

夢とロマンのチタン研究 ～20年間の苦労を振り返って～

2009年度 社団法人日本チタン協会・技術賞受賞講演から

岡 部 徹*

OKABE, Toru H.* My Dreams and Joys during 20 Years of Research on Titanium



On the occasion of receiving an honorary technical award from the Japan Titanium Society, I have organized and summarized all the research I had carried out on titanium for the last twenty years. (Fig. 1, 2) It would not be an exaggeration to say that I have devoted my life to this research. I began my research in this field in 1987, when I was a senior student at Kyoto University. First, I was assigned research theme on titanium smelting by Professor Katsutoshi Ono as a work for my graduation thesis. During the course of my research, I experienced many hardships and failures. However, there were also occasions on which I experienced a sense of novelty and joy, when an experimental work went well or when I discovered new things during the research. Owing to these unforgettable experiences, I have always wanted to establish a new titanium production process. I followed this dream even after I had moved to different research institutes. My continuing research on the titanium production involves considerable difficulties. However, the experience I have gained through my research work is far greater than the hardships I have had to endure.

1. はじめに

日本チタン協会から2009年度技術賞をいただく荣誉に恵まれ、私がこれまで行ってきたチタン研究を総括するべく纏めてみた (Fig. 1, 2)。補遺：研究の概要および論文リストは、下記の URL を参照、
http://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/from_okabe/09titanium/appendix.pdf。

私の研究者としての人生は、まさにチタンの研究人生であるといっても過言ではない。1987年秋、京都大学の四年生のときに卒業研究のテーマとして、小野勝敏教授（現、名誉教授）からチタンの製錬に関する研究テーマを与えられてから、早20年以上、延々とチタンの研究を続けてきた。

変化や浮き沈みが大きく、競争が激しい研究の世界で、長年、一貫して好きな研究を続けることができたことは、研究者として実に恵まれた境遇であったといえよう。しかし、実際のところは、苦難の連続であり幾度と

なくチタン研究を止めようかと思ったことがある。

チタンの研究は夢とロマンに満ち溢れているが、周囲が思うほど楽な研究ではない。チタンの研究、特にチタンの還元プロセスの開発に関する研究は難易度が高く、大学の研究室で行うには障害が多いため、数々の挫折を味わい、様々な困難に直面した。

私がこれまで行ってきたチタンの製錬プロセスに関する研究は、研究に必要な最低限の研究インフラを整備するだけでも多大な手間とコストがかかり、実際に実験を行っても、ほとんどの場合、上手く行かない。また、実験は危険を伴い、費やす時間や努力の割には研究成果が上がらない。

即効性の高い見かけ上の研究成果が求められる昨今、チタンのプロセス技術に関する研究を行うのは無謀といわざるを得ない。その分、チタンの研究は深みがあり、面白いので、一度とりつかれると止められないのかもしれない。

2. 学生時代のチタン研究

学部時代は、見方によってはスラム社会の縮図のような、家賃が月300円という大学の自治寮に4年間在籍していた。そこでは、兄弟以上に仲良しになった寮生とともに、日々、交遊やアルバイト、海外旅行などに明け暮

* 東京大学 教授
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
東京大学生産技術研究所 Fw301号室
Professor, the University of Tokyo, Institute of Industrial Science, Room Fw301, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

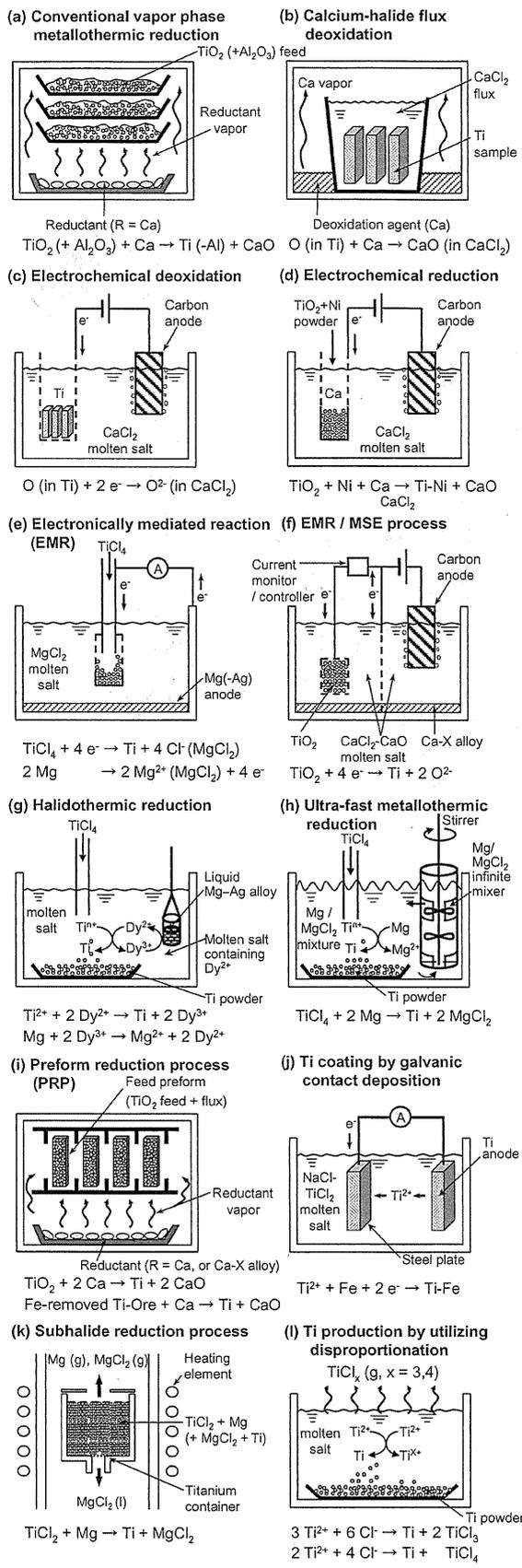


Fig. 1 Schematic illustration of various titanium production processes studied by Prof. Okabe from 1988 to 2009.

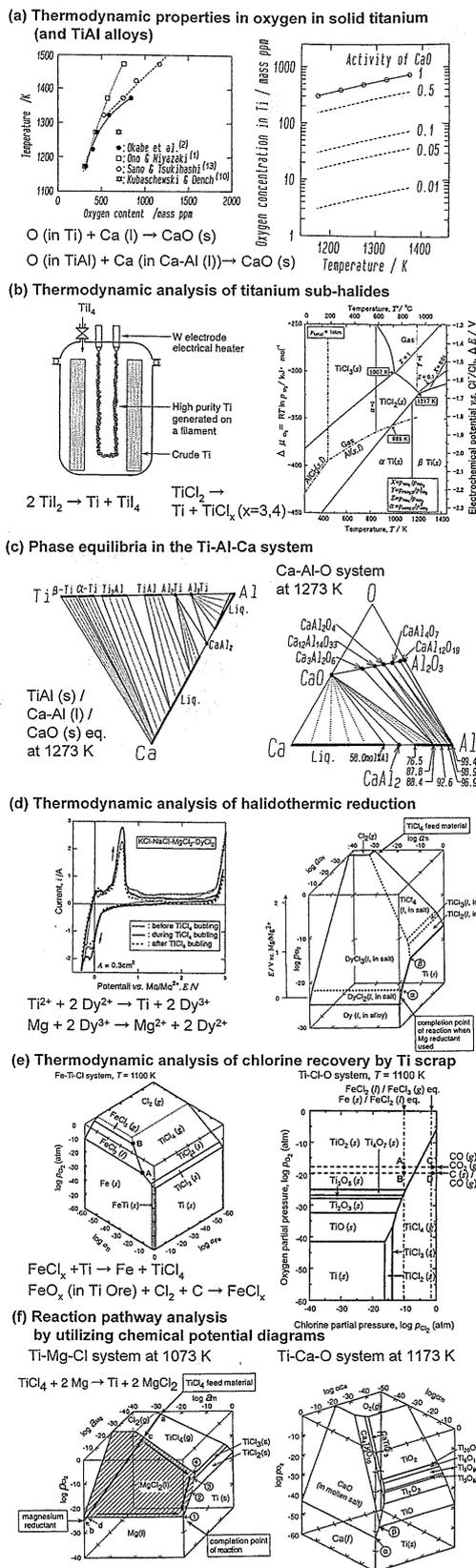


Fig. 2 Schematic illustration of fundamental research on titanium carried out by Prof. Okabe from 1988 to 2009.

れていた。したがって、大学には行かず、入学式やガイダンスはおろか、まともに講義に出た記憶はほとんどない。このため、京大の学部の4回生（最終学年）のときでも、必修の語学を含め卒業に必要な単位がほとんどなかった。本人だけでなく、多くの友人が私は卒業できずに留年するものだと信じていた。今でも「卒業は？」と訊かれると、京大工学部とはいわずに「熊野寮です」と答える場合がある。

留年を覚悟していたため、私は卒業研究のために配属される研究室について、自ら希望を出せる立場ではなかった。このため、研究室配属のガイダンスにも出ず、親しい友人に研究室の配属先を一任していた。この結果、私は自分の意思とは全く無関係に、当時は人気がなかった非鉄冶金学研究室に他人任せの判断で配属されることになった。

最終学年になっても必修の語学の単位の取得に忙しかったため、専門分野の講義には殆ど出ることができなかった。このため、研究室を主宰している小野教授をはじめ、大石敏雄助教授（現：関西大学教授）、鈴木亮輔助手（現：北海道大学教授）との面識もなく、小野研がどのような研究をしているかも知らないまま最終学年の学生として研究室に配属された。

配属された学生は、一つの研究テーマを選ぶことになるのだが、私はあえて二番あるいは三番人気のチタンの研究を希望した。当時は、液体窒素温度（77 K）で超伝導状態が発現する高温超伝導酸化物に関する研究が最もホットなトピックスであり、この人気の研究テーマの人气が高かった。しかし、私はこのテーマを希望せず、チタンの製錬の研究を希望した。チタンの研究テーマを選んだ理由は、その内容からではなく、当時、小野研でチタンの研究を行っていた大学院生の小川正人先輩の人柄によるところが大きい。当時の私にとっては、取るに足らない些細な決断であったが、今から思えば、私の将来に大きな変化を及ぼしたのは間違いのない事実である。

卒業研究は、チタンやアルミニウムの酸化物を金属カルシウムの蒸気で還元してチタンやTi-Al合金を製造する研究を行った（Fig. 1(a)）。実験が上手く行かず、小川先輩とともに、幾晩も徹夜をしながら実験に明け暮れた日々が今も懐かしい。当時は、チタンの酸化物から直接、低酸素濃度のチタンを作る技術は開発されておらず、クロール法と同等の酸素レベルの純チタンを直接製造するのは極めて困難であると考えられていた。

