

一般セッション | VI. 核融合工学：601-2 核融合炉材料工学（炉材料，ブランケット，照射挙動）

2024年9月12日(木) 10:35 ~ 11:55 B会場(講義棟A棟1F A102)

[2B05-09] 先進核融合炉材料工学

座長:片山 一成(九大)

10:35 ~ 10:50

[2B05]

中性子照射タングステン材料の高温酸化挙動および放射化酸化物放出挙動

*松本 あずさ¹、波多野 雄治^{1,2}、大塚 哲平³、小林 真⁴、大矢 恭久⁵、島田 雅⁶ (1. 富山大、2. 東北大、3. 近大、4. 核融合研、5. 静岡大、6. INL)

10:50 ~ 11:05

[2B06]

核融合炉用放射線遮蔽材適用に向けたホウ化タングステンサーメットの開発

*山村 海爾¹、荻野 靖之¹、陣場 優貴¹、余 浩¹、近藤 創介¹、笠田 竜太¹ (1. 東北大)

11:05 ~ 11:20

[2B07]

強度特性と熱伝導特性のトレードオフ克服を目指したCuYZr-WO₃酸化物分散強化銅合金の機械特性および微細組織

*高 子墨¹、余 浩¹、笠田 竜太¹ (1. 東北大学)

11:20 ~ 11:35

[2B08]

ODS-Cuの材料特性に対するYSZ添加の影響

*齋藤 隼輝¹、余 浩¹、高 子墨¹、Kim Gibum²、Park JongHyeon²、Lee Seongbeen²、Oda Takuji²、笠田 竜太¹ (1. 東北大、2. ソウル国立大)

11:35 ~ 11:50

[2B09]

超微小引張試験によるF82H鋼の強度特性評価

*安堂 正己¹、野澤 貴史¹ (1. QST)

11:50 ~ 11:55

座長持ち時間

中性子照射タングステン材料の高温酸化挙動および放射化酸化物放出挙動

High temperature oxidation of neutron-irradiated tungsten materials and radioisotope release by oxide sublimation

*松本 あずさ¹, 波多野 雄治^{1,2}, 大塚 哲平³, 小林 真⁴, 大矢 恭久⁵, 島田 雅⁶

¹富山大学, ²東北大学, ³近畿大学, ⁴核融合科学研究所, ⁵静岡大学, ⁶アイダホ国立研究所

熱重量測定装置および質量移行実験装置を用いて、中性子照射されたタングステン(W)の酸化速度および昇華性酸化物の飛散昇華速度、ならびにそれに伴うトリチウムと放射化物の放出速度を調べる。核変換で形成されるレニウム(Re)の影響に着目する。これらにより、核融合炉の真空喪失事故時における安全性評価に不可欠なデータベースの構築に寄与する。

キーワード：タングステン、酸化、熱重量分析

1. 緒言

核融合炉のプラズマ対向材料である W は燃料プラズマおよび高エネルギー中性子の照射を受け、トリチウムを取り込むと共に放射化する。真空喪失事故が起こると高温の W と酸素あるいは水蒸気の反応が生じるが、W や核変換生成物である Re の酸化物は高い蒸気圧を持つため、酸化に伴い放射化物およびトリチウムが飛散する懸念がある[1,2]。そこで日米協力 FRONTIER 計画では、アイダホ国立研究所に熱重量測定装置および質量移行実験装置を設置し、中性子照射 W の酸化速度および昇華性酸化物の放出速度を調べている。本発表では、設置した実験装置の概要と初期の成果を報告する。

2. 実験

熱重量測定(Thermogravimetric analysis TGA)には島津製作所製 TGA-50 を使用する。雰囲気ガスは Ar-20 %O₂ とし、一部の実験では室温程度の蒸気圧(約 3 kPa)の水蒸気を添加する。流量は 70 mL/min 程度を想定しているが、酸化が酸素および水蒸気の供給によって律速されることがないように適宜調整する。試料には純 W および W-10 %Re 合金のディスク(φ6 mm×t0.5 mm)を使用する。純 W 試料の一部には米国オークリッジ国立研究所の研究炉 HFIR で RB-19J キャプセルを用いて中性子照射を実施している[3]。酸化温度は 873 K～1173 K とする。

