

私が追い求めてきた夢とロマン

岡部 徹

チタンをはじめとするレアメタルの製錬・リサイクルの研究に取り組んで35年が経過した。酸化物からチタンを直接製造する新製錬法を開発し、チタンをコモンメタルに変える“夢”は達成できていないが、不純物酸素の除去技術は大きく進展した。日本は、非鉄冶金、とくに特殊金属精錬の研究分野は、今も世界をリードしている。今後は、若手人材が非鉄金属業界のさらなる発展させるべく、研究と人材育成に鋭意取り組んでほしいものである。

はじめに

大学4年生の時から一貫して、チタンをはじめとするレアメタルの精錬やリサイクルに関する研究に携わってきた。この間、素晴らしい人の縁や数々の幸運に恵まれ、今に至っている。チタンの研究に関わった発端は、偶然にも京大の研究室の先輩であった小川 正人 さんの人柄に惹かれ、同じくチタンを研究テーマに選んだことである。さらに、今もなお、チタンの精錬に関する研究が続けられているのは、当時、友人達の絶大な支援を受けて、奇跡的に留年を免れて大学を卒業でき、かつ、大学院に合格したからである¹⁾²⁾。当時、もっとも出来の悪い学生の一人であった筆者が、35年経った今も、チタンをはじめとするレアメタルの研究に関わることができ、その道の学者として生きている幸運に感謝しつつ、筆者が研究で追い求めてきた夢とロマンを紹介したい。

チタン研究の夢とロマン

チタンは、資源的に無尽蔵で、抜群の強度、優れた耐腐食性を有するため、未来材料として注目されてきた。しかし、チタンは酸素と極めて高い化学的親和性を有するため、現在の製錬技術では、低いコストで、高純度の金属チタンを製造することができない。この技術的な制約がチタンの大規模な普及を妨げている最大の問題である。

チタンは、地殻中の存在量が9番目に多い元素であり、元素の発見自体は、1791年まで遡る(表1参照)。しかし、不純物を含まない金属チタンが単離されたのは、元素の発見から120年後の1910年のことであった。チタンは、元素の発見から単離までに100年以上の時を費やしたわけであるが、このことからチタンの製・精錬の難しさが理解できよう。金属チタンの量産技術が確立されたのは、さらに40年後の第二次世界大戦後であった。構造用の量産金属の中では、80年弱と極めて歴史が浅い新金属である。

現在も、チタンの量産化の足かせとなっている主な理由は、チタンが、酸素、窒素、鉄との高い

表1 チタンの歴史。

1791年	R. W. Gregor (英) により menachinite という鉱物として発見される
1795年	ドイツの化学者 Klaproth によりルチル鉱石の中に再発見され、チタンと命名される
1887年	Nilson と Pettersson は不純物を多く含む金属チタンの製造に成功
1910年	M. A. Hunter が、 $TiCl_4$ と金属ナトリウムを鋼製反応容器内で反応させ純度 99.9% のチタンの製造に成功 (元素の発見から 119 年) →製錬がもっとも難しい元素の一つ
1946年	W. Kroll が、 $TiCl_4$ を金属マグネシウムで還元する方法を開発し、工業的な生産が始まる
現在	年間約 20 万トンのチタンが製造されているが、今後も需要は増大すると考えられている チタンは金属の中では、新しい素材 →今後、大いなる発展が期待できる

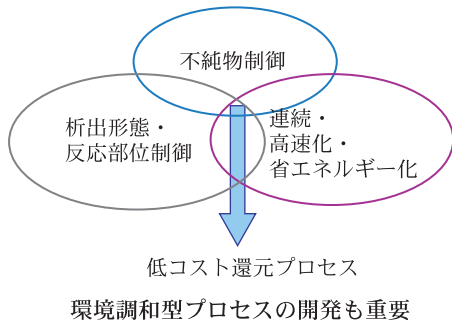


図1 チタン製錬プロセス開発の今後の課題.

