

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	小柳 孝彰
論文題目	構成要素の照射後特性に基づく SiC 複合材料の中性子照射下強度モデル		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、核融合炉や次世代核分裂炉の炉心材料としての使用が期待される炭化珪素 (SiC) 繊維強化 SiC マトリックス複合材料の中性子照射下における強度特性の理解に基づく強度予測モデルについて論じた結果をまとめたもので、7章からなる。</p> <p>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。エネルギー需要の増加と地球温暖化の観点から、安定供給が可能で、経済的に安定し、更に、発電時に二酸化炭素の排出の無い原子力エネルギーの重要性について述べている。SiC 複合材料の次世代原子炉材料としての必然性・優位性を示している。SiC 複合材料は、その構成要素 (SiC 繊維・SiC マトリックス・炭素界面相) の組み合わせによる材料設計の自由度が高い反面、破壊挙動が複雑であり、照射影響が構成要素により異なるため、照射下強度特性の理解が十分でない。そこで、各構成要素の照射後特性から、中性子照射下での強度特性を理解し、照射下強度の予測モデルを構築することの必要性を述べている。</p> <p>第2章では、SiC 複合材料の基礎的な破壊挙動、構成要素の基礎物性、製造方法の特徴を述べている。また、SiC 単体や、SiC 複合材料の強度に及ぼす照射効果について、本論文で使用する試料の種類や実験条件の選定に重要となる知見を体系的にまとめている。</p> <p>第3章では、中性子照射と、中性子照射の模擬としてのイオン照射について、実験方法を概説している。引張強度に及ぼす中性子照射効果と、イオン照射による照射誘起体積膨張 (スウェリング) については、強度試験による照射効果や透過電子顕微鏡を用いた微細組織観察を定量的に評価する方法について詳述している。</p> <p>第4章は、SiC 複合材料の強度特性支配因子である複合材料中の残留応力に影響を及ぼす繊維とマトリックスのスウェリングに関して述べている。複合材料中のマトリックスと繊維のスウェリング評価方法の開発を行い、評価方法の妥当性の検討と、スウェリングの照射温度依存性と照射線量依存性をイオン照射法と中性子照射法を用いた実験により、明らかにしている。また、焼結助剤成分を不純物として含む SiC と高純度 SiC のスウェリング挙動の違いについて、その焼結助剤成分の効果を、イオン照射法を用いたスウェリング評価結果、透過型電子顕微鏡 (TEM) や走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた微細組織観察結果を基に定量的に明らかにしている。</p> <p>第5章は、SiC 複合材料中の残留応力に影響を及ぼす中性子照射下応力緩和を曲げ応力緩和試験法を用いて明らかにしている。応力緩和歪の負荷応力依存性と、TEM と SEM を用いた微細組織観察の結果から、焼結助剤成分を含む SiC 材料に特有な照射下応力緩和機構を明らかにしている。</p> <p>第6章では、中性子照射した SiC 複合材料の負荷・除荷繰り返し引張試験を行い、その強</p>			

度に及ぼす中性子照射効果を評価し、その照射効果機構を明らかにすることで、SiC 複合材料の強度のモデル化を行う上での基礎的知見を得ている。この知見と、第4、5章で得られた知見を基に、SiC 複合材料の繊維、マトリックス、界面の照射後特性から SiC 複合材料の中性子照射下での強度予測モデルを構築し、そのモデルの妥当性を中性子照射した SiC 複合材料の引張試験結果と比較することで検証している。更に、強度予測モデルを用いて、高線量中性子照射下における SiC 複合材料の強度予測を行っている。

第7章は、得られた成果の総括である。一連の研究により、中性子照射下での SiC 複合材料の強度特性に関して、現象論的理解を深め、その機構論を提示し、高線量での照射効果を予測することが可能になった。また、それらの予測に基づき、耐中性子照射特性を向上させるための SiC 複合材料の材料設計指針を示した。これらの成果は、次世代原子炉材料としての SiC 複合材料の今後の開発に必要な情報を与えるものとなっている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、次世代原子炉材料としての適用が進められている炭化珪素 (SiC) 繊維強化 SiC マトリックス複合材料について、中性子照射下における強度特性のモデル化に関する研究成果をまとめたものであり、本研究の成果は、(1) SiC 複合材料構成要素の耐照射特性の解明、(2) SiC 複合材料の強度に及ぼす中性子照射効果の解明、(3) 構成要素の照射後特性に基づく SiC 複合材料照射下強度のモデル化、に大別される。

(1) については、不純物として焼結助剤成分をマトリックスに含む SiC 複合材料では、マトリックスの照射下体積膨張率 (スウェリング) が繊維よりも大きく、残留応力が変化し、強度に影響を及ぼすことを明らかにした。マトリックスのスウェリングの大きな一因が、焼結助剤成分から成る  $Y_3Al_5O_{12}$  の照射誘起アモルファス化であることを透過電子顕微鏡観察により明らかにした。

(2) については、照射した SiC 複合材料の負荷-除荷繰り返し引張試験によって、初期損傷の指標となる比例限度応力に及ぼす照射効果が、照射による残留応力変化とマトリックス破壊エネルギーの変化から説明できることを示し、これら二つの変化が照射下強度予測のモデル化に重要であることを示した。

(3) については、比例限度応力に影響を及ぼす照射下残留応力のモデル化を行い、既存の残留応力モデルを照射下応力緩和も考慮したモデルに発展させた。この照射下残留応力モデルと本研究で取得した構成要素の照射後特性ならびに比例限度応力の理論式を組み合わせることにより、SiC 複合材料の照射下比例限度応力予測モデルを初めて完成させ、その妥当性を実験結果との比較により示した。また、比例限度応力予測結果から、焼結助剤成分をマトリックスに含む SiC 複合材料は、残留応力変化が有利に働く比較的低線量での使用が適していることを示し、一方、高線量域では構成要素の照射下安定性に優れる高純度マトリックスを有する SiC 複合材料の使用が適切であることを示した。

以上の成果から、本論文は、次世代原子炉材料としての SiC 複合材料の強度特性への照射効果に関して重要な知見を与えるもので、原子力エネルギー材料の開発ならびにエネルギー科学に大きく寄与するものである。

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 25 年 2 月 21 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。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、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