

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度～令和6年度実施総括報告書

研究課題名	陸・水圏植物における有機結合型トリチウム（OBT）生産速度の網羅的把握
研究期間	令和4年度～令和6年度（3年間）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	佐藤 雄飛	公益財団法人環境科学技術研究所・副主任研究員
分担研究者		
若手研究者		

1. 研究の概要

本研究は、福島第一原子力発電所より海洋放出される ALPS 処理水に関連したトリチウム（^3H）の環境動態把握を目的とした。その中でも特に、植物有機物中への蓄積（有機結合型トリチウム：Organically Bound Tritium：OBT としての蓄積）に着目した。これは、降水や海水といった水中のトリチウム（トリチウム化水：HTO として存在）に比べて、有機物と結合したトリチウムに関しては環境動態に関する知見が希薄であること、また植物中の OBT がより直接的に人の経口摂取に寄与する可能性があるためである。本研究では、東北地方の太平洋側沿岸域において一般的に生息する各種の陸上植物 {クロマツ（苗木）、ミズナラ（苗木）、イネ、コマツナ、牧草} 及び水生一次生産者 {植物プランクトン（珪藻、ハプト藻、緑藻、クリプト藻）、海藻（アオサ、オゴノリ）} について、水素の安定同位体である重水素（^2H）をトリチウムの代替物質としたトレーサー培養実験を実施し、これら生物種における OBT 生産能力を評価した。また、これら培養実験で得られた結果に基づいて、陸上植物（コマツナ）中の OBT 濃度を再現する数値モデルを構築し、環境中にトリチウムが放出された際の同植物中における OBT 濃度の推定が可能になった。さらに、本研究の成果と環境科学技術研究所における過去の研究成果を合わせて、福島沿岸海域における魚類（ヒラメ）中の OBT 濃度を予測する数値モデルを開発した。そして、実際に処理水に由来するヒラメへの OBT の蓄積を推定した結果、この蓄積は実測的に検出可能な水準よりも低いものであり、ヒラメを経口摂取した場合より被ばくを考慮した際には十分に無視できる程度であることが示唆された。
--

2. 研究期間内に実施した内容

年目／実施年度	実施した内容
1 年目	環境科学技術研究所の構内に陸上植物（樹木、草本類、イネ）を栽培するための実験圃場を整備した。その後、各種の植物種 {クロマツ苗木、ミズナラ苗木、イネ、牧草（オーチャードグラス）、コマツナ} を実際に栽培し、栽培方法、試料の採取及び採取の方法、分析法の確認を行った。また、同時に、これらの植物に関する成長度合い（重量変化等）や有機物の元素組成といった、植物中の OBT 動態を解析する上で基盤情報となるデータを取得した ¹⁾ 。また、水生一次生産者である植
令和4年度	