化学的親和性を有するため、特殊な条件、環境下でしか製・精錬ができない点にある。現在の量産プロセス(クロール法)では、酸化物であるチタン鉱石を塩化処理して、四塩化チタン(TiCl₄)という酸素や鉄を含まない中間化合物に一旦変換する。その後、金属マグネシウムを還元剤として用い、TiCl₄を還元してスポンジ状の固体チタン(スポンジチタン)を製造している。

クロール法では、酸素を含まない化合物と反応系を利用して金属チタンを製造するため、比較的酸素濃度が低いチタンが得られる点が特徴である。しかし、依然として、金属チタン(スポンジチタン)中の不純物酸素は、他の不純物元素と比して圧倒的に多く存在し、高純度のスポンジチタンでも、300~500 mass ppmの酸素が含まれる。また、クロール法は、反応熱の制御が難しく、金属の生産速度が極めて低い(約1 t/day/反応装置)ことも、チタンが量産金属として普及しない大きな原因の一つである(図1参照)。

溶解、加工工程を経るとチタン中の酸素濃度は、さらに増大し、一般に使用されている工業用チタン(CP-Ti)には、約1000 mass ppmの酸素が不純物として含まれている。現時点では、チタン中の不純物酸素を直接除去・低減する工業的なプロセスは完成していない。

仮に、資源的に豊富な酸化チタン(TiO₂)を還元して、直接、酸素濃度が1000 mass ppm以下の金属チタンを製造する新しい量産技術を開発することができれば、チタンは、レアメタルではなくな

1990年代、京大・小野研においてカルシウム還元法に関する研究が精力的に行われた 京大での研究

カルシウム-ハライドフラックス脱酸法によるチタン中の酸素の除去



従来不可能とされていた金属チタン中の酸素の直接除去の可能性が示された

100 ppm以下の極低酸素濃度のチタンが製造できるようになった

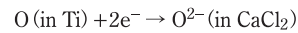
図2 カルシウム-ハライドフラックス脱酸法によるチタン中の酸素除去.

Electrochemical deoxidation method

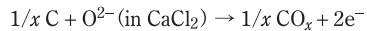
Okabe et al., 1993

京大での研究

陰極反応(還元)



陽極反応(酸化)



電気化学的手法による酸素の直接除去が可能となり、原理的には酸素濃度10 ppm以下のチタンが製造できるようになった

図3 電気化学的手法による極低酸素濃度の高純度チタンの製造.

り、ベースメタル、コモンメタルに変身する。

大学4年生の時に筆者は、このテーマを小野 勝敏 教授から与えられ、今も、同じテーマの研究に取り組んでいる。当時は、「酸化チタンの直接還元によるチタンの製造」、「チタン中の不純物酸素の直接除去」という研究テーマの難度がこれほど高く、苦勞に満ちた研究テーマであることを筆者は知らなかった。しかし、難しいテーマであるがゆえに、長く研究を続けることができ、今もチタン精錬の研究の虜になっている。

学生時、幸運にも、チタン中の不純物酸素を100 mass ppm以下にまで低減できるカルシウム-ハライドフラックス脱酸法という新精錬法を開発した(図2参照)。さらに、電気化学的手法を応用して、10 mass ppmレベルの極低酸素濃度の高純度チタンを製造する新技術を開発することができ

た(図3参照)。大学における基礎的な研究とはいえ、チタン中の酸素濃度を劇的に低減するこの新技術を開発できたときの感動は、今も忘れられない。

近年、岡部研では、希土類金属の脱酸能力やオキシハライドの生成反応を利用する新しいタイプのチタンの精錬技術の開発に取り組んでいる^{3)~5)}。筆者が開発した一連のチタンの精錬技術は、現時点では基礎的な学術研究のレベルではあるが、将来、チタン精錬の要素技術に応用されるのではないかと期待している。

レアメタルのプロセス技術のフロンティア

現在、筆者が注力して研究開発に取り組んでいるのは、「アップグレードリサイクル」あるいは「アップサイクル」と呼ばれる新しいタイプのリサイクル技術である⁶⁾(図4参照)。

一般に、レアメタルの多くは、リサイクルして生産される金属の方が、鉱石を製錬して生産される金属よりも純度が低くなる。特に、チタンなど、不純物との化学的な親和力が強いレアメタルは、スクラップ(2次原料)から再生した金属の純度は、鉱石(1次原料)から製造した金属より低くなる。このため、チタンなどのスクラップは、鉱石から製造した純度の高いチタン(スポンジチタン)で、スクラップ中の不純物を希釈溶解して、純度管理をしながら、再利用されることが一般的である。

仮に、スクラップ(2次原料)を原料として、鉱石(1次原料)から製造されたチタンよりも純度の高いチタンを製造可能な技術が開発できれば、鉱石の代わりにチタンスクラップを海外から輸入して、高品質のチタンを製造することが可能となる(図5参照)。このような、チタンの「アップグレードリサイクル」技術の開発は、精錬が難しいレアメタルのプロセス技術のフロンティアとして、わが国が取り組むべき重要な研究課題である。

