

新金属チタンの発展

浅 岡 博

まえがき

チタンが鉄、アルミニウムに代る驚異の金属として産業界に登場して以来、20 余年が経過した。誕生当初に示された世上の熱狂性は既に熄滅の感があるが、チタンに関係する論文、記事は内外雑誌に今なお多数掲上され、関係当事者の開発に対する着実な努力、進歩のあることを示している。ところで、わが国における商業生産は昭和 27 年に始まるが、当時本学の石井頼三教授はスポンジチタン製品の化学分析法規格制定委員の一人であった。このような理由から筆者もわが国のチタン産業創始期にチタンの化学分析に従事する経験を持った。ここで得た知識を背景に、金属チタンを商品学的観点から取りまとめてみる。方法論的になお古典的あるいは記述的な範疇に留まるかも知れない。この点識者のお教示を賜りたい。

I 品質（商品）の誕生

元素としてのチタン（チタニウム）は地殻中で9番目に多く存在するが、資源として世界的な分布状況を見ると、鉄・アルミニウムなどに比べて偏在する資源の1つである。⁽¹⁾ この元素の金属としての商業的生産は、クロール法により、1947年米国において開始され、ホール・ヘール行程によるアルミニウム電解精錬以来の非鉄金属界での最大のできごとといわれた。そして鉄・アルミニウムに代る新金属時代の急速な到来を覚えさすような取り上げ方も、1部世上で

行なわれた。これは当時の新聞・雑誌に目を通すことにより容易に知ることができる。利潤追求の好材料として産業界を湧かした、という経済事情もあるが、根底には金属材料としての優質性の、将来への期待が大きかったことがある。

チタン元素の化学的性質は、活性で結合力が非常に強く、空気中の酸素および窒素を吸収しやすく、特に高温ではこの性質が強い。これが精錬を困難にしている1原因である。また、不純物を含んでいると、非常にかたく脆いので、利用価値も少なく、金属としての真性は永らく推測の状態に置かれていた。したがって、クロール (W. J. Kroll) が商業的生産の基礎を確立するまでの、長い胎動過程には、他の発明発見にでも見られるように、多数の研究者の労苦が集積していることに留意されなければならないであろう。次表は本文引用の諸文献を主体にして作成した、金属チタン出現と開発の年表である。出典により年号および記述の異なる場合もあり、多少の不正確さは残している。

金属チタン出現と開発の年表

年次	外 国	日 本	参 考 事 項
1791	W. Gregor, 英国の黒砂を化学分析。チタン元素の発見。産出の地名にちなんで Mecanite と命名 ⁽³⁾ 。		寛政3年。
1794	M. H. Klaproth, チタンと命名 ⁽³⁾ 。		
1807			アルミニウムの発見。
1825	J. J. Berzelius, チタン弗化カリウムを金属カリウムで還元して金属単体を取り出した ⁽³⁾ 。性質、脆い ⁽⁹⁾ 。		文政8年, 異国船打払令。
1855	St. Claire Deville, 四塩化チタン蒸気をナトリウム上に通してチタン製造。性質、脆い ⁽⁹⁾ 。		

1886			明治 19 年. Hall, Héroult, 電気分解でアルミニウム製造.
1887	Nilson, Petterson, ボンベ中で四塩化チタンをナトリウムと反応させた ⁽⁹⁾ .		
1888			Bayer, ボーキサイトからアルミナ抽出, バイヤー法.
1892	Suebert, Schmidt, 炭酸ガス気流中, 四塩化チタンをマグネシウム鍍屑と反応させた. 性質, 脆い ⁽⁹⁾ .		Hadfield, 18% クロム鋼の研究.
1908			Rossi, 二酸化チタンの顔料適性発見.
1910	Hunter は Nilson-Petterson の方法を開発. 性質, 熱時可撓性あり ⁽⁹⁾ . Titanium Alloy Manuf. Co. は Hunter の方法でチタンをつくった ⁽⁸⁾ .		
1914	Lely, Hamburger らは Nilson-Petterson の方法開発. 性質, 冷時可撓性あり ⁽⁹⁾ .		大正 3 年.
1916			日本, アルミニウム製錬企業化.
1919	Titanium Alloy Monuf. Co., ニューヨークの化学展覧会にチタン金属出品 ⁽⁸⁾ . Weiss, 熱フィラメント上でチタンハロゲン化物		

	を分解. 性質, 冷時可撓性あり ⁽⁹⁾ .		
1921	Billy, 水素気流中, ナトリウムで四塩化チタンを還元した. 生成したTiH ₂ は真空中で脱気 ⁽⁹⁾ .		
1925	Van Arkel, De Boer, ヨウ化チタンの熱分解で高純度チタン製造. 性質, 冷時可撓性あり ⁽⁹⁾ .		
1932	Kroll, Siemens & Halske 工場でクロール法の基礎を確立 ⁽⁸⁾⁽⁹⁾ .		昭和7年.
1934			日本, アルミニウムの商業的生産に成功.
1935			米国鉱山局冶金課, Dean博士の未知金属の開発プロジェクト. この頃より英, 独, 仏, 伊などでジェット機関の開発始まる.
1938	クロール, 特許出願 ⁽⁹⁾ .		
1939	Freudenberg, 1 気圧の水素ガスのもと, 塩化物融剤中ナトリウムで四塩化チタンを還元. 性質, 脆い ⁽⁹⁾ .		(独), 近代ジェット機の開発. 第二次世界大戦開始.
1940	クロール, 米国特許取得. 大気圧のアルゴンガスのもとで四塩化チタンを溶融マグネシウムで還元. 性質. 冷時可撓性あり ⁽⁹⁾ .		
1943	米国鉱山局, クロール法を開発 ⁽⁸⁾⁽⁹⁾ .		日本, 学徒出陣, ガタルカナル島撤退.
1945			第二次世界大戦終了.

1947	米国鉱山局, クロール法を工業化. デュボン社, ナショナルレッド社生産 ⁽⁸⁾ .		
1948	デュボン社企業化 ⁽⁸⁾ .		昭和 23 年.
1950	ソ連邦, 生産開始.	(株)大阪特殊製鉄所 (大阪チタニウム製造KKの前身), 砂鉄より電気鉄の製造.	昭和 25 年, 朝鮮戦争.
1951		大阪チタニウム製造KK. 日本電気冶金 KK. スポンジチタン製造.	
1952			通産省, チタン工業育成策. チタン懇談会設立, 参加 34 社.
1953	英, I. C. I. ナトリウム還元法発表.	東邦チタニウム KK 設立.	
1954			昭和 29 年, 日本, 原子力予算実施.
1955		第 1 次対米輸出, 30年10月~32年9月 2,000 トン	日, 原子力基本法,
1956		日本電気冶金 KK, 三井金属鉱業 KK, スポンジチタン生産中止.	
1957		対米契約破棄. 契約, 32年10月~37年2月 5,700 トン. 1962年までの長期契約毎月 106 トンは継続.	米国防戦略転換, ミサイルに切換. ソ連邦, スプートニク 1 号打上げ.
1958	米, 宇宙法に基づき NASA 開設.		昭和 23 年, チタン需要開発委員会設立. 米, エクスプローラ 1 号打上.
1959	ソ連邦, 国民経済成果博		

	覧会にチタン金属製の宇宙征服記念塔設立。(今日のソ連邦, No. 22. 1964, 11月15日号).		
1961		第4回東京国際見本市にニューメタルコーナー開設, チタン展示.	有人衛星ウオストーク1号(ソ連)打上.
1962			米, ベトナム軍事介入. 米, 有人衛星マーキュリーフレンドシップ7号打上.
1963			昭和38年, 通産省, チタン工業概要発表.
1968	英国ロンドンで英, 米両金属学会主催第1回チタン国際会議. ソ連邦のスポンジチタン対米ダンピング.		科学技術庁資源調査会, 特殊元素に関する調査報告.
1969		日本曹達 KK, 帝人 KK 共同でスポンジチタン製造の新企業発表.	米, アポロ11号月着陸

さて、周知のように人類は石器、青銅、鉄、アルミニウム更にプラスチックと時代を大きく区分され、古い「材料」から新しい「材料」の変遷を示している。材料の発展には、材料に対する外部からの要請⁽²⁾のほか、生産技術・投資などの要因の必要があげられる。チタンの場合について、これらを考慮しながら年表を基に若干の説明をつけよう。

グレゴールは黒砂を化学分析したが、この過程で、砂の異例な性質から多分この砂には新元素が含まれていると信じるようになった。また、チタンと命名したのはクラブロースであるが、彼は1物質の特殊で特徴的な性質を指示するような名称の見つからないときは、誤まった観念の発生するのを遮けるため、それ自体は何も意味しない名称を選ぶのが一番よい、という理由でギリシャ神

話の中のタイタン——地球の最初の息子たち——と名付けた。⁽³⁾

ところで、人類の金属に対する欲望は時代の進展とともに強まる。1553年にはアグリコラは冶金の学術書デ・レ・メタリカを完成した。⁽⁴⁾ 当時の採鉱、冶金の中心は金、銀、銅であったが、16世紀の頃になると、「物」をつくる「材料」で主流を占めていた木材 [materia] 分野に金属も加わりはじめた。⁽⁵⁾ この状況は進歩展開する。19世紀に入ると普遍的な新材料となった安価な鉄は、粗雑な木の使用にとってかわった。⁽⁶⁾ そしてまた防錆の問題などが提起されてくる。グレゴール、クラプロースさらにベルツェリウスらの作業が、19世紀全般をつうじての化学である天然の物質を純粋にすることとこれを分析すること、⁽⁷⁾ に該当していたにしても、ここで得られた知見は、以後の化学、冶金研究者の一層の興味の対象となったことは疑いない。しかし、彼等の技術は、19世紀末の10年間は製鋼用の脱酸剤に主用途を見つけるだけであった鉄・チタン合金の製造段階で、⁽⁸⁾ 滞留を余儀なくされたようである。

ハンターになると、チタンの材料的優質性に着目して、その製錬を研究したことが、⁽⁸⁾ 明瞭になる。ゼネラル・エレクトリック社は電燈の非効率的な炭素繊維に代わる、新しい耐熱金属を探していた。そしてこの研究を彼にまかした。当時チタンの熔融点は、初期の研究者により、太陽の表面に等しいような11,000°Fと報告されていたのである。彼は既往の種々な方法を検討したあげく、鉄製ポンプ中で四塩化チタンをナトリウムで還元した。しかし冷めると硬くて脆い品質不同のチタンしかつくれなかった。

クロールは⁽⁹⁾ 1940年にチタン製法に関する米国特許を取得した。これは第二次世界大戦中、外国財産管理局により押えられていたが、米国鉱山局はこれを採りあげ開発した。この開発の裏には、1935年鉱山局冶金課のDean博士の低品位鉱処理法の開発と、豊富に存在しているが性質未知の金属の利用検討の2つのプロジェクトが大きく寄与している。⁽¹⁰⁾

ところで、クロールは1932年に自己の製品であるチタン板を持って米国を旅行し、アメリカン・スメルティング・アンド・リファイニング社、ペル・テレフォン社、ウェスティングハウス・ブルームフィールド社、ゼネラル・エレ

クトリク社などを訪れたが、いずれも興味を持たれなかった。また、1938年にも線、棒、板などの製品を捉え、生産技術の売込みに米国を旅行し、鉍石の利用、ステンレス鋼と比べて防蝕性、機械的強度の点などで優れていることを説明したが、このときも何等の興味は持たれなかった⁽⁹⁾。

さて、1944年に鉍山局はクロールを呼びだし、チタン製法について質すなどとして、開発を進めた。製造した金属チタンは厳重な戦時秘密として、政府関係者の間で回覧されていたのである⁽⁸⁾。これは当時、新材料を要求していた軍隊にとって多大の関心を引いた。即ち耐海水性は船外の儀装品やパイプに使用でき、高温においても変化のない強度重量比は、空軍のエンジンに採用するのに特に適していた。これらの理由で、早速海軍では凝縮管、シャフト、プロペラ、ポンプ、飛行艇の胴体など既に設計されてしまっている部品に使用する研究を始め、また空軍では、ロケット、ターボジェット、ラムジェットエンジンなどの使用のための研究を始めた。一方、耐蝕性の点でステンレス鋼に置換できる可能性は、クロムの消費量を心配しなければならない戦時動員計画員の注目を引くところともなった⁽⁸⁾。このような過程を辿り、1947年の工業化と併行して加工法の研究も進められ、陸・海・空三軍の研究所を通して軍需品としての用途が開拓された。そしてこの技術は民間企業に譲渡され、国家資金の投入による設備の建設、長期契約による買上げという政策に支えられ、量産化されていった⁽¹¹⁾。創始期のチタンスポンジ製造業者の設備能力は次のようであった。

創始期の設備能力

会社名	1952年8月	計画年産量	所在地
デュボン社	900(トン)	3,600(トン) (1954年)	デラウェア州 ニューポート
タイタニウム メタル社	550	3,600 (1954年)	ネバダ州 ヘンダーソン
鉍山局	—	360 (1952年)	ネバダ州 ボルダーシテイ
クレーン社	9	21 (1952年)	イリノイ州 シカゴ

また、創始期にある工業育生のため、政府が行なった投資は総額 4,970 万ド

ルに上り、その内容は次のようであった。⁽¹¹⁾

政府投資高

デュボン社の 3,600 トン計画に対し……………	14,700(千ドル)
タイタニウムメタル社の 3,600 トン計画に対し………	15,000
DMPA による買上げ費……………	5,000
空軍兵器廠, 海軍船舶局, 航空局各機関の研究費………	15,000
合 計	49,700

以上から明らかなように、米国におけるチタン商品は、製錬、加工技術の研究および市場の両面に対する国家投資によってしかも使用価値生産を直接目的として誕生し、量産体制の確立も進行したのである。

ところで、わが国におけるチタン商品発生の経済的メカニズムは、専ら米国軍需市場への輸出と、これに対する政府の育生援助によるもので、交換価値の生産を主目的としたものであった。ここに、つくられる物の本性を忘れた産業の弱さがある。企業形成の過程⁽¹²⁾⁽¹³⁾および進行の概略は次のようである。

昭和 25 年株式会社大阪特殊製鉄所が設立され、国内資源の砂鉄を原料として電気銑を製造した。翌 26 年には工業化試験に政府補助金 560 万円を受け、⁽¹⁴⁾砂鉄中のチタンの抽出に成功した。また日本電気冶金株式会社は試験研究費 115 万円の交付を受け、チタンの製造を行なった。⁽¹⁴⁾28 年には東邦チタニウム株式会社が設立された。以上のほか、日本曹達(株)、三井金属鉱業(株)、日本金属チタン精錬(株)など約 10 社の大小資本の企業が生産に着手した。⁽¹⁵⁾なお、27 年にはチタン工業育生対策要綱が政府において決定されたが、その内容は、①日本には原料も豊富で、製造技術その他も日本の国情に適している。②新規輸出産業として有望である。③企業の乱立による投資の分散をさけて、適正規模の近代工場の育生をはかり、輸出競争に耐えるようにする、といった 3 点にしばられたものであった。そして 3 年後の 30 年には 5,000 トン/年の増産計画が立てられ、税制、融資の両面で助成措置⁽¹⁶⁾がとられた。

ところで、昭和 32 年、米国のジェット機からミサイル中心に切替えた国防戦略の転換によって、米国軍需に依存して出現したチタン工業も、輸出の減少

により沈滞せざるを得なかった。なお、この期間までに既に生産を中止する企業も生じた。また生産計画の樹立だけで終わったのもある。いずれも米国のチタン生産量の急速な拡大と価格の低下に対し、自社の量産速度がこれと対抗できるか、あるいは原理的に異なった新製造法の出現で、設備の廃物化を惧れ、製法の確立するまで見合わせるというような理由などからである。⁽¹⁷⁾ この輸出減少以来、国内市場に立脚した安定なチタン工業への努力が開始され、政府補助金でチタン素材を学界、産業界に配布し、応用研究が進められるようになった。現在、国内生産企業は大阪チタニウム製造(株)と東邦チタニウム(株)の2

年次	米 国 (トン)	日 本 (トン)	対米輸出価格 (ドル/ポンド)
1947	2		
48	3		
49	8		
50	50		
51	500		
52	1,075	14	
53	2,241	105	4.00
54	5,370	702	3.30
55	7,400	1,501	2.55
56	14,600	2,991	2.00
57	17,250	2,545	1.65
58	4,500	1,812	1.20
59	3,898	2,730	1.18
60	5,311	2,307	1.18
61	6,727	2,282	1.18
62	6,730	1,543	1.10
63	7,879	1,759	
64	8,000	2,993	
65	—	4,840	
66	—	6,432	
67	14,000	7,840	
68	—	5,214	

Metal Statics 1965. 金属. 31 巻 10 号, およびチタニウムチ(タニウム協会)より作成.

社が創業以来生産を続けているが、超音速旅客機(SST)時代を迎え、将来性を期待できるという意図で、日本曹達(株)と帝人(株)が提携して、日本曹達(株)が米国のストファー社とデュボン社から技術導入して開発した金属ナトリウム還元法で、昭和45年より180トン/月の規模でチタン製造を企業化することを⁽¹⁸⁾発表した。

次表は米国および日本のチタンスポンジ生産量と対米輸出価格の推移を示したものである。急速な量産と価格の低下が明瞭である。

なお、西独、ソ連邦もチタン金属を生産している。⁽¹⁹⁾

ところで、チタン工業開始にあたって、その企業的危険性を憂慮した人々もまたあった。数列を記してみよう。米国ではアルミニウムが生産

当初5ドル/ポンドのものが32セントに、更に15セントにまで低下するのに
さして時間を要しなかったことと対比して、チタン企業を楽観する人々に対し
て、ダウケミカル社がマグネシウムを商業生産に持ち込むのに多大の苦勞を要
したことをあげて警告した人もいた。⁽⁸⁾ 日本国内では、チタンの優質性は認める
ものの、当該産業発展の問題点として、巨額の設備資金の必要、加工メーカー
の同時発展、国際競争に耐えられる資源、電力などがあげられた。⁽¹⁴⁾ またチタン
についての広範な原子論的および結晶学的研究が実用化につながると、基礎的
研究の重要性も強調された。⁽²⁰⁾ いずれもチタン商品の形成、発展にとって解決さ
れなければならぬ問題点である。

