

氏 名	朴 環 喚
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 101 号
学位授与の日付	平成 16 年 9 月 24 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	Effects of Ion Irradiation on $\beta$ -SiC for Advanced Nuclear Energy Systems (先進原子力エネルギーシステム用 $\beta$ -SiC のイオン照射効果に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教授 香山 晃 教授 塩津 正博 教授 小西 哲之

### 論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、SiC/SiC 複合材料を先進原子力エネルギーシステムに利用する際の課題である多様な照射環境における材料挙動の予測精度の向上を究極の目的とし、構成要素である高純度・高結晶性  $\beta$ -SiC の中性子照射効果の基礎的理解を多重イオンビーム照射により明らかにするものである。本論文ではイオン照射による強度特性変化とそれに対応する微細組織特性を論じた結果をまとめたもので、全 8 章からなっている。

第 1 章は序論で、研究の背景および目的について述べている。将来のエネルギー問題を議論し、その解決策としての第 4 世代原子炉や核融合炉について概説している。これらの先進原子力エネルギーシステムにおいて重要な構造・機能材料として候補に挙がっている SiC/SiC 複合材料の特長と実用化に向けた技術課題を議論している。特に、SiC/SiC 複合材料の構成要素である高純度・高結晶性  $\beta$ -SiC の照射効果に重点を置き本論文の構成を説明している。

第 2 章は概論で、SiC 及び SiC/SiC 複合材料の照射効果に関する研究の歴史と現状をまとめている。高温ガス冷却炉の核燃料への SiC 応用の期待から SiC/SiC 複合材料が核融合炉材料として注目されるまで SiC 及び SiC/SiC 複合材料の照射効果に関する研究は寸法変化、微細組織安定性、熱特性、強度特性の評価が行われてきたが、不純物を含む材料を用いている例が多く、信頼できるものは極わずかしかないと指摘している。また、高温照射領域での組織変化やそれに伴う強度変化に関する研究と、特にヘリウム形成とはじき出し損傷との同時照射効果に関する情報は皆無に等しく、体系的な研究が必要であることを指摘し、本論文の重要性を述べている。

第 3 章は実験方法の詳細について述べている。本研究では京都大学 DuET 施設を利用した高度に制御された二重ビーム照射により、SiC のヘリウム形成とはじき出し損傷との同時照射効果を評価している。イオン照射材の特徴である数  $\mu\text{m}$  以下の極微小な照射損傷部の強度特性評価のため、超微小及び微小押し込み試験法を用いて精度の高い評価を行っている。得られた強度変化に対応する微細組織観察のため、収束イオンビーム (FIB) を用いた加工法の新しい利用法を提案し、詳しく説明している。

第 4 章は  $\beta$ -SiC の強度と微細組織特性を記述している。圧痕下部の塑性領域と亀裂挙動を観察することで超微小及び微小押し込み試験の条件を決定し、イオン照射材への応用とその妥当性を示している。多結晶 SiC の塑性変形挙動、それに対応する転位挙動、および圧痕下部の亀裂進展を 3 次元的に解析し SiC 破壊挙動の基盤データとして明確に示している。

第 5 章はイオンビーム照射された SiC の強度特性変化を記述している。二重ビーム照射後の SiC の硬度、弾性率、破壊靱性を超微小及び微小押し込み試験により求め、その結果に基づき照射温度、損傷量、ヘリウム注入量の依存性を体系的に示している。

第 6 章はイオン照射が及ぼす SiC の塑性挙動と破壊挙動特性を示している。超微小押し込み荷重で生じた圧痕下部の高性能電子顕微鏡観察により塑性変形、初期亀裂、微細亀裂挙動を示し、高荷重押し込みにより生じた圧痕下部の観察から亀裂進展挙動、破壊に至るまでの挙動を明確に示している。

第7章はイオン照射したSiCの微細組織特性と強度特性変化の関係を述べている。照射によるSiCの硬さ増加、弾性率変化、破壊靱性を各々照射欠陥による塑性領域拡大の抑制、スウェリング、亀裂進展の複雑化などの挙動から説明しその機構を提案・議論している。

第8章は以上の研究結果から得られた総括を述べ、高純度・高結晶性 $\beta$ -SiCの優れた照射特性を記述し、 $\beta$ -SiCを主たる構成要素とする先進SiC/SiC複合材料の、将来の先進原子力エネルギーシステムでの利用に対する有効性を言及している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、多様な照射環境における $\beta$ -SiCの挙動を明らかにすることを目的としたものである。SiC/SiC複合材料を先進原子力エネルギーシステムの構造材料として利用するため、その主たる構成要素である高純度・高結晶性 $\beta$ -SiCを利用し、多重イオンビーム照射によりその照射における材料挙動を明らかにしている。これまで、SiCの強度特性とその微細組織に及ぼす照射効果に関する研究では、中性子照射実験の精度は悪く、不純物を多く含むSiCから得られた限られた結果が中心であり、正確な理解が得られていなかった。本論文では高純度・高結晶性 $\beta$ -SiCに対して、低温、低損傷から高温、高損傷まで高精度多重イオンビーム照射を行い、超微小及び微小押し込み試験法を用いて数 $\mu\text{m}$ 以下の極微小な照射損傷部の強度特性を評価している。また、照射による強度特性変化を微細損傷組織との相関を通して比較・検討している。さらに、破壊靱性変化については、塑性変形の開始から破壊に至る過程までの転位と損傷組織の観察により機構解明を行い、以下のようにSiCの照射効果基礎過程の理解に基づく体系的な成果を得ている。

最も重要な課題である照射下SiCの点欠陥集合体・転位ループ・キャビティー形成による強度変化挙動を明らかにし、照射によるSiCの圧縮応力下での破壊過程の特徴についても述べている。不純物を含むSiCとは異なり様々な照射条件下においても高純度・高結晶性 $\beta$ -SiCの場合は強度特性がほとんど劣化しておらず、逆に増加ないしは一定となる結果を示し、最近の高純度SiCの中性子照射結果の説明基盤を提示している。即ち、優れた照射下組織安定性と亀裂進展の抑制及び複雑化は強度特性の安定性の重要な要素であり、優れた耐照射特性の機構を明らかにしている。

金属材料と異なり高密度セラミックスの強度は表面近傍の破壊靱性に強く支配されており、本論文で得られた破壊靱性値を含む表面近傍の強度特性に及ぼす照射効果に関する知見は、マクロな強度特性との相関性を強く示すものであり、バルク照射効果への拡張性の大きい成果であることが示されている。この結果、先進SiC/SiC複合材料は200dpaを超える核融合炉環境やガス冷却型第4世代原子炉においても利用可能であるとの理論的な基盤を提示している。

本研究は、高結晶性の $\beta$ -SiCを主たる構成要素とする先進SiC/SiC複合材料の将来の実用炉での利用に対しての有効性を実験的データに基づいて示しており、照射効果基礎過程の理解に基づく体系的な研究は今後の多様な照射研究の基盤としても重要である。

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16年2月20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。