

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820397

研究課題名(和文) Dynamic fracture toughness of tungsten under ternary loading

研究課題名(英文) Dynamic fracture toughness of tungsten under ternary loading

研究代表者

Lee Heun Tae (Lee, Heun Tae)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：90643297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：核融合反応に関わる過程はプラズマ対向材料で構成される壁を持つ真空容器の内部で起こる。タングステン(タングステン)は重要な対向材料である。タングステン(タングステン)は本質的に脆弱な材料であるが、核融合炉では水素、ヘリウム、そして中性子といった粒子種に晒される。これら3種類の粒子はタングステン(タングステン)のような金属の脆性を増加させることで知られている。

本研究では、水素、ヘリウム、そして中性子によるタングステン(タングステン)の力学的挙動への影響を明らかにした。二・三重負荷の場合も調べた。レーザー超音波法と呼ばれる新しい実験手法を適用してタングステン(タングステン)の機械的性質を評価した。また、タングステン(タングステン)の脆性破壊を克服するための先進材の機械的性質も評価した。

研究成果の概要(英文)：Magnetic nuclear fusion reaction occurs in a plasma confined inside a vacuum vessel with a wall composed of plasma facing material. Tungsten is an important facing material. Tungsten is a brittle material, but in a fusion reactor it is exposed to hydrogen, helium, and neutron particles. These three types of particles are known to increase the brittleness of metals such as tungsten.

In this study, the effect of hydrogen, helium, and neutrons on the mechanical behavior of tungsten was clarified. We also examined select cases of binary and ternary loading. The mechanical properties of tungsten were evaluated by applying a new experimental method called laser ultrasonic method. We also evaluated the mechanical properties of advanced materials to overcome brittle fracture of tungsten.

研究分野：核融合学プラズマ・壁相互作用

キーワード：タングステン レーザー超音波法 機械的性質 水素同位体 ヘリウム 照射損傷

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁場閉じ込め核融合研究では、2つの水素同位体を燃料とし、ヘリウム、中性子、そしてエネルギーを生成するために水素プラズマが用いられる。生成物のうち、エネルギーを回収し利用するため、核融合エネルギーによる新しいエネルギー源の開発が計画されている。核融合反応に関わる過程はプラズマ対向材料で構成される壁を持つ真空容器の内部で起こる。

(2) タングステンは本質的に脆弱な材料であるが、核融合炉では水素、ヘリウム、そして中性子といった粒子種に晒される。これら3種類の粒子はタングステンのような金属の脆性を増加させることで知られている。脆性の増加は亀裂による材料破壊につながる。このような影響は核融合炉の安全運転の可能性を狭めてしまう。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、水素、ヘリウム、および放射線ダメージにより、脆性破壊が促進されるか否かを評価することである。

(2) タングステンの機械的性質に対する水素、ヘリウム、放射線ダメージの影響の物理を明らかにするために、新しい実験手法を適用する。

(3) タングステンの脆性破壊を克服するための解決策を模索する。

3. 研究の方法

材料中の脆性を決定する従来の方法は、破壊靱性と呼ばれるパラメータを評価する方法であった。破壊靱性は亀裂の広がり材料がどれくらい耐えられるかを示す。しかしながら、この従来法は水素、ヘリウム、中性子全てによるダメージの影響を試験するために用いることは適切ではない。Figure 1に示されるように、一般的に材料の強度は靱性に反比例する。材料強度は弾性定数を決定することで特性付けられる。弾性定数はタングステン中の波の伝搬速度を計測することで決定づけられる。波の伝搬速度は本研究において新たに開発された、レーザー超音波として知られる方法で計測された。Figure 2に示され

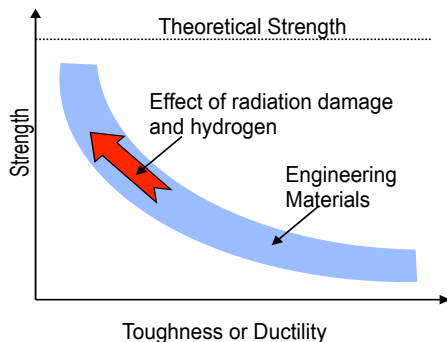


図1 一般的な材料の強度は靱性の関係

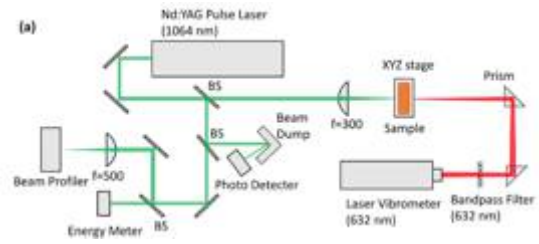


図2 レーザー超音波法実験

るように、レーザーは材料中の弾性波を発生させるためと、検出するため、両方に用いられる。この方法は非破壊法である。加えて、材料の硬度を決定するのに、ナノインデントーション法が用いられた。更に、MeV イオンビーム加速器と超高電圧電子顕微鏡によって変位ダメージを起こし、特性評価するのに用いられた。また、低エネルギーイオン加速器が水素やヘリウムを注入するのに用いられた。

