

プロジェクト中間評価報告書

評価委員会開催日：2019年11月13日

評価委員氏名（敬称略，五十音順）

五十嵐 正晃 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 常務執行役員
 辻 伸泰 京都大学工学研究科 材料工学専攻 教授
 中島 英治 九州大学大学院総合理工学府 物質理工学専攻 教授
 古原 忠 東北大学金属材料研究所 教授

確定年月日：令和2年3月24日

プロジェクト名	グリーンプロセスを用いた低炭素化社会にむけた高性能構造材料の創製
研究責任者の氏名・所属・役職	御手洗 容子 構造材料研究拠点 副拠点長
実施予定期間	平成28年度～令和4年度
研究目的と意義	地球環境負荷低減の観点から、火力発電や航空機等に使われる燃焼機関の効率向上を目的とし、金属材料、セラミックス及びその複合材料など耐熱材料を対象とする。これらの耐熱材料に対して、今後重要性を増すと考えられる3次元積層造形等のニアネットシェイプ製造技術、システム複雑化に伴う異種材料の接合・剥離技術、低温合成、焼結、鍛造・圧延、材料複合化技術等のグリーンプロセスに関する基礎研究を行い、高性能材料を創製するためのプロセスパラメータの最適化、さらに材料設計のためのプロセス技術構築を行う。さらに、最外層へ耐摩耗性・高潤滑性や耐酸化性を付与するためにコーティング等表面構造制御プロセスを確立し、最適化すること（プロセスセレクション）によって、火力発電や航空機ジェットエンジン等高温機器を高効率化する環境低負荷社会のための高効率、高性能材料を創製する。
研究内容	Ti合金、Ni基超合金、セラミックスなど広い範囲の耐熱材料について、3次元積層造形や異種接合、低温プロセスなど環境低負荷プロセスを適用し、プロセス条件基礎データ取得およびそれによりえらえる組織を観察し、プロセス条件に対する組織や特性の関連性を明確化し、高性能な材料創製のための最適なプロセスを確立する。令和1年度に、プロジェクトサブテーマ再編成により、「コンプレッサーに関わる新材料創製：3次元積層造形によるTi合金創製」および「タービンに関わる新材料創製：酸化物系セラミックスの創製」の2つのテーマについて取り組むことにした。コンプレッサーに関わる新材料創製では、3次元積層造形を用いて特性バランスが取れるTi合金を創製する。また、タービンに関わる新材料創製では、SiC/SiCを超える新しいセラミックス複合材料の開発に取り組む。
ミッションステートメント（具体的な達成目標）	令和1年度に再編成したテーマについて、下記の目標を設定した。 コンプレッサーに関わる新材料創製：プロセスによる疲労限寿命の長寿命化（1.5倍）およびプロセス改良による疲労限強度の高強度化（1.2倍）。最終的に、上記疲労特性を有し、引張強度1100MPa伸び14%を有する材料を創製する。 タービンに関わる新材料創製：新しいZrO ₂ 繊維の長繊維化プロセスの確立、見込みある新しいマトリックス用セラミックスの探索、これらを組み合わせる複合化プロセスの確立、これらにより、1500℃でh引張強度50MPaを有する複合体を創製。