現在筆者らが続けている、有害物を発生させずにレアメタルを分離抽出する環境調和型のリサイクル技術、チタンのアップグレードリサイクル技

チタンスクラップは、高純度のチタン(スポンジチタン)で希釈することによって循環利用されている

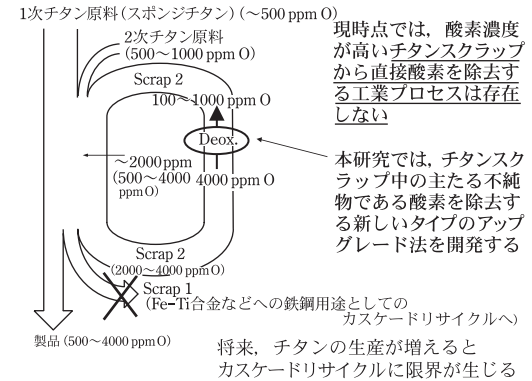


図4 チタンスクラップの材料フローと不純物酸素濃度の関係。

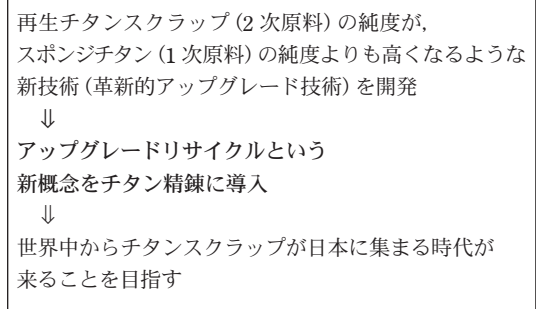


図5 岡部の夢。

術、CO₂ 排出量を激的に低減できるチタンの新製錬技術の開発などは、資源循環や省エネの観点、また、貴重な天然資源の保全、さらには、資源セキュリティの観点からも、今後、ますます重要性が高まるものと考えている。

おわりに

今から、35年前、何も知らない学生であった筆者に、小野 勝敏 先生は、この素晴らしい、「チタンをはじめとするレアメタルの精錬」というライフワークとなる研究テーマを与えてくださった。また、大石 敏雄 先生は、レアメタルの精錬に関する熱力学を、徹底的に教えてくださり、学術的な視点でチタン精錬をとらえる能力を与えてくださった。

「酸化チタンの直接還元によるチタンの製造」、

原料：

低品位チタン原料の利用技術
 鉱石や低品位チタン原料の高品位化技術
 有害な不純物を含むチタン原料の有効利用技術と
 廃棄物処理

還元プロセス：

チタンの還元プロセスの高速化あるいは連続化
 チタン粉末の高効率製造プロセス
 熱の有効利用，省エネルギー還元プロセス

リサイクル：

チタンスクラップからの不純物の除去技術・チタン
 の高純度化技術
 スクラップや廃棄物からのチタンの回収技術
 塩化物廃棄物の有効利用技術
 クロール法の塩化製錬技術を他のレアメタルリサイ
 クルに応用

図6 日本のチタン産業が今後取り組むべき課題。

「チタン中の不純物酸素の直接除去」という研究テーマは、一見、単純かつ簡単な課題のようであるが、いざ取り組んでみると、学術的にも奥が深く、また、技術的に極めて難しい。今後も、この難しい夢とロマンに満ちた研究テーマに対し、継続的にチャレンジし続けたい。

さらに、筆者が全うできなかった夢をさらに追いつけ、チタンの製・精錬にイノベーションをもたらす有為な人材が多数輩出されることを切に願っている(図6参照)。

京大、MIT、東北大、東大と研究機関を転々としながらも、筆者が長年、一貫してレアメタルのプロセス技術に関する基礎研究を続けて来られたのは、素晴らしい恩師、同僚、共同研究者、先輩、後輩、友人、協力者に恵まれ、家族に支えられたお陰である。

また、筆者はこれまで、実に多くの方々や企業から、多大な支援を受けて、レアメタルの研究に邁進することができた。大学における研究者として活動できる期間は、残すところ数年となってしまうが、今後も、チタンをはじめとするレアメタルのプロセス技術・環境技術の開発を目指し、世界最高水準の研究成果を目指すとともに、同時に、若手人材の育成にも注力するつもりである。

夢とロマン、さらには、困難と労苦に満ちたチタン研究に取り組み続けるためには、Never Give-up, Challenge! の精神、さらには、多様な支援者の存在が不可欠であることを改めて実感している。

参考文献およびリンク等

- 岡部 徹：夢とロマンのチタン研究～20年間の苦勞を振り返って～，チタン，**58** No.1 (2010)，3-9，((社)日本チタン協会平成21年度表彰式・記念講演会・懇親会，(2009.11.9)資料)．http://okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/docs/okabe_essays/essay_30.pdf
- 岡部 徹：卒業は京大熊野寮，熊野寮五十周年記念誌，(2014)．http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/docs/okabe_essays/essay_Kumano.pdf
- T. H. Okabe, C. Zheng and Y. Taninouchi: Thermodynamic Considerations of Direct Oxygen Removal from Titanium by Utilizing the Deoxidation Capability of Rare-Earth Metals, *Metall. Mater. Trans. B*, **49** No.3 (2018), 1056-1066. DOI: 10.1007/s11663-018-1176-0
- T. H. Okabe, Y. Taninouchi and C. Zheng: Thermodynamic Analysis of Deoxidation of Titanium Through the Formation of Rare-Earth Oxyfluorides, *Metall. Mater. Trans. B*, **49** No.6 (2018), 3107-3117. DOI: 10.1007/s11663-018-1386-5
- T. H. Okabe, L. Kong and T. Ouchi: Thermodynamic Consideration of Direct Oxygen Removal from Titanium by Utilizing Vapor of Rare Earth Metals, *Metall. Mater. Trans. B*, **53** No.2 (2022), 1269-1282. DOI: 10.1007/s11663-021-02342-z
- 岡部 徹，竹田 修，大内 隆成：チタンのアップグレードリサイクル，*金属*，**90** No.3 (2020)，166-172。
- レアメタル研究会 第100回記念講演会の収録映像，<https://www.youtube.com/watch?v=IEypQz-RwPQ>
- 岡部 徹：私が追いかけてきた夢とロマン，レアメタル研究会 第100回記念講演会の筆者の講演の部分，<https://youtu.be/IEypQz-RwPQ?t=11756>

おかべ・とおる OKABE Toru H.

1988 京都大学工学部冶金学科卒業。同大学院博士課程へと進み、チタンなどのレアメタルの精錬に関する研究で1993 博士号を取得。米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の博士研究員、東北大学素材工学研究所の助手、東京大学生産技術研究所の助教授(准教授)を経て、2009 教授に就任。2015-2019 生産技術研究所副所長。2019-2021 東京大学副学長(社会連携本部副本部長)。2021 より東京大学生産技術研究所所長、同所 持続型材料エネルギーインテグレーション研究センター教授、同所非鉄金属資源循環工学寄付研究部門特任教授(兼務)。

金属 12

KINZOKU MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY

Vol.92 No.12(2022)

特集 非鉄金属業界における 研究・人材育成の未来

チタン鉱石あるいはアップグレード鉱



原料プリフォーム (TiO₂ + Flux)



不純物除去とプリフォームの形成



還元とリーチング

溶解後のチタン



金属チタン粉末



溶解と鑄造

チタン鉱石から直接、金属チタンを製造する新製錬法の一例

レアメタル研究会提供

特集「非鉄金属業界における研究・人材育成の未来」

特集にあたって	岡部 徹	3(1227)
私が追い求めてきた夢とロマン	岡部 徹	4(1228)
希土類金属製錬学の体系化と展望	竹田 修	8(1232)
九州大学での夢と挑戦 ～最高のマテリアルは…～	谷ノ内勇樹	14(1238)
韓国内外環境変化と非鉄金属,そして研究者としての役割と夢	カン ジョンシン	19(1243)
高効率エネルギー利用と資源循環に向けたコトづくりと人づくり	大内隆成	25(1249)
国境を飛び越える製錬技術の面白さ Umicoreが取り組む非鉄人材育成	八木良平	31(1255)
タンタル・ニオブ製錬会社で働く研究者 ～ドイツ・ゴスラーからの便り～	野瀬勝弘	36(1260)

トピックス	資源の利用が誘発する炭素排出の削減に向けて	畑 奨, 南齋規介, 中島謙一	39(1263)
	環境親和型の低温精製技術の発展・応用	中野 優, 武田秀太郎, 藤井 昇, 中道 勝	45(1269)

レビュー	Marritt L. Kronberg 博士 — 転位論, 金属学を発展させた謎に包まれた天才化学者	乾 晴行	54(1278)
------	--	------	----------

連載	エレクトロニクスを中心とした近代技術史(9) センサ	江刺正喜	63(1287)
	石碑と墓碑でたどる地震の歴史(2) 日本における地震学のはじまり	林 能成	71(1295)
	琵琶湖集水域の環境メタロミクス(14) 耳石の微量元素組成・安定同位体比を用いたビワマスの回遊履歴推定	天野洋典	77(1301)
	核兵器禁止条約の発効に寄せて(9:最終回) 核兵器の威嚇または使用の違法性・核ゼロ訴訟	松尾宗次	86(1310)

