

DT 中性子照射下における固体増殖材 Li_2TiO_3 からのトリチウム放出特性

Characteristic of Tritium Release from Li_2TiO_3 under D-T Neutron Irradiation

枝尾 祐希 河村 繕範 落合 謙太郎 星野 毅
高倉 耕祐 太田 雅之 岩井 保則 山西 敏彦
今野 力

Yuki EDAO, Yoshinori KAWAMURA, Kentaro OCHIAI, Tsuyoshi HOSHINO
Kosuke TAKAKURA, Masayuki OHTA, Yasunori IWAI, Toshihiko YAMANISHI
and Chikara KONNO

核融合研究開発部門
ブランケット研究開発ユニット

Division of Blanket Research and Development
Fusion Research and Development Directorate

February 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

DT 中性子照射下における固体増殖材 Li_2TiO_3 からのトリチウム放出特性

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門
ブランケット研究開発ユニット

枝尾 祐希※1, 河村 繕範, 落合 謙太郎, 星野 毅, 高倉 耕祐※2
太田 雅之, 岩井 保則, 山西 敏彦, 今野 力

(2012 年 12 月 17 日受理)

核融合中性子源施設 FNS において、トリチウム増殖材であるチタン酸リチウム (Li_2TiO_3) を任意の温度に保持し、中性子を照射して生成したトリチウムを回収する実験を行った。実験体系としては、核融合炉ブランケットを模擬するため、トリチウム増殖材料を充填した容器の周囲をベリリウムブロック及び Li_2TiO_3 ブロックで覆った。トリチウム生成量計算による予測値と実験値はほぼ一致した。照射容器は核融合ブランケットの温度領域で一番トリチウム放出が遅い 300°C に加熱し、トリチウムをパージするガスとしては、ヘリウム、水素添加ヘリウム、水蒸気添加ヘリウム、水素及び水蒸気添加ヘリウムを選択した。生成トリチウムは HT 及び HTO として放出され、パージガス条件を変えることによりその割合が変わった。水蒸気添加ヘリウムパージの場合は、98%が HTO で放出された。水蒸気及び水素を添加したヘリウムによるパージでは 80%が HTO で放出され、この HTO 放出は水蒸気とトリチウムの同位体交換反応により起こると考えられる。乾燥ヘリウムパージの場合は、トリチウムはほとんど放出されなかった。一方、水素添加乾燥ヘリウムの場合は、60～70%が HT として放出され、この HT 放出は水素とトリチウムの同位体交換反応により起こると考えられる。水素添加により増殖材表面で起こる水分生成反応によって生じた水蒸気とトリチウムが交換反応を起こすため水素添加ヘリウムパージでも HTO が放出された。 300°C の低温ではトリチウムは水素との交換反応よりも水蒸気との交換反応を起こしやすいといわれているが、増殖材表面が水素による還元状態にある場合は HTO の放出は起こりにくかった。これは水分生成反応が低下するために起こる可能性が示唆されるが十分な検証が必要である。したがって、 300°C の Li_2TiO_3 からのトリチウム放出化学形はパージガス成分に大きく依存し、 Li_2TiO_3 表面状態の影響を強く受けることが明らかになった。

Characteristic of Tritium Release from Li_2TiO_3 under D-T Neutron Irradiation

Yuki EDAO^{※1}, Yoshinori KAWAMURA, Kentaro OCHIAI, Tsuyoshi HOSHINO, Kosuke TAKAKURA^{※2},
Masayuki OHTA, Yasunori IWAI, Toshihiko YAMANISHI and Chikara KONNO

Division of Blanket Research and Development,
Fusion Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2012)

Tritium generation and recovery studies on Li_2TiO_3 as a solid breeding material under neutron irradiation carried out in the Fusion Neutron Source (FNS) facility. A capsule with Li_2TiO_3 packed bed was put in a system which simulated an actual blanket system which built in beryllium blocks and lithium titanate ones. Estimated values of the amount of tritium generation by a numerical calculation agreed closely with experimental values. The capsule was heated up to 300°C under irradiation experiment. Helium, helium added water vapor, hydrogen or hydrogen/water vapor were selected as purge gas for tritium generated in Li_2TiO_3 . Tritium was released from Li_2TiO_3 as the chemical forms of HT and HTO, and the release ratio of HT/HTO depended on the composition of purge gas. In the case of purge by helium added water vapor, the ratio of HTO to total tritium release was 98%. In the case of purge by helium added water vapor and hydrogen, the ratio of HTO to total tritium release was 80%, which was confirmed that HTO released by isotope exchange reaction between water vapor and tritium on the surface of Li_2TiO_3 . In the case of purge by helium added hydrogen, the ratio of HT to total tritium release was 60 ~ 70%, which was shown that HT released by isotope exchange reaction between hydrogen gas and tritium. HTO released by water generation reaction between hydrogen in purge gas and oxygen in Li_2TiO_3 in the case that water vapor was not added in purge gas. Although it was known that isotope exchange reaction between water vapor and tritium was easier to occur than that between hydrogen and tritium in lower temperature less than 300°C, the ratio of HTO release seemed to be small under the deoxidized condition of the Li_2TiO_3 surface. The phenomenon may be correlated to water generation reaction rate. Therefore, tritium release behavior in the Li_2TiO_3 depended on the composition of purge gas, and its chemical form was affected by the surface conditions of Li_2TiO_3 .

Keywords: Solid Breeding Material, Blanket, Li_2TiO_3 , Tritium Recovery, Tritium Generation, Neutron Irradiation, In-situ, FNS, ITER-TBM

※1 Post-Doctoral Fellow ※2 Collaborating Engineer

目次

1. 諸言	1
2. 固体増殖材におけるトリチウム放出過程	2
3. トリチウム生成回収実験	3
3.1. 実験装置	3
3.1.1 トリチウム生成系	3
3.1.2 トリチウム回収系	3
3.2. 実験手順	3
4. トリチウム生成回収実験結果及び考察	4
4.1. トリチウム生成量と回収量	4
4.2. トリチウム放出化学形	5
4.2.1. Li_2TiO_3 からの水分放出現象	5
4.2.2. 300℃におけるパージガス組成のトリチウム放出化学形への影響	5
4.2.3. 室温におけるトリチウム放出化学形	7
4.2.4. 600℃におけるトリチウム放出化学形	7
5. 結論	7
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Processes of tritium release from a solid breeding material	2
3. Experiment of tritium generation in and tritium recovery from Li_2TiO_3	3
3.1. Experimental apparatus	3
3.1.1 Tritium generation system	3
3.1.2 Tritium recovery system	3
3.2. Procedure of the experiment	3
4. Results of the experiment	4
4.1. Amount of tritium generation and tritium recovery	4
4.2. Chemical forms of tritium release from a solid breeder	5
4.2.1. Phenomena of water release from Li_2TiO_3	5
4.2.2. Effect of composition of purge gas to chemical forms of tritium release in 300°C ...	5
4.2.3. Chemical forms of tritium release in room temperature	7
4.2.4. Chemical forms of tritium release in 600°C	7
5. Conclusions	7
References	9