<p>平成28年度～令和1年中間評価時までの主な研究成果（アウトプット）及び研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）</p>	<p>1) 主な研究成果（アウトプット） 3次元積層造形を用いたTi合金の創製では、プロセス条件および熱処理条件と組織、特性の相関解明を進め、強度と延性の両立を実現した。(S.Miyazaki, Mater. Trans., 2019)また機械学習を用いた組織特徴量抽出とそれを活用した力学特性推定手法の提案を行った。(M. Kusano, Additive Man. 2020, submitted)。3次元積層造形により、オーセチック構造の造形を行い、力学特性を評価し、堅牢でポアソン比が負であることを明らかにした。鍛造熱処理条件がTi合金の組織に与える影響を明らかにし、組織による変形機構とクリープ寿命に有効な組織因子を明らかにした。(K. Shimagami, Mater. Sci, Eng, A, 2019, H, Masuyama, Mater. Trans. 2019)。NIMS 開発 Ti 合金組成を3次元積層造形に適用するため、新しい合金粉末の作成に成功した。酸化物繊維製造装置の整備を開始し、プロセス検討を行った。BaZrO₃を選定してZrO₂繊維と複合化を試みた。ZrB₂系セラミックス複合材料の組成を変化させることにより、1400°C以上でも優れた強度を示す材料開発に成功した。(S. Guo, J. of European Ceramic Soc. 2019)セラミックス複合材料の高温変形挙動を明らかにするために、高温におけるき裂その場観察およびびずみ分布測定が可能な高温評価システムの開発に成功した。(R. Inoue, JJ. Of Mater. Sci, 2019)</p> <p>2) 研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト） 平成30年度までの成果で、3次元積層造形については、強度と延性バランスが取れる材料創製のためのプロセスを確立できた。後半ではこれらのプロセス条件を基に、疲労特性についても検討を行う。またNIMS 開発合金組成の新しい粉末を作製することにより、3次元積層造形に適した合金設計に展開が可能であり、従来プロセスでは創製できなかった高性能Ti合金の創製が期待される。また、セラミックス材料については、マトリックス候補になる材料がすでいくつか見出されており、後半、新しい繊維のプロセス開発とマトリックス用セラミックスとの複合化によりSiC/SiCを超える新しい高温セラミックス複合材料の創製が期待される。</p>
<p>中間評価時の進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>中間評価時の進捗状況： 前半で行ってきた研究成果で、プロセスの確立、いくつかの魅力ある材料の提案ができており、計画通りの進捗である。</p> <p>自己点検・評価 平成30年度までの成果で、3次元積層造形については、強度と延性バランスが取れる材料創製のためのプロセスを確立し、後半は3つのサブテーマの研究テーマを3次元積層造形に絞り、疲労特性評価の開始、新しい合金粉末の作製を行うなど、後半で研究を加速するための準備が整った。また、セラミックス材料については、前半で見出されたマトリックス候補になる材料を基に、後半はSiC/SiCを超える新しい複合材料の創製という挑戦的なテーマに絞り、令和1年度に繊維プロセスの確立など、研究を加速するための準備が整った。これまでの成果を生かして、プロジェクト中間でテーマを絞ることにより、後半に研究が加速することが期待される。</p>
<p>プロジェクト名</p>	<p>グリーンプロセスを用いた低炭素化社会にむけた高性能構造材料の創製</p>
<p>研究責任者の氏名・所属・役職</p>	<p>御手洗 容子 構造材料研究拠点 副拠点長</p>
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント</p>

①研究計画、実施体制、マネジメント、連携

(研究開発の方向性・目的・目標の見直し、計画・ロードマップの問題点、実施体制・マネジメントの改善、連携のあり方、ほか)

【A】

- ・本プロジェクトは地球環境負荷低減の観点から、燃焼機関の効率向上を目的とし、金属、セラミックス及びその複合材料など耐熱材料を対象として、3次元積層造形等のニアネットシェイプ製造技術、異種材料接合・剥離技術、低温合成、焼結、鍛造・圧延、材料複合化技術等のグリーンプロセスに関する基礎研究を行い、高性能材料を創製するためのプロセス技術構築を行う。さらにコーティング等表面構造制御プロセスを確立し、高効率、高性能材料を創製する、との明確な目標を掲げ、5つのサブテーマも明確なターゲット、目標設定がなされている。
- ・2019年度からは、5つのサブテーマで得られた知見・技術を組み込んで、新たに2大テーマへ再編、①3次元積層造形プロセスによる新規Ti合金創製と②SiC/SiC複合材料を超える新規セラミックス材料の創製とすることは、プロジェクトの方向性・到達目標を明確化でき、開発加速、効率化の観点で英断である。

【B】

- ・基礎研究ではあるが、プロジェクトとしてタービン用耐熱材料をターゲットにして基盤的な研究を分担して行っている点は評価できる。
- ・研究内容の見直しにより、サブテーマ1-3において積層造形にさらに注力して研究を推進するという一方で、互いの知見を共有した連携、平行して遂行されるSIP研究との間での成果のフィードバックも期待したい。
- ・今後のタービン材料において必須の研究分野であるセラミックスを利用した超耐熱材料の研究について、国研として推進することを期待する。

【C】

- ・運営交付金による個々の研究員の基盤的研究を、発電所タービンやジェットエンジンという共通した出口ターゲットによりまとめるという設定はわかりやすく、評価できる。
- ・統一された出口ターゲットのもと、レーザ積層プロセス、相変態の原子モデリング、非破壊評価技術、構造設計、クリープ・耐酸化性に優れたTi合金、自由エネルギーによる組織予測、高性能TiAl合金と遮熱コーティング、超高温セラミックス複合材料、SiCナノ粒子分散高靱性・高熱伝導性構造物、高温における局所ひずみ測定技術など、幅広い内容の研究が行われており、本分野におけるNIMSのポテンシャルと層の厚さを表している。しかし、評価委員会における説明発表においては、個々の研究成果を羅列的に示しただけに聞こえた。
- ・ジェットエンジンを出口とした研究プロジェクト設定をしているが、その結果としてどのような波及的効果を目指しているのかが不明確である。運営交付金をプロジェクトとして実施する仕組みの中で、実際には個々の研究者の基盤的研究が主体になるとはいえ、プロジェクトというスキームを利用して組織内の連携や外部とのネットワーク構築を計り、研究レベルの底上げを目指すための明確な目標とリーダーシップがあるべきではないか。

