

## 安全保障技術研究推進制度 令和3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：無冷却タービンを成立させる革新的材料技術に関する研究
- (2) 研究代表者：株式会社 IHI 高橋 聡
- (3) 研究期間：平成29年度～令和3年度

### 2. 終了評価の実施概要

日時：令和4年11月22日

場所：ビジョンセンター浜松町

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 洽 (委員長)

横浜国立大学 大学院環境情報研究院

人工環境と情報部門 教授

上野 誠也

東京理科大学 理工学部 機械工学科 教授

荻原 慎二

長崎海洋産業クラスター形成推進協議会 副理事長

東京大学 名誉教授

木下 健

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 特任担当役

嶋 英志

大阪大学大学院 工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授

中野 貴由

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

本研究では、無冷却タービンシステムの実現に有望なモリブデン合金（耐熱温度1800℃）に着目し、タービン翼の耐熱性の飛躍的な向上が可能なモリブデン合金及び、タービン翼を支えるタービンディスクの耐熱性向上が可能なニッケル合金に関して、これらの粉末冶金等の製造プロセスに関する材料技術の成立性及び適用性の基礎研究を実施する。

## 成果の概要

### ①-1 モリブデン合金粉末製造プロセス

モリブデン合金粉末製造プロセスとしてインゴット製造、粉砕、球状化処理のプロセスを開発し、Hausner 比 1.09 の非常に高い流動性を有するモリブデン合金の球状粉末を製造することに成功した。本研究で得られたプロセスは他の高融点合金に適用できると考えられる。

### ①-2 ニッケル合金粉末製造プロセス

ニッケル合金粉末製造プロセスとして、粉末冶金ディスク合金に適した粉末製造プロセスの開発を実施し、介在物指数 0.5 以下の高清浄度な粉末を製造することに成功した。本プロセスは他のディスク向け合金の製造に適用可能であり、さらなる開発が望まれる。

### ②-1 モリブデン合金タービン翼製造プロセス

モリブデン合金のタービン翼製造プロセスとして、SPS (Spark Plasma Sintering) によるプロセスおよび SLM (Selective Laser Melting) によるプロセスの検討を実施し、SLM プロセスを選定開発した。SLM 条件および形状の最適化により、複雑形状となる模擬タービン翼形状を得ることに成功した。

さらに、クラック、内部欠陥を除去する粉末充填と HIP (Hot Isostatic Press) によるプロセスを開発し、内部欠陥の目標であるポロシティ面積率 5% 以下の造形体の製造に成功した。しかしながら、製造した素材について特性評価を実施した結果、目標としていたモリブデン合金鋳造材 (1600°C、100MPa、10hr 破断) と、同等以上のクリープ強度を達成できなかった。

### ②-2 ニッケル合金タービンディスク製造プロセス

HIP による焼結、熱間押し出し、恒温鍛造のプロセスの開発を実施し、目標とする  $\phi$  150mm のタービンディスク模擬形状を製造することに成功した。製造した素材について特性評価を実施した結果、目標としていたクリープ強度 (800°C、650MPa、1000hr 破断) を達成できなかった。

### ③ 高性能ディスク向けニッケル合金開発

タービンディスク模擬形状試作時のプロセスで製造された素材が耐用温度 800°C (クリープ特性において 650MPa、1000hr 破断強度) を有することを目標に、タービンディスク用超合金の設計指針 (NIMS の長年にわたる鋳造方法のデータベース及びニッケル合金の組成から高温強度を予測する設計プログラム) を活用した新規 Ni-Co 基ディスク合金の設計・開発を実施した。その結果、NIMS が開発したタービン翼用 Ni 合金 TM-47 をベースとして、Co-Ti 合金の含有率を変更した TM-47 M1~M4 を開発し、クリープ強度が最も良い TM-47 M2 (725°C、630MPa、2100hr 破断) を選定した。TM-47 M2 の耐用温度は、クリープ強度が公表されている Ni 合金の中で最も強度が高い ME3 を超える結果を得たが、目標温度の 800°C は達成できなかった。