1. 諸言

核融合炉の燃料であるトリチウムは、核融合炉の炉心を取り囲んだブランケットで自己生産される。ブランケットで生成されたトリチウムは、回収、精製、同位体分離を経て燃料として調整され供給される。この一連の流れであるブランケット - トリチウム燃料システムは、トリチウム回収システム、燃料精製システム、同位体分離システムで構成され、これらシステムの確立が核融合炉を成立させるための重要な課題の一つとなっている。

トリチウム回収技術及び燃料処理技術についてはすでに開発が進んでおり、トリチウム回収システムに低温モレキュラーシーブ塔 (CMSB: Cryogenic Molecular Sieves Bed)、燃料精製システムにパラジウム拡散器、同位体分離システムに深冷蒸留塔を採用し、それらを複合したシステムによるトリチウム燃料システムの実証に成功している¹⁾。現在、DEMO 炉用のブランケット開発に向けた ITER テストブランケットモジュール (ITER-TBM) 計画が進められており、トリチウム回収法としては、性能が実証された CMSB 法が採用されている²⁻³⁾。ITER-TBM 試験計画は ITER 計画の目的の一つであり、ブランケットのトリチウム増殖性能と発電機能の実証試験が行われる予定である。日本が提案している TBM は固体増殖水冷却方式 (WCCB: Water Cooled Ceramic Breeder) であり、増殖材には Li_2TiO_3 、中性子増倍材にベリリウムあるいはベリリウム - チタン合金、スイープガスに水素添加ヘリウムを採用している。WCCB のトリチウム増殖性能を評価するにあたっては、ブランケットのトリチウム生成及び回収、各機器や配管等からの透過漏洩、蓄積といったトリチウム挙動の予測が必要である。トリチウム挙動予測には、トリチウム移行に関与する各移動現象を定性的、定量的な評価を行う必要がある。

これまで固体増殖材からのトリチウム放出挙動に関する様々な実験が行われており、中性子照射環境での増殖材からのトリチウム放出挙動が実験的に検証されている⁴⁻⁷⁾。それらの研究では、原子炉を利用した中性子照射下 (in-pile) でのトリチウム放出実験、原子炉中性子照射後 (out-pile) トリチウム放出実験が行われ、固体増殖材からのトリチウム生成放出挙動データが報告されている。しかしながら、それらの実験は原子炉中性子環境であり、実際の核融合炉では 14MeV の DT 中性子をブランケットが受けること、また、増殖材の性状変化によってトリチウム放出化学形が異なることから、様々な条件下におけるトリチウム放出挙動を予測するため、更なる実験データの取得が求められている。

本研究では、実際のブランケットを模擬した体系における固体増殖材 Li_2TiO_3 からのトリチウム放出挙動の把握及び、トリチウム生成量予測計算精度の検証、高いトリチウム増殖比をもつ先進増殖材の開発を目的とし、核融合炉中性子発生源を有する施設である FNS (Fusion Neutronics Source) において、DT 中性子照射中のトリチウム生成量とトリチウム挙動について実験的に検証した。本実験はトリチウム工学研究グループ、核融合中性子工学研究グループおよび増殖機能材料開発グループの協力によって行われた。実験に際しトリチウム挙動として押さえておくべき項目は以下である。

- トリチウム生成量
- トリチウム放出化学形
- トリチウム放出速度

トリチウム生成量については、トリチウム増殖率の評価を行う上で非常に重要であり、増殖材開発のためにも生成量の予測法の確立は重要である。トリチウム放出速度については、次節で述べる複数の移動過程が合わさって起こるため、速度的予測を行う際には、各々の移動過程について定性的かつ定量的に評価する必要がある。トリチウム放出化学形については、トリチウム回収システムを設計する上で把握しておく必要があり、水素ガス形トリチウムと水蒸気形トリチウムでは回収システムは異なる。いずれにせよ、トリチウム回収にあたり水蒸気形のトリチウムの放出は避けられない。トリチウム回収後の燃料循環システムへの負荷軽減を考慮して水素ガス形で回収する方向で設計するか、トリチウムの安全閉じ込めを重視して透過漏洩を防ぐために水蒸気形で回収する設計を行うのかの結論は出ていないが、その判断材料としてトリチウムの放出挙動を予測する技術開発が必要である。

本報告書では、DT 中性子照射による固体増殖材 Li_2TiO_3 のトリチウム生成量とトリチウム放出挙動について言及している。特に、パージガス条件がトリチウム放出化学形に与える影響について報告する。

2. 固体増殖材におけるトリチウム放出過程

固体増殖材内で生成したトリチウムがパージガスによって回収されるまでの過程には、複数の移動現象が関与していると考えられている⁸⁻¹³⁾。例えば、増殖材中で生成したトリチウムは結晶グレイン内を拡散し、照射欠陥との相互作用を受けながらグレイン表面に達する。グレイン表面に達したトリチウムは各表面反応により脱離し、パージガス中に放出される。グレイン表面で起こる反応の模式図を図1に示す。グレイン表面のトリチウム移行挙動には、水蒸気の吸着・脱着、気相中の水素との同位体交換反応（同位体交換反応1）、気相中の水蒸気との同位体交換反応（同位体交換反応2）、パージガスに水素を添加したことによって起こる水分生成反応、また高温で水素・水蒸気雰囲気曝されることによる増殖材グレイン表面性状の変化などが挙げられる。このように増殖材表面で様々な反応が起こるため、パージガス中に含まれる成分によって放出トリチウムの化学形は変化し、固体増殖材の種類によってもトリチウムの放出特性は異なる。固体増殖材の表面現象については、九州大学のグループの研究が知られており、各種パージガスについてトリチウム放出に関する表面現象と増殖材の温度の対応関係が表1のように報告されている¹⁴⁾。トリチウム放出化学形はブランケット材、パージガス、温度によって変化するため、トリチウム回収システムの設計にも深く関係してくる。したがって、中性子照射により増殖材から放出されるトリチウム量を定量し、各種パージガス条件での放出化学形について定性的かつ定量的評価を行うことは、トリチウム放出機構の解明のために非常に重要である。本実験におけるトリチウムの放出化学形としては、トリチウム生成量とパージガス中水蒸気濃度及び水素濃度から判断して、水素ガス形の HT と水蒸気形の HTO を想定している。

3. トリチウム生成回収実験

3.1. 実験装置

本実験は、核融合中性子源施設（FNS）において実施された。図 2 に FNS 第一ターゲット室内に設置したトリチウム生成回収実験装置の概略図を示す。実験装置は、固体増殖材 Li_2TiO_3 ペブルが充てんされたステンレス製キャプセル及びベリリウムとチタン酸リチウムで組み上げたブランケット模擬体系（トリチウム生成系）と増殖材から放出されたトリチウムを捕集するためのトリチウム回収系で構成されている。