- (1) 科学技術庁資源調査会；報告第44号昭和43年1月。
- (2) 黒岩俊郎；材料革命，ダイヤモンド社，昭和42年p58。
- (3) J. W. Mellor；A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, Vol. VII, Longmans, green and Co. Ltd., 1927。
- (4) 三枝博音；技術の哲学，岩波書店，昭和40年p57。
- (5) 三枝博音，前掲書，p61。
- (6) バナール，菅原仰訳；科学と産業，岩波書店，昭和40年p15。
- (7) バナール；前掲書，p11。
- (8) Fortune, May 1949。
- (9) 重大な発明はどれでも、まず発明者の教育的背景、精神的準備期およびその発展などを吟味するものである。そしてこれらの外に発明が産業化に成功するには、時の要素が無視できない。クロールは冶金の伝統を持った家族の中に生まれた。そしてチタン開発の動機は可撓性のあるチタンの安い製造法を見つけることであった。なお、特許については、後にクロールは外国資産管理局を被告として訴訟を起こし、多大の時間と負債をつくる程の費用を払ったので、こんなトラブルが予めわかっていたら発明などしなかった、と嘆じさせた。W. J. Kroll: Journal of the Franklin Institute, Vol. 260 No 3, P 169-192, 1955. 日本業者に対しては米法務省が昭和29年、特許料を支払うように要求してきた。日本経済新聞，昭和30年5月19日。
- (10) G. A. Boehm；Scientific America, Apr. 1949。
- (11) 中山章；チタニウム，No. 2 昭和28年5月。

最近の世界スポンジチタン公称生産能力

国	メーカー	生産能力t/yr	増強計画
米	T. M. C. A.	9,000	15,000
	REACTIVE	4,500	6,500
	ORMENT	1,800	6,000
	C. M. C.	450	
	計	15,750	
日	大阪チタニウム	3,000	4,200
	東邦チタニウム	2,750	4,000
	計	5,750	8,200
英	I. C. I.	1,700	3,600
ソ		10,000	

出所、高尾善一郎、チタニウム・ジルコニウム、16巻1号、昭和43年1月。

- (12) 黒子孟夫；金属，30巻17号1960年9月1日。
 (13) 金属，31巻10号，1961年5月15日。
 (14) 日本経済新聞，昭和27年7月18日。東京新聞，昭和27年6月20日。
 (15) チタンスポンジ生産と出荷（トン）

昭和	大阪チタニウム	東邦チタニウム	日本曹達	日本電気冶金	三井金属工業	計	輸出
27	14					4	1
28	80		12	10	1	105	68
29	343	299	35	19	5	702	588
30	691	673	127	4	4	1,501	1,413

出所、金属，31巻10号

- (16) チタンの鉍工業補助金，昭和28年より35年まで計1億3,320万円，金属，31巻10号。他に文部省科学研究費がチタン関係にでている。
 (17) 東京朝日；昭和27年8月15日。
 (18) 日本経済；昭和44年7月1日。
 (19) 野田敏男；チタニウム・ジルコニウム，16, 8, p 2, 1968. 同上，No. 56, 1957年11月。
 (20) 橋本隆吉；東京朝日，昭和27年5月27日。

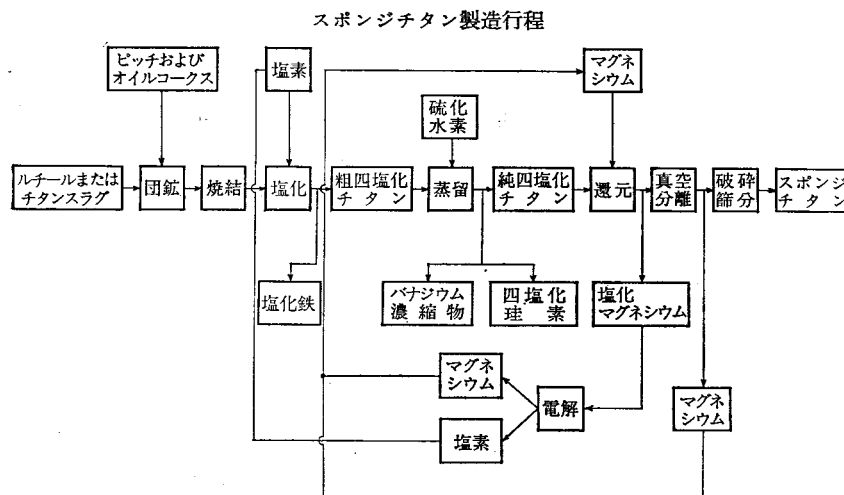
2 品質の形成

商品の品質は製造行程で盛り込まれる。したがって形成される品質は、使用設備の良否、生産技術、品質管理精度、経営規模、計画の良否あるいは経験の差違などによって左右される⁽¹⁾。ここでは現行の生産技術によるチタン品質の形

成過程をみることにしよう。

⁽²⁾クロール法によるチタン製錬の技術的発展については、既に専門技術者により⁽³⁾⁽⁴⁾発表されている。ここでは野田論文を利用してその概要を初めに記してみる。

次図はスポンジチタン製造行程の略図である。



⁽⁵⁾原料鉱石のイルメナイトと還元剤の石油コークスを電気炉で処理して、チタンスラグをつくる。これに粘結剤のピッチを加えて団鉱とするか、あるいはルチール、石油コークスおよびピッチから直接団鉱をつくる。現在使用されているチタンスラグおよびルチールの品位は次のようである。

⁽³⁾高チタンスラグ品位例

含有成分	重量%	含有成分	重量%
ΣTi	58.70	CaO	0.03
TiO ₂	58.51	MgO	1.50
Ti ₂ O ₃	35.30	MnO	0.50
ΣFe	1.70	V ₂ O ₅	0.15
FeO	2.19	P ₂ O ₅	0.14
SiO ₂	1.00	C	0.20
Al ₂ O ₃	0.50	S	0.02

