

# チタン製造コスト低減に関する調査研究 報告書

## —要 旨—

平成17年3月

財団法人 機械システム振興協会  
委託先 財団法人 金属系材料研究開発センター

**KEIRIN**



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

## 序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 放送大学 副学長 中島尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「チタン製造コスト低減に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人 金属系材料研究開発センターに委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成17年3月

財団法人機械システム振興協会

## はじめに

チタン合金は、鉄やアルミ、ステンレスなどの汎用金属材料に比べて非常に高価であるため、その用途は限られています。

しかしながら、チタンは他の素材に比べて

- ①軽量：比重が 4.5 で鉄の 60%の軽さである。
- ②高耐食性：海水中で白金に匹敵する耐食性を持ち、ステンレス鋼より優れている。
- ③高比強度：同じ重さではアルミの約 6 倍、鉄の約 2 倍の強度を持つ。

無害、生体適合性：金属アレルギーなどがなく、人体にやさしい安全な金属で、人工骨などに利用されている。

などの多くの特性を持っており、技術の発展や消費者ニーズの多様性などから生じる要求に応える次世代の構造用材料等としての利用が期待されています。

本調査研究は、上記の期待に応えるべく、チタンの工業的製造プロセスにおける製錬から製品製造まで含めた総合的な製造コスト上の課題を調査し、コスト低減のための製造因子を明らかにするとともに、今後必要となる技術開発課題を抽出することを目指すものであります。

本報告書の発行にあたり、ここにあらためて独立行政法人 大学評価・学位授与機構・佐久間委員長をはじめとする委員各位、並びに財団法人機械システム振興協会および、ご指導とご協力をいただいた多くの関係者の方々に深く感謝申し上げます。

平成 17 年 3 月

財団法人 金属系材料研究開発センター

# 目 次

序

はじめに

1 . 調査研究の目的	1
2 . 調査研究の実施体制	2
3 . 調査研究成果の要約	5
<b>第1章 チタンの製錬プロセス技術の現状とそのコスト上の課題</b>	<b>5</b>
1 - 1 チタン製錬プロセス技術の現状	5
1 - 1 - 1 チタン原料	5
1 - 1 - 2 スポンジチタンの製錬の歴史	5
1 - 1 - 3 クロール法による現在のチタン製錬	6
1 - 1 - 4 クロール法によるスポンジチタンの生産	6
1 - 2 新しいチタン製錬法	9
1 - 3 新しいチタン製錬方法の比較	14
<b>第2章 チタンの成形プロセス技術の現状とそのコスト上の課題</b>	<b>15</b>
2 - 1 溶解・鋳造プロセス技術	15
2 - 2 加工技術	18
2 - 3 二次加工技術	27
<b>第3章 新技術の導入によるコスト変化</b>	<b>29</b>
3 - 1 従来プロセス技術のコスト上の課題と新技術	29
3 - 2 新技術導入による製品コスト変化の推定	29
3 - 3 文献調査によるチタンの用途拡大とコストダウンの調査	30
<b>第4章 チタン価格低減による導入産業分野の変化</b>	<b>32</b>
4 - 1 企業へのアンケート調査	32
4 - 1 - 1 アンケート方法	32
4 - 1 - 2 アンケート結果	33

4 - 2	チタン価格低減による導入産業分野の変化	53
4 .	調査研究の今後の課題及び展開	57
4 . 1	今後の課題	57
4 . 2	今後の展開	57



## 1. 調査研究の目的

軽量で耐食性に優れるチタン合金は、次世代の構造用材料としての利用が期待されている。特に、海洋を中心とした構造物(発電所の熱交換器や海水熱発電、橋梁など)ではその耐食性の高さから、チタンへのニーズが高まっている。また、チタンは生体適合性が評価され、人工関節などの医療用材料としての応用も期待されている。

チタンは化学的に活性であることから、その製造コストは鉄やアルミなどの汎用金属材料に比べて非常に高価である。このため、現状ではその用途は、主として高価でも使用せざるを得ない航空宇宙材料などの高品質を追求する部材に限られている。

しかし、今後需要の増加が期待される海洋構造物などの分野では、航空宇宙材料のような高品質の材料は必要とされず、チタンの特性を損なわない程度の純度で安い材料の供給が求められている。また、近年の大学や国公立研究機関の研究成果として、チタンの新製錬法や低温成形技術などが発表されており、これらの新技術を導入することで製造コストの大幅な低下が期待される。

そこで、本調査研究ではチタンの工業的製造プロセスにおける製錬から製品製造まで含めた総合的な製造コスト上の課題を調査し、コスト低減のための製造因子を明らかにするとともに、今後必要となる技術開発課題を抽出することを目的とする。



## 2. 調査研究の実施体制

### (1)実施体制と役割分担

図1に示すように、財団法人金属系材料研究開発センター内に本事業を総括運営する機関として、特別に「チタン製造コストに関する低減調査委員会」を設置し、チタン協会ははじめ関連団体、有識者などによる調査を実施し、当初の目的を達成すべくこれを推進した。