3.1.1. トリチウム生成系

ブランケット模擬体系近傍に中性子源を設置し、重陽子ビームをトリチウムターゲットに当てることで D-T 反応がおこり、発生した 14MeV 中性子がブランケット模擬体系に照射される実験である。 Li_2TiO_3 ペブルとキャプセルは増殖機能材料開発グループにより準備され、 Li_2TiO_3 は原子燃料工業(株)製で天然 (^6Li : 約 7.6%) の Li を使用している。ステンレス製キャプセルは図 3 に示す二重管構造になっており、一辺 48 mm の矩形の外管ホルダーの内部に増殖材ペブルが充填された一辺 19 mm の内管が挿入されている¹⁵⁾。増殖材の充填量は 67 g で、充填長さは 100 mm である。増殖材の温度は内管外側に設置されたヒーターと熱電対により制御され、キャプセル表面温度が 100℃以下になるよう外管と内管との間に冷却用の空気を通気する。

3.1.2. トリチウム回収系

トリチウム回収系では、中性子照射により生成したトリチウムを各種パージガスによって回収し水バブラーによって捕集する。放出トリチウムの化学形は水形の HTO とガス形の HT が想定されるため、HTO は前段のバブラーによって捕集、HT は水に捕集されず前段のバブラーを通過し酸化銅ベッドにより酸化され HTO に変化した後、後段のバブラーによって捕集されるようになっている。バブラーで捕集したトリチウム水の一部をサンプリングし、液体シンチレーションカウンタによりトリチウム濃度を測定する。バブラーによるトリチウムの取り逃がしのないことを確認するためにバブラーを前段後段にそれぞれ 2 本ずつ設置している。図 2 中の破線で囲んだ部分はパージガス条件によって交換を行うもので、水蒸気添加条件では水バブラーを、乾燥条件ではモレキュラーシーブ 5A を充填した吸着塔を使用する。パージガス中の水分濃度はキャプセル入口と出口に設置した露点計により監視できるようになっている。キャプセル出口の配管は水蒸気の凝縮を防ぐためにパイプヒーターにより 150℃に加熱している。酸化銅ベッドには 12~14 mesh の酸化銅粒子が 250 g 充填してあり 500℃で使用する。パージガスにはヘリウムガスと 1.04% 水素添加ヘリウム混合ガスを用いた。

3.2. 実験手順

トリチウム生成回収実験においては、（１）試料の中性子照射前の増殖材試料のベーキングと酸化銅の再生処理、（２）中性子照射及びトリチウム回収、（３）中性子照射後の増殖材試料のベー

キングを一連の流れとして実験を行った。(1)及び(3)に関して、照射前後のベーキングを行う理由は、各実験で同一の増殖材試料を繰り返し用いることで残留する可能性のある増殖材中のトリチウムを除去するためである。照射実験前に温度 600℃で 5 時間のベーキングを行い、トリチウムの検出がないことを確認した。(2)では、中性子照射を 5 時間、照射後のトリチウム回収時間を 5 時間とした。

中性子照射時の実験手順を以下に示す。

- 1) バブラーの準備 (重量測定、BG サンプリング、実験装置に接続)
- 2) 酸化銅ベッド温度を 500℃、キャプセル出口配管用ヒーターを 150℃に昇温
- 3) 2 の設定温度到達後、パージガスを 100cm³/min で通気
- 4) キャプセル冷却空気の通気
- 5) キャプセルを任意の実験温度 (300℃、600℃) に昇温
- 6) 5 の設定温度到達後、中性子照射開始 (照射時間 5hr)
- 7) 5hr の照射終了後、実験温度を維持したままパージを継続 (照射後パージ時間 5hr)
- 8) 5hr の照射後パージ終了後、キャプセル温度を室温に戻し、全バルブを閉
- 9) バブラーの取外し及びサンプリング

表 2 に実験条件を示した。合計 7 回の実験を行い、キャプセル温度 300℃で 5 回、室温で 1 回、600℃で 1 回の照射実験を行った。パージガス条件は①水蒸気添加ヘリウム、②水蒸気添加ヘリウム水素、③④⑥⑦乾燥水素添加ヘリウム、⑤乾燥ヘリウムとした。表中の水蒸気濃度はキャプセル入口に設置した露点計の値から換算した。

4. トリチウム生成回収実験結果及び考察

4.1. トリチウム生成量と回収量

図 4 に各実験でのトリチウム総回収量 (上) と照射中及び照射後 5 時間パージ後のトリチウム回収量 (下) を示す。トリチウム総回収量には、照射日翌日以降から次の照射の開始前までに実施した 600℃でのベーキングにおける放出量が含まれる。トリチウム総回収量は各実験で同程度の値が得られた。中性子工学グループの中性子輸送計算コードを用いた核計算によると、トリチウム回収量とトリチウム生成量の比 (回収量実験値/生成量計算値) は 0.98~1.02 となり、トリチウム回収量はトリチウム生成量計算結果とほぼ一致したことから、発生したほとんどのトリチウムが回収できていることが分かった。

トリチウム総回収量と照射中及び照射後 5 時間パージ後のトリチウム回収量を比較すると、実験①~④は照射後の 5 時間パージでほとんどのトリチウムが放出されていることがわかる。一方、実験⑤⑥は照射中及び照射後 5 時間パージにおけるトリチウム放出量は微量で、600℃のベーキングにより生成トリチウムのほとんどが放出した。したがって、室温では増殖材中に生成したトリチウムの拡散速度が非常に遅いこと、また 300℃乾燥 He パージでは同位体交換反応 1 及び 2、水分生成反応といった表面反応が起こりにくいことから、照射実験時間中にトリチウムが放出されなかったものと考えられる。

4.2. トリチウム放出化学形

各実験条件におけるトリチウム放出化学形について整理し考察した。放出化学形については水蒸気形の HTO 及び T_2O 、水素ガス形の HT 及び T_2 の 4 種類が想定されるが、HTO と T_2O 、HT と T_2 の区別はつかない。しかしながら、本実験において、パージガス中の水蒸気濃度あるいは水素濃度が高い場合は、水蒸気形トリチウムは HTO、水素ガス形トリチウムは HT として放出されるものと想定している。

4.2.1. Li_2TiO_3 からの水分放出現象

パージガスに水素を添加した場合、 Li_2TiO_3 表面で起こる還元反応により H_2O が発生し、発生した H_2O とグレイン表面トリチウムとの同位体交換反応 2 により HTO が放出されと考えられる。したがって、HTO 放出の要因となる Li_2TiO_3 からの水分放出を把握しておく必要がある。各パージガス条件におけるキャプセル出口の水分濃度とトリチウム放出化学形の比の比較を表 3 に示す。実験③の出口水分濃度は記録できていなかったため載せていない。実験③と④の照射日の実験はほぼ同条件で行ったが、実験④の方は照射前日に室温で乾燥ヘリウムパージを行い、増殖材表面の物理吸着水を除去しているため、実験③の方がキャプセル内の残留水分の分だけパージガス通気後の水蒸気濃度は高いと推測される。

図 5 に 300°C における水素添加ヘリウムパージとヘリウムパージでの水蒸気濃度変化の比較を示す。 300°C で水素添加パージガスを増殖材に通すと水分濃度は上昇した。化学吸着水の脱離と水分生成反応による水分放出と考えられるが、 300°C ヘリウムパージの結果を見ると水分の上昇はほとんどない。表 3 より、乾燥ヘリウムパージの場合（実験⑥）の出口水分濃度は 1 ppm 以下であるのに対し、水素を添加すると（実験④）、照射中の平均で 120 ppm の水分が増殖材から放出されたことから、水分生成反応が起きていることが確認できる。したがって、水分放出の大部分が水分生成反応によるものであるとわかる。

4.2.2. 300°C におけるパージガス組成のトリチウム放出化学形への影響

300°C の Li_2TiO_3 に生成したトリチウムを各種パージガス（①水蒸気添加ヘリウム、②水蒸気及び水素添加ヘリウム、③④乾燥水素添加ヘリウム、⑤乾燥ヘリウム）で回収した際のトリチウム放出化学形の結果を以下にまとめた。

① 300°C H_2O+He パージでは、生成トリチウムの 98%が水蒸気形 HTO で放出した。

パージガスに水蒸気を添加した場合、トリチウム放出のほとんどが HTO であることが確認できた。これは増殖材中で生成したトリチウムが増殖材表面に移行し、 H_2O との同位体交換反応 2 により HTO としてトリチウムが回収されたためであると考えられる。一方、水素ガス形として放出されたトリチウムは微量であり、この微量のトリチウムは増殖材表面でトリチウムが水素と再結合し脱離した、あるいは酸化銅ベッドからの残留トリチウムが浸み出したものであると考えられる。

② 300°C H_2O+H_2+He パージでは、生成トリチウムの 80%が HTO として放出した。

水蒸気と水素を添加した場合、水蒸気添加のみ場合と比べて HT の回収量が増加した。これは増殖材表面のトリチウムが水素との同位体交換反応 1 により HT として放出されたものと考えられる。 Li_2TiO_3 の同位体交換反応 1 の速度定数の式については、T. Kinjyo et al.¹³⁾、K. Hashimoto et al.¹⁶⁾ による報告があり、 Li_2TiO_3 の表面性状にもよるが、 300°C の速度定数は $3.2 \sim 5.0 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ となっている。一方、同位体交換反応 2 の速度定数の式については、 Li_4SiO_4 、 Li_2ZrO_3 について参考となる報告¹⁶⁾があり、 300°C から 700°C の範囲で温度依存性はなく $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ となっている。 300°C における同位体交換反応 1 と 2 の速度定数を比較すると、HT よりも HTO の同位体交換反応速度が極めて大きい。また、この条件でのパージガス中の水素と水蒸気の濃度比は $\text{H}_2 : \text{H}_2\text{O} = 5 : 4$ で同程度である。したがって、 300°C ではトリチウムと水蒸気との交換反応を起こしやすく、水素との交換反応は起こりにくいことがわかる。この結果は、低温では同位体交換反応 1 の反応速度は遅く同位体交換反応 2 の反応速度は速いという M. Nishikawa et al. の報告とも一致する¹⁴⁾。

③④ 300°C $\text{H}_2 + \text{He}$ パージでは、生成トリチウムの 60~70% が HT で放出した。放出化学形の比は水蒸気濃度と増殖材表面状態に依存することが示唆された。

乾燥ヘリウムに水素添加した場合、HT と HTO の回収量の比は $\text{HT} : \text{HTO} = 7 : 3 \sim 6 : 4$ となった。水蒸気を添加していないにも関わらず HTO の放出が起こるのは、パージガス中水素と Li_2TiO_3 表面酸素との還元反応により生じる H_2O (水分生成反応) とトリチウムの同位体交換反応が起こるためである。表 3 より、 300°C 水素添加ヘリウムパージ条件で行った実験③と④のトリチウム放出化学形比について比較すると、実験④の方は照射前に室温 He で一晩パージを行うことで乾燥状態を保っているにもかかわらず、実験③よりも HTO の放出割合が大きい。実験③と④の温度及びパージガス条件が同じであることから、トリチウム放出化学形の比の違いは増殖材表面状態に起因していると推測される。乾燥水素添加ガスパージの場合、増殖材表面が還元状態にあると水素と Li_2TiO_3 表面で水分生成反応が起こりにくくなり HTO の放出は少なくなる。逆に還元状態でない場合は、水分生成反応が起こり HTO の放出が多くなると考えられる。また、 Li_2TiO_3 については、高温水素雰囲気下において還元反応により水分が発生することによる表面性状変化のため、同位体交換反応 1 が低下するという報告もある¹³⁾¹⁶⁾。したがって、トリチウムの放出化学形には、増殖材表面状態が大きく影響することがわかる。

⑤ 300°C He パージでは、全生成トリチウムの 4% が放出され、 600°C He パージ及び 600°C $\text{H}_2 + \text{He}$ パージにより残り 96% の生成トリチウムが放出した。 600°C He パージ及び 600°C $\text{H}_2 + \text{He}$ パージでは、放出トリチウムの 94% が HTO であった。

乾燥ヘリウムパージの場合、照射中及び照射後 5 時間パージではトリチウム放出量は微量 (総回収量の 4 % 程度) であった。HTO の放出に関しては、照射中の水分濃度が終始 1 ppm 前後で安定していたことから、低濃度の水蒸気でも同位体交換により HTO は放出されることが確認された。HT の放出に関しては、パージガス中に水素を添加していないため、増殖材表面からの直接放出が考えられるが、照射日の HT 放出量が 25 Bq であったのに対し、照射日前日に行った酸化銅再生処理時のトリチウム回収量が 77 Bq であったことを考えると、酸化銅ベッド中の残留トリチウムがゆっくりと放出されていることも十分あり得る。したがって、微量のトリチウム回収量について評価する場合には、酸化銅ベッドからのトリチウム放出についても考慮する必要がある。

表 4 に実験⑤のトリチウム回収量の結果を示す。照射翌日に 600°C 乾燥ヘリウムで 4 時間、続

いて 600℃水素添加ヘリウムで5時間のパージを行うと、どちらの条件でも放出トリチウムの90%以上が HTO で回収された。図6に示したパージガス中の水分濃度変化を見ると、ヘリウムパージでは 600℃昇温することによって水分濃度が上昇した。パージガス中に水素がないことを考えると、昇温により化学吸着水が脱離し、この吸着水との同位体交換によって HTO が放出されたと推測される。水素添加ヘリウムパージの場合、パージガスの流通と同時に水分濃度が大きく上昇し最大 2000 ppm まで上昇した。ヘリウムパージにより化学吸着水は脱離していることを考慮すると、水分生成反応による水放出であると判断できる。HT 成分の放出がほとんど見られないことから、水分生成反応によって生じた水蒸気により同位体交換反応2が促進されたものと考えられる。したがって、水分生成反応により生じる水蒸気成分はトリチウム放出化学形に大きな影響を与える。一方、過去に 450℃乾燥ヘリウムで行った実験では、照射実験中の HT の放出量が HTO 放出量よりも大きくなっている¹⁷⁾。これは 450℃の実験では増殖材表面が還元された状態にあり、十分に乾燥されていたことに加え、パージガス中の水蒸気濃度も 2~30 ppm と微量であったことから、HTO の放出が少なく、HT 放出が大きくなったと考えられている。したがって、トリチウム放出化学形はパージガス成分だけでなく、増殖材表面状態にも依存することが示唆された。

