

平成22年 6月16日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19686055  
 研究課題名 (和文) 核融合炉第一壁タングステンおよび炭素のミキシングとトリチウムダイナミクス  
 研究課題名 (英文) Mixing of tungsten and carbon and tritium dynamics at fusion first wall  
 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

研究成果の概要 (和文)：核融合炉第一壁タングステンにおいて、現在炭化タングステン等が形成することが予測され、トリチウム挙動がどのように変化するか明確な知見を集積することは核融合炉安全において重要な課題である。そのため今回の研究において、第一壁上に打ち込まれる炭素イオン、ヘリウムイオン、水素同位体である重水素イオンを種々の条件で照射し重水素滞留挙動を明らかにした。その結果、炭素イオン照射を行うことによる照射欠陥の形成、及びタングステン中における炭素の滞留により重水素滞留量および滞留挙動が変化した。またヘリウムイオン照射により照射欠陥が形成し重水素滞留量が増加することが示唆された。以上の結果をもとに重水素、炭素、ヘリウムイオン3種イオン同時照射を行ったところ、ヘリウムイオン照射による照射欠陥に主に重水素が捕捉されることが観測された。またタングステン表面での炭素-炭素結合の割合が2種イオン同時照射よりも減少していた。以上の結果からヘリウムイオン照射により炭素が減少するとともに滞留したヘリウムが水素同位体の内部への拡散に影響していることが示唆された。

研究成果の概要 (英文)：In the fusion reactor, tungsten materials are considered to use as the plasma facing materials and it is thought that tungsten carbide will be formed. Therefore, it is important issue for fusion safety to reveal the tritium behavior changes. In this study, carbon ion ( $C^+$ ), helium ion ( $He^+$ ) and deuterium ion ( $D_2^+$ ) were implanted into tungsten on various conditions, and the retention behavior of deuterium was clarified. As a result, it was shown that irradiation defects were formed by carbon ion implantation and the deuterium retention behavior was changed by carbon retained in tungsten. In addition, it was suggested that the irradiation defects also formed by helium ion irradiation and deuterium retention increased. For the triple ions ( $C^+$ ,  $He^+$  and  $D_2^+$ ) implantation into tungsten, it was shown that the deuterium was mainly trapped on irradiation defects formed by helium ion implantation. Moreover, the carbon-carbon bond on tungsten surface was decreased compared to that in the dual ion ( $C^+$  and  $D_2^+$ ) case. It was suggested that carbon was sputtered by helium ion implantation and the helium retention would have an influence on diffusion of hydrogen isotopes to bulk..

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2008年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：磁場核融合、トリチウム理工学

### 1. 研究開始当初の背景

核融合炉第一壁にはこれまで低 Z (原子番号) 材料が有望視されていたが、近年トリチウム滞留量の少ない高 Z 材料であるタングステンの可能性を検討する研究が広く進められている。しかし、プラズマが直接接し、高温になることが予想される場所では未だに低 Z 材料であるグラファイトを用いざるをえず、タングステンとグラファイトを適材適所に用いるというのが現在の核融合炉第一壁 (ダイバータを含む) 開発の現状と言える。そのため、炭化タングステン等が形成されることが予測され、材料上でトリチウム挙動がどのように変化するか明確な知見を集積することは核融合炉安全において重要な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、炭素イオンガンを用いて、タングステン基盤に炭素を注入し炭化タングステンを形成させると同時に、トリチウムを模擬した重水素イオンを注入することにより、膜の生成と水素同位体の導入を同じ時間スケール上で行い、実際の核融合炉第一壁でのトリチウム滞留挙動およびその機構解明を行うこととした。

