

[22010]

放射線照射が核融合炉用機能性被覆の諸特性に及ぼす影響の解明

Irradiation effects on properties of functional coatings for fusion reactor

近田拓未^{#A)}, 藤原輝^{A)}, 清水悠加^{A)}, 張浩志^{A)}, Do Duy Khiem^{A)}, 城田賢渡^{A)}, 松浦航^{A)}
Takumi Chikada^{#A)}, Hikaru Fujiwara^{A)}, Yuka Shimizu^{A)}, Haozhi Zhang^{A)}, Khiem Do Duy^{A)},
Kento Shiota^{A)}, Wataru Matsuura^{A)}
^{A)} Shizuoka University

Abstract

Tritium permeation and retention are serious problems in D-T fusion reactors from the viewpoint of fuel efficiency and radiological safety. Functional ceramic coatings have been intensively studied for the development of tritium permeation barriers for several decades, while reports about tritium retention in the ceramic coatings are scarce. Moreover, irradiation may affect tritium retention in fusion materials, which is important to precisely evaluate tritium inventory in the reactor. In this study, we report the migration of hydrogen isotopes in ceramic coatings induced by gamma-ray irradiation at room temperature. Nuclear reaction analysis performed simultaneously on hydrogen and deuterium reveals that residual hydrogen isotope impurities in zirconium oxide coatings fabricated by metal organic decomposition exist in the form of both stable and mobile species, whereas coatings made by magnetron sputtering contain only stable ones. The concentrations of mobile hydrogen and deuterium in the coating interior decrease significantly with the gamma-ray dose, whereas those of the stable species do not. An external hydrogen gas atmosphere prevents the depletion of mobile hydrogen and deuterium during the irradiation. This work opens a new strategy to transport and remove hydrogen isotopes from materials without elevated temperature.

Keyword: Tritium, Retention, Ceramic coating, Gamma-ray irradiation, Diffusion

1. はじめに

先進エネルギー源として現在研究開発が進められている DT 核融合炉では、燃料として重水素とトリチウムを用いる。これら水素同位体は高温下において、鋼材などの金属中を高速で拡散する性質を有していることから、構造材料中の水素同位体の透過による燃料効率の低下や、放射性同位体の炉外への漏洩などの問題が懸念されている。この透過漏洩を低減するために、構造材料表面に水素同位体低透過性のセラミック材料を用いた機能性被覆を施すことが検討されている。一方で、構造材料中への水素同位体の滞留も、透過と同様に燃料効率の低下を引き起こすため問題視されている。さらに、実際の核融合炉内は、高線量率の中性子線およびガンマ線の放射線照射環境になることが想定され、照射欠陥や励起が水素同位体滞留挙動に影響を及ぼすと考えられるが、特にガンマ線による影響は調べられていない。また、燃料配管内は、水素同位体が混在する環境であるため、周辺の水素同位体との相互作用による滞留挙動への影響は重要な検討事項である。そこで本研究では、放射線環境下における核融合炉内の水素同位体の予測と制御に貢献することを目的として、セラミック被覆に対して水素同位体による曝露実験と種々の条件下におけるガンマ線照射実験を行い、材料中の水素同位体滞留挙動を調査した。

2. 実験手法

本研究では、核融合炉構造材料の候補である低放射化フェライト/マルテンサイト鋼 F82H (Fe-8Cr-2W) を基板として用いた。また、被覆材料として、酸化ジルコニウム (ZrO_2)、酸化イットリウム、およ

び炭化ケイ素の三種類のセラミック被覆を選定し、マグネトロンスパッタリング法、および ZrO_2 被覆に対しては酸化クロム層を基板に生成させたのちに有機金属分解 (MOD) 法を用いて作製した。これらセラミック被覆に対して、重水素およびトリチウムを用いた水素同位体曝露試験を $500^\circ C$ で実施した。その後、コバルト 60 を用いたガンマ線照射試験を、室温下で異なる線量、線量率および照射時の雰囲気にて実施し、試料内の水素同位体分析をヘリウム 3 イオンビームまたは窒素 15 イオンビーム (^{15}N) を用いた核反応分析 (3He -NRA、 ^{15}N -NRA) と、イメージングプレートおよびベータ線誘起 X 線分光法にて実施した。