### (2)業務分担

チタンの(1)製錬プロセス技術、(2)成形プロセス技術の現状とそのコストの調査については神鋼リサーチ(株)に再委託を行った。

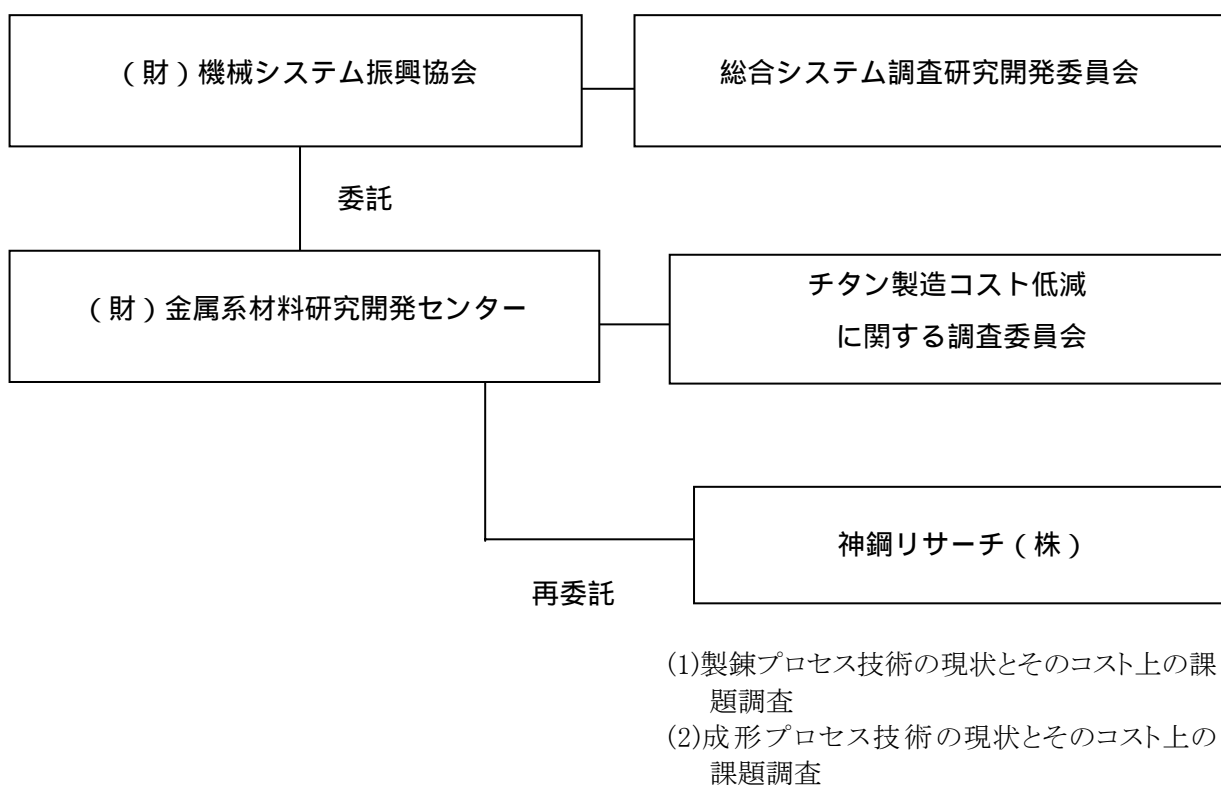


図1 調査の実施体制

(2)総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 副学長	中島尚正
委員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤正巖
委員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣田 薫
委員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤岡健彦
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	太田公廣
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャー	志村洋文

(3)チタン製造コスト低減調査委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	独立行政法人 大学評価・学位授与機構 教授	佐久間 健 人
委員	住友チタニウム株式会社 技術部 部長	小笠原 忠 司
委員	東邦チタニウム株式会社 チタン統括本部 主席技師	小瀬村 晋
委員	大同特殊鋼株式会社 技術開発研究所 プロセス研究部 主任研究員	芝 田 智 樹
委員	新日本製鐵株式會社 チタン事業部 部長	小 田 高 士
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 相制御材料研究グループ 主任研究員	尾 崎 公 洋
委員	株式会社神戸製鋼所 チタン本部 技術担当部長	福 田 正 人
委員	社団法人日本チタン協会 専務理事	秋 山 俊一郎

### 3. 調査研究の内容

#### 第1章 チタンの製錬プロセス技術の現状とそのコスト上の課題

##### 1-1 チタン製錬プロセス技術の現状

###### 1-1-1 チタン原料

チタンは地殻中の元素の存在順位は水素に次ぐ10位でクラーク数が0.46と高いことから解るように、多くの鉱物中に存在する。金紅石(天然ルチル、 $\text{TiO}_2$ 含有量95~100%)やチタン鉄鉱(イルメナイト、 $\text{TiO}_2$ 含有量52.7%)は主に海岸砂鉱床に存在し、広く利用されている。世界のルチル埋蔵量は8,700万トン、イルメナイト埋蔵量は73,000万トンとされており、ルチルの39%にあたる3,400万トン、イルメナイトの34%にあたる25,000万トンがオーストラリアに埋蔵されている。また、南アフリカ共和国にルチルが2,400万トン、イルメナイトが22,000万トン埋蔵されており、この他、インド、ベトナム、ノルウェー、カナダ、米国などで産出する<sup>1)</sup>。世界のチタン鉱石の埋蔵量は天然ルチルとイルメナイトを合わせ $\text{TiO}_2$ 量に換算して1991年頃で4.6億トン、2001年では5.3億トンと増加している。これは探査、探鉱技術の進歩によるものでありと考えられている。現在の全世界の鉱石使用量が $\text{TiO}_2$ 量に換算して4~5百万トン/年であることを考えると今後100年は資源枯渇の心配は無いと言える<sup>2)</sup>。

天然ルチル、イルメナイトは物理的方法により濃縮・採取される。天然ルチルは資源量が少ないため、イルメナイトを化学的方法により $\text{TiO}_2$ 濃度を向上させたUGI(Up Graded Ilmenite)の使用量が圧倒的に多い。UGIの $\text{TiO}_2$ 純度は93~96%程度であり、天然ルチルと遜色ない。

日本に2002年に輸入されたチタン鉱石は385千トンで、オーストラリアから152千トン(40%)、ベトナムから116千トン(30%)で、この2国で70%を占めている。この他、カナダ、南ア、インドなどから輸入されている<sup>1)</sup>。