小野教授から「酸化物から出発して、酸素濃度が1,000 ppm以下のチタンを作ったら“どこにでも”連れて行ってやる」といわれていたため、日々、張り切って試行錯誤を繰り返し、様々な還元実験を行った。このときの「どこにでも」というのは、「どこの国の国際会議にでも」と真面目な学生は受け取るのであるが、先輩と私は「どんなにかがわしいところにでも」連れて行って

くれるものだと信じ、この魅力的な約束を励みに実験を続けていた。

この頃から研究が面白くなり、酸化チタンを還元したり、金属チタン中の不純物酸素の除去に関する研究に没頭するようになった。

研究室に配属された同級生による絶大な支援により、奇跡的に大学院入試に合格し、また、留年せずに卒業することができた。チタンの製錬に関する研究が面白くなってからは、それまで熱中していたバイクを売り払い、海外への放浪の旅も止め、どうすればチタン中の不純物の酸素を効率良く除去できるのだろうか、日々考えるようになった。同時に、自らのアイデアを検証するべく、様々な装置を自作して実験を行うようになった。

大学院修士課程（マスターコース）に進学してからは、努力や工夫だけではチタン中の酸素濃度を低減できないことに気が付き、熱力学を中心に様々な勉強をするようになった。幸い、研究室の同室の指導教員が熱力学に詳しい大石助教授であったため、チタン中の酸素の熱力学的性質をはじめ、材料化学について広範囲に学ぶことができた。大石先生のところには、学科内の教員や製錬の企業関係者がしばしば研究討議に訪れて来たため、研究室外の先生方や研究者とディスカッションする機会に恵まれ、実に多くのことを教わった。

今から思えば、大学院生のときに、多くの教員や外部の研究者から、必ずしも自らの研究とは関係がない広い分野の研究について学ぶ機会を得たことは、研究者としての大きな糧となっているように思える。

3. チタン中の酸素の除去に関する研究

チタン中の酸素について様々な勉強を進めるうちに、金属カルシウム（Ca）を還元剤・脱酸剤として用い、かつ、反応生成物の酸化カルシウム（CaO）の活量を1/20に低下させれば、原理的には、（10 ppmレベルの）十分に低い酸素濃度のチタンが得られることがわかった（Fig. 2(a)）。

そこで、幾多の実験を重ね、様々な工夫を試みた結果、CaOを吸収するフラックスとして塩化カルシウム（CaCl₂）を用いれば、CaOの活量を低下させることができ、チタン中の酸素を効率良く除去できることがわかった。

こうして小野研で開発された、カルシウム-ハライドフラックス脱酸法（Fig. 1(b)）は、当時、最も低い酸素濃度のチタンを製造できる技術となった。この新しい手法により50 ppmを下回る酸素レベルのチタンを確実に製造できることがわかったが、多量のチタンを一度に処理する場合、反応生成物のCaOがCaCl₂中で濃化して脱酸効果が低下するという問題点があった。そこで、新たに電気化学的手法を応用することにより、反応系内で濃化するCaOを除去する手法を考案し、カルシウム-

ハライドフラックス脱酸法の問題点を克服し、チタン中の酸素の除去技術をさらに発展させた (Fig. 1(e)).

新たに開発した電気化学的な手法を用いてチタン中の酸素を除去する手法は、当時としては画期的な手法であり、通常分析技術では検出できないレベル (<10 ppm) までチタン中の酸素を除去できるようになった。こうして、それまでになかった新しいタイプのチタンの高純度化技術が確立できたわけであるが、この研究の背後には実に多くの苦労があった。一例を挙げると、電気化学的な脱酸手法を思いついたものの、当時の小野研には、熔融塩を電解する技術やノウハウがなく、自力でその手法を学んで開発しなければならなかった。幸い当時の京大には、伊藤靖彦教授 (熔融塩電気化学) や栗倉泰弘助教授 (水溶液電気化学) がおられ、諸先生方とその研究室のメンバーから電解に関する知識やノウハウを教えていただいた。

当時、クロール法で製造されるチタン中の不純物酸素のレベルは、200~500 ppm であり、溶解などの還元後のプロセスを通じて酸素濃度は低下することなく、増加するのみであった。ヨード法や熔融塩電解精製法などの特殊な製錬法を用いて高純度化したチタンでさえも 50~200 ppm レベルの不純物酸素を含んでいたため、一般には、50 ppm を下回る酸素レベルのチタンの製造は、技術的に不可能であると考えられていた。

このため、自らが考案し、種々の工夫を重ねて開発した電気化学的な手法により、従来の分析法の分析下限 (<10 ppm) の酸素レベルのチタンを、再現性良く製造できるようになったときの喜びと達成感は今も忘れられない。

卒業研究のときは、どうしても1,000 ppm の壁を突破できず、日々悩んで苦労していたが、熱力学や電気化学をしっかりと勉強し、新しい技術を導入して、努力をもって技を磨くことにより、10 ppm を下回る酸素レベルのチタンが製造できた時の感動と経験は、今の私の研究者としての礎となっている。チタンの製錬に関する研究は、殆どの場合、上手くいかないことが多いが、私の場合、若くしてチタン研究の醍醐味を経験する機会に恵まれたことは、幸運といえよう。

当時、オーディオなどのケーブルに使われていた高純度の“無酸素”銅の真似をして、私は「無酸素チタンつくりました」とチタンの製造メーカーの研究者に自慢した。すると、幾人かの研究者には、私が出した結果の信憑性について理解してもらえず、逆に「自分の研究成果を自慢する前に、しっかり自分の分析・評価技術を確かめるように」と諭された。当時は、金属チタンから直接酸素を除去するのは不可能と考えられていたため、50 ppm 以下のレベルのチタンの製造技術について、学生の私が語っても信じてもらえなかった。そこで、そのチタン関係者には、通常の1,000 ppm レベルのチタン試料

を提供してもらい、そのチタンを私が自ら10 ppm レベルまで脱酸して送り返して分析してもらうことにした。私が酸素を除去して送り返したチタンについては、酸素濃度が低すぎてチタンの製造メーカーのプロでも分析が上手くできず、「これは本当にチタンですか?」と問い合わせがきたときのことは、今も嬉しい記憶として覚えている。

博士課程 (ドクターコース) に進学してからは、チタン研究ではなく、電子ビーム溶解法を用いたニオブやタンタルの製錬に関する研究に大半の時間と労力を費やした。自らがチタンの研究を行う割合は下がったが、出浦哲史君をはじめ、研究室の何人かの後輩とともにチタン合金や他の活性金属の還元や脱酸に関する研究を続けた (Fig. 1(d)).

修士から博士課程に進学する時期は、主として電子ビーム溶解装置を設置して立ち上げる仕事に関わった。この研究も、見かけ上の研究成果は上がらなかったが、一連の仕事を通じて、溶接、旋盤、フライスなどの基本的な加工技術だけでなく、真空技術や各種電子制御技術を習得できた。結局、電子ビーム溶解に関しては、多大な時間と労力を費やしたものの学術論文は一報も書けなかったが、今から思えば、貴重な経験であった。

4. チタン研究の中断

博士課程に進学後は、研究時間の大半をニオブやタンタルの製錬に関する研究に時間を費やした。しかし、最終的には、博士の学位はチタンおよび Ti-Al 合金の製錬に関する研究で取得した。

学位取得後は、京大に助手として残るといった話もあったが、自らの腕を海外で試してみたいという気持ちから、米国にポスドク (博士研究員) として留学することにした。京大でもこんなに面白い研究が沢山できるのだから、海外ではもっと面白いことがあるかも知れないと思ったからである。また、チタンなどのレアメタルの研究は、その意義すら当時の日本では評価されないことが多かったため、長期的には、この分野では研究者として食べていけないとの判断もあった。

いまでこそ、チタンやレアメタル、ポスドクという言葉が広く一般でも受け入れられ、市民権を得た言葉となっている。しかし、20年前は、米国に行って「ポスドクとしてレアメタルの研究をします」といっても、殆どの人がその言葉の意味すら理解できなかったのが実情である。一般からみれば、わけの分からないマニアックな研究に没頭している私であったが、あえて日本での安定な職と立場を得ずに、リスクを省みず異国の地での不安定なポスドクとしての研究職に就く決断をしたわけである。客観的にみて、大学の教員という日本で安定な職を得ずに、米国に渡るという決断は、今でも、無謀かつリスクが高いアクションとしか思えない。何の文句もい

わず全面的に信頼して結婚してついてきてくれた家内には今も感謝している。

ボストンに渡ってマサチューセッツ工科大学 (MIT) の Sadoway 教授の研究室のポスドクとして赴任してからは、米国の企業と共同でタンタルの製錬に関する研究を行った。偶然とはいえ、博士課程のときにタンタルについてかなり勉強をし、また関係企業の研究者と人脈を作っていたことは大いに役に立った。米国では、企業の生産現場に赴き、実際のタンタルの還元プロセスの反応解析を行っているうちに、金属熱還元反応における導電体を介した反応 (Electronically Mediated Reaction: EMR) の重要性を見出した。これは帰国後の研究の方向性に大きな転機をもたらした (Fig. 1(e), (f))。

米国での留学生活で、新たな実験技術や研究手法を学べると期待していたが、意外にも、実際には教わるどころか、逆に私自身が研究現場で教えることの方が遥かに多かったように思える。例外としては、企業の現場で、金属ナトリウム (Na) を沸点近くの温度で取り扱う特殊技術を習得したことぐらいであろうか。実験技術については、京大で学んだことが大いに役に立った。旋盤や溶接機を自ら操り、目的の反応装置を自作し、また、電気炉などもパーツから組み上げ、必要に応じて自力で修理や改造を行う私のやり方をみて、MIT の大学院生たちはテクニシャン (技術職員) のような変わったポスドクが極東の地からやってきたと驚いていたようである。

テクニカルなことは、MIT ではあまり学べなかったものの、米国流の多様な考え方や価値観・文化を学んだことは留学の大きな成果であった。留学中はチタンの研究を行うことができなかったが、3年近くの研究生生活を通じて、いろんな意味でのプロの研究者としての必要な要件を学んだ。ポスドクという立場的に不安定な研究職に就いていただけに、自らの腕と実力で生き延びるといふ、プロ意識をしっかりと叩き込まれたような気がする。

5. プロの研究者としてのチタン研究

米国にてポスドクとして研究生生活を楽しんでいたころ、東北大学の早稲田嘉夫教授 (当時所長, 現名誉教授) から希少金属のリサイクルに関する研究センターを新たに立ち上げるので、助手としてこないかと誘われた。当時は、MIT での研究生生活がとても充実していたため、米国でしばらく研究を続けようかとも思っていた。Sadoway 教授に相談したところ、東北大学の早稲田先生のところで正規ポストの研究者として働くなら強く薦めるといわれた。ただし、私の代わりに Sadoway 研で自力で研究を進められる人材を日本に行って探してくるのが条件として、帰国することになった。

