

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Investigation of SiC fiber reinforced metal matrix composites for nuclear fusion application (核融合用炭化珪素繊維強化金属複合材料に関する研究)

申請者 DU YINA

最終学歴 令和 4年 3月
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻博士後期課程
(研究指導認定退学)

学識確認 平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
(主査) 教授 宮内 雄平

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 大垣 英明

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
准教授 中嶋 隆

調査委員 京都大学オープンイノベーション機構
特定教授 檜木 達也

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	DU YINA
論文題目	Investigation of SiC fiber reinforced metal matrix composites for nuclear fusion application (核融合用炭化珪素繊維強化金属複合材料に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、耐プラズマスパッタリング特性、トリチウム保持特性、伝熱特性等から核融合炉のダイバータや第一壁の有力な候補材料と期待される高融点金属であるタングステン及びモリブデンを対象とし、1000℃を超える高温や中性子照射により強度特性の劣化しない新たな材料として SiC 繊維で強化した材料の開発を論じた結果をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章では背景と目的として、核融合開発の現状やダイバータや第一壁で求められる環境等が纏められ、候補材料や問題点、問題解決の手段などが纏められている。SiC 繊維を用いる理由と全体の構成と目的も述べられている。</p> <p>第2章では、試料の作製及び評価について述べられている。SiC 繊維強化金属マトリックス複合材料はホットプレスを用いた焼結により作製している。原料素材や焼結条件等に関して纏められている。SiC と金属の反応を抑制するための界面層の作製方法に関しても纏められている。強度、熱特性、微細組織・構造評価の方法に関しても述べられている。</p> <p>第3章では焼結温度の影響に関して述べられている。本研究では焼結を 1500℃～1900℃で行っている。SiC とタングステンは高温で反応するため、界面剥離による靱性向上の観点では、低い焼結温度が望まれる。一方、焼結促進には高い温度が望まれる。1900℃では、高い強度は得られたが界面反応が進み、脆性的な破壊挙動が見られた。焼結性と界面での反応のバランスが取れ、繊維強化による望ましい延性挙動も見られ、熱伝導率も高い 1700℃での焼結条件が最適条件として得られた。</p> <p>第4章ではマトリックスの影響に関して述べられている。原料金属粉末のみの焼結と金属箔を組み合わせる方法を用いている。SiC 繊維との反応を考慮した上で金属箔の厚みを変えた試料を作製し評価、検討を進めている。焼結温度は金属マトリックスの再結晶温度を超えるが、SiC 繊維で強化した本材料では多くの条件で延性破壊挙動を示した。金属箔を用いることにより顕著な強度向上が見られた。</p> <p>第5章では繊維の影響に関して述べている。SiC 繊維の2次元織物、SiC 繊維とタングステン繊維の織物を用いた材料に関して述べている。2次元での繊維強化材も延性挙動を示した。全体的な傾向としては1方向強化材の強度は明らかに高く、大きな差は無いが SiC 繊維のみの織物材、SiC 繊維と W 繊維の織物材と続いた。タングステン繊維も用いることにより繊維層の伝熱性を向上させることができ、特に高温での熱伝導率の向上が見られた。強度と熱伝導率の総合的な観点では、SiC 繊維とタングステン繊維で強化した材料は有望と考えられる。</p> <p>第6章においては SiC 繊維と金属マトリックスの反応抑制のための界面層に関し</p>			

て述べている。様々な炭化物、窒化物、酸化物に関して検討を行うとともに、溶射とスラリーに漬け込む方法での作製を行い評価が進められた。溶射による ZrN と TiN の界面層は反応層の抑制効果が見られたが、最も反応層の抑制に成功したのはスラリーを用いた Er_2O_3 界面層であった。しかしながら、複合材料では、界面剥離を促すために適切に弱い界面強度が必要であることと、 $10\ \mu\text{m}$ 径の SiC 繊維で構成された繊維束内に被覆を施すことも困難であり、繊維/マトリックス界面への適用に関しては課題も明らかになった。

第 7 章では全体のまとめと今後の開発指針に関して述べられている。重要な成果として繊維強化により、延性挙動を示す材料開発に成功した。本材料の作製温度はタングステンやモリブデンの再結晶温度を超えており、繊維強化無しでは脆性的な破壊挙動を示す。これは、マトリックスが脆化しても延性挙動を示すことになり、中性子照射を行ったとしても、 SiC 繊維の特性は変わらないため同様に延性挙動を示すものと考えられる。繊維とマトリックスの反応を抑制する界面として Er_2O_3 を見出すことができたことも重要な成果ではあるが、複合材料に適用するには課題があることも明らかになった。

以上、本論文は核融合炉のダイバータや第一壁への応用を目標に、 1000°C を超える高温や中性子照射により強度特性の劣化しない新たな材料として、タングステン及びモリブデンを SiC 繊維で強化した材料を開発したものであり、エネルギー科学の学術上、また実際上寄与すると考えられる。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉のダイバータや第一壁の有力な候補材料と期待される高融点金属であるタングステン及びモリブデンを対象とし、1000°Cを超える高温や中性子照射により強度特性の劣化しない新たな材料として SiC 繊維で強化した材料の研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

本論文ではタングステン及びモリブデンを対象として、耐熱、耐中性子特性に優れ熱膨張係数も比較的近い SiC 繊維で強化する新たなアプローチで、ダイバータや第一壁の過酷環境下においても脆化しない材料の開発を目的としている。材料は繊維とマトリックスとそれらの界面で構成され、焼結温度等の作製条件の検討を行い、各構成要素が強度、熱、微細組織に及ぼす影響を明らかにするために幅広い条件での材料開発を進め、詳細な解析を行っている。作製条件の最適化において、焼結による緻密化と界面での反応のバランスを調整し、マトリックスのタングステン及びモリブデンが再結晶化により脆化する温度で作製した材料でも長繊維強化により靱性の発現する材料の開発に成功している。繊維構造や SiC 繊維とタングステン繊維の組み合わせ、マトリックス素材の箔の導入等により、強度及び熱特性の向上を行っている。界面の反応を抑制する手法に関しても、幅広い材料と形成方法の検討を進め、反応を抑制する材料として Er_2O_3 を見出している。本材料の靱性の発現は SiC 繊維強化によるものであり、実環境でのマトリックスの脆化に依らないため、実環境下においても脆化しないと考えられる。本論文で得られた新たな材料の開発は、核融合炉開発進展に貢献できる重要な成果である。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年2月17日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降