

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H04629

研究課題名(和文)トリチウム汚染水の海洋放出処分に向けた社会的合意形成の為にトリチウム生物影響研究

研究課題名(英文) Tritium bioeffects research for establishing social consensus on the disposal of tritiated water by oceanic discharge

研究代表者

鳥養 祐二 (Torikai, Yuji)

茨城大学・理工学研究科(理学野)・教授

研究者番号：80313592

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：トリチウム処理水の海洋放出処分における、安全確認と安心のために、トリチウム水を用いてヒト細胞の培養を行い、その影響を調べた。その結果、海洋放出するトリチウム処理水濃度と比較して、非常に高濃度なトリチウム環境下でしか細胞死は起きないこと、モンテカルロ法により、細胞核にトリチウムの線のエネルギーを付与するためには、トリチウムは細胞核内に存在する必要があること、を明らかにした。また、魚の自由水に含まれるトリチウムの濃度を迅速に測定できる手法の開発を行い、トリチウム処理水の海洋放出処分時の迅速な安全確認が行えるようにした。本研究は、トリチウム処理水の処分に大きく貢献する研究成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トリチウム処理水の海洋放出処分における、安全確認と安心のために、トリチウム水を用いてヒト細胞の培養を行い、その影響を調べた。また、細胞中のトリチウム分析法を応用し、魚の自由水中のトリチウム濃度の迅速測定法の開発を行った。既往の方法では、魚の自由水中に含まれるトリチウム濃度測定は、1つの試料に1ヶ月以上の時間が必要であるが、本研究により開発した手法では、1日に数試料の測定が可能である。この分析法は、トリチウム処理水の海洋放出処分時の魚のトリチウム濃度の安全確認法として実用段階にある技術であり、この成果は、風評被害の最小化に大きく貢献する。

研究成果の概要(英文)：To confirm the safety and assure the security of the disposal of tritiated water for ocean discharge, the effect of tritiated water on the culture of human cells was investigated. As a result, it was found that (1) cell death occurs only in a very high tritium environment compared to the concentration of tritiated water to be released into the ocean, and (2) tritium must be present in the cell nucleus to give tritium beta-ray energy to the cell nucleus by the Monte Carlo method. In addition, (3) we developed a method to rapidly measure the concentration of tritium in the free water of fish, so that we can quickly confirm the safety of tritiated water when it is disposed of by discharge into the ocean. This research result contributes significantly to the disposal of tritiated water.

研究分野：トリチウム理工学

キーワード：トリチウム処理水 海洋放出処分 生物影響 生体中トリチウム濃度の迅速測定 風評被害の最小化

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故では、燃料中に存在するトリチウムのうち1.5ペタベクレル(1.5×10^{15} Bq)が水として施設内循環水中に放出されており、地下水等の混入によりその量は増加を続けている。多核種除去設備等で他の放射性核種は分離除去できるが、トリチウムまでは処理できない。そのためトリチウム処理水の処分方法は現状確定しておらず、最終的な処分に向けて、社会的に合意できる方法を、その被害を最小にするように選択しなければならない。トリチウム処理水の処分方法として、同位体濃縮による減容が検討されているが、処理水中のトリチウム濃度は、最大で4,000 Bq/ml、現在新規に発生する汚染水中のトリチウム濃度は400 Bq/ml程度と非常に希薄であるため、処理水からトリチウムを濃縮・回収するには莫大なエネルギーと時間(コスト)が必要である。しかも、濃縮後の高濃度トリチウム水はなお大量であり、その保管・処分のリスクが残る。一方、処理水からトリチウムを完全に除去することはできず、環境濃度を大幅に上回るトリチウム水が数10万~100万トン残存し、その処分法の検討が必要である。現実的なトリチウム汚染水の処分方法として、公衆への被ばくが問題とならないレベルで希釈後に海洋放出することが可能である。しかしながら、生活環境あるいは農水産物における有意濃度の検出はより低レベルで発生しうるため、法定限度以下の濃度でもなお風評被害を含めた環境・社会影響が懸念され、社会的合意を得られる処分方法は現在のところ見出されていない。