###### 1-1-2 スポンジチタンの製錬の歴史

1795年にドイツの科学者クラプロートによってルチル鉱から新しい金属であるチタンが発見された。しかし、金属チタンとして取り出すことはできなかった。1910年、アメリカの科学者ハンターは四塩化チタンを金属ナトリウムで還元して、チタンを製錬することに成功。その製法は『ナトリウム還元法』又は『ハンター法』と呼ばれ、これによって金属チタンが初めて誕生することになった。日本でもハンター法によりチタンの製造が行われていた。

ついで1946年、ルクセンブルクの冶金学者クロールが、チタン鉱石(主にルチル)の中の酸化チタンを塩素ガスと反応させることにより四塩化チタンとしたのち、マグネシウムを還元することによって金属チタンをつくり出すことに成功。これは『マグネシウム還元法』又は『クロール法』と呼ばれている製法で、現在、スポンジチタン製錬に採用されている。

###### 1-1-3 クロール法による現在のチタン製錬

1946年に米国デュポン社により世界初の工業的チタン製造が開始された。現在、表1に示すように世界の7社でクロール法によりスポンジチタンの製造が行われている。日本国内では1952年に大阪チタニウム製造株式会社(現在の住友チタニウム株式会社)でチタン製錬が始まり、ついで1954年に東邦チタニウム株式会社でも生産が開始された。現在は2社よって世界全体の約30%を生産している。

表1-1 世界のスポンジチタン生産会社・生産能力<sup>3)</sup>

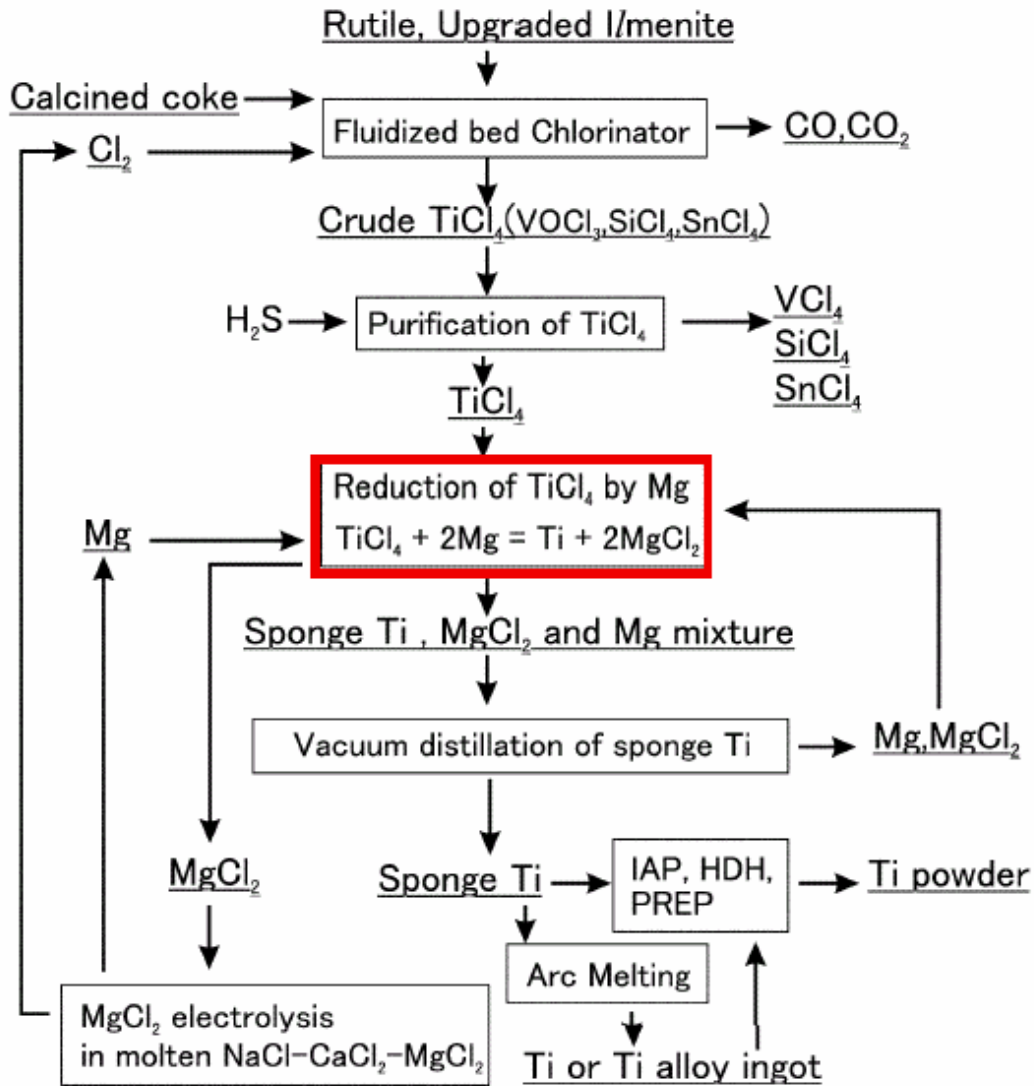
生産国	メーカー	生産能力(トン/年)	備考
アメリカ	Timet	8,600	
日本	住友チタニウム	18,000	
	東邦チタニウム	13,000	
CIS	AVISMA(ロシア)	25,000	
	UKTMK(カザフスタン)	18,000	
	ZTMK(ウクライナ)	6,000	
中国	Zhunyi(遵義)	3,000(*)	(*)さらに増強との情報あり。
	Fushun(撫順)	2,000	
	合計	93,600	

#### 1-1-4 クロール法によるスポンジチタンの生産

クロール法によるスポンジチタンの生産は次の4つのプロセスに大別される。

- (1)  $TiCl_4$ の製造: UGIなどのチタン源と塩素、コークスから四塩化チタンを製造する。
- (2) 還元、分離:  $TiCl_4$ とマグネシウム(Mg)を反応させ、スポンジチタンを生成し、さらに副生物の塩化マグネシウム( $MgCl_2$ )を分離する。
- (3) 破碎・梱包: スポンジチタンを破碎し、粒状にして客先のニーズ(成分、粒度)に従い、ブレンドし、ドラム缶に梱包する。
- (4) 電解: 副生物の $MgCl_2$ を電気分解し、Mgと塩素を生成する。なお、生成したMgと塩素は還元・分離、及び $TiCl_4$ 製造で使用される。

