

チタンをはじめとするレアメタルの製錬・ リサイクル技術の開発とその意義の啓蒙 —第86回服部報公会「報公賞」(2016)を受賞して—

岡 部 徹*

OKABE, Toru H.* Refining and Recycling of Rare Metals, Including
Titanium: Significance and Development
—On the Occasion of Receiving the 86th Hoko Prize
(2016)—



20 years ago, very few people recognized the importance of technologies for refining and recycling rare metals. I had been researching the development of the subject for more than 30 years, and made efforts for the enlightenment of its significance to the public. In recent years, the importance of refining and recycling technologies of rare metals is well recognized by the public, especially in Japan. I believe I have contributed to this change in the social recognition of rare metals and their importance. On the occasion of receiving the 86th Hoko Prize (2016) from the Hattori Hokokai Foundation, I looked back over the past, and have summarized my research activities on the development of refining and recycling technologies of rare metals, including titanium.

1. はじめに

時が経つのは早いもので、チタンをはじめとするレアメタルの製錬・リサイクル技術に関する研究を始めて30年が経過した。卒業論文、修士論文、博士論文の研究テーマはすべてチタン製錬に関するものであった。チタン以外にも希土類(レアアース)やニオブ、タンタル、レニウム、貴金属などのレアメタルの製錬・リサイクルの研究にも取り組んできたものの、今もなおチタンの製錬やリサイクルに関する研究を主に続けている。チタン一徹へのこだわりには、我ながら驚いている。

チタン製錬の研究は、研究そのものの難易度が極めて高い。還元実験を行うための基礎的な研究インフラを整備するだけで多額の経費がかかり、また、高温かつ不活

性雰囲気におけるチタンの還元反応を制御・解析する技術を習得するのに何年もの時間を要する。実験装置が高度化し、技術が進んだ今でも、酸化物(TiO_2)や塩化物(TiCl_4)の原料から出発して確実に1000 mass ppm以下の酸素濃度の金属チタンを製造できる技術を持っている研究者は世界中にほとんどいない。

筆者は学部学生の時代からチタン研究に魅せられ、見方によっては趣味のような気持ちでチタン製錬に関する研究に取り組んできた。難易度が極めて高く、困難に満ちた研究を続けられたのは、チタンそのものが有する魅力に加え、研究=Challengeというゲーム感覚の“遊び心”もあったためであろう。大学院生のときに100 mass ppmを下回る酸素濃度のチタンを確実に製造する新しい手法を独自に考案し、その要素技術を開発した。極低酸素濃度のチタンを製造する実験の再現性の確認ができた時の感動は、今も心の玉手箱となっている。

約30年前の大学院生の頃に心血を注いだチタンの製錬の研究を今も続けることができるのは幸運なことである。研究内容の陳腐化が早い昨今では、同一の研究分野で活動が続けることは、とても珍しい。さらに筆者にとって想定外であったのは、チタンをはじめとするレアメタルの製錬・リサイクル技術の開発に関する“研究の意義”が広く一般にも認められるようになったことである。20年前までは、この研究分野の研究の意義や重要

* 東京大学 生産技術研究所 持続型エネルギー・材料統合研究センター センター長・教授
〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 Fw301号室
Professor and Director,
Integrated Research Center for Sustainable Energy and Materials,
Institute of Industrial Science, Room Fw301,
The University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505
e-mail okabe@iis.u-tokyo.ac.jp
http://okabe.iis.u-tokyo.ac.jp

性について理解できる人は少なかった。筆者自身、社会全体が今日のような状況に変化するとは、まったく予想していなかった。

筆者の研究経歴や生き立ち、広報活動等についてはすでに別所で紹介しているため^{1)~10)}、ここでは、昨年、受賞した服部報公会「報公賞」の話題を中心にその関連事項について紹介する。

2. 報公賞

報公賞とは、1930年（昭和5年）に設立された（公財）服部報公会（理事長：佐藤壽芳東京大学名誉教授）が、工学に関する優秀な研究成果を挙げた研究者に対して、毎年、授与している賞である。

服部報公会は、(株)服部時計店（現セイコーホールディングス(株)）の創業者初代社長・服部金太郎が、国家、社会の恩に報いる念をもって、私財3百万円を投じて設立した公益事業団体である。当時としては、桁違いに巨額の寄付であり、研究奨励に対する基金としては画期的かつ際立ったものであった。

研究助成を行う財団としては、日本で最も古い伝統を誇る財団の一つである。財団は現在、工学に関する研究を奨励助成し、学術および科学技術の振興と進歩発展に寄与することを目的して活動している。

