

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06030

研究課題名（和文）長期信頼性支配因子の解明による革新的タングステン材料の創製

研究課題名（英文）Development of the innovative tungsten material by investigation of the dominant factors of long-term reliability

研究代表者

福田 誠（Fukuda, Makoto）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：70757666

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：核融合炉で想定される熱負荷及び粒子線照射環境を模擬した実験体系において、タングステンの長期的な信頼性支配因子を明らかにするとともに、その知見を活かし、原型炉以降の核融合炉に向けた、短期的のみならず長期的にも高い信頼性を示す新たなタングステン材料を開発することを目的とした。研究の結果、タングステンの組織と特性変化を起こす要因は、短期的には主に熱負荷、中長期的には粒子線照射の影響が大きくなると予想されることを明らかにした。また、長期間の熱負荷及び粒子線照射による組織や強度変化、信頼性低下の抑制に有効であると期待される材料学的手法を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The objective of this work is to understand the dominant factors of long-term reliability of tungsten in fusion reactor operation conditions such as high heat load and particle irradiation and develop the tungsten alloys with higher reliability for future fusion reactor systems such as DEMO. The results of this work showed that the dominant factor of the reliability of W is heat load during short-term operation. With increasing operational time, particle irradiation will become dominant factor of reliability. In addition, it was found that the effective method to suppress grain structure and mechanical property changes and improve reliability of W under heat load and particle irradiation condition.

研究分野：核融合炉材料

キーワード：タングステン タングステン合金 核融合炉 ダイバータ

### 1. 研究開始当初の背景

核融合炉の炉心プラズマを囲うように配置されるプラズマ対向機器において、プラズマと対向する壁面(プラズマ対向壁)は核融合炉の運転中、 $10 \text{ MW/m}^2$ 以上の非常に高い熱負荷を受けると共に、核融合反応により生じた中性子などの粒子線の重照射を受ける。したがって、プラズマ対向壁として使用される材料は、従来の機器では想定されなかったような非常に過酷な環境にさらされる。タングステンは金属材料中で最も融点が高く、熱伝導特性に優れ、かつ核融合炉の燃料となるトリチウムの吸蔵量が少ない等、核融合炉プラズマ対向壁材料として望ましい特性を有している。そのため、核融合炉プラズマ対向壁材料として、タングステンが最も有力な候補となっている。

核融合炉運転中、非常に高い熱負荷と中性子等の粒子線照射を受けることにより、タングステンの組織には種々の変化が起こり、機械特性や熱特性が変化する。また、これらの変化は、タングステンの破壊挙動の変化に直結する。すなわち、熱負荷及び粒子線照射を受ける時間が長くなるほど、材料の脆化が進み、き裂の発生及び進展がより一層起こり易くなると考えられる。タングステン中にき裂が発生し進展した場合、き裂によって熱伝達が阻害され、プラズマ対向機器の除熱性能が低下する。加えて、き裂形成等に伴い炉内に放出されたタングステンの破片や微粒子は、炉心プラズマに混入することで核融合炉の運転に深刻な支障をきたす。したがって、核融合炉、特に発電を目指す原型炉以降の炉に向けて、脆化やき裂の発生・進展への耐性を向上し、信頼性を高めたタングステン材料の開発が必要不可欠である。

これまで、核融合炉運転中の熱負荷環境を模擬した数百～数千サイクルの短期的な熱負荷によるタングステンの破壊挙動、粒子線照射による特性変化等に関する研究が個別に進展している。しかし、原型炉以降の核融合炉では、運転期間は月～年オーダーになると想定されることから、長期的な観点から材料組織及び特性変化を調査することで、タングステンの長期信頼性支配因子を明らかにし、信頼性の高いタングステン材料を開発する必要がある。

### 2. 研究の目的

核融合炉で想定される熱負荷及び粒子線照射環境を模擬した実験体系において、タングステンの長期的な信頼性支配因子を明らかにするとともに、その知見を活かし、原型炉以降の核融合炉に向けた、短期的のみならず長期的にも高い信頼性を示す新たなタングステン材料を開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

タングステン及び複数のタングステン合金を対象に、実機相当の温度環境における材

料組織及び機械特性の変化を調査した。また、イオン加速器による自己イオン照射を実施し、粒子線照射による材料組織と機械特性変化を調査した。装置及び時間的な制約から、後述する有限要素解析に使用できる、粒子線照射後の機械特性は本研究で取得することはできず、熱負荷と粒子線照射の重畳効果については、熱負荷を模擬した熱処理後の試験片に対する粒子線照射実験の結果から検討を行った。これらの実験で得られた知見から、タングステンの長期信頼性を支配する因子を調査した。また、複数のタングステン合金を用いた実験結果から得られた知見を基に、長期間信頼性を維持することのできる材料学的手法を明らかにするとともに、その手法を適用したタングステン合金の実機相当の熱負荷環境での温度及び応力の応答を有限要素解析によって調査し、その合金の実機適用性を検討した。

