

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01885

研究課題名(和文) プラズマ対向壁におけるプラズマ駆動水素透過機構の解明とその水素同位体効果

研究課題名(英文) Plasma driven permeation for plasma facing materials and its hydrogen isotope effect

研究代表者

大矢 恭久(OYA, YASUHISA)

静岡大学・理学部・准教授

研究者番号：80334291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ対向壁におけるプラズマ駆動透過に及ぼす水素同位体移行挙動について水素同位体を考慮して明らかにした。非照射タンゲステンでは800K以下の低温では高い水素同位体効果が見られ、H:Dの透過フラックス比が2:1になるが、900Kを越える高温ではH:D透過フラックスはほぼ1:1になった。一方、中性子照射タンゲステンでは低温での透過フラックスはH:D=3:2程度になり、高温でも大きな変化が見られなかったことから、照射欠陥が水素同位体透過に影響を及ぼしていると考えられる。一方、非照射タンゲステンにHe混合プラズマを照射した場合にはHe非混合プラズマ照射と比較して、同位体効果に大きな違いはなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉プラズマ対向壁での水素同位体透過に及ぼす水素同位体効果について明らかにしてきた。低温では水素透過に大きな同位体効果があることが明らかになり、実際の核融合炉でDTプラズマ燃焼の際には壁温度や照射損傷により水素同位体ごとの透過フラックスが変化することから、核融合炉燃料透過制御シミュレーションに必要な知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Hydrogen isotope plasma driven permeation was evaluated under the consideration of hydrogen isotope. It was found that large hydrogen isotope effect was observed at lower temperature less than 800 K, where the permeation flux of H:D was 2:1. At higher temperature above 900 K, the permeation flux was almost unity. But, the permeation flux of H:D for neutron damaged tungsten was limited to be 3:2. This fact indicates that the irradiation defects may influence on hydrogen isotope permeation behavior. For He mixed plasma exposure to undamaged tungsten, no large hydrogen isotope effect was observed at all the temperature region.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：プラズマ駆動透過 同位体効果 水素同位体移行 プラズマ対向壁

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合炉プラズマ対向材料にはトリチウムを含む水素同位体（軽水素:H、重水素:D およびトリチウム:T）に直接曝される。そのため、燃料効率や安全性の観点からトリチウムがプラズマ対向材料に滞留することが問題となる。トリチウム滞留量を評価するためには、共存する水素同位体の影響を理解し、その同位体効果を理解する必要がある。

2. 研究の目的

核融合炉プラズマ対向材料タングステンから真空容器を跨ぐ核融合炉システムにおいて、燃料となるトリチウムを含む水素同位体（軽水素:H、重水素:D およびトリチウム:T）の移行挙動に関連する物理定数（透過係数、溶解度等）を、水素同位体の存在比を考慮して明らかにするとともに、その水素同位体効果を解明する。

特に本研究では、プラズマ対向壁における水素同位体移行挙動について水素同位体を考慮して明らかにすることにより、水素同位体効果の発現機構・素過程および水素同位体ごとのシミュレーションに必要な物理定数を実験的に明らかにする。これらを活用し、精度の高い水素同位体移行シミュレーションを構築し、種々の環境での水素同位体移行評価を行う。

3. 研究の方法

アライドマテリアル社製の歪取加工済みタングステンおよびタングステン-10%レニウムを試料として用いた。照射欠陥導入のために量子科学技術研究開発機構(QST)高崎量子応用研究所の3 MV タンデム加速器(TIARA)にて、6 MeV 鉄イオン照射（損傷量 1 dpa）を室温にて行い照射欠陥を模擬した試料を作製した。また、オークリッジ国立研究所にて中性子照射したタングステン試料も用いた。その後、静岡大学のプラズマ駆動透過 (PDP) 装置 (図 1) にて D プラズマ照射および H と D の混合プラズマ照射を 723 K~923 K で行った。プラズマ計測分光システムによって測定したスペクトルの面積と、イオン化効率に基づき照射プラズマ中の原子比を評価した。H₂、D₂、He ガスは、マスフローコントローラ (MFC) により制御し、上流チャンバーに供給した。この時、上流側の混合ガス圧力は 1.0 Pa、下流側は 10⁻⁵~10⁻⁶ Pa であり、放電電力は 550 W、照射されたプラズマの総フラックスは 1.0 × 10²¹ m⁻² s⁻¹であった。プラズマフラックスはダブルラングミュアプローブにより測定した電流-電圧 (I-V) 特性から算出した。He の影響を評価するために 0.1, 1.0, 10 %の He を添加した実験も行った。これらの実験条件で水素同位体の透過フラックスを測定し、水素同位体透過挙動に及ぼす同位体効果およびその He 混合影響を調べた。また、表面状態を把握するために、PDP 実験を行った試料に対し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察を行った。

