安全保障技術研究推進制度　令和６年度終了課題　終了評価結果

1. 評価対象研究課題

（１）研究課題名：CMC 強化材用高耐熱性ジルコニア連続繊維の量産プロセスの確立

（２）研究代表者：物質・材料研究機構　鉄井　利光

（３）研究期間　：令和４年度～令和６年度

2. 終了評価の実施概要

日時　　：令和７年１１月７日

場所　　：ＴＫＰ新橋カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所　理事長、上席研究員

東京大学　名誉教授

平澤　泠（委員長）

横浜国立大学　名誉教授

宇宙航空研究開発機構　航空技術部門

航空利用拡大イノベーションハブ　主幹研究開発員

上野　誠也

東京科学大学　工学院　電気電子系　教授

梶川　浩太郎

近畿大学　名誉教授

京極　秀樹

宇宙航空研究開発機構　航空技術部門

航空利用拡大イノベーションハブ　主幹研究開発員

嶋　英志

日本大学　理工学部　航空宇宙工学科　特任教授

宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所　名誉教授

嶋田　徹

金沢工業大学　情報理工学部　教授

東京工業大学（現　東京科学大学）　名誉教授

藤田　政之

広島大学　大学院先進理工系科学研究科　教授

山本　元道

公共投資ジャーナル社　論説主幹

吉葉　正行

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

超耐熱・耐環境性酸化物系複合材料（第 2 世代 CMC[*1]）を実現するため、SiC/SiC より耐環境性（耐エロージョン特性）が優れていることが確認されているジルコニア系複合材料の強化材として使用できるジルコニア系連続繊維とその量産プロセスの確立と、繊維に対する界面層形成、複合材料化の基本プロセスの開発を本研究の目標とした。研究の実施により、水系乾式紡糸によるジルコニア系連続繊維の量産とその織布化に成功し、湿式法による SnO_2 界面層、PIP 法[*2] を改良した Advanced PIP（APIP）法[*3] による複合材料の緻密化を実現し、開発した連続繊維が高強度 CMC の強化材となることを実証した。また、試作した CMC の超耐環境性を確認し、超音速飛翔体への適用の可能性も確認した。

成果の概要

本研究の最終目標である、超耐環境性酸化物系複合材料の強化材として使用できるジルコニア系連続繊維とその量産プロセスを確立した。目標の達成に必要な三つの課題抽出を行い、各課題について達成すべき目標を定めて研究実施項目とし、以下の成果が得られた。

まず、最重要課題である高強度ジルコニア系連続繊維の量産プロセスの開発については、150～320 ホールのノズルを開発し、100g 以上/時での 200～500tex[*4] の繊維量産を達成した。

この量産した繊維を用いた CMC 用強化繊維の調製プロセス開発では、平織り、朱子織りによる加工性の実証を行い、CMC 化に必須の非反応性界面層付与技術として湿式法酸化物界面層である SnO_2 多孔質界面層の開発に成功し、高温でも機能保持が期待できるハイブリッド界面層に適用できる多孔質酸化物界面層を可能にした。

さらに、量産した繊維の超耐環境性 CMC の強化材としての有効性を評価するためのセラミック複合材料と繊維の特性の関係評価によって、PIP プロセスによって作製した１D-CMC[*5] が室温での曲げ強度がそれぞれ 600MPa（C 界面層と APIP）、300MPa（SnO_2 界面層と PIP）を達成でき、2D-CMC[*5] の超高温エロージョン試験（2300℃、3min.）では、酸化損耗がほぼなく、当初の予想である 1900℃をはるかに超える耐エロージョン特性[*6] を確認でき、量産した繊維の強化材としての有効性が確認できた。

4. 終了評価の評点

Ａ　相応の研究成果をあげた。

5. 総合コメント

前例のないジルコニア系繊維の連続紡糸技術の見込みが立ったことは高く評価できる。当初の目標は達成できなかったが、現段階でも十分な進歩は認められる。

他方、マトリックスと強化繊維に関しては材質面での耐用温度が不十分であり、今後のさらなる材料探索と、プロセス開発が必要である。

本制度の特色に鑑み、得られた研究成果については特許を取得されるとともに、論文発表及び学会発表についても積極的に行い、成果の公表に努めていただきたい。

6. 主な個別コメント

- さらに高温強度の高い繊維が開発できれば、今後の発展性が期待できるが、今後の CMC 材料創製においては、セラミックス材料系の観点から、強度特性向上において必須の繊維体積率などをパラメータとして CMC を仕立てるなどして、予測を行って開発することも必要と考える。
- 世界初の製造法などの優れたノウハウをどのように知財として残すのか、知財戦略を検討いただきたい。
- 成果と目標があまりにも乖離しているため、その理由を詳しく分析し、設定値を見直し、適切なアプローチを探るべきである。
- 具体的・定量的な良い結果が得られており、実用化への可能性も大きいと思われる。後継プロジェクトも決定しており、その成果が期待される。
- 大変興味深い研究成果が得られたことは評価するが、基礎研究（科学や技術の特性の追究）の範疇に属する成果への探索が十分でないことが残念である。

---

*1 CMC：セラミックス基複合材料(CMC：Ceramic Matrix Composites)の略。

*2 PIP 法:マトリックス前駆体を含浸した繊維成型体を焼成して得た多孔質 CMC にマトリックス前駆体ポリマーを含浸し焼成（Polymer Impregnation and Pyrolysis）を繰り返し、マトリックスを緻密化する CMC 製造方法。

*3 APIP 法:PIP 法を改良した高度な PIP 法（Advanced PIP）であり、発展型称することもある。

*4 tex：繊維束 1000m の質量（g)。

*5 1D-CMC、2D-CMC：一次元強化（一方向強化）CMC、二次元強化（二方向強化）CMC の略で、本研究では繊維束を一方向にのみ強化材として用いた CMC および織布を積層して繊維束が例えば 0°/90°方向に強化材として配置された CMC を意味する。

*6 耐エロージョン特性：材料が気体や固体粒子衝突による摩耗や損傷から保護される能力で、本研究の場合は 1900℃を超えるようなこれまで以上の超高温での特性を指す。