質量移行実験では図 1 の装置を用い、上記と同様の純 W および W-10 %Re 合金ディスク試料を使用する。酸化温度は 873 K, 1073 K とし、ガス流量は TGA 実験の結果に基づき決定する。

実験結果については発表当日報告する。

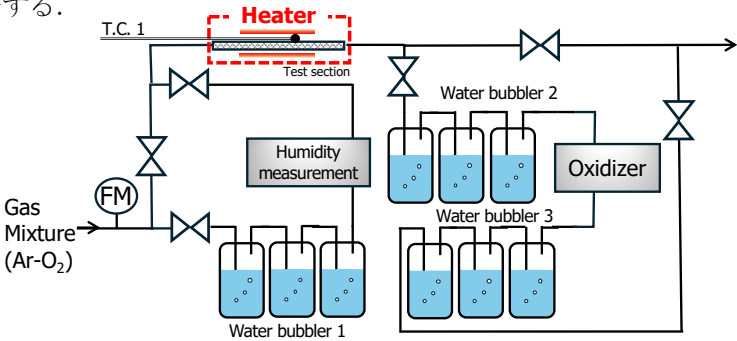


図 1 質量移行実験装置

参考文献

[1] S.C. Cifuentes et al., Corrosion Science 57 (2012) 114-121.
[2] T. Otsuka et al., Nuclear Materials and Energy 25 (2020) 100791.
[3] 上田良夫ら, プラズマ・核融合学会誌 96(2020) 129.

*Azusa Matsumoto¹, Yuji Hatano^{1,2}, Teppei Otsuka³, Makoto Kobayashi⁴, Yasuhisa Oya⁵ and Masashi Shimada⁶

¹Univ. of Toyama, ²Tohoku Univ., ³Kindai Univ., ⁴NIFS, ⁵Shizuoka Univ., ⁶INL.

核融合炉遮蔽材適用に向けたホウ化タングステンサーメットの開発

Development of Tungsten Boride Cermet for Radiation Shielding Material in Fusion Reactor

*山村 海爾¹、荻野 靖之¹、陣場 優貴¹、余 浩¹、近藤 創介¹、笠田 竜太¹

¹東北大学

抄録

核融合炉の放射線遮蔽材として期待されているホウ化タングステン（WB）は、難焼結性・低熱伝導性・低破壊靱性のため、構造材として使用しにくい問題がある。Cu を添加した WB-Cu サーメットは、遮蔽性能は低下するが、焼結性・熱伝導性・破壊靱性の改善が確認された。

キーワード：放射線遮蔽，ホウ化タングステン，炉材料

本文

球状トカマクは、中心にある超伝導コイルを放射線から防護するための遮蔽材を設置する領域が限られる問題がある[1]。ホウ化タングステン（WB）、特に W_2B_5 は既存の遮蔽材に比べ、中性子・ γ 線遮蔽性能が高い[2]ことから、球状トカマクの遮蔽材として期待されている。しかし、WB は高い融点と共有結合性により焼結性が悪く、緻密な焼結体を得るためには、2000 °C以上でのホットプレスが必要になる[3]。また、WB の伝熱性・破壊靱性は低いため、構造材として使用するためには、これらの改善が必要である。本研究では、低融点、高熱伝導、延性材料である Cu を焼結助剤として添加した WB-Cu サーメットを作製し、WB の遮蔽性能、焼結性、伝熱性、破壊靱性への影響を明らかにする。

サーメットは、 W_2B_5 の組成で作製した WB 粉末に Cu 粉末を添加し、パルス通電焼結（PECS）、1300 ~ 1500 °C、15 min の焼結条件で、WB-10wt.%Cu サーメットを作製した。参照試料として Cu 助剤添加なしの WB 単相試料は、ホットプレス（HP）、1900 °C、50 MPa、3 h の焼結条件で作製した。得られた各焼結体の試料（ ϕ 10 mm、厚さ 2 mm）について、密度をアルキメデス法、熱拡散率を Xe フラッシュ法にて測定した。ビッカース硬さ試験で発生した試料表面の亀裂長さとナノインデンテーションによる押し込み弾性率から破壊靱性値の算出をした。放射線遮蔽性能は、粒子輸送計算コード PHITS を用いて解析した。

