

戦略的創造研究推進事業(ALCA)
技術領域(プロジェクト名)
「低 CO₂ 排出型次世代火力発電用
新規耐熱材料の開発」
課題名
「超合金タービン翼の直接完全リサイクル法の開発」

終了報告書

研究開発期間 平成25年10月～令和2年3月

研究開発代表者:原田広史
(国研)物質・材料研究機構
構造材料研究拠点 超耐熱材料グループ
リサーチアドバイザー

○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：(国研)物質・材料研究機構 リサーチアドバイザー 原田広史
研究開発課題名：超合金タービン翼の直接完全リサイクル法の開発

1.研究開発の目的

ジェットエンジンや発電用ガスタービンの超合金タービン翼材の耐用温度を向上させることにより熱効率が向上し、燃料使用量低減により、CO₂が削減される。しかし、耐用温度の高い超合金ほど高価な元素を多く含む傾向にあるため、材料コストも高くなり、これが普及の妨げとなってきた。このような問題点を解消し、高性能超合金の広汎な普及によりCO₂削減効果を十分に発揮させるため、超合金の材料コストを大幅低減できる直接完全リサイクル技術を開発する。

2.研究開発の概要

(1)内容:

使用済みのタービン翼を再溶解し「直接完全リサイクル」することにより、実質材料コストを現状の約1/4を目標に大幅低減するための技術開発を行った。開発のポイントは、使用中に部材に侵入する硫黄の除去（脱硫）と合金組成調整である。

(2)成果:

物材機構原田・川岸グループを中心に、カルシア（CaO）るつぽを用いた2～20 kgレベルの脱硫、組成調整実験を行い、クリープ強度と耐酸化性の回復を確認し、直接完全リサイクルの可能性を明らかにした。また早稲田大学鈴木グループを中心に、小型モデル溶解炉にて脱硫メカニズムの詳細な検討を行い、脱硫反応の速度式を作成した。

これらの成果をもとに、2017年度に大型商用溶解炉による3 tonのリサイクル模擬実験を行った。即ち、単結晶タービンブレード用のTMS-1700 (MGA1700) 合金の溶湯3tonに23ppmの硫黄を添加後、脱硫予測式に基づき、適量のカルシア顆粒を添加して1600℃に保持して脱硫したところ、予測通り硫黄濃度を2ppmにまで低減できた。並行して合金設計プログラムを用いて主要元素の変化もモニターしつつ組成調整した。得られたインゴットから作製した単結晶試験片は、純正材と同等のクリープ特性、熱疲労特性、高サイクル疲労特性、室温破壊靱性、及び純正材を上回る耐酸化特性を発揮することが明らかとなった。カルシアるつぽ溶解による耐酸化性向上の原因をアトムプローブ解析等により解明した。

また一方向凝固（柱状晶）超合金TMD-1700についても物材機構の小型溶解による実験により単結晶合金と同様のリサイクル法が適用できることを実証した。

(3)今後の展開:

開発した直接完全リサイクル法（米国特許登録済）の発電ガスタービンやジェットエンジンの廃棄タービン翼のリサイクルへの実用化が期待される。エンドユーザー（エアライン、電力会社）、製造メーカー（発電ガスタービン・ジェットエンジンメーカー）、国内外のインゴットメーカー等と連携して、超合金のマテリアルフローに積極的に参加することにより、材料コスト削減を通して高性能超合金の広汎な普及によるCO₂削減に貢献していく。

○Report summary (English)

Principal investigator: Hiroshi HARADA, Research Adviser, National Institute for Materials Science

R & D title: “Development of Direct and Complete Recycling Method for Superalloy Turbine Aerofoils”

1. Purpose of R & D

By increasing the operating temperature of superalloy turbine blades in jet engines and gas turbines for power generation, thermal efficiency is improved, and CO₂ is reduced by reducing fuel consumption. However, the higher the operating temperature of the superalloy, the more expensive elements tend to be contained, and the material cost has been hindering its widespread use. In order to solve these problems and to fully exert the CO₂ reduction effect due to the widespread use of high-performance superalloys, we will develop direct and complete recycling technology that can significantly reduce the material cost of superalloys.

2. Outline of R & D

(1) Contents:

We have developed "direct and complete recycling" technology for turbine blade superalloys in order to significantly reduce the actual material cost down to about 1/4 of the current level. The points of development are the removal (desulfurization) of sulfur that penetrates into the turbine blade during use and the alloy composition adjustment.

(2) Achievements:

At the Harada and Kawagishi Group of the National Institute for Materials Science(NIMS), we carried out the desulfurization of used turbine blade superalloy in 2 to 20 kg level using calcia (CaO) crucibles and also composition adjustment. It was found that creep strength and oxidation resistance were recovered, and possibility of direct and complete recycling was confirmed. A detailed study of the desulfurization mechanism was carried out in a small model melting furnace at the Waseda University Suzuki group, and a rate equation for the desulfurization reaction was created.

Based on these achievements, a simulated 3 ton recycling experiment was conducted in a large commercial melting furnace in 2017. That is, after adding 23 ppm of sulfur to the molten metal 3ton of TMS-1700 (MGA1700) alloy for single crystal blade, based on the desulfurization prediction by the equation, an appropriate amount of CaO granules was added and desulfurized at 1600° C. As expected, the sulfur concentration could be reduced to 2ppm. In parallel, the alloy composition was adjusted while also monitoring changes in major elements using an alloy design program. It was revealed that the single crystal test piece produced from the obtained ingot exhibits the same creep properties, thermal fatigue properties, high cycle fatigue properties, room temperature fracture toughness, and better oxidation resistance properties compared with genuine materials. We have clarified the cause of oxidation resistance improvement by melting in CaO crucible by atom probe analysis.

Also, for the directionally solidified (columnar grained) superalloy TMD-1700, it was proved by using a small furnace at NIMS that the same recycling method as the single crystal alloy can be applied.

(3) Future developments:

It is expected that the developed “direct complete recycling method “(US patent registered) will be put to practical use for recycling used turbine blades of power generation gas turbines and jet engines. By cooperating with end users (airlines, electric power companies), manufacturers (power generation gas turbine/jet engine manufacturers), domestic and overseas ingot manufacturers, etc., we will contribute to CO₂ reduction through the widespread use of high-performance superalloys.