【D】

- ・航空機用のジェットエンジンをターゲットにした非常に革新的な材料開発を実施している。

②研究開発の進捗状況及び進め方

(進捗状況の把握、研究責任者の自己点検・評価の妥当性、進め方の見直し(継続・変更・中止等)、研究資源(資金・人材)の再配分、ほか)

【A】

- ・機構内でのヒアリングの結果を受けてテーマ再編を行っている点は評価すべきである。
- ・全体会議を半年に1回実施している。しかしそれ以外の連携的議論はないのか？
- ・個々の研究者間、グループ間の壁を超えて研究者が相互作用し、研究を高め合っていくための具体的な仕組みが示されなかった。

【B】

- ・ジェットエンジンの重要な部材の軽量化は航空機の燃費向上に必要不可欠であり、Ni基の超合金を脱してTi基へ、さらには従来非酸化物セラミックスが候補として考えられていたが、本プロジェクトでは酸化物セラミックスの開発に取り組んでおり、非常に先進的であり、挑戦的である。

【C】

- ・プロジェクト内での定期的な成果報告と、研究の進捗状況による傾斜配分を採用していることは評価できる。

【D】

- ・報告書から主な成果を列挙すると、
 - 1) 3D造形Ti合金組織定量化と特性相関解明
 - ①Ti-6Al-4V合金を対象にレーザー積層造形のプロセス条件を最適化し、強度・延性を両立。
 - ②機械学習を活用し、組織特徴量を抽出、力学特性を予測する手法を開発。
 - 2) 磁気センサーによる非破壊評価技術の高精度化に成功
 - ①アモルファス金属を用いた高感度磁気センサーを有する独自の渦電流探傷試験装置を開発。
 - ②磁場分解能を従来20pTから10pTへ大幅向上。積層造形Ti合金のき裂可視化に成功。
 - 3) 分子動力学法による高精度Ti相変態解析の枠組み構築
 - ①変形、熱揺らぎ、欠陥を導入した4000データを第一原理計算で取得し、機械学習ポテンシャルを実現。
 - 4) 600°C以上での耐酸化性とクリープ特性に優れたTi合金の開発
 - ①耐酸化性を向上させる元素のみで構成する新しい合金を開発。等軸α組織でもbi-modal組織のTIMETAL834に近いクリープ強度を実現。
 - 5) 大型部品用高強度TiAl鍛造合金の開発
 - ①セラミックろつぼ溶解、熱間鍛造で製造可能な新TiAl合金を開発。
 - 6) ポリカルボシラン前駆体から凝集のないナノSiC粒子強化ZrB₂複合材料の創製
 - ①1600°Cまでほとんど線形変形しない強い粒界結合により従来材よりも高い高温強度を有する新材料を開発。

とあり、それぞれ優れた成果と判断される。

 - ・2019年度からは、各サブテーマで得られた上記知見・新技術を組み込んで、新たに2大テーマへ再編し、①3次元積層造形プロセスによる新規Ti合金創製と②SiC/SiC複合材料を超える新規セラミックス材料の創製とすることは、開発加速、効率化の観点で研究マネジメントとして適切と判断される。各サブテーマの位置づけ、役割分担をさらに明確化して、再編された2テーマの完遂に向け、リソース配分の見直し等も柔軟に行って、開発を加速していただきたい。

<p>③論文・特許等の直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）</p> <p>（研究成果の質は世界レベルか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか/期待されるか、研究タイプを考慮した費用対効果はどうか、セレディピティ、ほか）</p>	<p>【A】</p> <ul style="list-style-type: none"> 論文発表は積極的に行われており、問題ないと判断した。 <p>【B】</p> <ul style="list-style-type: none"> これまでの論文投稿数は決して多くないが、論文数に見合う特許出願があることは、成果の新規性、進歩性を示す指標であり、着実にアウトプットを創出していると判断したい。 航空機エンジンタービン材料として、既存のNi基超合金、および現在開発が進められているSiC/SiC複合材料を超える新規セラミックス材料が創製できれば、波及効果は極めて大きい。 3D積層造形による新しいTi合金の開発は、その有効性を発揮できる用途、モデル構造部材を選定して、既存技術、競合技術との優劣をベンチマークしながら、最終到達目標を高めていくのが良いと考えられる。 <p>【C】</p> <ul style="list-style-type: none"> 特許数、受賞数は申し分ないが、知財化の優先が理由なのか論文としての成果発信については少し物足りない。今年度から研究テーマの変更はあるが、連携研究も含めて今後の成果発信を期待する。 <p>【D】</p> <ul style="list-style-type: none"> エフォートを加味した学術雑誌論文を3.5年間で49.18本発表している。常勤研究者の数が33名ほどなので、研究員一人当たり約1.5本であり、年あたりになると1本未満の論文しか出せていない。これは運営交付金による基盤プロジェクトとしても、不十分な数字ではないか。IFが3.5以上6未満の雑誌に13件の論文発表がなされており、質の高い論文を出すポテンシャルは感じられる。 個々に興味深い研究成果、発展性の期待できる研究成果は出てきている。
<p>④見込まれる直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）</p> <p>（質の高い成果は期待できるか、論文・特許数は十分出そうか、新技術や実用材料につながるか、多くの外部資金獲得・共同研究につながるか、他分野への波及効果は、ほか）</p>	<p>【A】</p> <ul style="list-style-type: none"> 2つのテーマに集中することで、各サブテーマの役割が明確となり、それぞれがブレイクスルーを目指した成果を上げることに集中でき、その結果、全体としても成果が上がることを期待する。 3D積層造形による新しいTi合金の開発では、 <ul style="list-style-type: none"> ①NIMS独自のスプレー技術を生かした3D積層造形で、高性能Ti合金部材が開発できないか、 ②新しいアセンブリ技術で異種材料の接合・接着・剥離制御の新領域を開拓できないか、 など、材料－工法－構造の3点セットで新たな構造部材を提案できれば、大きなブレイクスルーとなる。 航空機エンジンタービン材料用新規セラミックス材料では、 <ul style="list-style-type: none"> ①セラミックス繊維強化により、従来のNi基超合金、SiC/SiC複合材料を超える新材料を創製できるか。 ②新プロセスの導入でTiAl低圧タービン翼等の耐用温度を向上できるかなど、チャレンジングな成果が期待される。 <p>【B】</p> <ul style="list-style-type: none"> 克服すべき力学特性は破壊靱性値であり、今後の研究成果が楽しみである。 酸化物セラミックの高温強度は非酸化物に劣ると考えられていたが、本プロジェクトで対象としている酸化物は非常に高強度である。 <p>【C】</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ・個別には興味深い研究成果が出ているので、数多くの論文等として成果が出ることが期待される。 <p>【D】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ1～3における複合材料の開発研究、サブテーマ4、5における積層造形の研究連携が進むことで、耐熱用途での研究の進展が期待される。 	
<p>⑤総合評価 (研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイント、問題点等があれば追加してコメント)</p>	<p>【A】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクトとして、開発の方向性、目標は明確であり、研究責任者の裁量による運営方法も適切であり、2つのテーマでそれぞれ大きな成果が期待される。 ・開発ターゲットが最先端のジェットエンジン用高温構造部材の高性能化であるため、研究リソース、特に予算が十分であるのか疑問が残る。新たな材料－工法－構造の提案につながる指導原理、新技術を創出して、外部資金の獲得、産業界との共同研究をさらに促進することも必要と判断される。機構としても波及効果のある基盤技術研究に対する支援を、引き続きお願いしたい。 <p>【B】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スキーム設定は評価できるものであり、個別の研究成果は優れたものが獲得されている。 ・プロジェクトという形をとるのであれば、運営交付金により個々人の基盤的研究及び技術を発展させるだけでなく、組織としての発展形を思い描き、それに向かって意識を統一するような方向づけの努力と、具体的な政策がプロジェクト内で必要ではないかと感じる。 ・幅広い分野の優秀な研究者が在籍し、先端的な装置群に囲まれているというNIMSの利点を活かし、該当分野で国際的な成果発信が相次ぐような未来を期待する。 <p>【C】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の評価資料では、サブテーマ内に複数あるグループおよび各研究者が7年間という中長期の取り組みの中で、どのように系統立った研究を展開しているかがあまり見えなかった。年度毎の取り組みの資料があると今後の評価もさらに容易になると思われる。 	
委員の評価点 (10点満点)	7, 8, 8, 8	
総合評価点平均 (10点満点)	7.8点	
評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れている。 計画を変更することなく継続すべきである。
9		
8	A	総合的に優れている。 一部計画を見直し継続すればS評価になる可能性がある
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトである。 継続は認めるが、継続する時に、一部計画を見直した方が良い点がある。
4		
3		
2		
2	C	プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要である。

1	大きな問題があり、継続を中止すべきである。
---	-----------------------