	物プランクトンに関しては、国立環境研究所より東北沿岸海域に一般的に生息する植物プランクトン 4 種（珪藻、ハプト藻、緑藻、クリプト藻）の単離株を購入し、それらのプランクトン類について培養条件（人工海水の組成や光条件等）を検討した。その結果、環境科学技術研究所の実験室内における同プランクトン類の安定的な培養が可能となった。
2 年目	陸上植物 3 種（クロマツ苗木、コマツナ、イネ）に関して、環境科学技術研究所に設置された気象チャンバー（気温等の生育条件を制御できる培養器）内において栽培ポット内の土壌へ重水（^2H で標識された水：$^2\text{H}_2\text{O}$）を添加したトレーサー実験を実施し、植物の OBT 生産能力の指標となる有機結合型重水素（Organically Bound Deuterium：OBD）の生産速度に関するデータを取得した。また、植物プランクトンに関しては、海水中に重水を添加したトレーサー実験を実施し、陸上植物と同様に OBD の生産速度を取得した。さらに、ここで得られた植物プランクトンの OBD 生産速度データと環境科学技術研究所における過去の研究成果を合わせて解析し、福島沿岸海域における植物プランクトンの OBT 生産速度と底生魚（ヒラメ）への移行度合いを推定した。その結果、この OBT 生産速度は海底堆積物や魚介類への OBT の蓄積にほとんど影響しない程度であることが示唆された^{2,3)}。なお、トリチウムの代替として ^2H を用いた場合の実験結果に対する同位体効果は、安全評価上の解釈にほとんど影響しない。
令和 5 年度	
3 年目	陸上植物 2 種 {ミズナラ苗木、牧草（オーチャードグラス）} に関して、前年度と同様にトレーサー実験を実施し、これら植物種の OBD の生産速度に関するデータを取得した。また、海藻 2 種（アオサ、オゴノリ）を環境科学技術研究所近隣の沿岸海域より採取すると共に、同海藻類を水温及び光条件の制御下で培養するための実験系を構築した。その後、植物プランクトンと同様にトレーサー実験を実施し、これらの海藻における OBD の生産速度データを取得した。さらに、前年度にコマツナについて取得した各種データを用いて、同植物種の生育期間中における OBT の蓄積状況を推定する数値モデルを構築した。加えて、前年度に構築した数値モデル（植物プランクトンからヒラメへの OBT の蓄積を推定）に海水中の HTO の拡散を再現する数値モデル⁴⁾を組み合わせ、福島沿岸海域における ALPS 処理水に由来するトリチウムのヒラメへの蓄積度合いを推定した。この際、これまでの処理水の放出状況を参考にした現実に即した処理水放出（現実的放出シナリオ）と、東京電力が定める排出基準上限値のトリチウム濃度（$1,500 \text{ Bq L}^{-1}$）を仮定した放出（最大リスクを想定した放出シナリオ）の、各々で推定計算を実施した。その結果、最大リスクを想定したシナリオでさえも、ヒラメを経口摂取した場合による被ばくを考慮した際には十分に無視できる程度 {国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection：ICRP）が定める公衆被ばくの線量限度（1 mSv y^{-1}）の 0.001%以下} であることが示唆された。
令和 6 年度	

3. 研究終了時に得られた結果・結論

① 研究結果・結論（総括）・成果など

本研究の当初の計画では、東北沿岸域に生息する陸上植物及び水生一次生産者についての OBT 生産速度に関する実測的情報の提示までを目標としていた。しかしながら、計画初年度の終了時における評価委員からの要望と社会的必要性を鑑みて、計画 2 年目からは OBT 生産過程の数値モデルの作成を目標に加えた。まず OBT 生産速度の実測的評価については、重水トレーサー実験により、陸上植物 5 種（クロマツ、ミズナラ、イネ、牧草、コマツナ）及び水生一次生産者 6 種 {植物プランクトン 4 種（珪藻、ハプト藻、緑藻、クリプト藻）、海藻 2 種（アオサ、オゴノリ）} について同生産速度に関する情報を取得し、その一部を科学論文として公表した²⁾。また、ここで取得された実測データに基づいて、ALPS 処理水が放出された状況下の福島沿岸海域における植物プランクトンの OBT 生産量や底生魚（ヒラメ）へのトリチウムの蓄積量を推定するための数値モデルを開発した^{2,3)}。このモデルで実際に計算を実施した結果、ALPS 処理水に由来するトリチウムは、放射性核種を保持する重要な環境媒体である海底堆積物への滞留（ $10 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 以下）や人の経口摂取による被ばく {ICRP が定める公衆被ばくの線量限度（ 1 mSv y^{-1} ）の 0.001% 以下} を考えた場合に無視できる程度の蓄積度合いであることが示された^{2,3)}。また、陸上植物に関しては、海水中のように ALPS 処理水が植物中 OBT 濃度に影響を与えうる状況が明確に想定されるシナリオが無いものの、万が一の不慮の事象に備えるという意味で、OBT 濃度を推定するための数値モデルを構築した。この際、経口摂取に寄与する葉菜であり、また栽培期間の短さや植物体の大きさの観点でモデル構築を行い易かったコマツナを対象植物とした。ここで構築したモデルは、本研究で取得した実測データの精緻さと、これまで勘案しなかった非光合成反応の概念を構造に組み込んだことにより、従来の研究で用いられた数値モデルよりも推定精度の高いものとなった。この数値モデルに関しては、現在、科学論文としての公表を検討している。また、副次的成果として、本研究で得られた植物有機物の元素組成データを解析した結果、植物の種類及び部位によって OBT の蓄積効率が異なることが明らかとなり、具体的には植物種として木本植物、部位として根において OBT の蓄積効率が比較的低いことが示唆された¹⁾。これらの成果は、ALPS 処理水に伴う風評被害の防止や、原子力関連施設の運用に伴う安心・安全の保証に寄与することが期待されるものである。