服部報公会は、1931年（昭和6年）の第1回目の報公賞より2016年に至るまでに、報公賞112件を127名に対して贈呈してきた（**Fig. 1**）。報公賞に加え、工学研究奨励援助金を主として若手研究者に対して2,914件を贈呈してきた。過去の報公賞の受賞者には、茅誠司博士（1935年）、湯川秀樹博士（1938年受賞）らが名を連ねている。

昨年の第86回の「報公賞」では、「レア金属の製錬・リサイクル技術の開発とその意義の啓蒙」という業績に対して、筆者が受賞する栄誉に浴した。

報公賞の贈呈式は、2016年10月7日に、日本工業倶楽部にて開催された。報公賞の授与と同時に、「工学研究奨励援助金」15件の贈呈式と講演会が開催された。

筆者による挨拶、受賞講演（**Fig. 2**）のあとは、東京大学名誉教授・片岡一則先生（（公財）川崎市産業振興財団副理事長・ナノ医療イノベーションセンターセンター長）による「夢を形に：ナノテクノロジーで創る体内病院」に関する特別講演が行われた。

余談であるが、片岡教授は東京大学マテリアル工学専攻科のかつての同僚であり、大先輩である。研究分野はまったく異なるものの、出身高校も同じであるため今も親しくさせていただいている。人の縁とは不思議なものである。

筆者に授与された報公賞の受賞理由は下記のとおりである（（公財）服部報公会、2016年9月2日プレスリリースより抜粋）。



Fig. 1 Award ceremony of the 86th Hoko Prize held by the Hattori Hokokai Foundation (on 7th October, 2016).



Fig. 2 As a part of the ceremony, a special lecture was delivered by the author.

[業績の概要]

受賞者 岡部 徹氏は、チタン、ニオブ、タンタル、タングステン、スカンジウム、ガリウム、レニウム、レアアース、白金族金属等のレア金属の精錬とリサイクルの研究において世界をリードする研究業績を挙げ、金属材料科学に関する学術分野の発展に貢献し、更には非鉄金属産業界においてレア金属の精錬・リサイクルに関する技術分野のフロンティアを切り開くのに多大な貢献を果たした。

鉄鋼高機能化添加物、超硬合金工具、自動車排ガス浄化触媒、モーター用磁石、薄型テレビ、発光ダイオード、リチウムイオン二次電池、燃料電池、太陽電池、熱電変換素子などの製造にはなくてはならない金属であるレア金属について、受賞者は、鉱石からの分離・精製に関する様々な新技術を開発し、社会の発展に伴った需要の拡大、製品の高純度化の要求等に対応した技術を確立した。一方、レア金属は地球規模で偏在しており、それらの供給は社会的、政治的、経済的影響を極めて強く受ける。そこで受賞者は、鉱石からの製錬だけでなく、既に使用されている製品の中のレア金属を抽出してリサイクルする技術の開発も数多く手がけ、今後のレア金属供給不安を解消する方策として提案した。

受賞者は、熔融塩を用いた電気化学的手法により、チタン中の主な不純物である酸素を極めて低いレベルまで

低減する新規な手法を開発し、1993年に成果を学術誌に発表すると共に学位論文として纏めている。この成果が基盤となり、現在までのレアメタル精錬・リサイクル関連の研究に繋がっているが、受賞者の研究開発とそれらの成果について以下の特徴を挙げることができる。

- (1) 鉱石の製錬に関する基礎的な研究成果と共に、金属粉末の製造技術やリサイクル技術の開発など多岐にわたっている。
- (2) 高温でのレアメタルの還元プロセスにおける析出形態制御、反応部位制御等に電気化学的な手法を応用している。
- (3) 高温（乾式）反応だけでなく、水溶液系（湿式）の酸化還元反応や酸-塩基反応などを用いる化学的手法等も幅広く駆使している。
- (4) 既存・市販の実験装置を用いて手早く成果を出すのではなく、明らかにしたいことに最適な実験装置を設計・自作することにより、格段に質の高い成果を得ている。

これらの成果は、学術論文90編、解説論文・解説記事80編、著書（共著）24冊などとして纏められ、多くの論文賞を受賞した。また、基調講演・招待講演・依頼講演も150件を超えるなど、学術分野で極めて高い評価を得ている。更に、実用の立場からもその独創性が高く評価され、多くの学会や研究会を通じて受賞者のコンセプトやビジョンが広く共有され、学界ばかりでなく産業界でもキーパーソンとして認知されている。

また、受賞者はレアメタルに関する広い啓蒙活動を行っており、国内外の産官学のネットワーク（レアメタル研究会、Workshop on Reactive Metal Processing（米国版レアメタル研究会））を構築し、当該分野の発展に大きく貢献していると共に、講演会、解説記事、テレビ出演などを通して受賞者の知識と研究成果を市民に還元した。

