

「耐熱超合金の高性能化・省レアメタル化に向けた技術開発及び
革新的な製造技術開発」に関する研究開発構想（プロジェクト型）

令和5年12月
内閣府
文部科学省

目次

1 構想の背景、目的、内容.....	2
1.1 構想の目的.....	2
1.1.1 政策的な重要性.....	2
1.1.2 我が国の状況.....	3
1.1.3 世界の取組状況.....	3
1.1.4 構想のねらい.....	4
1.2 構想の目標.....	4
1.2.1 アウトプット目標.....	4
1.2.2 アウトカム目標.....	7
1.3 研究開発の内容.....	7
1.3.1 研究開発の必要性.....	7
1.3.2 研究開発の具体的内容例.....	8
1.3.3 研究開発の達成目標.....	9
2 研究開発の実施方法、実施期間、評価.....	9
2.1 研究開発の実施・体制.....	9
2.2 研究開発の実施期間.....	10
2.3 評価に関する事項.....	11
2.4 社会実装に向けた取組.....	11

1 構想の背景、目的、内容

1.1 構想の目的

1.1.1 政策的な重要性

マテリアルは我が国の科学技術・イノベーションを支える基盤技術である。我が国はこれまで革新的なマテリアルを数多く生み出した実績があり、我が国のマテリアル産業は汎用品から機能性製品に至るまで多様な企業が国内に集積し、機能性材料では世界的に高いシェアを獲得するなど産業競争力を有している。一方、近年、マテリアルを巡る国際競争は激しさを増していることから、戦略的な取組を強化する必要があるという問題意識の下、令和3年4月に「マテリアル革新力強化戦略」が決定された。同戦略では、産学官共創による社会実装、データ駆動型研究開発基盤の整備、持続的発展性の確保という基本方針の下、各種取組を進めている。

過酷条件下で使用される材料開発は高度な技術によるものであり、これまで培ってきた我が国の強みである。例えば、発電ガスタービンやジェットエンジン等の高温高圧な極限環境に必要な材料であり、その耐熱性が製品全体の性能・効率に直結する耐熱超合金に関して、我が国は世界最高水準の耐熱性を持つ材料の探索・製造技術に優位性を有している。一方で、現在の耐熱超合金には、高温力学特性や耐環境特性の向上のために産出量や流通量が少ない希少元素（レアメタル）が多く使われており、供給に関しては他国依存性が非常に強いことに加え、近年、一部のレアメタルの価格高騰が問題となっている。そのため、資源を有する特定国に依存しないレアメタル使用量を低減した新たな耐熱超合金の開発を行うことは、原料供給リスクの低減や低コスト化による競争力強化の向上が期待され、我が国が強みを持つ技術の優位性の確保・維持の上で重要である。

加えて、発電ガスタービンやジェットエンジン等の高効率化、軽量化といった高性能化のためには、新しい空力設計や内部冷却構造が可能な複雑な構造を持つ部材が必要であり、鋳造等の従来の加工技術では不可能であった、積層造形に代表される複雑な構造を持つ部材の加工技術の開発が重要である。さらには、レアメタルを始めとした原料の国内確保による省資源化・低コスト化のためには、耐熱超合金を用いた耐用期間を超えた部材や劣化した部材からの完全リサイクル技術の開発が必要である。そのため、複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術の開発や、耐熱超合金の完全

リサイクル技術の開発を、省レアメタル化した耐熱超合金の開発と併せて行うことは、発電ガスタービンやジェットエンジン等の耐熱超合金を用いた製品の高性能化や省資源化・低コスト化の実現につながり、国内でのマテリアル循環を実現するとともに、我が国が強みを持つ技術の優位性をより確実なものとする上で重要である。

以上に照らし、本構想は、プロジェクト型として、研究開発ビジョン（第二次）において支援対象とする技術として定められた「省レアメタル高機能金属材料」のうち「耐熱超合金の高性能化・省レアメタル化技術」について、我が国技術の優位性の獲得及びこれに繋がり得る自律性の確保を目指すものである。

1.1.2 我が国の状況

現状、我が国では、世界最高水準の性能を誇る耐熱超合金が開発されている。この耐熱超合金にはレニウムやルテニウムといったレアメタルが使用されているが、上述の通り、これらのレアメタルは我が国ではほとんど産出されず、特定の国からの輸入に依存している。このため、資源を有する特定国に依存しないレアメタル使用量を低減した新たな耐熱超合金が求められているが、現時点においてそのような耐熱超合金は実現できていない。国のプロジェクトとしても、これまで耐熱超合金の開発は行われてきたが、省レアメタル化を目的とした耐熱超合金の開発プロジェクトは実施されていない。また、発電ガスタービンやジェットエンジン等の耐熱超合金の応用先として期待される製品のうち、発電ガスタービンについては我が国企業が世界市場のシェアを獲得しているものの、ジェットエンジンについてはほとんどシェアを獲得できていない。また、複雑形状を可能とする積層造形技術では、欧米において、エンジン用耐熱部材の製造技術として品質保証も含めた技術開発と実用化が急速に進む中、我が国では技術開発が遅れ、耐熱超合金を用いた積層造形技術は確立しておらず、世界から大きく引き離された状況となっている。

1.1.3 世界の取組状況

前述したとおり、ジェットエンジンについて我が国企業はほとんどシェアを獲得できておらず、現在欧米3社がそのシェアを大きく占めている。

高温高圧の極限環境で使用される高圧タービン部材は、産学官の連携により設計技術を確立することで、大きなシェアを獲得している状況である。また、複雑形状を可能とする積層造形技術に各国ともに力をいれており、世界市場は現在年平均 20%前後で急成長し、金属 3D プリンタの普及台数も指数関数的な伸びを記録している。海外の企業の中には、数十台規模で金属 3D プリンタを導入し、部品を生産するといった先進的な取組が進んでいるほか、米国ではエンジンスペアパーツを 3D プリンタによりオンデマンドで製造する取組が始まっているところもある。一方で、省レアメタル化した耐熱超合金の開発や、リサイクル技術の開発は各国ともに大きく進んでいる訳ではない。

1.1.4 構想のねらい

本構想は、発電ガスタービンやジェットエンジン等に必要不可欠な材料である耐熱超合金に関して、高温力学特性や耐環境特性の向上のために含有しているレアメタルが特定国からの輸入に依存していることから、耐熱性を維持・向上させつつ、同等以上の高温力学特性や耐環境特性を有する省レアメタル化した耐熱超合金の開発を目指す。また、開発した耐熱超合金の発電ガスタービンやジェットエンジン、その他の製品への社会実装を見据え、新規空力設計や内部冷却構造による高性能化や、耐用期間を超えた部材や劣化部材の完全リサイクルによる省資源化・省コスト化を実現するため、積層造形に代表される複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術、耐熱超合金の完全リサイクル技術の開発を目指す。これらにより、耐熱超合金の省レアメタル化からその複雑形状を可能とする加工技術、完全リサイクル技術等の一気通貫の技術構築を目指し、我が国技術の優位性の獲得を目指す。

これにより、省レアメタル化した耐熱超合金がジェットエンジンやその他の公的利用に加え、発電ガスタービンやその他の産業部材の民生利用に活用されることが期待される。

1.2 構想の目標

1.2.1 アウトプット目標

本構想では、耐熱性を維持・向上させつつ、同等以上の高温力学特性や

耐環境特性を有する省レアメタル化した耐熱超合金を新たに開発し、新規空力設計や内部冷却構造による高性能化に資する複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術の開発や省資源化・省コスト化に資する耐熱超合金の完全リサイクル技術の開発を併せて行うことで、耐熱超合金から形成する製品の省レアメタル化や高性能化、省資源化・省コスト化を一気通貫で実現し、社会実装に向けたその後の展開につなげていく。

そのために、研究開発開始から5年後には、それぞれの技術を以下のとおり確立することを目指す。

○研究開発開始から5年後に確立することを目指す技術の満たすべき要件
<レアメタル使用量を低減した耐熱超合金の開発>

- 発電タービンやジェットエンジン等の高温高圧な極限環境で使用されている耐熱超合金に対し、その耐熱性を維持・向上させつつ、レアメタル使用量を低減した新たな耐熱超合金として、以下の要件の両方あるいはいずれかを実現できるようにすること。
 - 耐熱超合金の耐用温度（137MPa、寿命 1,000 時間で、1,040°C程度）に対し、レニウム及びルテニウムを含まないこと。なお、レニウム及びルテニウム以外の特定国に産出が限定されるレアメタル（例えば、モリブデン、タングステン等）についてもその使用量を可能な限り抑制する。また、高温力学特性や耐環境特性等についても同等以上の性能を有すること。
 - 耐熱超合金の耐用温度を 30°C以上向上し、レニウム及びルテニウムの使用量を質量単位で3%以下に抑える。なお、レニウム及びルテニウム以外の特定国に産出が限定されるレアメタルについてもその使用量を可能な限り抑制する。また、高温力学特性や耐環境特性等についても同等以上の性能を有すること。

<複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術の開発>

- 従来の加工技術では実現できない、積層造形に代表される複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術として、以下の技術を実現できるようにすること。
 - 従来の加工技術と同等以上の機械的特性（クリープ、低サイクル疲

劣、高サイクル疲労、亀裂進展抵抗等)を実現するための欠陥制御・組織制御技術

- ▶ 複雑形状の造形において、部位毎の欠陥・組織制御を可能とするための最適プロセス条件の予測技術及び高効率な条件最適化技術
- ▶ 造形プロセスのモニタリングによる品質保証技術

<耐熱超合金の完全リサイクル技術の開発>

- 耐熱超合金を用いた部材を溶解し、元素ごとに精錬し抽出して再利用する従来の方法ではなく、省エネルギー化にも留意しながら、耐熱超合金を用いた耐用期間を超えた部材や劣化した部材をそのまま再利用することが可能な完全リサイクル技術として、以下の要件を実現できるようにすること。
 - ▶ 有害な不純物を無害な水準以下（例えば、硫黄：2 ppm 以下）に低減する除去技術
 - ▶ リサイクル材による金属粉末について、純正粉末と同等の清浄度を実現する製造技術
 - ▶ リサイクル粉末による耐熱超合金について、純正粉末による耐熱超合金と同等の組織、強度を実現する技術

研究開発開始から10年以内には、それまでに確立したそれぞれの技術を組み合わせることにより、省レアメタル化した耐熱超合金を用いて、複雑な形状を有する部材の製造、劣化した部材のリサイクル、リサイクルした材料を用いた部材の製造まで一貫通貫した技術を確立し、小型の試作品の製造・評価等を通じて、優れた性能を持つ省レアメタル化した耐熱超合金を安定的に製品として活用するための基盤技術を構築する。そのために、発電ガスタービンやジェットエンジン等の高温高圧な極限環境で使用される省レアメタル化した耐熱超合金を用いて複雑形状を可能とする加工技術の開発を行うとともに、省レアメタル化した耐熱超合金を用いた完全リサイクル技術の開発を行う。加えて、5年後までに開発した省レアメタル化した耐熱超合金について、さらに耐熱性を向上させつつ、同等以上の高温力学特性や耐環境特性を有する耐熱超合金の開発を行い、その結果については複雑形状を可能とする加工技術や完全リサイクル技術に反映していく。

一貫通貫した技術の確立に当たっては、社会実装に結び付けられるよう、国内メーカー等の民間企業の参画や協力を得ながら、省レアメタル化した耐熱超合金による発電ガスタービンやジェットエンジンといった製品への応用を見据えながら研究開発を進める。

1.2.2 アウトカム目標

上記のアウトプット目標により、発電ガスタービンやジェットエンジン等の高温高圧な極限環境で使用することが可能な耐熱超合金の省レアメタル化、その耐熱超合金を用いて複雑形状を可能とする加工技術による高性能化、劣化した部材の完全リサイクル技術による省資源化・省コスト化が可能となる。これにより、特定国からの供給リスクに左右されない耐熱超合金を材料とした、低コストかつ高性能な製品等の実現につながる。例えば、省レアメタル化した耐熱超合金を用いた高圧タービン部材に加え、それほど高圧にならない周辺部材にもその適用範囲を拡大することで、エンジン全体としては0.5%以上の大きな燃焼効率向上につながることを期待されるとともに、他国に依存せず安定した資源供給の実現が期待される。また、国内メーカー等の民間企業の参画や協力等を通じ、発電ガスタービンの海外輸出や海外エンジンメーカーへのライセンス供与等につなげていくことが期待される。

これらにより、我が国における技術の優位性の獲得及びこれに繋がり得る自律性の確保に資する。

1.3 研究開発の内容

1.3.1 研究開発の必要性

優れた性能を持つ耐熱超合金を安定的に製品として活用するためには、省レアメタル化した耐熱超合金の開発と、複雑形状を可能にする耐熱超合金の加工技術、耐熱超合金を完全リサイクルする技術をそれぞれ開発するとともに、それらの技術を組み合わせることにより、省レアメタル化した耐熱超合金を用いて、複雑な形状を有する部材の製造、劣化した部材のリサイクル、リサイクルした材料を用いた部材の製造技術を確立することが求められる。しかしながら、これらの技術の開発には越えなければならない技術的課題が多く、また、それぞれの技術は相互に影響を与えることか

ら、一気通貫で技術の開発を進めていく必要がある。

1.3.2 研究開発の具体的内容例

「1.3.3 研究開発の達成目標」に向け、個々の技術の開発を進める。それに向けた研究開発の具体的内容として考えられる項目やその進め方を以下に例示する。

<レアメタル使用量を低減した耐熱超合金の開発>

- 研究開発開始から5年を目途に、発電タービンやジェットエンジン等の高温高圧な極限環境で使用される耐熱超合金に対し、計算科学・データ駆動型研究等も用いて、その耐熱性を維持・向上させつつ、レアメタル使用量を低減した耐熱超合金の開発を行う。
- 複雑形状を可能とする加工技術に用いる省レアメタル化した耐熱超合金の開発を行う。
- 開発した耐熱超合金について、その品質を担保するための各種試験（クリープ試験等）を行う。
- 研究開発開始から5年後以降、10年以内を限度として、それまでに開発した省レアメタル化した耐熱超合金について、さらに耐熱性を向上させた耐熱超合金の開発を行う。

<複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術の開発>

- 研究開発開始から5年を目途に、耐熱超合金について、従来の加工技術では実現できない積層造形に代表される複雑な形状を可能とする加工技術の開発を行う。
- 発電ガスタービンやジェットエンジン等の高圧タービン部材の模擬形状を造形し、造形完了時に微視き裂の無い部材の開発を行う。
- 研究開発開始から10年後を目途に、開発したレアメタル使用量を低減した耐熱超合金について、造形プロセス条件と材料組織、機械的特性の相関について明らかにし、部材製造技術の基盤を構築する。

<耐熱超合金の完全リサイクル技術の開発>

- 研究開発開始から5年を目途に、耐熱超合金を用いた部材を溶解し、

元素ごとに精錬して抽出して再利用する従来の方法ではなく、省エネルギー化にも留意しながら、耐熱超合金を用いた耐用期間を超えた部材や劣化した部材をそのまま再利用することが可能な完全リサイクル技術の開発を、大型商用溶解炉での実証を含め行う。

- 有害な不純物を無害な水準以下に低減する除去技術や、リサイクル材による金属粉末が純正粉末と同程度の清浄度を実現する技術、リサイクル粉末による耐熱超合金が純正粉末による耐熱超合金と同等の組織、強度を実現する技術の開発を行う。
- 研究開発開始から 5 年後以降、10 年以内を限度として、それまでに開発した省レアメタル化した耐熱超合金を用いた部材に対して、完全リサイクル技術の開発を行う。

1.3.3 研究開発の達成目標

研究開発開始から 10 年以内に、省レアメタル化した耐熱超合金を用いて、複雑な形状を有する部材の製造、劣化した部材のリサイクル、リサイクルした材料を用いた部材の製造まで一貫した技術を確立し、小型の試作品の部材の製造・評価等を通じて、優れた性能を持つ耐熱超合金を安定的に製品として活用するための基盤技術を構築することを目指す。そのため、研究開発開始から 5 年目には、「1.2.1 アウトプット目標」に示した要件を満たす、発電ガスタービンやジェットエンジン等の高温高圧な極限環境で使用することが可能な省レアメタル化した耐熱超合金を開発し、複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術、耐熱超合金の完全リサイクル技術をそれぞれ確立する。その際、それぞれの技術を組み合わせ一貫した技術の開発を行うことを視野に入れ、これ以降の研究開発に向けた課題を明確化する。

より具体的には、提案者の設定した個別の達成目標を基本としつつ、文部科学省及び JST のサポートの下、採択後、研究開発を開始するに当たって行う研究計画の調整にて定めると共に、研究開発開始後においては、協議会における意見交換の結果も踏まえ、必要な場合、見直しを行う。

2 研究開発の実施方法、実施期間、評価

2.1 研究開発の実施・体制

レアメタル使用量を低減した耐熱超合金の開発、複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術の開発及び耐熱超合金の完全リサイクル技術の一貫通貫した開発に向けて、研究機関を代表し研究開発を推進する研究代表機関を決定するとともに、大学や国内メーカー等の民間企業が持つそれぞれの技術開発に必要な知見を結集する。

期間中、研究代表機関、関係府省等による意見交換を経て、必要な技術について新たな研究機関による研究開発が適切とプログラム・ディレクター（PD）が判断した場合には、その研究開発について公募を行うものとする。その場合、研究代表機関から公募を行うことも可能とする。

上記視点を踏まえ、PD の指揮・監督の下、研究代表機関又は研究代表者が研究開発構想の実現に向け責任を持って研究開発を推進する。JST 等の助言に基づき、研究に参加する機関・研究者のそれぞれが、適切な技術流出対策を行うよう体制を整備するとともに、研究インテグリティの確保に努め、適切な安全保障貿易管理を行うよう、これらを推進すると共に、研究開発に必要な事項を行う。

研究開発成果を民生利用のみならず公的利用につなげていくことを指向し、社会実装や市場の誘導につなげていく視点を重視するという本プログラムの趣旨に則り、研究代表機関、研究代表者は PD 及び研究分担者との協議の上、知的財産権の利活用方針を定めることとする。その際には、研究開発途中及び終了後を含め、知的財産権の利活用を円滑に進めることができるように努めることとする。

なお、研究開発成果の利活用にあたりその成果にバックグラウンド知的財産権が含まれる場合には、その利活用についても同様に努めることとする。

2.2 研究開発の実施期間

研究開発開始から 5 年程度とし、この期間の予算として最大 75 億円程度を措置する。

本構想では、「1.2 構想の目標」の達成に向け、研究開発開始から 10 年以内を限度に、5 年程度を超えて継続することを可能とする。したがって、5 年程度を超えて継続することを現時点で構想し得る場合は、「1.2.1 アウトプット目標」にて研究開発開始から 10 年以内の目標として示した目標を

達成するまでの計画と、その計画の達成により「1.2.2 アウトカム目標」以外に実現が見込める潜在的な社会実装についても提出を推奨する。

5年程度を超えて継続する場合には、内閣府、文部科学省が、「2.3 評価に関する事項」に定める外部評価の結果等を踏まえ、関係府省と調整の上、当該継続期間に措置する予算を示す。

なお、5年以内で「1.3.3 研究開発の達成目標」を達成することが可能である場合はこの限りではなく、実現性があり可能な限り早い時期で達成できることが望ましい。

項目	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目	10年目
レアメタル使用量を低減した耐熱超合金の開発	レアメタルを低減した新たな耐熱超合金の開発・評価					さらに耐熱性を向上させた耐熱超合金の開発・評価				
複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術の開発	複雑形状を可能とする加工技術(欠陥制御・組織制御技術、最適プロセス条件の予測・最適化技術)の開発					省レアメタル化した耐熱超合金による造形条件・材料組織・機械的特性相関の解明				
耐熱超合金の完全リサイクル技術の開発	不純物の除去技術の開発、リサイクル粉末の開発					発電タービンやジェットエンジン等の部材製造技術確立 省レアメタル化した耐熱超合金による完全リサイクル技術の開発				

研究開発の進め方のイメージ

2.3 評価に関する事項

自己評価は毎年実施する。外部評価については原則、研究開発の開始から3年目に中間評価、5年程度を目途にステージゲート評価を実施する。さらに5年程度を超えて継続する場合には、終了年までの間に1回以上の中間評価を、また、研究開発終了年に最終評価を設けるものとする。具体的な時期やステージゲート評価の目標等の設定については、担当するPDが採択時点でマイルストーンを含む研究計画とともに調整した上で、JSTが決定するものとする。

2.4 社会実装に向けた取組

本構想は、省レアメタル化した耐熱超合金を開発するとともに、複雑形状を可能とする耐熱超合金の加工技術及び耐熱超合金の完全リサイクル技術を開発することにより、省レアメタル化した耐熱超合金を用いた発電ガスタービンやジェットエンジン等の安定的な製造、製品の高性能化かつ省資源化・省コスト化を実現することで、国際的な競争力を獲得することを目指すものである。社会実装につなげるためには、本構想で開発した技術を、共通的な基盤技術として社会実装を担う幅広い者が利用可能なこと

が重要である。このためには、研究代表機関又は研究代表者と、潜在的な社会実装の担い手として想定される関係行政機関や民間企業等との間で、耐熱超合金の性能及び耐熱超合金が求められる部材・製品についての情報共有や、社会実装イメージや研究開発の進め方を議論・共有する取組が有用である。また、特に製品につながるような社会実装に近いフェーズの研究開発の中には機微なものが含まれ得ることを踏まえ、どのように取り扱うのかを事前に検討をする必要もある。加えて、潜在的な社会実装の担い手につなげていくことや将来の運用に関する枠組みも検討していくものとする。

例えば、本構想以外における研究開発において、本構想で開発する耐熱超合金に対して、本構想で想定していない複雑な形状を持つ製品を製造する加工技術が開発された場合、それが本構想のねらいに合致したものであれば、協議会も活用し、研究開発対象に当該加工技術を導入することを検討することも考えられる。

したがって、今後設置される協議会を活用し、参加者間で機微な情報も含め、社会実装に向けて研究開発を進める上で有用な情報の交換や協議を安心して円滑に行うことのできるパートナーシップを確立することが重要であり、関係者において十分にこの仕組みの運用を検討する必要がある。なお、協議会の詳細は別に示す。また、PD は研究マネジメントを実施する際には、協議会における意見交換の結果も踏まえるものとする。