チタン製錬・リサイクルの最近の話題 ～グリーン・チタンの製造の可能性～

岡部　徹

航空機産業の発展，さらには，チタンの一般民生品への応用が広がる中，チタンやチタン合金の需要は今後も増大するものと予想されている．一方で，金属製錬における環境負荷が，一般社会からも問題視されるようになり，金属の製造過程で多量の CO_2 が発生するチタンについても，例外なく CO_2 の削減が喫緊の課題となっている．本稿では，CO_2 の発生量を低減しつつ，チタンの生産量を増大させることが技術的に可能であるのか，その方策を考察したい．また，今後推進が期待される，チタンのスクラップの循環利用における，アップグレード・リサイクル（高純度化・高付加価値化リサイクル）の重要性・将来性について考えてみたい．

はじめに

チタン（Ti）やその合金は，軽量，高強度，さらには抜群の耐腐食性などの優れた性質を有することから，今後も需要は増大するものと考えられる．特に，航空機産業の発展，さらには，iPhone（アップル（Apple）社製）の最新モデルの筐体材料として採用されたように，チタンの一般民生品への応用が広がる中，チタンの需要は，今後も増え続けるであろう．

チタンは，地殻中に存在する元素の中では，9番目に多く存在する元素であり，資源的には，無尽蔵の埋蔵量を有する．現在，約26万トン/年[1)]の金属チタンが世界で生産されているが，仮に10～100倍に需要が増大しても，資源供給上の制約は発生しない夢の材料と言える．

一方で，近年は，金属製錬における環境負荷が，一般社会からも問題視されるようになっている．金属の製造に伴って多量の CO_2 を発生するチタンについても，例外なく問題視されつつある．ここでは，CO_2 の発生量を低減しつつ，チタンの生産を増大させることが技術的に可能かどうか考察したい．

また，今後，チタンのスクラップの循環利用が推進されると予想される．循環利用を促進する要素技術として，スクラップをバージン材よりも高純度化し，高付加価値化する「アップグレード・リサイクル」技術の重要性・将来性について考察する．

チタン製造の歴史的・地政学的背景

VUCAとは，V（Volatility：変動性），U（Uncertainty：不確実性），C（Complexity：複雑性），A（Ambiguity：曖昧性）の4つの単語の頭文字をとった造語であり，「先行きが不透明で，将来の予測が困難な状態」を意味する．1990年代後半に軍事用語として発生した言葉であり，2010年代に入ると，昨今の変化が激しく先行き不透明な社会情勢を指して，ビジネス界においても広く使われるようになった．最近では，Permacrisis（長期にわたる不安定な状況）という言葉が似た意味で使われるようになった．現在，チタンをはじめとするレアメタルの商流は，まさにVUCA時代を迎えている．図1に示すように，世界的情勢が不安定であるため，レアメタルの商流についても先が見通せない状態が続いている．

このような状況下では，レアメタルの需要・供給，価格やサプライチェーンが，図1に示す事案によって，どのような影響を受けるのかを多角的に考える必要がある．

チタンを例に取ると，日本は，西側諸国で唯一

の金属チタンの供給国である．スポンジチタンの生産シェアは，20％程度まで低下したものの，日本は今もなお世界第2位のチタン生産大国である（図2参照）．

図1に示すようなVUCAの状況下において，西側諸国の唯一のチタン供給国・技術大国として日本は，そのサプライチェーンを維持・発展させ，チタンの世界供給を通じて世界に貢献するべきである．同時に，日本が誇る製錬技術・環境技術を利用して，環境調和型のチタン製錬・リサイクル法を開発することは，喫緊の課題であることは論を俟たない．

