

機関番号：10101

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760575

研究課題名 (和文) 表面損傷を与えた低放射化フェライト鋼の水素同位体リテンション

研究課題名 (英文) Hydrogen isotope retention of reduced activation ferritic steel with surface damage

研究代表者

山内 有二 (YAMAUCHI YUJI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80312388

研究成果の概要 (和文)：予め導入した表面損傷により、低放射化フェライト鋼の水素同位体保持特性や脱離挙動がどのように変化するのか系統的に評価することを目的としている。種々のエネルギーの水素同位体やヘリウムプラズマ/イオンを照射(予照射)し導入した表面損傷と水素同位体保持特性との関係について調べた。

ヘリウムプラズマ照射等により導入された表面損傷層、不純物分布変化などの表面改質により、当該フェライト鋼の水素同位体の脱離挙動及びリテンション特性が大きく変化することが分かった。

研究成果の概要 (英文)：The effects of surface damage induced in advance on hydrogen isotope desorption/retention properties of reduced activation ferritic steel were investigated. The reduced activation ferritic steel, F82H, was irradiated to helium or hydrogen ions/plasma. Then, the relation of the induced surface damage with properties of the hydrogen isotope retention/desorption was examined.

The introduction of surface damage layer and/or surface modification such as change in impurity distribution by plasma/ion irradiation significantly affected the properties of hydrogen isotope retention/desorption of the ferritic steel.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

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：プラズマ・壁相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

将来の基幹エネルギーとして核融合炉が期待され、商用炉の実現に向けて実験炉及び原型炉の研究・開発が進んできている。最近の磁場核融合並びに慣性核融合実験では、装置の大型化、プラズマ閉じこめ性能の向上による長期間放電の可能性等、商用炉の実現に向けて、大きな進歩を遂げている。一方、核融合装置の大型化に伴い、燃料プラズマと装

置の内壁との相互作用、いわゆるプラズマ壁相互作用の解明及びその制御が非常に重要となってきた。特に、燃料である重水素・三重水素の保持(リテンション)や脱離挙動の把握は、プラズマ中の粒子制御や安全性の観点から非常に重要な研究テーマの一つである。

低放射化フェライト鋼は、中性子照射耐性等に優れているため、プラズマ対向壁や核融

合炉構成材料の候補となっている。プラズマ対向壁は前述した重水素・三重水素だけではなく、核融合反応の結果生成される中性子やヘリウムの粒子負荷を受けるため、表面に損傷が生じる。また、その後の熱負荷などにより、表面に損傷を受けた層の微細構造が変化する。一方、金属材料中の水素同位体リテンションは表面微細構造によって大きく変化することが報告されている<sup>1)</sup>。従って、従来から調べられてきている低放射化フェライト鋼の水素同位体リテンション特性やその脱離挙動が大きく変化する可能性がある。

## 2. 研究の目的

核融合炉内のプラズマ対向壁の候補となっている低放射化フェライト鋼に対して、炉内で受ける表面損傷や表面改質を模擬するため、ヘリウムイオン等を照射する。引き続き水素同位体イオンを照射した後、昇温脱離分析により、水素同位体リテンション特性や水素同位体の昇温脱離挙動を評価する。

得られた結果から、表面に導入された表面損傷/改質と水素同位体リテンション特性との関係、例えば表面損傷の種類・密度と水素同位体脱離ピークとの関係、導入された表面損傷量と水素同位体リテンション量との関係、予照射時に導入された不純物分布の変化と水素同位体リテンション量や水素同位体脱離挙動との関係を系統的に評価する。

## 3. 研究の方法

低放射化フェライト鋼 F82H に種々のエネルギーのイオン等を照射し表面に損傷/改質層を導入する。その後重水素(D)イオンを照射し重水素リテンション特性を調べ、表面に導入された損傷/改質層の微細構造や不純物分布との関係を評価する。以下に年度毎の具体的方法を列記する。

[平成 20 年度]

ECR イオン源<sup>1)</sup>にて低放射化フェライト鋼 F82H に 5 keV のヘリウムイオン(He<sup>+</sup>)を照射した。照射量を 0.5-10×10<sup>17</sup> He/cm<sup>2</sup> の範囲で変化させた。引き続き当該装置内で 5 keV の D<sub>3</sub><sup>+</sup>イオンを照射した。照射量は 1×10<sup>18</sup> D/cm<sup>2</sup> とした。照射温度はともに室温である。照射後の F82H の重水素リテンション量や脱離挙動を昇温脱離分析(TDS)法にて評価した。昇温速度 0.5 K/s で 1073 K まで直線的に加熱し、その際、脱離した気体を定量的に測定した。