#### 4. 終了評価の評点

B 期待通りの研究成果をあげた。

#### 5. 総合コメント

モリブデン合金用タービンプレード製造プロセス、ニッケル合金タービンディスク製造プロセスについて、タイプSの取り組みとしては物足りないが、新規材料に関する本格的な取り組みに先鞭をつけたこと自体は評価できる。他方、タービンプレード用モリブデン合金とタービンディスク用ニッケル合金の研究が並列的に展開されており、いずれの研究も初期の強度目標を達成できていない点で不十分である。また、未達成部分への考察がされているが、新たな課題も発生する可能性があり実現性が不明確である。

今後は、得られた成果を基盤としてモリブデン合金については、組成改善にも取り組んでいただきたい。さらに、SLMをEBM(Electron Beam Melting)へ変更する等のプロセス条件をパラメトリックに磨き上げた戦略的研究を展開すれば、極めて重要な材料開発に繋がる可能性があるかと期待できる。

#### 6. 評価観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

##### 6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

##### ① 金属粉末製造プロセスの研究

###### ①-1 モリブデン合金粉末製造プロセス

モリブデン合金粉末製造プロセスとしてインゴット製造、粉砕、球状化処理のプロセスを開発し、Hausner 比 1.09 の非常に高い流動性を有するモリブデン合金の球状粉末を製造することに成功した。

###### ①-2 ニッケル合金粉末製造プロセス

粉末製造プロセスにおいて清浄度に影響を及ぼすプロセス因子を特定し、粉末冶金ディスク合金に適した粉末製造プロセスの開発を実施し、開発合金の内部清浄度が ASTM E45 の Method A による介在物測定を用いて指数 0.5 以下の高清浄度な粉末を製造することに成功した。

##### ② タービン翼及びタービンディスク製造プロセスの研究

###### ②-1 モリブデン合金タービン翼製造プロセス

SLM プロセスおよび SPS プロセスの試作を実施し、前者による製造プロセスを選定した。選定したプロセスを用いて内部クラックがなく、ポロシティ面積率(タービン翼断面積に現出しているポロシティ面積/タービン翼断面積)が 5%以下のモリブデン合金製タービン翼模擬形状(全長 70mm サイズ)の試作に成功した。

試作したタービン翼模擬形状素材の材料特性を評価したところ、得られた材料

特性はモリブデン合金鋳造材のクリープ強度（1600℃、100MPa、10hr 破断）よりも低いクリープ強度（1600℃、100MPa、0.2hr 破断）であり、目標を達成できなかった。

## ②-2 ニッケル合金タービンディスク製造プロセス

①-2で作製した粉末を用い、目標とするφ150mmのタービンディスク模擬形状を製造することができた。

同素材の耐熱温度は、クリープ強度が公表されているNi基合金の中で最も強度が高いME3のクリープ強度（720℃、630MPa、1000hr 破断）と同等以上であることを確認したが、目標とする温度である800℃は達成できなかった。

## ③ 高性能ディスク向けニッケル合金開発

タービンディスク模擬形状試作時のプロセスで製造された素材が耐用温度800℃（クリープ特性において650MPa、1000hr 破断強度）を有することを目標に、タービンディスク用超合金の設計指針を活用した新規Ni-Co基ディスク合金の設計・開発を実施した。結果として、NIMSが開発したタービン翼用Ni合金TM-47をベースとして、Co-Ti合金の含有率を変更したTM-47 M1～M4を開発し、クリープ強度が最も良いTM-47 M2（725℃、630MPa、2100hr 破断）を選定した。TM-47 M2の耐用温度は、クリープ強度が公表されているNi合金の中で最も強度が高いME3を超える結果を得たが、目標温度の800℃には未達であった。

### 【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

- モリブデンのプロセスの困難に対して着実な取り組みで対応しており、有望な技術を確立している。
- モリブデンで、複雑で緻密な造形品を製造できることを証明した点は高く評価できる。
- 得られた成果を有効に活用できる機会が今後あるとよい。

