

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—

岡 部 徹*

OKABE, H. Toru* The Frontier of Refining and Recycling Technologies for Rare Metals
 ~On the Occasion of Receiving the 13th Honda Frontier Award~



Over the last thirty years, my research has focused on refining and recycling titanium and other rare metals. It would not be an exaggeration to say that I have devoted my life to the research on titanium and rare metals. I have been engaged in fundamental research on various processes during my research career. On receiving the 13th Honda Frontier Award from the Honda Memorial Foundation, I have organized and summarized some of my research related to titanium refining and recycling technologies. In future, I hope that further innovation will take place in the field of titanium production technologies.

1. はじめに

チタンの生産量は、現状では数万トンレベル^注と少ないものの、将来的には100~1000万トンの需要が発生しても何ら不思議のないレアメタルである。なぜならば、チタンの鉱物資源は無尽蔵かつ採掘コストは低い一方、チタンやその合金は、金属材料の中では最高水準の比強度・耐食性を有する極めて優れた材料だからである。将来、製造プロセスのイノベーションにより、製錬コストの低減が実現すれば、チタンはレアメタルからコモンメタルに変わる。

上記の事実と将来性については、約30年前、筆者が大学4年生のときに、恩師である小野勝敏教授から教えられたことである。それ以来、チタンが有する類稀なるポテンシャルの高さに魅せられ、チタンの製造プロセスに関する研究を続けてきた。

チタンの還元プロセスの研究は、極めて難易度が高く、学術論文を書くのが難しい分野である。そのため、

チタン製錬の研究のみを続けていては研究業績の評価が低くなり、研究者として生き残ることが難しい。筆者は、チタン以外のレアメタルの製錬やリサイクルに関する研究にも取り組んできたため、幸いにも非鉄冶金学・特殊金属製錬という極めてマイナーな分野の研究者として研究を続けることができた。

これらの長年にわたる様々な研究への取り組みが評価され、昨年、本多記念会より栄誉ある第13回本多フロンティア賞を授与される光栄に浴した。

受賞の主な理由は、25年以上にわたり一貫して、チタン、ニオブ、タンタル、レアアース、白金族金属、レニウムなどのレアメタルの製錬・リサイクル技術の研究に取り組み、数々の発明と新規なプロセスの開発を行なったことである。プロセスや手法そのものの考案はもちろんのこと、実験装置も独自に設計・試作して研究を行い、金属材料科学の学術分野にレアメタル製錬・リサイクルというフロンティアを拓く貢献をした点が評価されたものと理解している。

基礎研究だけではなく、「一般社会に対する啓蒙活動」も受賞理由の一つとされている。筆者は、25年以上継続して、より広い視野でレアメタルの普及および啓蒙活動に取り組んできた。レアメタルの新製錬技術や環境調和型の新リサイクル技術の重要性、将来性を国内外に発信し続けてきた。とりわけ、チタンの将来性については、学術とは関係がないアプローチも利用して多様な広報活動を行ってきた¹⁾²⁾。

* 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, The University of Tokyo
 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

(注：1990年代の数値。近年の生産量は、10~20万トン/世界・年レベル)

筆者がレアメタル研究会の立ち上げや運営をはじめ、アカデミアにおいて「新たな産官学連携活動のフロンティア」も自ら切り開いてきたことも受賞理由として加えられている。大学では基礎研究に没頭する研究者が多いが、メディアを通じ社会に正確な情報を伝える啓蒙活動等、研究以外の活動も同時に推進している研究者は少ない。独自のビジョンと信念をもって取り組んだ啓発活動が高く評価されたのは、望外の歓びである。