4.2.3. 室温におけるトリチウム放出化学形

室温 H₂/He パージでは、トリチウムの放出はほとんど起こらなかった(⑥)。室温ではトリチウムの拡散速度が極端に遅いため、照射時間中に増殖材表面まで至らず脱離反応も起こりにくい状態にあると考えられる¹³⁾。照射翌日の 300℃水素添加ヘリウムパージでは、トリチウム拡散速度が速くなり、5時間のパージでトリチウム総回収量 85%が放出し、放出化学形の比は HT : HTO = 70 : 30 となった。300℃で水素添加ヘリウムパージを行った後、600℃に昇温して2時間の水素添加ヘリウムパージを行うと残りのトリチウムが放出した。600℃でのトリチウム放出化学形の比は HT : HTO = 90 : 10 となり、同位体交換反応1の温度依存性が確認された。

4.2.4. 600℃におけるトリチウム放出化学形

600℃ H₂/He パージでは、生成トリチウムの95%が HT で放出した(⑦)。600℃での水素添加パージでは、600℃では同位体交換反応1が速くなるため、300℃に比べて HT の放出が大きくなったものと考えられる。また、照射開始前に乾燥水素に接触させたため、化学吸着水の除去が十分に行われたことにより、パージガス中の水蒸気濃度が照射実験中平均で 140 ppm 程度に低下したことに加え、水分生成反応により増殖材表面の酸素が減少している状態にあったと推測すると、HTO 放出が起こりにくく、HT 放出量が増加したと考えられる。

5. 結論

核融合中性子源施設 FNS において、ブランケット模擬体系で DT 中性子照射中の固体増殖材 Li₂TiO₃ におけるトリチウム生成量とトリチウム放出化学形について調査した。本実験体系におい

て計算で求めたトリチウム生成量と実験で得られたトリチウム回収量はほぼ一致し、トリチウム生成量予測計算手法の妥当性が示された。

増殖材 Li_2TiO_3 温度 300°C 及び 600°C 、各種パージガス条件におけるトリチウム放出化学形について得られた結果を以下にまとめる。

- 水蒸気添加ヘリウムパージの場合、ほとんどが HTO として放出した。
- 水蒸気及び水素添加ヘリウムパージの場合、同位体交換反応 2 が速やかに起こるため、HTO が 80% と多く放出した。
- 乾燥水素添加ヘリウムパージの場合、HT 放出割合は大きい、水素添加に伴う水分生成反応により水蒸気濃度が上昇し HTO の放出も起こる。温度とパージガス成分が同条件でもトリチウム放出化学形の比が変化することから、トリチウム放出化学形は増殖材表面状態に影響することが示唆された。
- 乾燥ヘリウムパージの場合、表面反応が起こらずトリチウム放出量は微量だった。 600°C に昇温すると HTO が放出した。 600°C で H_2 を添加すると同位体交換反応 1 による HT は放出されず、水分生成反応により生じた水蒸気との同位体交換反応 2 により HTO が放出した。増殖材表面が還元状態にある場合と還元状態にない場合では、トリチウム放出化学形の比が変わる。
- 600°C 水素添加パージでは、 Li_2TiO_3 から放出したトリチウムの 95% が HT で放出した。

以上から、 300°C における Li_2TiO_3 からのトリチウム放出化学形はパージガス成分と表面状態に大きく依存することが明らかになった。

Li_2TiO_3 に生成したトリチウムを水素添加ヘリウムでパージする場合、水分生成反応が起こるため水蒸気形トリチウムの放出は避けられない。トリチウム回収システムの構築にあたっては、水素ガス形／水蒸気形の放出比率にかかわらず双方を回収可能にするトリチウム回収システムが必要であることが示唆された。パージガス組成に大きく影響されるトリチウム放出挙動を把握することにより、最適なトリチウム回収システム設計ができるようになる。水素ガス形でトリチウムが回収される場合は、トリチウムを燃料の形にするまでに水素ガス形トリチウム→精製→同位体分離というプロセスを経るが、水蒸気形トリチウムの場合、さらに水蒸気形→水素ガス形というプロセスが追加されるために燃料システムに負担がかかる。安全性の観点からトリチウムの透過防止のために、水蒸気形トリチウム回収を主体としたトリチウム回収システム設計を行うことも一つの方向性となりうる。トリチウム回収システムの負担を軽減する設計にするか、安全閉じ込めの観点からトリチウムの透過漏洩を抑制する設計にするかについての判断材料としてトリチウム挙動予測は重要となる。

本報告書では、 Li_2TiO_3 からのトリチウム放出量定量測定の結果報告とトリチウム放出化学形の定性的な考察を行った。主に 300°C の実験結果についての報告となったが、引き続き 600°C でパージガス条件を変えた場合のトリチウム放出量データ取得し、トリチウム放出化学形の温度依存性を調査する。またトリチウム放出速度評価のためにトリチウム放出の時間応答実験も行う予定である。

参考文献

- 1) Kawamura, Y. et al., 3. Accomplishments of Large Amount of Tritium Handling Technology (2) –For Establishment of a Fusion Fuel Cycle System; Progress of US-Japan Collaboration–, J. Plasma Fusion Res. vol.86, no.4, 2010, pp. 250-256.
- 2) Tanaka, S. et al., Present Status of ITER Test Blanket Development, J. Plasma Fusion Res. vol.81, no.6, 2005, pp. 434-450.
- 3) Yamanishi, T. et al., Interlinked test Results for Fusion Fuel Processing and Blanket Tritium Recovery Systems Using Cryogenic Molecular Sieve Bed, Fusion Sci. Technol., vol. 48, 2005, pp. 63-66.
- 4) Conrad, R. et al., Irradiation facilities for testing solid and liquid blanket breeder materials with in situ tritium release measurements in the HFR Petten, J. Nucl. Mater. Vol. 179–181 (1991) 1158–1161.
- 5) J.G. van der Laan, et al., EXOTIC-7: irradiation of ceramic breeder materials to high lithium burnup, J. Nucl. Mater. vol. 233–237, 1996, pp. 1446–1451.
- 6) Tsuchiya, K. et al., In situ Tritium Recovery Experiments of Blanket In-pile Mockup with Li_2TiO_3 Pebble Bed in Japan, J. Nucl. Sci. Technol. vol. 38, no. 11, 2001, pp. 996–1003.
- 7) Peeters, M. et al., Inpile tritium release behavior of lithium metatitanate produced by extrusion–spheroidisation–sintering process in EXOTIC-9/1 in the high flux reactor, Petten, Fusion Eng. Des. vol. 82, 2007, pp. 2318–2325.
- 8) Kinjyo, T. et al., Release behavior of bred tritium from irradiated Li_4SiO_4 , Fusion Sci. Technol., vol. 48, 2005, pp.646–649.
- 9) Nishikawa, M. et al., Tritium inventory in LiAlO_2 blanket, J. Nucl. Mater. vol. 246, 1997, pp.1–8.
- 10) Nishikawa, M. et al., Tritium inventory in Li_2ZrO_3 blanket, J. Nucl. Mater. vol. 257, 1998, pp. 162–171.
- 11) Kawamura, Y. et al., Adsorption characteristics of water vapor on Li_2ZrO_3 , J. Nucl. Mater. vol. 218, 1995, pp. 57-65.
- 12) Kawamura, Y. et al., Formation of water in lithium ceramics bed at hydrogen addition to purge gas, J. Nucl. Mater. vol. 230, 1996, pp. 287-294.
- 13) Kinjyo, T. et al., Tritium diffusivity in crystal grain of Li_2TiO_3 and tritium release behavior under several purge gas conditions, Fusion Eng. Des. vol. 83, 2008, pp. 580–587.
- 14) Nishikawa, M. et al., Chemical form of tritium released from solid breeder materials, J. Nucl. Mater., vol. 325, 2004, pp. 87-93.
- 15) Ochiai, K. et al., Tritium recovery experiment from Li ceramic breeding material irradiated with DT neutrons, Contributed papers of 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Republic of Korea, 2010, http://wwwpub.iaea.org/mtcd/meetings/PDFplus/2010/cn180/cn180_papers/ftp_3-2rb.pdf.
- 16) Hashimoto, K. et al., Tritium inventory in Li_2TiO_3 blanket, Fusion Eng. Des. vol. 61-62, 2002, pp. 375-381.
- 17) Kawamura, Y. et al., Effect of sweep gas species on tritium release behavior from lithium titanate packed bed during 14 MeV neutron irradiation, Fusion Eng. Des., vol. 87, 2012, pp. 1253-1257.