東北大学の素材工学研究所 (現: 多元物質科学研究所) では、最初は早稲田研 (金属系)、次に、研究センター (応用化学系)、後半は、梅津研 (資源系) の助手として

3つの研究室を転々とした。また、隣の齋藤研の留学生や学生の研究の指導もするなど、実に多くの仕事をする機会を得て、多くの同僚や友人にも恵まれた。東北大には、5年間しか在籍しなかったが、金属系、応用化学系、資源系の3つの学科の様々な教育コース出身のバックグラウンドの異なる学生の指導を行うことができたことは、今から思えば貴重な経験であった。

東北大学で行ったチタンの研究は、前述の EMR を発展させた研究 (Fig. 1(e)) に加え、還元力のある熔融塩を利用してチタンを還元するハライド熱還元法 (Fig. 1(g)) の研究など様々な研究を行った。

実験装置の立ち上げだけでなく、基本的な研究インフラの整備に苦勞しただけに、東北大での仕事は思い出深いものが多い。EMR という反応に着目することにより、金属還元剤 (Mg) と原料 (TiCl_4) が物理的に接触しなくても、条件によっては電気化学的な反応により還元反応が進行すること示し、この反応をうまく利用すれば金属熱還元法においても析出形態や不純物濃度を制御できることを実証したときの喜びも私の記憶の中で輝いている。また、還元力を有する熔融塩 (サブハライド塩) を利用して粉末チタンを製造するハライド熱還元法は、当時、博士課程の学生であった宇田哲也君 (現、京大准教授) とともに、新たに考案して実証したものである。最近では、東北大時代のように斬新なアイデアがドンドン出てこなくなっているのが辛いところである。これらの新しいタイプの研究を推進するためには、新たに解決しなくてはならない技術課題が生まれ、様々な困難を伴い苦勞も多かったが、今から思えば得たものの方が遥かに大きい。

東北大での5年間は、思いのままにチタン研究に没頭できた貴重な期間であった。液体金属と熔融塩を微細混合して合成した反応媒体中に四塩化チタンを直接投入する超高速還元法の確立を目指した研究も思い出深い。高温下で1,000 rpm もの高速で回転する特殊な混合器を自ら設計して自作し、800°Cの MgCl_2 熔融塩と Mg 液体金属を強攪拌して微細混合し、反応性が高い活性金属/熔融塩微細混合体を製造する手法を開発した。この活性な反応媒体に、直接、液体窒素で冷やした固体の TiCl_4 原料を打ち込むという、極めて危険な研究も行った (Fig. 1(h))。この研究は、チタンを超高速で還元し、連続的にチタン粉末を製造する新たな試みであるが、この危険極まりないチタン研究のワクワク感は今も忘れられない。「岡部君、君の実験の腕は確かなので、君の判断でどんなことやっても OK だけど、できれば四塩化チタンの排気口は、あの松の木には向けないようにしてくれ。大学のシンボルの松の木が枯れると、色々いわれるから……」と、無謀かつ危険な研究に対して文句をいわず、むしろ励ましてサポートしてくださった梅津教授には感謝の念を禁じ得ない。

東北大に赴任したときは、まともな実験室が得られず幾度となく引越しをし、何度も壁のペンキ塗りや電源工事を行ったことは懐かしい思い出である。私が赴任した当初は、大学院生の宇田哲也君と揃いの作業着を着て、連日、ペンキ塗りや配管・配電の仕事ばかりしていたので、研究所の人からは、設備関係の出入り業者とされていたようである。

東大では、研究インフラが整備された研究室で仕事をしているが、いまひとつワイルド感やハングリー精神がなくて物足りない。東北大のときは、古い建物の研究室に大きな不満があったが、今となっては、気軽に窓や壁を打ち抜いて、あらゆる実験配管を敷設できる自由な実験環境が懐かしい。

6. 研究指導者・教育者としてのチタン研究

2001年に東京大学の生産技術研究所（以下、生研）に助教授として赴任した。35歳のときから独立した研究室を主宰して運営するという立場に恵まれた。生研では、何でも自分の裁量でできるという研究環境が整っているのはとてもありがたかった。しかし、研究室の運営から資金繰り、はては学生のトラブル処理まで、すべて一人で行わなければならないという状況には、驚くと同時に、最初は途方に暮れることも多かった。

通常、チタンなどのレアメタルの研究については、若手研究者にとって研究資金の調達は極めて困難である。しかし、幸いにしてこの頃、若手研究者に対して手厚い研究助成プログラムが整備され始めたため、研究費は比較的容易に獲得することができ、研究室の立ち上げは順調に進んだ。ニオブの製錬に関する大型プロジェクトも採択されたため、チタンの研究も同時に推進できるように研究インフラの整備を進めた。

東大では、プリフォーム還元法（Preform Reduction Process: PRP）によるチタン酸化物のカルシウム熱還元法（Fig. 1(i)）、 CaCl_2 熔融塩中で TiO_2 を電気化学的手法を用いて還元する方法（Fig. 1(f)）、チタンの低級塩化物を金属マグネシウムで還元する方法（Fig. 1(k)）など、研究の幅を広げて多角的な研究を展開した。今は、チタンの低級塩化物を扱う研究をさらに発展させ、不均化反応を利用してチタンを製造する研究を進めている（Fig. 1(l)）。

チタンのプロセス研究は、難易度が高く、困難を伴うが、その分、チタン研究に携わった学生は大きく成長する場合も多い。チタン鉱石から直接金属チタン粉末を製造する研究は、博士の学位のテーマとした。この研究では、チタン鉱石を用いてプリフォーム（原料成形体）を製造し、これを高温で熱処理して選択塩化法により不純物の鉄を除去する。続いて、脱鉄後に得られたチタン酸化物を含むプリフォームをカルシウム蒸気で還元して、チタン酸化物から直接、金属チタン粉末を製造するもの

である。この研究を行った、Zheng Haiyan 女史は、学位取得後、今は中国の東北大の准教授として研究及び教育を続けている。

また、チタンの低級塩化物を金属マグネシウムで還元する研究（Fig. 1(k)）を行った竹田修君は、学位取得後、東北大学の助教として赴任し、今もレアメタル製錬の研究を続けている。この研究は難易度が高いだけでなく、研究成果を学術論文として纏めにくいという問題があった。竹田君が学位を取得する際、研究論文の本数の少なさが一部の審査の先生から問題視された。しかし、後に彼の研究は、複数の論文賞の対象となるなどして高く評価されたことは実に喜ばしいことである。

最近では、大学院生の大井泰史君が、岡部研の博士課程の学生として、熔融塩中の不均化反応を利用してチタンを製造する研究を進めている。この研究は、将来、増大するであろうチタンスクラップの再利用技術や、チタンのコーティング（皮膜形成）技術にも応用できるため、研究の進展を期待している。

チタン研究を一緒に行った学生が、大学などにおける研究者として、あるいは企業において活躍するのは実に喜ばしいことである。チタンだけでなく、レアメタルの製錬プロセスの研究を行う大学の研究者は、絶滅危惧種といわれて久しい。しかし、チタン研究の夢とロマンに魅せられ、チタンの製錬プロセスに革新的な変化をもたらすような研究を長期的に続けて欲しいものである。

7. おわりに

チタンは、今は10万トンレベルのレアメタル産業であるが、将来的には、100万～1000万トンの需要が発生しても何ら不思議のない金属である。資源的には無尽蔵であり、また、金属材料の中では最高水準の強度・耐食性を有するチタンは、製造プロセスのイノベーションにより、レアメタルからコモンメタルに変わる未来材料の一つである。

結果的に、未だに、私自身は成功の糸口すら掴めていないが、私自身が還元プロセスの技術革新を目指して、チタンの研究に取り組んで来たのは、チタンの類稀なるポテンシャルの高さに魅せられたからである。

時が経つのは早いもので、私がチタン研究に没頭してから、すでに20年以上が経過した。2001年に東大・生研に赴任し、ゼロスタートで新しい研究室を立ち上げ、今ではようやく種々の還元プロセスの要素技術の開発研究が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てしまった。

定年まではあと20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、私自身、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、チタン研究を通じて、私がか

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いきたいものである。

チタン研究や関連の教育、さらには、チタンの重要性や将来性を一般社会に伝えることは、私のライフワークとなるのであろう。同時に、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私の責務の一つであると思っている。

チタンの研究を通じて、実に多くの人と知り合うことができ、貴重なことをたくさん学んだ。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、チタンの研究を続けることができた。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チタン研究を続けていくことができたことに対し、あらためて感謝している次第である。

高純度チタン標準試料販売

Standard of Titanium Certificate of Analyses

TAS-115 (Commercial Pure)

1. 表示値及び不確かさ (Certified Value and Uncertainties)

[mass%]

種類	材質		0
TAS-115	Ti	表示値 Certified Value	0.034
		不確かさ (δ , 95%) Uncertainties	0.002

2. 定 価

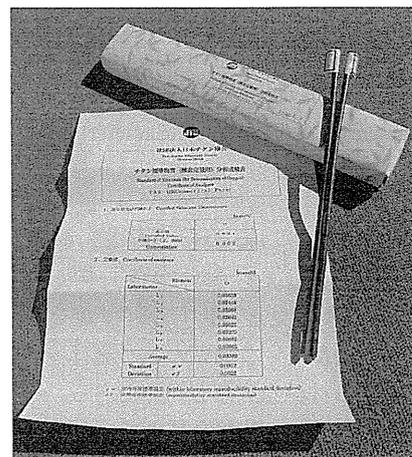
税込み21,000円 (本体20,000円) 送料別 *会員価格あり

3. 購入申込み先

社団法人日本チタン協会

〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 2-9 大新ビル 7F

Tel 03-3295-5958 Fax 03-3293-6187



チタン中の酸素定量用標準試料発売

Standard of Titanium (For Determination of Oxygen)

(注)日本チタン協会では、首題の標準試料を調整し発売。

種 類	材 質	酸素含有率(%)	定 価(円)	備 考
TAS-101	Ti	0.065	42,000(本体40,000)	送料別
TAS-102	Ti	0.210	31,500(// 30,000)	//
TAS-103	Ti	0.358	31,500(// 30,000)	//
TAS-201	Ti-6Al-4V	0.147	31,500(// 30,000)	//

4点セット定価126,000円 (本体120,000円) 送料別

購入申込み先

1) (株)日本チタン協会

(住所) 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町2-9 (大新ビル)

