

チタンの革新的アップグレード・リサイクル技術の開発

Development of a new upgrade recycling technology for titanium

課題番号：19H05623

岡部 徹 (OKABE, Toru H.)

東京大学・生産技術研究所・教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、世界に先駆けてチタンの新しいタイプのリサイクル技術を開発することを目的とし、我々が有する固有の特殊技術（チタンの脱酸技術）をさらに発展させ、希土類オキシハライドの生成反応をチタンスクラップの脱酸・高純度化に応用する。その過程で希土類オキシハライドの生成反応がチタンの脱酸能に与える影響や効果を学術的に明らかにする。

研究分野：金属生産および資源生産関連

キーワード：チタン、脱酸、希土類金属、リサイクル、環境調和型技術

1. 研究開始当初の背景

チタン (Ti) は無尽蔵の埋蔵量を有し、高い耐食性を示す。また Ti 合金は極めて高い比強度を有する夢の未来材料である。しかし、Ti は酸素 (O) との結合力が極めて強く、低いコストで鉱石 (TiFeO_x) から直接、金属 Ti を製造する技術が存在しない。このため、Ti 製品の価格は高く、広く一般には普及していない。Ti 製品の製造工程では、O や鉄 (Fe) などの不純物を含むスクラップが多量に発生する。Ti 製品の低価格化に向けて、不純物濃度の高い Ti スクラップを高純度化する新しいプロセスが求められている。

2. 研究の目的

Ti は Fe や O と高い親和性を有するため、Ti 中の Fe や O を除去する工業プロセスは存在しない。本研究では、主に Ti 中の酸素を除去（脱酸）する新規プロセスを開発し、Ti スクラップをバージン材（スポンジ Ti）よりも高純度化する「アップグレード・リサイクル」を実現することを目的とする。

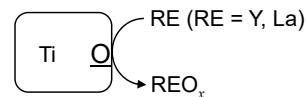
3. 研究の方法

熱力学的解析と基礎的な実験により、希土類オキシハライドの生成反応を Ti スクラップの脱酸・高純度化に応用する新規プロセスを確立する。また、得られた知見と技術を Ti 粉末の焼結技術や TiO_2 の直接還元法へと応用展開した。

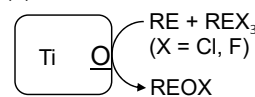
4. これまでの成果

熱力学的考察にもとづく反応設計により、候補として選択した希土類金属を用いて、脱酸反応の実験的評価を進めてきた。

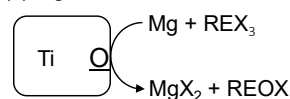
(a) 希土類酸化物生成を利用する脱酸反応



(b) 希土類オキシハライド生成を利用する脱酸反応



(c) Mgを脱酸剤とする脱酸反応



(d) 電気化学的脱酸反応

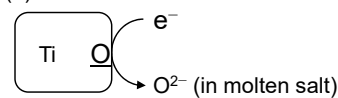


図1 本研究で開発する Ti の脱酸反応。

イットリウム (Y)、ランタン (La)、ホルミウム (Ho) を脱酸剤として用いて、図1 (a), (b) にそれぞれ示すような、酸化物生成もしくはオキシハライド生成反応により、Ti 中の O 濃度をスポンジ Ti レベル (500 mass ppm O) 以下の O 濃度まで低減可能であることを示した。Y や La のオキシハライド生成による

脱酸では、100 mass ppm O 以下の極低 O 濃度の Ti が得られることを実験的に示した。

また、塩化マグネシウム (MgCl₂) に希土類塩化物 (RECl₃) を添加した熔融塩中で、金属 Mg を脱酸剤として用いる場合、図1 (c) に示す脱酸反応 ($O_{in Ti} + Mg + RECl_3 = MgCl_2 + REOCl$) が進行して、1000 mass ppm Oを下回る酸素濃度の Ti が得られることを示した。通常金属 Mg を脱酸剤として用いる場合に得られる O 濃度は10000 mass ppm O (1 mass% O) 以上であるのに対して、MgCl₂ に RECl₃ を添加することで、オキシクロライド生成反応を伴う脱酸反応により大幅な酸素濃度の低減が可能であることを示した。