### 3. 研究の方法

本研究にはアライドマテリアル社製、1173 K 歪み取り処理済みの多結晶タングステンを使用した。各照射イオン種のフラックス比を  $He/D=0.2-1.8$ 、 $C/D=0.2-1.8$  とし、打ち込み深さが同じになるように、イオンエネルギーをそれぞれ  $3.0\text{ keV } D^+$ 、 $3.0\text{ keV } He^+$  および、 $10\text{ keV } C^+$  として、室温にて  $He^+-D_2^+$  及び、 $C^+-D_2^+$  同時照射を行った。照射後、その後、試料の化学状態を評価するために光電子分光法 (XPS) を照射前後にて行い、重水素の滞留挙動を評価するために、昇温脱離 (TDS) 実験を室温から  $1173\text{ K}$  まで昇温速度を  $0.5\text{ K s}^{-1}$  として行った。また、透過型電子顕微鏡 (TEM)、走査電子顕微鏡 (SEM) および原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて表面の照射損傷を観察すると共に温度間隔  $100\text{ K}$  で  $1073\text{ K}$  までアニーリングを行い、各温度で TEM 観察を行うことで試料表面における照射損傷の消滅挙動を評価し、重水素滞留挙動との相関性の解明を行っ

た。

### 4. 研究成果

図1に室温にて重水素単独照射および炭素イオン照射後に重水素イオン照射をフラック比  $C/D=1.0$  で行ったタングステン試料と炭素イオンおよび重水素イオンを同様のフラックス比で同時に照射した試料の  $D_2$  TDS スペクトルの比較を示す。

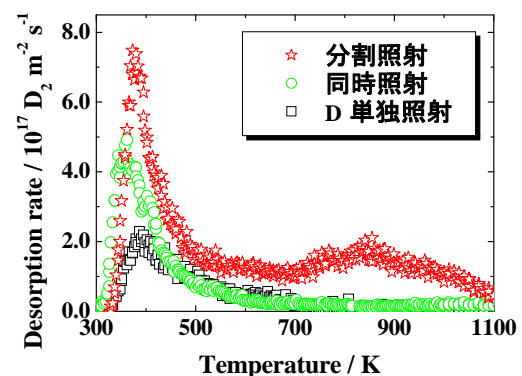


図1 分割、同時照射における  $D_2$  TDS スペクトルの比較

この結果、重水素イオン及び炭素イオンを同時に照射した試料は炭素イオンを前照射した試料と比べ、水素同位体の滞留量が大幅に低減した。一方、炭素イオン照射後に重水素イオン照射した場合は特に  $800\text{ K}$  付近の重水素脱離ピークが観測され、このピークは炭素に捕捉された重水素の脱離だと考えられる。また、XPSによる表面化学状態分析の結果、炭素イオン照射によっては表面に  $C-C$  結合が存在するが、炭素イオンと重水素イオンを同時照射すると、化学状態は  $W-C$  結合が主になることが示され、炭化タングステンの結晶化が進んでいることが示唆された。

この結果をもとに炭素イオンおよび重水素イオンフラックス依存性について検討した。図2に重水素イオンのフラックスを固定し炭素イオンのフラックスを変化させた際の同時照射時  $D_2$  TDS スペクトルを示す。

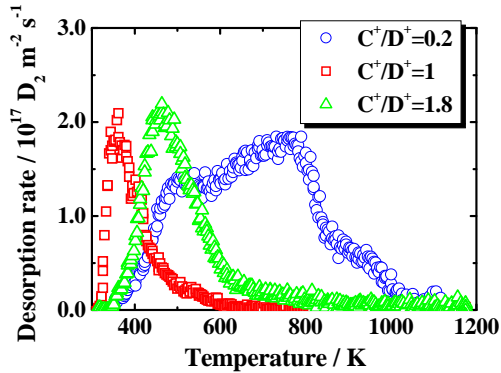
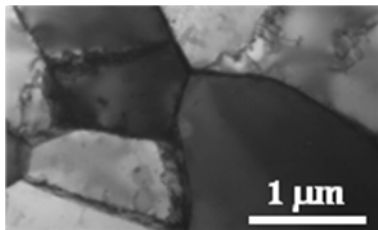


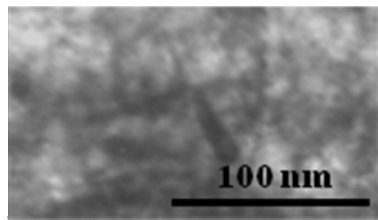
図2 C/D変化におけるD<sub>2</sub> TDSスペクトル

その結果フラックス比を変化させることにより、重水素滞留量が大きく変化することが示され、特に低フラックス時において炭素による捕捉への影響が大きいことが明らかとなった。これよりもフラックスが高い場合においては、堆積した炭素が炭素照射により自己スパッタリングされるため、炭素による捕捉が見られなかったと考えられた。