筆者が15年前に立ち上げたレアメタル研究会は、産業界との連携・交流を目的としたレアメタルのプロセス技術に関する研究会である。昨年、チタンの製錬とリサイクルをテーマとして開催（第73回、2016年11月）したときは180名以上の参加者が集まる会合となった。最近開催された、貴金属の製錬とリサイクル技術をテーマにした研究会（第74回、2017年1月）には、産業界を中心に官学含め270名以上が参加する大規模な会合となった。15年前の研究会発足時は、レアメタルのプロセス技術に対して現在のような関心が集まる状況に変化するとは誰も想像できなかった。筆者自身、レアメタルの製錬の研究を始めた当初は、自分が取り組んでいた研究の意義や関連の活動が産業界や一般社会からも認められる時代がくるとは夢にも思っていなかったのが、今昔の感に堪えない。

本稿では、筆者がこれまでに取り組んできたチタンの製錬やリサイクル技術の開発に関する研究の概略について紹介する。一般社会に対するチタンの広報活動等については、すでに本誌に寄稿しているので省略する¹⁾²⁾。

2. チタンの製錬・リサイクル技術^{3)~41)}

Fig. 1 は、筆者がこれまでに取り組んだチタン製錬のプロセス技術の開発に関する基礎研究の中で代表的なものを模式的に示したものである^{3)~41)}。

京都大学での学生時代、筆者はチタンの酸化物(TiO_2)を還元・脱酸して、直接、低酸素濃度(<1000 mass ppmO)の金属チタンを製造する新製錬法の開発に注力した(**Fig. 1(a)**)。研究を開始した頃は、実験は上手く進まず、1000 mass ppm どころか数%オーダーの酸素を多量に含むチタンしか作ることができなかった。卒業研究を行っていた頃には、当時の定説どおり、「酸化チタンを還元し、直接、低酸素濃度のチタンを製造することは技術的に不可能」であると思えたことも幾度かあった。

大学院に進学してからは、熱力学、電気化学を中心に勉強を行い、熱力学的な検討を多角的に行うとともに脱酸限界について様々な考察を行った。試行錯誤の末、幾つもの実験的な工夫によって、カルシウム―ハライドフラックス脱酸法という手法(**Fig. 1(b)**)を独自に開発し、最終的には極低酸素濃度(<100 mass ppmO)のチタンを製造する新しい手法を開発した⁹⁾。さらに、

開発したカルシウム―ハライドフラックス脱酸法を進展させた電気化学的手法によって、10 mass ppm レベルの酸素濃度のチタンを製造することに成功した¹⁰⁾(**Fig. 1(c)**)。

当時、チタン製錬の専門家には、固体チタン中の酸素を直接除去することは不可能と考える向きが多かった。このため、筆者が「10 mass ppm レベルの酸素濃度のチタンを製造できる新技術を開発した」と主張すると、データを捏造したのではとか、分析手法が間違っていたのではと、チタン製錬の幾人かの専門家から疑われた。今では、技術も進歩し MgCl_2 熔融塩を反応媒体として利用しても100 mass ppmO 以下のチタンが製造できることが明らかとなっているが¹¹⁾、当時としては、画期的なブレイクスルーの一つであったと考えている。

一連の脱酸技術を応用して、チタンだけでなく、希土類金属中の酸素の除去や高純度化手法に利用することも実験的に示した¹²⁾¹³⁾。近年、希土類金属やその合金の熔融塩電解は飛躍的に発展し大規模工業化が進んでいるため、これらの工業電解技術が将来、チタンやその合金の脱酸技術、リサイクル技術にも応用できるのではないかと期待している。

マサチューセッツ工科大学(MIT)でのポストドク時代には、熔融塩中におけるタンタルの還元反応の解析に関する研究をキャボット社(当時)との共同研究として行った。この際、原料のタンタルフッ化物(K_2TaF_7)は、必ずしも還元剤の金属ナトリウム(Na)と物理的に接触しなくても、電気化学的な反応によって金属タンタルに還元されることに気がついた¹⁴⁾。この発見をベースに、導電体を介した反応(Electronically Mediated Reaction, EMR)による、熔融塩中における金属の還元反応の解析を行った^{15)~17)20)}(**Fig. 1(e), (f)**)。EMRの反応解析そのものは学術的な基礎研究であったが、企業の現場に出向いてのプロセス研究は、筆者にとって基礎研究とは異なる新しいプロセス研究を学ぶ良い機会であった。現在も筆者は多くの産学連携研究を推進しているが、実際の製造プラントで仕事をした当時の貴重な経験が大きく役立っている。