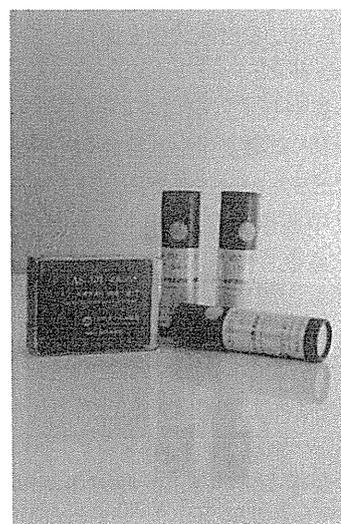
(電話) 03-3295-5958

(FAX) 03-3293-6187

2) (株)科学技術社

(住所) 〒113-0034 東京都文京区湯島1-5-31 (第一金森ビル)

(電話) 03-3815-8163



社団法人日本チタン協会
第26回表彰受賞者紹介

平成21年11月9日(月) 於：学士会館 それぞれの功績を称え感謝状と記念品が授与された。

The Winners of the 26th JTS Award



◎最上段左より

- ・(社)大同特殊鋼(株)
中坪修一 副会長
- ・(株)メタルワン
(社)日本チタン協会
四戸良治 副会長
- ・(社)日本チタン協会
専務理事
筒井政博

◎上段左より

- ・(株)新日本製鐵(株)
木下和宏 殿
- ・(株)大阪チタニウム
テクノロジーズ
梶井義文 殿
- ・(株)東邦チタニウム(株)
齋木俊彦 殿
- ・(株)大阪大学
小溝裕一 殿
- ・(株)大同特殊鋼(株)
倉橋基文 殿
- ・(株)住友金属直江津
金勝 勇 殿
- ・(株)大同特殊鋼(株)
楠美 保 殿
- ・(株)鈴木金属工業(株)
杉浦 登 殿

◎中段左より

- ・(株)甘利和枝 殿
- ・(株)久保裕子 殿
- ・(株)木下久美 殿
- ・(株)森川和子 殿
- ・(株)赤崎節子 殿
- ・(株)岡本泰枝 殿
- ・(株)岡部博美 殿

◎下段左より

- ・(株)甘利圭右 殿
- ・(株)東邦チタニウム(株)
久保真澄 殿
- ・(株)神戸製鋼所
木下敬之 殿
- ・(住友金属工業(株))
(社)日本チタン協会
戸崎泰之 会長
- ・(株)川重明石エンジニアリング(株)
森川美廣 殿
- ・(株)日鉄防蝕(株)
赤崎宏雄 殿
- ・(株)神戸製鋼所
岡本明夫 殿
- ・(株)東京大学
岡部 徹 殿

1) 功労賞, 2) 開発功労賞, 3) 技術賞, 4) 協会事業功労賞, 5) 永年技術功労賞, 6) 賛助会員功労賞

チタン TITANIUM JAPAN

January 2010

Vol.58 No.1

目 次

新年のご挨拶	戸崎 泰之	1
(社)日本チタン協会 平成21年度(第26回)表彰受賞者紹介		2
(社)日本チタン協会 平成21年度(第26回)表彰受賞者記念講演		
夢とロマンのチタン研究~20年間の苦勞を振り返って~	岡部 徹	3
組織変化のその場観察	小溝 裕一	10
第25回 ITA 年次大会参加報告		
ITA 年次大会報告(経済的側面)	石橋 伸夫	16
ITA 年次大会報告(技術的側面)	伊藤 喜昌	19
チタンに関する催物紹介		21
ITA TITANIUM 2009展示会報告	林 宏明	22
福祉・医療とチタン	朝倉健太郎	24
チタンめぐりⅡ(京都編)	編集委員会	30
チタンクラッド容器の多段深絞り加工法の開発	原田 泰典	33
純チタン・β型チタン合金・超音速フリージェット PVD	丹羽 直毅	38
機能性チタン合金Ⅱ—集合組織と形状記憶特性—	金 熙榮, 宮崎 修一	44
チタンの利用技術シリーズ		
チタンの規格	小川 厚	52
2009年秋の講演大会報告(日本金属学会・日本鉄鋼協会)	逸見 義男	56
経産省 霞が関子ども見学デー 報告	伊藤 均	59
第4回高校及び大学の教師と学生によるチタン工場見学会	山本 孝美	60
平成21年度賛助会員部会西日本支部総会・講演会・交流会及び見学会報告		
.....	高取 英男	62
第68回東京インターナショナル・ギフト・ショー秋2009におけるチタン製品		
.....	上瀧 洋明	65
北京で開催された2009年 ISO/TC79 会議の報告	萩原 益夫	66
ハワイで開催された2009年 ISO/TC79/SC11 会議の報告	萩原 益夫	69
SURTECH2009 表面技術展への出展報告	吉田 秀基	72
文献抄録		74
平成21年8月~10月中の主なニュース		76
金属チタン統計		78
委員会報告		80
“チタン誌”Vol.57 No.1~4 総合目次		82
編集後記	鈴木 昭弘	84



夢とロマンのチタン研究 ～20年間の苦勞を振り返って～

My Dreams and Joys during 20 years of Research on Titanium

東京大学 生産技術研究所 岡部 徹

Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Toru H. OKABE

岡部 徹 のチタンに関するこれまでの研究の業績 (関連論文のリストは4頁以降に掲載)

研究の概要 (1988～2009)

1. チタン酸化物の金属熱還元

チタンなどの酸化物を金属カルシウムで還元し、直接高純度の金属粉末を製造する実験を行った。また、アルミニウムを含む酸化物原料を直接還元し、目的とする組成の Ti-Al 金属間化合物粉末を酸化物から直接製造する手法を開発した。

(関連論文： 1, 2, 17, J1)

2. チタンなどの活性金属からの酸素の除去

チタンや希土類金属などの活性金属は、磁石や電子材料用素材としてその需要が急速に増大しており、素材の高純度化・再生・汚染防御等の諸技術の確立が今後の重要な課題である。活性金属中の金属成分不純物の除去については種々有効なプロセスが開発・実践されているが、酸素をはじめとするガス成分不純物の除去については、効果的な除去プロセスが確立されていない。このため、一度汚染され酸素濃度が増大した金属素材を直接処理し再生することは不可能とされてきた。このような背景から、活性金属中の主要不純物である酸素や窒素を直接除去する手法について基礎研究を行い、活性金属の高純度化ならびに汚染防御の基盤技術の開発を行った。具体的には、カルシウム-ハライドフラックス脱酸法を独自に開発し、電気化学的手法を用いて高い濃度の酸素を含む活性金属から酸素を直接除去し 10 ppm レベルまで低減できることを実証した。

新プロセスの開発だけでなく極めて低い酸素ポテンシャルにおける金属-酸素固溶体の熱力学的研究も行い、開発した脱酸技術の有効性に対する定量的な評価も行った。また、オキシハライドの生成に着目し、金属中の固溶酸素を直接除去して金属を高純度化する新しい手法の可能性について、さらには、電気化学的手法を用いた窒素の除去についても検討を行った。

(関連論文： 3, 4, 5, 6, J2, P2, P3, P4, P5, P9, B1)

3. チタンなどの活性金属の超高純度化技術の開発

前項の活性金属からの酸素の除去に関する研究と関連しているが、従来にないレベルの高い純度の金属素材の製造を目的とした研究を行った。多くの高純度金属素材では、金属不純物元素は ppm レベルの低濃度に制御され

ているが、酸素をはじめとするガス成分不純物はあまり制御されておらず、特にチタンなどの活性金属については 1000 から数千 ppm の酸素を含んでいる場合が多い。熔融塩電解法により精製した金属不純物濃度が 1 ppm 以下 (純度 6 N) の超高純度チタンを、前項で開発した手法を用いて脱酸し、高純度化した結果、酸素濃度が 10 ppm レベルの試料を製造することができた。一般に、チタンは高純度のもので酸素濃度が高く、残留抵抗比 (RRR) が 100 以下のものがほとんどであるが、カルシウム-ハライドフラックス脱酸法により RRR が 100 以上の世界最高レベルの純度のチタンの製造に成功した。本手法は、希土類金属などチタン以外の活性金属の高純度化にも応用できることも実証した。

(関連論文： 4, 6, P3, P4, P5, P9)

4. 金属熱還元反応の解析と関連プロセス原理の研究

導電体を介した反応 (EMR: Electronically Mediated Reaction) という新しい概念をチタン、タンタルなどのレアメタルの製造に導入し、高効率プロセスの開発とレアメタル素材の高機能化を達成するための基礎的な研究を行った。さらに、金属熱還元反応における電子およびイオンの動きを積極的にコントロールすることによって、反応や析出形態・部位を制御し、レアメタルを効率良く製造する新プロセスを開発した。EMR 制御による素材プロセスは、析出部位・形態の制御ならびにプロセスの連続化を可能とするだけでなく、原料の選択性の拡大にも応用可能であるため、たとえば、アルミスクラップを原料とした環境調和型の純チタン製造プロセスの開発にも応用できることを示した。

金属熱還元反応における還元メカニズムの解析を通じて得た知見をもとに、反応媒体を有効利用したレアメタルの新しい製造プロセスの開発も行った。一例を挙げると、熔融塩・液体金属の微細混合体を利用し、チタンなどのレアメタル粉末を効率良く製造するプロセスを中心に基礎的な研究を行った。(第7項参照) 熔融塩・熔融金属の界面における電子およびイオンの速い動きを積極的に利用して微細な金属粉末を製造する新しいプロセスの開発は、プロセスの連続化を可能とするだけでなく、超高速還元プロセスの開発にも応用できるため、現在の金属熱還元プロセスの生産性を飛躍的に向上させる可能性がある。

(関連論文： 7, J3, J4, J5, P6, P7, P10)

5. 熔融塩中で酸化物を還元してチタンを製造する方法

熔融塩中で電気化学的な手法を用いて酸化チタンを直接還元して金属チタンを製造する基礎実験を行った。具体的には原料の TiO_2 を焼結して電極として成形後、カソード（陰極）として熔融 CaCl_2 中に浸漬し、金属還元剤（Ca）が放出する電子により酸化物原料を還元し金属チタンを直接製造する方法（EMR: Electronically Mediated Reaction）などについて検討を行った。チタンの鉱石は酸化物として産出するため、本プロセスが確立できれば原料の製造工程が簡略化され、プロセスが連続化できる利点があり、チタンの新製錬法として発展する可能性がある。しかし、実際には得られるチタンの純度や熔融塩の分離方法の確立、還元剤 Ca の効率の良い電解製造法の開発等、解決しなくてはならない点が多い。本手法を発展させるためには金属カルシウムを効率良く製造する新技術の開発も重要であるため、熔融塩電解による金属カルシウムの製造に関する研究にも注力した。