図1-1、図1-2にスポンジチタンの製造工程フローを示す。



- \*IAP: Inert gas Atomization Process(不活性ガスアトマイズ法)
- \*\*HDH: Hydride-De-Hydride(水素化脱水素法)
- \*\*\*PREP: Plasma Rotating Electrode Process(プラズマ回転電極法)

図1-1 スポンジチタン製造工程フロー<sup>4)</sup>

クロール法は高純度のチタンが得られること、生成したTiと反応浴との分離が容易であること、還元で使用した塩素とマグネシウムのサイクルが確立しているという優れた点があるが、バッチプロセス(10トン程度/バッチ)で反応から冷却までに約10日を要し、生産性が悪いこと、エネルギーを多量に消費すること、バッチ内で品質のバラツキがあること、プロセスが複雑であるなどの課題がある。また、長期にわたって他のチタン製錬方法を淘汰してきたため、効率や生産性の改善は極限に近い。そこで、現在でもさまざまな製錬技術が提唱され、現行のクロール法に替わる新しい製錬法の研究開発が最近、活発になっている。チタン製錬方法は60数種にも及ぶといわれているが、表1-2にこれまで開発されてきた代表的な各種チタン製錬法を示す。

表1-2 各種チタン製錬方法<sup>3),5),6)</sup>

時期	名称	国名	人・団体	方法
1910年	Hunter法	アメリカ	Hunter	TiCl <sub>4</sub> をNaで還元
1925年	Van Arkel法	ポーランド	Arkel	TiCl <sub>4</sub> をIで還元後、加熱フィラメント上へ析出
1946年	Kroll法	ルクセンブルグ	Kroll	TiCl <sub>4</sub> をMgで還元
1950年		アメリカ	National Lead	バスケット陰極方式によるTiCl <sub>4</sub> の熔融塩電解
1956年		アメリカ	Bureau of Mines	TiCl <sub>4</sub> とTiでTiCl <sub>2</sub> 化、TiCl <sub>2</sub> の熔融塩電解
1959年		日本	竹内(東北大)	TiCl <sub>4</sub> をMgで気相還元
1963年		アメリカ	New Jersey Zinc	ニッケル金網陰極によるTiCl <sub>4</sub> の熔融塩電解
1969年		アメリカ	Dow Howmet	TiCl <sub>4</sub> の熔融塩電解
1974年		アメリカ	Halomet	TiCl <sub>4</sub> とMgの高温反応、液体Tiの連続回収
1982年		フランス	PUK	槽外TiCl <sub>3</sub> 還元と熔融塩電解
1983年		アメリカ	Albany Titanium	Na <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub> をAl-Znで還元、Znを揮発分解
1989年		アメリカ	Bureau of Mines	Ilmenite→TiF <sub>4</sub> →CaTiF <sub>6</sub> (Ca)→Ti
1990年	ミネルバ法	日本	日本チタン協会	TiCl <sub>4</sub> とMgの連続反応、直接インゴット回収
1991年		日本	池田、前田(東大)	TiO <sub>2</sub> のAl還元とEB溶解によるAl揮発分解
2000年	FFC法	イギリス	Fray, Farthing & Chen	TiO <sub>2</sub> 電極、CaCl <sub>2</sub> 浴による熔融塩電解
2001年	OS法 (Mark I ~IV)	日本	小野、鈴木(京大)	TiO <sub>2</sub> 粉のCaCl <sub>2</sub> 浴による熔融塩電解
2001年		イタリア	Ginatta	CaF <sub>2</sub> 浴にTiCl <sub>4</sub> を吹き込み、電解
2002年	JTS法	日本	日本チタン協会	CaCl <sub>2</sub> 電解によるCaの析出、TiCl <sub>4</sub> の還元
2002年	EMR/MSE法	日本	岡部(東大)	CaCl <sub>2</sub> 浴による熔融塩電解、析出したCaを液体合金として保持し、別途還元
2004年	Armstrong法	アメリカ	International Titanium Powder	TiCl <sub>4</sub> ガスを気体Naで還元、Ti粉末を析出
2004年		アメリカ	Josep&Whellock	TiCl <sub>4</sub> ガスをH <sub>2</sub> ガスなどで還元、Tiを水冷銅で回収

## 1-2 新しいチタン製錬法

クロール法に代わる新しい新製錬法として熔融塩を用いた製錬法、気相を用いた製錬法の代表的なものを示す。

### 〔1〕 OS法(小野、鈴木)

熔融CaCl<sub>2</sub>を電気分解してCaを生成し、CaCl<sub>2</sub>浴中に含まれるCaをTiO<sub>2</sub>粉末に作用させ、熱還元によりTiを製造する方法である。図1-2に示すように網状の陰極近傍にCaOの分解により生成Caが溶解し、TiO<sub>2</sub>粉末と反応する。

生成したCaOはCaCl<sub>2</sub>に溶解して酸素イオンは陽極の炭素と反応してCO,CO<sub>2</sub>として系外に排出される。

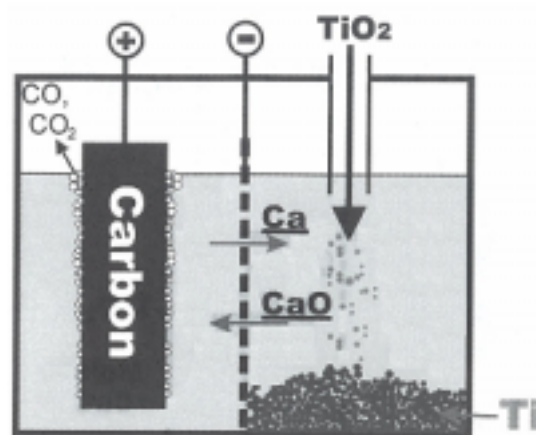
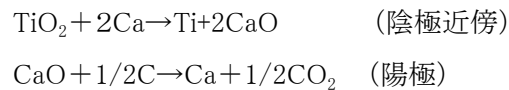


図1-2 OS法の基本概念図(OS-Mark I)<sup>5)</sup>

本方法の課題は陽極で発生するCO,CO<sub>2</sub>が速やかに排出されないと陰極近傍のCaと反応し、熔融塩中に炭素を遊離しやすく、生成したTiと反応する可能性があることで、炭素などの含有量の増加は展延性を損ねる問題がある。OS法は連続化を含め、いくつかの改良方法が提唱されている。図1-3は連続化を意図した工業化モデルで、投入したTiO<sub>2</sub>を凝固した塩とともに上方に取り出す。炭素電極は消耗するため、左右に移動して電極間距離を調整するようになっている。このようなユニットを多数直列につなぎ、連続的な操業を目指している。いっぽう、炭素電極に代わって非消耗電極が開発されれば電極間距離の制御や炭素汚染の心配がなくなる。



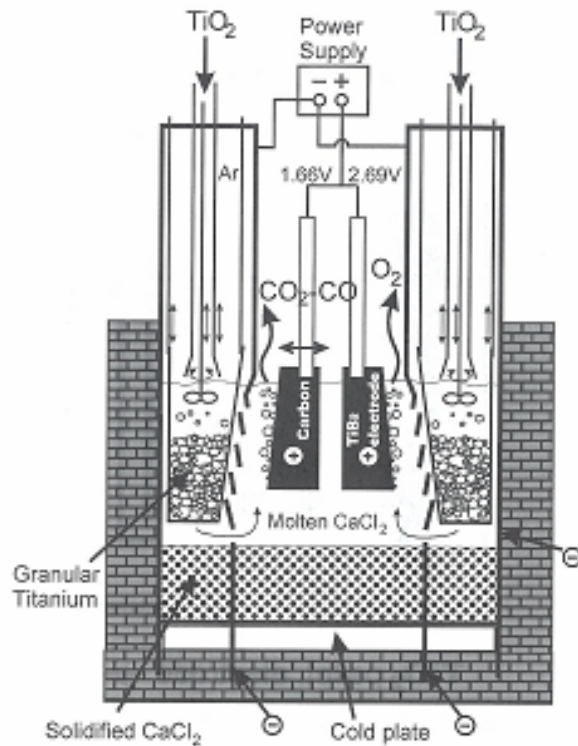


図1-3 OS法の工業化モデル(OS-MarkIVd)<sup>5)</sup>

〔 2 〕 FFC法(Fray, Farthing & Chen)

TiO<sub>2</sub>粉末を焼結成形して作成した板を陰極とし、陽極に黒鉛を用いて、CaCl<sub>2</sub>浴中で電気分解して、直接金属板を得る方法である。

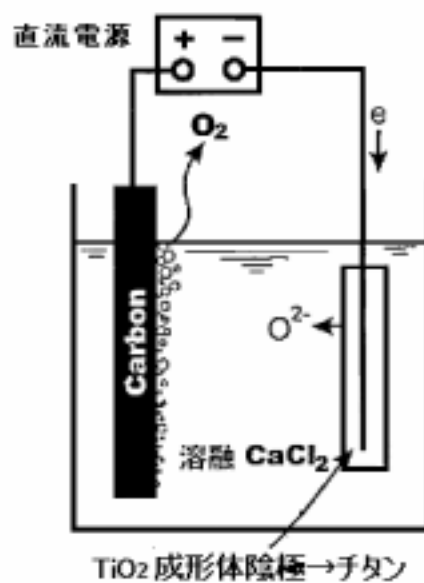
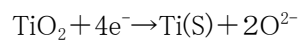