東北大学に移った後は、チタンやニオブについても、このEMRによる金属製造プロセスに関する研究を展開した。熔融塩化カルシウム(CaCl_2)中で酸化ニオブ(Nb_2O_5)を電気化学的に還元する反応($\text{Nb}_2\text{O}_5 + 10\text{e}^- \rightarrow 2\text{Nb} + 5\text{O}^{2-}$)の解析に関する研究¹⁷⁾は、後に発展した熔融 CaCl_2 中の酸化物の電気化学的な還元プロセスの研究の先を行く画期的なものと考えていたが、学術界からの注目度は今一つであったようである。

また、東北大学では、還元力を有する熔融塩を利用してチタン原料を還元し、粉末チタンを製造するハライド熱還元法(**Fig. 1(g)**)の開発も行なった¹⁸⁾¹⁹⁾。この手法は、熔融塩中に還元力を有する金属イオン(低級ハライ

ド塩のイオン)を共存させ、そのイオンを還元剤として利用する新しい手法である。還元力を有する媒体を利用するプロセスは、今後、レアメタル粉末の製造プロセスに応用される可能性があると期待している。

約1000 rpm で回転する高速攪拌器を独自に設計・製作し、約800℃の熔融 MgCl_2 と金属マグネシウムを混合して、熔融塩/液体金属の微細混合体を合成し、これに直接 TiCl_4 を打ち込んで、超高速でチタンを還元する手法の開発も行った²²⁾²³⁾ (Fig. 1(h))。800℃以上の高温で、化学的に極めて活性なマグネシウム液体を熔融塩とともに強攪拌し、これに TiCl_4 を打ち込む手法は、実験的な難易度が極めて高く、非常に危険な実験であったが、今となってはよい思い出となった。

東京大学に移ってからは、プリフォーム還元法(Preform Reduction Process: PRP)の開発に注力した²⁴⁾²⁵⁾ (Fig. 1(j))。この手法は、原料を含む成形体(Preform)を還元剤の蒸気で還元し、金属粉末を直接製造する方法である。原理的に反応容器からの汚染を防止できる点と、生産量を大幅に変更できる点(大きなスケラビリティ)が特徴である。プリフォームの成型には、フラックス(反応助剤)として CaCl_2 などを加える。このフラックスは、高温で還元反応を進める際に反応を促進する役目があり、得られる粉末の粒度や形態を制御する上でも重要な役割を果たす。また、得られる金属粉末と反応生成物を、リーチング(湿式法)によって分離する際にもフラックスの役割は大きい。プリフォーム還元法のように、プロセスのスケラビリティが大きく、汚染防御にも優れているプロセスは、将来、レアメタルの製造プロセスに利用されるものと期待している。

上記以外にも、チタンのサブハライド(低級塩化物)をマグネシウムで高速還元して高純度のチタンを製造するサブハライド還元法^{26)~28)} (Fig. 1(k))、サブハライドの不均化反応を利用し金属チタン粉を製造する手法⁷⁾ (Fig. 1(l))など、多様なプロセス開発を行なった。

金属チタンの還元プロセスだけでなく、チタン鉱石のアップグレード(富化)技術^{8)30)~36)}やチタンスクラップのリサイクル技術^{37)~40)}に関する研究も行った。

リサイクルの研究は、熔融塩を反応媒体として利用して、チタンのスクラップを塩化処理する研究を行った(Fig. 1(m))³⁷⁾³⁸⁾。塩化剤として塩化鉄を利用する試みは、将来、発生量が増大すると予想される塩化鉄(FeCl_x)を含む廃棄物を有効利用できるだけでなく、塩化プロセスにおける塩化ロスの低減にも有効である。