[平成 21 年度]

50 eV の水素イオン(H<sup>+</sup>)を F82H に照射した。その際の照射温度を室温から 773 K の間で変化させた。照射量は約 4×10<sup>20</sup> D/cm<sup>2</sup> である。その後 ECR イオン照射装置にて重水素イオンを照射し、同様に TDS 法にて重水素リテンション量や脱離挙動を評価した。

[平成 22 年度]

ECR プラズマ源<sup>2)</sup>を用いて F82H にヘリウムプラズマを室温で照射した。バイアス電圧(照射エネルギー)を-500 V とした。照射量を 2.5-5.0×10<sup>16</sup> He/cm<sup>2</sup> の間で変化させた。引き続き、同プラズマ源で重水素プラズマを室温で照射した。バイアス電圧を-200 V、照射量を 5.0×10<sup>15</sup> He/cm<sup>2</sup> とした。照射後、同様に TDS 法にて重水素リテンション量や脱離挙動を評価した。

## 4. 研究成果

平成 20 年度は、F82H に高エネルギーの He イオンを予照射し、その重水素リテンション挙動に与える影響について調べた。

F82H に注入された重水素イオンは TDS 分析中 D<sub>2</sub>、HD、及び HDO の形で脱離した。図 1 に He イオン照射後に D イオンを照射した場合の HD の昇温脱離スペクトルを示す。参考のため、He イオン未照射の試料のスペクトルも示す。HD 脱離ピーク温度は 500 K 付近であり、He イオン照射量増加に伴い脱離量が増加した。また、脱離ピーク温度が高温側にシフト

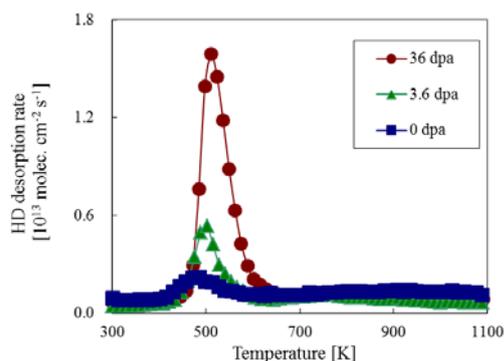


図 1 He イオン(5 keV He<sup>+</sup>)照射後に D イオンを照射した場合の HD 脱離スペクトル。参考のため He イオン未照射の場合も示す。

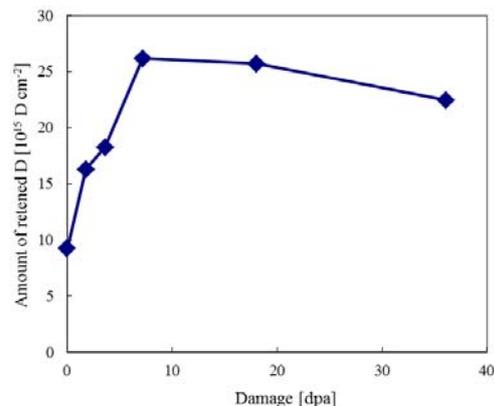


図 2 5 keV He<sup>+</sup>イオン照射の場合の D 保持量とヘリウムイオン照射量との関係。

トした。一方、HDO の脱離量も He イオン照射量増加に伴い増加したが、脱離ピーク温度に変化は見られなかった。図 2 に重水素リテンション量の He イオン照射依存性を示す。He イオン照射量増加に伴い、重水素リテンション量が増加した。He イオン照射により導入された照射損傷の増加により、重水素がより多く保持されたとみなせる。また表面損傷量 7.2 dpa で重水素保持量増加傾向が飽和に達した。

平成 21 年度は、F82H に低エネルギー H イオンを照射し導入した表面損傷と重水素リテンション特性との関係について、表面形態観察及び組成分析などにより調べた。

図 3 に H イオン照射及び未照射の D<sub>2</sub> 脱離スペクトルを示す。予め低エネルギーの H イオンを照射した試料の重水素脱離温度は、未照射のものに比べ低温側にシフトした。高エネルギーヘリウムイオン照射とは異なる表面損傷/改質が起こったとみなせる。また、照射温度を変化させた場合も脱離ピーク温度が変化しており、D 捕捉状態が変化したとみなせる。図 4 に重水素リテンション量と D<sub>2</sub>