VUCA時代におけるレアメタルの商流

ウクライナでの戦争，ガザ地区での戦闘，
台湾有事の可能性
（→世界戦争→東西の分断）

感染症の蔓延
気候変動，異常気象

環境破壊
・・・・・

等がレアメタルの需要・供給，価格やサプライチェーンにどのような影響を及ぼすか，
多角的に考える必要がある．

図1　VUCA時代におけるレアメタルの商流．

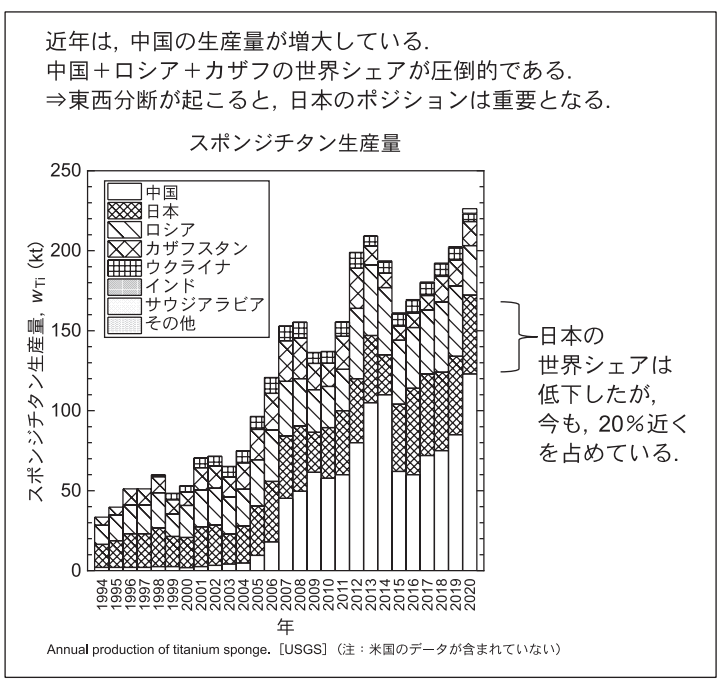

図2　チタンの生産量の変遷．

チタン製造に関わる環境負荷

チタンの製造過程では，膨大なエネルギーを消費し，多量のCO_2を排出する．鉱石を処理・アップグレードしてチタン製錬原料の酸化チタン（TiO_2）を製造するだけでも，多量のエネルギーを消費する場合が多い．TiO_2原料を還元して金属チタンを得るためには，さらに多量のエネルギーや電力を消費する．チタンは，金属になると，軽量で錆びることもない優れた材料であり，超長寿命の環境にやさしい未来材料と言える．しかし，鉱石から金属を製造するまでに，莫大なエネルギーを消費して，多量のCO_2を排出するため，その生産に関しては環境負荷の大きい材料であるという見方も否定できない．

なお，チタン鉱石の採掘や製錬に伴う環境破壊には，莫大なエネルギー消費やCO_2排出の問題だけでなく，ウラン（U）やトリウム（Th）などの自然起源放射性物質（NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials）[2)3)]の処理問題も含まれるが，本稿では，議論を単純化すべく，NORMの問題は考慮しない．

高橋によると[4)]，国内チタン製錬2社の合計生産量と2社がHPで公開している環境データ（Scope 1, 2, 3のCO_2排出量）の総合計から求めたスポンジチタンのGWP（Global Warming Potential: 地球温暖化係数）は19～22 ton CO_2/ton sponge Tiで，1トンのチタンを製造するのに，約19～22トンもの

CO_2 が発生する．チタンの製造に関する統計情報は，不明瞭な点が多いため，今後，この値の絶対値や精度はさらなる検証を行う必要がある．

ここで，Scope 1 は，事業者自らによる，燃料の燃焼，工業プロセスなどに伴う温室効果ガスの直接排出量である．すなわち，チタン製錬においては，実際にチタンの製造プラントから直接排出される CO_2 の量と考えてよい．Scope 2 は，他社から供給された電気，熱・蒸気の使用に伴う間接排出量である．チタン製錬の場合，還元剤であるマグネシウムの製造において多量の電力を必要とするため，この値は無視できないほど大きい．