図1-4 FFC法<sup>8)</sup>

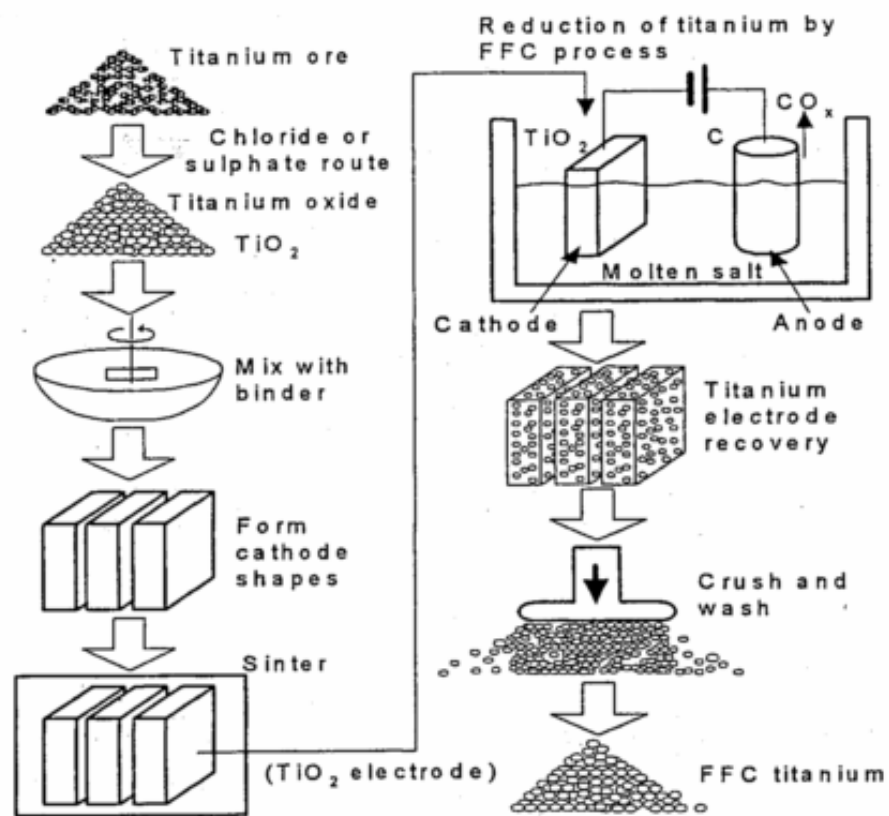


図1-5 FFC法の工程<sup>7)</sup>

FFC法はTiO<sub>2</sub>を電極にするので電流効率が良くなる。また、プロセスが簡単であるが、陰極の焼成に余分の労力と費用を要する点、通電量が少なく反応速度が遅い点、長時間の緩慢な反応のため、焼結したチタンからの熔融塩の洗浄が困難な点などの課題がある。2003年にはDARPA (米国国防省高度研究計画局)がFFC法の研究開発のため米国最大のチタンメーカーであるTIMET社を中心とする研究グループに研究費の拠出を決定している。

### 〔 3 〕 エレクトロスラグ溶解還元法

竹中ら<sup>8)</sup>、およびカナダのQuebec Iron and Titanium社<sup>9)</sup>などは図1-8に示すように、CaF<sub>2</sub>-CaO等を用いてエレクトロスラグ溶解法により、TiO<sub>2</sub>を溶解させた導電性熔融塩をつくり、炭素電極で通電してTiを還元する方法を提案している。

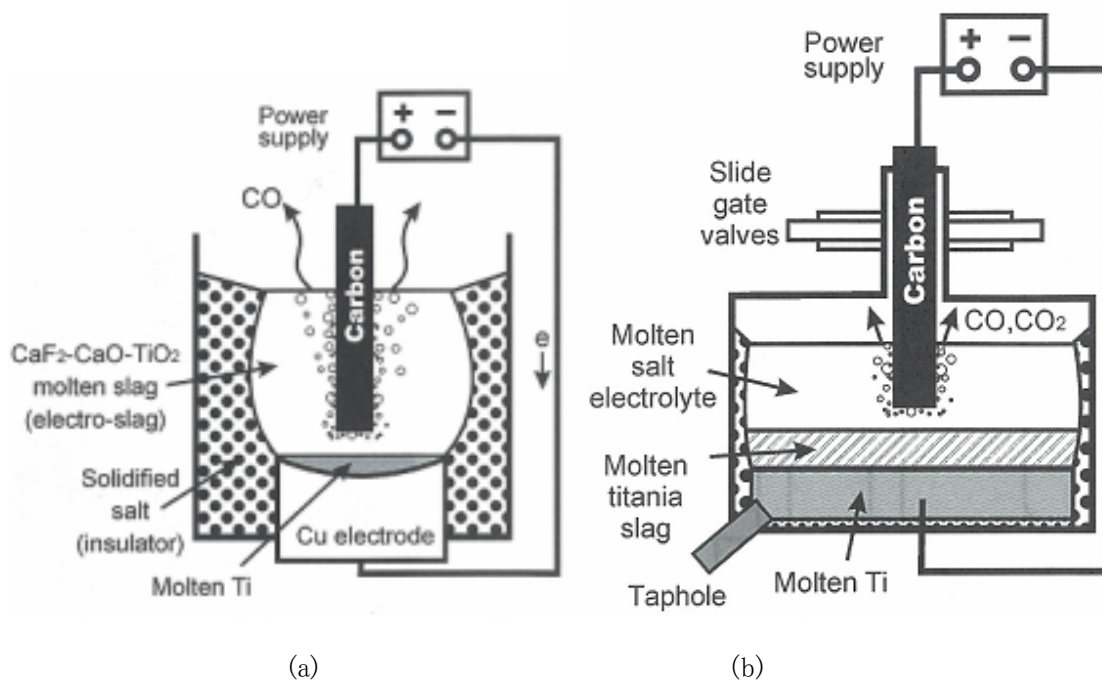


図1-6 エレクトロスラグ溶解還元法

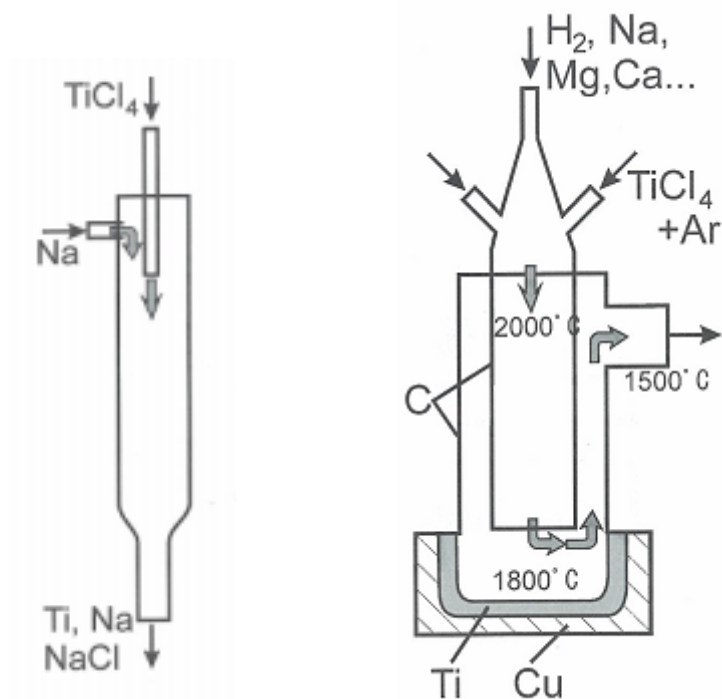
((a)竹中<sup>8)</sup>、および(b)カナダのQuebec Iron and Titanium社<sup>9)</sup>)