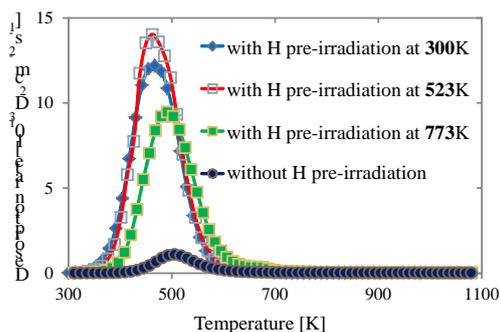


図 3 H イオン(50 eV H<sup>+</sup>)照射後に D イオンを照射した場合の D<sub>2</sub> 脱離スペクトル。参考のため H イオン未照射の場合も示す。

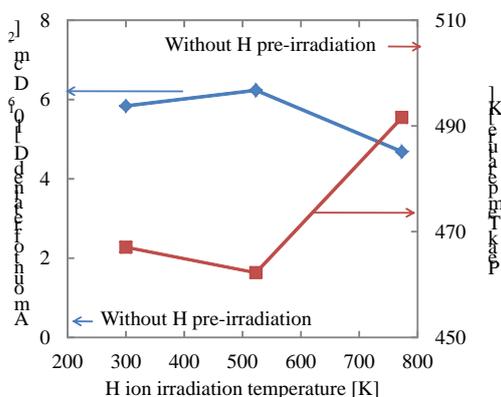


図 4 H イオン(50 eV H<sup>+</sup>)照射の場合の D 保持量及び D<sub>2</sub> 脱離ピーク温度の H 照射温度依存性

脱離ピーク温度の水素照射温度依存性を示す。H イオンの照射温度を変えた場合、照射温度が室温から 530 K まででは、重水素リテンション量にほとんど変化が見られなかったが、770 K では吸蔵量が大幅に減少した。また、低温における H イオン照射の結果、ピーク温度が低温側にシフトした。走査型電子顕微鏡や原子間力顕微鏡による重水素イオン照射後試料の表面形態観察の結果、全試料でプリスターと思われる隆起物の形成が観測されたが、予め H イオンを照射した試料のプリスター面密度が小さい傾向を示した。オージェ電子分光法による試料表面の組成を調べた結果、予め照射した試料最表面に酸素不純物層が見られた。照射後に形成された不純物層により、重水素リテンション量や脱離挙動が変化し、またプリスター形成過程も変化したと考えられる。

平成 22 年度は、低エネルギーのヘリウムプラズマを照射(予照射)し導入した表面損傷と重水素保持特性との関係について調べた。

当該条件で試料に打ち込まれた重水素は TDS 分析中 HD、D<sub>2</sub>、HDO の形で脱離し、特に HDO の脱離量が多くなった。図 5 にヘリウムプラズマ予照射有または無の場合の F82H の HDO 脱離スペクトルを示す。HDO の脱離ピーク温度は 450-700 K であり、ヘリウム予照射により低温で脱離する量が増大した。また、低温の脱離ピーク温度も低温側にシフトした。図 6 にヘリウムプラズマ予照射有または