⁽³⁾イルメナイト品位例

含有成分	重量%	含有成分	重量%
TiO ₂	54.64	SiO ₂	2.00
FeO	29.15	MgO	0.36
Fe ₂ O ₃	12.40	Cr ₂ O ₃	0.031
MnO	1.40	V	0.171
Al ₂ O ₃	1.10	S	0.021

団鈦は焼結してから塩化炉で塩素を作用させて粗四塩化チタンをつくる。原料不純物も共に塩化物となるが、塩化鉄、塩化カルシウムのような高沸点塩化

塩化工程操業実績 粗四塩化チタン⁽³⁾トン当り

年 度	39	40	41	42
生団鈦使用量 (Kg)	870	810	810	800
塩素使用量 (Kg)	915	885	880	870
廃 団 鈦 (Kg)	55	35	30	30

精製四塩化チタンの品質⁽³⁾

化学分析	Si < 0.0014% (SiCl ₄ < 0.009%)
	V < 0.00011% (VOCl ₃ < 0.0003%)
	Fe < 0.0020% (FeCl ₃ < 0.006%)
	TiCl ₄ の純度 > 99.9%

物は沈降槽で除かれる。粗四塩化チタンはなお少量の不純塩化物を含んでいるので精留塔で精留し、精製四塩化チタンを得る。バナジウム塩化物は四塩化チタンと沸点が近似しているため、硫化水素で沈殿して除く。塩化工程の操業状況および精製四塩化チタンの品質は次のようである。

精製四塩化チタンは、気密にしてアルゴンガスの雰囲気での還元炉内で、あらかじめ装入して溶融したマグネシウム上に滴下して還元する。反応終了後、温度約 1,000°C、10⁻⁵ mmHg

の高真空分離で、生成したスポンジチタン中の未反応のマグネシウムおよび塩化マグネシウムを除去する。除去した塩化マグネシウムは電解して再使用する。還

還元分離操業実績 1.4 トン⁽³⁾パッチ

還 元	分 離
Mg 装入量	1,590kg
TiCl ₄ 使用量	5,660
Ti 採取量	1,395
MgCl ₂ 抽出量	5,120
反応所要時間	40時間
Ti 収率	97.6%
Mg 反応率	69%
	分離最高温度 1,050°C
	分離所要時間 28 時間
	分離真空度
	4~9×10 ⁻⁵ mmHg
	回収
	Mg+MgCl ₂ 量 750Kg

チタンの収率と製品の品質⁽³⁾

高チタンカラミ製造	93.0%	TiO ₂ 90% min.
TiCl ₄ 製造および精製	93.4	TiCl ₄ 99.9% min.
Mg 還元	97.7	BHN 100 max,
全工程	84.5	(チタンスポンジ)

(BHN=ブリネル硬さ)

元分離の操業状況は次のようである。

以上、製錬法を総括平均して、チタンの収率と製品の品質は次のようになる。イルミナイト鈦石からチタ

ン抽出率 85% という数字は、現在のアルミニウム地金をボーキサイト鉱石から抽出する場合の抽出率と同じである。

また、次表は品質改善の推移を示したものである。

スポンジチタンの品質改善の歴史⁽³⁾

(全製品の不純物および BHN に関する年表)

年	化 学 成 分									BHN (1,500 kg 荷重)
	Fe	Cl	Mn	Mg	N	H	C	Si	O	
1954	438	777	17	376	111	29	143	268	—	119.6
55	480	770	12	330	100	22	120	180	—	106.0
56	486	707	47	315	73	19	127	150	—	101.7
57	435	718	72	317	57	19	125	70	—	99.9
58	467	674	72	310	61	20	120	70	—	98.6
59	482	549	20	250	66	19	124	77	481	98.4
60	400	622	26	234	58	19	88	70	493	96.3
61	311	743	22	203	59	18	105	70	403	97.4
62	325	812	16	327	55	20	100	70	476	99.3

(筆者注：化学成分は ppm 単位である)

スポンジチタンの商業取引においては、チタンの純度よりはむしろ代表品質特性の目安として、ブリネル硬さが使用されているが、この硬さは不純物影響の相互作用の結果、もたらされるものである。したがって不純物低下のために採られる技術は甚だ重要である。BHN は年度毎に低下の傾向を示している。また、不純物成分の恒常的傾向を示すものは、現行の原料、施設で生産技術の限度に近ずいたことを示している。

なお、生産技術に関連して、真に各パッチを代表する適正なサンプル採取法の確立による品質管理が、製造技術の改善を可能にしたといわれ、品質形成上、品質管理が当然のことながら重要作業であることを示している。次に資料としては古いものであるが、金属チタン原価構成をあげておく。

金属チタン原価構成	
項 目	%
原材料費	47.2
チタンスラグ	6.5
マグネシウム	15.7
塩 素	9.4
その他	15.6
電力費	18.4
労務費	18.5
経 費	15.9
合 計	100.0

さて、金属チタンの生産技術、製品品質に関連してその価格は、チタンの発

展, 利用を決定する重要問題であるが, この点どのような考察がされているか
みてみよう。

(9) 米国チタン工業成年期の形相		1955年にコロンビア大学 ケログ教授 (H. H. Kellog)
スポンジチタン価格	1.15ドル/ポンド	は, 米国チタン工業が成熟期 になった時の姿を次のように 予想した。 ⁽⁹⁾ そしてまた, 1955年にス
インゴット価格	1.30ドル	
圧延製品の平均価格	2.06ドル	
工場規模	3万トン級/年	
年間生産量	20万トンまたはそれ以上	

スポンジチタンの価格が 4.50 ドル/ポンドしたものが, 3年後の 1958年に 2.50
ドルまで下落した原因について, 生産会社が新しい低コストの製造方式を採っ
たのでない, 鉱石 (ルチール) や塩素が安くなったのでもない, 原料, 労賃の
低下でもない——これらはむしろ上昇している——, また, 生産量が非常に増
加して単価が下がったのでもないので (1955年 8,000 トン, 1958年 5,000 ト
ン), 唯一の結論はスポンジチタン生産会社がこの期間に如何にして, 収率を
上げるか, 労賃および維持費を切下げるか, また試験費を安くするか, などを
研究したからで, 附加的な原因として, 資金のこの3年間における回収もある
が, ノウハウがスポンジチタンの価格を 4.50 ドルから 2.50 ドルに切下げた
主因である, としている。そしてもはやノウハウを増すことによって, 大き
なコスト低下はできないので, 重要なコスト低下の手段としては, 生産の増加
——稼働率の完全利用⁽¹⁰⁾だけである, と述べている。

ところで, わが国のチタン工業の技術は, さきに記したようにクロール法を
基本として, これを開発発展したものである。この過程に, 急速に低下する米
国価格, 20% の輸入関税, 32年の米国防戦略変更による需要減, および 37
年の米国政府の C. C. C. (農務省商品金融公社)⁽¹¹⁾ 長期契約の完了に伴う需要
減などの不利な条件に遭遇している。このような経済条件の中でコストを切下
げながら, 世界的に優秀な品質を生産した技術改良は, 「もうこれ以上は量産
によるコストダウン以外に考える余地がないところまで合理化⁽¹²⁾されている」と
いわれている。以上のことなどから, クロール法の生産技術は開発されて既に

限界に到達しているようである。

現代の金属は炉を中心とした産業技術、つまり不完全な装置産業であるが、クロール法も当然これに該当し、バッチシステムである。量産、生産性、生産時間およびコストなどの点から、連続法、水素還元法、電解法など種々の技術が研究されている。現在使用されている生産技術は、ソ連でクロール法、米国ではクロール法、ナトリウム法および、電解法などである。⁽¹³⁾

クロール法でつくられたスポンジチタンは真空溶解炉で再び溶解して半製品インゴットチタンとする。これをアルミニウム電解精錬のように、陰極析出したスポンジチタンを電氣的溶解して直接チタンインゴットをつくる試みが行なわれているが、多数の未解決技術的問題をかかえている。溶融電解によるチタン製造が将来可能になった場合、電力エネルギーは生産コストの約 20% を占め、生産コストへの影響は大きい。ところが欧州での火力、水力による電力エネルギーの購入価格は早急に低下しそうにもないので、チタン生産コストの低下の期待できるのは、1980 年から 1985 年頃に高速増殖炉の利用が可能になる頃である。そして電解チタンの価格は 5.50 DM/kg、半製品は 14 DM/kg になるだろうといった経済予測が新技術と関連して立てられている。⁽¹⁴⁾ 企業は本来保守的である。したがって一度工業化された方法は簡単に新法の前には亡びないといった原則性もある。いずれにしても新技術は、合理化しつくされたクロール法に量産、生産性、コスト、品質などの点で勝ることが必要である。

(1) 星宮啓；近代商品学入門；邦光書房，昭和年 44 年，p 37.

(2) 1937 にクロールが試みたチタン製造は、アルゴンガスで満たした石英管内に、4 ボンドバッチ、モリブデンでライニングした鉄ルツボを置き、この中のマグネシウムを高周波加熱誘導で溶解してから、上部から四塩化チタンを滴下して還元した。できたチタンのブリネルかたさは 180 であった。W. J. Kroll: 前掲書。

(3) 横山桂三；日本鋳業会誌，84, 675, 1968.

(4) 野田敏男；同上，84, 1059, 1968.

(5) 日本では当初海岸砂鉄が豊富であることが、チタン工業育生の理由であったが、チタン鉱石としては低品位 (TiO_2 8~10%) で、またこれを鉄鉱石とチタン

- 鉍石に分離することも選鉱上困難であるので、チタン資源は現在オーストラリアから輸入している。科学技術庁資源調査会報告第44号。
- (6) JIS H 2151—1969.
- (7) チタニウム, Vol. 2, No. 10, p 41 昭和29年11月.
- (8) スポンジチタンの最近の価格, 米国約 \$1.30/lb, 日本約 \$1.10/lb, ソ連 \$0.90~1.00/lb. 野田敏男; チタニウム・ジルコニウム Vol. 16, No. 8, p 2~8 1968.
- (9) H. H. Kellog; E. M. J., April 1955.
- (10) H. H. Kellog; チタニウム, Vol. 6 No. 10, 昭和33年. 彼はチタン工業の将来を更に次のように述べている. チタン工業が成熟した時期の推定価格でさえも, アルミニウム, ステンレス鋼, 銅合金の価格の約3~4倍はする. だから現在安価な金属でもうまくいっているような用途に, チタンが進出することはありそうもない. ニッケル工業が今年産約20万トンの規模を持ち, 世界価格が0.74~1.05ドル/ポンドで, チタンスポンジの終局価格とそれ程大きな差異がないから, 将来像はニッケル工業と同程度の規模と価格を持つようになるだろう.
- (11) 米国政府戦略物資貯蔵計画による第一次対米輸出, チタン2,000トン総額約1,200万ドルの対日買付はC. C. C.を通じ, 余剰農産物とのバーター制で買付け, 国防動員本部に納入する. 東京朝日, 昭和30年8月5日.
- (12) 大阪特殊製鉄のスポンジチタン生産量1.5トン/月, 生産コストは1.75ドル/ポンドで, 米国の買付けが4ドル平均(東京新聞, 昭和27年6月20日)であったので, 初期には良い目にあったようだ. 1968年7月30日, 米国の関税委員会はソ連のスポンジチタン米国への輸入は, ダンピングであるという審決を下したが, これに先だつ公聴会においてスポンジチタンの製造コストは70~80セントであるという意見もでていた(金属時評; 1968年8月5日. チタニウム・ジルコニウム No. 432号).
- (13) 野田敏男; チタニウム・ジルコニウム, Vol. 16, No. 8, p 2~8, 1968.

溶融電解によるチタン生産コスト

箇 状	コ ス ト		計 算 の 要 素
	DM/t	%	
減 価 却	810	15.8	10%/年
労 力	90	1.7	1 技師, 2 技能者, 2 労働者, 1 助手
材 料	3070	57.7	1 トンチタンに対し1.67 トン TiO ₂ (1840 DM/t)
エネルギー*	1190	22.5	1 Kwk, 0.065 DM 相当.
雑	129	2.4	
計	5310	100	

* 加熱エネルギーを含めて 22 Mwh/t. 1 トンチタンの投資 8390 DM: 1 トンアルミニウム 2480 DM.

(14) K. D. Beccu; Chem. Ingr. Tech., 41 [4] 174, 1969.

3 品質の発展

材料商品に共通した客観的品質の発展法則として、まず単独でよりよい品質を持つものが見いだされ、次に複数の材料の結合によって新しい材料が誕生し、次に本質的な部分と表面的な部分に単独材料が分担する形態をとって改善される。⁽¹⁾ 現在、チタンは純金属、合金、クラッド板などの形態で市場開拓を目指して生産も行なわれている。チタン出現当初、アルミニウムおよび鉄の中間に位置する比重、耐熱性、耐蝕性などの優質性が期待され、その用途はペン先からエンジン、航空機材に渉る多方面を可能にする。⁽²⁾ ともいわれた。

ところで、平時市場を対象としたとき、チタンはなお商品使用の指導が生産者の課題になるいわゆるセールス・プロモーションの要素の多い商品である。⁽³⁾

金属チタン消費推移

年	展伸材消費 (1b) ×1000	展伸材の 総合価格 \$/1b	軍用機用 (%)	民間機用 (%)	スペース ミサイル 用 (%)	化学工業 用 (%)	その他 (%)
1951	150	20.00	100				
52	500	20.00	100				
53	2,225	20.00	100				
54	2,580	20.00	97	2	—	—	1
55	3,800	15.25	94	4	1	—	1
56	10,100	13.41	88	7	4	1	—
57	11,315	11.75	84	8	6	1	1
58	5,125	10.55	80	11	7	1	1
59	6,400	8.66	69	15	15	1	—
60	10,142	7.22	68	13	17	2	—
61	11,242	6.97	64	5	25	2	4
62	13,000	6.10	60	10	25	5	—
63	12,300	5.90	52	9	32	6	1
64	15,000	5.90	63	8	21	7	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	30,000	4.40	25	33	20	20	2
(推定)							

資料：TMCA、スポンジ統計（米鉱山局）、チタニウム Vol. 13, No. 10, 1965 より重引。

ここではまず金属としての特殊領域の確立と拡大について眺めてみる。

次表は米国における金属チタン消費の推移を示したものである。

米国において開発初期は専ら軍用市場であったことは既に記した。そしてここでは価格は二次的であった。表からは明らかに徐々にではあるが需用構造の変化がみられる。⁽⁴⁾ 1957年当時、チタン市場中48%は軍用機材であり、化学工業は僅か1%に過ぎなかったが、この割合は徐々に変化し、同じ航空機エンジンでも民間機用が伸びてきた。またアトラス、ミサイルへの採用を契機として、ミサイル需用が伸びて宇宙飛行のカプセルにチタンが採用されるようになった。化学工業も1965年には全市場の10%を占めるに至った。⁽⁵⁾ 1967年にはSST (Super Sonic Transportation) の1機当りのチタン展伸材の使用量は250トンといわれており、1970年代の米国チタン需要の最大のものともみられている。またSSTに先がけて登場するジャンボージェットのボーイング747は3トン前後、巨人輸送機C-5Aは1~2トンのチタンを使うものと推定されている。以上のほか、1970年以降は海水の真水化用、艦船用などの新規需要を迎えて需要量は一層拡大するものと予測されている。⁽⁶⁾

ところで、米国が先に記したように、チタンの高温における比強度に着目して航空機の主としてエンジン構造材料として開発された——したがって強力チタン合金の段階まで発展している——のに対し、わが国では純金属の段階で——合金は未だ試作の域を脱しない⁽⁶⁾——その耐蝕性を採りあげて、化学機器、装置用材料としての多方面の利用の開発が意図されている。これはわが国の航空機生産がようやく開発期に入った状態で、機体からエンジンまでの国産が行なわれていないから、特殊金属の使用量も多くない、という産業構造上の違いからきている。主なる用途別装置機器をあげておこう。⁽⁶⁾

①石油化学工業；反応装置，熱交換器，配管，②酢酸工業；蒸留器，蒸発皿，反応塔，熱交換器，③硝酸工業；蒸留プラント，④塩素ガス工業；タンク，化成器，オートクレーブ，バルブ，ポンプ，⑤二酸化塩素工業；紙バルブ，繊維の各種漂白装置，⑥合成化学工業；化学肥料，合成繊維の反応塔および槽，熱交換器，バルブ，⑦石油精製工業；蒸留塔，反応器，熱交換器，⑧金属電気化

学工業；電解用電極，アノードケース，バスケット，熱交換器，ポンプ，電解槽

以上のうち，塩素や塩化水素を導入するプロセスの多い石油化学工業に向くのは，チタンが塩素および塩化物に対してステンレス鋼に勝る耐蝕性があるからで，装置の巨大化を加味して広い利用分野が拡げている。⁽⁷⁾

生産技術により形成された品質は，評価されなければならない宿命にあるし，また評価されるべく形成されたともいえる。消費者は購買に当ってバイイング・ポイントの角度から，使用に当っては使用価値的に品質評価を行なう。そして商品品質の評価は価値意識対品質における価値判断によってなされる。⁽⁸⁾ここでは使用者側の評価をみてみよう。

装置，機械などの生産手段はまた技術と経済との関係の具体化したものである。大量生産体制が確立されると，材料コストの僅かな違いが全体では企業の収益に大きな影響をおよぼす。そこで材料コストを低減させるため，購入価格や原単位の切下げを図るだけでなく，より総合的な観点で材料コストの節約が行なわれる。材料コストの低下には，低廉な材料を選択できるように，設計や加工法そのものを改良することさえ行なわれる。⁽⁹⁾

さて，石油工業は周知のようにプラント産業である。このプラント設計上の材料採用決定要因——設計者の価値判断——は，①安価な材料で製作して，適宜取り替える，②高価でも長期にわたって耐蝕性の安定した材料を用いる，という2点にかかっている。ところで，石油産業では資金の回転という以外に，技術進歩が著しいのでプラントの耐用年数を短縮する傾向があって，一般に初期投資額は抑制される。したがって石油プラントは5～10年程度の寿命が保証されればよいので，ステンレス鋼の数拾倍の耐蝕性というチタンも不用で現在のチタン価格ではなお「貴金属」である，という指摘もある。⁽¹⁰⁾つまり設計の品質に対して，それを超える優質性は一転して過剰品質となり，有能ではあるが役に立たない現象を生じる。商品の成長要因が品質/価格であるなら，なお成長要因を欠いているといえる。また脆さ，かたさなど異質的なものでも，同じ次元の量として働らく利害系列の量とは，その根底には常に価格性が存在している。⁽¹¹⁾

次表はわが国金属チタンの近年の用途別消費を示したものである。⁽⁶⁾

チタン用途別消費 単位トン (1~12月)				
年	圧延材	その他	輸出	計
35	373	847	1,729	2,949
36	539	—	1,646	2,185
37	643	233	1,005	1,881
38	844	74	1,208	2,126
39	1,500	32	1,574	3,106
40	1,118	100	3,316	4,534

国内需要の開発が進められているが、なお輸出部分が大きく、国内需要量は少ない。⁽¹²⁾

米国のチタン需要の90%は軍用と宇宙産業で占めている。いつの時代でも技術を——したがってそれによって創られる商品を——発展させ

る社会的環境は重要である。国内民需の伸長には競合物の多数展開する中で、なお克服されねばならない問題が多く、⁽¹³⁾民需に対する品質発展は特殊領域の模索期にあるようである。そして研究開発の時間的短縮化の今日にあっても、鉄、アルミニウムの辿った道を考えるなら、それは決して遅いとはいえないであろう。

む す び

新しい品質を持った商品の創出が経済発展の原動力であるなら、またその基底には生産技術があるといってよい。そして現実には技術は常に資本の増殖という諸関係の中に位置をもっている。発明の産業的成功には時代の恩恵もある。わが国のチタン発展には技術問題よりも遙かに社会科学的拘束力が大きいといわれる所以も1つはここにあるようである。知識、情報の入手で後発の利点はあったであろうが、ソ連のチタン開発の内容は注目すべきものがある。いずれの国においてもチタン産業は年齢的に若い。質的变化の可能性を多分に潜めたチタンの品質発展は——そして民需の中に名称の転義であるタイタン、巨人として成長するのは——まさに体制のあり方と活用の意欲の強弱の中にかかっているとみられる感が深い。

スポンジチタンはチタン金属の素材に過ぎない。加工技術の大きな進歩が材料競争におけるアルミニウムの優位をもたらし、アルミニウムの需要拡大に大きな寄与をなしている。そこでこの部面にも立ち入り検討すべきであるが、紙

数の関係もあり触れなかった。

(昭和 44 年度日本商品学会関東支部大会発表)

- (1) 星宮啓; 前掲書, p 76.
- (2) Fortune; may 1949.
- (3) 山口辰男; 商品研究, 10 卷 p 21, 1949 年. 黒岩俊郎; 前掲書, p 143.
- (4) チタンに従事している自由諸国の人間は, 殆んど総ての用途は依然として軍需であり, 米国の軍需はチタンに対しては全く気まぐれであって, コンスタントな延びがでたということは「門外漢」の話とししか受取らない. 数回にわたる寸善尺魔の結果においてつくられた概念である, という声もある (三井三郎; チタニウム・ジルコニウム, Vol. 14 No. 4 p 88-94, 昭和 41 年). 対米従属の苛酷な経済条件の中に企業責任者として生き抜いた者の言葉として理解に難くはない.
- (5) 住友商事軽金属課; チタニウム・ジルコニウム, Vol. 14 No. 4, p 17 昭和 41 年.
- (6) 科学技術庁資源調査会; 前掲書.
- (7) このほか, 熱線膨張係数が小さいこと (18—8 ステンレス鋼の約半分), 電気抵抗はアルミニウムの約 2.3 倍, 18—8 ステンレス鋼の 2 倍, 加工性がよいことなどを利用して, コンデンサーマイクロホン, ボールマイクロホンなどの電気機器関係にも使われる. (チタニウム・ジルコニウム Vol. 11, No. 10, 1963).
- (8) 星宮啓; 前掲書, p 51.
- (9) 佐藤真住; 現代のアルミニウム工業, 東洋経済新報社, p 87.
- (10) 石井正義; 工業レアメタル, No. 29, p 39-43 昭和 39 年. チタンメーカーはチタン価格をステンレス鋼に近づける努力をしているが, このためにはインゴットから展伸材にする際の歩留りを, 現在の 50~60% から, 70~80% に高めることが先決だといわれている, 高尾善一郎; 工業レアメタル No. 29 同上. ステンレス鋼が 1 ポンド当り 1.50 ドルで販売しているから, チタンの将来はないというようなこともクロールは言っている. チタニウム, No. 14, p 2 昭和 29 年 5 月.
- (11) 杉田元宜; 商品研究, 14 卷 p 12, 1953 年.
- (12) 昭和 40 年頃からの輸出増加は, 米国チタン産業がベトナム戦争の余波もあって, 第 2 のブームを迎えたためである. 三井物産非鉄金属チタン課; チタニウム・ジルコニウム, Vol. 14, No. 5, 1966. 1966 年の国内需要はスポンジチタンの総出荷量の約 49% に達した. 同上, Vol. 14. No 4, 1966.
- (13) 民需に伸長するためには, 加工部門まで持った専門メーカーの育成, チタン

(100)

一橋論叢 第63巻 第1号

製品が商品のあり方の形式の発展として問屋物になることなどあげられている。いずれも資本に関するもので、チタンの発展には技術問題よりも遙かに社会科学の拘束力が大きく、投資力が大きくなると、それを実用化できるには、その国の政治経済のあり方がはっきり問題になるといわれている。三井三郎；前掲書。

(一橋大学専任講師)