X 線回折（XRD）と電子プローブマイクロアナライザ（EPMA）によりサーメットには WB_2 相、Cu 相および未反応の B 相が存在することが分かった。相対密度は 92.4%、熱拡散率は 16.2 W・k/m、破壊靱性は 10.5 MPa・m^{1/2} であり、Cu 助剤添加なしの試料に比べ相対密度、熱拡散率、破壊靱性はそれぞれ 1.03 倍、1.17 倍、1.46 倍に向上していた。サーメット化による特性向上は、WB 粒界に Cu 相が連続的に形成したため[5][6]であると考えられる。一方、PHITS による計算結果から、厚さを 50 cm としたとき WB-10wt.%Cu サーメットの遮蔽性能は Cu 助剤添加なしの試料に比べ、0.84 倍に低下することが分かった。Cu 添加による遮蔽性能の低下と材料特性の向上はトレードオフの関係にあるため、遮蔽性能要求を考慮した材料設計が可能となるように、Cu 添加量依存性についても今後明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] Y. Ono, et al., J. Plasma Fusion Res. 80 (11) (2004) 919-920.
- [2] Y. Ogino, et al. 21th. ICFRM. (2023).
- [3] M. S. Koval'chenko, et al., Poder Metall Met Ceram. 14(6)(1975) 469-473.
- [4] A. Yang et al., App, Phys A. (2022).
- [5] T. Maruyama, et al., Jour Nucl Sci Tech. 36(4)(1999) 380-385.
- [6] H. Kitahara, et al., J. Japan Inst. Metals. 66(11)(2002) 1116-1121.

*Kaiji Yamamura¹, Yasuyuki Ogino¹, Yuki Jimba¹, Hao Yu¹, Sosuke Kondo¹ and Ryuta Kasada¹

¹Tohoku Univ.

Mechanical properties and Microstructure of Gas-atomized CuYZr-WO₃ towards the Overcoming of Trade-off between Strength and Conductivity

*Zimo Gao^{1,2}, Diancheng Geng^{1,2}, Hao Yu¹, Yasuyuki Ogino¹, Sosuke Kondo¹, Ryuta Kasada¹

¹Institute of Material Research, Tohoku University

²Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

Abstract :

ODS-Cu was recognized as candidate of heat sink materials for divertor in fusion reactor. This research fabricated the CuYZr-WO₃ ODS-Cu alloy by mechanical alloying, showed great mechanical properties and thermal diffusivity simultaneously. The WO₃ addition for ODS-Cu dramatically enhance the production rate as a process control agent (PCA) and decomposed in MA process led to the formation of Y-Zr-O complex oxide and tungsten particles in ODS-Cu.

Keywords: Heat sink material, ODS-Cu, thermal diffusivity, oxide particles

1. Introduction

Copper alloys are good candidate for heat sink materials in fusion reactors due to their excellent thermal conductivity. Nonetheless, further improvements on mechanical properties and irradiation resistance were expected. Cu-Y₂O₃ type ODS-Cu made by mechanical alloying showed excellent mechanical properties and irradiation resistance[1]. Furthermore, Zr addition into the ODS-Cu can improved the mechanical properties by the formation of complex oxide such as Y₂Zr₂O₇[2] and YSZ[3]. However, the coarsening of powders in MA process due to the high ductility of Cu is a critical issue towards their mass-production. In this research, WO₃ was chosen as a PCA in the MA process of ODS-Cu powder as well as an excess oxygen supplement in order to improve the coarsening of powder and overcome the trade-off between mechanical properties and thermal conductivity in Cu alloys.

2. Experimental

In this research, gas atomized Cu-Y-Zr powder and WO₃ powder were mechanically alloyed by water-cooling ball milling machine at a rotation speed of 500 rpm in Argon atmosphere. The MAed powder was filtered by the mesh of 500μm and sintered at 880 °C with a load of 50 MPa.

3.Results

The WO₃ addition significantly refined the size of MAed powder, achieving an average size of 270 μm, and increase the production rate of MAed up to almost 100%. As for X-ray diffraction results, the WO₃ peaks disappear in the MAed powder and existed as pure tungsten peak and Y-Zr oxide peak in the as-sintered sample. The as-sintered CuYZr-WO₃ sample achieved the Vickers hardness of 286 HV0.1 and thermal diffusivity of 70.2 mm²s⁻¹ at room temperature. TEM observations revealed that the nanosized Y-Zr complex oxide and pure tungsten particles dispersed inside the grain and pinning on the grain boundary.