2. 研究の目的

トリチウム処理水の海洋放出に対して社会的に合意が得られるためには、海洋放出後の海洋及び近海陸域におけるトリチウムの濃度が、十分に安全かつ社会的に容認できるレベルとすること、放出されたトリチウムが生活圏へ到達しないか、到達してもその濃度は十分に安全であることのみならず、農水産物や居住環境における風評被害など社会的リスクを極小とするレベルとすること、いかなる状況においてもトリチウムが人体へ移行して有意な被曝あるいは影響を与えないレベルとすること、を可能とする方法を提示する必要がある。この中での有意な被曝あるいは影響を与えないレベルに関する研究は研究例が少なく、時間が掛かる研究であるため、トリチウム汚染水の海洋放出を速やかに行うためには、研究を早期に開始する必要がある。

低濃度から高濃度のトリチウム水および有機結合性トリチウム環境で培養したヒト細胞において、培地と比較してヒト細胞へのトリチウムの特異的な濃縮が起きるのか、DNA等の小器官の分離処理を行い、各部位に取り込まれたトリチウム量を測定し、DNAへのトリチウムの特異的な濃縮が起きるのか、を検証する。また、低濃度から高濃度のトリチウム水および有機結合性トリチウムを用いて培養したヒト細胞を、DNAの解析が行える医学・薬学系の施設に送り、放射線生物影響の専門家と放射線の専門家により分析と解析をおこない、トリチウムのβ線によるDNA鎖の切断に与えるトリチウム濃度依存性を求める。それにより、トリチウム汚染水のトリチウム濃度で人体への影響があるか確認するとともに、どの濃度まで細胞に影響があるかを確認する。これによりトリチウムのβ線がおよぼす細胞への影響を調べ、低線量トリチウム被曝の安全性を明らかにし、福島第一原子力発電所で発生したトリチウム汚染水の海洋放出を行うための社会的合意が速やかに得られるようにつとめる。

3. 研究の方法

富山大学 水素同位体科学研究センターにおいて比較的高濃度のトリチウム水および有機結合性トリチウムを用いてヒト細胞を培養し、この培養細胞に対して、DNAの分離等の処理を行い、各部位に取り込まれたトリチウム量を測定し、細胞内でのトリチウムの特異的な濃縮の有無を検証する。また、培養細胞の脱トリチウム処理を行い、富山大学 医学・薬学系の管理区域に試料を送り、トリチウムのβ線起因のDNA鎖の切断がトリチウムによってどの様に引き起こされるか検討し、ヒト細胞に与えるトリチウムの影響について検討する。

4. 研究成果

本科研費の研究代表者は、平成28年4月1日付で富山大学から茨城大学に転勤した。申請時には、転勤が予定されていなかったため、研究計画を大きく変更せざるを得なくなった。特に、富山大学の管理区域を常時使用できなくなったために、トリチウムを使用した継続的な実験は不可能となった。富山大学に出張することにより研究を行ったが、研究期間の後半はコロナの影響もあり、トリチウム水環境下でのヒト細胞の培養試験は大きく制限された。そこで、モンテカルロ法による細胞内でのトリチウムのβ線のエネルギー付与と、体内トリチウムの分析法について検討を行った。以下にその成果を示す。

トリチウム水と細胞影響があることが確認されているトリチウムチミジン環境下でのヒト細胞の培養を行い、アポトーシスの観察を行った。ヒト白血球細胞として放射線感受性の高いMolt-4細胞と感受性の低いU-937細胞を培養した。培養時間は27、48、72時間であ

る。また、ギムザ染色法を用いて細胞像を観察した。細胞培養の結果の一例を図に示す。トリチウムチミジンを含む培地で培養した場合、Molt-4 および U-937 細胞共に培養時間に依存してアポトーシスの割合が増加した。これに対し、トリチウム水を含む培地で培養した場合は、Molt-4 細胞では 500 kBq/ml のトリチウム濃度でもアポトーシスの割合の有効な増加は認められなかった。一方、U-937 では、この濃度条件下ではアポ