Scope 3 は，Scope 1，Scope 2（事業者自ら排出している温室効果ガス（CO_2 等））以外の事業者の活動に関連する他社の温室効果ガスの排出量である．すなわち，Scope 3 は，事業者の活動に関連する他社の CO_2 排出量である．鉱石から酸化チタン原料を製造する工程で排出される CO_2 もここに含めなければならないが，この工程での CO_2 排出量の推定は困難である場合が多い．

高橋によると[4]，Scope 3 を除いたチタンの CO_2 排出量は，8～10 ton CO_2 / ton sponge Ti（Scope 1, 2）となり，Scope 3 を考慮した値から半減する．一方，産総研が開発して IDEA Ver.3.2[5] は，評価製品を生産する際の材料調達から製品ができるまでの GWP のデータベース（下流の使用・廃棄の段階を除いた Scope 1＋2＋3 の上流のみ）であるが，スポンジチタンの CWP は，約 14 ton CO_2 / ton sponge Ti となる[4]．このように，CO_2 排出の原単位は，プロセスの捉える範囲や算出方法によって大きく変化する．

19～22 ton CO_2/ton sponge Ti（Scope 1, 2, 3）という値は，サプライチェーン排出量＝Scope 1 排出量＋Scope 2 排出量＋Scope 3 排出量と呼ばれ，原料調達から製造，物流，販売，廃棄に至る企業の事業活動の影響範囲全体の CO_2 排出量と考えることができる．Scope 3 に関しては集計が困難なことから未集計のケースが多い．このため，1 トンのチタンを製造するのに，20 トンを（はるかに）超える CO_2 が発生していると推測される．

現在，年間約 26 万トンのチタンが製造されているため，この活動により，500 万トン / 年をはるかに超える CO_2 が，サプライチェーン全体で排出されていることになる．将来的に，チタンの需要・生産が増大するにつれ，チタン製造に関わる CO_2 の発生量を削減すべきとの圧力が高まる可能性が高い．

アルミニウム製造に関わる環境負荷

電気の塊と言われているアルミニウムも，その製造工程で，多量のエネルギーや電力を消費し，CO_2 を排出する．高橋によると[4]，IDEA Ver.3.2[5] を用いて計算したアルミニウムの一次地金の GWP は，4～16 ton CO_2/ton Al となる[4]．アルミニウムの製造における CO_2 排出量は，使用される電力の製造形態が，水力等によるゼロカーボン発電か CO_2 を多量に排出する火力発電かによって，国や事業者ごとに値が大きく異なる．

現在，工業的に採用されている，アルミニウム製錬法は，ホール・エルー法（Hall-Héroult process）と呼ばれ，酸化アルミニウム（Al_2O_3）を溶融塩中で電解により還元して，金属アルミニウムを製造している．この方法では，原料である酸化アルミニウム（Al_2O_3）の中の酸素の全量が，グラファイト（C）陽極上での酸化反応により CO_2 に変換され，大気に放出される．仮に，水力などのゼロカーボン電力を使ってアルミニウムを製造する場合でも，現行の製錬技術を使用する限り，原料中の酸素に由来する CO_2 発生は避けられない．

水力などのゼロカーボン電力により製造したアルミニウムは，“CO_2 の発生がないグリーン・アルミニウムである”といった誤解が，一般や一部の専門家にさえ広がっている．しかし，その主張は，消耗型のグラファイト（C）陽極を利用しつづけている範囲においては，大きな間違いである（図 3 参照）．