本研究業績は、レアメタルの精錬とリサイクルの分野において先駆性が極めて高く優れた業績であり、その応用領域は今後さらに発展、貢献すると期待されている。とくに、今後大幅に発生量が増大する電子機器のスクラップ（E-scrap）の中から、貴金属やレアメタルを効率良く、かつ有害物を発生させずに分離抽出する「環境調和型の高効率リサイクル技術」は、日本だけでなく全世界で重要な技術となるため、当該分野をリードしている受賞者の研究のさらなる進展が望まれる。

3. レアメタル研究の夢とロマン

筆者は、学部学生のときから一貫して、チタン（Ti）やニオブ（Nb）、タンタル（Ta）、レアアース（希土類元素：REMs）、白金族金属（PGMs）、レニウム（Re）などのレアメタルの製錬・リサイクルなどのプロセス技術の開発に関する基礎的な研究に取り組んできた。

前項の受賞業績概要は一般向けの説明であるが、専門家に対して、レアメタルなどの金属材料の研究分野における学術面および技術面の画期的な発見または発明を説明する場合の主な項目は以下のとおりである。

- ① チタン中の不純物酸素を極低レベルまで除去する新手法の開発（初期の研究：この製錬技術は今でも世界最高レベルの技術であり多数の学術賞を受賞した。現在は、チタンスクラップのリサイクル技術への応用を進めている）
- ② ハライド熱還元法による粉末チタンの新製造法の開発（初期の研究、複数の論文賞を受賞）
- ③ 食塩のバイポーラ電解によるモリブデン硫化物鉱石の新溶解技術とレニウムの分離・回収（論文賞を受賞）
- ④ プリフォーム還元法によるニオブなどの高純度粉末の製造（関連特許が市村学術賞を受賞）
- ⑤ レアアースのリサイクル：有害な廃液を出さずにレアアースを直接、分離・回収する新技術の開発（1995年から取り組み、レアアースのリサイクルの先駆的かつ重要な研究として評価され、多数の賞を受賞した）
- ⑥ チタンの超高速還元技術：チタンの高効率・高速製造法の開発（論文賞受賞）
- ⑦ 貴金属の溶解法・新しい環境調和型リサイクル技術の開発（最近の研究：一連の研究は世界をリードしている。米国の材料系主要学会から最優秀論文（1件）に選ばれた）
- ⑧ チタン鉱石からの選択的脱鉄法の開発（最近の研究：学術論文賞2件受賞）
- ⑨ チタンやその合金の環境調和型リサイクル技術の開発（最近の研究）
- ⑩ レニウムやタングステンなどの新製錬・新リサイクル技術の開発（最近の研究）

以上が25年間に行った主な研究および発明である。上記以外にも、学術的な発見として、金属熱還元反応における電気化学的な反応（EMR: Electronically Mediated Reaction）の寄与が大きいことを見出し、これをレアメタルの還元プロセスにおける析出形態制御、反応部位制御、汚染防御技術等に応用できることを示したことも重要な業績であり、新たな研究フロンティアを築いた。さらに筆者は、シリコン（Si）やタンタル（Ta）、タングステン（W）、スカンジウム（Sc）、ガリウム（Ga）、レニウム（Re）などのレアメタルの新製錬法や、環境調和型リサイクル技術の開発研究も行なっている。一連の発明に関して、25件以上の特許を申請し、その多くが特許として成立している。

特筆すべき点は、上記の発明や技術開発は、プロセスや手法そのものの考案はもちろんのこと、実験装置も独自に考案・設計して研究を行っていることである。一連

の研究は、金属材料科学の学術分野においてレアメタル製錬・リサイクルというフロンティアを拓くのに貢献したものと信じている。

3. レアメタル研究の意義の啓蒙

筆者は、技術的な発明とその発明にもとづく技術開発だけでなく、レアメタルの重要性や将来性について、広く一般社会に向けて発信し、同時に、レアメタルのリサイクルの重要性を長年、社会に訴え続けてきた。

15年前から、主宰・企画しているレアメタル研究会（計75回開催）は、企業関係者が毎回100名以上（これまでの累計参加者8,000人以上）集まる会合となっており、今ではレアメタルの産学官連携の中心拠点となっている。また、米国でもレアメタル研究のワークショップ（Reactive Metal Workshop, RMW）を、10年以上の期間にわたって、毎年、企画・主宰しており、マサチューセッツ工科大学（MIT）をはじめとする研究機関と緊密な交流を推進している。

このように、レアメタルの新製錬・新リサイクル技術の発明と開発に関する研究だけでなく、より広い視野で世界規模でのレアメタルの普及および啓蒙活動に取り組み、アカデミアとして新たな産学連携活動および国際的研究連携のフロンティアを自ら切り開いてきたものと自負している。

