

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04937

研究課題名（和文）照射欠陥を利用したセラミックス強化に関する基礎研究

研究課題名（英文）Challenge to strengthen ceramics beyond theoretical strength by introducing lattice defects

研究代表者

近藤 創介（Kondo, Sosuke）

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：10563984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：炭化ケイ素（SiC）繊維強化SiCマトリックス複合材料（SiCf/SiC）は、核融合炉のブランケット材料として期待されているが、放射線照射による収縮が問題となっている。本研究は、照射がSiC繊維に与える影響を調査し、収縮と膨張のメカニズムを解明することを目的とした。SEMおよびSTEM観察により、Hi-Nicalon TypeS繊維の完全な非晶質化とTyranno SAファイバーの部分的な非晶質化を確認し、機械的特性の劣化を評価した。さらに、非晶質化の程度が機械的特性に与える影響を明らかにし、最適な使用条件を提案することで、SiCf/SiCの性能向上に寄与する知見を提供した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究は、核融合炉の安全性と効率性を向上させるために重要である。SiC繊維強化SiCマトリックス複合材料（SiCf/SiC）は、高温や放射線に耐えうる材料として核融合炉のブランケット材料に適しているが、放射線照射による収縮と機械的特性の劣化が課題であった。本研究はそのメカニズムを解明し、最適な使用条件を提案することで、核融合炉の実用化に向けた材料設計の基盤を提供する。これにより、持続可能なエネルギー源としての核融合技術の発展に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Silicon carbide (SiC) fiber-reinforced SiC matrix composites (SiCf/SiC) are expected to be used as blanket materials in nuclear fusion reactors, but irradiation-induced shrinkage is a significant issue. This study aimed to investigate the effects of irradiation on SiC fibers and elucidate the mechanisms of shrinkage and expansion. Through SEM and STEM observations, complete amorphization of HNLS fibers and partial amorphization of TSA3 fibers were confirmed, and the degradation of mechanical properties was evaluated. Furthermore, the study clarified the impact of the degree of amorphization on mechanical properties and proposed optimal usage conditions, providing insights that contribute to the performance improvement of SiCf/SiC.

研究分野：原子力材料、核融合材料、照射損傷、セラミックス

キーワード：照射損傷

1. 研究背景

炭化ケイ素 (SiC) 繊維強化 SiC マトリックス複合材料 (SiC^f/SiC) は、高い環境抵抗性、低放射化特性、優れた機械的特性を持つため、核融合炉のブランケット材料として期待されている。しかし、放射線照射による SiC 繊維の収縮現象が応用の制約となっており、そのメカニズムはまだ完全には解明されていない。特に、高結晶性を持つ第3世代の Hi-Nicalon TypeS (HNLS) 繊維と Tyranno SA^{3rd} (TSA3) 繊維においては、照射条件によって収縮や膨張が観察されている。第1世代の Nicalon 繊維や第2世代の Hi-Nicalon 繊維と比較して、第3世代の繊維は高い結晶性を有し、非晶質の SiC_xO_y 相を含まないことが特徴である [1-3]。本研究では、これらの繊維の照射後の微細構造変化と機械的特性の劣化を評価し、収縮と膨張のメカニズムを明らかにすることを目的としている。特に、粒界体積分率の影響を考慮しながら、SiC の非晶質化に焦点を当てた。さらに、照射による繊維の収縮メカニズムを解明するために、これまでの研究で報告されている繊維の特性や照射条件との比較も行う。

2. 研究の目的

本研究の目的は、SiC 繊維の照射誘起収縮と膨張のバランスを理解し、そのメカニズムを解明することである。特に、照射が原子間結合の配置と SiC 繊維の体積変化に与える影響を調査し、これらの変化に寄与する主要因を特定することを目指す。さらに、異なる照射条件下での繊維の振る舞いを比較し、収縮と膨張のメカニズムに関する新たな知見を得ることを目指している。この研究は、将来的な核融合炉材料の改良と設計に重要な貢献をすることが期待される。特に、粒界体積分率の減少が非晶質化の閾値線量に与える影響を明らかにすることに重点を置いている。また、収縮と膨張の比率がどのように変化するかを定量的に評価し、SiC^f/SiC の最適化に向けた指針を提供することを目指す。