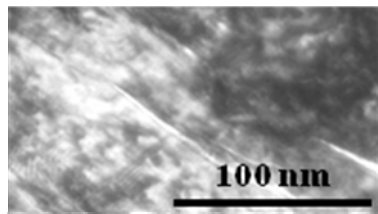
またTEM測定により各イオン同時照射による表面損傷観察の結果を図3に示す。



(a) 未照射多結晶タングステン



(b) 重水素イオン照射試料



(c) 重水素、炭素イオン同時照射試料

図3 各イオン照射におけるTEM像

上の結果から重水素イオン及び炭素イオンを同時照射したタングステンでは重水素イオンのみを照射したタングステンよりも多くの転位や転位ループ等の照射欠陥が形成されているとともに、炭素の存在も確認された。また、加熱により炭素が試料表面に偏析し、炭化タングステンが形成することが明らかとなった。またこれまでの結果をもとにフラックス比をC/D=0.2とし、イオンフルエンスを変化させた実験を行ったところ、500 K以下の結晶粒界からの重水素脱離ピーク面積は一定なのに対して500 K以上の転位や転位ループ、炭素からの重水素捕捉ピーク面積は増加することから、重水素は結晶粒界に優先的に捕捉されるがその後、転位や転位ループ、炭素に捕捉されることが明らかとなった。また、炭素によって捕捉された重水素滞留量は、化学スパッタリングの影響を受けやすいことが示された。

次に、実際の核融合炉環境下では水素同位体、炭素に加えてヘリウムも核融合炉第一壁に打ち込まれることが考えられることから、これまでに構築した炭素イオンおよび水素同位体イオン同時照射装置にヘリウムイオン照射装置を付加し、3種イオンの同時照射を行うことができるシステムを構築し、ヘリウムイオン及び重水素イオン同時照射におけるフラックス比依存性実験、また同時照射におけるイオン種を変化させた照射イオン種依存性実験を行った。

重水素イオンのフラックスを固定し、ヘリウムイオンのフラックスを変化させることで、フラックス比を変化させ同時照射した際のD<sub>2</sub> TDSスペクトルを図4に示す。

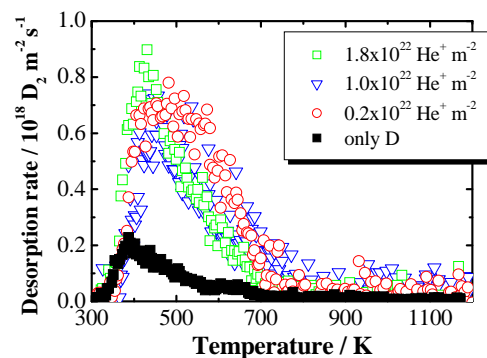


図4 He/D変化におけるD<sub>2</sub> TDSスペクトル

以上の結果より、ヘリウムイオン照射によりタングステン中に重水素捕捉サイトである照射欠陥が形成し、重水素イオン単独照射と比較して重水素滞留量は増加することが示唆された。

一方、ヘリウムイオン及び重水素イオン

との同時照射ではイオンフラックス比を変化させても水素同位体滞留挙動及び滞留量には大きな影響は与えないことが示された。

図5に各イオン種を同時に照射した際のD<sub>2</sub> TDS スペクトルを示す。

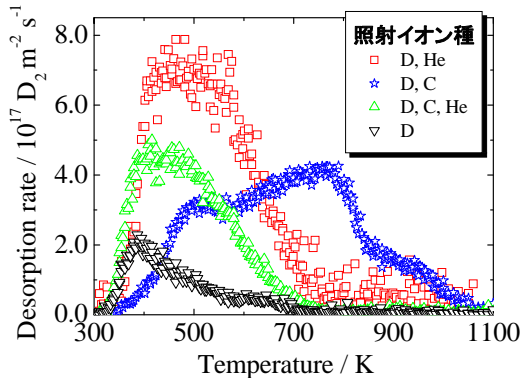


図5 各照射イオン種におけるD<sub>2</sub> TDS スペクトル

図5の結果より、炭素イオン、ヘリウムイオンおよび重水素イオンの3種イオン同時照射ではヘリウムイオン照射による照射欠陥に主に水素同位体の捕捉がされるが、炭素やヘリウムイオンとの2種同時照射よりも水素同位体滞留量は減少することが示された。またタングステン表面での炭素-炭素結合の割合が減少していることからヘリウムイオン照射により炭素の結合が減少するとともに水素同位体の内部への拡散に影響していることが示唆された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