3. 結果と考察

本報告では、MOD 法で作製した ZrO_2 (MOD- ZrO_2) 被覆の ^{15}N -NRA 結果に関して述べる。

Fig. 1 に、 ^{15}N 照射量に対する、MOD- ZrO_2 被覆試料中の深さ 100 nm から測定された軽水素および重水素の量を表すシグナルの変化を示す。 ^{15}N イオンビーム照射初期に軽水素および重水素のシグナルの急激な減衰がみられ、その後ある値に収束した。 ^{15}N イオンビームの照射により、照射面の局所的な温度上昇が起こったことから、被覆内部の結合力の弱い水素同位体が拡散を起こし、シグナルの減衰がみられたと考えられる[1]。以上から、重水素曝露後の MOD- ZrO_2 被覆内には容易に拡散する不安定な水素同位体と拡散性の低い安定な水素同位体が存在することが示唆された。

続いて、ガンマ線照射後の試料に対して、不安定

[22010]

な水素同位体と安定な水素同位体のシグナルを調査した。Fig. 2 に、アルゴン雰囲気下での照射後の MOD-ZrO₂ 被覆の表面から深さ 100 nm の領域から得られた重水素のシグナルを示す。低線量率照射で不安定な重水素シグナルの減少がみられ、最大の吸収線量を与えた試料においては、不安定な重水素のほぼ全量が脱離した。一方、Fig. 3 に示す軽水素雰囲気下で照射を行った試料では、アルゴン雰囲気下試料と比較して劇的な変化は見られなかった。加えて、照射時雰囲気によらず、安定な重水素シグナルの著しい減少は認められなかった。以上の結果から、水素同位体分圧の低い環境における高線量率のガンマ線照射が、被覆内部に存在する不安定な水素同位体の拡散および脱離に寄与すると考えられる。実際に運転終了後の核融合炉においても、本実験と同等の線量率のガンマ線が照射されているため、核融合炉内においてもガンマ線照射が機器中の水素同位体の脱離に寄与すると考えられる[2]。

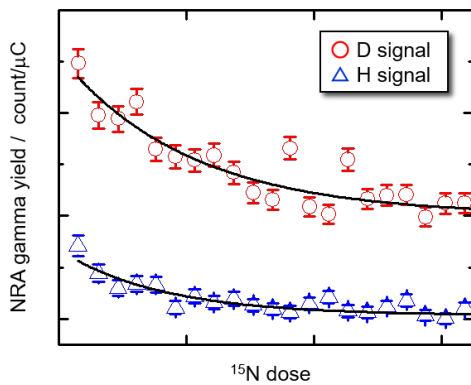


Figure 1. ¹⁵N dose dependence of H and D signals for MOD-ZrO₂ coatings without prior gamma-ray irradiation. Fitted decay curves are also presented.

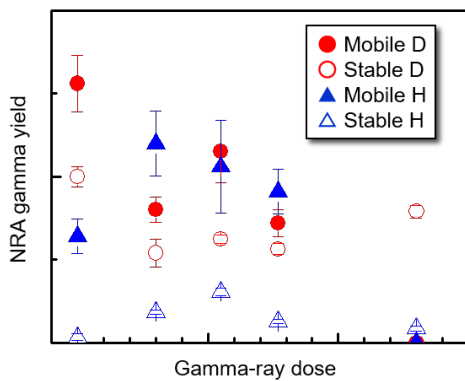


Figure 2. ⁶⁰Co gamma-ray dose dependence of retained H and D in MOD coatings irradiated under Ar atmosphere.

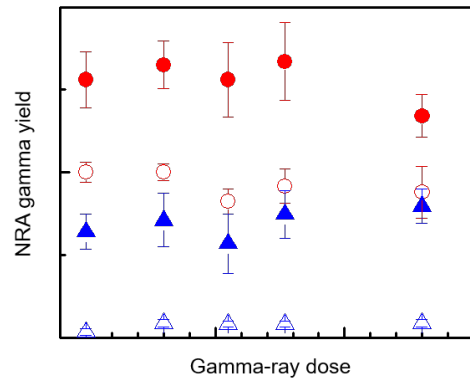


Figure 3. ⁶⁰Co gamma-ray dose dependence of retained H and D in MOD coatings irradiated under H₂ atmosphere.

参考文献

- [1] H. Shimizu, M. Wilde, W. Sato, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section B: Beam Interact. Mater. Atoms 467 (2020) 13–16.
- [2] 染谷洋二, 柳原敏, 飛田健次, プラズマ・核融合学会誌 Vol. 91, No. 12 (2015) 757-763.