（関連論文： 10, P11, P13, P15）

6. サブハライドの還元力を利用するチタンの新製造法

サブハライド（低級ハロゲン化物）の還元力を利用する新しいタイプのチタン粉末の製造法の開発を行った。2価のジスプロシウムのイオン (Dy^{2+}) を溶解している熔融塩中に TiCl_4 原料を投入し、熔融塩中でチタンの塩化物を Dy^{2+} により還元して粉末状のチタンを連続的に製造する新規な手法に関する基礎的な研究を行った。還元反応に伴って生成する3価のジスプロシウムのイオン (Dy^{3+}) は、熔融塩と共存させている金属マグネシウムにより還元して、再び還元力のある2価のジスプロシウムのイオン (Dy^{2+}) に再生できることも立証した。この結果、ジスプロシウムのイオンは消費せずに、総括反応としては、チタン塩化物の金属マグネシウムによる還元反応を反応媒体塩を介して進行させることができること示した。還元力を有する熔融塩を利用するハライド熱還元法は、チタン以外の他の活性金属の粉末の製造にも適していることを見出した。

（関連論文： J6, J7, P8）

7. 熔融塩・熔融金属微細混合体を用いたレアメタル粉末製造

現状のチタンの製造プロセスは多くのエネルギーを消費し、また生産速度が低い。資源的に豊富で、軽量かつ強度があり抜群の耐食性を備えたチタン素材を広く普及させるためには、現行の製造プロセスからの脱却・新製造技術の確立が不可欠であるため、新しいタイプの省エネルギー・高速製造プロセスや高純度化技術の開発を多角的に行った。

一例を挙げると、熔融塩と活性金属の液体を機械的に強攪拌することにより、熔融塩・液体金属微細混合物を合成し、これを反応媒体として用いて金属粉末を製造する新しいプロセスの研究を行った。専用の Well 型攪拌装置を自作して MgCl_2 などの熔融塩と液体マグネシウムを $800^\circ\text{C}-1000\text{ rpm}$ で混合し、この反応媒体中に TiCl_4 を直接投入して粉末状のチタンを製造する実験を行い、チタンの還元プロセスの反応速度を飛躍的に向上する要素技術の確立を行った。また、レアメタルの粉末製造だけではなく、この熔融塩・液体金属微細混合体を有害化合物

の処理等、無害化プロセスへ応用する新しいプロセスについても検討を行った。

（関連論文： J8, J9）

8. 原料成形体の金属熱還元によるチタン粉末の製造

チタンの酸化物の原料を含む成形体（プリフォーム）をあらかじめ作製し、これをカルシウム還元剤の蒸気で還元することにより、均一な粉末を効率良く製造する新しいプロセスについて研究を行った。この手法は、原料成形体と反応容器との接触部位を限定し、還元剤の蒸気を用いる還元手法であるため、反応容器や還元剤からの汚染を効果的に防止できる。また、還元プロセスの（半）連続化・大型化も容易に達成できるので、次世代のレアメタルの粉末製造法として発展する可能性がある。このプリフォーム還元法（PRP: Preform Reduction Process）を用いてチタン粉末の製造を試みた結果、還元時の熱処理条件や原料成形体に加えるフラックスを変化させることにより、均一で高純度の金属チタンの粉末を酸化物から直接製造できることが明らかとなった。さらに、フラックスの種類や量を変化させることにより得られる金属粒子の粒径を制御できることがわかった。さらに、還元剤を含む液体合金を用いて反応系内の還元剤の蒸気圧を制御することにより、得られる金属粉末の純度や粒度を制御する新しい手法の開発を行った。

（関連論文： 8, P12）

9. サブハライド（低級塩化物）の金属熱還元によるチタンの高速還元法の開発

現在のチタンの量産プロセスであるクロール法は、確実に高純度のチタンが得られる点で優れているが、原料として TiCl_4 を利用するため還元プロセスにおける反応熱が非常に大きく、最新鋭の大型設備を用いても生産速度が $1\text{ t/day} \cdot \text{reactor}$ と非常に遅い。さらに、プロセスの連続化が困難で、反応容器から鉄などの汚染の防御も困難である。このような背景から、現行のチタンの製造プロセスが抱える本質的な問題からの脱却を目指し、マグネシウム熱還元法を基盤にチタンの低級塩化物（サブハライド： TiCl_3 , TiCl_2 ）を原料として用いる新しいタイプの高速還元法の開発を行った。高温でも凝縮相であるサブハライドを原料として用いてチタンを製造する反応は、反応密度を大幅に増大できるだけでなく、クロール法に比べて反応生成熱が半分以下と小さいため、還元プロセスの高速化に適している。さらに、反応容器としてチタンを利用できるため、鉄などの汚染を効果的に防御することも可能である。

（関連論文： 11, 13, 15, P16, P21, P23, P25）

10. サブハライドの不均化反応を利用するチタンの新製造法

前項の研究をさらに発展させ、チタンの低級塩化物（サブハライド： TiCl_3 , TiCl_2 ）の不均化反応（熱分解反応）を利用する新しいタイプのチタンの製造法の開発を行った。 MgCl_2 などの反応媒体にチタンのサブハライドを原料として溶解させ、高い反応密度でチタンの不均化反応を進行させて、効率良くチタンを製造する新しい手法の開発を行った。この手法は、反応速度を大幅に増大できるだけでなく、チタンの粉末製造に適している。ま

た、反応条件を選べば、鉄鋼などの基板上にチタンを膜状に生成できるため、新しいタイプのチタンコーティング技術としても応用できる。

今後は、チタンの需要が増大するに伴って、チタンのスクラップの量は増加すると考えられるため、鉄やアルミニウム、銅で汚染されたチタンスクラップから金属チタンを抽出する新技術の開発は重要である。チタンの不均化反応を利用してチタンを精製する本研究手法は、不純物を多く含むチタンスクラップから高純度のチタンを製造する新しいタイプのリサイクル技術にも応用できると考えられる。

(関連論文： P24, P28)

1 1. 塩化物廃棄物の有効利用法の開発

チタン製錬などの塩化製錬プロセスから発生する塩化物廃棄物を有効利用する環境調和型のプロセス開発を行っている。塩化製錬から発生する塩化物廃棄物は、プロセスの塩素ロスの一因となっているが、現状ではこのロスを補償するため、外部から塩素ガスを新たに購入している。また、我が国の環境規制は厳しいため、発生する塩化物廃棄物は多大なコストと手間をかけて処理されている。現状では、不純物濃度が低い高価な原料を購入し、極力塩化物廃棄物の発生量を低減しているが、将来的には不純物濃度が高い原料を用いる必要が生じる可能性がある。このような背景から、塩化物廃棄物中の FeCl_x などの塩化物を塩化剤として有効利用する新規プロセスの開発を行った。一例として、塩化物廃棄物を塩化剤として利用してチタンスクラップを塩化し、有価な塩化物原料 (TiCl_4) を製造すると同時に、廃棄物中の塩素量を低減する新しいプロセスの開発を行った。また、貴金属などのレアメタル化合物の塩化反応への応用も検討した。

(関連論文： 16, P14, P19, P22)

1 2. チタン鉱石からの脱鉄と反応解析

チタン鉱石中の主な不純物は鉄であり、今後、チタン鉱石の品位は低下する傾向にあるため効率の良い脱鉄プロセスの開発は重要である。このため、鉱石から効率良く脱鉄し、高純度の酸化物チタン原料を製造する各種プロセスの開発を行った。具体的には、高温でチタン鉱石と塩化剤を反応させ脱鉄を行う選択塩化法に関する研究を行った。脱鉄後に得られた酸化チタン原料は、電気化学的な手法やプリフォーム還元法により直接、金属チタンに還元することができる。脱鉄反応により生成する塩化鉄の有効利用法 (前項参照) だけでなく、電気化学的な手法を用いた新しいタイプの選択脱鉄反応についても各種検討を行った。

(関連論文： 14, P17, P20, P26)

1 3. チタン鉱石から直接金属チタンを製造する超高速チタン製造技術の開発

チタン鉱石を原料として利用して成形体 (プリフォーム) をあらかじめ作製し、これを選択塩化法により脱鉄し (前項参照)、続いて、金属カルシウムの蒸気を還元剤として用いて、プリフォーム還元法 (PRP: Preform

Reduction Process) により還元することにより、均一なチタン粉末を効率良く製造する新しいプロセスについて研究を行った。本手法により、チタン鉱石からプリフォーム原料を経由して直接、不純物の鉄の濃度が低いチタン粉末を製造した。

この手法は、原料成形体と反応容器との接触部位を限定し、還元剤の蒸気を用いる還元手法であるため、反応容器や還元剤からの汚染を効果的に防止できる。また、還元プロセスの (半) 連続化・大型化も容易に達成できる。この手法を用いれば、原理的には24時間以内で、チタンの鉱石から直接、金属チタンの粉末の製造が可能となる。

(関連論文： 14, P20, P26)

1 4. 相平衡と多元系化学ポテンシャル図

多元系金属合金や複合酸化物の相平衡関係を平衡実験により決定し、一部の系については、複合酸化物の熱力学的な安定性を起電力法により測定した。一連の実験結果の情報をもとに、様々な種類の多元系化学ポテンシャル図を作成し、相平衡関係と熱力学的な安定性について定量的な評価を行った。

化合物の熱力学的な安定性を評価するうえで、化学ポテンシャル空間を基軸とした相平衡関係の解析は有効である。そこで、化学ポテンシャル図を利用して、金属熱還元反応における反応経路の解析を行った。一例を挙げると Ti-Mg-Cl 系や Ti-Ca-O 系などの3元系等温化学ポテンシャル図を作成し、塩化物の金属マグネシウムによる還元反応や CaO 共存下における TiO_x の還元反応の反応経路の解析を行った。

(関連論文： 10, J4, J7)

1 5. その他

ヨウ化物の不均化反応や、多元系における揮発性の塩化物の熱力学的な解析を行い、蒸発挙動や分解反応について検討し、現行のチタンの製錬法との比較を行った。

また、ヨード法による電子材料用の超高純度チタンを製造するプロセスにおける微量不純物元素の挙動について熱力学的な解析を行った。

熔融塩中の不均化反応を利用してチタンなどのレアメタルの粉末やバルク (塊) を製造する新しい手法についても各種検討を行った。さらに、金属チタンと平衡する熔融塩中の2価のチタンイオンを利用して、チタンのアノード溶解反応により鉄鋼にチタンの皮膜を形成する新しい手法の開発を行った。(関連論文： 12)

高純度チタンを電子ビーム溶解法により製造し、2次イオン質量分析装置 (SIMS) を用いて分析評価を行った。(関連論文： P1)

歯科材料用の Ti-Cr-Cu 系合金の分析評価も行った。(関連論文： 9)

最近、酸化チタンの直接還元技術が素粒子物理・核物理の研究に応用されたため、基礎物理の研究に貢献することが出来た。(関連論文： 17)

公表されている研究業績 (1989~2009)