4. 若手研究者へのメッセージ

最近、“研究に対する情熱”が希薄な者が多くなっていると感じることがある。これは、若手研究者や学生の研究発表を聴いていて、筆者が頻繁に感じる由々しき事態である。

研究に不可欠な夢と情熱が乏しい若者が増えているのは、見かけの業績が重んじられるようになったためであろうか。このような風潮のせいもあってか、学会での発表実績や学術論文のリスト等の見かけ上の研究成果を積み上げることが最も重要な活動であると信じて研究に取り組んでいる者が多い。

その結果として、共著者が妙に多く、また、研究の本質的な意義や成果が不明確な研究発表が多くなっているように思える。さらには、難易度の低い小刻みな研究を作業ベースで積み上げ、論文リストの作成が目的化している事例も多くなっているようである。

若手の研究者や学生は、見かけ上の研究成果や外部獲得研究資金等の外形的な情報に振り回されずに、しっかりとしたビジョンをもって、地に足が着いた研究に取り組んでほしいと願っている。また、研究教育者は、作業ベースで学術論文を積み上げる方法を指導するのではなく、確固たる目的を絞ったリスクを伴う研究に取り組む教育を指向すべきと考えている。

筆者は、偶然にも「夢とロマンに満ちたチタン研究」

と良き師に巡り会えた結果今に至っているが、筆者がかつて受けたような研究教育を受けることができる若者が今後も増えることを祈って已まない。

5. おわりに

大学4年生の時に、チタンの製錬に関する研究にめぐり合ったが、思い起こせば最初の10年間は、「レアメタル？何それ？研究する意味あるの？」と多くの人にいわれ、研究の意義すら認めてもらえない場合も多々あった。

ところが、筆者自身の考え方や研究への取り組み姿勢は、当初からいささかも変わっていないにもかかわらず、10年ほど前からは世の中の方が大きく変わった。その結果、今では一般の人からも「レアメタルのリサイクルの研究ですか！意義のある重要な研究をしていますね」と励まされるようになったのは感慨深い。

もっとも、レアメタルの製錬やリサイクル技術に関する基礎的な研究を延々と続けてはいるものの、残念ながら、いまだにチタンの新製錬法を実現するブレークスルーの糸口すら掴めていない。

しかしながら、チタンをはじめとするレアメタルの研究を通じて、実に多くの人と知り合うことができ、貴重なことを沢山学んだ。また、多くの人から助けられ、励まされ、幾多の困難を乗り越えてレアメタルの研究を続けることができた。

京大、MIT、東北大、東大と研究機関を転々としながらも、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、家族に支えられた結果である。

偶然の重なりとはいえ、チタンとめぐり合い、多くの人に支えられてレアメタルの研究を続けることができ、一連の活動に対して一定の評価もいただいていることに對し、あらためて感謝申し上げたい。

これからも、レアメタル研究のフロンティアを開拓し、人材の育成と社会貢献にも精進する決意を新たに固めている。

参 考 文 献

- 1) 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，vol. 58, no. 1. (2010) pp. 3-9.
- 2) 岡部 徹：‘レアメタルの製錬・リサイクル技術のフロンティア～第13回本多フロンティア賞を受賞して～’，チタン，vol. 65, no. 2 (2017) pp. 124-129.
- 3) 岡部 徹：‘新製錬法について’，チタン，vol. 50, no. 2 (2002) pp. 102-104.
- 4) 二上 菱，岡部 徹：‘チタンはアルミニウムを越えられるか’，チタン，vol. 50, no. 3 (2002) pp. 219-

227.

- 5) 岡部 徹, 宇田哲也: '熔融塩を利用する酸化チタンの還元プロセス', チタン, vol. 50, no. 4 (2002) pp. 325-330.
- 6) 大井泰史, 岡部 徹: 'チタンの低級塩化物の不均化反応を利用するチタン製造法に関する基礎的研究', チタン, vol. 56, no. 4 (2008) pp. 268-275.
- 7) 岡部 徹, 姜 正信: '廃液や塩化物廃棄物を排出しない環境調和型のチタン製錬法', チタン, vol. 64, no. 2 (2016) pp. 112-117.
- 8) 岡部 徹: '私のチタンの広報活動', チタン, vol. 60, no. 1 (2012) pp. 18-20.
- 9) 岡部 徹, 角尾 舞, 山中俊治: 'チタンでデザインする! チタンをアートする?', チタン, vol. 63, no. 2 (2015) pp. 93-96.
- 10) 岡部 徹: 'レアメタルの環境・リサイクル技術の課題と展望', 日本金属学会創立80周年記念特集「材料科学の変遷と展望～社会からの要求に応じて～」, まてりあ (日本金属学会会報), vol. 56, no. 3 (2017) pp. 157-160.