アルミニウム電解における非消耗型（不溶性）陽極の開発は，長年，世界各所で研究が行われてきた．近年，アルコア（Alcoa）社が，炭素に代わる

一般に，(水力発電等を利用して製造する)グリーンアルミと言われているAlでも，ほとんどの場合，多量のCO_2を発生する．

$$Al_2O_3 + 3/2\,C \rightarrow 2\,Al + 3/2\,CO_2 \quad (1)$$

真の意味でのグリーンアルミは，たえとば以下の反応プロセスで生産されなくてはならない．

$$Al_2O_3 \rightarrow 2\,Al + 3/2\,O_2 \quad (2)$$

現在，不溶性陽極(Inert anode)を利用する，純酸素(O_2)発生型のAl電解製錬の技術開発が活発に行われている．

しかし，現状では，ほぼすべてのAlは，CO_2発生型の電解プロセスを利用して生産されている．

図3　アルミニウム製錬におけるCO_2発生の現状．

酸素ガス(O_2)発生型の非消耗型(不溶性)電極を開発し，2018年にはリオ・ティント(Rio Tinto)と合弁で実用化を目指してエリシス(Elysis)を設立した[6]．これにアルコア，リオ・ティント，アップル，カナダ ケベック州政府が総額1億4,400万ドルを出資し，CO_2を一切発生しない夢のようなアルミニウム新製錬法の開発を行っているようである．この手法は図3の式(2)に示す反応を利用し，原料酸化物(Al_2O_3)中の酸素を，酸素ガス(O_2)として排出するため，真にグリーンなアルミニウム製造法と言える．

現在，エリシスはスケールアップ生産と商業化に向けた開発を進めており，2024年にはアップル社のパッケージやアンハイザー社のビール缶にも使用する計画とのことである．

上記のエリシス以外も，CO_2を発生させないアルミニウム新製錬法の開発が世界各所で活発に行われている．しかし，現在のホール・エルー法に代わる，CO_2をまったく発生しないアルミニウムの量産プロセスの実現には，さらに年月を要するようである．

しかし，将来的には，技術革新が進展し，製造工程でCO_2を一切排出せず，O_2を副産物として生産するグリーン・アルミニウムが市場に供給される時代が到来するものと期待される．

Ti製錬でも多量のCO_2を発生する．

$$TiO_2 + C \rightarrow Ti + CO_2 \quad (3)$$

電解法によりTiO_2から金属Tiを製造する試みもあるが，現在の技術では困難．

$$TiO_2 \rightarrow Ti + O_2 \quad (4)$$

グリーン・アルミニウムを用いてTiO_2を還元すれば，現行の技術でもCO_2を発生せずに金属Ti(-Al)を製造可能．

$$TiO_2 + 4/3\,Al \rightarrow Ti(\text{-}Al) + 2/3\,Al_2O_3 \quad (5)$$

$$2/3\,Al_2O_3 \rightarrow 4/3\,Al + O_2 \quad (6)$$

式(5)+(6)=

$$TiO_2 \rightarrow Ti(\text{-}Al) + O_2 \quad (7)$$

図4　チタン製錬においても，グリーン・アルミニウムを還元剤として利用すると，CO_2発生量を大幅に削減できる．

グリーン・チタン製造の可能性

さて，本題の環境調和型のチタン製錬について考えてみると，現在の技術では，チタン酸化物(TiO_2)原料中の酸素は，すべてCO_2に変換され，排出されている．

チタン製錬の総括反応としては，下記の図4の式(3)となる．現行のチタンの量産プロセスでは，原料のTiO_2を，コークス(C)の存在下で一旦塩化して$TiCl_4$に転換する．その後，金属マグネシウム(Mg)で還元して金属チタンを製造している(クロール法(Kroll process))．TiO_2の塩化行程で，TiO_2原料中の酸素は，CO_2に変換して排出される．また，還元剤の金属マグネシウムを製造する際にも，膨大な電力を消費する．

アルミニウム製錬のように，電解法により酸化チタンから金属チタンを製造する試みもある．しかし，チタンの場合，純酸素ガス発生型の不溶性電極が開発されておらず，図4中の式(4)のような，TiO_2から直接，チタンと酸素ガスを製造する，夢のようなチタン製錬法は，現時点では成り立たない．しかし，図4中の式(5)に示す反応を利用し，製造工程でCO_2を一切発生しないグリーン・アル