工業材料 NEWS	— WEBパトロールから		2(1226)
-----------	--------------	--	---------

催しものカレンダー 91(1315) / 講演会・研究会案内 92(1316)

次号予定 93(1317) / 編集後記 94(1318) / 広告索引 94(1318) / Vol.92 総目次 95(1319)

編集顧問: 井野博満, 永田和宏

特集にあたって

岡部 徹

これまで20年間にわたり、筆者が主催してきた「レアメタル研究会」は、2022年3月11日に、第100回目の記念講演会を開催した。レアメタル研究会の累計参加者は、14,000人を超え、非鉄金属業界における重要な情報交流、人的ネットワーキング、人材育成の場となってきた。発足当初は極めてマイナーな存在であった「レアメタル」を冠する研究会の隆盛は、まことに喜ばしい次第である。

従来のレアメタル研究会は、非鉄金属分野の企業関係者を対象とした講演が中心であったが、第100回を記念して「非鉄業界における研究や教育（人材育成）に関する未来」と題して、この分野での研究人材育成をテーマとした、これまでとは異なる趣向の記念講演会を企画した。

長らく非鉄金属分野、とくにプロセス系の分野では、「若手人材枯渇の危惧」が指摘されてきた。わが国の非鉄金属産業は、産業規模も大きく、世界的にみても高い競争力を有しているにも関わらず、それを担う若手人材が育っていないと、各所から懸念の声が上がっていたのである。

この状況を踏まえ、筆者は2002年に、関連学会とは無関係に、独自に企業に点在する優れた人材や研究者を糾合する「レアメタル研究会」を立ち上げた。いわば、非鉄金属業界を、大学人が単独で学術界から盛り上げるべく、孤軍奮闘を続けてきた無謀な試みであった。

非鉄金属業界の危機感や東大での一連の活動が機縁となって、有難いことに、JX金属株から多額の寄付を受け、2012年には、東京大学生産技術研究所に「非鉄金属資源循環工学寄付研究部門」が設置されることになった。この寄付研究部門の設置により、若手人材の育成、さらには、非鉄金属分野の重要性を一般社会に対してアウトリーチする活動等に、多角的かつ長期的に取り組むことができるようになった。

同時に、岡部研では、東大に採用されるまで非

鉄金属製・精錬に関する研究に従事したことがない人材を積極的に採用してきた。異分野からの人材を、貴金属やレアメタルの精錬・リサイクルに関する研究に携わらせることにより、若手の研究分野・専門分野の転換を試み、非鉄金属製・精錬分野の人材育成を図ったものである。

本特集の著者らは、いずれも岡部研在籍時に、貴金属やレアメタルの研究を究め、第100回の記念講演会で実に素晴らしい講演をしてくれた気鋭の研究者である。また、著者らは、いずれもレアメタル研究会や非鉄金属資源循環工学寄付研究部門の運営に深くコミットし、非鉄金属分野の発展にアカデミアサイドから尽力してくれた。

著者らの講演を聞き、また、今回の特集記事を見ると、国際学会や海外の企業の中でも十分に競争力のある若手人材が、非鉄金属分野でしっかり育っていることがわかる。

今後は、著者らが、次世代の非鉄金属分野の若手人材の育成に取り組み、この分野での新たな研究成果が、豊かで持続性の高い社会の発展に、さらに大きく貢献することを願ってやまない。

本特集の趣旨にご賛同いただき、非鉄金属分野の人材育成に関する興味深い寄稿をいただいた著者の方々、そして一連の編集作業にきめ細かく対応して下さった編集スタッフの方々に、厚く御礼申し上げます。

備考：レアメタル研究会の第100回記念講演会の様子は、以下のサイトから閲覧できる。

<https://www.youtube.com/watch?v=IEypQz-RwPQ>

おかげ・とおる OKABE Toru H.

1988 京都大学工学部冶金学科卒業。同大学院博士課程へと進み、チタンなどのレアメタルの精錬に関する研究で1993 博士号を取得。米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の博士研究員、東北大学素材工学研究所の助手、東京大学生産技術研究所の助教授(准教授)を経て、2009 教授に就任。2015-2019 生産技術研究所副所長。2019-2021 東京大学副学長(社会連携本部副本部長)。2021 より東京大学生産技術研究所所長、同所 持続型材料エネルギーインテグレーション研究センター教授、同所非鉄金属資源循環工学寄付研究部門特任教授(兼務)。