チタン鉱石の中の不純物の鉄(Fe)を塩化反応によって選択的に揮発・除去するアップグレード技術の研究も行なった(Fig. 1(n)(o))⁸⁾。一般的には、酸素分圧($p\text{O}_2$)が高い条件では、鉱石中の鉄は酸化物(FeO_x)として安定であり塩化されない。しかし、反応系内の酸素分圧と塩素分圧($p\text{Cl}_2$)を上手く制御すれば、チタン鉱石中

の鉄のみを選択的に塩化して揮発除去できることを見出した^{33)~36)}。この技術が発展し、将来、廃液が一切発生しない環境調和型のチタン鉱石のアップグレード技術の開発が進むことが期待される。

有害な廃液や廃棄物を一切発生せずにチタンを製造し、また、リサイクルして循環利用する環境調和型のチタンのプロセス技術は将来重要となるものと確信して、現在も新しい環境技術の開発に鋭意に取り組んでいる⁸⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾。

3. 人材育成の重要性

時が経つのは早いもので、筆者がチタン研究に没頭してから、約30年が経過した。2001年には東京大学・生産技術研究所に赴任し、ゼロスタートで新しい研究室を立ち上げ、今では種々のレアメタルの還元プロセス・リサイクルプロセスに関する要素技術の開発研究を行える恵まれた研究環境が整っている。一方で、自らが実験を中心とする研究に専念する時間がなくなったのが残念である。

定年まではまだ10年以上、研究ができるが、チタンの研究は、並外れた気力や体力、精神力、忍耐力が必要であるため、筆者自身、いつまでチタンの研究が続けられるかわからない。しかし、苦労と困難に満ちたチタン研究を通じて、筆者が会得した“Never Give Up, Challenge”の精神だけは、若手研究者や技術者にも引き継いで行きたいと考えている。

末尾に示す文献リストの共著者からもわかるように大学の世界においては、筆者が直接、研究指導を行った人材が各所で大いに活躍している。したがって、学術的な後継者の育成という観点からは、筆者はすでに、その責務を十分に果たしていると考えている。また、若手の共同研究者が行った研究の多くは、学術論文賞や研究奨励賞が授与される機会が多い。難易度の高い研究を遂行する苦労が報われ、更なる飛躍の励みとなるのでありがたいことである。

論文数等の表面的な業績の蓄積を考慮すると、チタンのプロセス研究に取り組むのは得策ではないどころか、研究キャリア上は不利となる場合が多い。しかし、「岡部先生とプロセスの研究に取り組んだ経験を一度すると、他のほとんどの研究がとても簡単に感じるので良い」とかつての共同研究者が後に語ってくれたので、研究教育の方針としては間違っていないと信じている。

大学に籍を置く以上、優秀な人材を社会に排出することは重要なミッションであるが、今後は、専門外の人材に対するレアメタル関連の教育を行うことも、筆者のライフワークとなる。同時に、レアメタルの重要性や将来性を一般社会に伝え、チタンの研究の「夢とロマン」に魅せられる若者を一人でも多く育てて、次世代に繋ぐことも筆者の責務の一つであると思っている。