ミニウムを用いて TiO_2 を還元すれば，図 4 中の式 (7) に示すように，総括反応としては，CO_2 を発生せずに金属チタンを製造することが可能となる．

図 4 の式 (5) のアルミニウム熱還反応を利用してチタンを製造する試みは，日本では東邦チタニウム㈱が取り組んでいる[7)8)]．アルミニウム熱還元反応によって生成するチタン (ATR-Ti) は，多量のアルミニウムや酸素を含む．今後は，金属熱還元反応によってつくられたチタンやチタン合金からの不純物酸素 (O) の除去に関する研究が重要となる．筆者らも基礎研究ではあるが，多角的な視点でグリーン・チタンの製造プロセスの開発を続けている．必ずしも還元剤がアルミニウムである必要はないと筆者は考えているが，今後，世界中でグリーン・チタンの研究開発が行われるであろう[9)10)]．

チタン製錬における CO_2 の排出削減の意義については，コストや合理性を含め，今後，多角的に議論される必要がある．しかし，グリーン・アルミニウムをチタン製錬に利用する手法は，将来，チタン製錬における CO_2 排出量の大幅削減に関する一つの解決策となるかもしれない．

グリーン・チタンの製造法の一つとして，図 4 の式 (5) の反応において，還元剤であるアルミニウムに，金属のスクラップを利用する方法もある．CO_2 排出の考え方にもよるが，アルミニウムのスクラップを利用することは，金属アルミニウムの製造における CO_2 発生がなく，CO_2 フリーの金属を還元剤として利用すると考えることができる．仮に，スクラップのアルミニウムをゼロ CO_2 排出素材として考えるならば，図 5 中の式 (8) のアルミニウム熱還元反応を利用して TiO_2 から直接金属チタンを製造する手法も，低 CO_2 排出チタン製錬であると考えることができる．

$$2/3\ Al_2O_3 \rightarrow 4/3\ Al + O_2 \quad (6)$$

上記の反応で製造された，真にグリーンなAlを使わなくても，Alの「スクラップ(廃棄物)」を利用して，TiO_2を還元する場合，CO_2を発生しないとも，考えることができる．

$$TiO_2 + 4/3\ Al\ (スクラップ) \rightarrow Ti\ (\text{-}Al) + 2/3\ Al_2O_3 \quad (8)$$

→見かけ上は，CO_2が発生しないTiの還元プロセス．

上記のAlスクラップを利用する金属熱還元反応で製造されたTiやTi-Al合金は，グリーンなTiと呼んでよいか？

今後は，
Al熱還元反応によってつくられたTi(ATR-Ti)からの不純物酸素(O)の除去に関する研究が重要となる．

図 5　チタン製錬において，アルミニウムのスクラップを還元剤として利用すれば，見かけ上，CO_2 排出量を大幅に削減できる．

チタンのアップグレード・リサイクル

電気の塊と言われるアルミニウムは，酸化物原料から金属地金 (一次金属) を作るよりも，金属のスクラップ (二次金属) をリサイクルで循環利用することによって，CO_2 の排出量は，20〜30 分の 1 に低減できると言われている．

アルミニウム以上に，製錬に多量のエネルギーと電力を要するチタンについても，スクラップをリサイクルして循環利用することは重要である．しかし，現時点では，酸素を金属チタン中から効率良く除去する量産技術が開発されていないため，循環利用には限界がある．現状では，チタンのリサイクルは，酸素で汚染されたスクラップチタン (二次 Ti) を，鉱石を製錬して製造した酸素濃度が低い高純度のチタン (Sponge Ti, 一次 Ti) で希釈し，酸素濃度の増加を抑えることによって循環利用している[11)]．

酸化物原料から金属チタンを得る際に発生する CO_2 の排出量を削減する努力も重要であるが，チタンのスクラップをアップグレード・リサイクル (高純度化・高付加価値化リサイクル) して，チタンを循環利用する方が合理的・経済的かもしれない．仮に，チタンのアップグレード・リサイクルに，チタンから酸素を直接除去する新技術を利用できれば，チタンのスクラップから，微量に混入した不純物酸素のみを取り除くプロセスとなるので，CO_2 の発生量は大幅に低減できる．チタンの

