

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01196

研究課題名（和文）プラント事故耐性を有する高靱性タングステン積層複合材料の創生と室温延性への挑戦

研究課題名（英文）Development of Highly Toughened Tungsten Laminated Composites with Plant Accident Tolerance and Challenge to Room Temperature Ductility

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） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：結晶粒微細化W合金とWフォイルラミネートの利点を融合し、さらにCr添加により耐酸化性を付与した耐酸化性結晶粒微細化W合金ラミネートの開発を実施した。開発した結晶粒微細化W合金は耐酸化性を示したものの、Cr添加により硬さが高くなっていることから、延性を調整することができないことが明らかとなった。よって、Cr添加した場合に目標達成は困難であると判断した。一方、Crの低減や製造条件の調整により特性改善の見通しが得られたとともに、高硬度かつ低延性の材料を基材として延性を有するWラミネートが実現可能であることも明らかになったため、さらなる研究を実施することで、当初目的が達成可能性あるとの見通しを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のW系材料の開発では、機械特性や耐酸化性など個別の課題を解決した材料は開発されていたものの、実機適用まで見据えた全ての課題を同時に解決しうる材料は少なかった。本研究は、W系材料の課題である室温以上における脆性と、再結晶による機械特性劣化を同時に克服し、さらに高温機器の事故時において不可欠な耐酸化性を備えた材料を開発する点が特徴であり、W系材料を適用した高温機器の構造健全性の改善が期待される。この開発知見は、W系材料のみならず、多くの高融点脆性金属材料に水平展開可能となり得る点も指摘するべきであり、核融合炉のみならず様々な機器の構造健全性の改善に資することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Oxidation-resistant grain refined W-alloy laminates, that combines the advantages of grain refined W-alloy and W-foil laminate, and furthermore, adds oxidation resistance through the addition of Cr, were developed. Although the developed grain refined W alloy showed oxidation resistance, it was found that the ductility could not be adjusted due to the high hardness caused by the addition of Cr. Therefore, it was determined that it would be difficult to achieve the research initial goal with the addition of Cr. On the other hand, the prospect of property improvement was obtained by reducing Cr and adjusting manufacturing conditions, and it also became clear that ductile W laminate could be realized using a material with high hardness and low ductility as a base material, so further research was conducted to determine the possibility of achieving the initial goal.

研究分野：核融合炉材料

キーワード：タングステン 複合材料 延性 耐酸化性 再結晶

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

発電プラントなどの高温機器は、システム全体の熱効率向上のため高温化されることに伴い、耐熱性のある高融点金属材料やセラミックス材料などを多用する傾向にある。代表的な高融点金属材料であるモリブデンやタングステン、また、セラミックス材料は、室温以上のある一定の温度域で「脆性」を示すため、機器の構造健全性を担保するためには、運転条件の制限や、材料の複合材料化などにより、脆性の発現を回避することが必要とされる。本研究で対象とする核融合炉ダイバータには、タングステン(W)系材料の使用が有力であるが、W系材料は延性脆性遷移温度(延性から脆性に変化する温度、DBTTと呼ぶ)が500以上になることもあり、室温からDBTTまでの低温脆性が課題の一つになっている。

研究代表者は、W系材料の「脆性」の改善のための研究開発をこれまで実施し、カリウム(K)ドープによりバブルを分散させることで結晶粒界を強化し、DBTTを低減した「結晶粒微細化W合金」を開発した。本材料では、機械特性劣化の原因となる再結晶化の開始温度を1600まで高めるとことに成功した。さらに、冷間加工により加工度を高めたKドープWフォイルを積層してラミネート構造とすることにより、室温でも延性を発現する「Wフォイルラミネート」を開発することに成功した。

しかし、W系材料の脆性の改善に成功した両材料ではあるが、それぞれ課題が残されている。結晶粒微細化KドープW合金は、200以下では脆性を示すため、機器の最低使用温度に制限が生ずる。KドープWフォイルラミネートは、Wフォイルの再結晶開始温度が強加工により本質的に低く、再結晶後は延性が消失するため、機器の最高使用温度に制限が生ずる。

また、近年の核融合炉開発では、炉内冷却水漏洩時において、高温に加熱されたWと冷却水の反応により放射化W酸化物ダストが炉内に飛散し、甚大な炉内汚染が起こりうることで課題として指摘されている。よって、ダイバータ等で使用されるW系材料についても、このようなプラント事故時の耐性、特に耐酸化性を向上させることにより、通常運転時だけでなく事故時も含めた構造健全性を視野に入れた材料を適用することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、核融合炉の構造健全性の向上と設計・運転条件の尤度の拡大を目的とし、「室温からの延性と耐酸化性を有し、再結晶開始温度が高く、再結晶後の機械特性劣化を抑制したW系材料は実現可能か?」という「問い」に挑戦することとした。そこで、前述の「結晶粒微細化W合金」と「Wフォイルラミネート」の利点を融合し、さらにクロム(Cr)添加により耐酸化性を付与することで、前述の「問い」に応える性能を発揮する「耐酸化性結晶粒微細化W合金ラミネート」の開発を本研究の目的とした。

3. 研究の方法

まず、結晶粒微細化W合金に、耐酸化性を向上させることが原理的に期待されるCrを添加し、ラミネートの基素材となり得る耐酸化性結晶粒微細化W合金と、比較のための材料を、合計4種類製作した。具体的には、結晶粒微細化W合金であるKドープW(KW)、KWにCrを5%ないし10%添加したKW-5%CrおよびKW-10%Cr、KW-10%Crにイットリウム酸化物(Y_2O_3)を分散させたKW-10%Cr- Y_2O_3 である。

次に、これらの材料の特性と、その発現メカニズムを明らかにするため、密度測定による緻密性の評価、金相観察等による組織の評価、曲げ試験や硬さ測定による機械特性の評価、熱重量測定装置を用いた耐酸化特性の評価を実施した。

なお、2019年度の研究により、DBTTが従来材に比べ低く再結晶温度が高い結晶粒微細化W合金と、室温延性は有するものの再結晶温度が従来材に比べ低いWフォイルラミネートの利点を融合することは、Cr添加した場合には困難であることが示された。この原因としては、Cr添加により大幅に硬さが高くなっている点と、圧延などの加工処理が高い硬さにより実現できていない点が考えられ、本研究の計画修正の必要性が示された。2020年度以降は、高硬度かつ低延性の材料を基材とした延性を発現するWラミネートの実現可能性についての検討を進めた。これは、冶金学的なアプローチから複合材料学的なアプローチに展開し、高硬度かつ低延性の開発材料を基材として用いて、延性または擬延性を発現するWラミネートの実現可能性を実験的に検討するものである。

4. 研究成果

(1) 耐酸化性結晶粒微細化W合金の基本特性

開発した耐酸化性結晶粒微細化W合金の密度は、理論密度の85%~95%であった。この理由の一つとして、焼結体外周部に見られたCrの揮発による低密度領域の影響が考えられた。この低密度領域については、部材製作などの際に切除することが可能であるため、実用上は大きな問題にはならないと考えられた。この低密度領域を除くと、開発材の組織や硬さは、Crを10%添加し

た2材料以外は概ね均一であった。ただし、Cr 添加による固溶強化により、Cr 添加材は未添加材より硬さが 400 程度高く、これが前述した本研究の計画修正の原因の一つとなった。Cr を 10%添加した2材料については、素材内の硬さのばらつきが大きかった。これは、これらの材料の密度が他より低い原因である、微細な空隙の存在が影響していると考えられた。室温において、開発材の曲げ試験を実施したところ、全ての材料において延性は見られず、脆性破壊した。これは、前述の高い硬度や空隙の影響が考えられた。

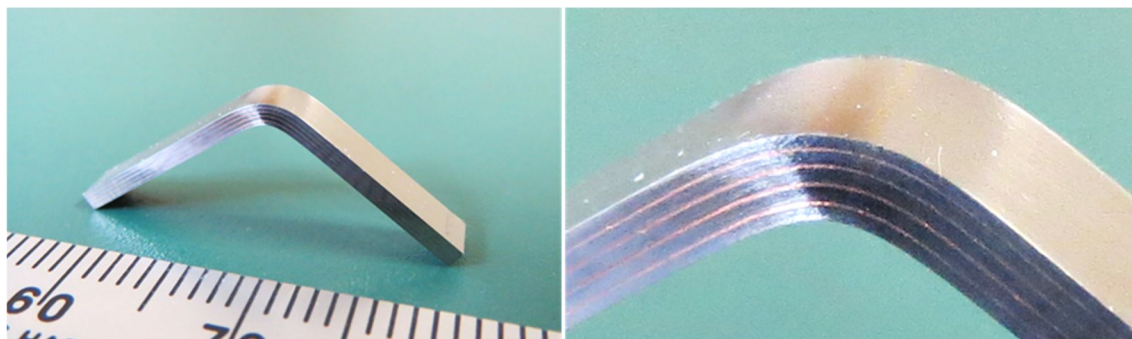
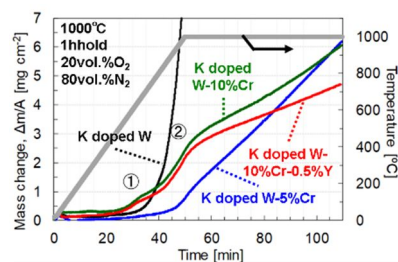
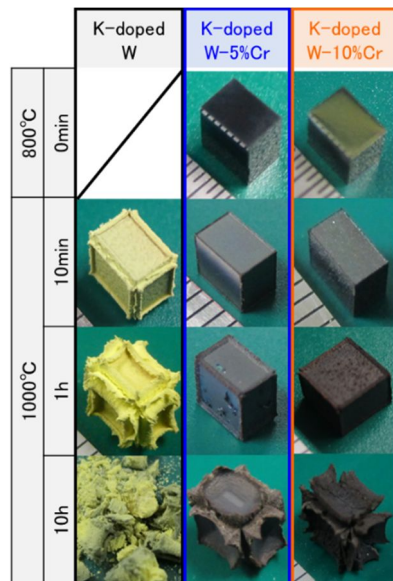
(2) 耐酸化性結晶粒微細化 W 合金の耐酸化性

右図に示すとおり、Cr 添加材は未添加材と比較して、酸化の進行とそれによる酸化による重量増加が大幅に抑制された。しかし、10 時間以上の保持時間では 10%添加した材料の方が耐酸化性はわずかに劣り、より長時間の酸化ではさらに酸化が進行することが示唆された。Cr 未添加材は、酸化によって試料表面に黄色い多孔質の WO_3 が形成された。試料寸法と酸化物の粒界における新たな酸化物の形成によって酸化皮膜内に応力が発生し、き裂が発生・進展したと考えられた。また、本研究で用いた試料寸法では 8 時間程で酸化反応が飽和した。一方、Cr 添加材では、800 /保持無しでの酸化によって最表面に $CrWO_4$ が形成し、1000、1 分保持以降は最表面に Cr_2WO_6 、内部に WO_3 が形成したと考えられた。Cr を 5%添加した材料では、 Cr_2O_3 および $CrWO_4$ 、 Cr_2WO_6 の形成により試料表面近傍における Cr が枯渇したが、材料が高い密度であることから 10 時間保持後も試料中央部では平滑な酸化皮膜が形成された。一方、Cr を 10%添加した材料では 5%添加した材料と比較して Cr 量が豊富であり、より保護性の高い酸化皮膜が形成されたが、1~10 時間保持の酸化試験では、材料内に存在する空隙の影響で酸化皮膜の急速な成長やき裂の発生が起こったと考えられた。

本研究で用いた Cr 添加材は、既往研究の W-Cr 合金においてスピノーダル分解に起因した微細組織の不均一性により、酸化皮膜の構造や耐酸化性が良好でない可能性が考えられたが、スピノーダル分解は見られなかった。また、Cr を 5%添加した材料のように密度の高い材料では、10 時間以上の酸化試験においても酸化皮膜は平滑であり、Cr 添加量の調整や活性元素の添加によって耐酸化性を向上させる可能性があると考えられた。さらに、本研究で開発した Cr 添加材は、メカニカルアロイング (MA) を行わず、熱間等方圧加工法 (HIP) で製作しているが、MA を適用し他の方法で製作された既往研究の W-Cr 合金の一部では Cr 添加によっても高い密度を示していることから、製造方法を最適化することで耐酸化性をさらに向上させることが可能であると考えられた。

(3) 高硬度・低延性材料を基材としたラミネートの開発

(1)で述べたとおり、開発した耐酸化性結晶粒微細化 W 合金は、Cr 添加により大幅に硬さが高くなっていることから、圧延などの加工により延性を調整することができないため、DBTT が従来材に比べ低く再結晶温度が高いことが期待される結晶粒微細化 W 合金と、室温延性は有するものの再結晶温度が従来材に比べ低い W フォイルラミネートの利点を融合することは、Cr 添加した場合には困難であると判断した。よって、開発した耐酸化性結晶粒微細化 W 合金のように、高硬度かつ低延性の材料を基材として、延性を発現する W ラミネートが実現できないか検討することとした。本研究では、単体では室温で延性を有さない KW を用いてラミネートを製作し、シャルピー衝撃試験と曲げ試験を実施した。その結果、接合温度と中間材の材料種や厚さを調整することにより、延性発現温度を 100 程度まで低減できることが明らかになるとともに (本ページ写真参照) 室温においても複合材料特有の擬延性が発現し (次ページ写真参照) DBTT を大幅に低減できることが明らかになった。



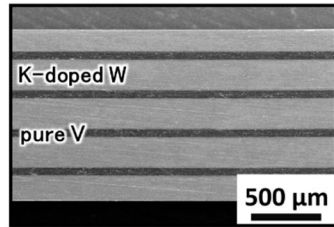


図 曲げ試験片の断面写真

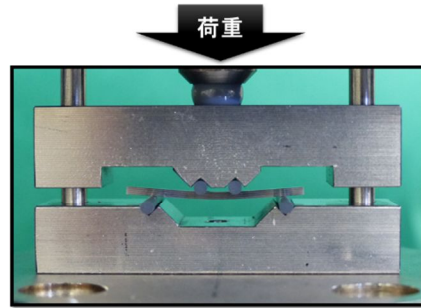


図 4点曲げ試験

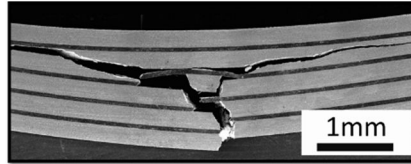


図 曲げ試験後の試験片の断面写真

(4) 成果のまとめ、今後の展望

本研究では、結晶粒微細化 W 合金と W フォイルラミネートの利点を融合し、さらに Cr 添加により耐酸化性を付与した耐酸化性結晶粒微細化 W 合金ラミネートの開発を志向し、開発を実施した。開発した結晶粒微細化 W 合金は優れた耐酸化性を示したものの、Cr 添加により大幅に硬さが高くなっていることから、圧延などの加工により延性を調整することができないことが明らかとなった。その結果、DBTT が従来材に比べ低く再結晶温度が高いことが期待される結晶粒微細化 W 合金と、室温延性は有するものの再結晶温度が従来材に比べ低い W フォイルラミネートの利点を融合することは、Cr 添加した場合には困難であると判断した。一方、Cr を 1%程度まで低減することや、MA の適用、製造条件の調整により、結晶粒微細化 W 合金の特性を改善できる見通しが得られたとともに、高硬度かつ低延性の材料を基材として延性を有する W ラミネートが実現可能性あることも明らかになったため、さらなる研究を実施することで、当初目的が達成可能性あるとの見通しを得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Shuhei Nogami, Dmitry Terentyev, Aleksandr Zinovev, Chao Yin, Michael Rieth, Gerald Pintsuk, Akira Hasegawa | 4. 巻 553 |
| 2. 論文標題 Neutron irradiation tolerance of potassium-doped and rhenium-alloyed tungsten | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 153009 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jnucmat.2021.153009 | 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 D. Terentyev, M. Rieth, G. Pintsuk, J. Riesch, A. von Muller, S. Antusch, K. Mergia, E. Gaganidze, H.-C. Schneider, M. Wirtz, S. Nogami, J. Coenen, J.H. You, A. Zinovev, W. Van Renterghem | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Recent progress in the assessment of irradiation effects for in-vessel fusion materials: tungsten and copper alloys | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Fusion | 6. 最初と最後の頁 26045 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac4062 | 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 Shuhei Nogami, Takefumi Hazama, Hiroyuki Noto, Takuya Nagasaka, Akira Hasegawa | 4. 巻 161 |
| 2. 論文標題 Laminated composites using potassium doped tungsten | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 111894 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2020.111894 | 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 - |
| 1. 著者名 Shuhei Nogami, Akira Hasegawa, Makoto Fukuda, Michael Rieth, Jens Reiser, Gerald Pintsuk | 4. 巻 543 |
| 2. 論文標題 Mechanical properties of tungsten: Recent research on modified tungsten materials in Japan | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 152506 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jnucmat.2020.152506 | 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 Masafumi Akiyoshi, Lauren M. Garrison, Josina W. Geringer, Hsin Wang, Akira Hasegawa, Shuhei Nogami, Yutai Katoh | 4. 巻 543 |
| 2. 論文標題 Thermal diffusivity of irradiated tungsten and tungsten-rhenium alloys | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 152594 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152594 | 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 Chao Yin, Dmitry Terentyev, Tao Zhang, Shuhei Nogami, Steffen Antusch, Chih-Cheng Chang, Roumen H. Petrov, Thomas Pardoen | 4. 巻 95 |
| 2. 論文標題 Ductile to brittle transition temperature of advanced tungsten alloys for nuclear fusion applications deduced by miniaturized three-point bending tests | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Refractory Metals and Hard Materials | 6. 最初と最後の頁 105464 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrmhm.2020.105464 | 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 Shuhei Nogami, Akira Hasegawa, Makoto Fukuda, Shotaro Watanabe, Jens Reiser, Michael Rieth | 4. 巻 152 |
| 2. 論文標題 Tungsten modified by potassium doping and rhenium addition for fusion reactor applications | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 111445 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.111445 | 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 Shotaro Watanabe, Shuhei Nogami, Jens Reiser, Michael Rieth, Sven Sickinger, Siegfried Baumgartner, Takeshi Miyazawa, Akira Hasegawa | 4. 巻 148 |
| 2. 論文標題 Tensile and impact properties of tungsten-rhenium alloy for plasma-facing components in fusion reactor | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 111323 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.111323 | 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 Shuhei Nogami, Shotaro Watanabe, Jens Reiser, Michael Rieth, Sven Sickinger, Akira Hasegawa | 4. 巻 140 |
| 2. 論文標題 Improvement of Impact Properties of Tungsten by Potassium Doping | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 48-61 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.01.130 | 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 |