### 4. 研究成果

熱負荷の影響について、まず純タングステンの組織変化に及ぼす熱処理温度の影響を調査したところ、 $1100^\circ\text{C}$ で結晶粒組織の粗大化が開始し、 $2300^\circ\text{C}$ での熱処理後には、熱処理前に約 $50\mu\text{m}$ 程度であった結晶粒径が約 $1\text{mm}$ 程度まで成長した。タングステン合金の場合、第二相(カリウムバブル)の分散や合金元素(レニウム)の添加を施すことにより結晶粒組織が微細になり、熱処理による明確な結晶粒組織の粗大化が認められたのは $1800\text{--}2000^\circ\text{C}$ 程度と、純タングステンよりも高温での組織安定性に優れることが明らかになった。合金元素の添加量については、 $1\%$ の場合は有意な効果が認められなかったが、 $3\%$ まで添加量を増やすことで、有意な効果が認められた。高温環境での結晶粒組織安定性の観点からは、合金元素添加よりも第二相分散の方がより効果的であった。長期安定性を評価するために、 $1100^\circ\text{C}$ で最長 $100$ 時間の熱処理を行った結果、図1に示すように純タングステンでは、熱処理時間の増加に伴う結晶粒組織の粗大化と硬さの低下が認められた。

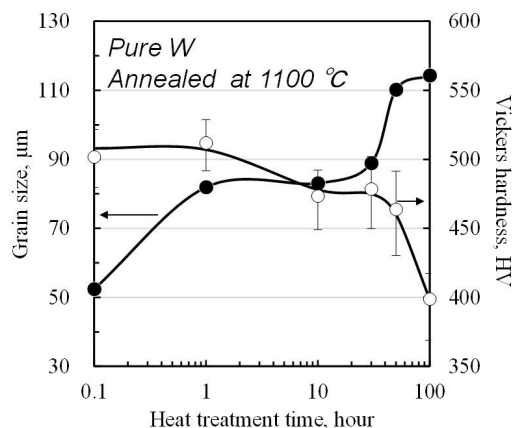


図1 純タングステンの結晶粒径とピッカース硬さの熱処理時間依存性

その一方、タングステン合金では 100 時間後にも結晶粒径の明確な変化は認められず、長期的な材料組織安定性の観点からも、先述の第二相分散や合金化が効果的であることが明らかになった。熱負荷による機械特性を評価するため、所定の温度で熱処理した試験片の引張特性を評価した結果においても、純タングステンでは熱処理による強度の低下や、低温での靱性の低下が起り、顕著な脆化が認められた一方、タングステン合金、特にカリウムバブルを分散し、レニウムを添加した合金では、熱処理による特性変化が抑制された。

粒子線照射の影響については、最大で 8dpa までの照射量領域における、純タングステン及びタングステン合金の自己イオン照射によるナノインデンテーション硬さ変化を調査したところ、カリウムバブル分散による照射硬化量の減少が認められた。その一方で、レニウム添加による照射効果量の顕著な変化は認められなかった。受け入れまま材と熱処理済みの試験片の照射効果量を比較したところ、受け入れまま材の照射硬化量が小さい傾向が認められ、またタングステン合金の照射硬化挙動調査結果から、微細な結晶粒組織や高い転位密度が照射硬化抑制に効果的であることが明らかになった。また、どの材料においても損傷量が 1dpa 程度に達した時点で硬化量が飽和する傾向が認められた。1 dpa に達するまでに要する時間は、本研究で実施した自己イオン照射の場合は、約 4-5 時間程度、核融合炉実機では 3-4 か月程度と想定される。その一方で、熱負荷による材料組織と強度変化は、速い場合は 1 時間でその変化が明確に認められている。したがって、短期的には熱負荷による影響が主であり、中長期的には照射の影響が徐々に大きくなると予想される。したがって、照射硬化抑制に重要な微細な結晶粒組織が、熱負荷環境でも長期間維持されると期待される、カリウムバブルの分散及び、カリウムバブルの分散とレニウム添加がタングステンの長期信頼性向上に有効であると考えられる。