4. 研究成果

(1) 単負荷：水素による力学的挙動への影響
いくつかのことなる量の水素がタングステン試料に注入された。水素リテンションの増加に伴い、弾性定数は増加した。これにより、タングステンは硬くなったと言える。したがって、図3に示されるように、材料はより速く振動エネルギーを減衰することができる。

(2) 単負荷：イオンダメージ(中性子の影響)による力学的挙動への影響

中性子による変位ダメージは、高エネルギーMeV イオンによる変位ダメージによって見積もられた。ダメージは2000 nm深さまで与えられた。ダメージを引き起こす最小エネルギーは結晶の方位に依存するため、方位(100)と(110)の単結晶タングステン試料が用いられた。図4は何種類かの単結晶タングステンと鉄の試料に対する、深さ方向の硬度である。イオンによってダメージを受けた試料(“irradiated W”)は、2000 nmの深さ(つまりダメージを受けたエリア)まで硬度が増加していることが分かる。

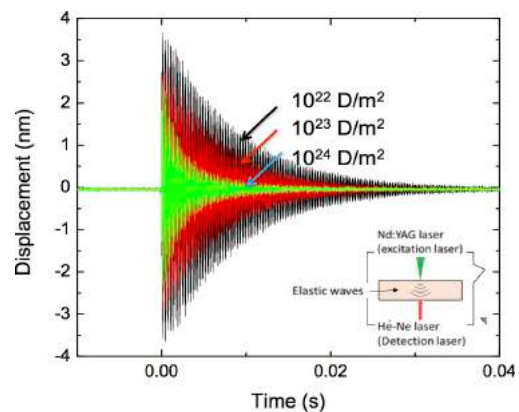


図3 タングステン中に水素蓄積により速く振動エネルギー減衰

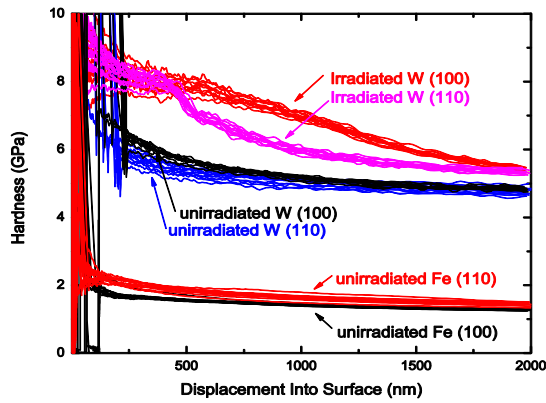


図4 何種類かの単結晶タングステンと鉄の試料に対する深さ方向の硬度を示す。

(3) 二重負荷：水素およびヘリウム同時照射下における bcc 方位金属タングステンと鉄中の水素輸送(1)で見られるように、水素は材料の強度を上げ、より脆弱にする重要な役割がある。材料中のどこでそれが起こり、どれ位の水素量によって起こるかははっきりと分かっていない。これは、局所的な水素濃度による。つまり、タングステン中で水素がどのように輸送されているかを知る必要がある。問題は、水素はタングステンのような金属中で非常に流動性があることである（拡散が早い）。水素輸送は表面における輸送境界条件が決定的な要素となる。したがって、表面状態の変化が境界条件の変化に繋がる。代表的な例が、タングステン表面へのヘリウムの水素との同時注入である。我々は、ヘリウムによって改質されたタングステン表面からの反射率が低いことを示した。これは、注入された水素がタングステン表面にヘリウムが存在する時に増加することを示唆する。[K. Doi et al., Physica Scripta T167 014044 (2016)] 先行研究では、ヘリウムの影響は内部での水素輸送を減少させることが示されている。我々の結果は、内部での水素輸送の減少は反射率の変化により生じるものではなく、外部への水素放出の増加によって起こること示唆する。また、我々はヘリウムによって誘発された外部への水素放出の増加は鉄やスチールといった他の bcc 方位の金属に対しても当てはまることを示した。[K. Yakushiji et. al., Physica Scripta T167 014067 (2016)] 従って、ヘリウムによって誘発された外部への水素放出の増加は、未解明な基本的メカニズムの理解につながり得る、bcc 金属にとって一般的な現象であることを示したと言える。

