

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289351

研究課題名(和文) タングステンの熱疲労劣化挙動の学理究明による傾斜機能長寿命ダイバータ開発への挑戦

研究課題名(英文) A Challenge to Development of Functionally-graded Long-life Divertor based on Degradation Behavior Caused by Thermal Fatigue of Tungsten

研究代表者

野上 修平 (Nogami, Shuhei)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00431528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ボイド分散強化Wにナノ組織制御Wを付与した傾斜機能ダイバータ用Wを創生することを目的とした。基本的な機械特性、再結晶挙動、疲労特性および粒子負荷耐性に基づくボイド分散強化Wとナノ組織制御Wの開発は完了し、それぞれ優れた特性を示した。また、疲労特性評価のための新規試験装置の開発も完了し、有益な評価結果が得られた。一方、ヘリウム注入耐性の評価については、評価条件は限定的であり、課題が残った。しかしながら、本研究の主目的である傾斜機能ダイバータ用Wの開発のためのボイド分散強化Wとナノ組織制御Wを用いた健全な接合体の製作技術も概ね確立したため、本研究の基本的な目標は達成されたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is development of functionally-graded tungsten (W) for divertor using a void dispersion strengthened W (VDSW) and a nano structure controlled W (NSCW). Based on the fundamental mechanical properties, recrystallization behavior, fatigue properties, and resistance to the beam bombardment, development of the VDSW and NSCW was carried out and the excellent performance was shown by these materials. Development of a new testing machine for evaluating the fatigue properties was also carried out and the available data of these materials were obtained. In contrast, the evaluation of resistance to helium implantation was carried out under the only limited evaluation conditions. This is one of the issues to be improved by future works. However, the development of fabrication technology of reasonable joints using VDSW and NSCW was all but almost over. Therefore, the objective of this research is considered to be basically achieved.

研究分野：核融合・原子力材料

キーワード：核融合炉 ダイバータ タングステン 強度 疲労 寿命 固相拡散接合 傾斜機能

1. 研究開始当初の背景

核融合炉実現のための最重要工学機器であるタングステン (W) ダイバータの主たる材料損傷事象は熱疲労であるため、粒子負荷による表面損傷の抑制によるき裂発生寿命の延伸、き裂成長の抑制、疲労寿命を低下させる再結晶化の抑制などが必要とされる。これまで我々は、ナノ組織制御 W (Nano Structure Controlled W、以下、NSCW) の優れた表面損傷耐性と高い再結晶化温度、ボイド分散強化 W (Void Dispersion Strengthened W、以下、VDSW) の高い再結晶化温度、結晶粒微細化によるき裂成長抑制の可能性などを明らかにした。しかし、ナノ組織制御 W は大型素材製造に課題があった。

2. 研究の目的

本研究では、熱疲労劣化挙動の学理究明によりナノ組織制御 W とボイド分散強化 W を疲労の観点から最適化し、ボイド分散強化 W にナノ組織制御材の優れた特性を付与した傾斜機能ダイバータ用 W を創生することを目的とした。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するため、本研究では以下4項目を実施することとした。

- (1) 基本的な機械特性、再結晶挙動、疲労特性および粒子負荷耐性の観点に基づきボイド分散強化 W とナノ組織制御 W を開発する。
- (2) 開発材料の疲労特性を実証するための装置を開発する。
- (3) 開発材料のヘリウム粒子負荷耐性を評価する。
- (4) ボイド分散強化 W にナノ組織制御 W の優れた特性を付与した傾斜機能ダイバータ用 W を開発する。

4. 研究成果

(1) 種々の結晶粒径を有する5種類のボイド分散強化 W と1種類のナノ組織制御 W を製作した。具体的には、粉末焼結と熱間圧延で製作した板材 (VDSW-t7、VDSW-t8 および NSCW-t7) と、粉末焼結とスエージ加工で製作した棒材 (VDSW-d20、VDSW-d10 および VDSW-d06) である。参照材として、粉末焼結と熱間圧延で製作した純 W の板材 (PW-t7) も製作した。図1に、これらの材料の結晶粒組織を示す。結晶粒径は、ボイド分散強化 W はカリウム (K) 添加や加工率など、ナノ組織制御 W はレニウム (Re) 添加や加工率などの調整により、結晶粒径は5 μ m程度から100 μ m程度までとした。これら開発材料の再結晶温度を結晶粒径と硬さの熱処理による変化に基づき評価した。その結果を図2に示す。開発材料の再結晶温度は1500~1800 $^{\circ}$ Cであり、純Wに比べ400~600 $^{\circ}$ Cの再結晶温度の上昇に成功した。