① Yasuhisa Oya et. al., Correlation between deuterium retention and microstructure change for tungsten under triple ion implantation, Physica Scripta, 査読有, T138 (2009) 014051

② Makoto Kobayashi, et al. (9番目), Trapping behaviour of deuterium ions implanted into tungsten simultaneously with carbon ions, Physica Scripta, 査読有, T138 (2009) 014050

③ Yasuhisa Oya et al., Behavior of hydrogen isotope retention in carbon implanted tungsten, Journal of Nuclear Materials, 査読有, 390-391 (2009) 622-625.

[学会発表] (計13件)

① 大矢恭久 他, 炭素イオン照射されたタングステンにおける結晶構造変化とトリチウム滞留, 2010年電気化学会第77回大会, 2010年3月31日, 富山

② 濱田明公子 他(7番目), ヘリウム-重水素同時照射したタングステンにおける重水素滞留挙動に及ぼすヘリウム照射効果, 原子力学会2009年春の年会, 2010年3月26-28日, 茨城

③ Rie Kurata, et al. (8番目), Correlation between desorption of deuterium and recovery of irradiation defects in simultaneously deuterium and carbon ion-implanted tungsten, 7th Asia Plasma and Fusion Association, 2009年10月28-30日, 青森

④ 倉田理江 他(8番目), 炭素-重水素同時照射したタングステンにおける重水素放出と照射損傷回復との相関性, 日本原子力学会2009年秋の大会, 2009年9月16-18日, 仙台

⑤ 松岡和志 他(9番目), 固体における高エネルギーイオンのホットアトム化学過程に関する研究(XX)-炭素-重水素イオンを同時に照射したタングステンにおける重水素滞留量のフルエンス依存性-, 第53回放射化学討論会, 2009年9月28日, 東京

⑥ Wanjing Wang, et al. (8番目), Temperature Dependence on Retention Behavior of Energetic Deuterium and Carbon Implanted into Tungsten Simultaneously, 14th International Conference for Fusion Reactor Materials, 2009年9月6-11日, 札幌

⑦ Yasuhisa Oya et. al., Correlation between deuterium retention and microstructure change for tungsten under triple ion implantation, 12th International Workshop on Plasma Facing materials and Components for Fusion Application, 2009年5月11-14日, ユーリッヒ・ドイツ

⑧ Makoto Kobayashi et al. (9番目), Trapping behaviour of deuterium ions implanted into tungsten simultaneously with carbon ions, 12th International Workshop on Plasma Facing materials and Components for Fusion Application, 2009年5月11-14日, ユーリッヒ・ドイツ

⑨ 木田克也 他(5番目), 固体における高エネルギーイオンのホットアトム化学的過程に関する研究(XVI)-タングステン-炭素混合層における水素同位体滞留挙動, 日本放射化学会/第52回放射化学討論会, 2008年9月27日, 広島

⑩ Yasuhisa Oya, et al., Deuterium retention and desorption behaviors in

tungsten exposed to TPE, 25th Symposium on Fusion Technology, 2008年9月18日, ロストック・ドイツ

⑪ Sachiko Suzuki et al. (9番目), Effects of implanted carbon on chemical behavior of hydrogen isotopes implanted simultaneously into tungsten, The 9th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials, 2008年6月2日, サラマンカ・スペイン

⑫ Yasuhisa Oya, et al., Behavior of hydrogen isotope retention in carbon implanted tungsten, 18th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2008年5月27日, トレド・スペイン

⑬ 小林真 他 (6番目), タングステン-炭素混合層における水素同位体滞留挙動, 日本原子力学会 第40回中部支部研究発表会, 炭素イオンと重水素イオンの同時照射したタングステンにおける重水素滞留量のフルエンス依存性, 日本原子力学会 2009年春の年会, 2008年3月24日, 東京

[その他]

ホームページ等

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~srkokun/>

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: