

【3K133002】水素を利用したチタン合金切削屑の高効率再資源化技術の実用化研究(H25～27；
累計予算額 104,510 千円)

近藤 勝義(大阪大学)

1. 研究開発目的

本研究事業では、高温真空溶解製法によるチタン切削屑の再生工程を経由せず、完全固相状態において切削屑を直接、素原料として高歩留りで再生できるリサイクル技術の基盤プロセスの開発とスケールアップ化に関する検証を目的とする。その結果、製造工程内での省エネ効果(エクセルギー損失の最小化)と製品(チタン素材)使用時のCO₂ガス排出量の削減効果といった2つの環境対策の実効に寄与できるものとする。具体的には、チタンが水素成分を含む際に脆性な水素化チタンを生成し、これによりチタン素材の延性が低下するといった問題に着目し、チタン合金切削屑と水素の反応において酸素や炭素などの不純物を除去した後、脆性な水素化チタン粉末を作製し、機械粉碎により切削屑を破砕することでチタン原料粉末に仕上げる。その後、既存製法である成形・焼結・押出工程を経由して水素を除去し、バージン材と同等性能を有するチタン合金素材を再生する。本研究事業における主たる課題は、水素化反応機構の解明とその際の不純物除去技術、水素化チタン粉末の緻密化成形技術、焼結過程での脱水素化技術の開発である。また、水素成分の熱分解過程において、極僅かの残留水素量を利用してチタンの相(phase)制御による再生チタン素材の特異な集合組織を通じて、ヤング率および耐力の向上といった力学特性の向上といった新たな材料設計構築についても検討を行う。これらの技術的な課題解決を通じて、航空機産業をはじめとする輸送機器分野でのCO₂ガス排出量の削減に貢献するチタン合金から発生する切削屑の高効率再資源化・再生プロセスの実用化を目指す。

2. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究成果であるチタン切削屑の再資源化と健全な再生チタン素材の創製に関して、既往研究では金属材料において「負の因子」とされてきた水素原子を活用し、その特徴である脆性と非燃性を活用した革新的なリサイクルプロセスを構築した。具体的には、現行の真空再溶解工程によるチタン切削屑の再資源化において、低い再生歩留りであったが、水素化熱処理によりチタン切削屑を安全でかつ短時間で粉碎加工し、100%の回収率のもとで粉末冶金用原料とすることで顕著な歩留り向上を実現した。また、粉碎した水素含有チタン微粉末の成形固化挙動を圧密化モデルにより定量解析することで、脆性に起因する粉末の破砕過程での粒子再配列現象を利用して健全な成形固化体の作製に成功した。さらに、脱水素化同時焼結プロセスの開発によって市販のチタン合金素材(バージン材)と同等の引張強さ、破断伸び、疲労強度を有する再生チタン素材の創製を可能とした。このように従来からの真空アーク/電子ビームを用いたチタンの再溶解製法では、2000 を超える高温での溶解工程を2回経由して素材が製造されるが、本プロセスでは600～1000 での熱処理によりチタン切削屑からのチタン素形材の再生が可能となり、顕著な省エネ・低コスト化に資するリサイクルプロセスの基盤構築に寄与するものとする。

他方、上述の通り、既往研究ではチタン合金における水素含有量の増加に伴い、引張強さや破断伸びの顕著な低下が報告されてきたが、本研究では、僅か0.2～0.3wt%の微量水素がTiの相変態挙動と集合組織形成機構に及ぼす影響を解明し、剛性および耐力の向上に寄与するこ

とを明らかにすると共に、脆性ながらも硬質な水素化合物が微細分散すること変形双晶の進展を抑制して一様な変形を伴い、破断伸びが向上するといった新規な現象を発見した。これらの結果を通じて、従前より負の材料因子とされた水素原子を活用したチタン材の高強度・高延性化に向けた新たな材料設計指針の可能性を見出した。なお、本成果に関して、大阪大学にて大学院生が博士号（工学）を取得するに至った。

（２）環境政策への貢献

Ti 切削屑の固相リサイクルによる製造工程内での省エネ効果

現状のチタン切削屑の真空再溶解工程における切削屑の歩留りは約 30%であり、残りの 70%は新塊チタン原料を利用する。2004 年に米国で開催された国際での講演資料に基づくと、インゴット（熱間鍛造や熱間押出などの 2 次加工前の素形材）状態での製造加工費は約 805 円/kg と試算される（ここでは、鉍石原料や回収した切削屑などの素原料費用は含まない）。他方、本研究で開発したチタン切削屑の再生工程（水素化熱処理（600 ）+ 機械粉碎加工 + 成形固化 + 脱水素化同時焼結（1000 ）の連続プロセス）によるインゴットの製造加工費は約 73 円/kg と試算される（本研究成果を熱処理、粉碎加工、粉末冶金メーカー各社に開示して得た概算見積に基づく結果）。このように製造工程内でのエネルギー消費量は現行再溶解製法と比較して、1/10 以下へと顕著な減少が期待できる。

鉄製補強材から廉価再生 Ti 材への代替と CFRP の更なる使用促進による軽量化に伴う CO₂ 排出削減

上記の試算結果を踏まえ、インハウスでのチタン製部品の生産から切削屑回収と、その後の再生工程を想定し、原料素材費を含めた再生チタン素材の単価は、現行の再溶解素材に対して約 28%のコスト削減が可能と試算できる。また、微量の残留水素を活用したチタン合金の更なる高強度化・高延性化を実現することで素材の性能、品質および信頼性の向上が期待できる。このような低コスト・高機能化の達成により再生チタン素材の使用率の拡大が見込まれ、CFRP 素材の適用部材の拡張が可能となると共に、補強部材においても鉄鋼製部品から本開発チタン材への代替が期待できる。定量的な効果に関しては、産業界との今後の更なる調査・解析が必要ではあるが、上述のように本研究成果を活用した廉価・再生チタン材の実用化の利用において、機材重量の更なる軽量化に資することで燃費改善と CO₂ ガス排出削減に寄与できると考える。

< 行政が既に活用した成果 >

特に記載すべき事項はない。

< 行政が活用することが見込まれる成果 >

特に記載すべき事項はない。

3 . 委員の指摘及び提言概要

チタンの閉ループリサイクルを実現可能にする画期的な成果で、スケールアップの検討も高い実用性と信頼性が高い。次のステップは、比較的閉鎖的な Ti 合金ユーザーに対して従来法とのエネルギー消費量の比較を示し、企業者との連携による事業化プログラムである。

4 . 評点

総合評点 : A