英文論文リスト (List of English Regular Papers)

1. 'Preparation of TiAl and Ti₃Al powders by Calciothermic Reduction of Oxides', R. O. Suzuki, M. Ikezawa, T. H. Okabe, T. Oishi, and K. Ono: Mater. Trans. JIM, vol.31, no.1 (1990) pp.61-68.
2. 'A Fundamental Study on Preparation of Al₃Ti Powders by Calciothermic Reduction of Oxides', R. O. Suzuki, T. Ueki, M. Ikezawa, T. H. Okabe, T. Oishi, and K. Ono: Mater. Trans. JIM, vol.32, no.3 (1991) pp.272-277.
3. 'Thermodynamic Properties of Dilute Titanium-Oxygen Solid Solution in Beta Phase', T. H. Okabe, R. O. Suzuki, T. Oishi, and K. Ono: Mater. Trans. JIM, vol.32, no.5 (1991) pp.485-488.
4. 'Preparation and Characterization of Extra-Low-Oxygen Titanium', T. H. Okabe, T. Oishi, and K. Ono: J. Alloy. Compd., vol.184 (1992) pp.43-56.
5. 'Deoxidation of Titanium Aluminide by Ca-Al Alloy under Controlled Aluminum Activity', T. H. Okabe, T. Oishi, and K. Ono: Met. Trans. B, vol.23B, October (1992) pp.583-590.
6. 'Electrochemical Deoxidation of Titanium', T. H. Okabe, M. Nakamura, T. Oishi, and K. Ono: Met. Trans. B, vol.24B, June (1993) pp.449-455.
7. 'Contactless Electrochemical Reduction of Titanium (II) Chloride by Aluminum', T. Uda, T. H. Okabe, Y. Waseda, and K. T. Jacob: Metall. Mater. Trans. B, vol.31B, no.4 (2000) pp.713-721.
8. 'Titanium Powder Production by Preform Reduction Process (PRP)', T. H. Okabe, T. Oda, and Y. Mitsuda: J. Alloy. Compd., vol.364 (2004) pp.156-163.
9. 'Evaluation of Ti-Cr-Cu Alloys for Dental Applications', M. Koike, M. Itoh, O. Okuno, K. Kimura, O. Takeda, T. H. Okabe, and T. Okabe: J. Mater. Eng. Perform., vol.14, no.6 (2005) pp.778-783. (P18 の査読修正版)
10. 'Production of Titanium Powder Directly from TiO₂ in CaCl₂ by Electronically Mediated Reaction (EMR)', Il Park, T. Abiko, and T. H. Okabe: J. Phys. Chem. Solids, vol.66, no.2-4 (2005) pp.410-413. (P13 の査読修正版)
11. 'High-Speed Titanium Production by Magnesiothermic Reduction of Titanium Trichloride', O. Takeda and T. H. Okabe: Mater. Trans., vol.47, no.4 (2006) pp.1145-1154. *** 第32回資源素材学会論文賞 ***
12. 'Electroplating of Titanium on Iron by Galvanic Contact Deposition in NaCl-TiCl₂ Molten Salt', T. Uda, T. H. Okabe, Y. Waseda, and Y. Awakura: Sci. Technol. Adv. Mater., vol.7, no.6 (2006) pp.490-495.
13. 'Fundamental Study on Magnesiothermic Reduction of Titanium Dichloride', O. Takeda and T. H. Okabe: Metall. Mater. Trans. B, vol.37B (2006) pp.823-830.
14. 'Production of Titanium Powder by Calciothermic Reduction of Titanium Concentrations of Ore Using the

Preform Reduction Process', Haiyan Zheng, H. Ito, and T. H. Okabe: Mater. Trans., vol.48, no.8 (2007) pp.2244-2241??.

15. 'Fundamental Study on Synthesis and Enrichment of Titanium Subchloride', O. Takeda and T. H. Okabe: J. Alloy. Compd., vol.457 (2008) pp.376-383.
16. 'Recovery of Titanium Metal Scrap by Utilizing Chloride Wastes', Haiyan Zheng and T. H. Okabe: J. Alloy. Compd., vol. 461 (2008) pp. 459-466.
17. 'Gamow-Teller Strength Distributions in 48Sc by the 48Ca(p,n) and 48Ti(n,p) Reactions and Two-Neutrino Double-beta Decay Nuclear Matrix Elements', K. Yako, M. Sasano, K. Miki, H. Sakai, M. Dozono, D. Frekers, M. B. Greenfield, K. Hatanaka, E. Ihara, M. Kato, T. Kawabata, H. Kuboki, Y. Maeda, H. Matsubara, K. Muto, S. Noji, H. Okamura, T. H. Okabe, S. Sakaguchi, Y. Sakemi, Y. Sasamoto, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, K. Suda, Y. Tameshige, A. Tamii, T. Uesaka, T. Wakasa, and H. Zheng: Phys. Rev. Lett., vol.103, no.1 (2009) 012503.

和文論文リスト (List of Japanese Regular Papers)

- J1. '酸化チタンのカルシウム熱還元法による粉末チタンの製造', 小野 勝敏, 岡部 徹, 小川 正人, 鈴木 亮輔: 鉄と鋼, vol.76, no.4 (1990) pp.86-93.
- J2. 'カルシウム-ハライドフラックス脱酸法による極低酸素チタンの製造', 岡部 徹, 鈴木 亮輔, 大石 敏雄, 小野 勝敏: 鉄と鋼, vol.77, no.1 (1991) pp.93-99.
- J3. 'TiCl₄ 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', 宇田 哲也, 岡部 徹, 葛西 栄輝, 早稲田 嘉夫: 日本金属学会誌, vol.61, no.7 (1997) pp.602-609.
- J4. '導電体を介した反応(EMR)を含む TiCl₄ 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', 岡部 徹, 宇田 哲也, 葛西 栄輝, 早稲田 嘉夫: 日本金属学会誌, vol.61, no.7 (1997) pp.610-618.
- J5. '四塩化チタンのマグネシウム熱還元における金属導電体を介した反応(LR-EMR)によるチタンの析出部位の制御', 宇田 哲也, 岡部 徹, 早稲田 嘉夫: 日本金属学会誌, vol.62, no.1 (1998) pp.76-84.
- J6. 'ハライド熱還元法による粉末チタンの製造', 宇田 哲也, 岡部 徹, 早稲田 嘉夫: 日本金属学会誌, vol.62, no.9 (1998) pp.796-802. *** 第47回日本金属学会論文賞 (材料科学部門) (1999年) ***
- J7. '反応媒体塩中のチタン塩化物の還元メカニズム', 岡部 徹, 宇田 哲也, 早稲田 嘉夫: 資源と素材, vol.114, no.8 (1998) pp.573-579. *** 第25回資源素材学会論文賞 (2000年) ***
- J8. '熔融塩・液体金属の混合体を利用した TiCl₄ の還元', 道下 尚則, 岡部 徹, 酒井 直秀, 田中 淳一, 二

上 菱、梅津 良昭: 日本金属学会誌, vol.64, no.10 (2000) pp.940-947.

- J9. '反応媒体塩を利用した新しいチタンの製造方法', 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 菱: 日本金属学会誌, vol.65, no.8 (2001) pp.659-667.

国際会議予稿論文リスト

(List of Conference Proceedings)

- P1. 'Electron Beam Melting of Titanium and Quality Evaluation by Secondary Ion Mass Spectrometry', K. Ono, T. H. Okabe, N. Maeda, and Y. Ueda: Proceedings of the Conference on Electron Beam Melting and Refining, Reno, Nov. (1989) pp.123-133.
- P2. 'Preparation of Extra Low Oxygen Titanium by the Calcium-Halide Flux Deoxidation Process', T. H. Okabe, R. O. Suzuki, T. Oishi, and K. Ono: Proceedings of the International Conference on Titanium Products and Applications (Titanium Development Association), Florida, Oct. 1-5 (1990) pp.822-829.
- P3. 'Electrochemical Deoxidation of Titanium', M. Nakamura, T. H. Okabe, T. Oishi, and K. Ono: Molten Salt Chemistry and Technology 1993, ed. by M. L. Saboungi and H. Kojima (Proceedings of the International Symposium on May Hawaii, The Electrochemical Society Inc.) (1993) pp.529-540.
- P4. 'Deoxidation of TiAl Intermetallic Compounds', T. H. Okabe, K. Fujiwara, T. Oishi, and K. Ono: Titanium Science and Technology, ed. by F. H. Froes and I. Caplan, The Minerals, Metals & Materials Society (Proceedings of the 7th World Conference on Titanium, San Diego, June 28 - July 2, 1992) (1993) pp.1211-1218.
*** 第7回世界チタン会議(TMS主催)学生ポスター賞 (1992) ***
- P5. 'Preparation and Characterization of Extra-Low-Oxygen-Titanium', T. H. Okabe, M. Nakamura, T. Ueki, T. Oishi, and K. Ono: Titanium Science and Technology edited by F. H. Froes and I. Caplan, The Minerals, Metals & Materials Society (Proceedings of the 7th World Conference on Titanium, San Diego, June 28 - July 2, 1992) (1993) pp.2273-2280.
- P6. 'Reaction Pathways during Metallurgical Reduction of $TiCl_4$ by Utilizing Chemical Potential Diagrams', T. H. Okabe, T. Uda, E. Kasai, and Y. Waseda: Proceedings of Titanium Extraction and Processing, ed. by B. Mishra and G. J. Kipouros, The Minerals, Metals & Materials Society, U.S.A. (1997) pp.133-151.
- P7. 'Mechanism of Magnesiothermic Reduction of $TiCl_4$ by an Electronically Mediated Reaction (EMR)', T. H. Okabe, T. Uda, E. Kasai, and Y. Waseda: Proceedings of Titanium Extraction and Processing, ed. By B. Mishra and G. J. Kipouros, The Minerals, Metals & Materials Society, U.S.A. (1997) pp.243-258.
- P8. 'Titanium Powder Production by Reactive Molten Salt as a Reductant', T. Uda, T. H. Okabe, and Y. Waseda: 2nd Intl. Conf. on Processing Materials for Properties (PMP) [San Francisco, Nov. 2000] (2000) pp.31-36.
- P9. 'Direct Oxygen Removal and Anticontamination Treatment of Titanium', T. H. Okabe and Y. Umetsu: Proceedings of the 9th World Conference on Titanium [Saint Petersburg, June 7-11, 1999] (2000) pp.1417-1424.
- P10. 'Titanium Production by Magnesiothermic Reduction of $TiCl_4$ Through an Electronically Mediated Reaction (EMR)', T. Uda, T. H. Okabe, and Y. Waseda: Proceedings of the 9th World Conference on Titanium [Saint Petersburg, June 7-11, 1999] (2000) pp.1515-1522.
- P11. 'Reduction of Titanium Oxide in Molten Salt Medium', T. Abiko, Il Park, and T. H. Okabe: Proceedings of 10th World Conference on Titanium, Ti-2003, [Hamburg, July 13-18, 2003] (2003) pp.253-260.
*** 第10回世界チタン会議学生ポスター賞 (2003) ***
- P12. 'Titanium Powder Production by Preform Reduction Process', T. H. Okabe, T. Oda, and Y. Mitsuda: Proceedings of 10th World Conference on Titanium, Ti-2003, [Hamburg, July 13-18, 2003] (2003) pp.261-268.
- P13. 'Production of Titanium Powder Directly from TiO_2 in $CaCl_2$ by Electronically Mediated Reaction (EMR)', Il Park, T. Abiko, and T. H. Okabe: Proceedings of International IUPAC Conference on High Temperature Materials Chemistry -XI, [Tokyo, May 19-23, 2003] (2003) p.66. (査読後, J. Phys. Chem. Solids, vol.66, no.2-4, Feb.-Apr., (2005) pp.410-413 に転載)
- P14. 'Recycling Titanium and Other Reactive Metal Scraps by Utilizing Chloride Wastes', T. H. Okabe, R. Matsuoka, and O. Takeda: Proceedings of the Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology [REWAS 2004], [IFEMA, Feria de Madrid, Madrid, Spain, Sep. 26-29, 2004] (2004) vol.1, pp.893-902.
- P15. 'Production of Titanium Powder Through an Electronically Mediated Reaction', T. H. Okabe, T. Kakihira, and T. Abiko: Proceedings of the Symposium on Electrochemical Measurements and Processing of Materials at the 2004 TMS Annual Meeting, [Charlotte, NC, Mar. 14-18, 2004]. (Invited Lecture)
- P16. 'A New High Speed Titanium Production by Subhalide Reduction Process', O. Takeda and T. H. Okabe: Proceedings of the 2005 TMS Annual Meeting, [San Francisco, California, Feb. 13-17, 2005] pp.1139-1144.
- P17. 'Iron Removal from Titanium Ore Using Selective Chlorination and Effective Utilization of Chloride Wastes', R. Matsuoka and T. H. Okabe: Proceedings of the Symposium on Metallurgical Technology for Waste Minimization at the 2005 TMS Annual Meeting, [San Francisco, California, Feb. 13-17, 2005].
- P18. 'Evaluation of Ti-Cr-Cu Alloys for Dental Applications', M. Koike, M. Itoh, O. Okuno, O. Takeda, T. H. Okabe, and T. Okabe: Proceedings of the 2005 TMS Annual Meeting, [San Francisco, California, Feb. 13-17, 2005]. (査読後, J. Mater. Eng. Perform., vol.14, no.6 (2005) pp.778-783 に転載)
- P19. 'Recycling Titanium Metal Scraps by Utilizing Chloride Wastes', Haiyan Zheng, R. Matsuoka, and T. H. Okabe:

Proceedings of the European Metallurgical Conference 2005 (EMC2005), [Dresden, Germany, Sep. 18-21, 2005], vol.4, (2005) pp.1509-1518.

- P20. 'Selective Chlorination of Titanium Ore and Production of Titanium Powder by Preform Reduction Process' [Poster Presentation], Haiyan Zheng and T. H. Okabe: Proceedings of the 16th Iketani Conference: Masuko Symposium, [Tokyo, Japan, Nov. 12-16, 2006] (2006.11) pp.1005-1010.
- P21. 'Fundamental Study on Magnesiothermic Reduction of Titanium Subchlorides', O. Takeda and T. H. Okabe: Proceedings of the 16th Iketani Conference: Masuko Symposium, [Tokyo, Japan, Nov. 12-16, 2006] (2006.11) pp.715-720.
- P22. 'A Novel Recycling Process of Titanium Metal Scraps by Using Chloride Wastes', Haiyan Zheng and T. H. Okabe: Innovations in Titanium Technology, ed. by M. N. Gungor, M. A. Imam, F. H. Fores, The Minerals, Metals & Materials Society, U.S.A. (Proceedings of the 136th TMS Annual Meeting [Orlando, Florida, U.S.A., Feb. 25 - Mar. 1, 2007]) (2007) pp.147-154. (InvitedLecture)
- P23. 'Synthesis and Enrichment of Titanium Subchlorides in Molten Salts', O. Takeda and T. H. Okabe: Innovations in Titanium Technology, ed. by M. N. Gungor, M. A. Imam, F. H. Fores, The Minerals, Metals & Materials Society, U.S.A. (Proceedings of the 136th TMS Annual Meeting [Orlando, Florida, U.S.A., Feb. 25 - Mar. 1, 2007]), (2007) pp.69-78.
- P24. 'Fundamental Study on Titanium Production Process by Disproportionation Reactions of Titanium Subchlorides' [Poster Presentation], T. Oi and T. H. Okabe: Proceedings of the 11th World Conference on Titanium, [Kyoto, Japan, Jun. 3-7, 2007] (2007.12), vol.1, pp.111-114.
- P25. 'Titanium Production Process by Utilizing Titanium Subchlorides' [Poster Presentation], O. Takeda and T. H. Okabe: Proceedings of the 11th World Conference on Titanium, [Kyoto, Japan, Jun. 3-7, 2007] (2007.12), vol.1, pp.115-118.
- P26. 'Production of Titanium Powder Directly from Titanium Ore' [Poster Presentation], Haiyan Zheng and T. H. Okabe: Proceedings of the 11th World Conference on Titanium, [Kyoto, Japan, Jun. 3-7, 2007] (2007.12), vol.1, pp.119-122.
- P27. 'Recent Topics on Titanium and Silicon Production Technologies', T. H. Okabe, K. Yasuda, and T. Oi: Proceedings of 2008 Joint Symposium on Molten Salts, [Nichi-i Gakkan Kobe Port-Island Center, Kobe, Japan] (Oct. 19-23, 2008) (2008) pp.270-275.(Invited Lecture)
- P28. 'Titanium Production Process by Disproportionation of Titanium Dichloride in $MgCl_2$ Molten Salt', T. Oi and T. H. Okabe: Third International Conference Processing Materials for Properties (PMP3), [Bangkok, Thailand] (2008.12). (2008年12月7日～10日に予定されていた学会が中止になったため、TMSがプロシーディングスを書籍として出版予定)
- P29. 'Recent Topics on Titanium Production Processes', T. H. Okabe and, T. Oi: Proceedings of the 18th International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced

Materials (PFAM XVIII), (Sendai, Tokyo, Dec. 12-14, 2009) [Organized by the 176th Committee on Process Created Materials Function of the Japan Society for the Promotion of Science]. (Invited Lecture)

解説記事リスト (List of Review Articles)

- R1. 'カルシウム-ハライドフラックス脱酸法による極低酸素チタンの製造方法', 岡部 徹、中村 正信、植木 達彦、大石 敏雄、小野 勝敏: 日本金属学会会報, vol.34, no.4 (1992) pp.315-317.
*** 第15回日本金属学会技術開発賞(1992年) ***
- R2. 'チタンの脱酸技術', 大石 敏雄、岡部 徹、小野 勝敏: 軽金属, vol.43, no.7 (1993) pp.392-400.
- R3. 'レアメタルの新しい精練方法～究極の脱酸技術を目指して～', 岡部 徹、葛西 栄輝、早稲田 嘉夫: 金属, 臨時増刊号 8月 (1996) pp.133-140.
- R4. '金属熱還元法による素材プロセス研究における新しい展開～導電体を介した反応 (EMR) 制御によるチタン製造プロセスへの応用～', 岡部 徹、宇田 哲也、葛西 栄輝、早稲田 嘉夫: 金属, 臨時増刊号 8月 (1996) pp.123-132.
- R5. '接触させずに反応させる ～新しい発想”導電体を介した反応 (EMR)”による素材プロセス～', 岡部 徹、宇田 哲也、葛西 栄輝、早稲田 嘉夫: バウンダリー, vol.13, no.1 (1997) pp.42-51.
- R6. 'TiCl₄のマグネシウム還元における反応部位制御', 岡部 徹、宇田 哲也: 東北大学素材工学研究所彙報, vol.53, no.1,2 (1997) pp.1-11.
- R7. 'Producing Titanium Through an Electronically Mediated Reaction', T. H. Okabe and Y. Waseda: Journal of Metals (JOM), vol.49 June (1997) pp.28-32.
- R8. 'レアメタルの金属熱還元反応～電子の移動経路と反応メカニズム～', 岡部 徹、朴 日、早稲田 嘉夫: 溶融塩および高温化学, vol.41, no.2 (1998) pp.213-225.
- R9. 'チタンの還元プロセスについて', 岡部 徹、早稲田 嘉夫、梅津 良昭: 金属, vol.69, no.10 (1999) pp.868-874.
- R10. 'チタン製錬プロセスの最近の話題', 岡部 徹、二上 菱、小野 勝敏: ふえらむ(日本鉄鋼協会会報), vol.7, no.1 (2002) pp.39-45.
- R11. '新製錬法について', 岡部 徹: チタン, vol.50, no.2 (2002) pp.102-104.
- R12. 'チタンはアルミニウムを越えられるか', 二上 菱、岡部 徹: チタン, vol.50, no.3 (2002) pp.219-227.
- R13. '溶融塩を利用する酸化チタンの還元プロセス', 岡部 徹、宇田 哲也: チタン, vol.50, no.4 (2002) pp.325-330.
- R14. 'チタン製錬研究の概要と新製造技術開発への提言', 二上 菱、岡部 徹、小野 勝敏: 資源と素材, vol.118, no.8 (2002) pp.529-535.
- R15. '日本にチタンの未来はあるかーミネルバ以降、材料技術戦略からー', 二上 菱、岡部 徹: チタン, vol.51, no.2 (2003) pp.96-101.
- R16. 'レアメタル製錬の最近の話題', 岡部 徹: 溶融塩および高温化学, vol. 46, no. 3 (2003) pp.196-210.
- R17. 'レアメタルの新製錬技術', 岡部 徹、平藤 哲司、片山 巖、神保 至、大藏 隆彦: 資源と素材, vol.119,

no.10,11 (2003) pp.697-700.

- R18. 'チタンの新製錬法', 岡部 徹: 軽金属, vol.56, no.11 (2005) pp.537-543.
- R19. 'レアメタルの製造プロセス', 岡部 徹: OHM, vol.93, no.4 (2006) pp.37-41.
- R20. '電気と技術の塊: 金属チタンの製造法', 岡部 徹: 電気学会誌, vol.126, no.12 (2006) pp.801-805.
- R21. 'レアメタルの実情と日本の課題', 岡部 徹: 工業材料, vol.55, no.8 (2007) pp.18-25.
- R22. 'チタン製錬技術の新展開', 岡部 徹、大井 泰史: 金属, vol.77, no.11 (2007) pp.1247-1251.
- R23. 'チタンの製錬法の歴史と将来', 大井 泰史、岡部 徹: 金属, vol.78, no.2 (2008) pp.114-120.
- R24. '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', 大井 泰史、岡部 徹: チタン, vol.56, no.4 (2008) pp.268-275.

