

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13523

研究課題名(和文)核融合照射環境でのタングステン材料劣化予測法の確立に向けた挑戦

研究課題名(英文)Challenge to predict material degradation for tungsten under fusion neutron irradiation

研究代表者

宮澤 健(Miyazawa, Takeshi)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：00733726

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):原子炉による中性子照射実験に加えて加速器によるイオン照射実験を相補的に取り入れることで、核融合炉ダイバータ候補材料として期待されているタングステン(W)及び先進W合金の耐照射特性を評価し、核融合ダイバータ設計に資する工学的知見を得るとともに、先進W合金の応用はダイバータの構造強度・健全性の向上と設計と運転条件の裕度を拡大させることができ、ダイバータ機器のより長期間の運用が期待できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「ダイバータ機器構成材料の中性子照射影響」としてアクションプランの課題に挙げられているように、Wの機械特性に及ぼす中性子照射の影響を明らかにし、ダイバータの設計に資するWのデータベースを構築することは喫緊の課題と言える。本研究成果において、Wバルク材の中性子照射後強度特性に関する工学的知見を得ることができ、これらをベースとして核融合ダイバータ設計への実用が期待される。さらにこれらの工学的知見は、ITERでのダイバータ機器構成材料の中性子照射影響に資する重要な知見と成り、核融合エネルギーの早期実現に寄与するものである。

研究成果の概要(英文):By complementarily incorporating ion irradiation experiments using an accelerator in addition to neutron irradiation experiments using a nuclear reactor, the irradiation tolerance of tungsten (W) and advanced W alloys, which are expected as candidate materials for fusion reactor divertors, were evaluated. In addition to obtaining engineering knowledge that contributes to the design of fusion divertors, the application of advanced W alloys can improve the structural soundness of divertors and expand the margin of design and operating conditions. And the application can be expected to operate the divertor components for a longer term.

研究分野：材料工学

キーワード：核融合炉材料 高融点金属 中性子照射 プロトン照射 照射硬化 引張特性 微細組織

1. 研究開始当初の背景

核融合ダイバータに使用されるタングステン(W)には低温脆性という欠点を有しており、再結晶脆化(再結晶による脆性温度域の拡大)や中性子照射脆化(照射欠陥による硬化・脆化)が課題として指摘されている。Wの脆性を克服するために、カリウム(K)とレニウム(Re)を複合添加した先進W合金(K-doped W-3%Re)の圧延材が研究代表者所属の研究グループ(東北大学)によって開発された。

「ダイバータ機器構成材料の中性子照射影響」としてアクションプランの課題に挙げられているように、Wの機械特性に及ぼす中性子照射の影響を明らかにし、ダイバータの設計に資するWのデータベースを構築することは喫緊の課題と言える。しかしながら、他の炉内機器候補材料である低放射化フェライト鋼や低放射化バナジウム合金等に比べて、Wの中性子照射のデータは圧倒的に少ないのが現状であり、ITER運転条件の1 dpa近傍の重照射データのみならず、照射温度範囲や材料の系統的な調査はほとんどされなかった。これまで材料照射炉を用いて種々のW材料の中性子照射実験が国内外にて実施されてきたが、照射温度は800℃までが中心であったのに対して、ダイバータでは最高1500℃程度までの使用温度が想定されている。純W圧延材では1000℃近傍で再結晶が開始するが、1000℃以上での中性子照射データは非常に限られている。またWの場合では、熱中性子による中性子捕獲反応によってRe等の核変換元素が生成され、特に1 dpa程度の比較的高い照射量ではReの生成量が10%程度になり、照射誘起析出によりW-Reの金属間化合物が多量に形成される。そのため、熱中性子束を有する材料照射炉による中性子照射実験では、Wの照射硬化量の過大評価につながる可能性が示唆された。

2. 研究の目的

材料照射炉 HFIR にてガドリニウム(Gd)によって熱中性子遮蔽を施したキャプセルを用いて、500℃から1000℃に至るまでのダイバータ実機での運転温度を想定した広範囲な温度域にて中性子照射されたW合金圧延材を対象とした。これらのW合金圧延材における中性子照射脆化耐性を調査することで、核融合ダイバータ設計に資する工学的知見を得ることを目的とした。

原子炉による中性子照射材では、試料の放射化のために実験が制約されるために、照射後の組織観察の研究では加速器によるイオン照射材を取り入れた。イオン照射にはダイナミトロン加速器にて生成した高エネルギープロトンを用いて、1000℃を超える高温照射におけるWの照射硬化量と損傷組織の関係を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で用いたW合金圧延材は、工業的規模での生産性と材料均質性等を勘案して、ITERのダイバータタイトルの製造を想定した粉末焼結と高温における圧延加工によって製造されたW圧延材である。900℃×20分の応力除去熱処理を施したものを受入れまま材とした。