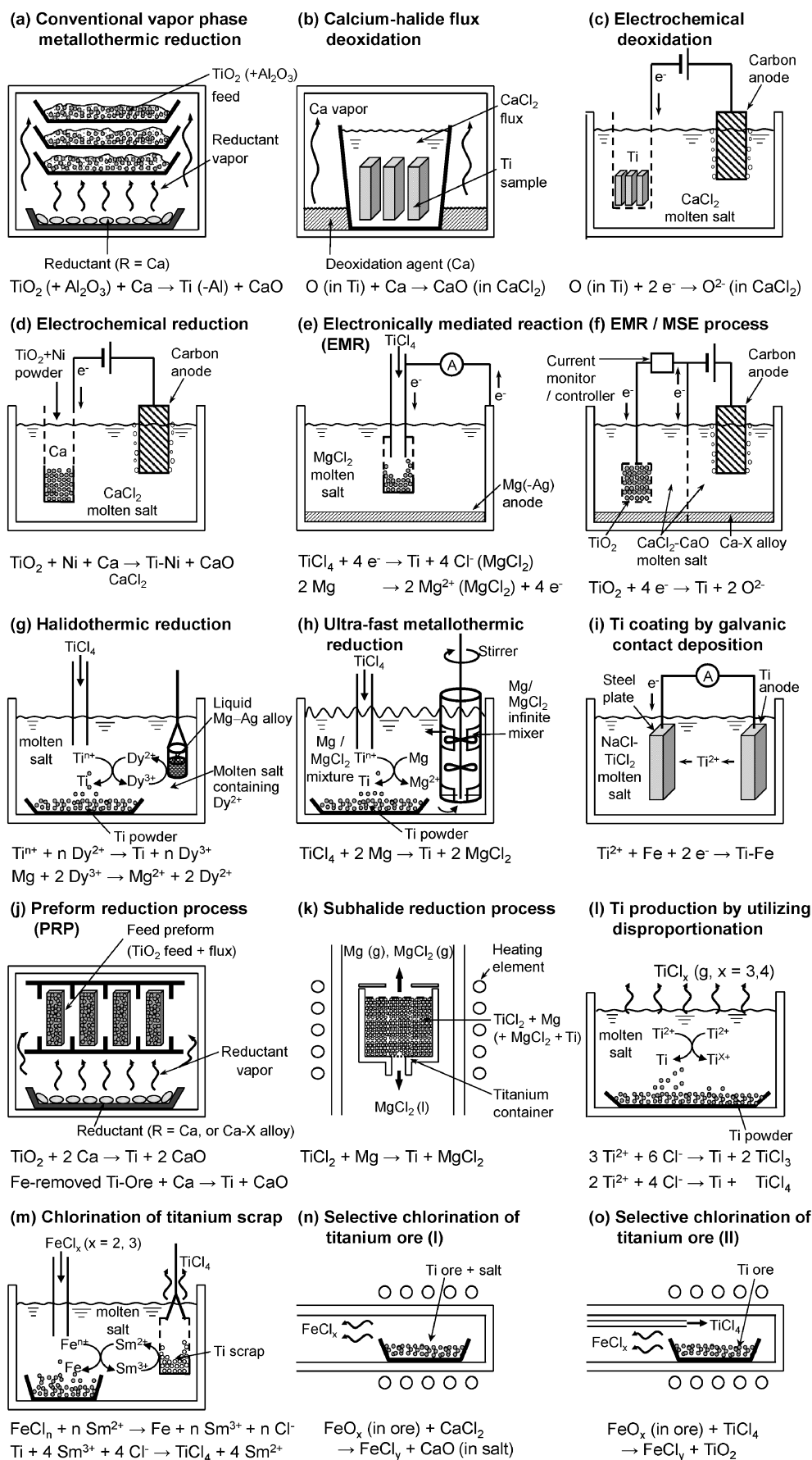


Fig. 1 Schematic illustration of various titanium production processes studied by Prof. Okabe.

4. 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あった。筆者自身の考え方や取り組みは、当初から何も変わっていないが、10年ほど前からは世の中の方が大きく変わり、今では一般の人からも「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。

筆者は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、筆者自身は、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、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、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る次第である。