## 6-2. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

モリブデン合金のタービン翼製造プロセス開発において、これまでの鋳造プロセスでは得られない極微細な組織が得られることを明らかにした。高温強度面では不利であるが、耐酸化性などの他の材料特性の向上は期待できる。また、超塑性現象の発現による塑性加工プロセスへの展開が期待できる。これらは、今後の製造プロセスを加味した合金開発に対して指針になるものと考えられる。

ニッケル合金のタービンディスクの製造プロセス開発において、国内で初となるサブスケールサイズでの航空エンジン部材用高温押出工程の立ち上げに成功した。この押出工程の適用により微細化されたビレットは、当初の想定を超えた高い変形

能を有しており、想定より高ひずみ速度での鍛造が可能となった。この高い変形能は恒温鍛造プロセスウィンドウを大きく広げ、今後の開発を大きく進めるものである。

【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

- 新領域の材料開発への取り組みの在り方に重要な示唆がある。
- 失敗事例を含めて相当数の副次的成果が得られている。

6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

特筆事項なし。

6-4. 科学技術上特筆すべき成果

モリブデン合金のタービン翼製造プロセス開発において、これまでの鋳造プロセスでは得られない極微細な組織を得た。

ニッケル合金のタービンディスクの製造プロセス開発において、押出工程の適用により微細化されたビレットは当初の想定を超えた高い変形能を有しており、高ひずみ速度での鍛造が可能となった。

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）

- 科学技術上の特筆すべき成果については若干弱いように思われる。
- モリブデン合金ではマイクロ組織のコントロール、ニッケル基合金では高温部材用高温押出工程の立ち上げに成功している。

6-5. 論文（投稿中のものも含む）、学会発表等

論文 7 件、口頭発表 10 件、展示・講演 1 件

【個々の委員によるコメント】（論文（投稿中のものも含む）、学会発表等）

- 論文、学会発表については積極的に行っている。
- Materials & Design 等の高 IF の論文への投稿がなされている。

6-6. 特許（出願中のものも含む）

出願中 1 件

6-7. 科学技術への波及効果

本研究において複雑形状の付与が難しいモリブデン合金に対し、実サイズ規模で動翼形状を付与可能であることを示すことはできた。一方で HIP 処理など複雑な後処理を必要としており、多数の実機製造を行うことは困難である。そのため当該製

造プロセスに適し、かつ後処理を簡略化できるように合金開発を進めることで、適用可能性がさらに広がるものと考えられる。加えて、当該製造プロセスで得られる特徴的な微細組織は高温強度以外の材料特性も期待でき、その領域に対する研究も期待したい。また本研究で適用した球状粉末の製造方法は、他の高融点合金へ展開可能であり材料開発の可能性を広げるものである。

エンジン心臓部であるディスクについては、国内での合金開発から小型ディスクの試作まで一貫した研究開発を行えた。今後の粉末冶金ディスク材関連の国内開発への大きな進歩と考えられる。

ニッケル合金開発においては、粉末冶金ディスク向け合金の合金設計指針を構築することができ、また、合金設計プログラムの活用と実証ができた。一方で目標強度には満たなかったため、この指針を使用しさらなる合金開発が必要であることが示唆された。

**【個々の委員によるコメント】（科学技術への波及効果）**

- 高温材料開発手法への波及効果は期待したい。

**6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント**

IHI 及び NIMS の連携による研究計画推進のため、研究開始時より原則 2 か月に 1 度の定例進捗報告会を実施し、お互いの課題を共有・議論した。

**【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）**

- 両機関が別々の研究テーマを並列的に実施しており単なる合わせ技で終わっている。
- IHI と NIMS の連携体制であるが、学との連携も考えてよいのではないか。

**6-9. 研究推進時に生じた問題への対応**

コロナ禍により実験作業や結果に対する議論の一時停止があったが、実験作業の優先順位の見直しを適切に実施し、遅れを取り戻した。

**6-10. 経費の効率的な執行**

購入した設備を有効活用することにより、モリブデン合金およびニッケル合金の新規粉末冶金プロセスを構築することができた。また研究費を効率的に執行することにより最大限の成果を得られるように研究を進捗させた。

**【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）**

- 予算規模の割には成果が全体的に少ない。
- 相当多様な検討をしており、副次的成果も加味すれば適正といえる。