アップグレード・リサイクルについては，筆者らの文献を参照されたい[11)12)]．

今後は，多少コストはかかっても天然資源の採掘量や廃棄物の発生量を少しでも減少できるよう，使用済み材料の積極的なリサイクル利用に注力すべきである．この視点からのアプローチとして，将来的には，チタンについては，アップグレード・リサイクル技術[11)12)]を利用するチタンの循環利用技術の開発が重要となることは間違いない．

おわりに

チタンは，人々の生活を豊かにしている．今後もその利用は，適用範囲・量ともに世界規模で増え続けるであろう．同時に，新たな資源開発や天然資源の採掘や製錬に伴って環境破壊も進んでいく．

このような情勢下で，チタンの製造に伴う環境負荷を世界規模で削減するにはどのような社会システムや新技術を導入すべきか，技術先進国はこれらの課題にしっかりと取り組んでいかなければならない．とくに，日本は，西側唯一のチタン生産大国して，チタン製錬やリサイクルに関して，世界をリードしつづける必要がある．

本稿では，CO_2 の排出を極力低減したグリーン・チタンの製造プロセスについて，その可能性を議論した．また，アップグレード・リサイクルの重要性・将来性について紹介した．

今後も，チタンをはじめとするレアメタルの生産は，特定の国による寡占が続くであろう．VUCA時代における資源セキュリティ，サプライチェーンの強靭化という観点からは，供給源を多角化するだけでは不十分である．加えて，製錬の高度化やリサイクルなどの新技術の開発を進め，チタンの供給ルートを多様化することが，工業立国である日本にとっては重要な課題となる．具体的には，未利用一次・二次資源の利用などの新技術開発を進めることも重要かもしれない．

参考文献

1)　工業レアメタル No.139 (Annual Review 2023), アルム出版社 , (2023), 57-62.
2)　フリー百科事典 ウィキペディア（Wikipedia），https://en.wikipedia.org/wiki/Naturally_occurring_radioactive_material
3)　岡部徹：クリティカルメタルの資源循環の現状と課題，金属，**91** No.1 (2021), 31-36.
4)　高橋和彦：脱炭素化時代とチタン，第 108 回 レアメタル研究会（第 7 回チタンシンポジウム）講演資料，(主催：一般社団法人日本チタン協会 , 日本チタン学会, レアメタル研究会（合同開催）)（2023 年 11 月 24 日）.
5)　ライフサイクルインベントリデータベース（産総研が開発），IDEA（Inventory Database for Environmental Analysis), IDEA Ver.3.2（リリース日：2022 年 4 月 15 日）. https://riss.aist.go.jp/idealab/outline/
6)　たとえば，https://www.elysis.com/ や https://riotintojapan.com/product/772/ を参照
7)　たとえば，https://www.toho-titanium.co.jp/pdf/csr/2022/csr_2022-025-026.pdf，https://www.toho-titanium.co.jp/csr/carbon-neutral/ を参照
8)　Nature Index 2021 Materials Science, Titanium takes on a greener hue, https://www.nature.com/articles/d42473-021-00166-8
9)　たとえば，Guang Yang, Hengwei Yan, Zhanwei Liu, Wenhui Ma, Shenghui Guo and Yonghui Yang: 'Preparation of titanium powder using a combined method of aluminothermic reduction and molten salt electrolysis', Solid State Sciences, **148** (2024), 107328.
10)　たとえば，https://iperionx.com/
11)　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.
12)　大内隆成，岡部徹：希土類塩化物と塩化マグネシウムの混合溶融塩を用いるチタンのアップグレードリサイクル新技術，チタン，**68** No.4（2020），288-294.

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 93 年に博士号を取得．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．2015-19 生産技術研究所副所長．2019-21 東京大学副学長．2021- 生産技術研究所所長．生産技術研究所持続型エネルギーインテグレーションセンター教授，同所 非鉄金属資源循環工学寄付研究部門特任教授（兼務）.