原子炉での中性子照射実験では国内での照射実験の機会が無いのが現状である。そこで米国オークリッジ国立研究所の材料照射炉 HFIR を用いてW合金の中性子照射実験を実施した。中性子照射条件は550℃/0.4 dpa、850℃/0.7 dpa及び1000℃/0.7 dpaであり、ダイバータでの使用温度域、且つ、ITERにおける照射損傷量を想定している。SS-J型の微小引張試験片を用いて、ビッカース硬さと引張試験を実施した。

東北大学工学部高速中性子実験室のダイナミトロン加速器によって生成した3 MeVのH⁺イオン(W中の飛程: 26 μm)を用いてプロトン照射実験を実施した。照射条件は1200℃/1 dpaとした。直径3 mmのディスク試験片を用いた。SRIM計算により、プロトン照射では損傷量が一定と見なせる2~10 μmの深さにおける損傷量の平均値を公称値とした。照射後の試料に対しては、照射表面におけるビッカース硬さを測定した後に、電解研磨をして薄膜化することで透過型電子顕微鏡にて微細組織を観察した。

4. 研究成果

(1) 熱中性子遮蔽を施した照射材の機械特性

図1に純Wにおける照射硬化量の中性子照射量依存性を示す。これまでの熱中性子遮蔽無し HFIR-unshielded 照射材と比較して、熱中性子遮蔽有りの HFIR-shielded 照射材(本研究)では照射硬化量が減少している傾向が得られた。また、本研究の HFIR-shielded 照射材は高速炉 JOYO 照射材と同等の照射硬化量を示した。以上のことから、熱中性子遮蔽によって核変換物(主に、Re)の生成が抑制され、急激な硬化が抑制されたためと考えられる。

図2に純W及びW合金の中性子照射後引張特性を示す。600℃及び800℃にて中性子

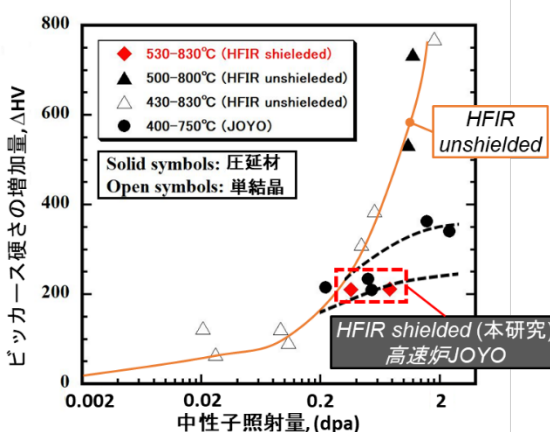


図1. 純Wにおける照射硬化量の中性子照射量依存性

照射した純Wでは、照射硬化に伴い、全伸びがゼロ、もしくは数%まで低下し延性が減少した。それに対して、W合金では照射硬化に伴い、降伏応力が2倍程度になったが、W合金では破断伸びが照射前とほぼ変わらない値を示しており、照射後に破壊までに要するエネルギー、すなわち靱性値が2倍程度になるという照射誘起の高靱性化（タフニング）現象が見られた。W合金では圧延材特有の扁平な結晶粒が積層した組織（層状組織）に由来する多層構造の延性破面が観察されており、この照射温度及び照射損傷量では格子欠陥集合体による硬化は起こるものの、多層の微細結晶粒が残っているために、脆化が起きなかったものと考えられる。

一方で、再結晶温度域における高温照射における照射後引張特性は、1000°C照射ではほとんど硬化せず、むしろ引張強さは減少し、伸びが増加する傾向があった。高温照射中においては回復と再結晶が進行したため、それらによる強度減少と照射欠陥クラスターの生成による照射硬化が均衡することで、強度が増加することなく、延性が保たれたと考えられる。

