

氏名	ひのき たつ や 檜 木 達 也
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 37 号
学位授与の日付	平成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻
学位論文題目	Investigation of Mechanical Properties and Microstructure of SiC/SiC Composites for Nuclear Application (核融合用 SiC/SiC 複合材料の強度特性及び微細構造に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 香山 晃 教授 塩津正博 教授 木村晃彦

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、核融合への応用を目的として SiC/SiC 複合材料を開発し、その強度特性及び微細構造に関する結果をまとめたもので、8章からなっている。

第1章は研究の背景及び目的について述べており、人類の恒久的かつ環境負荷の小さい理想的なエネルギー源として核融合の必要性を述べ、核融合用材料に求められる課題や、優れた低放射化特性や高温強度特性を持つ SiC/SiC 複合材料の魅力や問題点を述べている。従来の強度特性評価法や問題点について述べ、本論文全体の構成や各章の位置付けについて述べている。

本研究で用いた化学蒸気含浸法 (CVI 法) は原料ガスを熱分解し、温度勾配やガス流速を制御した炉の中で繊維に蒸着させることにより試料を作製する方法で、結晶構造を持つ β -SiC 型マトリックスを成形でき、優れた物理特性及び力学特性を有する材料開発が可能で、繊維/マトリックス界面の精密な微細構造制御が可能である。第2章ではシステム改良により、精密な温度制御やガス流量制御を行い、均一な界面と高密度マトリックスを得るための条件の最適化を行った結果について述べている。

SiC 繊維開発は近年目覚ましい進歩を遂げている。本研究では繊維開発に参加し、開発途上の繊維を用いる広範な研究を行った。第3章では繊維の製法、特徴について述べ、優れた耐照射特性が期待される低酸素含有量で高結晶性繊維を用いた材料を開発し、微細構造や表面特性の評価から、強度特性に及ぼす影響を考察した。従来非常に困難であった透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察用薄膜の作製を、超精密カッター及び収束イオンビーム (FIB) 加工装置を用いることにより可能にした。強度評価は、サイズや難加工性から試験が容易な曲げを中心に行われてきたが、治具等の開発により最新材料の引張試験による、より正確な強度特性評価を行った。

界面強度特性は全体の強度特性を決める上で非常に重要である。第4章では界面強度の評価法から、新たな界面開発、界面強度特性及び破壊挙動とマクロな破壊挙動との関係について考察した。用いた繊維は $10\mu\text{m}$ 径前後のもので、界面強度評価には超微小硬さ試験機を応用して単繊維の押し出し試験や押し戻し試験を行い、界面の接合力や摩擦力を評価した。界面破壊挙動の直接的な理解のために、押し込み試験後の界面を FIB により薄膜にし、TEM 観察で破壊挙動を捉えることに成功した。耐照射性向上のため SiC を基本とした SiC/C 多層界面や擬多孔質 SiC 界面を開発し強度特性を評価した。

第4章により界面の破壊は繊維/界面間で起こり、界面強度の重要な要素の摩擦力が十分に得られないため剝離した界面での応力伝達能力を著しく低下させることが明らかになった。第5章では繊維表面処理により、界面内での複雑な破壊を促し剝離後も応力伝達能力を維持させ、強度特性を向上させる試みについて述べている。表面処理として繊維の SiC 被覆及び活性化処理を行った。SiC 被覆した試料は、界面層内で破壊が進展し摩擦力向上により強度特性は大きく改善された。

中性子照射研究は非常に時間を要するのに対して、SiC/SiC 複合材料の進歩は著しい。本研究では、最新繊維を用いた材料の中性子照射を行い、世界的にも最新のデータを得た。第6章では核融合で問題とされるが核分裂では模擬できない

He 効果に関しても、高度に制御された重イオン照射を行い、繊維、マトリックス、界面の各要素の微細構造に及ぼす照射効果を TEM により評価し、強度特性及び破壊挙動に及ぼす中性子照射効果を評価することにより、耐照射特性に優れた材料開発の指針を得た。

第7章では核融合炉材料として研究すべき繊維、マトリックス、界面構造を提案するとともに、照射後も可能で特性を十分に理解できる実験手法を提案した。本研究全体で得られた微細構造と強度特性との関係及び照射効果を総合的に評価し、核融合炉材料としての SiC/SiC 複合材料の現状と問題点を示し、近い将来の核融合動力炉用材料として高い可能性を有することを結論付けている。また、論文のまとめとして、その為に必要な今後の研究及び開発指針を示した。

第8章では全体の総括を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、核融合への応用のために SiC/SiC 複合材料を開発し、強度特性及び微細構造に関する成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。

核融合炉が将来の魅力あるエネルギー源の有力なオプションとして位置付けられるには、環境影響、安全性、経済性のすべての側面から社会に受容されることが不可欠である。SiC/SiC 複合材料は優れた耐照射特性や高温特性を満ちし、経済性の要求にも応えうる究極の低放射化材料として期待されている。本研究は繊維、マトリックス、界面、それぞれの微細構造と界面強度特性を含む強度特性、破壊挙動との関係の理解により各要素の最適化を図り、各要素の微細構造や強度特性に及ぼす照射効果を理解することにより、発電炉要件を満たす核融合炉用 SiC/SiC 複合材料の開発を目的としている。

SiC/SiC 複合材料に関する研究は、核融合研究以外で開発された材料を用いて評価するのが主流で、核融合用材料開発といえるものは皆無に等しかった。本研究は材料製造プロセス開発を基本とし、耐照射特性も含めた系統的な研究を行った。試料は化学蒸気浸透 (CVI) 法により作製し、CVI 条件の最適化により界面の制御性や強度特性を著しく向上させた。ほぼ不可能であった透過型電子顕微鏡像も、収束イオンビームによる薄膜作製技術を確立させることにより観察可能とし、繊維や界面の微細構造、破壊挙動が理解された。微小試験片による引張り試験法の確立や単繊維押し出し試験などによる界面強度評価法を確立させ、強度特性に及ぼす繊維や界面の影響を評価した。これらの結果に基づき界面改質などを行い、強度特性及び破壊挙動の向上に寄与した。最新の高結晶性繊維を用いた材料の重イオン照射及び中性子照射を行い、微細構造や強度特性に及ぼす照射効果を評価することにより、優れた耐照射特性を備えた材料開発を行うための指針を得た。

以上要するに、本論文は核融合用 SiC/SiC 複合材料の耐照射特性も含めた特性を向上させるための基礎的知見を与えるものであり、エネルギー材料開発ならびにエネルギー科学に寄与するところが少なくない。

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、平成13年2月5日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。