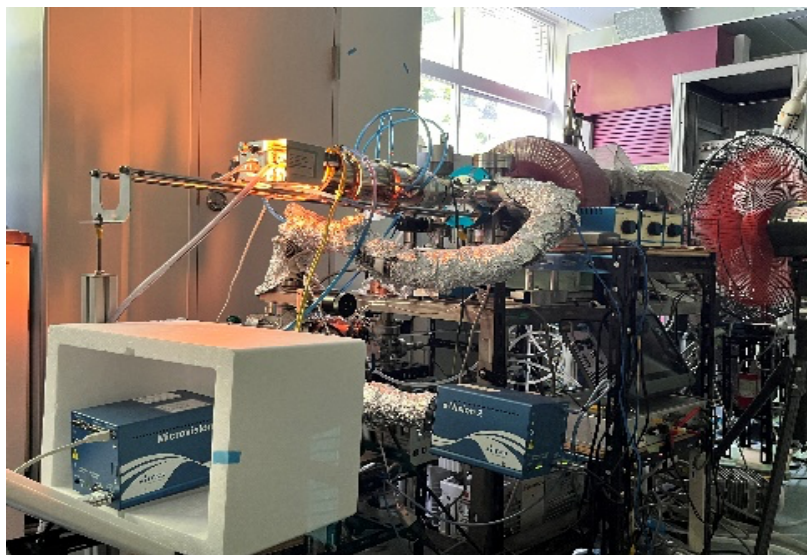


図 1 PDP 装置写真

4. 研究成果

H/D 混合プラズマ照射における水素同位体透過挙動を評価するために必要なプラズマ駆動透過装置を構築した。本装置では下流側に高分解の質量分析装置を組み込み、D₂ と He を分離して測定できるシステムとするとともに、プラズマ中の H/D 比を評価するために、高分解能分光システムを構築した。プラズマ照射において、軽水素の透過率は、1.34 × 10¹³ D₂ s⁻¹ となり重水素の透過率は 1.01 × 10¹³ D₂ s⁻¹ となった。軽水素の透過率は重水素の透過率の約 1.4 倍を示してお

り、軽水素の透過率が高いことが示された。H/D 比を変化させることで、透過挙動が変化し、HD の生成は H/D イオン比に大きく影響することが示唆された。

He を添加した H/D 混合照射における、H および D の定常透過フラックスの温度依存性を評価したところ、図 2 および図 3 に示すように 10% の He を添加するだけで、定常透過フラックスが 1 桁減少することが確認され、He の添加割合が増加することによって透過フラックスも大きく減少した。さらに、PDP 実験前後の SEM によるタングステン表面形態を観察したところ、He を 1 % または 10 % 添加することにより、試料表面に多数の突起が形成され、He バブルの形成が確認された。また、D プラズマに He プラズマを添加させると He バブル層が形成し、D 滞留が減少することから、He 添加によって、He の大部分はタングステン試料の上流側の表面付近に留まり、He バブルが生成し、水素同位体の拡散障壁となり、H および D 透過フラックスを減少させることが示唆された。