3. 研究の方法

SiC^f/SiC 複合材料は、一方向に強化された HNLS および TSA3 繊維で構成されている。これらの繊維は、まず CVI 法を用いて SiC マトリックスを生成し、その後 5.1MeV Si²⁺ イオンビームを用いて 30°C で 100dpa まで照射された。照射後の微細構造の変化を明らかにするために、SEM および STEM を用いた観察が行われた。特に、照射による繊維の構造変化を詳細に観察するために、薄片試料を作製し、高分解能の STEM で観察を行った。また、FIB を用いて作製したマイクロピラーを用いて、室温での圧縮試験を実施し、照射後の機械的特性の変化を調べた。試験は G200 ナノインデントを用いて行われ、変位速度は 3 nm/s に設定された。これにより、SiC 繊維の収縮と膨張の割合、およびそのメカニズムを評価した。さらに、繊維の破断面の観察を通じて、照射による損傷メカニズムを明らかにした。

4. 研究成果

照射後の SiC^f/SiC 複合材料の表面形態は、照射前と比較して大きく変化した (図 1)。特に、HNLS および TSA3 繊維は、照射により膨張が見られ、体積収縮よりも膨張の割合が高いことが示された。これは、SiC の非晶質化が原因であり、粒界体積分率の減少に伴い非晶質化の閾値線量が増加することが確認された。SEM および STEM の観察結果から、HNLS 繊維は完全に非晶質化し、TSA3 繊維は部分的に非晶質化した (図 2)。また、機械的特性の劣化も観察され、特に強度の低下が顕著であった。マイクロピラー圧縮試験の結果、照射後の繊維は圧縮前の変位が大きく、弾性率の低下が見られた (図 3)。これらの結果から、放射線照射による SiC 繊維の非晶質化メカニズムが明らかになり、改良された SiC^f/SiC の開発に役立つ知見が得られた。さらに、粒界体積分率の減少が非晶質化に与える影響について、照射条件との関連性を示すことができた。これにより、SiC 繊維の最適な使用条件を導き出し、将来的な応用に向けた具体的な指針を提供することが可能となった。

本研究で得られた結果は、照射による SiC 繊維の非晶質化が、粒界体積分率の減少と密接に関連していることを示している。非晶質化は、照射によって生成された欠陥の集積と緩和によって引き起こされ、その結果、繊維の膨張が促進される。特に、粒界体積

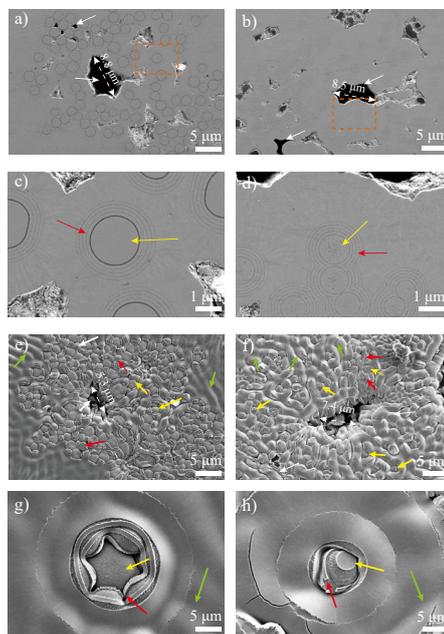


図 1 SiC 繊維の照射による表面形態の変化. (a-d) 照射前、(e-h) 照射後.

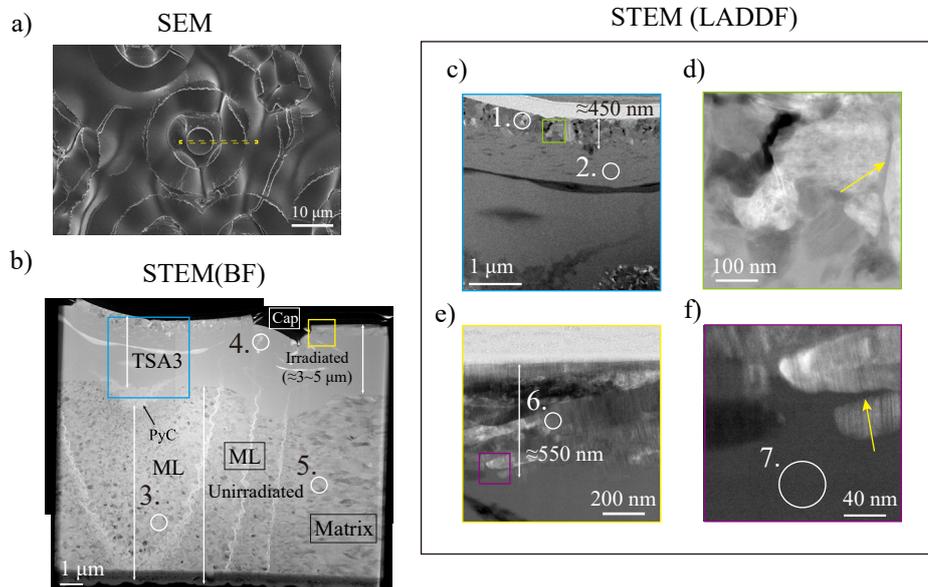


図2 照射による微細組織変化.

