



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on refractory high-entropy alloys for nuclear fusion application [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	ZONG, Yun
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15349号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89468
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yun_Zong_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 ZONG Yun

審査担当者 主 査 教 授 橋本 直幸
副 査 教 授 三浦 誠司
副 査 教 授 大野 宗一
副 査 准教授 磯部 繁人

学位論文題名

Study on refractory high-entropy alloys for nuclear fusion application

(核融合用の BCC 型高エントロピー合金に関する研究)

原子力は、その生産効率の高さから依然として主要なエネルギー供給源として期待されており、並行して次世代原子炉として高速炉、高温ガス炉、核融合炉などの未来型原子炉の開発が世界中で進められ、特に核融合炉については、今後 20 年間の到達目標を掲げ、実験炉 (ITER) から実証炉 (DEMO) へ移行するための技術開発が盛んに行われている。例えば、ITER の熱交換器であるダイバータで使用される材料は、高温、高圧、高エネルギー照射環境で長期間にわたる組織的・機械的安定性が必要となる。現在まで、ITER ダイバータ用候補材料として炭素繊維複合材 (CFC) 或いはタングステン (W) が着目されてきたが、それぞれ組織的安定性という点で十分とは言えない。W のような高 Z マテリアルの最大の特徴は高い耐照射性にあるが、それでも核融合炉のような高レベルの中性子フラックスを受けたときの安定性には疑問が残る。翻って、昨今エネルギー的に極めて安定かつ特異な物性を発現する材料としてハイエントロピー合金 (HEA) が注目され、この材料の照射環境への応用を期待する向きがある。特に、Ti、Zr、Hf、Ta、V、Nb、W 及び Cr を含む HEA は、将来的に純 W と置き換わる代替材料として有望視されている。本研究では、体心立方 (BCC) 型高融点 HEA である MoNbTaTi、MoNbTaW、MoNbTaTiW、HfNbTaTiZr、及び HfNbTaTiV に着目し、照射下における微細組織安定性と機械的特性変化 (照射硬化) について精査することで、核融合炉環境に適した新規高耐照射性材料の創製を目指した。

まず、アーク溶解法により MoNbTaTi、MoNbTaW 及び MoNbTaTiW 固溶体を作製し、これらの合金を 1200 °C で 48 時間熱処理した後、結晶構造、微細組織、機械的特性について調査した。作製した各 HEA について SEM 及び EDS マッピングを行った結果、適切な熱処理を施すことにより、高温で組織的に安定な HEA が得られることが分かった。続いて、これら 3 種の HEA に Fe^{3+} イオンを 6.4 MeV かつ 500 °C で照射し、照射前後の硬度変化についてナノインデンテーションを用いて精査した結果、3 種の HEA の照射損傷組織は、純タングステンと比較して僅かに遅延しており、照射後の機械的特性 (硬度) も損傷組織を反映する形で抑制され、耐照射性が向上する傾向が見られた。次に、良好な延性を持つ BCC 型 HEA として知られる Senkov 合金 (HfNbTaTiZr) に基づいて耐照射性向上を目途とした HfNbTaTiV 合金を作製した。なお状態図上、当該合金は 800 °C 以上で BCC 安定構造を有する。既存の低放射化フェライト/マルテンサイト鋼である F82H(Fe-8Cr2WTa) と Senkov 合金を比較材料とし、それぞれの微細組織、結晶構造、機械的特性及び耐照射性について調査した結果、HfNbTaTiV のビッカース硬度は Senkov 合金よりも高く、降伏応力と引張強度は

Senkov 合金及び F82H と比較して大きくなった。なお、伸びは $\text{HfNbTaTiV} < \text{Senkov 合金} < \text{F82H}$ の順であった。これらの耐照射性について精査するため、 Fe^{3+} イオンを 6.4 MeV かつ 500 °C で照射した結果、 HfNbTaTiV の照射硬化は Senkov 合金と比較して明らかに小さく、F82H と同程度であることが分かった。

以上より、本研究では先進原子炉用構造材料としての新規高融点 BCC 型 HEA の開発に着手し、高温条件で従来鋼と遜色ない優れた耐照射性を有し、構造材料として十分な機械的特性を有する材料の創製に成功した。この材料は、未来型先進炉及び核融合炉で利用される高温材料の代替としての応用が期待される。これらの研究結果は、過酷な中性子エネルギー環境下における基幹炉構造材料開発について新たな知見を与えるものであり、材料工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。