4.Conclusion

WO₃ addition into ODS-Cu can effectively refined the MAed powder and improved their production rate. WO₃ decomposed during MA process was precipitated as pure tungsten particle and gave excess oxygen in as-sintered sample, leading to the formation of Y-Zr complex oxide and contributing to the mechanical properties of ODS-Cu.

References

- [1] Liu, Yuchen, et al. Nuclear Materials and Energy 26 (2021): 100903.
- [2] Gao, Zimo, et al. Journal of Alloys and Compounds 899 (2022): 163328.
- [3] Saito, Toshiki, et al. Journal of Alloys and Compounds 983 (2024): 173852.

ODS-Cu の材料特性に対する YSZ 添加の影響

The effect of YSZ addition on material properties of ODS-Cu

*齋藤 隼輝¹, 余 浩¹, 高 子墨¹, Kim Gibum², Park JongHyeon², Lee Seongbeen², Oda Takuji²,
笠田竜太¹

¹ 東北大学, ² Seoul National University

核融合炉ダイバータヒートシンク構造材料として、熱力学的安定性に優れる酸化物粒子を Cu 母相中に微細分散させた酸化物分散強化銅合金が注目されている。本研究では、ZrO₂ 系酸化物のイットリア安定化ジルコニア (YSZ) を添加した Cu-YSZ を作製し、その添加が材料特性に及ぼす影響を評価した。

キーワード：ダイバータヒートシンク、銅合金、ODS 銅合金

1. 緒言

原型炉以降の核融合炉ダイバータヒートシンク構造材料として、熱力学的安定性に優れた酸化物粒子を微細・緻密に Cu 母相中に分散させ、Cu 由来の熱伝導性と、高温強度や耐照射性を持たせることを志向した酸化物分散強化銅合金 (ODS-Cu) が注目されている。Cu-Y₂O₃ 系 ODS-Cu に Zr を添加した Cu-Y₂O₃-Zr [1] 中では、他の ODS 合金では報告のなかった酸化物であるイットリア安定化ジルコニア (YSZ) の微細粒子が形成しており、YSZ が ODS-Cu の微細分散粒子として有用である可能性が示唆された [2]。そこで本研究では、YSZ 分散 ODS-Cu (Cu-YSZ) を作製し、材料特性に対する YSZ 添加の影響を解明することを目的とした。

2. 実験手法

水冷式ボールミル装置により Cu 粉末と YSZ 粉末をメカニカルアロイング (MA) し、Cu-YSZ 合金粉末を作製した。作製した合金粉末について、放電プラズマ焼結を用いて固化成形した。焼結前後の Cu-YSZ について X 線回折測定 (XRD) を行い、また焼結体の熱拡散率測定、ビッカース硬さ試験、微細組織観察を行った。比較として、ITER 用ダイバータヒートシンク構造材料の候補材とされた Glidcop® Al-15 (Glidcop) についても熱拡散率測定とビッカース硬さ試験を行った。

3. 結果と考察

Cu-YSZ では、Cu-Y₂O₃-Zr と比較して合金粉末が粗大化しにくい傾向が見られた。焼結体中では、YSZ の形成を示唆する XRD ピークが見られ、また熱拡散率は、Cu-Y₂O₃-Zr より向上した。熱拡散率向上の原因として、合金中の不純物元素が Cu-Y₂O₃-Zr と比較して減少した可能性がある。一方で、ビッカース硬さは Cu-Y₂O₃-Zr より低く Glidcop と同等であった。Cu-YSZ で強度の著しい向上がなかった理由として、焼結体の緻密化が不十分である可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究により、Cu と YSZ の MA では、合金粉末が粗大化しにくく、均一に粉碎されると示唆された。また Cu-Y₂O₃-Zr よりも熱拡散率が改善していた。YSZ 添加が ODS-Cu の強度に与える影響については、焼結密度を改善した上で再評価を行う必要がある。

参考文献

- [1] Z. Gao *et al.*, J Alloys Compd 899 (2022) 163328.
- [2] T. Saito *et al.*, J Alloys Compd 983 (2024) 173852.