次に、開発材料の引張特性を評価した。図3に、受入れまま材に関する結果を示す。加

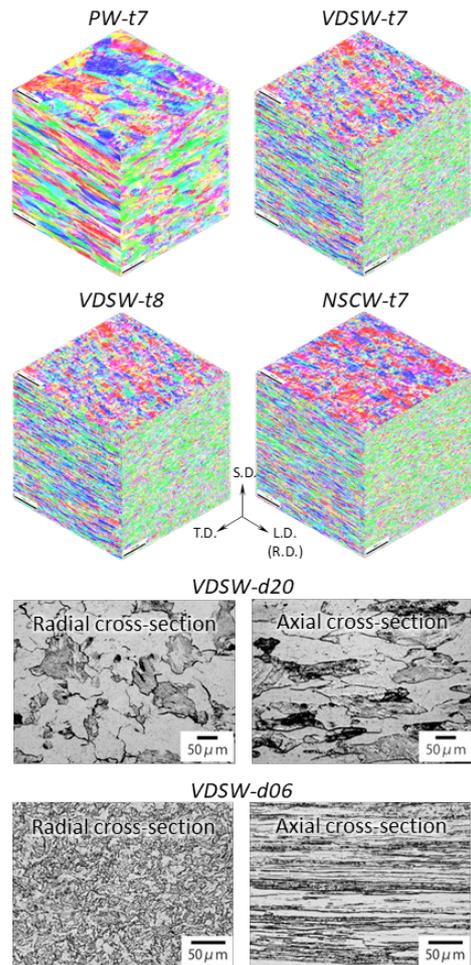


図1. 純W (PW-t7)、ボイド分散強化W (VDSW-t7、VDSW-t8、VDSW-d20 および VDSW-d06) およびナノ組織制御W (NSCW-t7) の結晶粒組織

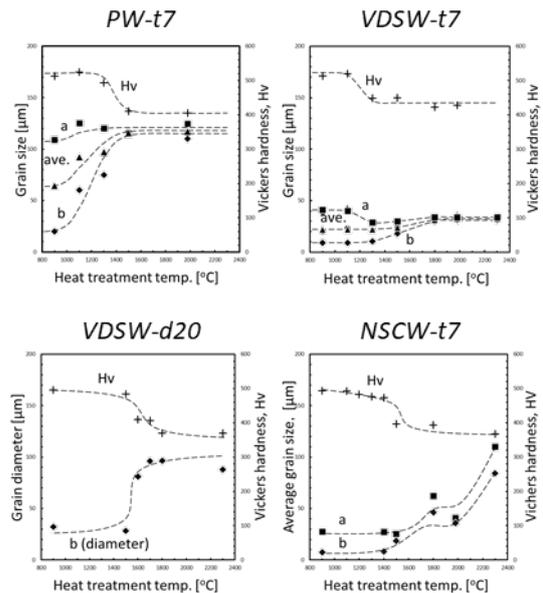


図2. 純W (PW-t7)、ボイド分散強化W (VDSW-t7 および VDSW-d20) およびナノ組織制御W (NSCW-t7) の硬さおよび結晶粒径の熱処理温度依存性