表 1 パージガスに影響される固体増殖材表面のトリチウム移動現象¹⁴⁾

パージガス	固体増殖材温度			
	室温～300℃	300～500℃	500～700℃	700℃～
乾燥ガス (不活性ガス)	吸脱着	吸脱着	吸脱着 Li 移行	吸脱着 Li 移行
水素	吸脱着	吸脱着 水分生成 交換－2 (交換－1) (表面変化)	吸脱着 水分生成 交換－2 交換－1 Li 移行 表面変化	吸脱着 水分生成 交換－1 交換－2 Li 移行 表面変化
水蒸気	交換－2 吸脱着	交換－2 吸脱着	交換－2 吸脱着 Li 移行	交換－2 吸脱着 Li 移行

表 2 実験条件

実験 No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
実験温度 [°C]	300	300	300	300	300	25	600
パージガス	He+H ₂ O	He+H ₂ O+H ₂	He+H ₂	He+H ₂	He	He+H ₂	He+H ₂
流量 [cm ³ /min]	100	100	100	100	100	100	100
水素濃度 [ppm]	-	10400	10400	10400	-	10400	10400
水蒸気濃度 [ppm]	8000~9000	8000~9000	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

(水素濃度及び水蒸気濃度はキャプセル入口におけるパージガス中の濃度)

表3 各実験のキャプセル出口におけるパージガス中水分濃度比較
(実験③の水分濃度については記録できていないためデータなし)

実験 No.	③	④	⑤	⑥	⑦
パージガス	1%H ₂ /He	1%H ₂ /He	He	1%H ₂ /He	1%H ₂ /He
キャプセル温度	300°C	300 °C	300 °C	RT	600 °C
昇温前出口水分濃度 ppm	NA	0.25	0.25	0.79	0.18
照射前出口水分濃度 ppm	NA	620	0.7	174	231
降温前出口水分濃度 ppm	NA	64	0.67	0.39	91
照射中出口平均水分濃度 ppm	NA	117.8	0.95	166.4	167.2
照射～降温平均出口 水分濃度 ppm	NA	89.07	0.74	89.12	142.20
照射～降温までの水分量 g	NA	2.8×10^{-3}	2.3×10^{-5}	4.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}
T 放出化学形比 HTO:HT (照射後の T 放出量も含めた値)	28:72 (28:72)	40:60 (40:60)	65:35 (93:7)	0:100 (28:72)	5:95 (6:94)

表4 実験⑤乾燥ヘリウムパージにおけるトリチウム回収量

トリチウム回収量 [Bq]					HT/ (HT+HTO) 比率[%]
放出 化学形	照射日 300°C He	照射翌日 600°C He	照射翌日 600°C H ₂ +He	総量	
HTO	46.7	710.0	815.5	1572.2	93
HT	24.6	79.8	13.8	118.2	7
総量	71.3	789.8	829.3	1690.4	100