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shuhei Nogami, Dmitry Terentyev, Michael Rieth, Marius Wirtz, Philipp Lied, Takumi Chikada, Kiyohiro Yabuuchi, Akira Hasegawa |
| 2. 発表標題 Development of Dispersion-Strengthened and Alloyed Tungsten for Neutron Irradiation Environment |
| 3. 学会等名 20th International Conference ofn Fusion Reactor Materials (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shuhei Nogami |
| 2. 発表標題 Neutron Irradiation Tolerance of Potassium-Doped Tungsten-Rhenium Alloys |
| 3. 学会等名 GIMRT Joint International Symposium on Radiation Effects in Materials and Actinide Science (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野上修平, Dmitry Terentyev, Aleksandr Zinovev, 長谷川晃, Michael Rieth |
| 2. 発表標題 分散強化および合金化によるタングステンの耐中性子照射特性の向上 |
| 3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 菊池裕太, 大塚宏紀, 野上修平, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 タングステンの酸化挙動に及ぼすクロム添加の影響 |
| 3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高橋遼平、野上修平、能登裕之、近田拓未、時谷政行、浜地志憲、小林真、長坂琢也、長谷川晃 |
| 2. 発表標題 タングステンフォイル積層複合材料の開発 |
| 3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 浅見大輔, 奥谷健太, 大澤一輝, 野上修平, 笠田竜太, 宮澤健, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 タングステンの基本特性に及ぼす合金元素の影響 |
| 3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 奥谷健汰, 野上修平, Hao Yu, 笠田竜太, 宮澤健, Philipp Lied, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 分散強化タングステン材料の機械特性と熱特性 |
| 3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shuheï Nogami, Akira Hasegawa, Makoto Fukuda, Michael Rieth, Jens Reiser, Gerald Pintsuk |
| 2. 発表標題 Mechanical Properties of Tungsten |
| 3. 学会等名 The 19th 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 Shuheï Nogami, Akira Hasegawa, Jens Reiser, Michael Rieth, Shotaro Watanabe, Hiroyuki Noto, Takuya Nagasaka, Takeshi Miyazawa |
| 2. 発表標題 Development of Dispersion Strengthened Tungsten Alloys and Their Laminated Composites |
| 3. 学会等名 The 19th International Conference on Fusion Reactor Materials (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shuheï Nogami |
| 2. 発表標題 Irradiation Lifetime of Divertors |
| 3. 学会等名 6th IAEA DEMO Programme Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shuheï Nogami, Takefumi Hazama, Amon Takahashi, Ryota Kanamaru, Hiroyuki Noto, Takuya Nagasaka, Akira Hasegawa |
| 2. 発表標題 Laminated Composites using Potassium Doped Tungsten |
| 3. 学会等名 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野上修平, 高橋壘門, 能登裕之, 長坂琢也, 檜木達也, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 高延性タングステン積層複合材料の開発 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大塚宏紀, 野上修平, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 熱機械特性と耐酸化性の向上を目指したカリウムドーパングステン - クロム合金の開発 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高橋壘門, 金丸凌大, 野上修平, 能登裕之, 長坂琢也, 檜木達也, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 タングステン積層複合材料の室温における強度と延性 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 大塚宏紀, 野上修平, 菊池裕太, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 核融合炉用タングステン - クロム合金の酸化挙動 |
| 3. 学会等名 日本原子力学会2020年春の年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 間偉文, 野上修平, 能登裕之, 長坂琢也, 宮澤健, 長谷川 晃 |
| 2. 発表標題 低温脆性の改善に向けたタングステン積層複合材料の開発 |
| 3. 学会等名 日本原子力学会2018年秋の大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野上修平, 間偉文, 能登裕之, 長坂琢也, Jens Reiser, 長谷川晃 |
| 2. 発表標題 核融合炉用タングステン合金及び複合材料の開発 (5) タングステン積層複合材料の開発 |
| 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 野上修平, 間偉文, 渡邊捷太郎, 能登裕之, Jens Reiser, Michael Rieth, 長谷川晃, 宮澤健, 長坂琢也 |
| 2. 発表標題 低温脆性と再結晶脆化の抑制を目指したタングステン合金およびその複合材料の開発 |
| 3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 S. Nogami, S. Watanabe, T. Hazama, J. Reiser, M. Rieth, S. Sickinger, G. Pintsuk, A. Hasegawa |
| 2. 発表標題 A Challenge to Improve Low Temperature Ductility of Tungsten |
| 3. 学会等名 14th Japan-China Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2018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 |
|-----------|--|--|----|
| 研究 分担者 | 能登 裕之 (Hiroyuki Noto) (50733739) | 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902) | |

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 | | | |
|---------|---------------|-------------|--|--|
| ドイツ | カールスルーエ工科大学 | ユーリッヒ研究センター | | |
| ベルギー | ベルギー原子力研究センター | | | |