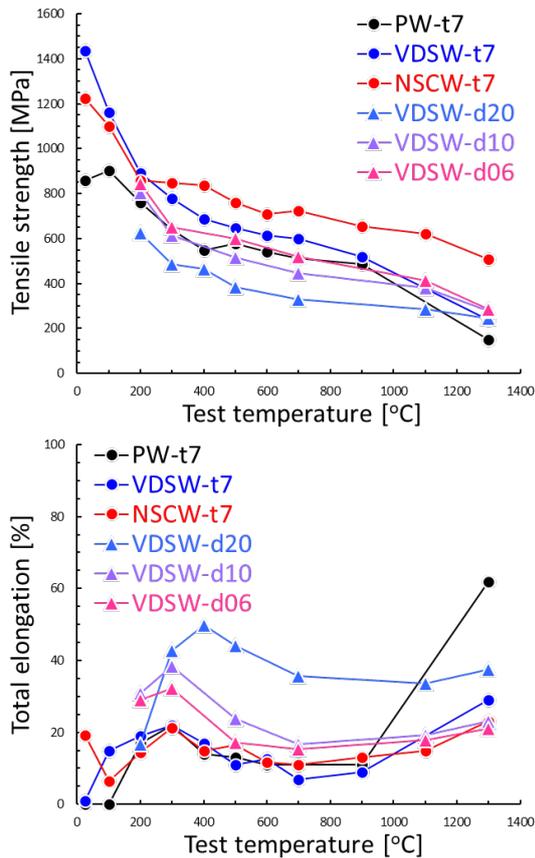


図3. 純W (PW-t7)、ボイド分散強化W (VDSW-t7、VDSW-d20、VDSW-d10 および VDSW-d06) およびナノ組織制御W (NSCW-t7) の受入れままにおける引張強さと全伸びの試験温度依存性

工率が同等の板材では、ボイド分散強化やナノ組織制御により引張強さは上昇したが、延性に大きな変化は見られなかった。一方、棒材について加工率を調整した結果、強度は若干低くなるものの、延性を高くすることに成功した。図4に、2300°C熱処理後の引張特性を示す。純Wやボイド分散強化Wは、再結晶により強度の低下と伸びの増加が見られたが、ナノ組織制御Wは熱処理による強度低下の程度は小さく、再結晶後も含めた高強度化に成功した。

(2) 開発材料の疲労特性を実証するため、高温真空中低サイクル疲労試験装置を開発し

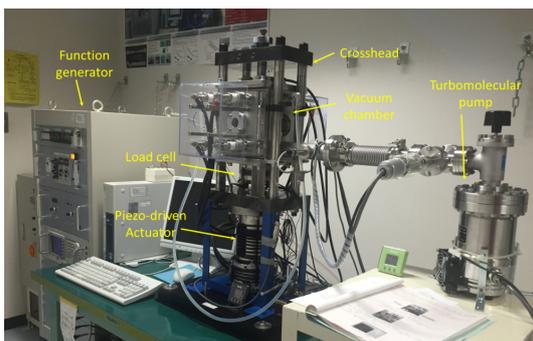


図5. 高温真空中低サイクル疲労試験装置の外観写真

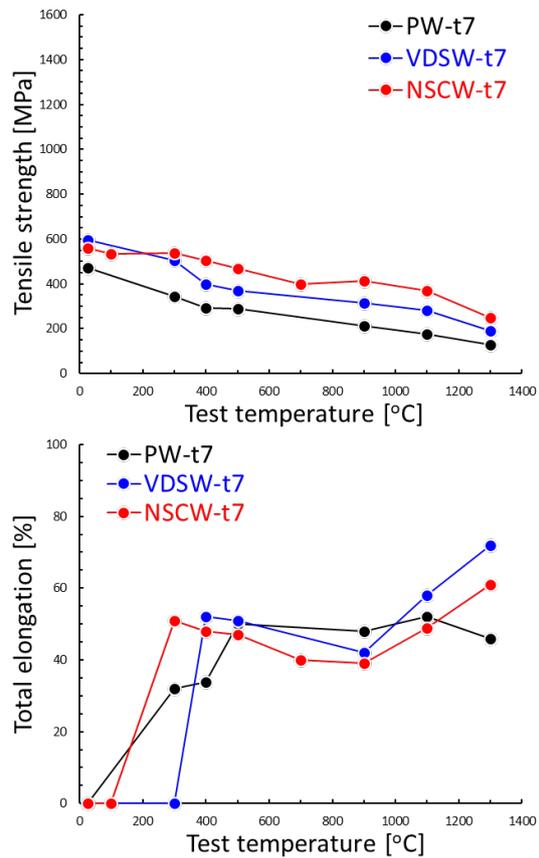


図4. 純W (PW-t7)、ボイド分散強化W (VDSW-t7) およびナノ組織制御W (NSCW-t7) の2300°C熱処理後における引張強さと全伸びの試験温度依存性