② 計画・目標通り実施できなかった事項とその理由

本研究は計画通り遂行され、設定された目標も十分に達成された。したがって、実施出来なかった事項は特に無い。

③ 当初の計画で予定した成果以外（以上）に得られた事項

当初の計画では重水トレーサーを用いて陸上植物及び水生一次生産者の OBT 生産速度に関する実測的データを取得することを目標としており、この目標は十分に達成した。これに加えて本研究では、この実測データを基に海水中における植物プランクトンや魚類への OBT 蓄積の数値モデルを構築した。また、このモデルを用いて ALPS 処理水に由来するトリチウムを蓄積した魚を摂取した場合の被ばく線量を具体的に評価し、その線量が非常に軽微であることを示した。さらに、陸上植物に関して、生育期間中の OBT 蓄積過程を再現する数値モデルを構築すると共に、トリチウムの蓄積効率に関する植物種や部位による差異を明らかにした。これら予定された以上の成果は、ALPS 処理水由来のトリチウムに関するリスク評価や風評被害の防止に直接的に貢献するだけでなく、原子力技術の運用に伴う環境リスク評価や安全性評価への活用が期待されるものである。

4. 研究成果の活用方策の提案

本研究をさらに発展させる新たな研究や事業化の提案

本研究では時限や予算の関係上、限定的な陸上植物種でのデータ取得や数値モデルの構築を行った。一方、本研究で対象とした植物種以外にも福島沿岸域には多くの種が存在する。その中には、野菜や穀物等、人の経口摂取による被ばくに寄与する可能性が高いものもある。また、水生一次生産者に関しても同様に、全て種類を網羅した訳ではなく、本研究では調査しなかった可食海藻も存在する。今後は、これら「食物」となる植物種に対して本研究のようなアプローチを広げてくことが、ALPS 処理水に関連したリスクに対する正確な科学的評価や風評被害の防止に繋がる可能性がある。さらに、本研究では数値モデルを用いて、植物プランクトンから魚（ヒラメ）へのトリチウムの蓄積を推定し、この魚を摂取した場合の被ばくリスクを評価したが、ここで想定した以外の蓄積経路（海藻から魚、など）や魚種についても同様のモデル計算を実施することで、福島沿岸で採取される水産物に対するALPS 処理水の影響について網羅的でかつ定量的な情報を提示できる可能性がある。

引用文献

- 1) Satoh, Y., Imada, S., Nagai, T., Yamagami, M., Tani, T. 2025. Factors regulating the accumulation efficiency of organically bound tritium in plants across species, parts, and environmental conditions: Investigation using the C/H ratio in plant organic matter. *Journal of Environmental Management*, 380, 125168.
- 2) Satoh, Y., Omori, Y. 2023. Evaluating production rates of particulate organic hydrogen by marine phytoplankton for estimating phytoplanktonic productivity of organically bound tritium. *Water Research*, 242, 120592.
- 3) Satoh, Y, Tani, T. 2024. Estimation of accumulation potential for tritium in olive flounder on exposure of treated water derived from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Tritium transfer from seawater and food chain into organically bound tritium in the targeted fish. *Environmental Research*, 257, 119278.
- 4) Kamidaira Y, Uchiyama Y, Kawamura H, Kobayashi T, Otosaka S, 2021. A modeling study on the oceanic dispersion and sedimentation of radionuclides off the coast of Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*, 238–239, 106724.