有限要素解析による繰り返し熱負荷環境での純タングステン及びタングステン合金の温度及び応力の応答を調査したところ、純タングステンやカリウムバブルを分散した材料の場合には熱負荷の繰り返し数の増加に伴うひずみの蓄積が認められた一方、カリウムバブルを分散し、かつレニウムを添加した合金ではその蓄積が抑制される傾向が認められ、カリウムバブルを分散したタングステンにレニウムを添加することによる機械特性の向上の効果が表れたものと考えられる。

以上より熱負荷環境及び粒子線照射環境におけるタングステンの特性変化や信頼性の低下を引き起こす原因となるのは、短期的には熱負荷、中長期的には粒子線照射であることが示唆された。また、タングステンの結

晶粒組織の微細化及び高温環境での安定性向上と、粒子線照射による照射硬化抑制には、カリウムバブルの分散とレニウム添加が有効であり、これらの手法を適用することによって、中長期的な観点からもタングステンの信頼性を向上できる可能性を示唆する成果が得られた。熱負荷の影響については、核融合炉の運転計画や、炉心プラズマの安定性に起因する熱流束の変化等に強く左右されると考えられる。核融合炉運転中の熱流束が低く抑えられる場合は、熱負荷による特性変化が現れるのがより遅くなることも考えられ、実機環境で想定されるタングステンの熱履歴をより詳細に予測することができれば、本研究で得られた知見を基にさらに詳細な特性や信頼性変化の予測が可能になると期待される。また、粒子線照射による特性変化については、有限要素解析に適用可能な機械特性データを、超微小試験技術の開発等によって取得することが可能になれば、より精度の高いタングステン合金の有効性評価ができると期待される。

#### 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 2 件)

M. Fukuda, S. Nogami, W. Guan, A. Hasegawa, T. Muroga, Analysis of the temperature and thermal stress in pure tungsten monoblock during heat loading and the influences of alloying and dispersion strengthening on these responses, Fusion Engineering and Design, 査読有, 479, 2016, 249 - 254  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.04.013

T. Hwang, M. Fukuda, S. Nogami, A. Hasegawa, H. Usami, K. Yabuuchi, K. Ozawa, H. Tanigawa, Effect of self-ion irradiation on hardening and microstructure of tungsten, Nuclear Materials and Energy, 査読有, 9, 2016, 430 - 435  
DOI: 10.1016/j.jme.2016.06.005

[学会発表](計 7 件)

長谷川晃、福田誠、黄泰現、野上修平、タングステン及びタングステン合金における損傷の発達における中性子・イオン照射創刊に関する研究、日本原子力学会 2017 年春の年会、2017 年 3 月 27 日 ~ 2017 年 3 月 29 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県)

長谷川晃、梶島侑馬、福田誠、土田航平、野上修平、純タングステン及びタングステン合金の熱履歴による引張特性変化、日本原子力学会 2017 年春の年会、2017

年3月27日～2017年3月29日、東海大学湘南キャンパス（神奈川県）

黄泰現、福田誠、大野悟史、田嶋恒紀、長谷川晃、野上修平、小沢和巳、谷川博康、重イオン照射による純タングステン及びタングステン合金の照射影響評価、日本原子力学会 2017 年春の年会、2017年3月27日～2017年3月29日、東海大学湘南キャンパス（神奈川県）

M. Fukuda, A. Hasegawa, S. Nogami, Development of Tungsten Alloys with Improved Resistance against Irradiation and Recrystallization Embrittlement for Fusion Application, 2016 MRS Fall meeting and exhibit, 招待講演, 国際学会, 2016年11月27日～2016年12月2日, Boston, MA, USA

福田誠、土田航平、梶島侑馬、長谷川晃、野上修平、レニウム及びカリウムドーブしたタングステン材料の再結晶による結晶粒組織及び引張特性変化、日本原子力学会 2016 年春の年会、2016年3月26日～2016年3月28日、東北大学川内キャンパス（宮城県）

田嶋恒紀、黄泰現、福田誠、長谷川晃、野上修平、谷川博康、小沢和巳、重イオン照射したタングステンの挙動(1)レニウム添加したタングステンの重イオン照射による硬化挙動、日本原子力学会 2016 年春の年会、2016年3月26日～2016年3月28日、東北大学川内キャンパス（宮城県）

黄泰現、大野悟史、田嶋恒紀、福田誠、長谷川晃、野上修平、谷川博康、小沢和巳、重イオン照射したタングステンの挙動(2)タングステンの照射効果に及ぼすレニウム及びカリウムドーブの複合影響、日本原子力学会 2016 年春の年会、2016年3月26日～2016年3月28日、東北大学川内キャンパス（宮城県）

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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