た。本研究では、既存の低サイクル疲労試験装置に、専用の高温真空チャンバーを付設することにより、目的とする評価を実現した。

図6に、この装置を用いて評価したボイド分散強化Wとナノ組織制御Wの500°Cにおける低サイクル疲労寿命を示す。ボイド分散強化とそれに伴う結晶粒微細化や高強度化などにより、開発材料は、特に負荷の小さな条件で純Wに比べて寿命が長くなることが明らかになり、開発目標が概ね達成されたことを示す。

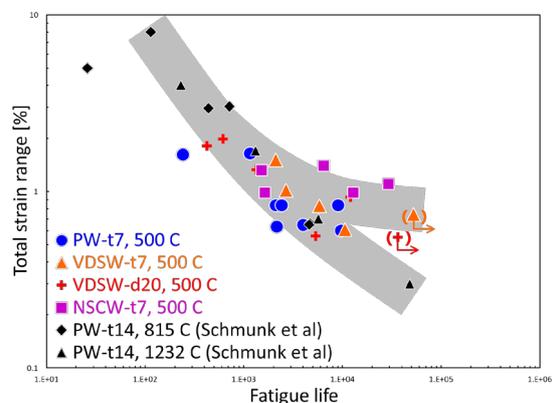


図6. 純W (PW-t7、PW-t14 (Schmunk ら))、ボイド分散強化W (VDSW-t7 および VDSW-d20) およびナノ組織制御W (NSCW-t7) の受入れままにおける疲労寿命

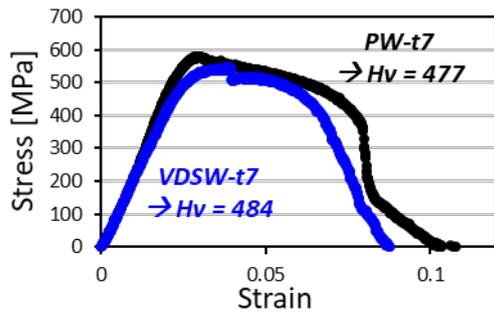


図 7. 純 W (PW-t7) およびボイド分散強化 W (VDSW-t7) のヘリウム注入後の引張試験結果と硬さ測定結果

確認した。

(3) 開発材料のヘリウム粒子負荷耐性を評価するため、東北大学サイクロトロン加速器を用いたヘリウム注入実験を実施した。計算の結果、W 試料に対しては、当該加速器で実績のない 80 MeV のヘリウムの加速が必要であり、W への注入の結果生成する放射性同位元素 (RI) の核種と数量も実績とは異なるため、まず予備実験として、80 MeV のヘリウムイオンの注入実験と、注入試験片の放射化分析を実施した。その結果、注入実験および RI 管理ともに問題ないことが確認されたため、本試験を純 W、ボイド分散強化 W およびナノ組織制御 W に対して実施した。注入温度は 200°C 以下、注入量は最大 200 appm とした。図 7 に、注入試験片の引張試験結果と硬さ測定結果の一例を示す。限定的な評価ではあるものの、概して核融合炉で想定される核変換ヘリウム量の範囲内では、ヘリウムによる機械特性の変化が顕著でないことが想定され、開発材料のヘリウム粒子負荷耐性を示唆する結果が得られたと考えられる。

(4) ボイド分散強化 W にナノ組織制御 W を付与した傾斜機能ダイバータ用 W の開発を目的とし、接合技術開発と接合体熱機械特性評価のため、ボイド分散強化 W とナノ組織制御 W による傾斜機能を有する接合体を固相拡散接合により製作した。また、比較として、純 W を使用した接合体なども複数製作した。両 W 材料の間には、純バナジウム (V) の中間材を使用した。接合温度と接合時間は、再結晶化挙動の評価結果を考慮し、1250°C×1 時間とした。図 8 に示すように、ダイバータ適用において最も重要な熱伝導特性を評価した結果、熱伝導障壁となり得る欠陥は存在せず、良好な特性を示した。当初計画では、製作した接合体の高温疲労特性評価を実施する予定であったが、期間内に完了することはできなかった。並行して実施した高温引張特性評価では、図 9 に示すように、中間材を薄くすることにより、接合界面や中間材での破損は回避できることが明らかになった。以上より、熱機械特性の観点で健全な傾斜機能ダイバータ用 W の開発の見通しが得られたと考えら

