

氏 名	近 藤 創 介
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第134号
学位授与の日付	平成18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	SiCの微細組織に及ぼす照射効果

論文調査委員	(主査) 教授 香山 晃	教授 山 寄 鉄 夫	吉 川 潔
--------	-----------------	------------	-------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、将来のエネルギー源として期待されている先進原子炉や核融合炉での利用が検討されている炭化珪素 (SiC) 材料において最大の課題である照射効果、特に加速器照射による微細組織変化を機構論的に論じた結果をまとめたもので、8章からなっている。

第1章は「序論」で、研究の背景、目的および意義について述べている。核融合炉を中心とした新しい核エネルギー利用の実現において、有力候補としての SiC 材料が有する優れた高温強度特性、耐環境特性を指摘し、将来のエネルギー材料としての必然性および他の材料と比較した優位性を説いている。次いで、高温・中性子照射等の苛酷環境での総合特性を正しく理解するために、中性子照射下での材料挙動の予測精度を高めることの重要性を述べている。特にその基礎となる微細組織変化に関する知見がきわめて限られていること、また、これまで金属材料に関して体系化されてきた理解をそのまま適用できない事を指摘し、本研究の目的を「微細組織変化に基づくセラミック材料の照射下挙動の体系的な理解の構築」としている。

第2章は「概論」で、本論文の理解に必要な核融合環境模擬手法としてのシミュレーション照射と、その核融合環境との相関に関する一般的な考え方、また、照射損傷過程に関する基本的な物理、さらには SiC 材料に関するこれまでの照射研究をまとめている。また、従来の離散的な原子炉照射データからは、機構論的な理解を得ることが困難であることを指摘し、核変換ヘリウム生成やその他の照射因子を高度に制御した系統的な照射研究の必要性を述べ、関連する研究分野における本論文の位置づけを示している。

第3章は「イオン照射と照射後試験法の確立」で、本研究で主に用いた京都大学 DuET 施設の構成、性能、特徴、および本研究で新たに導入した加熱装置や試料ステージに関して概説している。また、照射材の選択的部位を対象とした FIB 法による 100nm 以下の膜厚の薄膜試料作成方法と、その膜厚ではじめて可能になるウィークビーム観察法や微細構造暗視野法について詳細に解説し、これらの成果としてはじめて損傷組織変化を定量的に解析し機構を議論できることを示している。

第4章は「照射後微細組織変化」で、本論文の中軸となる研究である。イオン照射により、最大損傷量 100dpa、照射温度は 1400℃ までの広範な照射条件において形成される微細組織欠陥の構造解析と定量的評価を行っている。特に、はじき出し損傷のみを与えた場合と、ヘリウムイオンを同時照射した場合とでの、損傷組織発展挙動の違いを示し、核変換ヘリウムの欠陥集合体形成及び成長における役割を述べている。また、照射下での体積膨張と微細組織変化の相関より、安全に使用できる照射条件範囲、およびその範囲外での材料課題を機構論に基づき指摘している。また、イオン照射と中性子照射の相関を損傷速度依存性の面より検討し、金属材料などで用いられる比較的単純な温度シフトによる解釈ではなく、はじき出し損傷とヘリウム注入の同時効果が Si と C の構成元素により異なる依存性を有していることの重要性から損傷速度効果の顕在化を示している。

第5章は「フランクループ形成に及ぼすビーム入射方向の影響」で、第4章での研究の中で明らかにした結晶構造に基づく照射損傷組織発展の異方性、すなわち、結晶面ごとに異なる欠陥組織の成長挙動があることを示し、照射中に発生する材料内部の応力状態の結晶方位依存性を重要な因子として、その機構を考察している。さらに、この機構により熱クリープが問題とならない温度域でも、照射下クリープが発生することを指摘している。

第6章は「フランクループ成長に及ぼす Si/C 構成比の保存効果」で、欠陥組織の原子配列に関わる組成構造から解析し、新たな組み合わせイオン照射法を提案し、実行することにより、欠陥内部の Si および C 原子の化学量論組成比が維持可能な条件下において欠陥集合体が安定に成長しうることが初めて示し、これが SiC の高い照射下組織安定性に効果的に寄与していること、すなわち、従来の欠陥成長の予測モデルでは、SiC の欠陥組織の変化を正確に記述できないことを示唆している。

第7章は「フランクループ成長に及ぼす電気的中性保存効果」で、第6章の結果を踏まえて、電子線照射と計算機によるシミュレーションで欠陥集合体の成長・発達過程に及ぼす、電気的中性条件の効果について検討しており、その重要性を実験及びモデル検討の両面より明らかにする新たな研究展開を提示している。

第8章は「総括」で、これら一連の研究は、精度の高い照射データの蓄積や現象論的理解の向上に留まらず、照射による材料特性変化の基礎をなす欠陥蓄積・集合体形成・組織発展過程の機構論的解明に至り、新たな物理機構の提案にまで至っていることを述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高温、中性子照射等の苛酷環境下での使用において問題となる炭化珪素 (SiC) 材料の照射効果、特に加速器照射による微細組織変化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。

これまで情報が極めて限られていた SiC の照射後微細組織変化を、広範な照射条件 (照射温度・損傷量・フラックス・ヘリウム注入速度など) における高効率かつ高精度な評価法の確立に基づき、比較的短期間で系統的に検討している。これらの成果は、材料の巨視的な特性変化に密接に関与するものであり、実環境下での材料挙動を予測し、構造設計に反映させるためには不可欠な学術的な基盤となる。

本論文では、照射による材料の体積膨張と微細組織変化の相関についても議論しており、安全に使用できる照射条件範囲、およびその範囲外で予想される材料課題を機構論に基づき指摘している。また、加速器照射のデータと中性子照射データの相関を明らかにするための基礎となる、損傷速度効果についても検討しており、これまで金属材料などで報告されている比較的単純な温度シフトによる解釈ではなく、はじき出し損傷とヘリウム注入の同時効果が Si と C の構成元素により異なる依存性を有しており損傷速度効果も顕著に現れることを示している。

これらの系統的な研究の中で明らかにした結晶構造に基づく照射損傷組織発展の異方性、すなわち、結晶面ごとに異なる欠陥組織の成長挙動のあることを示し、照射中に発生する材料内部の応力状態の結晶方位依存性を重要な因子として、その機構を考察している。さらに、この機構により熱クリープが問題とならない温度域でも、照射下クリープが発生することを指摘している。

また、欠陥組織の原子配列に関わる組成構造から解析し、新たな組み合わせイオン照射法を提案し、実行することにより、欠陥内部の Si および C 原子の化学量論組成比が維持可能な条件下において欠陥集合体が安定に成長しうることが初めて示し、これが SiC の高い照射下組織安定性に効果的に寄与していること、すなわち、従来の欠陥成長の予測モデルでは、SiC の欠陥組織の変化を正確に記述できないことを示唆している。

これを踏まえて、電子線照射と計算機によるシミュレーションで欠陥集合体の発達過程に及ぼす、電気的中性条件の効果についても検討しており、その重要性を実験及びモデル検討の両面より明らかにする新たな研究展開を提示している。

これら一連の研究は、精度の高い照射データの蓄積や現象論的理解の向上に留まらず、照射による材料特性変化の基礎をなす欠陥蓄積・集合体形成・組織発展過程の機構論的解明に至り、新たな物理機構の提案にまで至っている。

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18年2月17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。