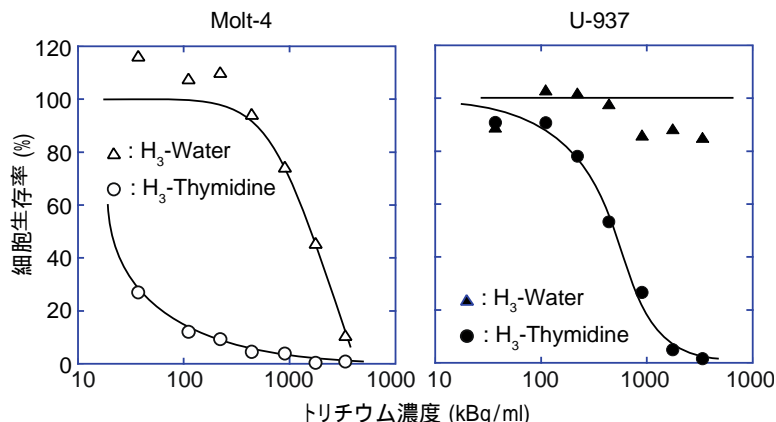


図 トリチウム水及びトリチウムチミジン環境下で 24 時間ヒト細胞を培養したときの細胞生存率のトリチウム濃度依存性

トーシスの有意な増加は観測されなかった。トリチウム処理水は 1,500 Bq/L (1.5 Bq/ml) 以下の濃度で海洋放出することが決まっているが、この濃度と比較して、非常に高濃度なトリチウム環境下でしか細胞死は起きないことが明らかとなった。しかしながら、この時の細胞核に付与するエネルギーを後述のモンテカルロ法により評価した結果、細胞核に付与するエネルギーが 0.1 Gy 程度でも細胞死が起きることが明らかとなった。

モンテカルロ計算コード PHITS を用いて、トリチウムの線がヒト細胞に与える影響のモデル解析を行った。これまでの知見では、トリチウムの線の水中での飛程は 5 マイクロメートル程度であり、細胞質内にトリチウムが存在する場合でも細胞核にトリチウムの線のエネルギーを付与できることになっていた。今回、直径 10 マイクロメートルの細胞に直径 5 マイクロメートルの細胞核が存在する三次元の水球体モデルを構築し、PHITS を用いてトリチウムの線の細胞内での飛程を詳細に解析した。トリチウムの線は、トリチウムの存在位置から 0.05 マイクロメートルの距離で、エネルギーの 80% 以上を失い、0.8 マイクロメートルで 90% 以上のエネルギーを失うことが分かった。そこで、細胞核の中心から細胞の外に向けてトリチウムの存在位置をずらしながら細胞に付与するエネルギーを計算した結果、DNA が存在する細胞核にトリチウムの線のエネルギーを付与するためには、トリチウムは細胞核内に存在する必要があることが明らかとなった。また、トリチウム水を人体に取り込んだ場合に、人体のトリチウム濃度から細胞核に与える線量を求める換算係数を求めた。この換算係数を用いることにより、人体にトリチウムを取り込んだ場合の DNA 損傷の指針を得ることができる。

トリチウム環境下で培養した細胞から、DNA を含む細胞構造体と細胞に含まれる水の分離法の検討を行った。残念ながらトリチウム水環境下で培養した細胞に対して実験することはできなかったが、本手法を応用して、魚の自由水中のトリチウム濃度の迅速測定法の開発を行った。既往の方法では、魚中の自由水に含まれるトリチウム濃度測定は、1 つの試料の測定に 1 ヶ月以上の時間が必要である。これに対して、本研究により開発した電子レンジを用いて試料の加熱と水を回収する方法により、1 つの試料から 30 分以内に自由水を回収することができた。この方法を用いてトリチウム処理水の海洋放出時の安全確認法を検討した結果、1 日に 5~10 試料の魚の自由水中に含まれるトリチウム濃度を測定することができるようになった。この技術は、福島第一原子力発電所で生じたトリチウム処理水の海洋放出処分時の魚のトリチウム濃度の安全確認法として現在実用化段階にある技術であり、トリチウム処理水の海洋放出処分時の魚の安全性の確認を速やかに行うことができるため、風評被害の最小化に大きく寄与する研究成果である。