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

- 岡部 徹：‘私のチタンの広報活動’，チタン，vol. 60, no. 1 (2012) pp. 18-20.
- 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.
- 岡部 徹：‘夢とロマンのチタン研究～20年間の苦労を振り返って～’，チタン，vol. 58, no. 1, (2010) pp. 3-9.
- 岡部 徹：‘新製錬法について’，チタン，vol. 50, no. 2 (2002) pp. 102-104.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- T. H. Okabe, T. Oishi, and K. Ono: ‘Preparation and Characterization of Extra-Low-Oxygen Titanium’, J. Alloys and Compounds, vol. 184 (1992) pp. 43-56.
- T. H. Okabe, M. Nakamura, T. Oishi, and K. Ono: ‘Electrochemical Deoxidation of Titanium’, Met. Trans. B, vol. 24B, June (1993) pp. 449-455.
- Toru H. Okabe, Yuki Hamanaka, and Yu-ki Taninouchi: ‘Direct Oxygen Removal Technique for Recycling Titanium Using Molten $MgCl_2$ Salt’, Faraday Discussions, vol. 190 (2016) pp. 109-126.
- T. H. Okabe, T. Deura, T. Oishi, K. Ono, and D. R. Sadoway: ‘Electrochemical Deoxidation of Yttrium-Oxygen Solid Solution’, J. Alloys and Compounds, vol. 237 (1996) pp. 150-154.
- T. H. Okabe, K. Hirota, Y. Waseda, and K. T. Jacob: ‘Thermodynamic Properties of Oxygen in Ln-O (Ln=La, Pr, Nd) Solid Solutions and Their Deoxidation by Molten Salt Electrolysis’, J. Mining and Materials Processing Institute of Japan, vol. 114, no. 11 (1998) pp. 813-818.
- T. H. Okabe and D. R. Sadoway, ‘Metallothermic Reduction as an Electronically Mediated Reaction’, J. Materials Research, vol. 12, no. 13 (1998) pp. 3372-3377.
- 宇田哲也，岡部 徹，葛西栄輝，早稲田嘉夫：‘ $TiCl_4$ のマグネシウム還元における導電体を介した反応 (EMR) の実証’，日本金属学会誌，vol. 61, no. 7 (1997) pp. 602-609.
- 岡部 徹，宇田哲也，葛西栄輝，早稲田嘉夫：‘導電体を介した反応 (EMR) を含む $TiCl_4$ のマグネシウムおよびナトリウム還元における相平衡および反応経路’，日本金属学会誌，vol. 61, no. 7 (1997) pp. 610-618.
- T. H. Okabe, I. Park, K. T. Jacob, and Y. Waseda: ‘Production of Niobium Powder by Electronically Mediated Reaction (EMR) Using Calcium as a Reductant’, J. Alloys and Compounds, vol. 288 (1999) pp. 200-210.
- 宇田哲也，岡部 徹，早稲田嘉夫：‘ハライド熱還元法による粉末チタンの製造’，日本金属学会誌，vol. 62, no. 9 (1998) pp. 796-802.
- 岡部 徹，宇田哲也，早稲田嘉夫：‘反応媒体塩中のチタン塩化物の還元メカニズム’，資源と素材，