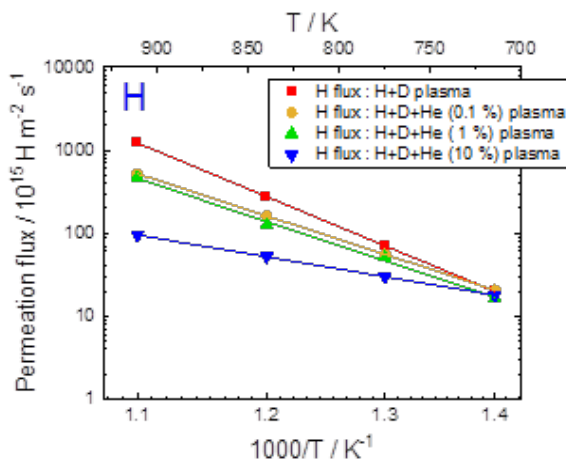


図 2 He 添加した H の定常透過フラックスの温度変化

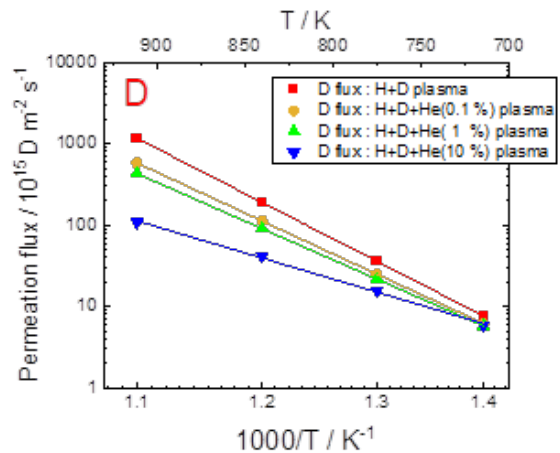


図 3 He 添加した D の定常透過フラックスの温度変化

0.3 dpa まで中性子照射したタングステン試料における水素同位体透過挙動を評価したところ、図 4 および図 5 に示すように 800 K 以下では非照射材と比較して透過フラックスは大きくなった。これは中性子照射では照射欠陥がバルク全体に跨がって分布することが影響していると考えられる。水素同位体効果の評価したところ、非照射材では低温 800 K 以下の低温では水素同位体効果が大きく H の透過フラックスが高いが、900 K を越える高温では H と D の透過フラックスはほぼ同じになり、水素同位体効果が小さいことが示された。一方、中性子照射材は高温では H と D の透過フラックスには同位体効果が示されたことから、照射欠陥が水素同位体透過挙動に影響を及ぼしていることが示された。一方、He 混合プラズマ照射では透過フラックスにおける同位体効果に大きな違いが見られなかったことから He 照射は同位体効果に影響を与えないことが明らかとなった。