本研究成果を含むこれまでのトリチウム研究成果が認められ、2021 年度から環境省の ALPS 処理水に係る海域モニタリング専門家会議のメンバーに選任された。また、本研究から派生した魚の自由水中に含まれるトリチウム濃度の迅速測定法の検証と実用化の為に、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構と共同研究“魚介類トリチウム濃度の迅速測定法に関するフィジビリティスタディ”を締結できたのは、本科研費の大きな成果である。

【研究成果のまとめ】本科研費により、海洋放出するトリチウム処理水濃度と比較して、非常に高濃度なトリチウム環境下でしか細胞死は起きないこと、モンテカルロ法によりトリチウムの線の細胞内での飛程を計算した結果、DNA が存在する細胞核にトリチウムの線のエネルギーを付与するためには、トリチウムは細胞核内に存在する必要があることが明らかとなった。また、人体のトリチウム濃度から細胞核に与える線量を求める換算係数を求めた。魚の自由水に含まれるトリチウムの濃度を迅速に測定できる手法の開発を行い、トリチウム処理水の海洋放出処分時の迅速な安全確認が行えるようになった。本研究はトリチウム処理水の海洋放出処分に大きく貢献している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tauchi, H., Toyoshima-Sasatani, M., Nagashima, H., Shimura, T., Umata, T., Tachibana, A.	4. 巻 128
2. 論文標題 Tritium Biology in Japan: A search for a new approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 28-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 土田大貴、鳥養祐二、趙慶利、庄司美樹、近藤貴
2. 発表標題 トリチウムのヒト細胞への影響
3. 学会等名 NIFS一般共同研究 研究会「原型炉におけるトリチウムの課題」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間駿太、菊地絃太、鳥養祐二
2. 発表標題 環境トリチウム分析の簡素化と迅速化
3. 学会等名 NIFS一般共同研究 研究会「原型炉におけるトリチウムの課題」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土田 大貴, 鳥養 祐二, 趙 慶2, 庄司 美樹, 近藤 隆
2. 発表標題 トリチウムのヒト細胞への影響-PHITSを用いた細胞核線量の計算
3. 学会等名 日本原子力学会 2019春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間 駿太, 菊地 絃太, 鳥養 祐二
2. 発表標題 海水中トリチウム分析法の迅速化に向けた研究
3. 学会等名 日本原子力学会 2019春の年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究により開発された魚の自由水中に含まれるトリチウム濃度の迅速測定法は、風評被害対策に大きく貢献するものであり、地方自治体や民間企業などに技術移転を積極的に進めている。特に、漁協関係や流通業界に対して技術の提供と分析のサポートを行い、消費者に対して安全性の説明ができる体制を構築を行っている。また、2022年の秋の原子力学会で技術の詳細を報告すると共に、トリチウム処理水の海洋放出に関わるシンポジウムを開催し、成果を公表する予定である。これらのトリチウム処理水の海洋放出処分における風評被害対策が行えるのは、本科研費に採択されたおかげである。

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田内 広 (Tsuchi Hiroshi) (70216597)	茨城大学・理工学研究科(理学野)・教授 (12101)	
研究分担者	趙 慶利 (ZHAO Qing-Li) (90313593)	富山大学・学術研究部医学系・助教 (13201)	
研究分担者	庄司 美樹 (Shoji Miki) (30361950)	富山大学・研究推進機構 研究推進総合支援センター・准教授 (13201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------