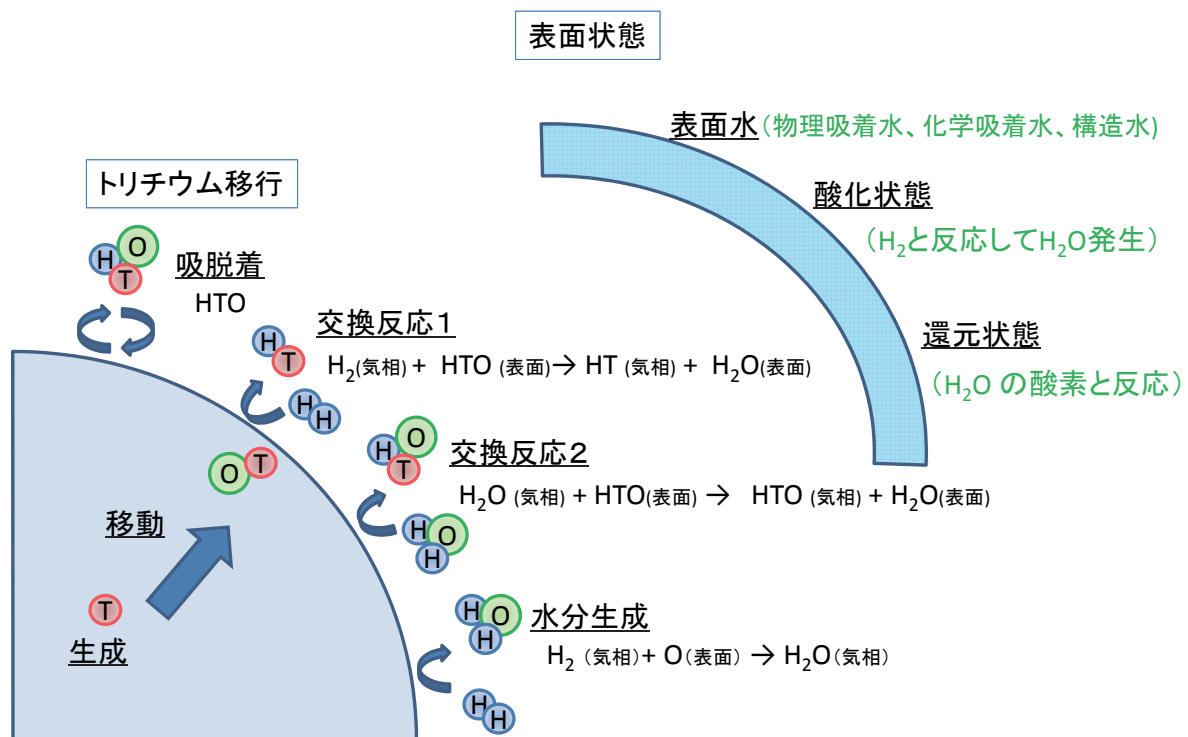


図1 固体増殖材からのトリチウム放出に関わる移動現象（表面反応）

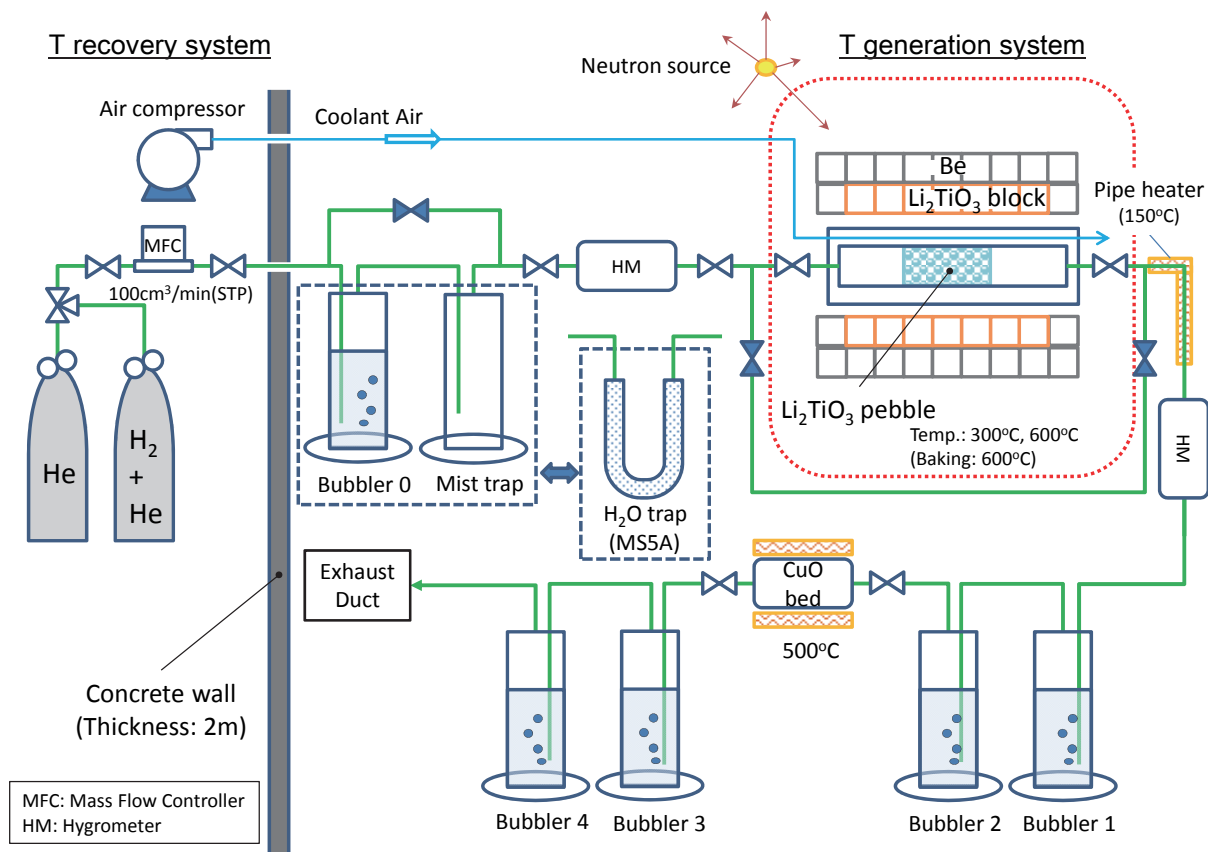


図2 トリチウム生成回収実験装置概略図

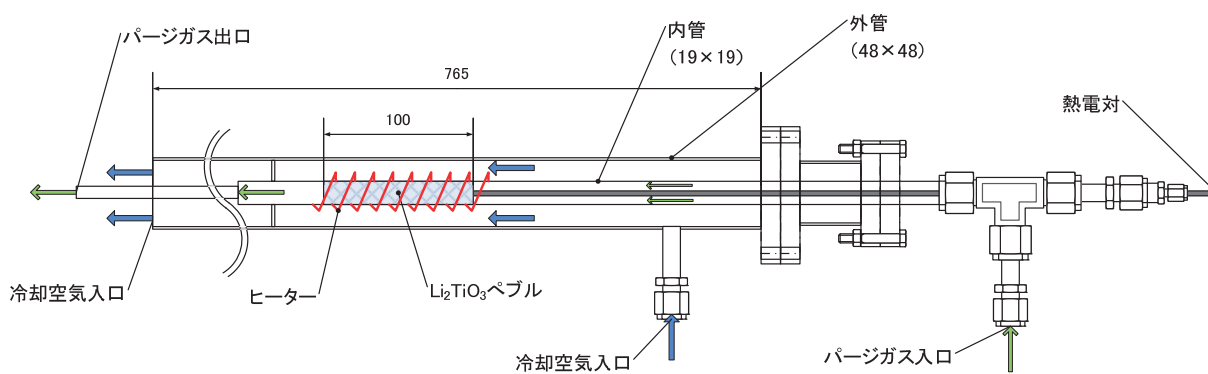


図3 固体増殖材 Li₂TiO₃ ペブル充填キャプセル

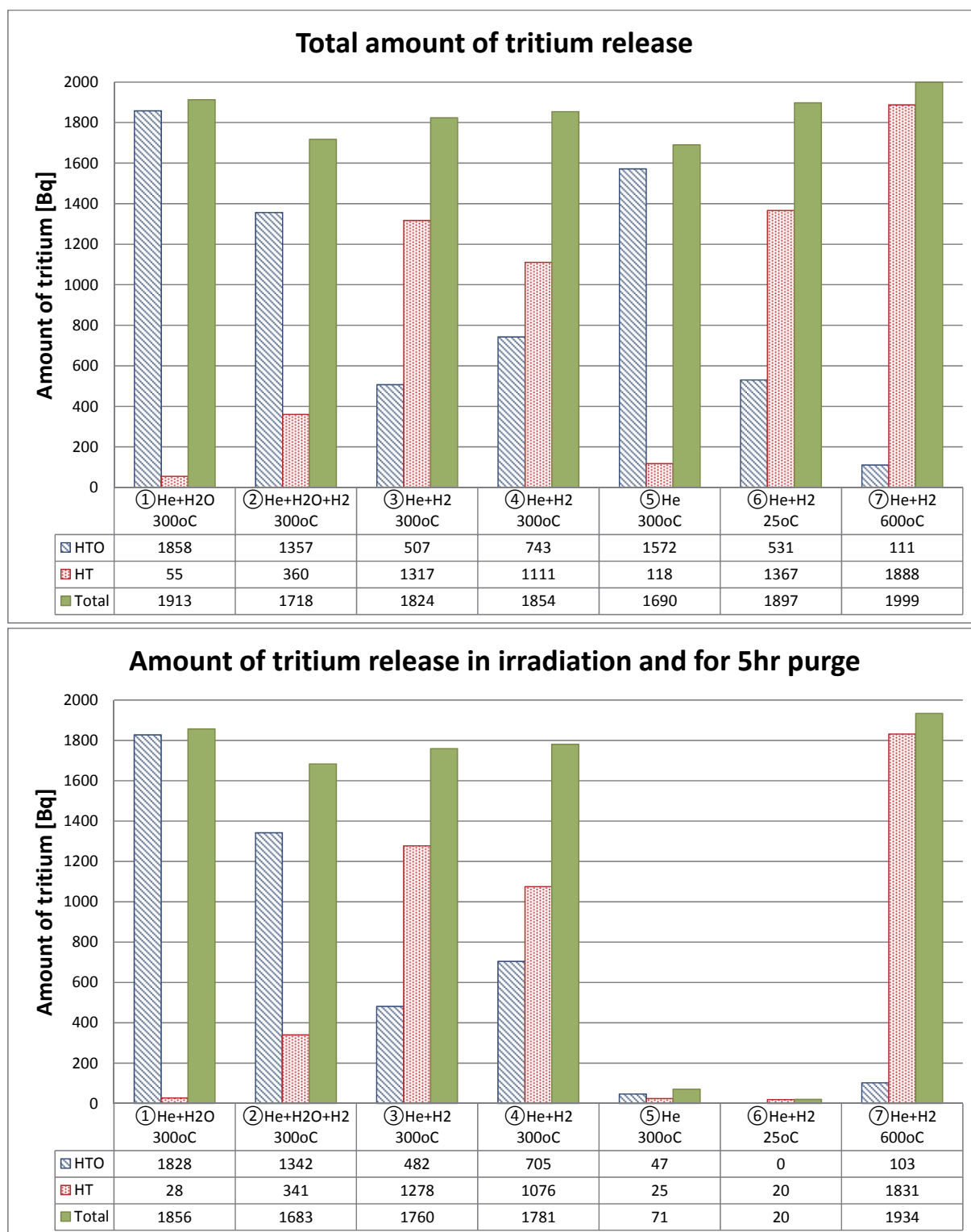


図4 各パージガス条件におけるトリチウム回収量結果

(上図：トリチウム総回収量

下図：照射中及び照射後 5hr パージでのトリチウム回収量)

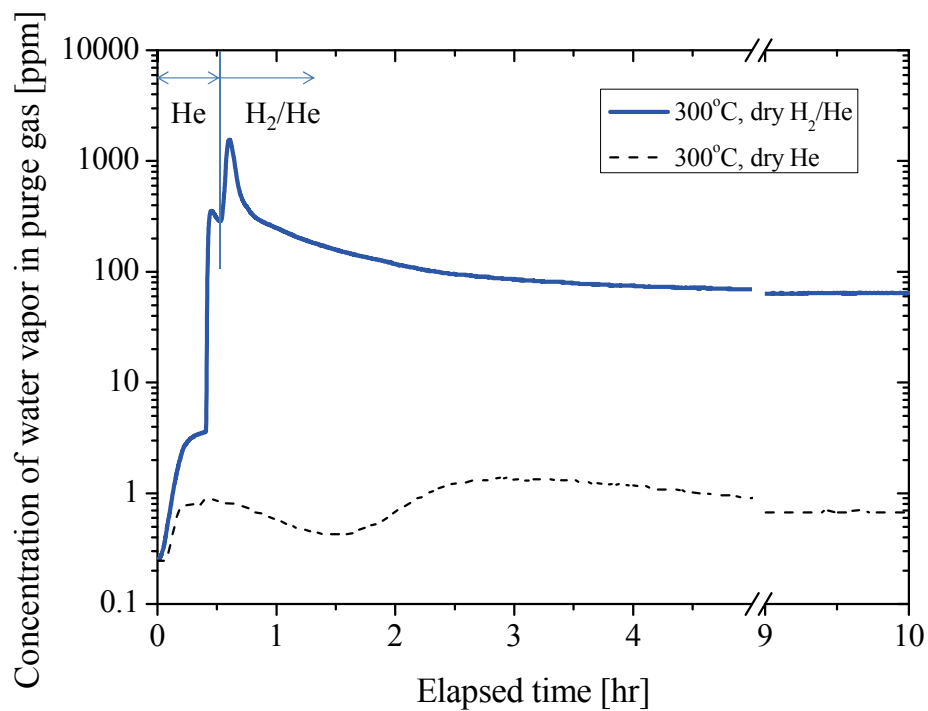


図5 300°Cにおけるパージガス中水蒸気濃度の比較

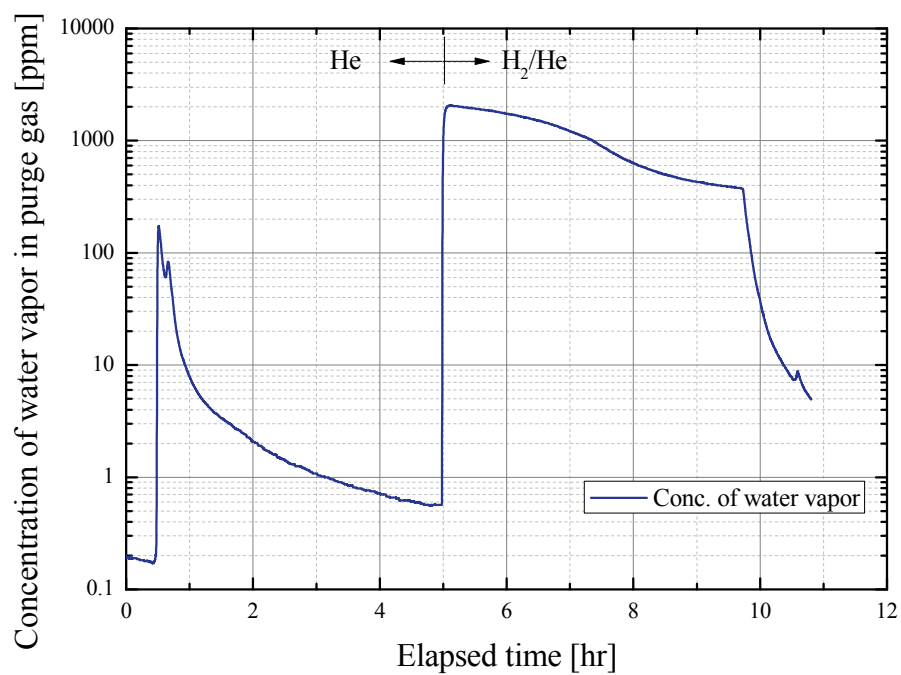


図6 実験⑤照射後 600°Cヘリウム及び水素添加ヘリウムパージ中の水分濃度時間変化

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質モル量	mol	
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
電界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比誘電率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
光束流	ルーメン	lm		K
照射度	ルクス	lx	cd sr ^(c)	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎平方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁻¹ m ² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ⁻² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

(c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J (「15℃」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

