

氏名	李 承
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 123 号
学位授与の日付	平成 17 年 9 月 26 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	伝熱機能材料及び耐熱構造材料としての SiC/SiC 複合材料の研究

論文調査委員 (主査) 教授 香山 晃 教授 小西 哲之 講師 檜木 達也

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、優れた低誘導放射化特性と高温特性により核融合炉の構造材料としての使用が想定されている SiC/SiC 複合材料の伝熱機能材料及び耐熱構造材料としての適正について論じたものである。本論文は 6 章からなり、熱伝導度に関する理論モデルの開発、ダイバータの健全性評価に対する熱伝導度測定の実証、SiC/SiC 複合材料の He に対する気密性の評価に関する研究結果をまとめている。

第 1 章は序論で、研究の背景及び目的について述べている。一次エネルギー源の枯渇問題と地球環境問題を整理した上、核融合発電への期待、核融合発電の実現のための材料研究の意義、核融合炉の有力な候補材料で本論文の研究対象でもある SiC/SiC 複合材料の低誘導放射化特性と高温特性について述べている。一方、セラミック及びその複合材料における課題である He などに対する気密性の確保についても述べている。本研究の目的はセラミック複合材料の熱伝導度に関する理論モデルの構築と実験による検証、熱伝導度測定法を応用した W 被覆 SiC/SiC 複合材料の被覆界面評価、He に対する気密性と気密性に及ぼす熱サイクル付与の影響等の評価から核融合炉構造材料としての SiC/SiC 複合材料の適正を示すことである。

第 2 章では SiC/SiC 複合材料の構成要素である繊維、マトリックス、繊維/マトリックス界面相の基礎物性・作製法について述べている。実用化に向けた先進 SiC/SiC 複合材料の研究開発を重視し、高結晶性・高熱伝導性の先進 SiC 繊維である Tyranno-SA と先進 SiC/SiC 複合材料の有効な作製法として注目されている NITE 法により優れた特性を実現できることを述べている。

第 3 章では SiC/SiC 複合材料の熱伝導度に関する新しい理論モデルの開発と応用について述べている。熱伝導度に関する既存モデルの誘導過程を詳述した上、FEM モデル計算を用いて既存モデルの精度を定量化し、界面相の熱伝導度の異方性と界面相の厚さを的確に考慮することの重要性を指摘している。異方性と厚さを論理的に数式化すべく、界面相の熱伝導特性を反映した新しいモデルを開発し、FEM モデル計算・実際の複合材料の熱伝導度との誤差が本モデルを適用できる材料 (NITE 法で作製した欠陥の少ない材料) においては ±2% 未満で信頼できるモデルであることを確認している。開発したモデルを SiC/SiC 複合材料の最適化設計に応用し、高熱伝導度の先進 SiC 繊維を使用した SiC/SiC 複合材料の伝熱特性・強度特性の向上のための界面相の薄膜化を提案している。また、3次元 SiC/SiC 複合材料への応用においては、高熱伝導度の先進 SiC 繊維の有効性を示している。

第 4 章ではダイバータの健全性評価に対する熱伝導度測定の実証について述べている。運転中のダイバータの健全性評価の重要性、ダイバータ材料としての W 被覆 SiC/SiC 複合材料の有効性を指摘した上、W 被覆 SiC/SiC 複合材料に対する熱伝導度測定による健全性評価の意義について述べている。熱伝導度測定による健全性評価の実証のため、電子ビームによる熱負荷を W 被覆 SiC に与え、熱伝導度測定・FEM モデル計算・コンピューター断層撮影により、熱負荷による W-SiC 反応相の増加が熱伝導度の変動として捉えられることを示し、熱伝導度測定を以って W-SiC 反応相の増加

を感知することにより W/SiC 界面付近での亀裂・剝離を事前に把握できることを実証している。

第5章では、SiC/SiC 複合材料の He に対する気密度の評価について述べている。高温特性に優れた SiC/SiC 複合材料の使用により He 冷却サイクルが可能になること、高温の He の使用による核融合炉のエネルギー変換効率の向上、材料を透過する He の流れの分類について整理した上、He に対する気密度の研究の意義と課題について述べている。NITE 法により作製した SiC/SiC 複合材料・SiC 単体に定常核融合炉の起動時のブランケットの温度条件を模擬した熱サイクルを与え、熱サイクル前後の He に対する気密度を測定し、試料の表面観察結果及び熱サイクル時の試料内の熱応力に関する FEM モデル計算結果に基づき気密度の変動を分析している。熱サイクル試験前後の NITE-SiC/SiC 複合材料・SiC 単体の気密度が核融合炉での設計要件を満たし、気密性保持のための措置を加えることなく構造材料として利用できる可能性のあることを示している。

第6章では、本研究の総括であり、高効率・環境調和型核融合炉の実現に向けた、SiC/SiC 複合材料の熱伝導度に関する理論モデル開発、熱伝導度測定によるダイバータの健全性の向上、SiC/SiC 複合材料の He に対する気密性の改善の研究の今後のあり方について述べている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、優れた低誘導放射化特性と高温特性により核融合炉の構造材料として期待されている SiC/SiC 複合材料の熱伝導度に関する理論モデルの開発、ダイバータの健全性評価に対する熱伝導度測定の応用可能性の実証、SiC/SiC 複合材料の He に対する気密性の評価に関する研究成果をまとめたものである。NITE 法により優れた特性の SiC/SiC 複合材料が得られることを示し、核融合炉第一候補材料として評価を行った。主な成果は次のとおりである。

SiC/SiC 複合材料の熱伝導度に関する理論モデルとして、繊維/マトリックス界面相の熱伝導度の異方性・厚さを考慮したモデル開発を行った。開発した理論モデルと SiC/SiC 複合材料での実測値との誤差は本モデルを適用できる材料（NITE 法で作製した欠陥の少ない材料）では、既存の理論モデルの精度（ $\pm 8 \sim 15\%$ ）を大きく凌駕し、 $\pm 2\%$ 未満の優れた精度を示した。本モデルより、高熱伝導度の先進 SiC 繊維を使用した SiC/SiC 複合材料では伝熱特性・強度特性の向上に界面相の薄膜化が有効であることが示され、強度特性の向上と合わせて、耐高熱負荷特性の改善を実現できる事を示し、実験での検証も行っている。

熱伝導度測定によるダイバータの健全性評価では、先進ダイバータの要素として W 被覆 SiC/SiC 複合材料を想定し、W 被覆 SiC への熱負荷試験を行い界面での亀裂生成・剝離の前駆現象である W-SiC 反応層の増加を検出した。このことは、W 被覆 SiC/SiC 複合材料において W 被覆の剝離及びその前駆段階を熱伝導度測定より予知できることを実証するものである。

SiC/SiC 複合材料のガス炉システムへの適合性評価として、NITE-SiC/SiC 複合材料・NITE-SiC に対して定常核融合炉の運転条件を模擬した熱サイクル試験を行い、He 透過性の変化を測定した。NITE-SiC/SiC 複合材料・NITE-SiC は熱サイクル試験後も He に対する優れた気密度を維持しており、核融合炉への使用に十分な基礎特性を有することを示した。

以上要するに本論文は核融合炉の伝熱機能材料・耐熱構造材料としての SiC/SiC 複合材料の伝熱特性・気密性の向上、熱伝導度測定の工学的応用に関する重要な知見を与えるものであり、エネルギー材料の開発並びにエネルギー科学に寄与するところ大である。

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、平成17年7月28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。