(4) 三重負荷：ヘリウムバブルの構造的安定性の理解

(3)で述べられたように、水素は非常に流動性が高く、しかも高温($T > 900$ K)では、非常に流動的なためほとんどの水素がタングステン中に保持されない。しかしながら、ヘリ

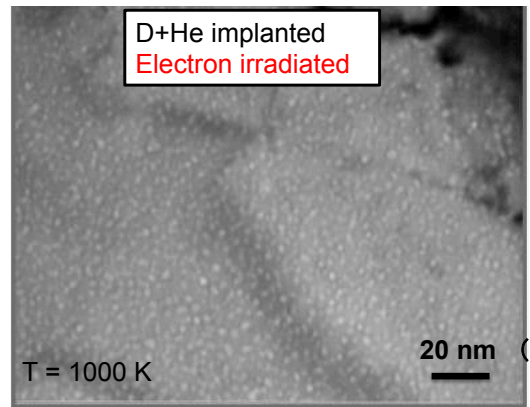


図5 白いドットに示されるようなヘリウムバブルの秩序構造の増加を示す。

ウムはタングステン中でヘリウムバブルという形態で安定的に強く結合され、内部に残る。それゆえ、高温ではヘリウムの影響が支配的となり、これはヘリウムバブルの微視的状态に依存する。我々は重水素-ヘリウム(D-He)同時照射下で形成されるヘリウムバブルの動的な進展と、続く変位ダメージ存在下における進展を調査した。超高電圧顕微鏡を用いて、イメージングとダメージ付与を同時に行う方法で実験を行った。このような動的条件下で、図5の白いドットに示されるようなヘリウムバブルの秩序構造の増加が観測された。大きいサイズのヘリウムバブルは凝集エネルギー減少の効果によって増加される脆性に繋がる。我々の結果は動的条件下におけるヘリウムバブルの成長は、ternary 効果を見積もるためにより詳細に研究される必要があることを示す。これらの結果は2017年中に ICFRM 国際学会で発表し、論文を発表する予定である。

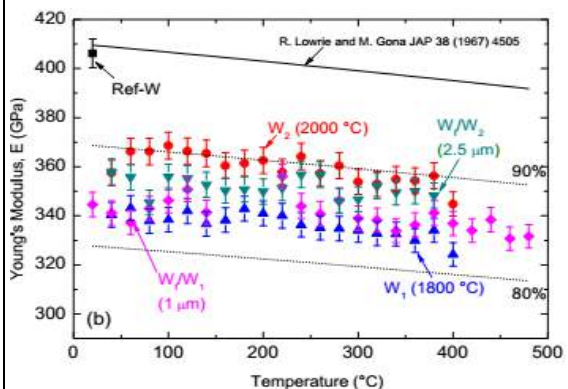


図6 先進材料の弾性定数を特性評価

(5) タングステン繊維強化タングステン複合材料の特性評価

(1)-(4)の結果から見られるように、水素、ヘリウム、変位(中性子)ダメージの影響はタングステンの脆性増大に繋がる。このような脆性を克服するための一つの解決策として、タングステン繊維強化タングステン複合材

料の利用が挙げられる。しかしながら、材料の性質は材料プロセスにおけるパラメータに決定的に依存する。我々は開発されたレーザー振動技術を用いて、図 6 に示されるように、このような先進材料の弾性定数を特性評価した。[H.T. Lee et al., Physica Scripta, submitted (2017)].

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 Lee Heun Tae, “レーザー超音波法によるその場診断”, Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Vol.93-11 月号(2017 年 11 月発行)掲載予定の小特集「プラズマ対向材料表面のその場診断」(査読無)
- ② K. Yakushiji, H.T. Lee, M. Oya, Y. Hamaji, K. Ibano, Y. Ueda, “Influence of helium on deuterium retention in reduced activation ferritic martensitic steel (F82H) under simultaneous deuterium and helium irradiation”, Physica Scripta T167 014067 (2016). (査読有)
- ③ K. Doi, Y. Tawada, H.T. Lee, S. Kato, N. Tanaka, M. Sasao, M. Kasaki, M. Nishiura, Y. Matsumoto, T. Kenmotsu, M. Wada, Y. Ueda, H. Yamaoka, “Reflection properties of hydrogen ions at helium irradiated tungsten surfaces” Physica Scripta T167 014044 (2016). (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