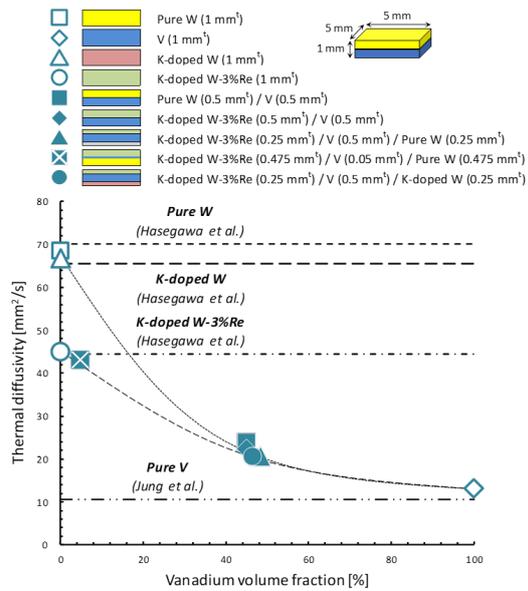


図 8. ボイド分散強化 W (図中、K-doped W) とナノ組織制御 W (図中、K-doped W-3%Re)、純 W (図中、Pure W) を用いた接合体の熱拡散率と中間材 (純 V) の体積率との関係

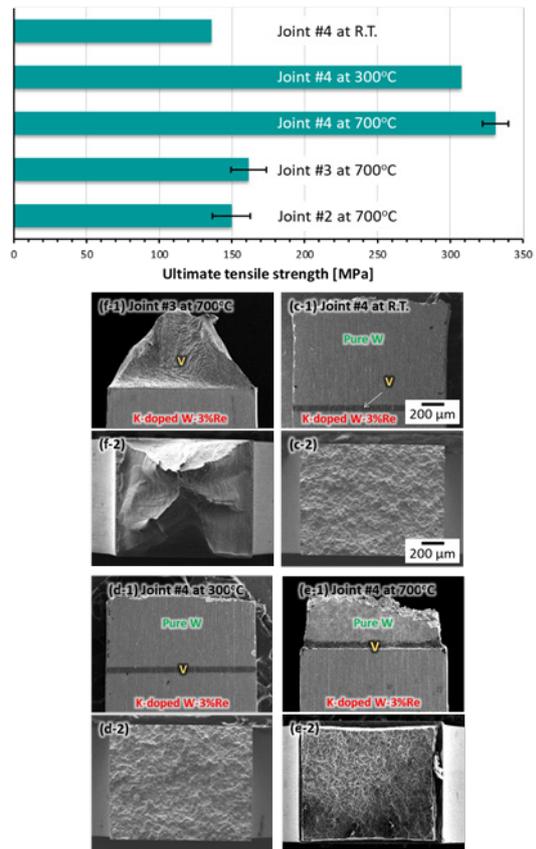


図 9. ボイド分散強化 W (図中、K-doped W) とナノ組織制御 W (図中、K-doped W-3%Re)、純 W (図中、Pure W) を用いた接合体の引張強さと破断試験片の電子顕微鏡観察結果

れる。

(5) 本研究の結論として、引張特性や硬さなどの基本的な機械特性、再結晶挙動、疲労特

性および粒子負荷耐性の観点に基づくボイド分散強化Wとナノ組織制御Wの開発は概ね完了し、それぞれ優れた特性を示したと考えられる。その成果は、国内外の学会や学術論文で公表し、世界的にも先導しうる核融合炉用W材料となり得たと考えられる。また、疲労特性評価にあたっては、計画した高温真空中低サイクル疲労試験装置の開発も完了し、有益な評価結果が得られた。W材料の疲労特性評価を実現している例は世界的にも稀有であり、今後核融合炉材料分野や関連分野を先導しうる装置と試験技術が本研究により確立できたと考えられる。一方で、ヘリウム注入耐性の評価については、加速器のマシントイムや試験片の放射化の問題などが影響し、評価条件は限定的であったため、今後更なる評価を進め、開発材料の有効性を実証する必要がある。

