時の地下水位上昇に伴う斜面下部から川谷低地部への地下水流れには、地表面付近の植物根跡や動物の居住空洞等を伝わったバイパス流が発生することが知られている。

*6マントル He 成分

地下水中に溶存しているHe成分には、大気起源のHe、岩石起源He(岩石に含まれるU、Thの α 壊変He)と地球創生時の原始大気由来のHeが存在する。そのHe同位体(³He/⁴He)比は、それぞれ 1.4×10^{-6} 、 1×10^{-8} 、 1.1×10^{-5} と異なる。³H+³He法で地下水年代を推定する際に、マントルHe成分の混入が認められる場合には、誤差が大きくなる。

*7涵養温度

降水が地下に浸透して地下水面に到達した時点で平衡に達している不飽和層内の土中大気の温度。

*8不飽和層

土壌の間隙が地下水で満たされていないで、空気やガスを含む層。地下水位の上昇や下降で不飽和層の大きさは変動する。

*9コンパートメントモデル

放射性核種等の移行挙動評価において、評価対象領域をその物質の蓄積部(コンパートメント)の集合体と考え、放射性核種等の移行挙動を、コンパートメント間の移行や、コンパートメントと領域外との移行として表現したモデルであり、物質収支を連立常微分方程式で記述することができる。動的モデルは非平衡状態における蓄積量や濃度の経時変化を評価するのに対し、静的モデルは平衡状態における評価を行う。

*10沖積層と洪積層

新生代第四紀のうち、最初の約180万年前より1万年前までを洪積世、約1万年前から現在までを沖積世といい、それぞれの時期に形成された堆積層のことを指す。前者では氷河期と間氷期が交互に起こり、広く厚い堆積層が発達して、その礫層に豊富な地下水がある。後者には、最後の氷河期が終わった後、その堆積物によって沖積平野が発達して、地下水層が形成されている。

*¹¹Be-7

Be-7 (半減期53.3日)は宇宙線生成核種であり、大気中ではエアロゾルに付着して挙動しているが、雨により地表面に降下する。Cs-137 (半減期30.1年)は核実験フォールアウト核種で地表面に蓄積した。Pb-210 (半減期22.3年)は大気へ地面から揮散したラドンから生成する。大気中ではエアロゾルに付着して挙動しているが、雨により地表面に降下する。

これらの放射性核種は測定の容易なガンマ線を放出するので環境のトレーサとして有用である。

小特集執筆者紹介



もも しま のり ゆき
百島 則幸

九州大学アイソトープ総合センター・教授、環境放射能とその分析手法の研究を行っている。4年生(1974年)のときに水試料のトリチウム濃度を分析する卒業研究を行った。環境トリチウム研究の取りかかりであるが、35年も前の話である。よくこれまで研究が続いたと思う。趣味は、野原やもっばらご近所の庭に咲いている季節の花を見ることです。



う だ たつ ひこ
宇田 達彦

核融合科学研究所安全管理センター教授、核融合における放射線と炉システム安全性を専門としています。放射線ではトリチウム安全と中性子が主要な課題です。環境安全にも関心を抱いていますが難しい複雑なシステムの問題と感じています。また、大型プラズマ実験施設における電磁環境の安全管理も関わる特異な課題と考え取り組んでいます。



た なか まさ ひろ
田中 将裕

核融合科学研究所安全管理センター助教。大阪市立大学、名古屋大学大学院を卒業後、三菱電機などを経て、2006年5月より現職。現在は、微量トリチウムの取り扱いに関する要素技術開発に従事。先日ペルーを訪問し、嫁に誘われるままマチュピチュ遺跡を望むワイナビチュ(標高2690m)に登りました。でも、高い場所は苦手です。



すぎ はら しん じ
杉原 真司

九州大学アイソトープ総合センター放射線監視情報部門助教。主な研究分野は、環境放射能を利用した環境動態研究。福岡県大牟田市出身、九州大学理学部化学科を卒業後、現施設に就職して早・十年近く。研究と施設管理に奮闘中だが、老化には勝てず、字が見えないとか肩が上がらないとか、ちょっと疲れ気味。



しま だ じゅん
嶋田 純

熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター長・兼熊本大学大学院自然科学研究科教授。専門は、同位体水文学・地下水水文学。地下水を含む水循環の実態解明を水に含まれる天然の同位元素を用い、その年齢や起源を解析する研究をしている。熊本大学は10年前に赴任したが、我が国では特異的な火山性地下水と地下水行政が盛んな地域で、地の利を生かしたフィールド研究を多くの学生と共に楽しんでいます。趣味は犬の散歩と温泉旅行。



ま はら やす のり
馬原 保典

京都大学原子炉実験所(兼)京都大学大学院都市環境工学専攻、研究分野：環境トレーサーを使った地球規模水・物質循環、電中研で約30年その後京大へ、6年経っても大学はやは

り異文化な世界。



おお た とも こ
太田 朋子

京都大学原子炉実験所、助教。研究分野：環境放射能(地下水の滞留時間と起源の推定、環境放射能を指標とした水循環の推定、考古学試料の製作技法の解明など)。経歴：佐藤純博士のもとで学位を取得。趣味：武道



たか はし とも ゆき
高橋 知之

京都大学原子炉実験所原子力基礎工学研究部門准教授。博士(工学)。実験所では専ら放射線管理や環境影響評価、原子力防災などの業務に追われています。主な研究分野は、陸域生態圏(特に耕作地系)での放射性物質の移行挙動のモデル化で、今は主に炭素14の移行モデルの構築に取り組んでいます。



やま し ひろ くに
山西 弘城

自然科学研究機構核融合科学研究所准教授。所属は安全管理センター。専門分野は、保健物理、放射線防護。名古屋大学工学研究科原子核工学専攻で工学博士取得。そのときのテーマは大気中ラドン濃度測定。ちょっと前の趣味はうどん作り。夜のジョギングを始めて7日目(6月17日現在)。妻1人、息子2人、文鳥1羽、かめ1匹。



みや もと きり こ
宮本 霧子

放射線医学総合研究所基盤技術センター、専門業務員。研究専門分野はフォールアウトおよび原子力施設起源の環境中トリチウム動態モデル化。特に趣味と言えるものはないのに、することには事欠かない不思議な毎日です。



あま の ひかる
天野 光

日本分析センター技術参事、東邦大学大学院理学研究科客員教授、博士(工学)。2008年までは日本原子力研究開発機構において環境放射能に関する研究や業務に従事。趣味は自然観察と写真撮影、スキー、テニスなど。青森県むつ市在住中に共著した「下北半島自然観察ノート」は2008年に青森県の推薦図書となった。



いの うえ よし かず
井上 義和

放射線医学総合研究所にて、1969年入所以来2004年の退職まで、主としてトリチウム(T)の環境挙動に関する研究に従事。大気から人体組織まで種々の環境媒体に含まれる、種々の化学形の低濃度Tの分析法を確立し、自然および原子力施設周辺のT濃度を長期間測定しデータベース化した。それらを環境移行モデル実証国際研究に応用した。1995年~2000年IAEAに科学秘書として勤務。