分率が低下すると、非晶質化の閾値線量が増加し、繊維の機械的特性の劣化が顕著になることが明らかとなった。また、照射後の繊維の弾性率の低下は、非晶質化による結晶構造の乱れと強く関連している。これらの知見は、SiC 繊維を用いた核融合炉材料の設計において、最適な照射条件を設定するための重要な指針となる。

さらに、照射後の繊維の破断面の観察から、非晶質化が繊維の破壊メカニズムに与える影響についても考察した。非晶質化した繊維は、破断面において脆性破壊が顕著であり、これが機械的特性の劣化の一因であると考えられる。特に、HNLS 繊維においては、完全な非晶質化が観察され、これが強度の低下と関連していることが示唆された。一方、TSA3 繊維は部分的な非晶質化に留まり、そのため機械的特性の劣化は比較的軽微であった。これらの結果から、非晶質化の程度が繊維の強度や弾性率に直接影響を与えることが明らかとなった。

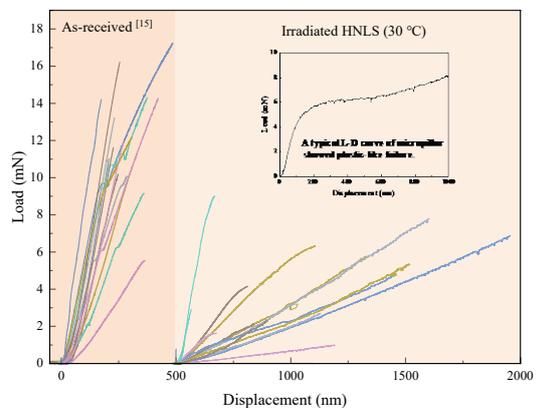


図3 照射前後の強度比較.

最後に、本研究の結果を基に、SiC 繊維の最適な使用条件について具体的な提言を行う。

まず、照射条件に応じた繊維の選定が重要であり、高結晶性を有する繊維を選ぶことで、非晶質化の影響を最小限に抑えることができる。さらに、照射温度や照射線量の最適化によって、繊維の収縮と膨張のバランスを制御することが可能である。また、照射後の繊維の機械的特性の劣化を防ぐための新しい材料設計やプロセスの開発も検討すべきである。このように、本研究はSiC 繊維の照射誘起収縮と膨張のメカニズムを明らかにし、その最適な使用条件を提案するものである。これにより、SiC 繊維を用いた核融合炉材料の性能向上に貢献することが期待される。

<引用文献>

- [1] L. L. Snead, T. Nozawa, Y. Katoh, T. S. Byun, S. Kondo, D. A. Petti, J. Nucl. Mater. 371 (2007) 329-377.
- [2] G. R. Hopkins, J. Chin, J. Nucl. Mater. 141-143 (1986) 148-151.
- [3] S. Kondo, T. Hinoki, M. Nonaka, K. Ozawa, Acta Mater. 83 (2015) 1-9.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Yuan Xinwei, Kondo Sosuke, Yabuuchi Kiyohiro, Yu Hao, Ogino Yasuyuki, Kasada Ryuta | 4. 巻 n/d |
| 2. 論文標題 Effects of grain boundary volume fraction on the threshold dose of irradiation-induced SiC amorphization at 30? °C | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the European Ceramic Society | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.04.042 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Xinwei Yuan, Sosuke Kondo, Hao Yu, Kiyohiro Yabuuchi, Ryuta Kasada |
| 2. 発表標題 Changes in microstructure of SiC fibers irradiated at room temperature |
| 3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Xinwei Yuan, Sosuke Kondo, Hao Yu, Kiyohiro Yabuuchi, Ryuta Kasada |
| 2. 発表標題 Amorphization of SiC fiber under ion irradiation at 30 |
| 3. 学会等名 材料照射研究会2022 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Xinwei Yuan, Sosuke Kondo, Hao Yu, Yasuki Okuno, Kazuya Shimoda, Ryuta Kasada |
| 2. 発表標題 Strength degradation and mechanism of SiC fiber after oxidation |
| 3. 学会等名 日本セラミックス協会 第35回秋季シンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|