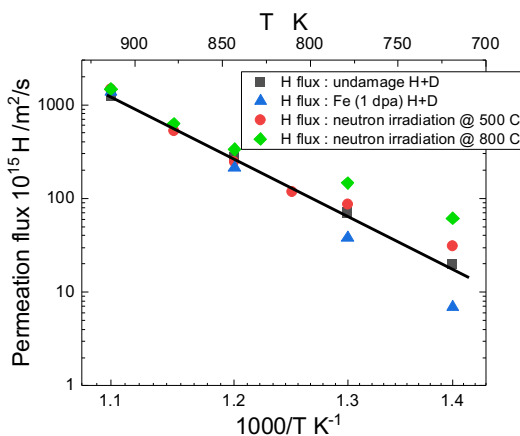


図 4 中性子照射した W における H の定常透過フラックスの温度変化

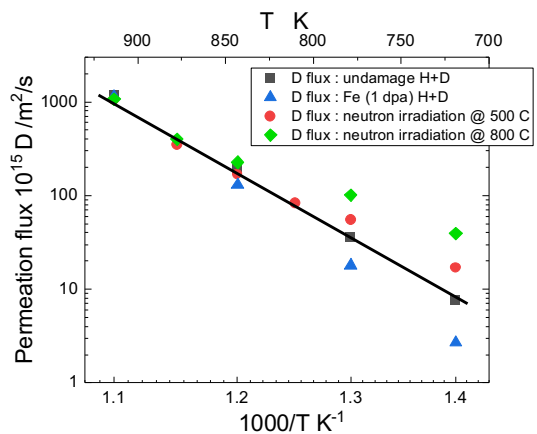


図 5 中性子照射した W における D の定常透過フラックスの温度変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasuhisa Oya, Kyosuke Ashizawa, Fei Sun, Shiori Hirata, Naoko Ashikawa, Yoji Someya, Yuji Hatano, Robert Kolasinski, Chase N. Taylor, Masashi Shimada	4. 巻 194
2. 論文標題 Effect of He seeding on hydrogen isotope permeation in tungsten by H-D mixed plasma exposure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 113722
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2023.113722	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 菊地 紘太、芦川直子、鳥養祐二	4. 巻 99(6)
2. 論文標題 核融合プラズマ対向材の残留トリチウム測定法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mingzhong Zhao, Shota Yamazaki, Takuro Wada, Ayaka Koike, Fei Sun, Naoko Ashikawa, Yoji Someya, Tetsu Mieno, Yasuhisa Oya	4. 巻 160
2. 論文標題 Deuterium recombination coefficient on tungsten surface determined by plasma driven permeation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 111853
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/15361055.2019.1705727	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Oya, F. Sun, Y. Yamauchi, Y. Nobuta, M. Shimada, C.N. Taylor, W.R. Wampler, M. Nakata, L.M. Garrison, and Y. Hatano	4. 巻 539
2. 論文標題 D retention and depth profile behavior for single crystal tungsten with high temperature neutron irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jnucmat.2020.152323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 F. Sun, X.C. Li, L. Zhang, M. Nakata, M. Zhao, T. Wada, S. Yamazaki, A. Koike, Y. Oya	4. 巻 537
2. 論文標題 Modeling and simulation for surface helium effect on hydrogen isotopes diffusion and trapping/detrapping behavior in plasma facing materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152227	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yasuhisa Oya, Nao Inozume, Shiori Hirata, Naoaki Yoshida, Tatsuya Hinoki, Kiyohiro Yabuuchi
2. 発表標題 Temperature dependence on D retention for damaged W-10%Re alloy
3. 学会等名 16th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhisa Oya, Nao Inozume, Shiori Hirata, Naoaki Yoshida, Tatsuya Hinoki, Kiyohiro Yabuuchi
2. 発表標題 Thermal annealing effect on D retention for damaged W-10%Re alloy
3. 学会等名 Nuclear Material Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhisa Oya, Kyosuke Ashizawa, Shiori Hirata, Fei Sun, Naoko Ashikawa, Masashi Shimada, Chase N. Taylor, Robert Kolasinski, Lauren Garrison, Yuji Hatano, Yoji Someya
2. 発表標題 Hydrogen isotope effect on plasma driven permeation for neutron damaged W
3. 学会等名 13th International Conference on Tritium Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大矢 恭久, 芦沢 京祐, 平田 詩織, 三福寺 旭, 齋藤永, 星野柚香, 芦川 直子, 染谷 洋二, 波多野 雄治, 島田 雅, Chase N. Taylor, Robert Kolasinski, 外山健
2. 発表標題 プラズマ駆動水素同位体透過に及ぼすタングステン中の照射損傷影響
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大矢恭久、孫飛、平田詩織、芦川直子、檜木達也、波多野雄治
2. 発表標題 タングステン中における水素同位体輸送に及ぼすヘリウムの役割
3. 学会等名 日本放射化学会第66回討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大矢 恭久, 芦沢 京祐, 平田 詩織, 芦川 直子, 染谷 洋二, 波多野 雄治, 島田 雅, Chase N. Taylor, Robert Kolasinski
2. 発表標題 中性子照射タングステンを用いた水素同位体混合プラズマ照射におけるプラズマ駆動透過
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhisa Oya
2. 発表標題 Effect of irradiation damages and He existence on hydrogen isotope plasma driven permeation for W
3. 学会等名 AAPPS-DPP2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyosuke Ashizawa, Shiori Hirata, Yuki Koyama, Naoko Ashikawa, Yoji Someya, Yuji Hatano, Fei Sun, Yasuhisa Oya
2. 発表標題 Permeation characteristics of hydrogen isotope in tungsten under H-D mixed plasma irradiation
3. 学会等名 ICFRM-20 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhisa Oya
2. 発表標題 HYDROGEN ISOTOPE RETENTION AND PERMEATION BEHAVIOR FOR DAMAGED TUNGSTEN UNDER H/D MIXED PLASMA EXPOSURE AND THEIR HE EFFECT
3. 学会等名 ICFRM-20 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Koyama
2. 発表標題 Deuterium gas driven permeation behaviour for W-10%Re alloy
3. 学会等名 PFMC-18 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhisa Oya
2. 発表標題 Effect of deuterium-helium mixed plasma exposure on hydrogen isotopes retention in damaged tungsten
3. 学会等名 Nuclear Materials Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuhisa Oya
2. 発表標題 Influence of He and/or irradiation defects on the plasma driven permeation behavior in tungsten material
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Symposium on Tritium Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大矢研究室 http://wpp.shizuoka.ac.jp/fusion/
--

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	芦川 直子 (Ashikawa Naoko) (00353441)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
研究分担者	染谷 洋二 (Someya Yoji) (20589345)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所研究所 核融合炉システム研究開発部・主幹研究員 (82502)	
研究分担者	波多野 雄治 (Hatano Yuji) (80218487)	富山大学・学術研究部理学系・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			
中国	合肥工業大学			
米国	アイダホ国立研究所	サンディア国立研究所	オークリッジ国立研究所	