本研究の一番の目標であるボイド分散強化Wにナノ組織制御Wの優れた特性を付与した傾斜機能ダイバータ用Wの開発の観点では、当該材料の元素材となるボイド分散強化Wとナノ組織制御Wが開発され、それらを用いた健全な接合体の製作技術も概ね確立したため、基本的な目標は達成されたと考えられる。ただし、傾斜機能Wとしての疲労特性については評価が完了しなかったため、当該材料の実機適用性などを実証するためにも、継続した取り組みが必要であると考えられる。疲労特性評価には、素材が優れた特性を有するほど多大な時間を要するため、本研究の実績を生かし、今後の研究計画を策定することが重要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① S. Nogami, H. Noto, M. Toyota, T. Hattori, K. Otomo, A. Hasegawa, Solid State Diffusion Bonding of Doped Tungsten Alloys with Different Thermo-Mechanical Properties, Fusion Engineering and Design, 査読有, 印刷中
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.12.036
- ② S. Nogami, W. H. Guan, A. Hasegawa, M. Fukuda, Feasibility of Utilizing Tungsten Rod for Fusion Reactor Divertor, Fusion Science and Technology, 査読有, 72 (2017) 673-679.
DOI: 10.1080/15361055.2017.1347463
- ③ S. Nogami, W. H. Guan, T. Hattori, K. James, A. Hasegawa, Improved Structural Strength and Lifetime of Monoblock Divertor Targets by using Doped Tungsten Alloys under Cyclic High Heat Flux Loading, Physica Scripta, 査読有, T170 (2017) 014011-1-014011-6.
DOI: 10.1088/1402-4896/aa864d

- ④ S. Nogami, M. Toyota, W. H. Guan, A. Hasegawa, Y. Ueda, Degradation of Tungsten Monoblock Divertor under Cyclic High Heat Flux Loading, Fusion Engineering and Design, 査読有, 120 (2017) 49-60.
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.04.102
- ⑤ S. Nogami, C. Hisaka, M. Fujiwara, E. Wakai, A. Hasegawa, High Temperature Fatigue Life Evaluation Using Small Specimen, Plasma and Fusion Research, 査読有, 12 (2017) 1405022-1-1405022-6.
DOI: 10.1585/pfr.12.1405022
- ⑥ W. H. Guan, S. Nogami, M. Fukuda, A. Hasegawa, Tensile and Fatigue Properties of Potassium Doped and Rhenium Containing Tungsten Rods for Fusion Reactor Applications, Fusion Engineering and Design, 査読有, 109-111 (2016) 1538-1542.
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.11.030
- ⑦ S. Nogami, W. H. Guan, M. Fukuda, A. Hasegawa, Effect of Microstructural Anisotropy on the Mechanical Properties of K-doped Tungsten Rods for Plasma Facing Components, Fusion Engineering and Design, 査読有, 109-111 (2016) 1549-1553.
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.11.024
- ⑧ W. H. Guan, S. Nogami, M. Fukuda, A. Sakata, A. Hasegawa, Effect of Grain Structure Anisotropy and Recrystallization on Tensile Properties of Swaged Tungsten Rod, Plasma and Fusion Research, 査読有, 10 (2015) 1405073-1-1405073-10.
DOI: 10.1585/pfr.10.1405073

〔学会発表〕(計28件)

- ① S. Nogami, H. Noto, M. Toyota, K. Otomo, A. Hasegawa, Solid State Diffusion Bonding of Doped Tungsten Alloys with Different Thermo-Mechanical Properties, 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 2017
- ② S. Nogami, T. Hattori, K. James, W. H. Guan, A. Hasegawa, Improvement of Structural Strength and Lifetime of Monoblock Divertor under Cyclic High Heat Flux Loading by Using a Doped Tungsten Alloys, 16th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, 2017
- ③ S. Nogami, W. H. Guan, A. Sakata, M. Toyota, M. Fukuda, A. Hasegawa, Y. Ueda, S. Suzuki, Surface and Near-surface Degradation of Tungsten Monoblock Divertor Mockup under