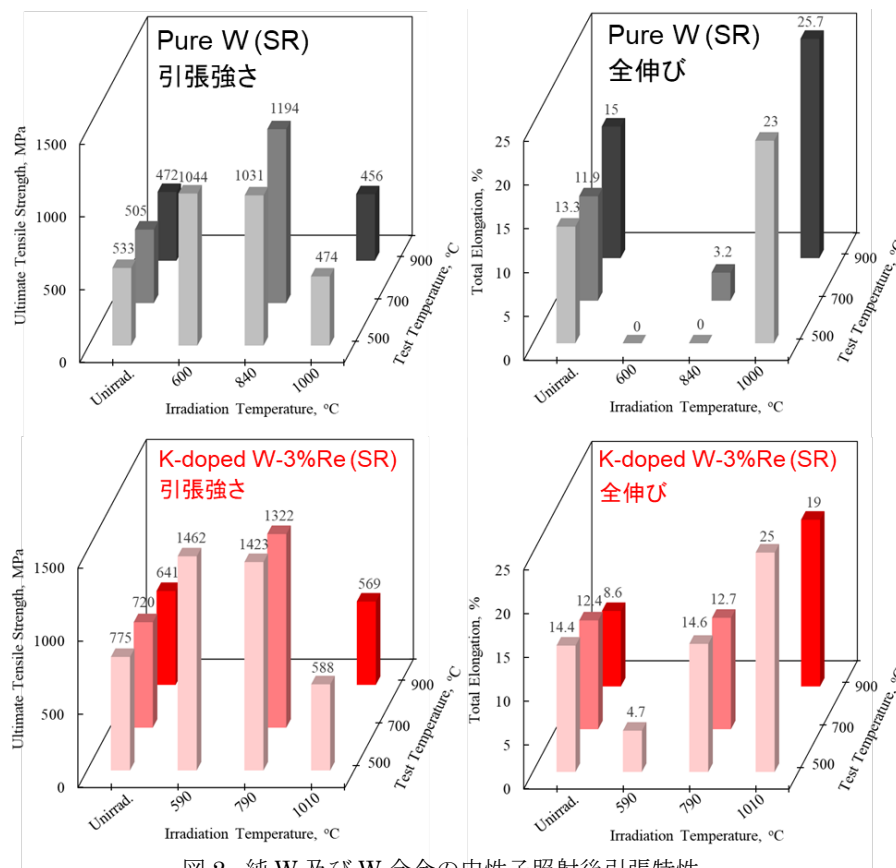


図2. 純W及びW合金の中性子照射後引張特性

(2) プロトン照射による照射硬化量と損傷組織の関係

Wの再結晶温度付近である1200°C付近におけるプロトン照射を実施して、硬化量と損傷組織の相関性に関する基礎的な知見を得た。純Wにおいては、1200°C/1 dpaにおいて照射硬化量 ΔHV は30程度であった。しかしながら、試験荷重50 gfのマイクロビッカース硬さの測定誤差が $\pm 30 HV$ であるため、照射前後で有意な差があるとは言えない。図3に1200°C/1 dpaプロトン照射した純Wの微細組織を示す。ボイドのみが観察され、数密度及び平均サイズはそれぞれ $8.0 \times 10^{21}/m^3$ 、5.9 nmであった。高温照射のプロトン照射材では、粗大なボイドが観察された。ボイドのサイズは大きい数密度は小さかったために、照射硬化への寄与はほとんど無いことが分かった。1000°Cを超える照射温度では、照射欠陥の回復段階で言うところのステージVに相当し、不安定な微細なボイドは消滅し、安定な粗大なボイドのみが生き残ったものと考えられる。