析出したTiは他の方法のように固体粉末やデンドライトなどではなく、液体であるため、鉄鋼溶銑のように熔融したTiを連続的に排出できる可能性を秘めている。また、現行の工程のスポンジチタンの後工程である溶解が省略でき、エネルギー削減に寄与できる。現状では容器の問題のため、TiCやTi-Fe合金が得られていると報告されている。炭素電極のため、炭素汚染の課題も残る。

#### 〔 4 〕 気相を用いた製錬法

アメリカのInternational Titanium Powder社はTiCl<sub>4</sub>のNa還元であるHunter法を改良したArmstrong法を提唱している<sup>10)</sup>。Armstrong法は図1-9(a)に示すように円筒型容器内中央のノズルからTiCl<sub>4</sub>ガスを噴射し、気体のNaと反応させてTi粉末を得る方法である。Ti粉末の連続的な製造が可能である。生成物からは過剰なNaを回収し、循環して使用する。わずかに残存するNa、NaClも湿気式処理で取り除く。

アメリカのJosephとWhellockは図1-7(b)に示すようにTiCl<sub>4</sub>ガスを水素ガスなどと反応させ、Tiを還元し、Ti液体として水冷銅で回収する方法<sup>11)</sup>を提唱している。TiO<sub>2</sub>の純度向上は困難であるが、TiCl<sub>4</sub>のガスでは蒸留の繰り返しで純度を高めることができる。また、これまでの方法のように炭素電極を使用しないので炭素汚染の問題はない。しかし、気体還元では体積の割りに生成物量が少なく単位時間当たりの収量は少ないこと、微細なチタン粉末では回収物と副生成物の分離が困難な問題がある。



(a)Armstrong法<sup>10)</sup>

(b)Josephらの特許<sup>11)</sup>

図1-7 気相を用いた製錬方法の例

#### 〔 5 〕 JTS法(日本チタン協会)

チタン協会では、平成14年7月より新製錬法開発委員会(千葉工大/河部義邦委員長)を設立し、現行のクロール法に比べコスト、生産性の面で優れた「新製錬方法(JTS法)」の検討を重ねて来た。製錬方式、ならびに開発費用について昨年3月の理事会での承認を経て、国への助成金申請活動を行って来た。

経済産業省では、この新製錬方法(JTS法)が製錬のための総消費電力を抑制し得る技術であること、また生産される安価なスポンジは「海洋温度差発電」、「地熱発電」等の部材への適用研究を通して二酸化炭素をほとんど発生させないグリーン電力等のエネルギー源の多様化に資することから、「高機能チタン合金創製プロセス技術の開発プロジェクト(4カ年の計画)」としてH17年度の概算要求(総事業費1億円、補助額5千万円(補助率1/2))を行った。

新製錬の開発目標は以下のように掲げられている。

- ①チタンの酸化物や塩化物をカルシウムの熱還元で連続的に効率よく製錬する方法を開発する。
- ②スポンジの品質は工業用純チタン(JIS2種相当)を目標とし、製造コストはインゴット段階で現行品の約70%程度を目指す。

また、用途開拓の目標として、展伸材メーカーなどは、新製錬法により製造されるチタンを使用した合金設計や成型加工技術の開発を行い、グリーン電力としての「海洋温度差発電」、「地熱発電」、「燃料電池」等の部材への用途拡大を目指すとしている。

### 1-3 新しいチタン製錬方法の比較

新しいチタンの製錬方法の研究開発が活発に行われている。しかしながら、製造されるTiの純度、生産性、製造コストなどの点から、永年にわたって効率や生産性の改善が行われてきたクロール法に打勝つには技術の完成度、コストなどの面から相当の改善が求められる。

これまでに研究開発されてきた各種製錬方法の中で、クロール法にとって替わると注目されている技術は金属Caを還元を利用するOS法、FFC法、JTS法であると考えられている。

#### 参考文献

- 1) World Metal Statistics Yearbook 2003
- 2) 前川豪智: Titanium“チタン揺籃期から成長期へ”、(社)日本チタン協会, (2002), p.51
- 3) 第11回チタン講習会 ((社)チタン協会主催)資料(2004年11月16日)
- 4) 岡部 徹(東京大学生産技術研究所)HP(<http://okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/docs/eveningforum.pdf>)
- 5) 鈴木亮輔: チタン、Vol.52(2004)10, p.9
- 6) 鈴木亮輔: 金属、Vol.73(2003)5, p.21
- 7) Z.Chen, D.J.Fray and T.W.Farthing: nature, 407(2000), p.361
- 8) T.Takenaka, T.Suzuki, M.Ishikawa, E.Fukasawa and M.Kawakami: Electrochemistry, 67(1999) p.661
- 9) F.Cardarelli: World Patent, WO 03/046258 A2(2003)
- 10) R.P.Anderson, W.Ernst, L.Jacobsen, D.Kogut, J.M.Steed: Proc.Cost-Affordable Titanium Symposium. Dedicated to Prof.H.F.Flower, TMS(2004), p.121
- 11) A.A.Joseph, J.G.Whellock: US Patent, 2004/0103751 A1(2004)

## 第2章 チタンの成型プロセス技術の現状とそのコスト上の課題

### 2-1 溶解・鋳造プロセス技術

スポンジチタンは溶解・鋳造工程を経て、インゴットが製造される。現在、VAR(Vacuum Arc Remelting)がチタン溶解の主流であるが、スクラップ処理の問題や、高度な品質要求に応えるため、VAR以外の方法が数多く開発され、実用化されている。

チタンは、融点が1700℃と高く、しかも、酸素・窒素との化学親和性が極めて強いという特性があるため、他の金属に有効な耐火材を炉材として使用することができず、またAr、He等の不活性雰囲気若しくは真空中において溶解されなければならない。このため溶解時の熱源として真空アーク、プラズマ、電子ビーム、高周波誘導等が用いられ、溶解時の雰囲気としては真空或いは不活性ガス雰囲気が、また溶解容器の炉材としては水冷銅ルツボが用いられる。表2-1にチタンの各種溶解方法の特性比較を示す。