*Toshiki Saito¹, Hao Yu¹, Zimo Gao¹, Gibum Kim², JongHyeon Park², Seongbeen Lee², Takuji Oda², and Ryuta Kasada¹

¹Tohoku Univ., ²Seoul National Univ.

超微小引張試験による F82H 鋼の強度特性評価

Evaluation of strength for F82H by Micro-tensile testing

*安堂 正己¹, 野澤 貴史¹

¹ 量子科学技術研究開発機構

照射を受けた F82H 鋼の機械的特性がどの程度変化（劣化）するのかを把握するためのツールとして、これまで模擬照射実験・微小硬さ評価を進めてきている。本報告では複合イオン照射された F82H 鋼のシングルブロック部を対象に、ノッチ付超微小引張試験から得たマイクロ破断強度評価について報告を行う。

キーワード：低放射化フェライト鋼, イオン照射実験, 超微小引張試験

1. 緒言

核融合原型炉ブランケット構造材料の候補材として低放射化フェライト鋼の開発を進めている。核融合環境下では、ヘリウムによる脆化促進の懸念があるが、現状その理解は十分ではない。複数の加速器を用いたイオン照射実験では、核融合中性子照射の特徴である弾出し損傷の導入と核変換ヘリウムの生成を部分的に模擬することができる利点を有するが、評価体積が非常に小さく、これまで主に電子顕微鏡観察によるボイドスエリングの評価、微小硬さ試験（圧縮試験）による照射硬化量の評価に限られていた。本研究では、超微小引張試験法による、マイクロ領域の破断強度の評価を試みた。

2. 実験方法

F82H IEA ヒートを対象に、10.5MeV の Fe³⁺イオンと 1.05MeV の He⁺イオンによる照射実験を行った。デュアルイオン (Fe+He) 照射では、He 量は約 15appm/dpa とした。照射温度は照射硬化が顕著な 300℃付近とし、照射量は最大 80dpa とした。照射後は、F82H 鋼のシングルブロックを対象に、集束イオンビーム (FIB) 加工装置を用いて、超微小引張試験を実施した。照射領域での破断強度の評価を行えるように、図 1 のようなノッチ付超微小引張試験片を採用し、この破断直前の最大応力をマイクロ破断強度として定義した。

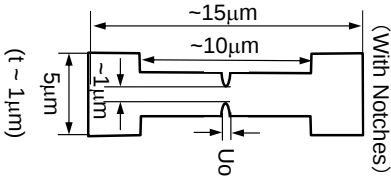


図 1 ノッチ付引張試験片

3. 結果と考察

図 2 は、イオン照射した F82H 鋼の 300℃、80dpa までの超微小引張試験から得た破断強度の結果である。ヘリウムの有無にかかわらず、300℃で照射した F82H では、顕著な照射硬化が生じるが、マイクロ破断強度は 20dpa 付近までは、未照射材と同等の結果となった。さらに高照射量 (>40dpa) では、破断強度は照射量とともに増加する傾向にあった。試験後の破面形状も、より変形量の少ない平坦な形状となる傾向にあった。総ヘリウム量は照射量の増大とともに増加するが、300℃、80dpa デュアル照射 F82H においては破断強度のばらつきもより顕著となる結果が得られた。

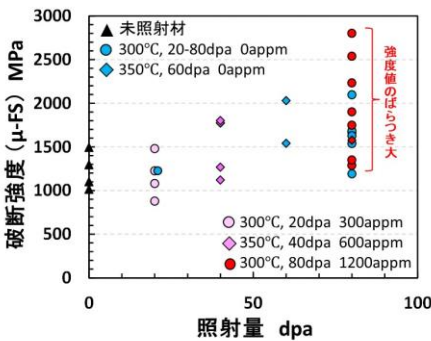


図 2 破断強度と照射量との関係

4. 結論

本手法により、イオン照射材 F82H 鋼の破断強度の比較、さらに破断強度の上昇はマイクロ領域での変形しにくさを示すとも考えられることから、変形能に関する新たな指標として利用できる可能性を得た。

*Masami Ando¹ and Takashi Nozawa¹
¹National Institutes for Quantum Science and Technology