- vol. 114, no. 8 (1998) pp. 573–579.
- 20) I. Park, T. Abiko, and T. H. Okabe: 'Production of Titanium Powder Directly from TiO_2 in CaCl_2 by Electronically Mediated Reaction (EMR)', *J. Physics and Chemistry of Solids*, vol. 66, no. 2–4 (2005) pp. 410–413.
 - 21) T. Uda, T. H. Okabe, Y. Waseda, and K. T. Jacob: 'Contactless Electrochemical Reduction of Titanium (I) Chloride by Aluminum', *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 31B, no. 4 (2000) pp. 713–721.
 - 22) 道下尚則, 岡部 徹, 酒井直秀, 田中淳一, 二上 夔, 梅津良昭: '熔融塩・液体金属の混合体を利用した TiCl_4 の還元', *日本金属学会誌*, vol. 64, no. 10 (2000) pp. 940–947.
 - 23) 田中淳一, 岡部 徹, 酒井直秀, 藤谷 義, 高橋和秀, 道下尚則, 梅津良昭, 二上 夔: '反応媒体塩を利用した新しいチタンの製造方法', *日本金属学会誌*, vol. 65, no. 8 (2001) pp. 659–667.
 - 24) T. H. Okabe, S. Iwata, M. Imagunbai, Y. Mitsuda, and M. Maeda: 'Production of Niobium Powder by Preform Reduction Process Using Various Fluxes and Alloy Reductant', *ISIJ International*, vol. 44, no. 2 (2004) pp. 285–293.
 - 25) T. H. Okabe, T. Oda, and Y. Mitsuda: 'Titanium Powder Production by Preform Reduction Process (PRP)', *J. Alloys and Compounds*, vol. 364 (2004) pp. 156–163.
 - 26) O. Takeda and T. H. Okabe: 'Fundamental Study on Magnesiothermic Reduction of Titanium Dichloride', *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 37B (2006) pp. 823–830.
 - 27) O. Takeda and T. H. Okabe: 'High-Speed Titanium Production by Magnesiothermic Reduction of Titanium Trichloride', *Materials Trans. (JIM)*, vol. 47, no. 4 (2006) pp. 1145–1154.
 - 28) O. Takeda and T. H. Okabe: 'Fundamental Study on Synthesis and Enrichment of Titanium Subchloride', *J. Alloys and Compounds*, vol. 457 (2008) pp. 376–383.
 - 29) T. Uda, T. H. Okabe, Y. Waseda, and Y. Awakura: 'Electroplating of Titanium on Iron by Galvanic Contact Deposition in NaCl-TiCl_2 Molten Salt', *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 7, no. 6 (2006) pp. 490–495.
 - 30) H. Zheng, H. Ito, and T. H. Okabe: 'Production of Titanium Powder by Calciothermic Reduction of Titanium Concentrations of Ore Using the Preform Reduction Process', *Materials Trans. (JIM)*, vol. 48, no. 8 (2007) pp. 2244–2251.
 - 31) J. Kang and T. H. Okabe: 'Upgrading Titanium Ore through Selective Chlorination using Calcium Chloride', *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 44B, no. 3, (2013) pp. 516–527.
 - 32) J. Kang and T. H. Okabe: 'Removal of Iron from Titanium Ore through Selective Chlorination Using Magnesium Chloride', *Materials Trans. (JIM)*, vol. 54, no. 8 (2013) pp. 1444–1453.
 - 33) J. Kang and T. H. Okabe: 'Production of Titanium Dioxide Directly from Titanium Ore Through Selective Chlorination Using Titanium Tetrachloride', *Materials Trans. (JIM)*, vol. 55, no. 3 (2014) pp. 591–598.
 - 34) J. Kang and T. H. Okabe: 'Thermodynamic Consideration of the Removal of Iron from Titanium Ore by Selective Chlorination', *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 45B, no. 4 (2014) pp. 1260–1271.
 - 35) 岡部 徹, 姜 正信: '高温における酸化物の塩化反応に関する熱力学的考察', *熔融塩および高温化学*, vol. 56, no. 1 (2013) pp. 15–26.
 - 36) J. Kang and T. H. Okabe: 'Development of a Novel Titania Slag Upgrading Process Using Titanium Tetrachloride', *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 47B, no. 1 (2016) pp. 320–329.
 - 37) H. Zheng and T. H. Okabe: 'Recovery of Titanium Metal Scrap by Utilizing Chloride Wastes', *J. Alloys and Compounds*, vol. 461 (2008) pp. 459–466.
 - 38) Yu-ki Taninouchi, Yuki Hamanaka, and T. H. Okabe: 'Reaction-mediator-based chlorination for the recycling of titanium metal scrap utilizing chloride waste', *Materials Trans. (JIM)*, vol. 56, no. 1, (2015) pp. 1–9.
 - 39) Yu-ki Taninouchi, Yuki Hamanaka, and Toru H. Okabe: 'Chlorination-Volatilization Behavior of Titanium Metal Scraps during Recycling Using Reaction-Mediating Molten Salt', *Materials Trans. (JIM)*, vol. 57, no. 8, (2016) pp. 1309–1318.
 - 40) Toru. H. Okabe and Yu-ki Taninouchi: 'Recycling Titanium and Its Alloys by Utilizing Molten Salt', *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of The 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16)* [Seattle, USA, May 22–25, 2015], Edited by: Ramana G. Reddy, Pinakin Chaubal, P. Chris Pistorius, and Uday Pal, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), (2016) pp. 751–760.
 - 41) 岡部 徹: 'レアメタルの環境・リサイクル技術の課題と展望', *まてりあ80周年特集, 日本金属学会誌*, vol. 56, no. 3 (2017) pp. 157–160.