- Cyclic Heat Load by JEBIS, 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2016
- ④ S. Nogami, W. H. Guan, A. Hasegawa, M. Fukuda, Feasibility of Utilizing Tungsten Rod for Fusion Reactor Divertor, 22nd Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 2016
- ⑤ S. Nogami, W. H. Guan, A. Hasegawa, C. Hisaka, M. Fujiwara, T. Kim, Fatigue Life of Tungsten Materials Strengthened by Various Methods, 29th Symposium on Fusion Technology, 2016
- ⑥ 野上修平, 管文海, 福田誠, 長谷川晃, タングステン合金の疲労寿命, 第 11 回核融合エネルギー連合講演会, 2016
- ⑦ 野上修平, 管文海, 福田誠, 長谷川晃, 先進タングステン材料の適用による核融合炉ダイバータの長寿命化, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 2016
- ⑧ 豊田倫敏, 野上修平, 管文海, 福田誠, 長谷川晃, 先進タングステン合金を適用した核融合炉ダイバータの構造強度評価, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 2016
- ⑨ 野上修平, 管文海, 福田誠, 日坂知明, 金泰俊, 秋月陽二郎, 南山二三男, 藤原昌晴, 長谷川晃, 核融合炉材料の寿命評価に向けた疲労試験技術開発, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 2016
- ⑩ 管文海, 野上修平, 福田誠, 豊田倫敏, 仁木健人, 長谷川晃, 組織制御および合金化によるタングステンダイバータの構造強度の変化, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 2016
- ⑪ S. Nogami, W. H. Guan, M. Fukuda, A. Hasegawa, Effect of Microstructural Anisotropy on Mechanical Properties of K-doped Tungsten Rods for Plasma Facing Component, 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 2015
- ⑫ W. H. Guan, S. Nogami, M. Fukuda, A. Hasegawa, Tensile and Fatigue Properties of Potassium Doped and Rhenium Added Tungsten Rod for Fusion Application, 12th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 2015
- ⑬ S. Nogami, W. H. Guan, M. Fukuda, A. Hasegawa, D. Kawai, T. Iwata, R. Nakai, K. Yamamoto, Y. Sato, M. Yamazaki, T. Nozawa, Advances in Fatigue Test Technology, 17th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2015
- ⑭ 野上修平, 管文海, 酒井康幸, 福田誠, 長谷川晃, 核融合炉プラズマ対向壁用タングステン合金開発 (5) タングステ

ンの変形およびき裂発生に及ぼす応力 3 軸度と組織異方性の影響, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 2015

- ⑮ 管文海, 野上修平, 長谷川晃, 福田誠, 坂田敦生, 核融合炉プラズマ対向壁用タングステン合金開発 (4) タングステンロッド材における延性発現機構に関する検討, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 2015
- ⑯ 管文海, 野上修平, 小保内陽大, 福田誠, 長谷川晃, カリウムドーブしたタングステンロッドの結晶粒組織と機械特性, 日本原子力学会 2015 年春の年会, 2015
- ⑰ 野上修平, 坂田敦生, 福田誠, 管文海, 藪内聖皓, 長谷川晃, 室賀健夫, タングステンロッド材の機械特性に及ぼす K ドーブの影響, 日本原子力学会 2014 年秋の大会, 2014
- ⑱ 管文海, 野上修平, 坂田敦生, 福田誠, 藪内聖皓, 長谷川晃, 室賀健夫, 純タングステンロッド材の引張特性に及ぼす組織異方性の影響, 日本原子力学会 2014 年秋の大会, 2014
- ⑲ 野上修平, 坂田敦生, 管文海, 福田誠, 藪内聖皓, 長谷川晃, 室賀健夫, K ドーブにより組織制御したタングステンロッド材の機械特性の異方性, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 2014
- ⑳ 管文海, 野上修平, 坂田敦生, 福田誠, 藪内聖皓, 長谷川晃, 室賀健夫, 純タングステンロッド材の機械特性の異方性と再結晶化の影響, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野上 修平 (NOGAMI Shuhei)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00431528

(2) 研究分担者

江原 真司 (EBARA Shinji)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：30325485

福田 誠 (FUKUDA Makoto)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：70757666

涌井 崇志 (WAKUI Takashi)
 東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教
 研究者番号：70359644

藪内 聖皓 (YABUUCHI Kiyohiro)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：70633460