さらに、図1 (d) に示すような電気化学的脱酸を行うことで、安定的に極低酸素濃度の Ti が得られることを実証した。

当初の予定から発展し、本研究で開発した希土類金属を脱酸剤として用いる脱酸反応系に、Ti 粉末の成形体を設置し、焼結を進行させながら脱酸することで、低酸素濃度の Ti 焼結体が得られる可能性を示した。Ti の粉末冶金プロセスは、シンプルでコスト競争力のある歩留まりの良いプロセスであるため、Ti 製品の普及拡大を実現するポテンシャルを秘めている。また、希土類オキシハライド生成反応を、TiO₂ の直接還元法にも適用可能であることを実証した。この技術は将来的に Ti の製造プロセスを抜本的に変革しうる技術であり、その波及効果は本研究で目的としている脱酸技術と同様に極めて高い。いずれの技術も、将来的には Ti 製品の価格低減につながると期待される。

5. 今後の計画

これまでに利用していない希土類金属や、希土類金属の混合物を用いる脱酸プロセスについて検証する。同時に、希土類オキシハライドの熱力学データや物性を系統的に調べる。さらに、不純物汚染の挙動の解明や抑制法について検討する。一連の研究を通じて、Ti の脱酸反応の学理を追求する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. L. Kong, T. Ouchi, and T. H. Okabe: 'Deoxidation of Ti Using Ho in HoCl₃ Flux and Determination of Thermodynamic Data of HoOCl', J. Alloys. Compd., vol. 863, (2021) 156047.
2. T. Tanaka, T. Ouchi, and T. H. Okabe: 'Magnesiothermic Reduction of TiO₂ Assisted by LaCl₃', J. Sustain. Metall., vol. 6, (2020) pp. 667–679.
3. T. Tanaka, T. Ouchi, and T. H. Okabe., 'Yttriothermic Reduction of TiO₂ in Molten

Salts', Mater. Trans., vol. 61, no. 10, (2020) pp. 1967–1973.

4. T. Ouchi, S. Wu, and T. H. Okabe: 'Recycling of Gold Using Anodic Electrochemical Deposition from Molten Salt Electrolyte', J. Electrochem. Soc., vol. 167, no. 12, (2020) 123501.
5. T. Tanaka, T. Ouchi, and T. H. Okabe: 'Lanthanothermic Reduction of TiO₂', Metall. Mater. Trans. B, vol. 51, no. 4, (2020) pp. 1485–1494.
6. A. Iizuka, T. Ouchi, and T. H. Okabe: 'Development of a New Titanium Powder Sintering Process with Deoxidation Reaction Using Yttrium Metal', Mater. Trans., vol. 61, no. 4, (2020) pp. 758–765.
7. A. Iizuka, T. Ouchi, and T. H. Okabe: 'Ultimate Deoxidation Method of Titanium Utilizing Y/YOCl/YCl₃ Equilibrium', Metall. Mater. Trans. B, vol. 51, no. 2, (2020) pp. 433–442.
8. O. Takeda, M. Yamada, M. Kawasaki, M. Yamamoto, S. Sakurai, X. Lu, and H. Zhu: 'Development of Wide-range Viscometer and the Viscosity Measurement for SiO₂-Na₂O-NaF System', ISIJ Int., vol. 60, no. 3, (2020) pp. 590–596.

[受賞]

1. 令和 3 年度 文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門, 文部科学省 (2021 年 4 月 14 日), 受賞者: 岡部 徹、竹田 修、大内 隆成 (内定) .
2. **The Degree of Doctor Honoris Causa at NTNU, Honorary Doctor of the Norwegian University of Science and Technology (NTNU)** (ノルウェー科学技術大学 名誉博士号) (2021 年 3 月 26 日), 受賞者: 岡部 徹.
3. 資源・素材学会 関東支部 第 17 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会ポスター賞 (2020 年 10 月 16 日), 受賞者: Kang Sukho、大内 隆成、岡部 徹.
4. 第 78 回日本金属学会功績賞 [材料化学部門], 公益社団法人日本金属学会 (2020 年 3 月 17 日), 受賞者: 竹田 修.
5. **TMS Extraction & Processing Division Pyrometallurgy Best Paper Award (2020)** (米国 TMS 論文賞) (2020 年 2 月 26 日), 受賞者: 谷ノ内 勇樹、岡部 徹.
6. 資源・素材学会 関東支部 第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会ポスター賞 (2019 年 8 月 2 日), 受賞者: 田中 尚良、大内 隆成、岡部 徹.

7. ホームページ等

<https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html>