国際学会

- ① H.T. Lee, S. Ando, J. W. Coenen, Y. Mao, J. Riesch, H. Gietl, R. Kasada, K. Ibano, Y. Ueda “Longitudinal and shear wave velocities in pure tungsten and tungsten fiber-reinforced tungsten composites”, 16th International conference on plasma-facing materials and components for fusion applications (PFMC-16), May 15-19th, 2017, Neuss, Germany. (Poster presentation-P2-2)
- ② H.T. Lee, “Application of laser ultrasonics to characterize Tungsten material response in the field of plasma material interactions in nuclear fusion”, 5th International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing, July 4th, 2016, Linz, Austria. (Oral presentation)
- ③ H.T. Lee, “Crack propagation in tungsten detected using acoustic emissions by laser doppler vibrometer”, 17th International conference on fusion reactor materials (ICFRM-17), October 12th, 2015, Aachen,

Germany. (Poster presentation-Po-80)

- ④ H.T. Lee, “Experimental studies of hydrogen transport parameters in tungsten”, International workshop on Models and Data for Plasma-Material Interaction in Fusion (MoD-PMI2015), May 26th, 2015, Marseille, France. (Invited presentation)
- ⑤ H.T. Lee, “Application of laser ultrasonics for plasma material interaction studies”, 5th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research, October 9th, 2015, Juelich, Germany. (Oral presentation- IV-8)
- ⑥ H.T. Lee, H. Katsuma, K. Ibano, Y. Ueda, “Laser ultrasonics as a method for in-situ material monitoring diagnostic in fusion device”, 15th International conference on plasma-facing materials and components for fusion applications (PFMC-15), May 21st, 2015, Aix-en-Provence, France. (Poster presentation-P-13)
- ⑦ K. Yakushiji, H.T. Lee, M. Oya, Y. Hamaji, K. Ibano, Y. Ueda, “Influence of helium on deuterium retention in reduced activation ferritic martensitic steel (F82H) under simultaneous deuterium and helium irradiation”, 15th International conference on plasma-facing materials and components for fusion applications (PFMC-15), May 21st, 2015, Aix-en-Provence, France. (Poster presentation-P-22)
- ⑧ K. Doi, Y. Tawada, H.T. Lee, S. Kato, N. Tanaka, M. Sasao, M. Kasaki, M. Nishiura, Y. Matsumoto, T. Kenmotsu, M. Wada, Y. Ueda, H. Yamaoka, “Reflection properties of hydrogen ions at helium irradiated tungsten surfaces” 15th International conference on plasma-facing materials and components for fusion applications (PFMC-15), May 19th, 2015, Aix-en-Provence, France. (Poster presentation-P-22)

国内学会

- ⑨ 上田和輝, Lee Heun Tae, 安藤颯介, 上田良夫, “レーザー振動計を用いたタングステンモノブロックにおける亀裂深さ測定”, 第 33 回 プラズマ・核融合学会年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016 年 12 月 1 日 (ポスター発表)
- ⑩ Lee Heun Tae “Application of laser ultrasonics for plasma material interaction studies”, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 名古屋大学 東山キャンパス・豊田講堂, 2015 年 11 月 26 日 (口頭発表)

- ⑪ 勝間洋行, Lee Heun Tae, 伊庭野健造, 上田良夫, “パルスレーザーにより励起された弾性波によるタングステン試料における縦波速度の計測”, Plasma Conference 2014, 新潟県新潟市, 2014年11月20日(ポスター発表)

[その他]

ホームページ等

<http://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/~supraweb/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Lee Heun Tae (LEE, Heun Tae)

大阪大学工学研究科・助教

研究者番号：90643297

(2) 研究協力者

上田 良夫 (UEDA Yoshio)

大阪大学工学研究科・教授

研究者番号：30193816

勝間 洋行 (KATSUMA Hiroyuki)

大阪大学工学研究科・修士課程学生

薬師寺 高輝 (YAKUSHIJI Kouki)

大阪大学工学研究科・修士課程学生

上田 和輝 (UEDA Kazuki)

大阪大学工学研究科・修士課程学生

安藤 颯介 (ANDO Sousuke)

大阪大学工学研究科・学部学生

笠田 竜太 (KASADA Ryuta)

京都大学エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：20335227

Schwarz-Selinger, Thomas

Max Planck Institute for Plasmaphysics,

Garching, Germany・研究員