著書リスト (List of Books)

- B1. 'Removal of Oxygen in Reactive Metals', T. H. Okabe, K. T. Jacob and Y. Waseda: in "Purification Process and Characterization of Ultra High Purity Metals" edited by Y. Waseda and M. Isshiki, Springer, Berlin (2001) (全 411 頁) pp.3-37.
- B2. '金属製錬(第3章), 岡部 徹 (分担執筆): '溶融塩の科学と応用 - エネルギー・環境技術への展開 -', 伊藤 靖彦 編集, アイ・ピー・シー, 東京 (2003) (全 347 頁) pp.49-76.

特許リスト (List of Patents)

1. 'Ti₃Al の製造方法', 鈴木 亮輔、小野 勝敏、大石 敏雄、岡部 徹、池澤 正志: 日本国特許 [平成元年 9 月 13 日出願] **特許第 1882005 号** (特開平 3-100129, 特公平 6-21302, 特願平 1-235766) (1991).
2. '極低酸素チタンの製造方法', 大石 敏雄、岡部 徹、池澤 正志、小野 勝敏、鈴木 亮輔: 日本国特許 [平成 2 年 8 月 14 日出願] **特許第 2090561 号** (特開平 4-99829, 特公平 8-14009, 特願平 2-213658) (1992).
3. '金属間化合物 Al₃Ti の製造方法', 鈴木 亮輔、小野 勝敏、大石 敏雄、岡部 徹、池澤 正志、植木 達彦: 日本国特許 [平成 2 年 8 月 24 日出願] **特許第 1991487 号** (特開平 4-103732, 特公平 7-11039, 特願平 2-221080) (1992).
4. 'Ti₃Al の製造方法', 鈴木 亮輔、小野 勝敏、大石 敏雄、岡部 徹、池澤 正志: 日本国特許 [平成 5 年 7 月 27 日出願] **特許第 1966688 号** (特開平 6-184660, 特公平 7-11040, 特願平 5-185099, 特願平 1-235766[平成元年 9 月 1 3 日出願]の分離) (1994).
5. '金属チタンの製造方法および装置', 梅津 良昭、岡部 徹、田中 淳一、藤谷 義、酒井 直秀、高橋 和秀、二上 菱: 日本国特許 [平成 12 年 1 月 7 日出願] (特開 2001-192748, 特願 2000-5973) (2001).
6. 'チタンの製造方法、純金属の製造方法、及び純金属の製造装置', 岡部 徹: 日本国特許 [平成 14 年 4 月 18 日出願] **特許第 3718691 号** (特開 2003-306725, 特願 2003-1166351) (2003).
7. 'レアメタル塩化物の製造方法および装置', 岡部 徹、

小瀬村 晋、深澤英一: 日本国特許 [平成 15 年 6 月 24 日出願] **特許 4243655 号** (特開 2005-15250, 特願 2003-179318) (2005).

8. 'チタンの製造方法及び還元原料体の製造方法' 岡部 徹: 日本国特許 [平成 15 年 12 月 8 日出願] **特許第 3829218 号** (特開 2005-171273, 特願 2003-408909) (2005).
9. '金属チタンの製造装置', 岡部 徹、小野 有一: 日本国特許 [平成 16 年 1 月 5 日出願] **特許 4277080 号** (特開 2005-194554, 特願 2004-449) (2005).
10. 'チタンの低級塩化物を還元して金属チタンを製造する方法', 岡部 徹: 日本国特許 [平成 16 年 1 月 28 日出願] **特許第 3809514 号** (特開 2005-213548, 特願 2004-19889) (2005).

随筆リスト (List of Essays)

- E1. '私のつくった極低酸素チタン', 岡部 徹: バウンダリー, no.9 (1990) pp.10-13.
- E2. 'チタン研究を通じて広がる人の輪', 岡部 徹: 研友, vol.57 (1999) p.43.
- E3. '夢とロマンの行動派研究者〜小野先生', 岡部 徹: 水曜会誌(京都大学資源・金属系関係学科), vol.23, no.4 (2001) p.386.
- E4. 'チタンの新製造プロセスの開発', 岡部 徹: まてりあ(日本金属学会会報), vol.40, no.9 (2001.9) p.818.
- E5. 'チタン研究に没頭した十年余', 岡部 徹: (社)日本チタン協会 50 周年記念, 記念誌コラム (2002) p.308.
- E6. 'プロセス技術がレアメタルをコモンメタルに変えるーレアメタル研究会ー', 岡部 徹: 生研ニュース(東京大学生産技術研究所), no.85, [2003.12] (2003) p.2.
- E7. '日本の課題: ~わが「レアメタル」への取り組みは〜新製造法の開発に加え、高効率な回収技術も', 岡部 徹: 時事評論, vol.38, no.4 [7 月号] (2006.7) pp.2-5.
- E8. '未来材料: チタン・レアメタルの研究室', 岡部 徹: 生産研究(東京大学生産技術研究所発行), vol.61, no.3 (2009) p.354.

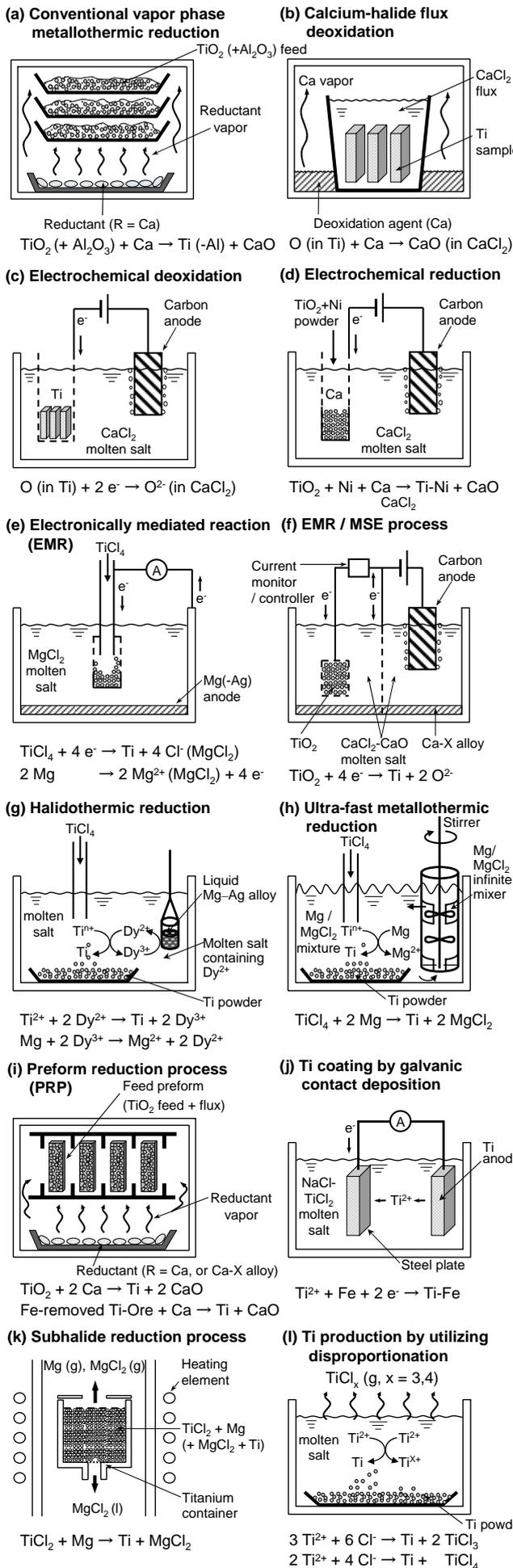


Fig. 1. Schematic illustration of various titanium production processes studied by Prof. Okabe from 1988 to 2009.

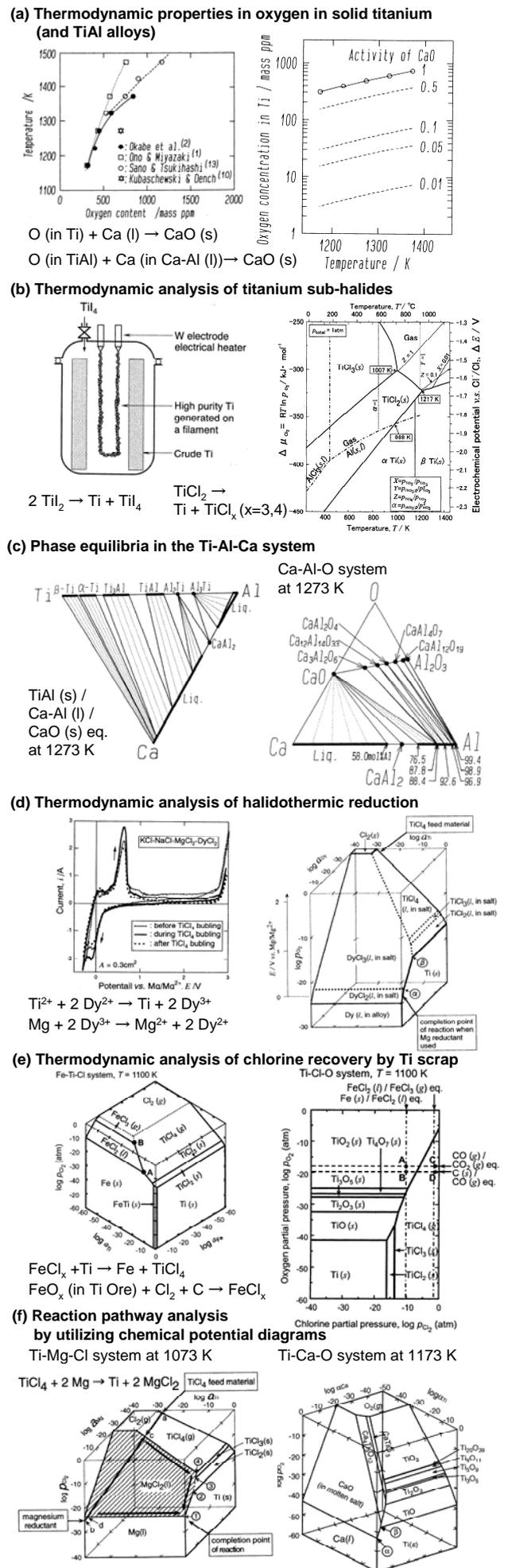


Fig. 2. Schematic illustration of fundamental research on titanium carried out by Prof. Okabe from 1988 to 2009.