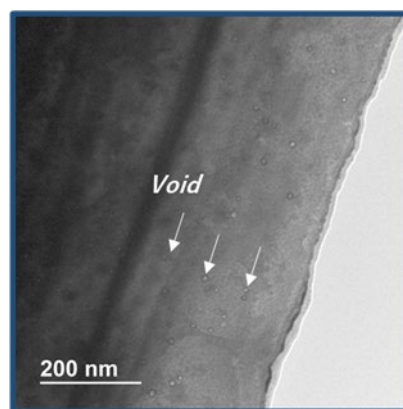


図3. 1200°C/1dpaプロトン照射した純Wの微細組織

(3) 今後の課題

本研究成果にてW合金(K-doped W-3%Re)圧延材では照射硬化に伴い、降伏応力が2倍程度になったにもかかわらず、破断伸びが照射前とほぼ変わらず、照射誘起の高靱性化（タフニング）現象を発見した。しかしながら、照射硬化によって延性脆性遷移温度(DBTT)が上昇して脆化が引き起こされるのが一般的な破壊挙動であり、且つ、材料開発においては強度と延性はトレードオフの関係にある。それらにも関わらず、W合金圧延材においては照射硬化によって高靱性化が現れた。照射硬化による高靱性化メカニズムを解明するために、今後は照射欠陥集合体と核変換元素がどのような形態として存在し、分布しているのかを明らかにする必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miyazawa Takeshi, Garrison Lauren M., Geringer Josina W., Fukuda Makoto, Katoh Yutai, Hinoki Tatsuya, Hasegawa Akira	4. 巻 529
2. 論文標題 Neutron irradiation effects on the mechanical properties of powder metallurgical processed tungsten alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 151910 ~ 151910
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2019.151910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyazawa Takeshi, Garrison Lauren M., Geringer Josina W., Echols John R., Fukuda Makoto, Katoh Yutai, Hinoki Tatsuya, Hasegawa Akira	4. 巻 542
2. 論文標題 Tensile properties of powder-metallurgical-processed tungsten alloys after neutron irradiation near recrystallization temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152505 ~ 152505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Garrison Lauren M., Katoh Yutai, Geringer Josina W., Akiyoshi Masafumi, Chen Xiang, Fukuda Makoto, Hasegawa Akira, Hinoki Tatsuya, Hu Xunxiang, Koyanagi Takaaki, Lang Eric, McAlister Michael, McDuffee Joel, Miyazawa Takeshi, Parish Chad, Proehl Emily, Reid Nathan, Robertson Janet, Wang Hsin	4. 巻 75
2. 論文標題 PHENIX U.S.-Japan Collaboration Investigation of Thermal and Mechanical Properties of Thermal Neutron-Shielded Irradiated Tungsten	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 499 ~ 509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15361055.2019.1602390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyazawa Takeshi, Hishinuma Yoshimitsu, Nagasaka Takuya, Muroga Takeo	4. 巻 165
2. 論文標題 Effect of tantalum addition on the tensile properties of V-Ta-4Cr-4Ti quaternary alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112191 ~ 112191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2020.112191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西村星耶、宮澤健、三輪 美沙子、兪周炫、安堂正己、谷川博康、野上修平、長谷川晃
2. 発表標題 タングステン-レニウム合金の微細組織発達に及ぼすイオン照射による影響
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Miyazawa, L. M. Garrison, J.W. Geringer, J.R. Echols, M. Fukuda, Y. Katoh, T. Hinoki and A. Hasegawa
2. 発表標題 Neutron Irradiation Effects on Mechanical Properties of Tungsten Alloys
3. 学会等名 The Nineteenth International Conference on Fusion Reactor Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮澤健、佐藤祐輔、羅杜、野上修平、長谷川晃
2. 発表標題 タングステン材料の組織安定性と引張特性に及ぼすヘリウム注入濃度の影響
3. 学会等名 日本金属学会第166回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮澤健、L. M. Garrison、J.W. Geringer、福田誠、加藤雄大、檜木達也、長谷川晃
2. 発表標題 タングステン材料の再結晶温度域における中性子照射後機械特性
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮澤健、L. M. Garrison、J.W. Geringer、福田誠、加藤雄大、檜木達也、長谷川晃
2. 発表標題 再結晶温度域にて中性子照射したタングステン材料の機械特性
3. 学会等名 日本金属学会第165回講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Miyazawa, Lauren M. Garrison, Yutai Katoh, Tatsuya Hinoki and Akira Hasegawa
2. 発表標題 Tensile behaviour of tungsten materials irradiated with a thermal neutron shield
3. 学会等名 Fifth International Workshop on Structural Material for Innovative Nuclear Systems
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiya Nishimura, Shuhei Oizumi, Takeshi Miyazawa, Suhei Nogami and Akira Hasegawa
2. 発表標題 Proton irradiation effects on the microstructural development of tungsten
3. 学会等名 Fifth International Workshop on Structural Material for Innovative Nuclear Systems
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮澤健、Lauren M. Garrison、加藤雄大、檜木達也、長谷川晃
2. 発表標題 核融合炉用タングステン材料の照射効果(1)中性子照射したタングステン材料の高温引張特性
3. 学会等名 日本原子力学会2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村 星耶, 大泉 周平, 宮澤 健, 野上 修平, 長谷川 晃
2. 発表標題 核融合炉用タングステン材料の照射効果(2)軽イオン照射したタングステン材料の照射効果
3. 学会等名 日本原子力学会2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤祐輔, 井藤大智, 服部剛弥, 宮澤健, 野上修平, 長谷川晃, 吉田健太
2. 発表標題 核融合炉用タングステン材料の照射効果(3)ヘリウム注入したタングステンの微細組織及び高温引張特性
3. 学会等名 日本原子力学会2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大泉周平、宮澤健、野上修平、長谷川晃、安堂正己、谷川博康
2. 発表標題 ナノインデンテーション法によるタングステン材料の照射硬化評価
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮澤健、Lauren M. Garrison、加藤雄大、檜木達也、長谷川晃
2. 発表標題 熱中性子遮蔽を施して照射したタングステンとタングステン合金の機械特性
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮澤健、松井賢斗、野上修平、長谷川晃
2. 発表標題 タングステン圧延材の引張特性に及ぼす組織異方性と注入ヘリウムの影響
3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	オークリッジ国立研究所		