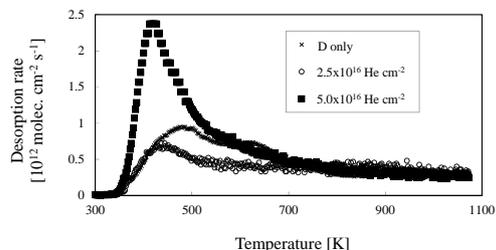


図 5 ヘリウムプラズマ予照射有または無の場合の HDO 脱離スペクトル。予照射時のバイアス電圧は-500 V である。

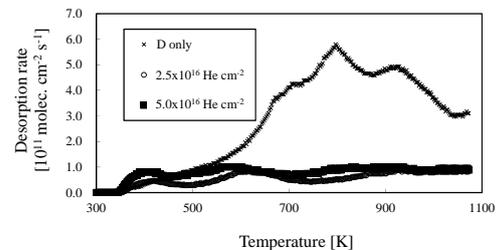


図 6 ヘリウムプラズマ予照射有または無の場合の HD 脱離スペクトル。予照射時のバイアス電圧は-500 V である。

無の場合のF82HのHD脱離スペクトルを示す。予照射無試料では表面炭素不純物による700-900Kの脱離ピークが見られた。当該ピークは予照射試料では大きく減少した一方で、低温側ピーク(～400 K)の増大が見られた。図7に予照射時の照射量と重水素保持量・脱離量との関係を示す。低照射量領域では、予照射により重水素脱離量と保持量が一旦減少したが、高照射量まで照射した場合、ともに増加した。組成分析結果との比較・検討から、予照射による表面炭素除去による保持量の低下と、表面損傷や不純物(酸素)層の導入による増加が起こったことが分かった。また、

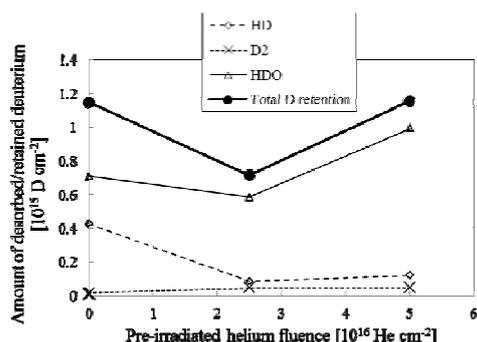


図7 D 保持量及び D を含むガス脱離量とヘリウム予照射量との関係。

脱離種割合の変化を調べた結果、予照射によりHDの脱離割合が減少した。表面層に含まれていた軽水素がヘリウム予照射により脱離したためと考えられる。

本研究により、ヘリウムプラズマ照射等により導入された表面損傷層、不純物分布変化などの表面改質により、当該フェライト鋼の重水素脱離挙動及びリテンション特性が大きく変化することが分かった。商用炉に向け、本研究で取得したデータなどから、表面損傷と水素同位体リテンション量や水素同位体脱離挙動との相関に関するデータベースの構築が必要となる。

#### [参考文献]

- 1) 例えば、T. Hino, K. Koyama, Y. Yamauchi and Y. Hirohata, Fusion Engineering and Design, Vol. 39-40 (1998), pp. 227-233.
- 2) H. Yanagihara, Y. Yamauchi, T. Hino, Y. Hirohata, T. Yamashina, Journal of Nuclear Materials, Vol. 241-243 (1997), pp. 1098-1102.

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文] (計2件)

- (1) T. Ito, Y. Yamauchi, T. Hino, T. Shibayama, Y. Nobuta, K. Ezato, S.

Suzuki and M. Akiba, Deuterium Retention of F82H After Low Energy Hydrogen Ion Irradiation, To be appeared in J. Nucl. Mater., 2011. (査読有)

- (2) Y. Yamauchi, K. Gotoh, Y. Nobuta, T. Hino, S. Suzuki, M. Akiba, "Deuterium retention and desorption behavior of reduced activated ferritic steel with surface damage due to high energy helium ion irradiation", Fusion Engineering and Design, Vol. 85 (2010), pp. 1838-1840. (査読有)

##### [学会発表] (計4件)

- (1) 伊藤達哉, 信太祐二, 山内 有二, 日野友明, 柴山環樹, 江里幸一朗, 鈴木哲, 秋場真人, "低エネルギー水素イオンを照射したF82H鋼の重水素保持脱離挙動", 日本原子力学会北海道支部第27回研究発表会, 札幌, 2009年12月14日.
- (2) Y. Yamauchi, K. Gotoh, Y. Nobuta, T. Hino, S. Suzuki, M. Akiba, "Deuterium retention and desorption behavior of surface damage due to high energy helium ion irradiation", Ninth International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Dalian, China, 2009年10月14日.
- (3) T. Ito, Y. Yamauchi, T. Hino, T. Shibayama, Y. Nobuta, K. Ezato, S. Suzuki and M. Akiba, Deuterium Retention of F82H After Low Energy Hydrogen Ion Irradiation, 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, Sapporo, 2009年9月8日.
- (4) 伊藤達哉, 山内 有二, 信太祐二, 日野友明, 江里幸一郎, 横山堅二, 鈴木哲, 秋場真人, "低エネルギー水素ビームに曝された低放射化フェライト鋼の重水素保持・脱離挙動", 第25回プラズマ・核融合学会年会, 宇都宮, 2008年12月5日.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山内 有二 (YAMAUCHI YUJI)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 80312388

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし