

「航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業」

事業原簿 概略版

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 材料・ナノテクノロジー部
-----	---

—目次—

内容

概 要	2
プロジェクト用語集	6
研究開発項目ごとの成果	7
1 研究開発項目①：「革新的エンジン部品製造プロセス開発」	7
2 研究開発項目②：「革新的合金探索手法の開発」.....	13
3 研究開発項目③：「航空機エンジン用評価システム基盤整備」.....	37

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・プロジェクト開始時関連資料（事前評価結果、パブリックコメント募集の結果）
- ・特許論文等リスト

概要

		最終更新日	令和5年5月1日	
プロジェクト名	NEDO プロジェクト名 航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業 METI 予算要求名称 航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業	プロジェクト番号	P21007	
担当推進部/ PMまたは担当者 及び METI 担当課	材料・ナノテクノロジー部 PM 飯山 和亮（令和3年4月～令和5年5月現在） 材料・ナノテクノロジー部 主査 小西 弘之（令和3年4月～令和5年5月現在） METI 担当原課：製造産業局 金属課、航空機武器宇宙産業課			
0. 事業の概要	航空機の燃費改善・環境適合性向上の要請に応えるため、航空機エンジン向けに高機能材料を開発し、さらにその材料を用いた部品製造、量産化のための加工技術プロセス（特に鍛造プロセスに焦点を当てる）の効率化、高度化を図っていく。また、関連企業や研究機関等と連携し、航空機用エンジンに関する材料データ蓄積及び強度評価、性能評価等に必要なデータベースを整備する。川下である部素材産業及び加工・製造産業の連携により、当該部品を獲得し、航空機エンジン産業の国際競争力強化を目指す。			
1. 事業のアウトカム（社会実装）達成までの道筋				
1.1 本事業の位置付け・意義	<ul style="list-style-type: none"> ・我が国の航空機産業は、民間航空機の機体構造・エンジンの国際共同開発事業を中心に産業規模を拡大させてきた。近年の世界的な CO₂ 排出量削減の動向を受け、各航空会社は燃費効率の高い旅客機の導入を進めている。これに伴い、航空機産業においても燃費性能を重視した、より性能の良い航空機・エンジンの製造が求められ、その結果、技術獲得競争がさらに激化している。 ・このような中、我が国航空機産業の競争力を強化していくためには、基礎開発だけでなく応用開発、特に量産段階における生産性向上を目指した部品や製品一体の製造技術向上や、環境性能の向上に資する材料や要素技術の開発が不可欠となっている。航空機エンジンに注目した場合、燃費向上に直結する高圧タービン技術や、更に材料分野に目を転じると航空機エンジン材料の軽量化、耐熱性・耐久性向上を目指した新たな材料の開発が重要である。 ・また、航空機産業では最終製品として求められる安全性・信頼性の高さ故、材料の段階から厳しい認証基準等が求められる。 ・これらのことから、本事業では我が国の航空機エンジン向け材料及び部品製造における競争力向上に資するため、下記を実施していく。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 量産化を志向した航空機エンジン部品の設計・製造プロセス(特に鍛造プロセス)の効率化 2. 人工知能(AI)、マテリアルズ・インフォマティクス(MI)等の計算機科学を利用した国産材料の開発 3. 航空当局の認証取得に向けた、航空機エンジンの材料特性及び実環境下における性能等のデータ収集、整備、蓄積 ・なお、航空機エンジンの耐熱性向上については 2020 年に文部科学省及び経済産業省が設置した「マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合」の中で「極限機能を有するマテリアル」及び「マルチマテリアル化技術」として取り上げられており、政府としても注力していくべきとされている。 			
1.2 アウトカム達成の道筋	NEDO は、内外の技術開発動向・政策動向・市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析/検討するとともに、技術推進委員会等において、研究開発の進捗管理や目標の見直しを行う等、細やかなマネジメントを実行することで、社会ニーズに合った研究開発を推進し、確実な実用化へと繋げる。			
1.3 知的財産・標準化戦略	知財マネジメント基本方針（「NEDO 知財方針」）に関する事項 NEDO 知財方針に記載された「全実施機関で構成する知財委員会（又は同機能）」を整備し、「知財の取扱いに関する合意書」を作成する。			

2. 目標及び達成状況	
2.1 アウトカム目標 及び達成見込み	<p>■ アウトカム目標</p> <p>本事業で開発した成果が次世代航空機に搭載され、航空機エンジンの高効率化と軽量化による燃費改善が図られることにより、2040 年において、92.8 万トン/年の CO₂ 削減が期待される。</p> <p>■ 達成見込み（令和 4 年度末時点）</p> <p>材料データベースを用いたエンジン性能効果検証により CO₂ 排出量の削減効果を算出する。検証に用いるエンジンモデル等を決定するため、航空エンジン技術全般について、過去数年から比較的近い将来までの動向調査を行った。予備検討として材料の耐用温度を用いて CO₂ 排出量を見積もるシステムの構築に着手し、2024 年度以降にデータベースに蓄積された材料特性を用いて削減量を算出可能とする見込みである。</p>
2.2 アウトプット目標 及び達成状況	<p>■ 研究開発項目①「革新的エンジン部品製造プロセス開発」</p> <p>【アウトプット目標（令和 7 年度末）】</p> <p>経済合理性を担保した国内における航空エンジン部品（ディスク部分）の鍛造プロセスを確立し、エンジン部品試作・評価を行う。</p> <p>【達成状況（令和 4 年度末時点）】</p> <p>抵抗式金型加熱については、金型表面温度 1000～1100℃において、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±10℃となるシステム、誘導式金型加熱については、金型表面温度 1000～1100℃において、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±30℃となるシステムを構築すべく、主要な装置と関連する金型の作製を進めた。</p> <p>■ 研究開発項目②「革新的合金探索手法の開発」</p> <p>【アウトプット目標（令和 7 年度末）】</p> <p>金属バルク材料の自動合成システム、結晶構造解析、組成分析、金属組織像取得などを順次分析するシステムを構築し、これらのプロセスを利用することで、一日当たり 100 サンプル数のデータを取得可能とする。その結果、従来の 1/10 の材料開発期間及び開発コスト 1/100 を達成する。またコンビナトリアル・バルク創製技術を用いて軽量・耐熱性に優れたハイエントロピー合金材料を 2 つ以上開発するとともに、その製造プロセスを開発する。マテリアルズ・インフォマティクス・ツールを構築して、代表的な金属 20 種のデータを蓄積する。</p> <p>【達成状況（令和 4 年度末時点）】</p> <p>4 種類の金属材料を所望の量を用いて自動合成を行うシステムの開発に成功し、中性液体を用いた電解砥粒エッチングによる金属表面の平坦化を可能にした。また、結晶構造解析、組成分析、金属組織像取得、電気抵抗率(導電率)、ピッカース硬さ試験などの複数のハイスループット評価を連続的に評価できるシステムの構築を行った。さらに、耐熱性および軽量化に優れたハイエントロピー合金材料予測を可能とするマテリアルズ・インフォマティクス・ツールを構築し、これらのシステムを順次活用して多量のデータ取得およびデータ解析を可能にする技術的な指針を得ることができた。</p> <p>■ 研究開発項目③「航空機エンジン用評価システム基盤整備」</p> <p>【アウトプット目標（令和 7 年度末）】</p> <p>航空機エンジン用の評価システム基盤を整備し、3 部材以上での活用を可能とするデータベースを構築する。</p> <p>【達成状況（令和 4 年度末時点）】</p> <p>ブレード用単結晶合金およびディスク用鋳鍛造合金の組成、熱処理条件等の仕様を検討した。またクリープ特性、疲労特性、き裂進展特性等のデータ取得を開始した。汎用海外材料と比較し、特性の優位性を確認している。これらの取得データを整理するためのデータベースソフトウェアを設計し、システムを構築した。今後データの蓄積によりデータベースを充実させ、部材設計に結び付くよう機能を改良していく。</p>

3. マネジメント							
3.1 実施体制	経産省担当原課	製造産業局 金属課、航空機武器宇宙産業課					
	プロジェクトリーダー	国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 教授 榎 学					
	プロジェクトマネージャー	材料・ナノテクノロジー部 主任 飯山 和亮					
	委託先および助成先	研究開発項目①「革新的エンジン部品製造プロセス開発」 助成先：(株) プロテリアル 研究開発項目②「革新的合金探索手法の開発」 委託先：(国研) 産業技術総合研究所、 (一財) 金属系材料研究センター、JX 金属 (株)、筑波大学 研究開発項目③「航空機エンジン用評価システム基盤整備」 委託先：(国研) 物質・材料研究機構 (株) I H I、川崎重工業 (株)、三菱重工業 (株)、 三菱重工航空エンジン (株)、(株) 本田技術研究所					
3.2 受益者負担の 考え方 事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実 績額 (評価実施年 度については予算 額) を記載) (単位:百万円)	主な実施事項	R3fy	R4fy	R5fy	R6fy	R7fy	
	研究開発 項目①		—————→				助成
	研究開発 項目②	—————→			—————→		委託→助成
	研究開発 項目③	—————→					委託
	会計・勘定	R3fy	R4fy	R5fy	R6fy	R7fy	総額
	特別会計 (需給)	442	839	1240	()	()	2521
	開発成果 促進財源	0	421	0	()	()	421
	総 NEDO 負担額	442	1260	1240	()	()	2942
	(委託)	442	1184	1125	()	()	2751
	(助成) : 助成率 1/2	0	76	115	()	()	191
3.3 研究開発計画							
情勢変化への 対応	<p>■ NEDO としても積極的に情報収集活動に参画</p> <p>当該分野で先行する米国の動向を中心に、事業者と共に NEDO としても積極的に情報収集活動 (国際会議、調査機関、展示会、意見交換) に参画して研究開発の方向性を議論、プロジェクトマネジメントに役立てた。</p> <p>「注視すべき米国での超合金開発動向」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・GE/NASA/Ohio State Univ.が開発した Ni 基超合金 ・米国ナショプロ「Material Genome Initiative」、「ULTIMATE」 ・次世代の超耐熱合金 (高融点ハイエントロピー合金) および関連要素技術 						

	<p>■ 研究開発項目②「革新的合金探索手法の開発」における事業方針の見直し</p> <p>技術推進委員会での結果も踏まえ、高品質かつ魅力ある自動合成システム*1を構築すべく、実施内容の充実化及び 開発期間/費用について議論を重ね、基本計画変更の妥当性について技術推進委員会にて審議、経済産業省をはじめとする関係各所への調整を行い、事業方針を見直した。</p> <p>*1：高品質かつ魅力ある自動合成システムとは ①高品質な合金を作製可能な自動合成システムを開発する ②MI/AIを組み合わせたシステムを高度化する。</p>	
中間評価結果への対応	-	
評価に関する事項	事前評価	令和2年11月実施 担当部 材料・ナノテクノロジー部
	中間評価	令和5年5月実施予定 担当部 材料・ナノテクノロジー部
	終了時評価	-
別添		
投稿論文	「査読付き」0件、「その他」4件	
特許	該当なし	
その他の外部発表 (プレス発表等)	学会発表・講演；5件、新聞・雑誌等への掲載；7件、その他（展示会等）；1件	
基本計画に関する事項	作成時期	令和3年2月制定
	変更履歴	令和3年12月改訂（研究開発項目①に関する事項の変更） 令和5年2月改訂（研究開発項目②に関する事項の変更）

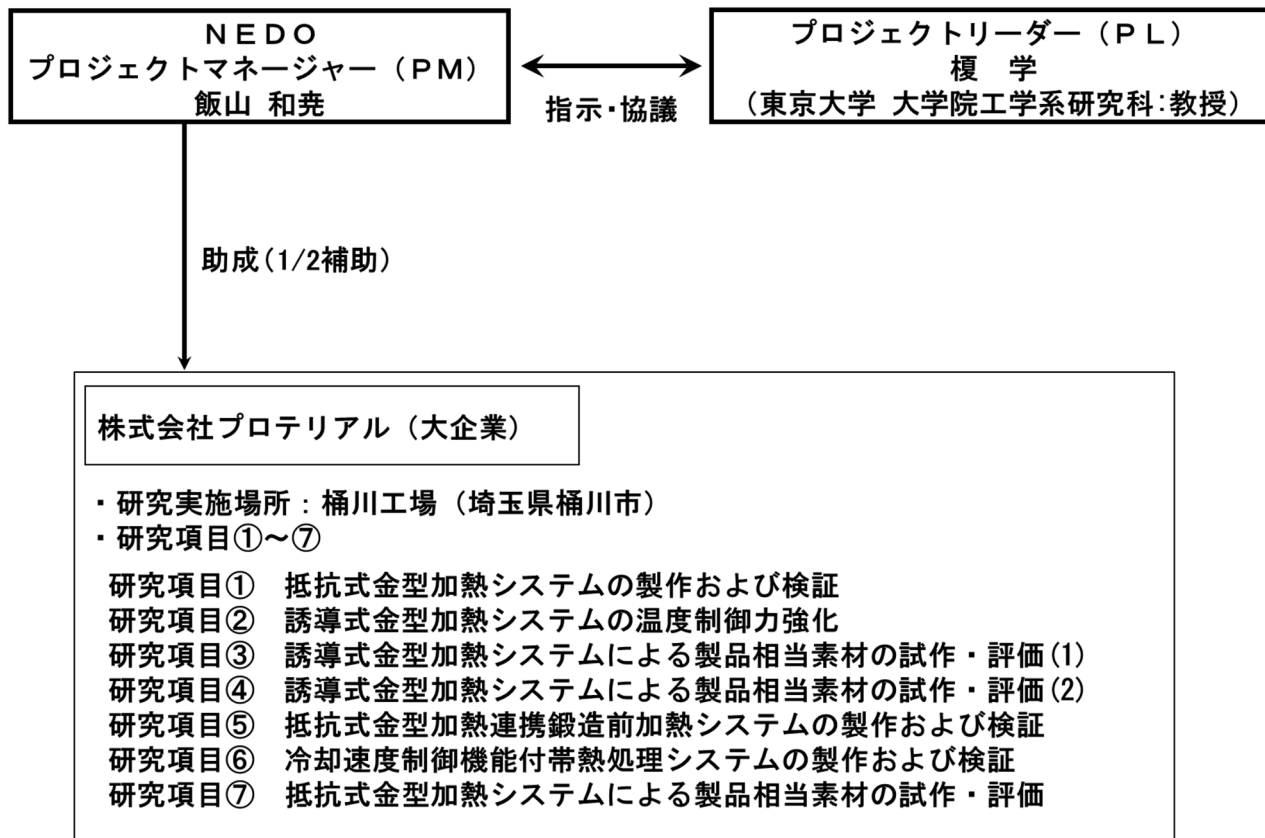
プロジェクト用語集

用語	用語の説明
アウトカム（社会実装）	研究開発に係る活動自体やそのアウトプットによって、その受け手に、研究開発を実施または推進する主体が意図する範囲でもたらされる効果・効用
アウトカム目標	成果の本質的又は内容的側面であり、活動の意図した結果として、定量的又は定性的に評価できる、目標の達成度を測る指標 NEDOプロジェクト基本計画上は、市場創成効果や省エネルギー効果、CO ₂ 削減効果等、社会や経済（市場）に対する貢献を主たるアウトカム目標として設定する
アウトプット	研究開発に係る活動の成果物、目的達成に向けた活動の水準を表す
アウトプット目標	成果の現象的又は形式的側面であり、主として定量的に評価できる、活動した結果の水準を測る指標
基礎的・基盤的研究開発	プロジェクト終了後5年を目処に（もしくはそれ以上の期間で）、実用化まで達することを目指す研究開発
事業化	当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献すること
実用化	当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されること
知的基盤・標準整備等の研究開発	知的基盤・標準整備等を目的としており、研究開発成果による事業化・実用化を目標としていない事業
波及効果（インパクト）	研究開発を実施または推進する主体が、必ずしも意図しない範囲で副次的にもたらされる効果・効用
標準的研究開発	プロジェクト終了後5年を目処に、事業化まで達することを目指す研究開発
プログラム	目指すべき将来像（ビジョン・目標）を実現するための研究開発のまとめ

研究開発項目ごとの成果

1 研究開発項目①:「革新的エンジン部品製造プロセス開発」

1. 実施体制



2. 期間/予算

事業期間:2022年6月10日から2026年3月31日まで

予算:下記表の通り。

今後予算要求

年度	2021	2022	2023	2024	2025	合計
研究開発項目						
①革新的エンジン部品製造プロセス開発	-	76	115	-	-	191
②革新的合金探索手法の開発	200	535	580	-	-	1,315
③航空機エンジン用評価システム基盤整備	255	663	545	-	-	1,463
合計	455	1,274	1,240			2,969

(単位:百万円)

3. 目標

【中間目標(2023 年度末)】

経済合理性を担保した国内における航空エンジン部品(ディスク部分)の鍛造プロセス候補を決定する。具体的な目標は以下のとおりである。

(1) 抵抗式金型加熱方式:

- ・金型表面温度 1000~1100°Cにおいて、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±10°Cとなる抵抗式金型加熱システムを開発し、被加工材が以下の特性を満足することを確認する。
- ・形状:円板形状
- ・金属組織:平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒であること
(ASTM E112 による)

(2) 誘導式金型加熱方式:

- ・金型表面温度 1000~1100°Cにおいて、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±30°Cとなる誘導式金型加熱システムを開発し、製品相当素材の試作を通して、製品相当素材が以下の特性を満足することを確認する。
- ・形状:設定した製品形状が得られる型打鍛造形状
- ・金属組織:平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒であること
(ASTM E112 による)

【最終目標(2025 年度末)】

経済合理性を担保した国内における航空エンジン部品(ディスク部分)の鍛造プロセスを確立する。また、確立した製造プロセスにより、部品試作・評価を行う。具体的な目標は以下のとおりである。

(1) 抵抗式金型加熱方式:

- ・さらに高い品質要求を安定して実現するための鍛造前素材加熱システムを構築し、その機能を検証する。併せて製品種毎に熱処理(溶体化処理)直後の冷却速度の制御が可能な熱処理システムを構築し、その機能を検証する。構築したシステムを用いて、製品相当素材を試作し、製品相当素材が以下の特性を満足することを確認することにより、量産適用性を検証する。
- ・形状:設定した製品形状が得られる型打鍛造形状
- ・金属組織(*1):平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒であること
(ASTM E112 による)
- ・引張特性:(649°Cあるいは 650°Cにて)引張強さ 1300MPa 以上、耐力 1000MPa 以上、伸び 10%以上、絞り 10%以上

(*1):エンジンプライムの要求によって変わる可能性あり

(2) 誘導式金型加熱:

- ・さらに製品相当素材の試作実績を増すとともに、製品相当素材が以下の特性を満足することを確認する。

- ・形状: 設定した製品形状が得られる型打鍛造形状
- ・金属組織(*1): 平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒であること (ASTM E112 による)
- ・引張特性: (649°Cあるいは 650°Cにて)引張強さ 1300MPa 以上、耐力 1000MPa 以上、伸び 10%以上、絞り 10%以上

(*1): エンジンプライムの要求によって変わる可能性あり

事業項目	2022 年度				2023 年度				2024 年度				2025 年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①抵抗式金型加熱システムの製作および検証																
②誘導式金型加熱システムの温度制御力強化																
③誘導式金型加熱システムによる製品相当素材の試作・評価(1)																
④誘導式金型加熱システムによる製品相当素材の試作・評価(2)																
⑤抵抗式金型加熱連携鍛造前加熱システムの製作および検証																
⑥冷却速度制御機能付帯熱処理システムの製作および検証																
⑦抵抗式金型加熱システムによる製品相当素材の試作・評価																

4. 成果の達成状況と根拠

抵抗式金型加熱については、NEDO 先導研究(2019~2020 年度)で得られた設計技術を活用して金型加熱装置の製作を進めた。また、金型加熱装置と組み合わせる専用の金型の製作を順次進めた。2023 年度には、金型加熱装置および金型を完成させ、金型表面温度 1000~1100°Cにおいて、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±10°Cとなること、同システムを用いて鍛造した素材で円板形状と平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒となる金属組織が得られていることを検証する。

誘導式金型加熱システムについては、温度制御能力を強化するための、追加の装置導入を完了した。また、金型加熱装置と組み合わせる専用の金型の製作を順次進めた。2023 年度には、金型加熱装置および金型を完成させ、金型表面温度 1000~1100°Cにおいて、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±30°Cとなること、同システムを用いて鍛造した素材で、設定した製品形状が得られる型打形状であること、平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒となる金属組織が得られていることを検証する。

事業項目①: 抵抗式金型加熱システムの製作および検証

達成状況: ○

抵抗式金型加熱については、NEDO 先導研究(2019～2020 年度)で作製した抵抗式金型加熱試験機(図 1)で得られた設計技術を活用して、シミュレーション(図 3)も併用しながら、既設の 6000ton 油圧プレス用の新規の抵抗式金型加熱装置(図 2)の仕様検討、設計を実施し、金型加熱装置の製作を進めた。また、自社既開発の金型用 Ni 基合金を用いた、金型加熱装置と組み合わせる専用の金型の製作を順次進めた(図 4)。2023 年度には、抵抗式金型加熱装置および専用金型を完成させ、金型表面温度 1000～1100℃において、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±10℃となること、同システムを用いてディスク用 Ni 基合金の鍛造を行い、鍛造した素材で円板形状と平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒となる金属組織が得られていることを検証する。

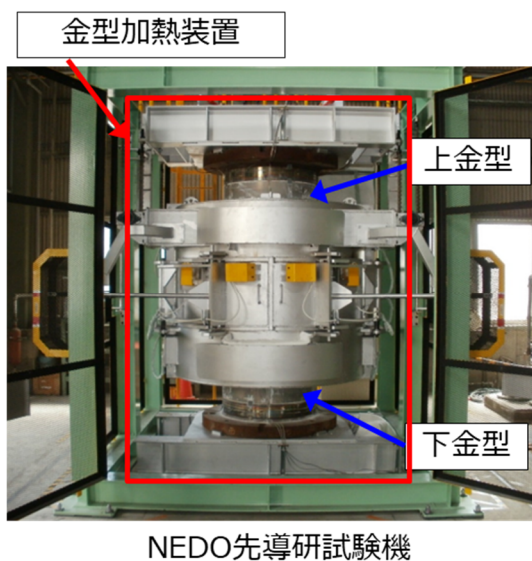


図 1 先導研による金型加熱試験機

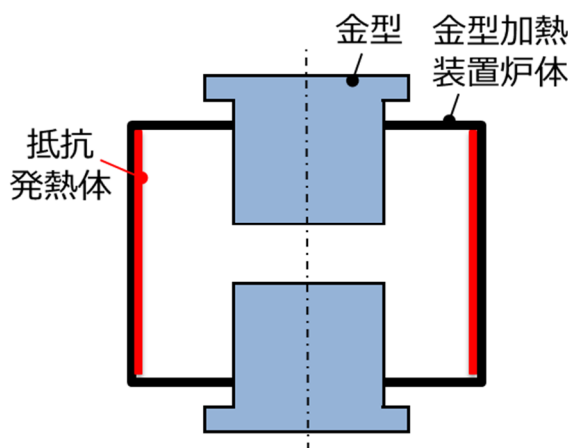


図 2 抵抗式金型加熱方式の模式図

<平金型>

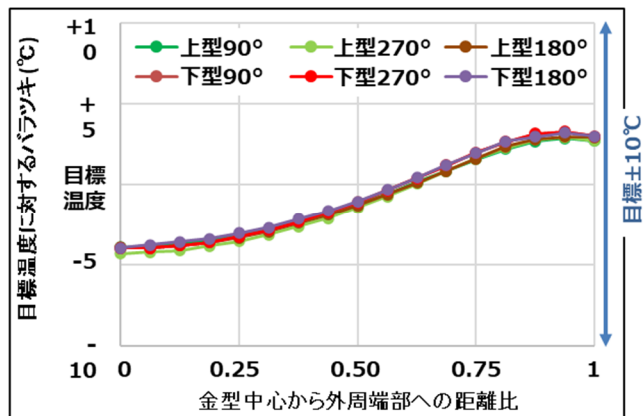
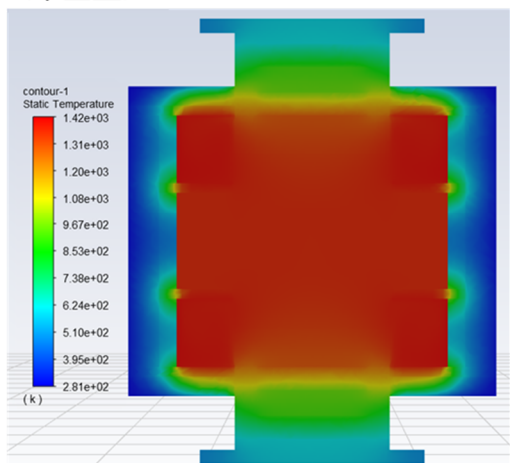


図 3 抵抗式金型加熱方式による金型および雰囲気温度分布の計算例

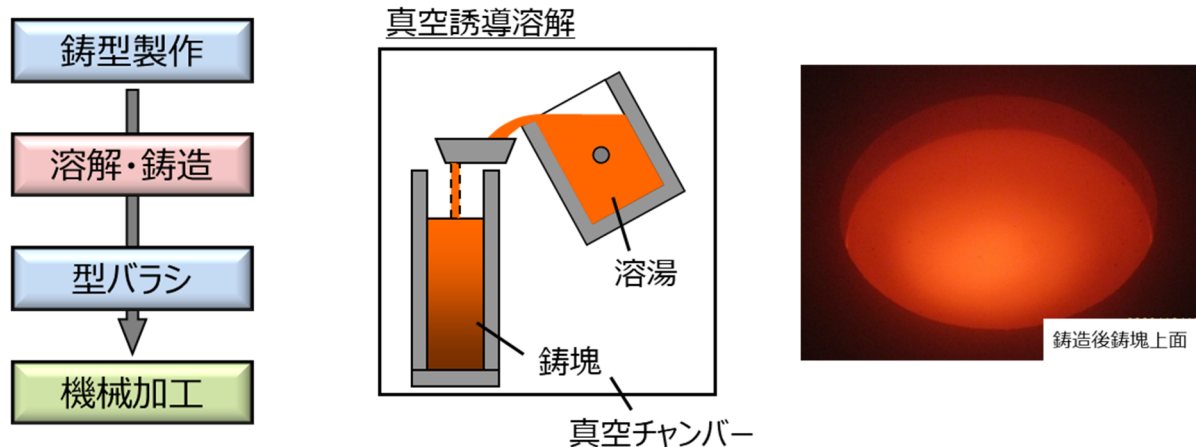
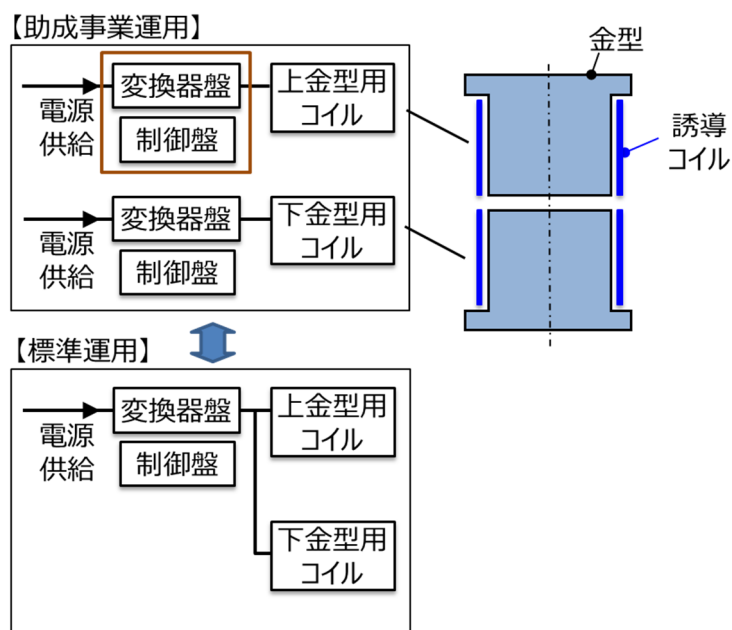


図4 自社開発合金による専用金型の製作工程、溶解-鋳造の模式図および鋳造時の写真

事業項目②: 誘導式金型加熱システムの温度制御力強化

達成状況: ○

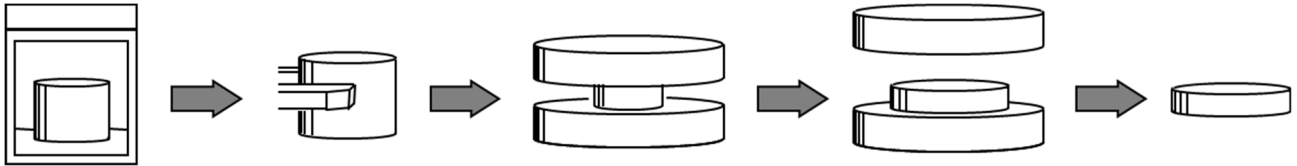
誘導式金型加熱システムについては、株式会社プロテリアルにて実績のある方式であるが、さらに安定した精度の鍛造を実現するために、温度制御能力を強化するための、追加の装置導入を完了した。また、抵抗式金型加熱システムと同様に、自社既開発の金型用 Ni 基合金を用いた、金型加熱装置と組み合わせる専用の金型の製作を順次進めた。2023 年度には、金型加熱装置および金型を完成させ、金型表面温度 1000~1100°Cにおいて、金型表面の被加工素材との接触域での温度差が±30°Cとなることを検証する。



事業項目③: 誘導式金型加熱システムによる製品相当素材の試作・評価(1)

達成状況:○

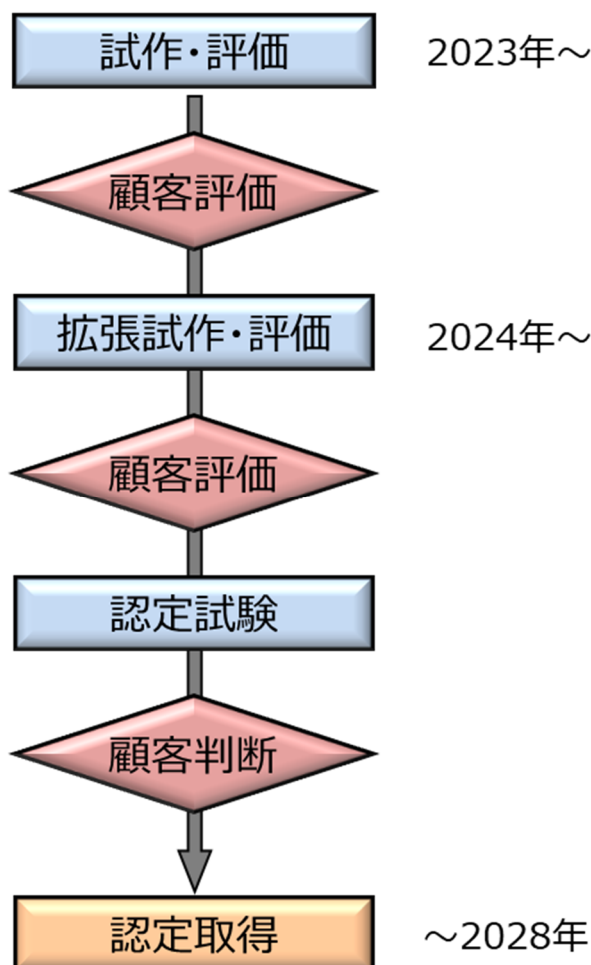
誘導式金型加熱システムを用いてディスク用 Ni 基合金の鍛造試作を行い、鍛造した素材で、設定した製品形状が得られる型打形状であること、平均粒径 ASTM No. 8(22 μm)あるいはそれより細粒となる金属組織が得られていることを検証する。



5. 成果の意義

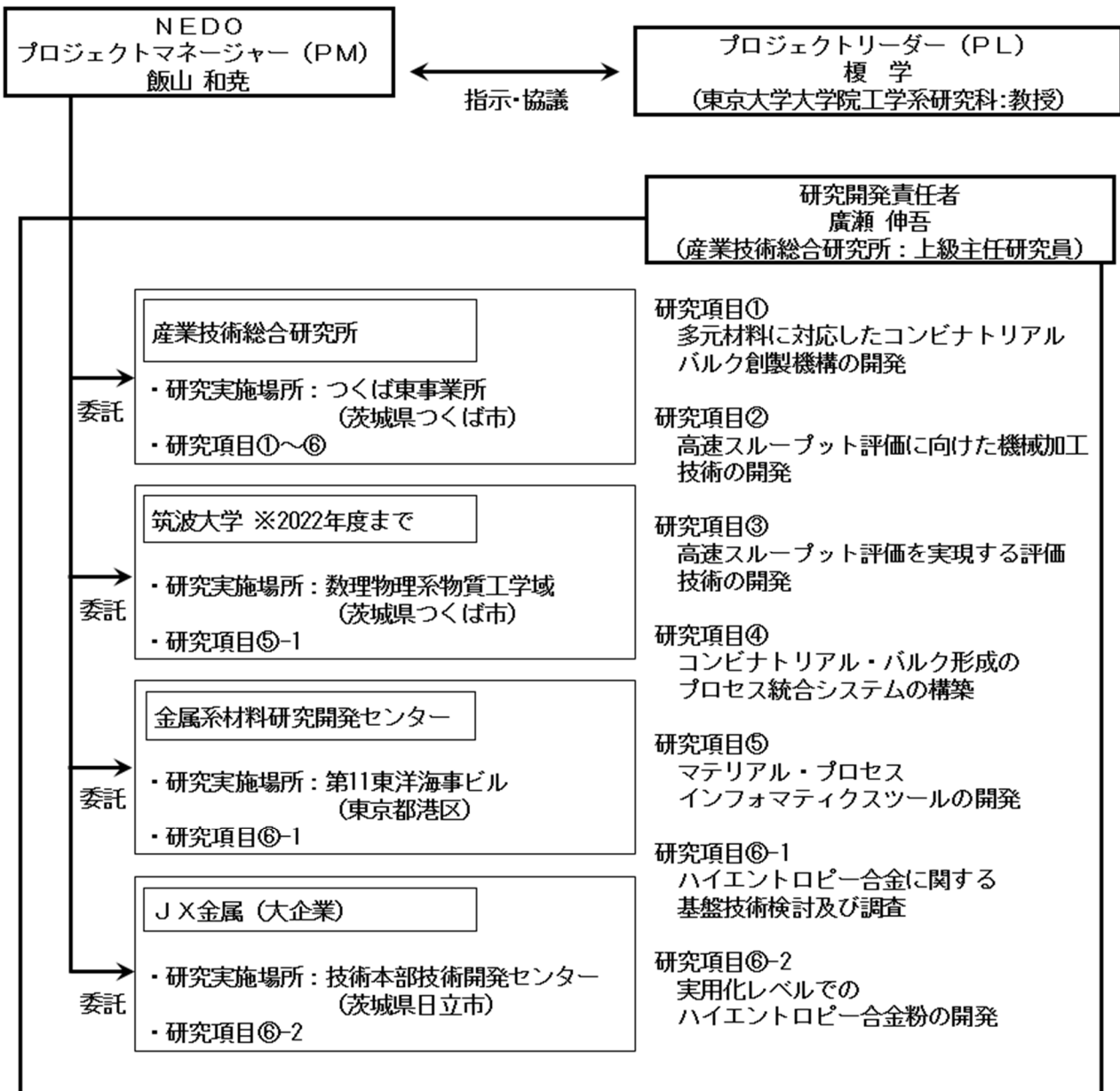
(株)プロテリアル桶川工場が保有する 6,000ton 油圧鍛造プレスと、開発した抵抗式金型加熱システム、誘導式金型加熱システムとの組合せによって、初期設備投資を圧縮しつつ、現時点では欧米の限られた素材メーカーしか供給できない、最も品質要求水準の高い高圧系ディスク素材の国内での製造が実現可能であることを技術的側面から確認できる。二つの金型加熱システムは、製品要求に合わせて使い分け、随時取付け、取外しが可能な付帯装置であるため、生産の柔軟性、鍛造プレスの高稼働率での運用といった生産性の点での魅力的な特徴を持つ。

6. 実用化への道筋と課題



2 研究開発項目②:「革新的合金探索手法の開発」

1. 実施体制



2. 期間/予算

事業期間:2021年5月21日から2026年3月31日まで

予算:下記表の通り。

今後予算要求

研究開発項目 \ 年度	2021	2022	2023	2024	2025	合計
①革新的エンジン部品製造プロセス開発	-	76	115	-	-	191
②革新的合金探索手法の開発	200	535	580	-	-	1,315
③航空機エンジン用評価システム基盤整備	255	663	545	-	-	1,463
合計	455	1,274	1,240			2,969

(単位:百万円)

3. 目標

研究開発項目① 多元材料に対応したコンビナトリアル・バルク創製機構の開発

(担当:産業技術総合研究所)

① -1 多元材料対応のための同時異種材供給機構の開発

【目標(2021年度)】

多元材料に対応したコンビナトリアル・バルク創製機構を開発するため、粉末噴射ノズル、機構制御部を導入し、4種類の材料を供給可能とする。また、粉末送給機構を導入し、1kg以下の少ない粉末の使用量で20回の試行実験を可能とさせる。

【目標(2022年度)】

高品質な合金を作製可能な自動合成システムを開発する。作製した材料の品質を確保するためには、現有の航空機エンジンに使われている材料(インコネル718など)のバルク材と比較検証を行い、硬さや引張強度などの機械特性試験により同等かそれ以上の性能が得られること、6mm角以下のバルク体を評価する際に光学顕微鏡で複数箇所観察し、原料粉末の溶け残りなど異常がないこととする。新たに粉末噴射ノズル、機構制御部を導入し、6種類の材料を供給可能とする。また、10%以下の精度で材料供給を制御可能にする粉末送給機構を導入し、実現する。これらの技術を開発することにより、バルク評価可能なバルク体を5分以内で一つ形成することができるようにする。

【目標(2023年度)】

複数の単元素粉末や合金粉末を用いて高エントロピー合金の作製を行い、対応可能とする元素および合金の種類を6種類以上に増やす。

① -2 形状精密制御技術の開発

【目標(2021年度)】

後工程となる切削、研削、研磨において平坦化処理を行う上で、可能な限り平坦化、微細化されてい

ることが望まれる。そこで、ステージ駆動系、ステージ制御部を導入し、数 μm 以下の表面の凹凸を制御可能とするとともに、6mm角以下のバルク形成を基板上に形成可能とする。

① -3 雰囲気制御機構の開発

【目標(2021年度)】

可能な限り酸素や水素などの不純物の混入を防ぐために、グローブボックスによるガス循環による極低酸素濃度化により酸化を防止するガス雰囲気制御機構、ガス純化装置を導入し、ppmオーダーの酸素および水分量の環境とする。

【目標(2022年度)】

グローブボックスによるガス置換による極低酸素濃度化により酸化を防止するガス雰囲気制御機構、ガス純化装置を導入し、ppmオーダーの酸素および水分量の環境とする。また、作製した合金材料の品質に影響する合金合成時の酸素濃度や水分量などを条件パラメータとし、条件パラメータと試料の品質の関連性についてマッピングを行うこととする。

【目標(2023年度)】

循環型グローブボックスによる低酸素濃度のバルク形成を行う。また、高融点材料のクラック発生や内部応力低減のため、基板加熱機構を開発し、高品質バルク形成を行う。

① -4 レーザ光高反射率材料向け造形ガン機構の開発

【目標(2021年度)】

レーザ光源の波長に対して反射率が高く吸収が少ない材料系にも適用できるように、ハイパワーの近赤外光レーザ発振器およびその光学系を導入し、銅およびアルミニウム系材料への対応を可能とする。

【目標(2022年度)】

レーザ光源の波長に対して反射率が高く吸収が少ない材料系にも適用できるように、ハイパワーの短波長レーザを導入し、銅およびアルミニウム系材料への対応を可能とする。

【目標(2023年度)】

ハイパワー短波長レーザを用いたバルク形成を行い、合金作製時の合金種の適用拡大を行う。

①-5 波長分割を利用したリアルタイムバルク形成モニタリング手法の開発

【目標(2021年度)】

金属蒸発の情報を得るためには、加工中での加工点の観測が最も重要である。そこで、波長分割を利用したバルク形成中でのリアルタイム観測を実現する。

【目標(2022年度)】

加工中で得られる大量の画像データを解析することで、異常状態を防いだり、元素含有量の制御に活用するため、得られた観測現象を機械学習で学習、判定可能とするアルゴリズムを開発する。

【目標(2023年度)】

機械学習を組み込んだ判定機能を活用し、バルク形成中での金属蒸発による組成ずれに関する知見を得る。

研究開発項目② 高速スループット評価に向けた機械加工技術の開発

(担当:産業技術総合研究所)

②-1 電解砥粒研磨による金属エッチング機構の開発

【目標(2021年度)】

造形バルクの寸法が小さく、また高さの異なる造形バルクが40×40mmの板上に12個以上並び、隣の造形バルクの間も狭いため、電解砥粒研磨機構を導入し、造形バルク用小面積電解砥粒エッチング処理工具を開発する。

【目標(2022年度)】

電解砥粒エッチング機構を導入し、加工液の供給、電解砥粒エッチング、加工液回収、洗浄の一連の動作を1サンプルあたり7分以内で実現する。

②-2 切削・研削を組み合わせた連続機械加工システムの構築

【目標(2021年度)】

電解砥粒エッチング処理を行うために必要な平坦面を確保するため、切削、研削加工機構を導入し、切削・研削にて、造形バルク表面の仕上げを、表面粗さRa 0.2 μm以下にする。また、切削と研削加工で、加工時間を1サンプルあたり20分以内で実現する。

【目標(2022年度)】

試料搬送のためのステージ駆動系を導入し、切削・研削・金属エッチングを組み合わせた連続機械加工システムを構築する。

【目標(2023年度)】

新たに精密研磨、洗浄、乾燥工程を追加し、機械加工による造形バルク表面の仕上げを、表面粗さ(Ra)を1 nm程度とし、超平坦化バルク面形成を実現する。また、10分で1個のバルク体の粗切削(20個で200分)、10分で1個のバルク体の精密研削(20個で200分)を実現する。

②-3 精密機械加工のためのモニタリング技術の開発

【目標(2021年度)】

造形バルクの高さや表面状態はバルクごとに異なっている。また、切削速度や切り込み量を決定するためにも状態の確認が必要となる。そこで、造形バルク用に、切削・研削高さ調整のための造形物高さ測定機構を導入し、構築する。

【目標(2022年度)】

逃げ面摩耗幅が大きくなると切削能力が下がり、加工が進まなくなるため、安定した切削状態かどうかモニタリングする必要がある。そこで、切削・切削力測定機構を導入し、切削抵抗をモニターすることで切削条件を決定する技術を開発する。

【目標(2023年度)】

機械加工間において切削、研削、研磨の加工面の粗さやバルク高さ情報を共有化するために、各工程において非接触による表面プロファイル観測を行えるようにする。

研究開発項目③ 高速スループット評価を実現する評価技術の開発

(担当:産業技術総合研究所)

③-1 金属組織のハイスループット計測手法の開発

【目標(2021年度)】

3D積層造形によってサンプルを作製、切削、研磨処理を行った後、サンプルの組織を導入する自動焦点深度補正機構により自動で金属組織を観察し、組織のデータを取得するシステムを開発する。

【目標(2022年度)】

ハイスループット計測に対応するための制御機構を導入し、20サンプルで200分、すなわち1サンプルあたり10分で観察できるようにする。また、金属組織観察ソフトウェアコーディングを外注し、金属組織画像処理システムを構築する。

【目標(2023年度)】

レーザ顕微鏡による金属組織観察機構を導入し、さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的に20サンプルで200分、すなわち1サンプルあたり10分で観察可能とする。

③-2 結晶構造のハイスループット計測手法の開発

【目標(2021年度)】

結晶構造をハイスループットで調べるために、Z軸制御X線回折装置を導入する。レーザ光による高さの変位制御を可能とし、スクリーニング法の有効性を検証する。

【目標(2022年度)】

レーザ光による高さの変位制御及びバルク用3次元ステージを採用し、各サンプルを自動的に装置にセットできる制御機構を導入し、X線回折パターンを得られるようにすることで、現状の所要時間(セット時間も含め1サンプルあたり通常1時間、20個で20時間)を20サンプルで5時間(300分)、1サンプルあたり15分に短縮化できるハイスループット計測システムを開発する。

【目標(2023年度)】

さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的に20サンプルで5時間(300分)、1サンプルあたり15分で計測可能にする。

③-3 組成のハイスループット計測手法の開発

【目標(2021年度)】

作製した試料の組成をハイスループットで計測するために、XRFシステムを導入し、オフライン計測による組成分析を行う。

【目標(2022年度)】

大型のサンプルを測定室に入れることが可能な超軽元素対応マイクロXRF装置を導入し、12個のサンプルをまとめて測定室に入れ、計測する多軸制御機構を導入することにより、サンプル20個5時間(300分)、すなわちサンプル1個あたり15分で計測できるシステムを開発する。

【目標(2023年度)】

さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的にサンプル20個5時間(300分)、すなわちサンプル1個あたり15分で計測可能とする。

③-4 硬さのハイスループット計測手法の開発

【目標(2021年度)】

深層学習を用いた実用的な硬さの自動計測システムを開発し、オフライン計測による硬さ測定を行う。

【目標(2022年度)】

ハイスループット計測用硬さ試験機を導入し、前年度開発した自動計測システムを組み込み、さらに

多軸制御機構を導入することにより、サンプル1個あたり10分すなわち20サンプルあたり200分で計測できるようにする。

【目標(2023年度)】

さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的にサンプル1個あたり10分すなわち20サンプルあたり200分で計測可能とする。

③-5 プローブ計測で物性を決定可能とするハイスルーブット計測手法の開発

【目標(2021年度)】

電気抵抗率測定装置を導入し、多軸制御機構を設けることで、電気抵抗を自動で計測するシステムを開発し、20個のサンプルを100分で計測可能にする。

【目標(2022年度)】

超音波パルス法を用いた超音波パルスエコー装置およびプローブ計測用多軸制御機構を導入し、縦波と横波の音波を自動で測定して、ヤング率、ポアソン比を導出するシステムを構築し、20個のサンプルを150分で計測可能にする。

【目標(2023年度)】

さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的に20個のサンプルで、ヤング率、ポアソン比を150分で計測可能とする。

研究開発項目④ コンビナトリアル・バルク創製および評価のプロセス連結統合化システムの構築

(担当:産業技術総合研究所)

④-1 コンビナトリアル・バルク創製・機械加工のプロセス連結システムの構築

【目標(2021年度)】

ロボットによるサンプル搬送機構を構築するため、工程間を移動するための加工用基板搬送機構を導入し、共通試料ホルダーを開発する。また、加工時において、得られた加工条件をデータベース化するシステムを開発する。その際、加工条件データベースソフトコーディングを外注する。

【目標(2022年度)】

コンビナトリアル・バルク創製装置、切削・研削加工装置、金属組織用研磨装置それぞれの装置をグローブボックスのように区切られた空間に構築する。また、共通試料ホルダーを使用し、各工程間を移動する加工間自動連結機構を導入し、各工程を繋げて連続加工システムを構築する。さらに、前年度に引き続き、加工時において、得られた加工条件をデータベース化するシステムを開発する。その際、加工条件データベース改良ソフトコーディングを外注する。

【目標(2023年度)】

各加工に対しての加工プロセスデータベースを開発し、かつそれらを統合化した加工プロセスデータベースを構築する。さらに、評価プロセスデータベースと連携させることで加工・評価プロセス統合化システムを構築する。

④-2 ハイスルーブット評価の評価連結システムの構築

【目標(2021年度)】

表面観察装置とX線回析装置について、共通試料ホルダーを使用した評価用基板搬送機構を導入し、連続評価システムを構築する。また、評価時において、得られた各種測定データをデータベース化し、加工条件データと連携するシステムを開発する。その際、物性評価データベースソフトコーディングを

外注する。

【目標(2022年度)】

表面観察装置、X線回折装置、元素制限XRF、プローブ式評価を連結させるため、共通試料ホルダーを使用した評価間自動連結機構を導入し、連続評価システムを構築する。また、前年度に引き続き、評価時において得られた各種測定データをデータベース化し、加工条件データと連携するシステムを開発する。その際、物性評価データベース改良ソフトコーディングを外注する。

【目標(2023年度)】

各評価に対しての評価プロセスデータベースを開発し、かつそれらを統合化した評価プロセスデータベースを構築する。さらに、加工プロセスデータベースと連携させることで加工・評価プロセス統合化システムを構築する。

研究開発項目⑤ マテリアル・プロセス・インフォマティクスツールの開発

⑤-1 耐熱性評価のための少量サンプルによる計測データ取得(担当:産業技術総合研究所、筑波大学)

航空機エンジン向けの材料開発における材料データベース構築するため、試験片作成や試験時間が長くなる機械的特性・耐熱性評価より得られる計測データを蓄積する。また同様に、開発する新しい耐熱材料の破壊・変形メカニズムを解明する。

【目標(2021年度)】

産総研では、ミクロンサイズの微小試験片を作成し、微小試験を用いた引張・圧縮強度、降伏強度、ひずみ(伸び)、硬さ等のラウンドロビンテストによるデータを取得する。また、既設の高温強度試験機、高温硬さ試験機、高温摩擦摩耗試験機を用いて～1200℃までの高温環境下での圧縮強度、硬さ、摩擦係数、摩耗量を測定する。同様に、既設の熱分析装置を用いて非熱、熱伝導率等の熱物性も取得する。その際、各種試験機の保守費用を計上する。

筑波大では、透過電子顕微鏡によるナノ力学実験法を活用し、当該技術で作製された少量サンプルについて、組織を原子レベルで観察する。特に、3000Kを超える材料組織の原子ダイナミクスをその場で観察できる透過電子顕微鏡を用いて、作製された材料の耐熱特性を～2000℃までの組織変化観察(結晶構造、相変態)をもとに評価する。その際、観察時の分解能と操作性の向上を目的として、電子顕微鏡電子銃交換作業を計上する。

【目標(2022年度)】

産総研では、前年度に引き続き、微小試験を用いた引張・圧縮強度、降伏強度、ひずみ(伸び)、硬さ等のラウンドロビンテストによるデータを取得する。また、～1200℃までの高温環境下での圧縮強度、硬さ、摩擦係数、摩耗量や非熱、熱伝導率等の熱物性を取得する。その際、効率的な加工を行うため集束イオンビーム加工装置を導入するとともに、微小試験における加熱機構を導入する。加えて、材料試験機に1600℃まで加熱可能な超高温大気炉を導入し、～1600℃までの高温・大気環境下での圧縮強度、クリープ特性のデータを取得する。その際、各種試験機の保守費用を計上する。

筑波大では、前年度で取得するデータに加え、組織と対応させた機械的特性などを明らかにする。また、～2000℃までの超高温組織を電子顕微鏡観察し、材料を加熱しながら、引張、圧縮、せん断、曲げ等の荷重を負荷し、そのときに現れる転位、粒界・界面、積層欠陥などの各種結晶欠陥の挙動を導入する電子顕微鏡用カメラにて直接観察し、強度特性の劣化と破壊を組織観察をもとに調べる。その際、試料を加熱するため、加熱試料ホルダーのヒーターを交換し、装置の冷却性能向上のため、チラー室外機を交換する。こうした高温その場解析から、耐熱特性に優れた材料を探索し、その耐熱

性向上の機構を導く。これらの成果から、当該技術で耐熱性の高い材料組織を導出し、耐熱材料開発の方針を打ち出す。

【目標(2023年度)】

産総研では、レーザDEDで作成した試料の、微小試験を用いた引張・圧縮・降伏強度、硬さ等のデータを取得するとともに、航空機エンジンに必要な耐熱性・機械的特性評価のために必要な、1200°Cを超える高温圧縮強度、クリープ特性や比熱、熱伝導等の熱物性について2022年度に導入した試験機を用いてデータを取得する。

加えて、電子顕微鏡観察による組織状態、荷重負荷時の転位構造等を調べるとともに、クリープ・引張その場観察装置を導入し、高温環境下でのクリープ・引張荷重負荷したときのすべり線、粒界等の変化を直接観察し、強度特性と破壊を組織観察を元に調べる。これら取得したデータは研究項目⑤-4に反映させる。

⑤-2 経験則に基づいたレーザDED用ハイエントロピー合金予測ソフトウェアの開発(担当:産業技術総合研究所)

【目標(2021年度)】

コンビナトリアル・バルク創製の条件を設定するにあたり、事前にハイエントロピー合金予測を行うことで、膨大な量の実験を行わなくても計算結果に基づき、求める結果を得ることができる。そこで、元素の組成比、あるいは合金粉末の混合比から高エントロピー性に関わる特性値と、密度・硬さ等の特性値の理論計算を行い、高エントロピーになる条件を満たす元素の組成比(合金粉末の混合比)を探索するソフトウェアを開発する。その際、ハイエントロピー合金予測計算ソフトコーディングを外注する。

【目標(2022年度)】

2021年度に開発した高エントロピーになる条件を満たす元素の組成比(合金粉末の混合比)を探索するソフトウェアで得られる計算結果を活用し、ベイズ推論等の機械学習手法を用いて、合金組成を提案するソフトウェアを開発する。

【目標(2023年度)】

熱力学ソフトウェアや高エントロピー合金の経験則、機械学習を活用し、所定の特性が期待できる合金の元素およびその混合比率が得られる合金探索ソフトウェアを開発する。

⑤-3 多元系材料の事例データのデータベース化と可視化ソフトウェアの開発(担当:産業技術総合研究所)

【目標(2022年度)】

ハイエントロピー合金探索では、入力、出力データ量が多く、その特性也多岐にわたっており、データ管理のためには事例データのデータベース化が必要である。また、データを扱いやすくするために、グラフィカルユーザインタフェースや多次元グラフを用いて、入力や出力を可視化する必要がある。そこで、多元系材料の事例データのデータベースを構築する。元素周期表から材料を選択し、スライダを操作あるいは直接数値を入力して組成比を指定し、計算結果をグラフ表示させる可視化ソフトウェアを開発する。さらに、グラフ上でハイエントロピー性、密度や硬さ等の特性を表示させ、グラフ上の点を選択するとその点に含まれているデータ(組成比、結晶構造等)を表示させる可視化ソフトウェアを開発する。その際、多元系材料物性可視化ソフトウェアコーディングを外注する。

【目標(2023年度)】

計算結果や実験データをわかりやすく表現するために、4次元以上の複雑なデータに対応したグラフ

などの可視化ソフトウェアを開発する。

⑤—4 機械学習を用いた多元系材料へのMIソフトウェアの開発(担当:産業技術総合研究所)

【目標(2022年度)】

目的の合金組成比を得るためには、元素の混合比や造形装置条件等のパラメータと、それにより得られる合金組成比との関係を見つけなければならない。しかし、混合する元素の種類や造形パラメータはとて多く、組み合わせは膨大になり、そこから関係性を見つけるのは困難である。そのため、得られた各種実験データに機械学習を適用することで、安定した品質(造形後に原料粉末の未溶解のないこと/ボイド・割れがないこと)が得られる製造条件を見つけ出すことのできるMIソフトウェアを開発する必要がある。そこで、ハイエントロピー合金製造のプロセスパラメータ決定のために、多元系材料へのMIソフトウェアを開発する。

また、材料特性に優れた合金組成を探索するため、良質な材料特性データに機械学習を適用及び項目⑤-3と連携した、MI-AI統合化プロセスインフォマティクスツールを開発する。その際、プロセス・インフォマティクス・ツールコーディングを外注する。

【目標(2023年度)】

2022年度に引き続き、得られた材料物性値とその製造プロセスパラメータと機械学習による解析、⑤-3で開発する可視化ソフトウェアを組み合わせることで、MI-AI統合化プロセスインフォマティクスツールを開発する。

研究開発項目⑥ 航空機エンジンのニーズに即した材料実現のための基盤技術検討

⑥—1 ハイエントロピー合金に関する基盤技術検討および調査(担当:金属系材料研究開発センター、産業技術総合研究所)

航空機エンジン用のハイエントロピー合金の研究開発で先行する米国空軍などの世界の耐熱性ハイエントロピー合金及び軽量高強度ハイエントロピー合金の特許および文献を調査し、技術動向を明らかにすることで、研究開発の方向性をより明確にする。特許調査には、特許調査ソフトウェアを使い、企業や公的機関の特許出願状況をマッピングすることが可能である。

本研究項目においては、「コンビナトリアル手法」や「ハイエントロピー合金」、「3D積層造形」、「マテリアルズ・インフォマティクス」などの複数のキーワードを用いて精密に調査することが必要であり、2年間において技術動向調査を行う。また、専門家へのヒアリングを行い、検索ワードや調べるべき項目などをブラッシュアップしていくとともに、ジェットエンジン等の材料開発に深い知見を有する企業や有識者からなるユーザー委員会を開催し、世界動向、ニーズや知財状況を把握しつつ、次世代の材料開発に迅速に対応できるようにする。

【目標(2021年度)】

・米国空軍を中心とした耐熱用ハイエントロピー合金に関する特許500件、論文300件程度の検索・抽出と、注目論文・注目特許各20件程度の分析により現状開発レベルを明確化する。

【目標(2022年度)】

・データ駆動型材料科学および多元系合金の計算熱力学に関する論文および特許各200件程度の検索・抽出と、注目論文・注目特許各20件程度の分析によりハイエントロピー合金への適用の課題を抽出する。

・コンビナトリアル手法に関する論文50件程度の検索・抽出と注目論文10件程度の分析により現状開発レベルを明確化する。

【目標(2023年度)】

- ・ジェットエンジン等の材料開発に深い知見を有する企業や有識者と議論し、ニーズの把握や要望を受けて、材料開発に迅速に対応できる仕組みを構築する。
- ・ハイエントロピー合金に関する最新の80件の文献情報を分析し、データベースを構築する。
- ・航空機エンジン用材料に関する300件の論文の動向整理と、20件の論文の分析により適用の課題を抽出する。
- ・ハイエントロピー合金の論文100件について時系列的に技術を調査する。
- ・フェーズBに向けた取り組みとして、2022年に引き続き、産総研と協力の上、ユーザー会を開催し、合金探索システムに対するユーザーニーズを確認する。

⑥-2 実用化レベルでのハイエントロピー合金粉の開発(JX金属株式会社)

ハイエントロピー合金は基本として、5種類以上の金属粉末をほぼ等量含有する合金であるが、その組成に合金化された粉末を作製することは技術的ハードルが高く、そのような合金粉末を作製、提供できる場所は限定的である。ハイエントロピー合金のように5種程度、または、それ以上の元素からなる合金では、それぞれの元素の蒸気圧が異なり、粉末製造時に工夫を施すことが必要となる。また、元素によっては溶け残りが生じる等もあり、粉末組成を制御するのは困難である。

本事業ではレーザーDEDで作製されたバルク材の元素組成をもとにして粉末の設計を行うこととなる。このため、バルク造形結果によって得られた元素組成から粉末として用意すべき元素組成を有する粉末を製造することが必要である。そこで本事業では、レーザーDEDによる組成制御可能なバルク創製を実施するために、フレキシブルに配合率を決定可能とするハイエントロピー合金粉末の開発を行う。

【目標(2021年度)】

- ・ハイエントロピー合金の合金設計に必要な構成元素球状粉末を作製する。

平均粒径(D50): <45 μ m、流動度: 30sec/50g(穴径 0.1inch)

【目標(2022年度)】

- ・DED法に適した新規合金組成粉末を作製する。

ハイエントロピー合金の平均粒径(D50): <45 μ m

ハイエントロピー合金の流動度: 30sec/50g(穴径 0.1inch)

ハイエントロピー合金の合金組成精度: $\pm 1.5\%$ 以下

【目標(2023年度)】

- ・ハイエントロピー合金のバルク体作製を目的として、DED造形に適した2元系の新規合金粉末を作製する。

合金の平均粒径(D50): <45 μ m

合金の流動度: 30sec/50g(穴径 0.1inch)

合金の合金組成精度: $\pm 1.5\%$ 以下

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度			
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期
① 多元材料に対応したコンビナトリアル・バルク創製機構の開発（産総研）												
①-1 多元材料対応のための同時異種材供給機構の開発												
①-2 形状精密制御技術の開発												
①-3 雰囲気制御機構の開発												
①-4 レーザ光高反射率材料向け造形ガン機構の開発												
①-5 波長分割を利用したリアルタイムバルク形成モニタリング手法の開発												
② 高速スループット評価に向けた機械加工技術の開発（産総研）												
②-1 電解砥粒研磨による金属エッチング機構の開発												
②-2 切削・研削を組み合わせた連続機械加工システムの構築												
②-3 精密機械加工のためのモニタリング技術の開発												

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
③高速スループット評価を実現する評価技術の開発 (産総研)												
③-1 金属組織のハイスループット計測手法の開発												
③-2 結晶構造のハイスループット計測手法の開発												
③-3 組成のハイスループット計測手法の開発												
③-4 硬さのハイスループット計測手法の開発												
③-5 プローブ計測で物性を決定可能とするハイスループット計測手法の開発												
④コンビナトリアル・バルク形成のプロセス統合システムの構築 (産総研)												
④-1 コンビナトリアル・バルク創製のプロセス統合システムの構築												
④-2 ハイスループット評価の評価連結システムの構築												

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度			
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期
⑤マテリアル・プロセス・インフォマティクスツールの開発												
⑤-1 耐熱性評価のための少量サンプルによる計測データ取得（産総研、筑波大学）												
⑤-2 経験則に基づいたレーザーDED用ハイエントロピー合金予測ソフトウェアの開発（産総研）												
⑤-3 多元系材料の事例データのデータベース化と可視化ソフトウェアの開発（産総研）												
⑤-4 機械学習を用いた多元系材料へのMIソフトウェアの開発（産総研）												
⑥ 航空機エンジンのニーズに即した材料実現のための基盤技術検討												
⑥-1 ハイエントロピー合金に関する基盤技術検討および調査（金属系材料研究開発センター、産総研）												
⑥-2 実用化レベルでのハイエントロピー合金粉の開発（JX金属）												

4. 成果の達成状況と根拠

コンビナトリアル・バルク創製技術による自動合成を行うシステムの開発に成功し、中性液体を用いた電解砥粒エッチングによる金属表面の平坦化を可能にした。また、結晶構造解析、組成分析、金属組織像取得、電気抵抗率(導電率)、ビッカース硬さ試験などの複数のハイスループット評価を連続的に評価できるシステムの構築を行った。さらに、耐熱性および軽量化に優れたハイエントロピー合金材料予測を可能とするマテリアルズ・インフォマティクス・ツールを構築し、これらのシステムを順次活用して、多量のデータ取得およびデータ解析を可能にする技術的な指針を得ることができた。

研究項目①: 多元材料に対応したコンビナトリアル・バルク創製機構の開発

達成状況: ○

担当; AIST

① -1 多元材料対応のための同時異種材供給機構の開発

多元材料に対応したコンビナトリアル・バルク創製機構を実現するため、少量材料供給対応の粉末送給機構や粉末噴射ノズル、機構制御部を開発し、4種類の材料を供給可能とした。また、開発したバルク創製機を用いて所望の箇所に所望の合金を形成し、ハイエントロピー合金の作製に成功した。

開発したバルク創製機の性能確認のため、作製したバルク合金の品質を調べた。現有の航空機エンジンに使われているインコネル 718 の市販バルク材と比較検証を行い、硬さや引張強度などの機械特性試験により同等かそれ以上の性能が得られた。また、6mm 角以下のバルク体において光学顕微鏡で複数箇所観察し、原料粉末の溶け残りなど異常がなく、99.9%を超える充填密度の高品質バルク形成に成功したことを示した。さらに、ステンレス鋼など一部の合金では 5 分以内でバルク体を一つ形成する高速形成も実現できた。

2023 年度は、さらなる改良を重ね、複数の単元素粉末や合金粉末を用いて高エントロピー合金の作製を行い、対応可能とする元素および合金の種類を 6 種類以上に増やす。

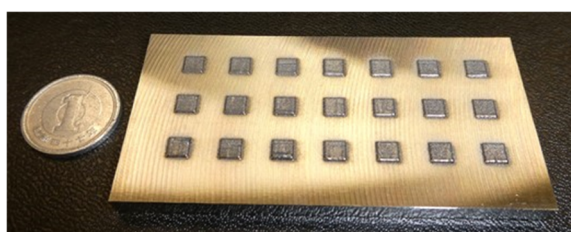


図 1 コンビナトリアルバルク合金の作製

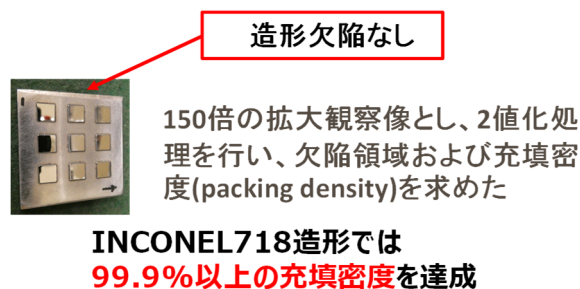


図 2 インコネル 718 バルク形成とその品質

①-2 形状精密制御技術の開発

ステージ駆動系、ステージ制御部を開発し、数 μm 以下の従来法よりも表面粗さを低減させた表面凹凸を制御可能とし、後加工の加工時間低減につながるニアネットシェーブ化に成功した。

①-3 雰囲気制御機構の開発

可能な限り酸素や水素などの不純物の混入を防ぐために、グローブボックスによるガス循環による極低酸素濃度化により酸化を防止するガス雰囲気制御機構を開発し、ppm オーダーの酸素の環境形成を

可能とした。また、作製した合金材料の品質に影響する合金合成時の酸素濃度や水分量などを条件パラメータとし、バルク形成時の酸素量を減らすことで大幅な品質の向上が見られることを明らかにした。

2023 年度は、循環型グローブボックスによる低酸素濃度のバルク形成を行う。また、高融点材料のクラック発生や内部応力低減のため、基板加熱機構を開発し、高品質バルク形成を行う予定である。

①-4 レーザ光高反射率材料向け造形ガン機構の開発

レーザ光源の波長に対して反射率が高く吸収が少ない材料系にも適用できるように、ハイパワーの短波長レーザを導入し、銅およびアルミニウム系材料への対応を可能とする。

2023 年度は、ハイパワー短波長レーザを用いたバルク形成を行い、合金作製時の合金種の適用拡大を行う予定である。

①-5 波長分割を利用したリアルタイムバルク形成モニタリング手法の開発

金属蒸発の情報を得るために波長分割を利用したバルク形成中でのリアルタイム観測を実現可能とした。また、得られた観測現象を機械学習で学習、判定可能とするアルゴリズムについても着手した。

2023 年度は、機械学習を組み込んだ判定機能を活用し、バルク形成中での金属蒸発による組成ずれに関する知見を得る予定である。

研究項目②: 高速スループット評価に向けた機械加工技術の開発

達成上状況: ◎

担当: AIST

②-1 電解砥粒研磨による金属エッチング機構の開発

造形バルクの寸法が小さく、また隣の造形バルク間も狭いため、電解砥粒研磨機構を導入し、所望のバルク体だけにエッチングできる、造形バルク用小面積電解砥粒エッチング処理工具を開発した。試作した工具での加工を実施し、INCONEL718 の造形物に対して高速エッチングに成功。局所的、かつ液体を外に漏らさない加工を可能にし、加工液の供給、電解砥粒エッチング、加工液回収、洗浄の一連の動作を1サンプルあたり7分以内で実現した。

2023 年度は、さらなる改良を加えて、工具機構の安定化、加工能力向上を目指す。

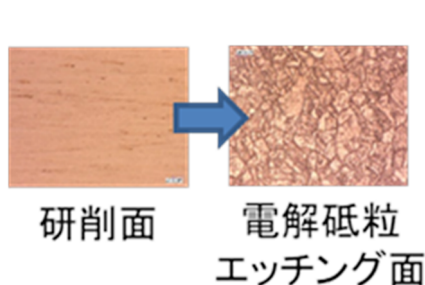


図3 銅面への電解砥粒エッチング

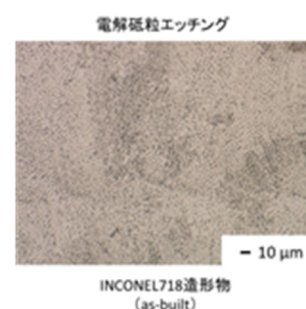


図4 インコネル718面への電解砥粒エッチング

②-2 切削・研削を組み合わせた連続機械加工システムの構築

電解砥粒エッチング処理等を行うために必要な平坦面を確保するため、切削、研削加工機構を導入した。INCONEL718 バルク造形表面の仕上げを、表面粗さ Ra 0.2 μm 以下に成功した。また、切削と研削加工

で、加工時間が1サンプルあたり 20 分以内を実現した。また、試料搬送のためのステージ駆動系を導入し、加工時の試料固定自動化と試料搬送自動化を実現。切削・研削・金属エッチングを組み合わせた連続機械加工システムを構築した。

2023 年度は、精密研磨、超音波洗浄、乾燥工程を追加し、表面の残留砥粒や不純物の除去を実現する。新たに精密研磨、洗浄、乾燥工程を追加することで、機械加工による造形バルク表面の仕上げを、表面粗さ(Ra)を 1 nm 程度とし、超平坦化バルク面形成実現を目指す。

②-3 精密機械加工のためのモニタリング技術の開発

造形バルクの高さや表面状態はバルクごとに異なっているため、切削速度や切り込み量を決定するために状態の確認が必要となる。そこで、造形バルク用に、切削・研削高さ調整のための造形物高さ測定機構を導入し、構築した。造形後、レーザ変位計によりバルク高さ測定可能を確認した。また、逃げ面摩耗幅が大きくなると切削能力が下がり、加工が進まなくなるため、安定した切削状態かどうかモニタリングする必要がある。そこで、切削・研削力測定機構を導入し、切削抵抗をモニターすることで、正常切削、異常切削の判断を可能にした。

2023 年度は、機械加工間において切削、研削、研磨の加工面の粗さやバルク高さ情報を共有化するために、各工程において非接触による表面プロファイル観測を行えるようにし、その情報をもとに加工条件最適化を目指す。

研究項目③: 高速スループット評価を実現する評価技術の開発

達成状況: ○

担当: AIST

③-1 金属組織のハイスループット計測手法の開発

3D 積層造形によってサンプルを作製、切削、研磨処理を行った後、サンプルの組織を自動焦点深度補正機構により自動で金属組織を観察し、組織のデータを取得するシステムを開発した。

ハイスループット計測に対応するための制御機構を導入し、20 サンプルで 200 分、すなわち 1 サンプルあたり 10 分で観察可能にした(図 5)。

2023 年度は、レーザ顕微鏡による金属組織観察機構を導入し、さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的に観察可能とする。

③-2 結晶構造のハイスループット計測手法の開発

結晶構造をハイスループットで調べるために、Z 軸制御 X 線回折装置を導入した。レーザ光による高さの変位制御を可能とし、スクリーニング法の有効性を確認した。

レーザ光による高さの変位制御及びバルク用 3 次元ステージを採用し、各サンプルを自動的に装置にセットできる制御機構を導入し、X 線回折パターンを得られるようにし、現状の所要時間(セット時間も含め 1 サンプルあたり通常 1 時間、20 個で 20 時間)を 20 サンプルで 5 時間(300 分)、1 サンプルあたり 15 分に短縮化できるハイスループット計測システムを開発した。

2023 年度は、さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的に計測可能にする。

③-3 組成のハイスループット計測手法の開発

大型のサンプルを測定室に入れることが可能な超軽元素対応マイクロ XRF 装置を導入し、12 個のサンプルをまとめて測定室に入れ、計測する多軸制御機構を導入することにより、サンプル 20 個 5 時間(300 分)、すなわちサンプル 1 個あたり 15 分で計測できるシステムを開発した(図 5)。

2023 年度は、さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的に計測可能とする。

③-4 硬さのハイスループット計測手法の開発

ハイスループット計測用硬さ試験機を導入し、遠隔で計測可能となるシステムを開発した。また、計測データの自動取得、自動解析を可能にした。

2023 年度は、さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、20 サンプルあたり 200 分で計測可能にする予定。

③-5 プローブ計測で物性を決定可能とするハイスループット計測手法の開発

電気抵抗率、導電率、色、反射率を遠隔、かつ自動で計測するシステムを開発した(図 5)。また、超音波パルス法を用いた超音波パルスエコープローブ計測用多軸制御機構を開発し、縦波と横波の音波を自動で測定して、ヤング率、ポアソン比を導出するシステムを構築した。

2023 年度は、さらなる高速化、自動取得、遠隔管理、自動解析のための機構を開発し、遠隔で自動的に 20 個のサンプルで、ヤング率、ポアソン比を 150 分で計測可能とする。電気抵抗率、導電率、色、反射率については 20 個のサンプルを 100 分で計測可能にする予定。



図 5 プローブ計測で物性を決定可能とするハイスループット計測手法の開発

研究項目④:コンビナトリアル・バルク創製および評価のプロセス連結統合化システムの構築

達成状況:○

担当:AIST

④-1 コンビナトリアル・バルク創製のプロセス統合システムの構築

コンビナトリアル・バルク創製装置、切削・研削加工装置、金属組織用研磨装置それぞれの装置をグローブボックスのように区切られた空間に構築を行った。また作製されたハイエントロピー合金の表面の組織観察を容易にするために、切削・研削加工装置と金属組織用研磨装置との間に新たに超音波洗浄、及び砥粒研磨工程を行う工程を構築した。サンプルを各工程に搬送するため、共通試料ホルダーを使用

し、各工程間を移動する加工間自動連結機構を導入し、各工程を繋ぎ、連続加工システムの構築を行った。

④-2 ハイスループット評価の評価連結システムの構築

各種物性値の評価装置と硬さ測定装置との間にレーザ顕微鏡による表面観察工程、及びSEM・EDSによる成分分析評価工程を新たに構築した。また表面観察装置、X線回折装置、元素制限 XRF、プローブ式各種評価、EDX 成分分析評価等の各種評価工程を連結させるため、共通試料ホルダーを使用した評価間自動連結機構を導入し、連続評価システムを構築した。

④-1 工程、及び④-2 工程における各工程を①コンビナトリアル・バルク創製工程、②切削・研削加工工程、③洗浄研磨工程、④電解砥粒エッチング工程、⑤XRF 測定工程、⑥XRD 測定工程、⑦各種物性測定工程、⑧表面観察工程、⑨EDS 評価工程、⑩硬さ測定工程、⑪ヤング率測定工程の合計 11 の工程群に分け、それらの工程群ごとに Unix 系サーバーを設置し、各工程群が独立して管理運営を行えるような分散型のシステムを構築した。分散型のシステム設計にすることにより、故障等のトラブルに対して故障部分を切り離し修理を行うことが可能である。また大規模なシステムの工程の変更等にも容易に対応できる。

またそれぞれの工程を繋ぐ合計 11 の工程間自動連結機構自体は PLC(Programmable Logic Controller)を用いて各工程間のサンプルの受け渡しのための各種センサやアクチュエーターを直接制御している。今回個々の PLC をネットワークで管理するために Unix 系のシングルボードコンピュータを 11 工程間の自動連結機構すべてに設置を行い、各工程間自動連結機構自体も各工程と同じように、各工程間のサンプルの搬送を独立して管理運営を行える分散型システムとして構築した。

2023 年度は、各工程間自動連結機構でサンプルを自由に受け渡しを行うために AMR(Autonomous Mobile Robot)を導入し、工程間を自由に選択対応可能とする予定。また、より上位のシステム管理を行うためのサーバー群を構築し、各種データのデータ蓄積および管理や各種評価法とサンプルの運行管理を切り離すことによる、システムとしての冗長性を高めることとする。

研究項目⑤: マテリアル・プロセス・インフォマティクスツールの開発

達成状況:○

担当: AIST

⑤-1 耐熱性評価のための少量サンプルによる計測データ取得

ミクロンサイズの微小試験片を作成し、微小試験を用いた引張・圧縮強度、降伏強度、ひずみ(伸び)等のデータを取得した。その際、効率的な加工を行うため集束イオンビーム加工装置を導入し、インコネル 718、ハイエントロピー合金およびミドルエントロピー合金の微小強度試験データを取得した。

また、既設の高温強度試験機、高温硬さ試験機、高温摩擦摩耗試験機を用いて～1200℃までの高温環境下での圧縮強度、硬さ、摩擦係数、摩耗量を測定。同様に、既設の熱分析装置を用いて比熱、熱伝導率等の熱物性も取得した。

高温環境が必要な圧縮、クリープ試験および熱物性評価については、試験装置の納入が遅れたため(2022 年度末納入)、現状の装置、依頼試験にて実施した。

2023 年度には、作製した試料の微小試験を用いた引張・圧縮・降伏強度、硬さ等のデータおよび、2022 年度に納入が遅れた微小試験用加熱機構を導入し高温微小強度データを取得するとともに、航空機エンジンに必要な耐熱性・機械的特性評価のために必要な、1200℃を超える高温圧縮強度、クリープ特性や比熱、熱伝導等の熱物性について 2022 年度に導入した試験機を用いてデータを取得する。

加えて、顕微鏡観察による組織状態、荷重負荷時の転位構造等を調べるとともに、クリープ・引張その場観察装置を導入し、高温環境下でのクリープ・引張荷重負荷したときのすべり線、粒界等の変化を直接観察し、強度特性と破壊を、組織観察を元に調べる。これら取得したデータは研究項目⑤-4に反映させる。

担当:筑波大学

⑤-1 耐熱性評価のための少量サンプルによる計測データ取得

粉末噴射コンビナトリアル・バルク創製法で作製された金属元素5元系の高エントロピー合金組成の材料について、この材料の機械的特性に適合した透過型電子顕微鏡検鏡試料作製の手順と条件を最適化した。粉末噴射時にバルク材を堆積させる基板の選択も含めて、検鏡試料作製の切り出しと研磨に関する条件を調べた。この結果、常温観察を十分に実施できる検鏡試料作製の条件を導出した。また、この条件を基に、常温観察とは異なる高温観察用の検鏡試料を設計し、その作製法を開発した。さらに、当該試料特有の微小歪みを解析する方法とそれぞれの母材の機械的特性に合わせた透過型電子顕微鏡ナノ力学実験法を開発した。これらの観察準備が完遂した結果、当該試料で発現する機械的特性の組織学的背景を求め、作製されたバルク材を実用化するときの組織調査の指針を得た。

粉末噴射バルク作製時の非加熱処理材と同じ組成のアーケ溶解材の結晶構造、格子定数、方位の乱れや転位などの歪みについて調べた。透過型電子顕微鏡に取り付けられたX線エネルギー分析装置を用いて、これらの材料の組成を評価し、両者の違いを調べた。

粉末噴射バルク作製時の非加熱処理材を透過型電子顕微鏡内部で常温のまま変形し、その過程をその場で原子間隔レベルで観察した。引っ張り変形などの過程を観察し、作製時の非加熱処理試料の常温における破壊・変形機構を調査した。透過型電子顕微鏡内部で同じ粉末噴射バルク材を加熱し、圧縮・引っ張り変形を観察した。これらの結果から、この材料における変形・破壊機構を調べた。

⑤-2 経験則に基づいたレーザDED用ハイエントロピー合金予測ソフトウェアの開発

元素の組成比、あるいは合金粉末の混合比から高エントロピー性に関わる特性値と、密度・硬さ等の特性値の理論計算を行い、高エントロピーになる条件を満たす元素の組成比(合金粉末の混合比)を探索するソフトウェアを開発した。また、機械学習アルゴリズムを開発し、所望の結晶構造を満たす元素配合率を高速で予測するソフトウェアを開発した。

2023年度は、熱力学ソフトウェアと高エントロピー合金の経験則、機械学習を活用し、所定の特性が期待できる合金の元素およびその混合比率が得られる合金探索ソフトウェアを開発する。

⑤-3 多元系材料の事例データのデータベース化と可視化ソフトウェアの開発

多元系材料の事例データのデータベースを構築した。元素周期表から材料を選択し、スライダを操作あるいは直接数値を入力して組成比を指定し、計算結果をグラフ表示させる可視化ソフトウェアを開発した。さらに、グラフ上でハイエントロピー性、密度や硬さ等の特性を表示させ、グラフ上の点を選択するとその点に含まれているデータ(組成比、結晶構造等)を表示させる可視化ソフトウェアを開発した。

2023年度は、計算結果や実験データをわかりやすく表現するために、4次元以上の複雑なデータに対応したグラフなどの可視化ソフトウェアを開発する。

⑤-4 機械学習を用いた多元系材料への MI ソフトウェアの開発

得られた各種実験データに機械学習を適用することで、元素の混合比とバルク形成条件パラメータ、安定した品質(造形後に原料粉末の未溶解のないこと/ポイド・割れがないこと)が得られる製造条件を見つけ出すことのできる MI ソフトウェアを開発した(図 6)。また、バルク欠陥の存在の有無、欠陥存在率を機械学習により判定可能とするソフトウェアを構築した。

2023 年度は、2022 年度までに開発したソフトウェアが一体的に利活用できるようにソフトウェア開発を行う予定である。

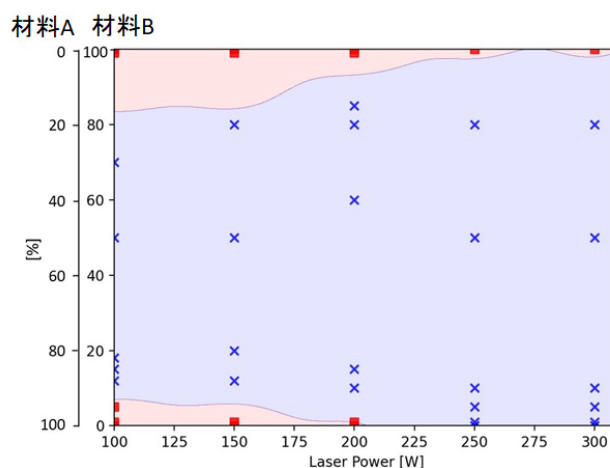


図 6 機械学習による材料組成の比率と正常なバルク形成領域の範囲決定

研究項目⑥: 航空機エンジンのニーズに即した材料実現のための基盤技術検討

達成状況:○

⑥-1: ハイエントロピー合金に関する基盤技術検討および調査

担当: AIST

バルク金属の作製では、結晶構造がどのようなものであるか、元素はどのような種類であり、その配合率はどのような割合か、材料強度などの機械特性や熱膨張や熱伝導などの熱物性はどのようなものか、製品の利用される環境や目的に応じて必要とさせる物性値を満足することが望まれる。ハイエントロピー合金でどのようなバルク構造特性、機械特性、耐熱特性を示すかをそれぞれのバルク特性機能と捉えて、既に報告されている文献等を特性(機能)別に事例データを整理し、材料特性事例として提示するハイエントロピー合金データベースを構築した。

Web 画面上において、利用者が合金により得られる機能(機械特性、熱特性、構造特性など)から一つを選択し、次に表示される画面において、各種バルク特性を選択することで、事例データリストが表示される。さらに、表示された事例データリストから閲覧したいデータを選択することで、選択した合金のバルク特性と合金の組成、また、その組成がハイエントロピー合金となりえるのかを経験則に基づいて計算を行い、得られた計算結果もデータ事例として閲覧可能とした。(図 7)。

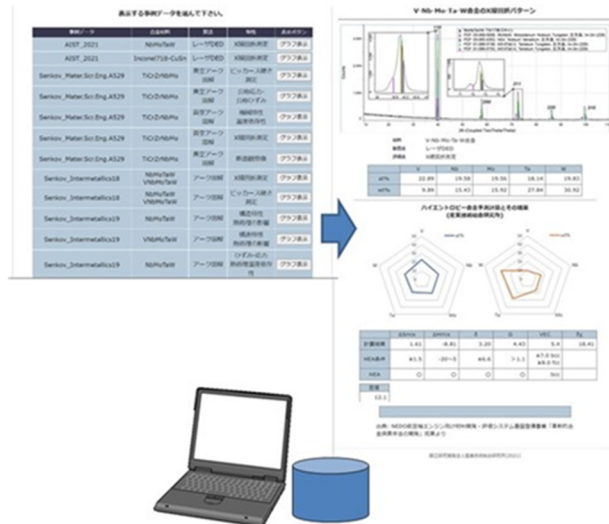


図 7 ハイエントロピー合金データベース

2003 年から報告が始まったハイエントロピー合金についてのバルク物性についての報告を調査し、それらの中から本プロジェクトに関連すると思われる主要文献について精査した。それらの文献から、航空機エンジンと関連の深い合金系をピックアップし、データ事例化を行った。データ事例化した材料開発事例は約 150 事例となり、上記で開発したハイエントロピー合金データベースのデータ事例をして登録し、活用可能とした。2023 年度末ではデータ事例を 200 事例とする予定である。

担当：一般財団法人金属系材料研究開発センター

世界のハイエントロピー合金、MI、コンビナトリアル手法の注目論文・特許の概要紹介だけでなく、種類・耐熱温度ごとの動向、世界と日本の研究開発状況の比較、航空機エンジン用材料としての性能の評価、技術別分析まで行うことができた。

ハイエントロピー合金の報告からは、Cantor 合金 (CoCrFeMnNi) が最も多く、Al 系合金、Ti 系合金が続く。世界のハイエントロピー合金の出願先国別の特許出願件数比率 (2012 年～2021 年公開の 1593 件) から、出願国順位は、中国が圧倒的に多く、次いで韓国、米国と続いている (図 8)。

ハイエントロピー合金の温度別の論文数は、600～1000℃が最も多く (図 9)、また、米国空軍研究所などの VNbMoTaW 系超耐熱合金以外は、既存の航空機エンジン材料を凌駕する HEA は無いことが確認できた。

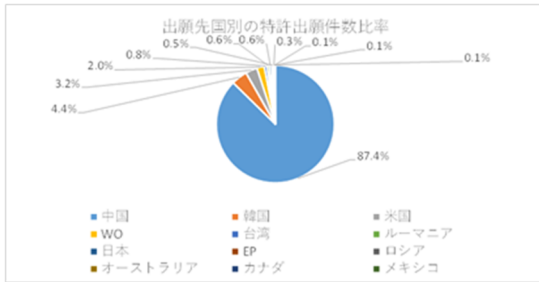


図 8 世界のハイレントロピー合金の出願先国別の特許出願件数比率 (2012 年～2021 年公開の 1593 件)

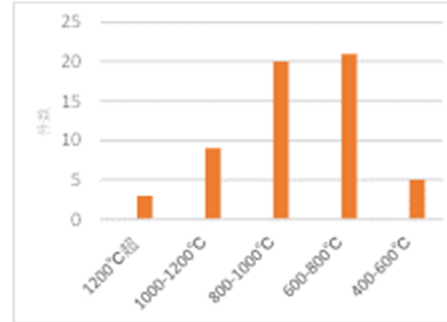


図 9 ハイレントロピー合金の温度別の論文数

2023 年度は、80 件の論文情報に基づいたデータベース構築と航空機エンジン用材料に関する論文調査を行う。データベースは、AIST のデータベースへの情報展開、今後の航空機エンジン用材料以外への展開も考慮し、データ入力・利用の利便性などを考慮したシステムを目指す。航空機エンジン用材料に関する論文調査は、300 件の動向調査と 20 件の概要整理、活用における課題整理を行う。

⑥-2 実用化レベルでのハイレントロピー合金粉の開発

・ハイレントロピー合金組成球状粉末の作製

ハイレントロピー合金組成について、AIST と相談検討し、組成、粒径、流動度の目標を満たす粉末を作製し、AIST に供給した。

ハイレントロピー合金組成球状粉末の物性値

平均粒径: 33 μm

流動度: 7.7sec/50g

合金組成精度:

元素a -0.5%、元素b -0.6%、元素c +0.3%、元素d +0.6%、元素e +0.1%

・構成元素球状粉末の作製

ハイレントロピー合金の合金設計に必要な構成元素球状粉末について、AIST と相談検討し、粒径、流動度の目標を満たす粉末を作製し、AIST に供給した。

構成元素球状粉末の物性値

平均粒径: 粉末 A 136 μm ※1、粉末 B 40 μm 、粉末 C 36 μm

流動度: 粉末 A 16sec/50g、粉末 B 7sec/50g、粉末 C 17sec/50g

※1 粉末 A の平均粒径については 53~150 μm にて AIST と整合済

・DED 法に適した新規合金組成粉末の作製

DED 法に適した新規合金組成粉末について、AIST と相談検討し、組成、粒径、流動度の粉末を作製し、AIST に供給した。

新規合金組成粉末の物性値

平均粒径: 39 μ m

流動度: 15sec/50g

合金組成精度:

元素a -0.3%、元素f +0.8%、元素e +0.5%、元素b -1.0%

・DED 造形に適した 2 元系の新規合金粉末の作製

2023 年度はハイエントロピー合金のバルク体作製を目的として、DED 造形に適した 2 元系の新規合金組成について、AIST と相談検討し、組成、粒径、流動度の目標値を満たす粉末を作製し、AIST に供給する予定である。

5. 成果の意義

本事業により開発したシステムはコンビナトリアルにバルク状ハイエントロピー合金を作製し、組織、特性の評価をハイスループットで行うものである。化学素材や薄膜状の材料に対して同様なハイスループットシステムの報告はあるが金属材料に関する報告は国内のみならず国外においても見られず、本システムが世界に先駆けて開発したものである。また、本システムで得られたデータは統合管理され、データベース化されるため、AI、MI による新材料開発に活用できる。

本システムにより、優れた特性を有する新材料の開発段階でのスピードとコストの改善と、高性能な材料の開発により航空機の燃費の改善をもたらし、環境負荷低減に寄与する。

本事業では航空機部材を開発するためのシステムであるが、他の輸送機器を軽量化するための材料開発や他の評価装置を加えることで医療機器材料などの開発にも貢献するものであり、その波及効果は非常に大きいと言える。さらに本システムの完成は総合エンジニアリングの高さを示すものである。国産ジェット機の開発の頓挫に見られるような、今の日本に欠けている個々の優れた要素技術を組み合わせでシステムを構築する総合エンジニアリング力の高さを国内外に示すことで、日本のモノづくり力を復元する契機につながる副次的な効果が期待できる。

6. 実用化への道筋と課題

(1) 国立研究開発法人産業技術総合研究所

開発したシステムについて知財化を行うとともに、本事業でのユーザー会や学会、展示会での発表により成果を発信、企業との共同研究やコンサル業務にて成果を普及させるとともにシステムの改善、データベースの充実化を行う。助成事業終了後は、航空機エンジン材料開発に着手する。5年後には産総研の制度を利用してベンチャーを立ち上げて、本システムによる材料開発の事業化を目指す。

(2) 国立大学法人筑波大学

粉末噴射創製バルク材料の電子顕微鏡観察による組織評価を、材料設計と製作時条件(組成、堆積速度、レーザ照射密度等)にフィードバックさせ、材料特性を改善する方針をまとめ、具体的手順を得る。この材料開発への貢献によって、経済効果、ユーザーニーズ、性能・コスト面、知財等に対して益を得る。現在、種々の条件で作製した材料を評価することでこれらが可能になっている。

(3) 一般財団法人金属系材料研究開発センター

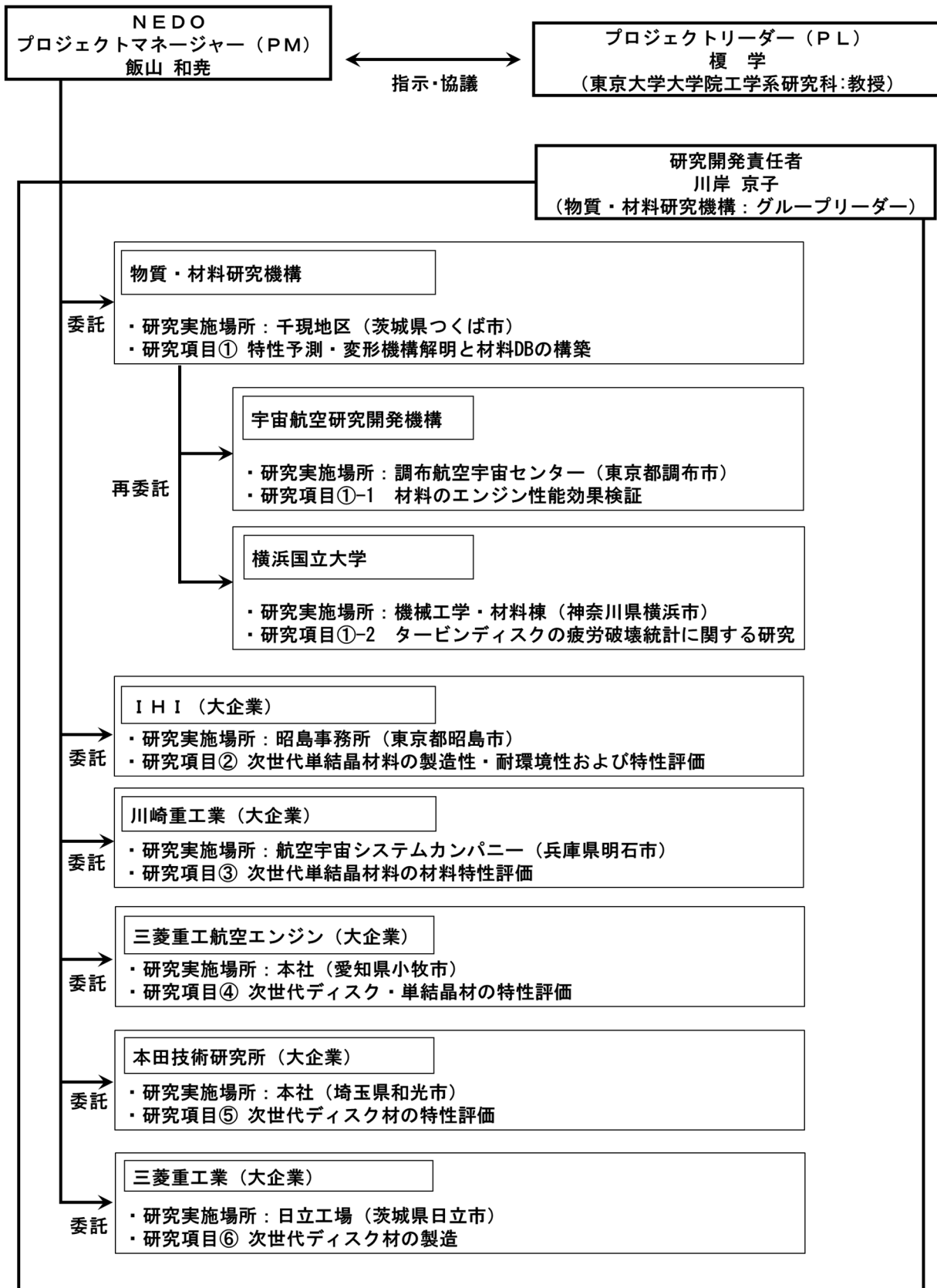
コンビナトリアル手法については世界の中でも進んだ手法を研究開発中だが、ハイエントロピー合金、マテリアルズ・インフォマティクスについては、これまでの日本の研究開発は米国、中国、欧州に大きく後れを取っている。早急に挽回するためには、産学連携でのデータベース構築を急ぐ必要があると考えられる。実験からの大量のデータ取得は本研究開発が効果を発揮すれば成し遂げられるが、文献情報からのデータ取得の予算確保、体制構築が課題と考えられる。

(4) JX 金属株式会社

本 PJ の成果物であるコンビナトリアル探索プラットフォームを用い、優れた特性を持つ、Nb、Ta 系の新規ハイエントロピー合金組成を探索・検証により見出し、その合金組成の粉末を一早く市場に供給する事業モデルを考えている。2026 年後半から顧客への試作品提供や少量販売を通し実用化を図る予定で、2028 年に事業化を目指している。

3 研究開発項目③:「航空機エンジン用評価システム基盤整備」

1. 実施体制



2. 期間/予算

事業期間は 2021 年 5 月 21 日から 2026 年 3 月 31 日まで

今後予算要求

研究開発項目 \ 年度	2021	2022	2023	2024	2025	合計
①革新的エンジン部品製造プロセス開発	-	76	115	-	-	191
②革新的合金探索手法の開発	200	535	580	-	-	1,315
③航空機エンジン用評価システム基盤整備	255	663	545	-	-	1,463
合計	455	1,274	1,240			2,969

3. 目標

【中間目標(2023 年度末)】

材料カタログデータベースを構築し、そこで得られたデータから部材として使用する候補材料を選定する。国内エンジンメーカーにおいて 1 部材以上での活用を想定することを可能とするデータベースの構築を目標とする。

【最終目標(2025 年度末)】

国内エンジンメーカーにおいて 3 部材以上での活用を可能とするデータベースの構築を目標とする。

研究項目①: 特性予測・変形機構解明と材料データベースの構築

(担当: 国立研究開発法人物質・材料研究機構)

開発材料の組成および熱処理条件等仕様を検討する。サブスケール素材を用いてクリープ、疲労試験等の評価を行い、高温変形挙動の機構解明を行う。更に、材料の組織と特性の相関から特性予測を試み、データ取得の効率化及びデータベースの高度化に貢献する。

横浜国立大学への再委託により、タービンディスクの疲労破壊統計に関する研究を実施し、部品の信頼性の検証を行う。更には、これらデータを活用することで、宇宙航空研究機構(JAXA)への再委託によりエンジン特性の評価を行う。

本研究により得られるすべてのデータを集約し、共通利用可能なデータベースを構築する。データベースには市販データベースシステムを NIMS 内に導入することで、参画企業各社が取得するデータ容易にインポート・エクスポート可能であり、かつ、事業終了後も保守・運用が可能な体制を構築する。

① -1 材料のエンジン性能効果検証 (担当: 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構)

材料のエンジン性能効果検証を進めていくにあたり、まず航空エンジン技術全般について、過去数年から比較的近い将来までの動向調査を行う。その上で、その動向調査の成果等を踏まえ、取得する材料

データベースを用いた性能効果検証を行うためのエンジンモデル等を検討する。そして、そのエンジンモデルを用いて、材料データベースに基づく材料のエンジン性能効果検証を行う。

① -2 タービンディスクの疲労破壊統計に関する研究(担当:国立大学法人 横浜国立大学)

サンプル N 数の最適化等、より効率的なデータベース構築には、疲労破壊統計が重要となる。ここでは、横浜国立大学が保有する材料組織・欠陥情報から部品の破壊統計を予測する解析スキームを、NIMS が保有する超合金における特性予測技術に融合することで、疲労寿命のばらつきを予測するとともにタービンディスクの信頼性の検証を行う。

研究項目②:次世代単結晶材料の製造性・耐環境性及び特性評価

(担当:株式会社 IHI)

- a. NIMS において開発された国産次世代単結晶材料 TMS-238 の将来のエンジン開発における採用を目指し、製造性・耐環境性を確認するデータを取得し、設計に必要な材料データベースの構築を行う。比較材でのデータ取得を行ない、TMS-238 の競争力を検証するとともに、製品模擬形状での試作を行ない、製造性を確認する。
- b. 製造性の確認においては、マイクロ組織と結晶欠陥の発生を最適化するような熱処理条件の設定を行う。Heat Lot ごとのばらつきや casting 固有の製造条件 (casting 方案, 鑄型, 鑄造炉) に起因する影響評価するための特性データおよび結晶欠陥に対する強度影響データを蓄積するなどして材料スペックを仮設定する。
- c. 耐環境性の確認においては、強度だけではなく、高温での組織の安定性や腐食性などの使用において不具合を起こすリスクを検証するデータを取得する。
- d. 上記を踏まえ、設計に必要な疲労強度などの材料データベースを構築する

研究項目③:次世代単結晶材料の材料特性評価

(担当:川崎重工業株式会社)

国内共同利用が可能な材料データベースの構築に向けて、航空機エンジン向け材料の物性値・機械的特性等の材料特性の取得を行う。航空機エンジン部材の中でエンジンの高効率化に寄与するタービン動翼用の耐熱材料として用いられている Ni 基単結晶合金を対象材料として、具体的には物質・材料研究機構にて開発されて優れた高温強度と耐環境性を有する Ni 基単結晶鑄造合金 TMS-238 ならびに汎用単結晶合金について、材料特性評価を実施する。

TMS-238 については、まず最初に材料に求められる優れた機械的特性を安定して得るための各種製造条件を定めるため、種々の条件で製造した試験用材料を用いて基礎的な強度試験を実施して、材料の製造条件 (管理値) を定める。

次に定められた製造条件に従って試験用材料の製造を行い、基礎的な部品設計に必要な強度特性値を得るために一定量の各種強度試験を実施して信頼性を有する材料特性データを取得する。また得られた材料データをもとに材料の機械的特性の仕様要求値を定める。また汎用単結晶合金についても同様の材料特性を取得し、TMS-238 との比較を行う。なお製造条件の確定ならびに材料特性データの信頼性確保のためには相当量の各種強度試験を実施する必要があるため、参画機関内で分担して試験を行い、それらを統合して最終的に標準的な材料特性を決定する。

研究項目④: 次世代ディスク・単結晶材の特性評価

(担当: 三菱重工航空エンジン株式会社)

a. データベース構造検討

構築する材料データベースに入れるべきデータ種類等を関係機関とともに検討・決定する。

b. ディスク材料データベース構築

材料データベースに入れるデータの一つとして NIMS 開発ディスク材料である TMW-4M3 を対象として材料評価・部品評価を行う。なお、評価に用いる材料は三菱重工業が主導して製造し供給されたものを用いる。取得すべき材料データを明確化して、評価を行う。また、比較材料の特性評価も行う。さらに、部品形状の評価も行う。

c. ブレード材料データベース構築

材料データベースに入れるデータの一つとして NIMS 開発ブレード材料である TMS-238 を対象として材料評価・部品評価を行う。なお、評価に用いる材料インゴットは IHI が主導して製造し供給されたものを用いて、単結晶供試体を作製する。取得すべき材料データを明確化して、評価を行う。

d. データ比較・検証

NIMS 開発材料である TMW-4M3、TMS-238 のデータと比較材のデータの比較を行い、それぞれの材料の特徴を明確化する。各種材料評価での試験条件・試験場所等のラウンドロビン評価を行う。また、ディスク材のき裂進展試験において、パリス則評価を行う。

研究項目⑤: 次世代ディスク材の特性評価

(担当: 株式会社本田技術研究所)

ディスク材に関する材料スペックの作成、材料データベースを構築するために必要な評価項目および仕様の作成、材料評価を実施する。

研究項目⑥: 「次世代ディスク材の製造」

(担当: 三菱重工業株式会社)

次世代タービンディスク材料の製造技術を確立するとともに製造したディスク素材を航空機エンジンメーカーに供給。また、製造仕様のひな形を策定、確定し、各航空機エンジンメーカーの部材製造時にひな形として使うことを可能とする。本業務では、NIMSが開発した溶解鍛造材(TMW-4M3)とNIMSと Honda が開発した粉末鍛造材(HGN300 および HGN200)を対象とする。また、実用化に不可欠な金型の仕様策定も実施する。

⑥-1 溶解鍛造ディスク材の製造と製造仕様策定

2021 年度は、インゴット作製のため、採用するトリプルメルトプロセス、VIM、ESR、VARを国内に製造所がある2社にて実施する。ただし、1社については、トリプルメルトプロセスの仕様を妥当化するため、当該材の凝固偏析試験を実施した上で、溶解を開始するため、VIMまでのみの実施とする。凝固偏析の試験結果は、VARプロセスの製造仕様の決定に用いる。これらの製造仕様を参画する航空機エンジンメーカーとともに取りまとめる。

2022 年度は製造したトリプルメルトインゴットを熱間鍛造し、アップセット鍛造前のビレットを作製する。ビレットのサイズは、航空機エンジンメーカーと協議し決定する。また、ビレットの製造仕様を取りまとめる。

2023年度は、2022年度に作製したビレットをアップセット鍛造し、ディスク素材に仕上げる。仕上げる形状は参画する航空機エンジンメーカーと調整する。また、アップセット鍛造、その後の熱処理、加工について製造仕様書を策定する。作製したディスク素材は、参画メンバに供給する。

2021年度から2023年度に、材料評価を早期に開始できるよう、参画する航空機エンジンメーカーの要望にもとづき、小型の試験材を提供できるよう調整する。また、外注先の素材メーカーの協力を得て、ディスク素材提供時期の前倒し可能とする施策を検討する。

⑥-2 粉末鍛造ディスク材の製造と製造仕様策定

2021年度から2022年度にかけて、素材メーカーでの量産化に必要な予備検討を実施するとともに、粉末鍛造ディスク用の粉末製造を開始する。

2023年度からは、2021年度から2022年度の予備検討結果、2022年度で終了するSIPプロジェクトの成果に基づき、粉末鍛造ディスクの製造、製造要領書の策定を実施し、作製したディスク素材を参画メンバに供給する。2023年度は、粉末製造を継続し、参画する航空機エンジンメーカーと協議し、製造仕様書を策定する。

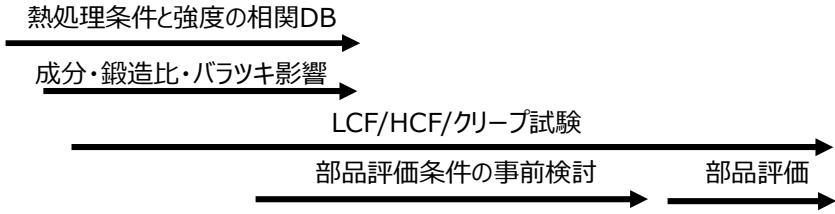
2024年度は、2023年度に作製した粉末および2024年度にも追加製造する粉末を用いて、HIP成型、ビレット製造を実施する。また、航空機エンジンメーカーと協議し製造仕様書を策定する。

2025年度は、2024年度に作製したビレットをアップセット鍛造して、ディスク素材に仕上げる。仕上げる形状は参画する航空機エンジンメーカーと調整する。また、アップセット鍛造、その後の熱処理、加工について製造仕様書を策定する。作製したディスク素材は、参画メンバに供給する。

⑥-3 鍛造金型の製造と仕様策定

アップセット鍛造時の金型として粉末HIP金型、DED造形金型(補修にも対応)について量産化対応を行い、製造仕様を策定する。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				2024年度				2025年度			
	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期
① 特性予測・変形機構 解明と材料データベ ースの構築	組成・プロセススペック決定支援 1500トンプレス鍛造								データベース構築 耐環境き裂進展・ギガサイクル疲労・長時間クリープ											
①-1 材料のエンジン 性能効果検証	航空機エンジン技術動向調査								エンジン性能効果検証											
①-2 タービンディスク の疲労破壊統計に 関する研究	破壊統計プロトタイプモデル構築								NIMS特性予測 モデルとの連結				実機模擬形状品 でのケーススタディ							
② 次世代単結晶材料の 製造性・耐環境性及 び特性評価	a. 製造性・耐環境性データ取得 競争力の検証								模擬形状での製造性確認											
	b. 欠陥影響把握/材料スペック仮設定 材料欠陥の影響把握								スペックの仮設定											
	c. 使用リスク検証データ取得																			
	d. 材料データベース構築																			
③ 次世代単結晶材料の 材料特性評価	材料データベース整備								熱処理条件検証および製造条件の確認											
									仕様要求値・材料特性の設定 (スペック)											
									引張・LCF・HCF・クリープ試験											
④ 次世代ディスク・単結 晶材の特性評価	データベース構築																			
	ディスク材特性影響評価																			
	ディスク材 LCF/HCF/クリープ試験																			
	ディスク部材評価																			
	ブレード材特性影響評価																			
	ブレード材 LCF/HCF/クリープ試験																			
									ブレード部材製造性評価											
	比較材評価・検証																			

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				2024年度				2025年度			
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期
⑤ 次世代ディスク材の特 性評価	<p>熱処理条件と強度の相関DB </p>																			
⑥ 次世代ディスク材の製 造	<p>溶解鍛造ディスク製造・仕様策定 </p>																			

4. 成果の達成状況と根拠

ブレード用単結晶超合金 TMS-238 およびディスク用鋳鍛造超合金 TMW-4M3 について、組成、プロセス等の仕様検討を行い、素材を調達、各種試験を開始した。製造プロセスが特性に与える影響を検討し、また海外汎用材料との特性の比較を行った。材料データベースのシステムは計画より2年早く、導入が完了した。2023年度からデータの蓄積を開始する予定である。

国内エンジンメーカー1社において、データベース構築中の TMS-238 および TMW-4M3 に関してそれぞれ適合する2部材への活用の検討が始まっており、目標を上回る成果となっている。

研究項目①: 特性予測・変形機構解明と材料データベースの構築 担当: 物質材料研究機構

達成状況: ◎

ブレード用単結晶 Ni 基超合金 TMS-238 の仕様検討支援として、組成のずれによるクリープ強度の変化を検討し、許容できる組成範囲を提案した。NIMS が開発した合金設計プログラムを用い、TMS-238 の公称組成と、その組成から各元素を±0.5wt%増減させた場合について、1100°C/137MPa の条件でのクリープ破断寿命を計算した。図1に計算結果を示す。

公称組成の TMS-238 のクリープ破断寿命は 1350 時間と予測され、これに対して各元素の添加量を増やすと寿命は長くなることわかる。しかし添加量を増やすと γ 相、 γ' 相の固溶限を超えて組織安定性が低下し、TCP (Topologically Closed Pack) 相が析出する。この析出はクリープ強度を低下させるため、合金設計プログラムにより固溶指数 SI 値を計算し、組織が安定となる上限の添加量を計算した。これらの予測により、強度、組織安定性の観点から許容できる組成範囲を提案した。

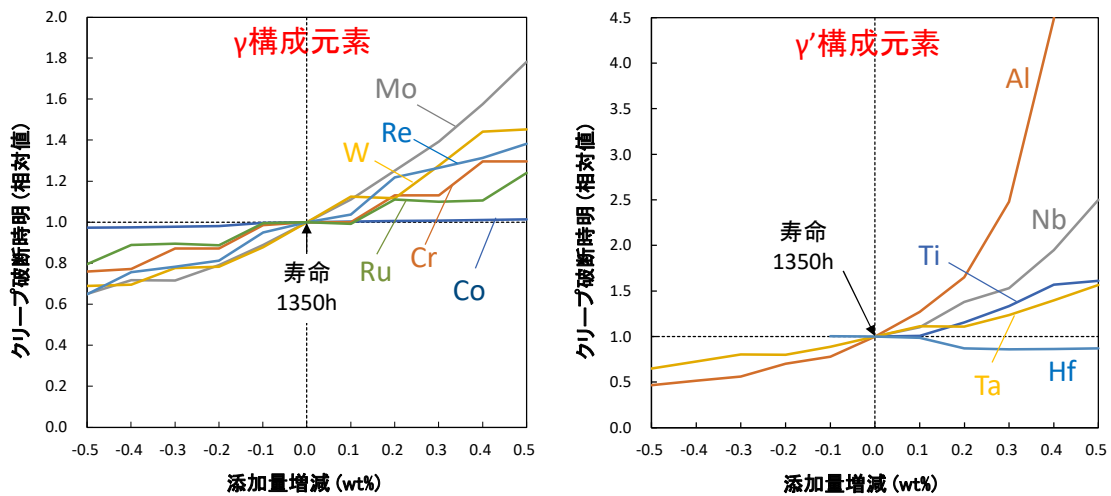


図1 合金元素の増減によるクリープ破断寿命の変化予測

さらに、TMS-238 の仕様検討支援として、溶体化(均質化)熱処理条件の検討を行った。熱処理温度、時間を変えた試料の組織観察と濃度分布分析を EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)により行った。最初に凝固するデンドライトコア部と最終凝固部となるインターデンドライト部の各元素濃度の比を熱処理温度に対して図示したものが図 2 である。熱処理温度が上昇すると、デンドライト中の濃度(C_d)とインターデンドライト中の濃度(C_{id})の比は 1 に近づき、均質化されていることがわかる。また、拡散が遅いレニウムの均質化が最も難しいことがわかる。経済性の観点から、熱処理条件はなるべく低い温度、身近に時間が望ましいとされる。しかし均質化が不十分な場合強度特性が低下することを実験により明らかにした。また熱処理温度が高すぎると部分溶融が起こりやはり強度低下につながるため、部分溶融が起こらない範囲で許容できる溶体化熱処理条件を提案した。

材料データを蓄積するデータベースシステムの導入を行った。プロジェクト参画機関内で検討したデータ項目、構成によるシステムを構築し、加速予算により計画より 2 年早く導入することが可能となった。2023 年度から各参画機関によるデータの蓄積を開始し、システムの微修正を行いながらデータベースの充実化を図っていく予定である。

データベース構築については計画より早まり、他は計画通りため、達成状況は◎とする。

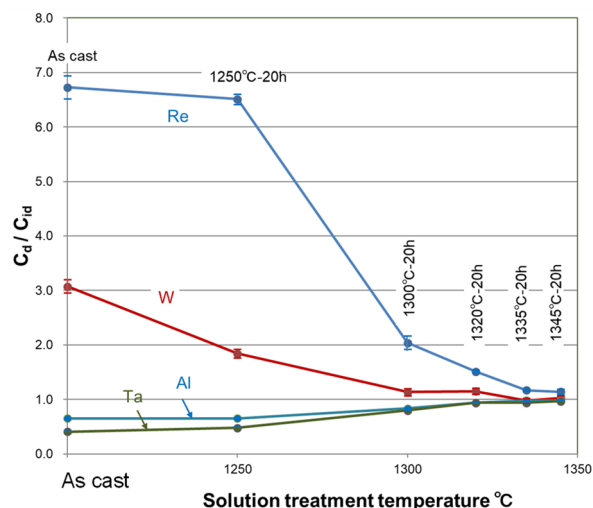


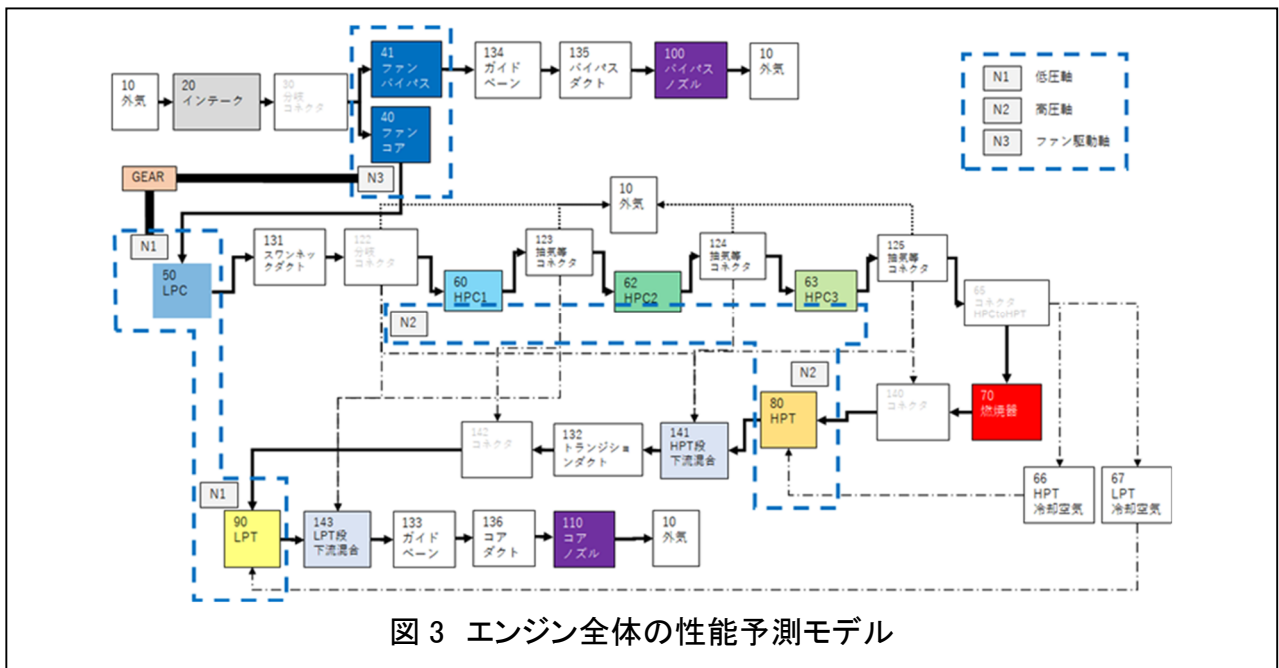
図 2 溶体化熱処理温度と元素濃度

① -1 材料のエンジン性能効果検証

担当; JAXA

エンジン性能効果検証の対象となる想定エンジンを推定するため、航空エンジン技術の動向調査を行った。調査は、市場台数が多い(従ってインパクトが大きい)推力レベル 100~150kN 程度の単通路亜音速機用ターボファンエンジンを中心に行った。この調査結果を踏まえ、エンジン形態やその代表諸元(推力、燃費、全体圧力比、バイパス比、等)の相関を把握し、またその相関から、当該開発材が適用されるであろう近い将来の想定エンジン案の代表諸元を推定した。

また、性能効果を算出するため、並行して、エンジン全体の性能予測モデルも検討した(図 3 参照)。この全体モデルの策定に引続き、2024 年度以降は、当該開発材の適用を想定しているタービン翼等を中心に、さらに詳細な要素性能予測モデルを検討し、そして最後に、構築したエンジンモデルを用いて、材料データベースに基づく材料のエンジン性能効果検証まで進める予定である。



① -2 タービンディスクの疲労破壊統計に関する研究

担当; 横浜国立大学

横浜国立大学が保有する材料組織・欠陥情報から部材の破壊統計を予測する解析スキームについて、NIMS が保有する超合金における特性予測技術への融合に向けた準備を行った。具体的には、図 4 に示すような材料組織・欠陥の様々な分布特性に対して、一般化極値分布、一般化パレート分布、対数正規分布およびべき乗則分布などの各種確率密度関数を用いて近似するための方法論を整理した。また、任意の有限要素解析モデル内に材料組織・欠陥を確率的に発生させ、強度解析用の構成式の入力情報として使用するためのサブルーチンを構築した。他方、タービンディスクの疲労破壊統計解析に向けた取り組みとして、N 個の簡易ディスクモデルを作成し、確率的に分布する欠陥周りの局所破壊応力を評価するとともにモデルごとの危険部位を可視化した(図 5)。加えて、Ni 基超合金疲労モデルの有限要素法サブルーチン化について NIMS との議論を開始した。

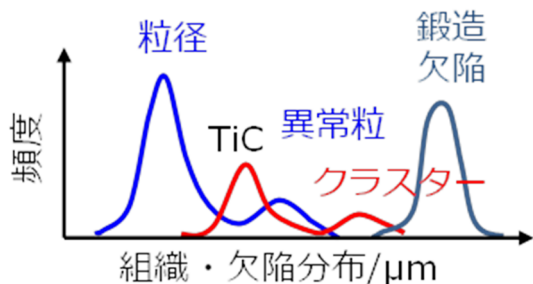
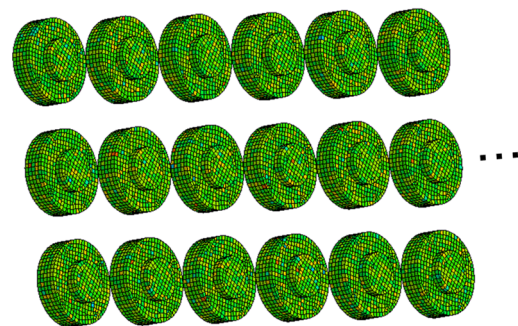


図 4 材料組織・欠陥の分布特性



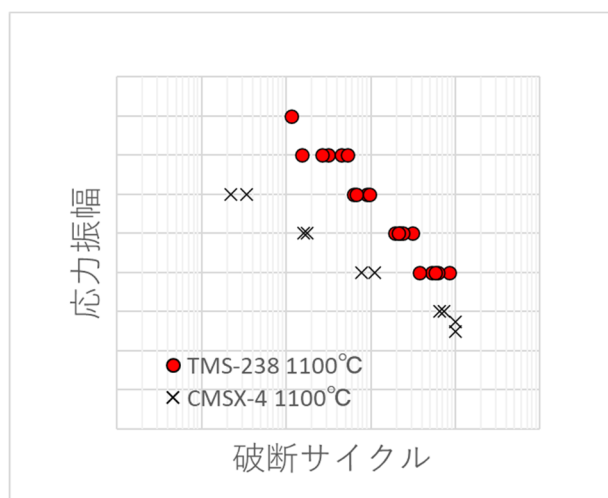
き裂発生応力のコンター：赤色が危険部位 (均一応力・室温の条件の例)

図 5 起点欠陥の確率的分布を導入したディスクの有限要素解析モデル

a. 製造性・耐環境性評価データの取得

参画機関への提供用も含めて TMS-238 インゴットの製造を行い、評価データ取得用の単結晶素材の製造を実施した。クリープ強度については TMS-238 が既存の単結晶素材に対して競争力があることがわかっていたが、高サイクル疲労、低サイクル疲労特性についても 700°C, 1100°C いずれの温度域においても CMSX-4 よりも強度が高く、競争力を有していることが確認できた。

一方、NIMS の試験試作用の鑄造炉の標準製造条件を用いて、量産鑄造炉にて TMS-238 の製造を実施したところ、想定よりも多くの結晶欠陥が発生し、鑄造条件の検討をしていく必要があることがわかったことから、鑄造シミュレーションの適用や欠陥発生メカニズム解明を実施しながら、製造性の評価を実施していく。

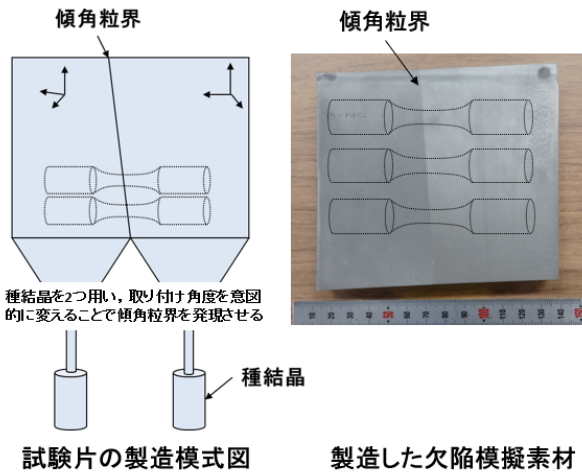


1100°C TMS-238 と CMSX-4 高サイクル疲労の比較

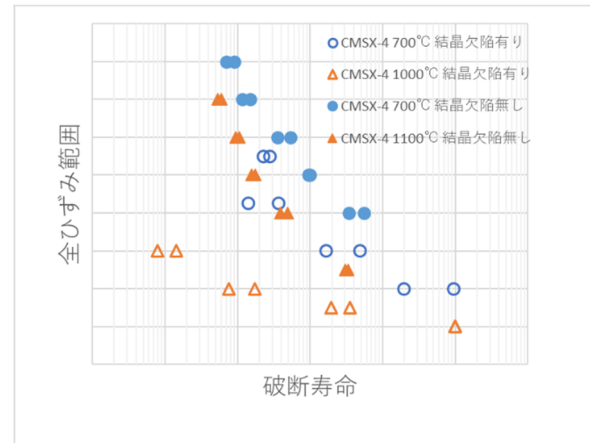
b. 欠陥影響把握・材料スペックの仮設定

単結晶鑄造で発生する可能性のある欠陥の強度への影響を把握するため、結晶欠陥の一つである傾角粒界(界面を境に結晶の成長方向に方位差をもつもの)試験素材の製造方法を開発し、比較材の CMSX-4 を用いて、傾角粒界の方位差が所定の値に制御された素材の製造に成功した。その素材を用いて引張試験を行ったところ、方位差 8 度を超えるところから強度影響が出始め、12 度を超えると急激に強度低下があることが分かった。さらに低サイクル疲労特性の評価では、温度域により強度低下の方位依存性の傾向が異なり、1000°C 以上の温度域の方が強度低下への影響が強いことが分かった。

今後は TMS-238 を用いた傾角粒界入り素材の製造及び強度評価を実施し、CMSX-4 との違いについて検証を実施していく。また、欠陥として単結晶の鑄物表面に発生する可能性のある Shrinkage を再現する素材の製造方法の開発を実施していく予定であり、材料スペックの仮設定に向けた欠陥許容値選定データの収集を行っていく。



傾角粒界を含む試験片素材の製造方法の開発



傾角粒界の低サイクル疲労寿命に与える影響評価

c. 使用リスク検証データ取得

TMS-238 の溶体化処理の熱処理条件の選定のため、マイクロ組織、材料強度、工業的な経済性を判断項目として評価を行い、条件を 2 条件に絞り込むことができた。また製造工程中に発生する可能性のある再結晶欠陥について、CMSX-4、TMS-238 の 2 材料を用いて、再結晶欠陥の発生しやすいさの定量的な評価手法を開発することができた。

今後は、現在製造中のエンジン部材にて適用されている耐酸化コーティングを模擬したコーティングを施工し、コーティングと合金との相性の確認及び耐酸化性の評価を実施し、使用リスクの検証データの取得を実施していく。

d. 材料データベース構築

素材の来歴や試験条件、試験結果について航空エンジンの材料データベースに必要な収録項目を整理し、参画機関で共通のデータフォーマットを完成させ、海外 OEM でも使用実績のある管理システムの運用の開始に目途が立った。今後はこれまでに取得したデータの登録を実施し、収録内容の追加や使いやすいフォーマットの改修を実施していく。

国内共同利用が可能な材料データベースの構築に向けて参画機関で協議を行い、必要な機能を有した材料データベースの管理システムとして海外 OEM でも使用実績のある管理システムを選定した。参画機関で共通してシステムを利用するため、代表機関であるNIMSへのシステム導入に向けた調整を行っており、2023年度中に運用を開始する予定である。

材料データベースへ格納する航空エンジンのタービン動翼用の耐熱材料のうち、NIMSにおいて開発された次世代単結晶材料 TMS-238 について、優れた強度特性と経済性を両立する熱処理条件を見出すために複数の候補条件を定め、各熱処理を行った試験片を用いて材料試験を実施した。図 1 および図 2 に熱処理条件の異なる試験片で実施した高温引張試験ならびに高温クリープ破断試験の結果を示す。

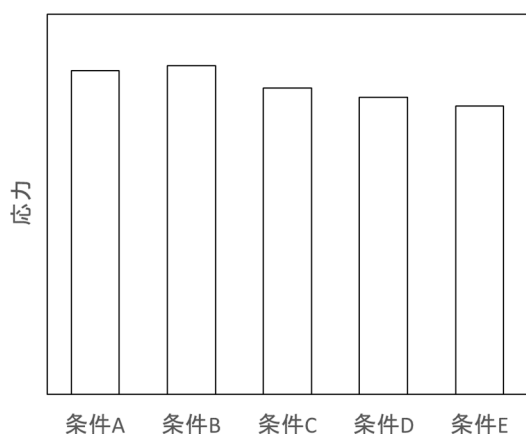


図 1 TMS-238 高温引張強度

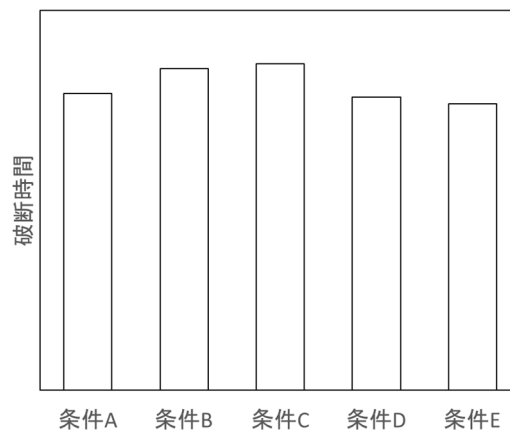


図 2 TMS-238 高温クリープ破断時間

熱処理条件によって引張強さとクリープ寿命に異なる傾向が見られたが、今後は更に材料試験を実施したうえで、製品への適用を考慮した熱処理条件を決定する予定である。

TMS-238 の比較として汎用 Ni 基単結晶材料 CMSX-4 について材料試験を実施した。これまでに引張試験、クリープ試験、ならびに疲労試験を行い、各試験データを取得した。図 3 および図 4 に引張試験ならびにクリープ試験の結果を示す。

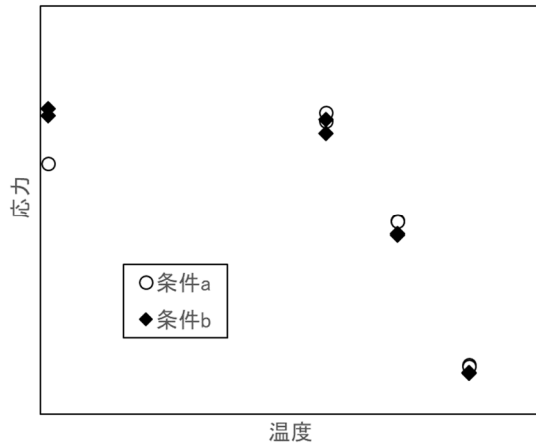


図 3 CMSX-4 引張強度

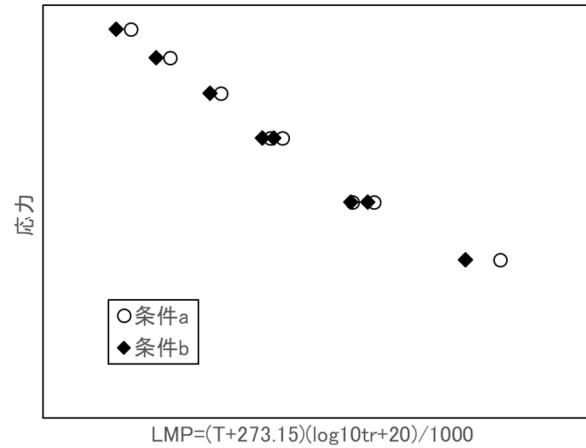


図 4 CMSX-4 クリープ強度

CMSX-4 の一般的な 2 種類の熱処理条件 a および条件 b を適用した試験片を用いて試験を行ったところ、条件 a の方が高温引張強さおよびクリープ強度に優れていたため、条件 a を選定して以降 CMSX-4 の材料データを取得した。引き続き材料試験を実施してデータを取得するとともに、単結晶合金の結晶方位による材料特性の違いを確認する予定である。

達成状況: ○

a. データベース構造検討

構築する材料データベースに入れるべきデータ種類等を関係機関とともに検討中。構造の基本フォーマットを作成し、関係機関で共有した。2023 年度中に基本フォーマットを確定させる予定。

b. ディスク材料データベース構築

材料データベースに入れるデータの一つとして NIMS 開発ディスク材料である TMW-4M3 を対象として材料評価を行い、基本特性(高温引張特性)を取得した。なお、評価に用いる材料は三菱重工業が主導して製造し供給されたものを用いた。2023 年度中に動的特性(高温疲労特性等)を取得する予定。

c. ブレード材料データベース構築

材料データベースに入れるデータの一つとして NIMS 開発ブレード材料である TMS-238 を対象として材料評価を行い、基本特性(高温引張特性)を取得した。なお、評価に用いる材料インゴットは IHI が主導して製造し供給されたものを用いて、国内メーカーにて単結晶供試体を作製した。

2023 年度中に動的特性(クリープ特性等)を取得する予定。

d. データ比較・検証

NIMS 開発材料である TMW-4M3、TMS-238 のデータと比較材のデータの比較を行った。ディスク材料の比較材としては、AD730と IN718DA を選定し、それらの基本特性(高温引張特性)を取得した。下図に、ディスク材(TMW-4M3)とその比較材(AD730、IN718DA)の高温引張特性を示す。TMW-4M3 の優位性が確認できた。今後様々な特性において比較する。

ブレード材料の比較材としては、CMSX-4 を選定し、その基本特性(高温引張特性)を取得した。下図に、ブレード材(TMS-238)とその比較材(CMSX-4)の高温引張特性を示す。TMS-238 の優位性が確認できた。今後様々な特性において比較する。

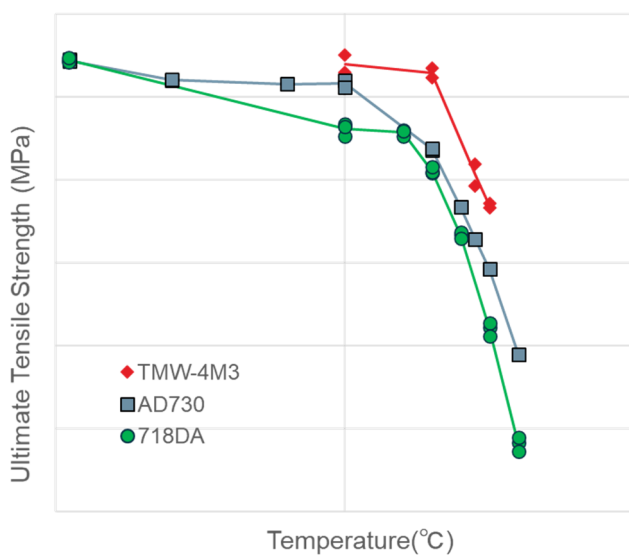


図 ディスク材料とその比較材の高温引張特性

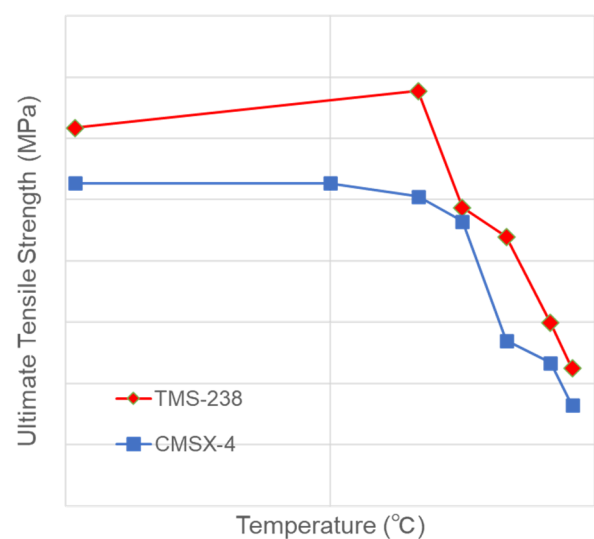


図 ブレード材料とその比較材の高温引張特性

達成状況:○

本田技術研究所では次世代タービンディスク候補材として(株)三菱重工業より提供された TMW-4M3 合金および比較材として AD730 合金の評価を進めている支給材の評価を実施している。取得結果の一部を図 1 および図 2 に示す。

図 1 TMW-4M3 の疲労強度

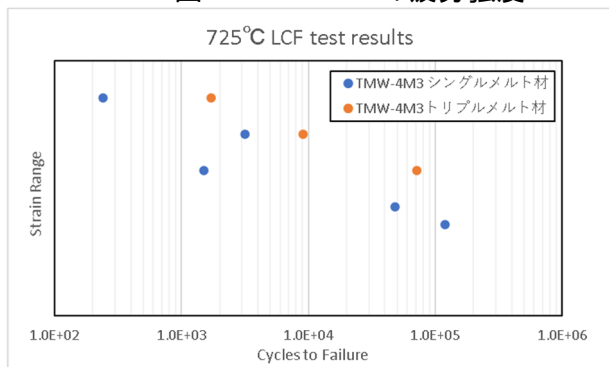


図 2 評価材のクリープ強度

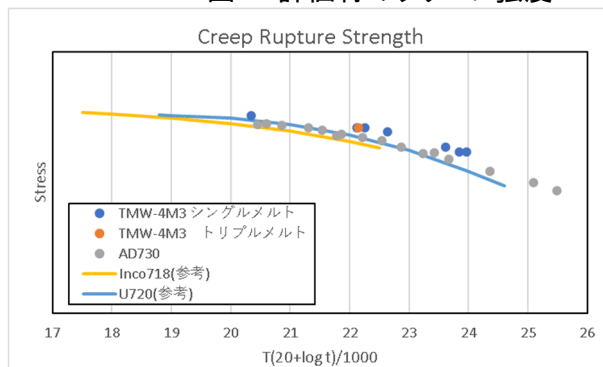


図 1 より TMW-4M3 のシングルメルト材とトリプルメルト材を比較するとシングルメルト材において疲労強度が低く、ばらつきが大きいことが確認された。事前の組織観察よりシングルメルト材には不均質組織が形成していることが分かっており、この差はその組織の違いに起因していると思われる。航空機エンジン設計においては最小値が重要であり、こういった特性におけるばらつきは設計許容値に重大な影響を与えるため、厳密に管理されなければいけない。これらの試験から得られた結果を反映し、航空エンジン用途に向けた TMW-4M3 のスペックを作成する予定である。

図 2 より本プロジェクトの評価対象である TMW-4M3 合金は実用材である Inco718 や U720、比較材である AD730 より優れたクリープ特性を有しており高圧ディスク材として高いポテンシャルを有していることが分かる。

2022 年度においては素材の支給遅れにより評価に遅れが生じたが、2023 年度末には表 1 に示す特性を使用想定温度の全域で取得し、評価材での部品の成立性の簡易判断が可能となるデータベースの構築が完了する見込みである。

表 1 本田技術研究所で構築予定の材料データベース登録項目

物理的特性	密度	引張特性	0.2%耐力
	ヤング率		引張強さ
	剛性率		伸び
	ポアソン比		絞り
	比熱		クリープ特性
	熱伝導率		高サイクル疲労特性
	熱膨張率		低サイクル疲労特性
機械的特性		亀裂進展特性	
		破壊靱性値	
		衝撃試験	

⑥—1 溶解鍛造ディスク材の製造と製造仕様策定

国内ファーストベンダのトリプルメルトインゴットを熱間鍛造し、ビレットを経てディスク素材まで作製し、参画メンバに供給した。また、航空機材ではコストや信頼性を競争させるためにマルチベンダ化が必要であり、実績のあるファーストベンダに加えて国内セカンドベンダでも規格化を目指したインゴットを製造した。2023 年度に鍛伸・据込鍛造し、プロセスの異なる別水準のディスク素材に仕上げるとともに、これら対象材の製造仕様書の策定を開始する予定。



図 溶解鍛造ディスク材(ファーストベンダ)



図 VAR インゴット(セカンドベンダ)

⑥—2 粉末鍛造ディスク材の製造と製造仕様策定

製造プロセス中にコンタミが混入しないための仕様策定を行い、使用する粉末の粒径分布を検討するとともに、小型粉末 HIP 材を試作し、組織観察により健全性を確認した。また、粉末鍛造ディスク材の試作結果を製造プロセスにフィードバックする十分な期間を確保するために、前倒して粉末製造を開始した。2023 年度は、一連の製造プロセスでディスク試作する予定であり、参画する航空機エンジンメーカーと協議し、製造仕様書の策定を開始する計画。

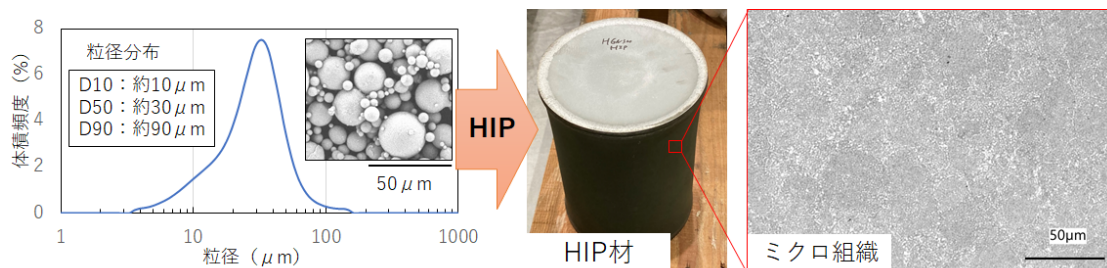


図 粉末予備試作および HIP 材の組織確認

⑥—3 鍛造金型の製造と仕様策定

アップセット鍛造時の金型として粉末 HIP 金型や DED 造形金型について量産化対応を検討し、検証用の小型金型造形モデルを試作した。2023 年度はこの設計技術を基に、小型金型を試作し耐久性を検証するとともに、粉末 HIP 金型技術についても検証を実施する予定。

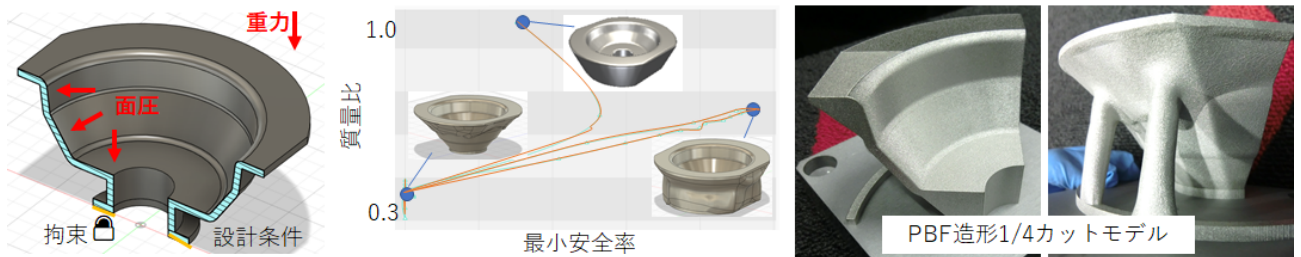
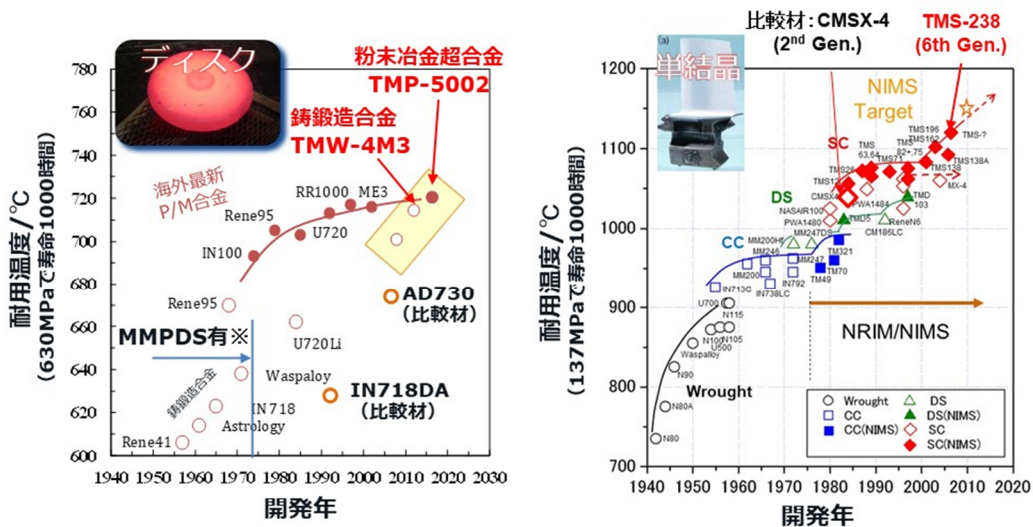


図 金型設計および縮小カットモデル

5. 成果の意義

本プロジェクトでデータ取得対象とした TMS-238、TMW-4M3 は、図に示すように海外の汎用材料に比べて顕著に高い耐用温度を持つ。これらの材料を航空エンジン部材として実用化することで、エンジン性能の向上、燃料消費率の低減、CO₂ 排出量の低減を実現することができる。本プロジェクトは国内のエンジンメーカーがこれらの先進材料を部材として検討するためのデータベース構築を行うものであり、NIMS、JAXA、横浜国大が特性予測による仕様検討、エンジン性能予測、破壊統計予測等を行って、企業による特性評価、データベース構築を支援している。



※MMPDS: Metallic Material Properties Development and Standardization

図 TMW-4M3、TMS-238 と海外材料の耐用温度

波及効果として、本プロジェクトの対象合金は発電タービンに適用することが可能であり、構築するデータベースを公開することで発電分野での応用につながれば、さらに CO₂ 排出量の削減を期待することができる。また、今回国内の競合企業が共通利用できるデータベースを作るという枠組みが実現したことは、今後の材料開発、材料評価において画期的な副次的成果と言える。

6. 実用化への道筋と課題

(1) 国立研究開発法人物質・材料研究機構

今回構築するデータベースは、プロジェクト終了後も NIMS のデータ中核拠点に置き、産官学連携の場としてこの枠組みを継続運営していく。各参画企業が部材設計などさらに実用化に向けたフェーズに入る場合は、データベースを用いた特性予測技術を高度化し、各企業を個別に支援していく。

(2) 株式会社 IHI

TMS-238 は先進の第 6 世代単結晶材であり、クリープ強度と高温での耐食性をバランスよく兼ね備えた材料であり、本研究開発でも高いクリープ強度が確認されている。耐食性コーティングとの親和性や製造のロバスト性を確認し、TMS-238 の競争力を明らかにしていく。

2050 年のカーボンニュートラルに向けて、燃費改善の要求が上積みされており、第 6 世代単結晶材をもたない欧米のエンジン OEM に TMS-238 の採用を働きかけていく。

民間エンジンの国際共同開発において、日本メーカーが高圧タービン翼の設計を担当した実績はないが、JAXA との共同研究などを通じて、世界に通じる設計技術を獲得し、高圧タービン翼への参入を目指している。

(3) 川崎重工業株式会社

設計および製造パートナーとして参画している海外 OEM における材料に関するニーズを捉え、新規のエンジン開発への参画時に優れた開発材料の適用提案を行う。ただし適用に際しては参画可能なエンジン部位、ならびに材料認証の取得要件が課題となる。

(4) 三菱重工航空エンジン株式会社

三菱重工航空エンジンは、現在、欧米航空エンジンメーカーの Tier1 の立場で航空エンジン部品製造を行っている。作業シェア拡大のために、新規材料を用いた部品設計・製造を計画している。本プロジェクトで得られた材料データベースを活用して、材料レベルの検証、部品レベルの検証、エンジン組み込み試験による検証を実施していきたい。

(5) 株式会社本田技術研究所

実用化については、まずは本プロジェクトで目標が達成されること、実用化に向けた解決不可能な課題がないことが確認されてから、社内において目標時期を含めて実用化に向けた検討を行う予定である。実用化を検討する時点での世の中の状況や、外部との関係、社内事情、サプライヤーの事情、開発スケジュールやコスト等により様々な制約が生じる可能性があるが、それらを解決することが課題である。

(6) 三菱重工業株式会社

開発した溶解鍛造ディスクと粉末 HIP 鍛造ディスクの製造技術および金型設計技術を速やかに国内エンジンメーカーや素材メーカーに継承することで、航空機エンジン部材への実用化を加速し国際競争力の向上に貢献する計画。本PJで策定した標準仕様(製造要領、スペック等)を基に実機部品に展開する際の、各適用部品の形状や要求仕様に合わせた製造プロセスの最適化およびそれに伴う量産体制の構築が課題である。

添付資料

- プロジェクト基本計画
- プロジェクト開始時関連資料：事前評価結果、パブリックコメント募集の結果
- 特許論文等リスト

「航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業」基本計画

材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

我が国の航空機産業は、民間航空機の機体構造・エンジンの国際共同開発事業を中心に産業規模を拡大させてきた。近年の世界的なCO₂排出量削減の動向を受け、各航空会社は燃費効率の高い旅客機の導入を進めている。これに伴い、航空機産業においても燃費性能を重視した、より性能の良い航空機・エンジンの製造が求められ、その結果、技術獲得競争がさらに激化している。

このような中、我が国航空機産業の競争力を強化していくためには、基礎開発だけでなく応用開発、特に量産段階における生産性向上を目指した部品や製品一体の製造技術向上や、環境性能の向上に資する材料や要素技術の開発が不可欠となっている。航空機エンジンに注目した場合、燃費向上に直結する高圧タービン技術や、更に材料分野に目を転じると航空機エンジン材料の軽量化、耐熱性・耐久性向上を目指した新たな材料の開発が重要である。

また、航空機産業では最終製品として求められる安全性・信頼性の高さ故、材料の段階から厳しい認証基準等が求められる。

これらのことから、本事業では我が国の航空機エンジン向け材料及び部品製造における競争力向上に資するため、(1) 量産化を志向した航空機エンジン部品の設計・製造プロセス(特に鍛造プロセス)の効率化、(2) 人工知能(AI)、マテリアルズ・インフォマティクス(MI)等の計算機科学を利用した国産材料の開発、(3) 航空当局の認証取得に向けた、航空機エンジンの材料特性及び実環境下における性能等のデータ収集、整備、蓄積を実施していく。

なお、航空機エンジンの耐熱性向上については2020年に文部科学省及び経済産業省が設置した「マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合」の中で「極限機能を有するマテリアル」及び「マルチマテリアル化技術」として取り上げられており、政府としても注力していくべきとされている。

② 我が国の状況

前述のとおり、我が国の航空機エンジン産業は国際共同開発への参画を通じて事業規模を拡大してきた(日本企業の参画例:Trent 1000、GEnX-1Bの約15%、PW1100G-JMの約23%)。

他方、我が国として航空機エンジン産業を更に成長させるためには、技術革新で優

位性を維持、拡大することが必要であるほか、航空機エンジン設計段階から開発に携わり欧米 OEM メーカーの戦略的パートナーとなっていくことが不可欠である。

③ 世界の取組状況

航空機エンジンの業界構造は欧米中心の寡占状態であり、GE 社（米）、RR 社（英）、P&W 社（米）といった OEM メーカーが、高い安全性とその品質保証体系、当局の認証管理のもと、他社参入による追随を許容しない市場を構築している。

④ 本事業のねらい

航空機の燃費改善、環境適合性向上の要請に応えるため、航空機エンジン向けに高性能材料を開発し、さらにその材料を用いた部品製造、量産化のための加工技術プロセス（特に鍛造プロセスに焦点を当てる）の効率化、高度化を図っていく。また、関連企業や研究機関等と連携し、航空機用エンジンに関する材料データ蓄積及び強度評価、性能評価等に必要データベースを整備する。川下である部素材産業及び加工・製造産業の連携により、当該部品を獲得し、航空機エンジン産業の国際競争力強化を目指す。

（2）研究開発の目標

① アウトプット目標

経済合理性を担保した国内における航空エンジン部品（ディスク部分）の鍛造プロセスを確立し、エンジン部品試作・評価を行う。

金属バルク材料の自動合成システム、結晶構造解析、組成分析、金属組織像取得などを順次分析するシステムを構築し、これらのプロセスを利用することで、一日当たり 100 サンプル数のデータを取得可能とする。その結果、従来の 1/10 の材料開発期間及び開発コスト 1/100 を達成する。またコンビナトリアル・バルク創製技術を用いて軽量・耐熱性に優れたハイエントロピー合金材料を 2 つ以上開発するとともに、その製造プロセスを開発する。マテリアルズ・インフォマティクス・ツールを構築して、代表的な金属 20 種のデータを蓄積する。

航空機エンジン用の評価システム基盤を整備し、3 部材以上での活用を可能とするデータベースを構築する。

② アウトカム目標

本事業で開発した成果が次世代航空機に搭載され、軽量化と航空機エンジンの高効率化による燃費改善が図られることにより、2040 年において、92.8 万トン／年の CO₂ 削減が期待される。

③ アウトカム目標達成に向けての取組

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）

は、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析・検討するとともに、技術推進委員会等において、研究開発の進捗管理や目標の見直しを行う等、細やかなマネジメントを実行することで、社会ニーズに合った研究開発を推進し、確実な実用化へと繋げる。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために以下のテーマについて、研究開発を行う。
具体的な開発内容は、別紙1の研究開発計画の通りとする。

- 研究開発項目① 「革新的エンジン部品製造プロセス開発」
- 研究開発項目② 「革新的合金探索手法の開発」
- 研究開発項目③ 「航空機エンジン用評価システム基盤整備」

研究開発項目①は、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進すべき研究開発であり、助成事業として実施する。また、開発成果の社会への浸透を図るため、成果の一部は開発段階に合わせて順次実用化する。

研究開発項目②のうち、事業開始から3年目までの【フェーズA：システム開発】は、自動合成システムから複数の分析システムを組み合わせてデータを大量取得可能なシステムの構築を目指す等、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り、協調して実施し、航空機エンジンの新部材への適用を目指す事業であり、委託事業として実施する。また、事業開始から4年目以降の2年間の【フェーズB：合金探索】は、フェーズAで構築したシステムをもとに合金探索のためのデータ取得を行うもので、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進すべき研究開発であり、助成事業として実施する（NEDO負担率1/2助成、中堅・中小・ベンチャー企業2/3助成）。

研究開発項目③は、評価システム基盤整備等、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り、協調して実施し、航空機エンジンの新部材への適用を目指す事業であり、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

NEDOはプロジェクトマネージャーとして、NEDO材料・ナノテクノロジー部 飯山 和堯を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、プロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

研究開発項目①については、2022年度にNEDOが公募によって研究開発実施者を選定する。研究開発項目②、③については、2021年度にNEDOが公募によって研究開発実施者を選定する。研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独または複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究

開発能力や研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、国立大学法人東京大学大学院工学系研究科 教授 榎学 氏をプロジェクトリーダー（以下、PL」という。）とし、各実施者はPLの下で研究開発を実施する。

また、技術動向調査の結果及び各研究テーマの進捗を元とした事業化（出口）を見据えた開発戦略（全体の最終目標達成に向けたテーマごとの研究開発ロードマップを含む）を構築し、効率的な研究開発・研究成果の実用化を目指す。

（2）研究開発の運営管理

①研究開発の進捗の把握・管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本事業の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、技術推進委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、随時、プロジェクトの進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。また、全体の最終目標の効率的かつ効果的な早期達成のため、（新たな課題の対応も含む）関連技術や市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、実施方針に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。早期実用化が可能と認められた研究開発については、期間内であっても研究を完了させ、実用化へ向けた実質的な研究成果の確保と普及に努める。

②技術分野における動向の把握・分析

NEDOは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析・検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

研究開発項目①については2022年度から2025年度までの4年間とし、②及び③については、2021年度から2025年度までの5年間とする。なお、研究開発項目②については【フェーズA】を2021年度から2023年度までの3年間、【フェーズB】を2024年度から2025年度までの2年間とし、【フェーズB】の実施体制構築に当たっては公募を実施することとする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、中間評価を2023年度、事後評価を2026年度に実施する。

当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

NEDO及び研究開発実施者は、研究成果を広範に導入・普及するように努めるものとする。

②知的財産権の帰属、管理等取扱い

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

③知財マネジメントに係る運用

委託事業である研究開発項目②【フェーズA】、③については、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

④データマネジメントに係る運用

委託事業である研究開発項目②【フェーズA】、③については、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針」を適用する。

(2) 「プロジェクト基本計画」の見直し

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制、新規テーマの追加等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号ニ及び第三号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

①2021年2月、制定。

②2021年12月、研究開発項目①に関する事項の変更。

③2023年1月、研究開発項目②における【フェーズA】の事業期間の延長。

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目① 「革新的エンジン部品製造プロセス開発」

1. 研究開発の必要性

航空機エンジン部材の競争力強化には、後述の研究開発項目②で行うような材料開発や品質向上だけでなく、量産段階における歩留り改善、コスト競争力強化が必須である。そのためには各種材料にあわせた航空機エンジン部品の量産プロセスにおけるタクトタイムの向上や投資効率の向上等、製造プロセスの革新が重要となる。本項目では、特に鍛造プロセスに焦点を当て、製造プロセスの革新を目指す。

2. 研究開発の具体的な内容

航空機エンジン部品に必要な安全性・信頼性を確保するための品質を担保しつつ、航空機エンジン部品の製造工程（鍛造プロセス等）の効率化、高度化を図る。その際、金型材料の見直し等、製造工程に必要な設備の効率化も含めて検討する。

3. 達成目標

【中間目標（2023年度）】

経済合理性を担保した国内における航空エンジン部品（ディスク部分）の鍛造プロセス候補を決定する。

【最終目標（2025年度）】

経済合理性を担保した国内における航空エンジン部品（ディスク部分）の鍛造プロセスを確立する。また、確立した製造プロセスにより、部品試作・評価を行う。

研究開発項目② 「革新的合金探索手法の開発」

1. 研究開発の必要性

航空機エンジン向け材料は、高温、高圧という過酷な環境に耐えることが必要であり、複数の金属元素を適切に組み合わせることで、従来製品よりも軽量、耐熱性、耐摩耗性、熱伝導性、導電性などに優れた「全く新しい合金」の開発が可能となる。

合金特性は金属元素の組合せとプロセス条件で決まるが、その組合せは膨大な数に上るため、従来型の実験方法では天文学的時間が必要となる。合金探索に必要な良質なデータを大量かつ高速に収集し、情報科学を利用することで、所望の特性を有する合金の探索時間を大幅に短縮することで迅速な合金材料開発を行い、航空機エンジンへの適用可能性を模索する。

2. 研究開発の具体的な内容

(a)多種多様な合金組成の金属片を高速かつ自動で作製可能なシステム、(b)多量の合金サンプルを高速に分析できるシステム、(c) (a)と(b)を順次組み合わせてデータを取得可能なシステムの構築、(d)得られた大量のデータから最適な合金組成を導出するシステムが必須となる。上述した目的を達成するためには、laser directed

energy deposition (レーザ DED) 積層造形法を新たにコンビナトリアル材料対応に改良することで、信頼性の高い大量の実験データを効率的に取得することを可能にし、情報科学と融合したマテリアルズ・インフォマティクス合金材料開発への実装を図る。

具体的には事業開始から2年目までの【フェーズA:システム開発】では、自動合成システムと複数の分析システムを順次組み合わせて大量のデータを取得可能なシステムを構築する。また、事業開始から3年目以降の3年間の【フェーズB:合金探索】は、フェーズAで構築したシステムをもとに合金探索のためのデータ取得を行う。

3. 達成目標

【中間目標 (フェーズA 終了時点)】

- 自動合成システムと複数の分析システムを順次組み合わせて一日当たり20サンプル以上のデータを取得可能なシステムを構築する。
- 元素を選択し、金属組織像、結晶構造(X線結晶構造)などのバルク評価特性データを検索により取得できるソフトウェア(代表的な金属6種)を開発する。バルク特性と条件レシピとの相関関係は、アンサンブル機械学習などを用いた境界領域手法を組み込むこととする。

【最終目標 (フェーズB 終了時点)】

- 1日当たり100実験・評価データセットを自動的に取得可能な高速システムを開発することで、年間20,000セットのデータを取得可能とし、従来の1/10の材料開発期間および開発コスト1/10を達成する。
- 本データを用いて本事業で開発したコンビナトリアル・バルク創製技術を用いて、軽量・耐熱性に優れたハイエントロピー合金材料を2つ以上開発することを目標とする。
- 元素を選択し、金属組織像、結晶構造(X線結晶構造)などのバルク評価特性データを検索により取得できるソフトウェア(代表的な金属20種)を開発する。
- ハイエントロピー合金のためのユーザインターフェースを構築し、ユーザが元素間の関係を得やすくするための多元系材料に対応した可視化ソフトウェアを開発する。

研究開発項目③ 「航空機エンジン用評価システム基盤整備」

1. 研究開発の必要性

航空機エンジン用材料は欧米当局の認証を取得する必要があるが、認証取得に当たり、データ取得とベンチマークデータの収集が必要となる。

まず、データ取得に関しては、航空機エンジン材料の諸データ(合金組成、鑄造条件、鍛造条件、熱処理条件等)を使用環境(温度域、圧力等)に応じて試験する必要があり、膨大な試験工数と長期の試験期間が必要である。

また、ベンチマークデータの収集では、既存の航空機エンジン材料や国内材料のデ

ータ等を取得、蓄積、データベース化することが必要となる。

2. 研究開発の具体的な内容

航空機エンジン材料のデータを効率的に取得するために企業や研究機関等と連携し、データベースを整備する。

また、構築したデータベースに基づいて実際に部材を製造し、性能評価試験等を実施する。

3. 達成目標

【中間目標（2023年度）】

国内エンジンメーカーにおいて、1部材以上での活用（部材に使用する認定材料の選定）を可能とするデータベースの構築を中間目標とする。

【最終目標（2025年度）】

国内エンジンメーカーにおいて、3部材以上での活用（部材に使用する認定材料の選定まで実施）を可能とするデータベースの構築を目標とする。

(別紙2) 研究開発スケジュール

	2021	2022	2023	2024	2025	2026
研究開発 項目①		効率的な鍛造プロセス の設備設計・導入プロ セス開発		鍛造プロセス認 証取得に向けた 開発		
評価時期			中間 評価			事後 評価
研究開発 項目②	自動合成システム開発			軽量・耐熱 性に優れた 新合金材 料の探索に 向けたデー タ取得		
	自動分析システム開発					
	高速データ取得・ 解析システム開発					
評価時期			中間 評価			事後 評価
研究開発 項目③	データ蓄積・部材製造・評価試験					
評価時期			中間 評価			事後 評価
予算 (億円)	5	8	13	(13)	(12)	

(添付資料) プロジェクト開始時関連資料：事前評価結果

2020 年度事前評価結果

研究評価委員会において 2021 年度NEDO新規案件の事前評価を実施しました。結果は以下の通りです。

当該評価結果は、今後基本計画等に反映してまいります。

2020 年 11 月

案件名	航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業
推進部署	材料・ナノテクノロジー部
総合コメント	本事業は我が国の優位性のあるマテリアル分野での研究開発であり、その開発手法が劇的に変わるステージにさしかかる中で、本事業の実施は時宜を得ており、また国際的な競争力強化が期待できる。一方、過去の SIP を含めた構造材料開発研究の成果を活用し、新たな社会経済システム下でのグローバルな航空(機)需要を見極めたうえで、材料設計戦略を標準化や認定までを見据えて見直す必要がある。また、航空機エンジンは大量生産ではないので、本事業はできるだけ多くの他分野で利用できる基盤技術の開発となることが望ましい。

以上

(添付資料) プロジェクト開始時関連資料：パブリックコメント募集の結果

**「航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業基本計画（案）」に対する
パブリックコメント募集の結果について**

2021年2月12日

NEDO

材料・ナノテクノロジー部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。

1. パブリックコメント募集期間
2021年1月19日～2021年2月3日
2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞
計0件

以上

(添付資料) 特許論文等リスト

特許論文等リスト

【特許リスト】 該当なし

【論文リスト】 「査読付き」 0 件、「その他」 4 件

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	川岸京子	物質・材料研究機構	(報告) 航空機エンジン材料の国際標準化に向けたデータベース構築	日本ガスタービン学会誌, Vol. 49, No.4 (2021) 299-300.	無	2021/7
2	廣瀬伸吾, 江塚幸敏, 小木曾久人	産業技術総合研究所	(解説) レーザDEDによる細書/異種材造形と溶射との関わり	溶射, 58 (2021) 212-215	無	2021/10/31
3	廣瀬伸吾, 江塚幸敏	産業技術総合研究所	(総説) 電解砥粒研磨による高速金属鏡面化と各種金属材料への研磨事例	表面技術, 73 (2022) 2-6.	無	2022/11/01
4	廣瀬伸吾, 荒川さと子, 江塚幸敏	産業技術総合研究所	(解説) 教師付き機械学習を用いた溶射皮膜の品質管理と良否判定	溶射, 59 (2022) 233-236.	無	2022/10/31

研究開発項目① ; 該当なし、研究開発項目② ; 番号 2 ~ 4、研究開発項目③ ; 番号 1

【外部発表リスト】

(a) 学会発表・講演 5 件

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	廣瀬伸吾	産業技術総合研究所	(招待講演) デポジション方式積層造形(DED)と溶射	日本溶射学会第 115 回(2022 年春季)全国大会	2022/06/09
2	廣瀬伸吾	産業技術総合研究所	(特別講演) 表面処理プロセスのデータ化とプロセス・インフォマティクス	先進加工技術懇話会第 102 回例会	2022/07/15
3	廣瀬伸吾	産業技術総合研究所	(特別講演) 電解砥粒研磨を用いたステンレス鋼の高速鏡面化とデータ駆動型研磨プロセスの実現に向けた取り組み	日本溶接学会 2022 年度第 2 回表面改質技術研究委員会	2022/09/09
4	廣瀬伸吾	産業技術総合研究所	(依頼講演) 表面処理におけるデジタルトランスフォーメーション	日本溶射学会第 116 回(2022 年秋季)全国大会オーガナイズドセッション	2022/11/28
5	廣瀬伸吾	産業技術総合研究所	(依頼講演) 細書・異種材レーザDEDの開発と最近の試み	日本塑性加工学会 第 350 回塑性加工シンポジウム	2023/2/2

研究開発項目① ; 該当なし、研究開発項目② ; 番号 1 ~ 5、研究開発項目③ ; 該当なし

(b)新聞・雑誌等への掲載 7件

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	NEDO	航空機向け合金開発に JX 金属	日刊工業新聞	2021/5/25
2	物質・材料研究機構	材料進化の最前線-NIMS 最新成果 114_航空機エンジン国産材料特性 DB 構築	日刊工業新聞	2021/12/22
3	NEDO	航空機部品製造で革新的プロセス-Ni 基合金の鍛造金型材を開発	鉄鋼新聞	2022/4/18
4	NEDO	日立金属と新事業-航空機部品 鍛造プロセス開発	日刊工業新聞	2022/4/18
5	NEDO	日立金属の航空機部品製造 鍛造プロセス効率化	日刊産業新聞	2022/4/18
6	NEDO	航空機エンジン部品 製造プロセス確立へ	日刊油業報知新聞	2022/6/28
7	NEDO	大規模 CO2 削減！航空機の燃費向上と水素航空機	YouTube	2023/2/1

研究開発項目①；番号 3～7、研究開発項目②；番号 1 及び 7、研究開発項目③；番号 2 及び 7

(c)その他（展示会等）1件

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	物質・材料研究機構	航空機エンジン用材料の特性予測・変形機構解明と材料データベースの構築	Nanotech2023	2023/2

研究開発項目①；該当なし、研究開発項目②；該当なし、研究開発項目③；番号 1

以上