

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：平成18年度～平成21年度

課題番号：18360443

研究課題名（和文）ELMによるタングステンダイバータ板損傷の基礎過程の解明と材料の最適化

研究課題名（英文）Fundamental behavior of damage on tungsten divertor plate by ELM and optimization of materials

研究代表者

徳永 和俊（TOKUNAGA KAZUTOSHI）

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：40227583

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・核融合、タングステン、高熱負荷、水素同位体、ヘリウム

## 1. 研究計画の概要

本研究では、核融合炉実験装置のタングステンダイバータ板に関して、以下の点について調べる。

- (1) 国際熱核融合炉(ITER)の ELM 時のダイバータ熱負荷を模擬し、周期的なパルス高熱負荷を受けた際に発生するタングステンの損傷・損耗及びダスト・不純物発生、注入水素同位体の再放出挙動を明らかにする。
- (2) パルス熱損傷に対する水素同位体・ヘリウム(He)注入効果について明らかにする。
- (3) ELM時の負荷によるタングステンの耐損傷特性を、製造方法、加工度、組織の異なるタングステン材に対し評価を行うことにより、その依存性及びさらに損傷メカニズムを明らかにし、ダイバータアーマ材としてのタングステン材を最適化する。

## 2. 研究の進捗状況

- (1) 粉末焼結タングステン、超微細結晶粒タングステン合金(W-TiC 合金)、プラズマ溶射タングステンに対して、高熱負荷試験装置を用いてディスラプション、ELM 時の熱負荷に相当するパルス高熱負荷実験を行った。プラズマ溶射タングステンでは、特に、大気中溶射試料では被覆タングステンの層間で剥離が発生するが、一方、真空溶射試料では熱の拡散が早く皮膜の性能が優れていることが明らかとなった。
- (2) 予め水素同位体及びヘリウムを照射したタングステン材に対して、ディスラプション、ELM 時の熱負荷に相当するパルス高熱

負荷実験を行った。He 照射を受けていない焼結 W は、ディスラプション・ELM レベルのパルス熱負荷（1 GW、1ms）には耐え、また損耗も少ない。さらに、繰り返しの回数が多い場合を検討する必要がある。一方、He 照射を受けた焼結 W では、ディスラプション・ELM レベルのパルス高熱負荷によって表面層の剥離や、プリスターの形成、熔融などが促進され、大きな損耗やダストの発生をもたらす。これは、表面直下にスポンジ状の He バブルが形成されたことによる熱伝導率の低下、原子の熱拡散の低下による回復の遅れ、材料脆化などが起こったためと考えられ、損耗やダストの発生には大きな差が出てくることが明らかとなった。

- (3) 粉末焼結タングステン材(PM-W)に加え、各種改良タングステン材に対して実験を進め、材料依存性を調べ、タングステン材の最適化を進めた。試料は、圧延方向が表面に対して垂直及び平行の 2 種類の粉末焼結 W、La(0.86wt%)ドープ W、K(0.003wt%)ドープ W、超微細結晶粒 W(W-0.5wt%TiC-H<sub>2</sub> 及び W-0.5wt%TiC-Ar)で、ELM 時の熱負荷に相当するパルス高熱負荷実験を行った。特に、K(0.003wt%)ドープ W 及び、製造の際のメカニカルアローイング(MA)時に水素雰囲気中で作製した W-0.5wt%TiC-H<sub>2</sub> は、このパルス熱負荷による損耗量が少なく損耗特性が良好である。また、それぞれ、粉末焼結 W と比較し優れた特性を持っていることから、改良材として有望であることが明らかとなった。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。  
(理由)

当初の計画に対して、全体的に着実に実験が進んでおり、また、これと並行して改良タングステン材の作製、評価も進んでいるため、順調に進展していると評価できる。

### 4. 今後の研究の推進方策

本年度は、これまでの研究を進めると共に成果をまとめる。試料については、粉末焼結タングステン材では、圧延方向が試料表面に垂直な試料、超微細結晶粒タングステン合金では、MA時の雰囲気を水素で行った試料等これまでの実験で特性の優れていた試料を中心に実験を行う。また、各種実験装置等を用い、ELM時の熱負荷模擬実験、水素/ヘリウム照射実験及び電子ビーム高熱負荷実験を進める。さらに、昨年度実験を開始した冷却管付のモックアップについても強制冷却下での条件で実験を進める。

(1) レーザ光を使用したパルス高熱負荷実験装置では、熱流束の測定等、照射条件の正確な把握ができるよう実験を進める。また、レーザ照射時の試料の表面温度測定、放出ガス分析、放出原子の分光測定等の計測については、実験を進め、結果をまとめる。

(2) 試料としては、粉末焼結タングステンに加え、超微細結晶粒タングステン合金、圧延方向の異なる改良材、Kドーパタングステン、Laドーパタングステン、プラズマ溶射タングステンについて実験を進め、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡、走査型プローブ顕微鏡などを用いた分析・観察・測定を行ない、損傷挙動を解明すると共に、試料依存性をまとめ、最適化を行う。

(3) 熱挙動を定量的に評価するために、これまでに引き続き、汎用の熱構造解析ソフトを使用し有限要素法を用いた熱弾塑性応力解析等をさらに進める。特に、計算結果と実験結果と対応させることにより現象の定量的評価について完成させる。また、モックアップについては、強制冷却下での挙動を冷却水への熱伝達を含め解析を行う。

(4) 水素・ヘリウムビーム照射実験については、フルエンス及び最高到達温度を変化させた実験をさらに進め、より広い条件での挙動を明らかにする。また、表面損傷と水素吸蔵の関係を明らかにする。さらに、ITERにおけるダイバータ板表面に照射される低エネルギー及び高フラックス領域での水素同位体/ヘリウム照射では、照射試料の分析・観察を進め、ヘリウム照射によるナノ構造の形成挙

動や水素同位体の同時照射効果、光学的性質変化について明らかにし、これらを含め、これまでの結果をまとめる。

### 5. 代表的な研究成果

(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7件)

① K. Tokunaga, T. Fujiwara, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, H. Kurishita, S. Nagata, B. Tsuchiya, A. Tonegawa, N. Yoshida, Effects of high heat flux hydrogen and helium mixture beam irradiation on surface modification and hydrogen retention in tungsten materials, Journal of Nuclear Materials, in press, 査読有

② Y. Yahiro, M. Mitsuhashi, K. Tokunaga, N. Yoshida, T. Hirai, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, H. Nakashima, Characterization of thick plasma spray tungsten coating on ferritic/martensitic steel F82H for high heat flux armor, Journal of Nuclear Materials, in press, 査読有

③ K. Tokunaga, T. Fujiwara, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, N. Yoshida, Effects of helium implantation on damage during pulsed high heat loading of tungsten, Journal of Nuclear Materials, Vol. 367 (2007) 812-816. 査読有

④ K. Tokunaga, Y. Kubota, N. Noda, Y. Imamura, A. Kurumada, N. Yoshida, T. Sogabe, T. Kato, B. Schedler, Behavior of actively cooled mock-ups with plasma sprayed tungsten coating under high heat flux conditions, Fusion Engineering and Design, Vol. 81 (2006) 133-138. 査読有

〔学会発表〕(計10件)

① 徳永和俊、藤原 正、吉田直亮、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、タングステン材料の高熱流束水素・ヘリウム混合ビーム照射実験、日本原子力学会「2007年秋の大会」、2007年9月27日、北九州市

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

なし