表2-1 チタンの各種溶解方法の特性比較<sup>1)</sup>

	消耗電極式真空アーク溶解法 (VAR)	電子ビーム溶解法 (EBM)	プラズマアーク溶解法 (PAM)
熱源	アーク	電子線衝撃	プラズマアーク
溶解時の真空度	1次溶解のみ サイドチャージ 0.1Pa～大気圧のAr雰囲気 通常VAR 0.1～1Pa	0.01～0.1Pa	0.1Pa～大気圧のAr雰囲気
成分のコントロール	消耗電極中に合金元素を均一に添加しておけば、合金成分のコントロールは良好	蒸気圧の高い成分(Al等)のコントロールには特別の工夫が必要	比較的良好
プール形状	深い	浅い	浅い

#### [1]VAR法

消耗電極式真空アーク溶解法は、電極と熔融金属との間にアーク(大電流低電圧)を発生させ、これを熱源とする溶解法で、電極には溶解材自体を消耗電極とする。図2-1、図2-2に示すように消耗電極はスポンジチタンを主体に母合金、チタンスクラップなどと混合した原料をプレスしてブリケットまたはコンパクトを作成し、これをプラズマアーク溶接したものである。

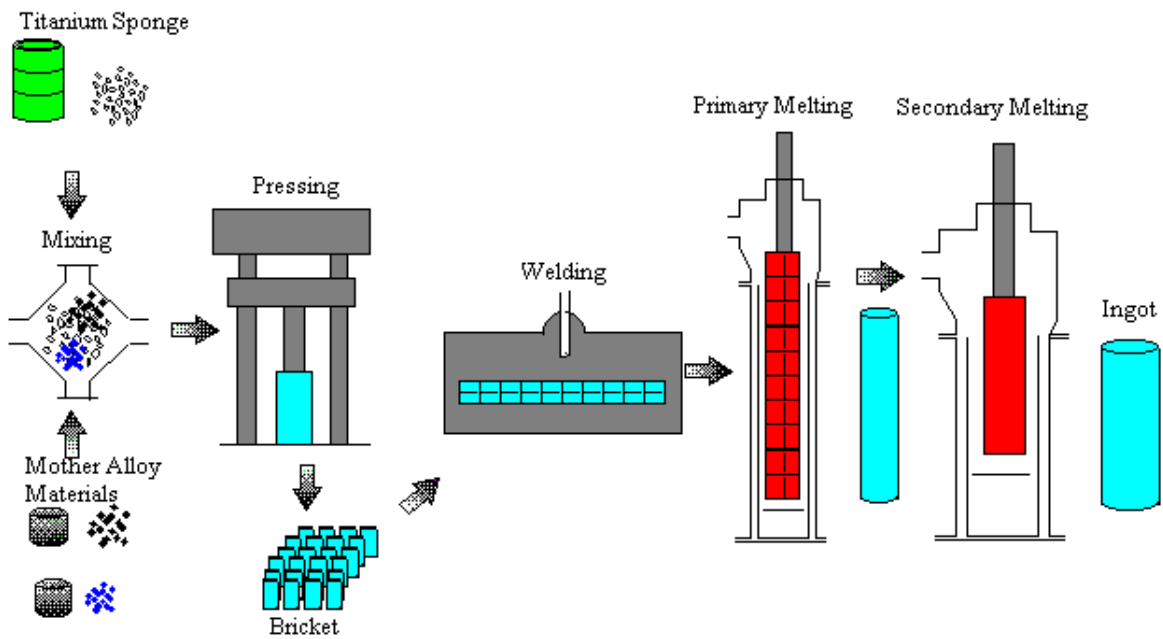


図2-1 VAR法による溶解・鋳造<sup>2)</sup>

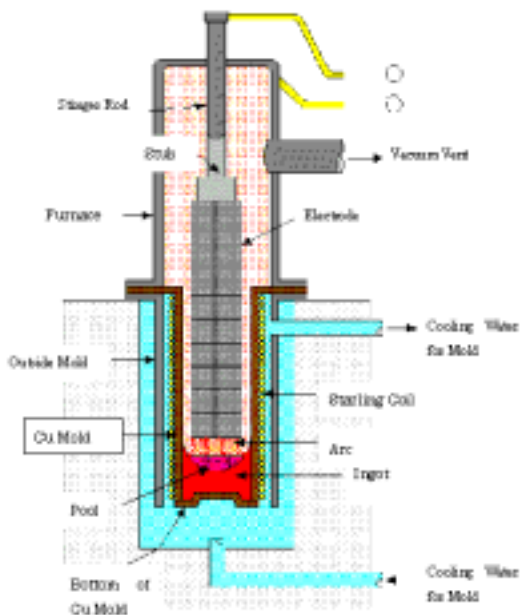


図2-2 VAR溶解炉とインゴット<sup>2)</sup>

[2] 電子ビーム溶解法 (EBM: Electron Beam Melting)

電子ビーム (EB: Electron Beam) 溶解法は図2-3に示すように、0.01~0.1Paの高真空下で陰極を高温に加熱して熱電子を発生させ、高電圧下で対象物に衝突させることによって融解する。EB製造法には従来のVARや他の溶解法にはない以下のような多くの優れた特徴がある。

- ・ 材料の形状を問わないため、スクラップの利用が容易。
- ・ W、Ta、Moなどの高密度介在物(HDI=High Density Inclusion)の除去が可能。

- ・ 直接スラブを作ることが可能で、次の鍛造工程を省略することが可能。
- いっぽう、他の溶解法では見られないような次のような欠点もある。
- ・ 合金を製造する際、Alなど揮発しやすい成分の蒸発ロスがあり、成分調整には厳格な配慮が必要。

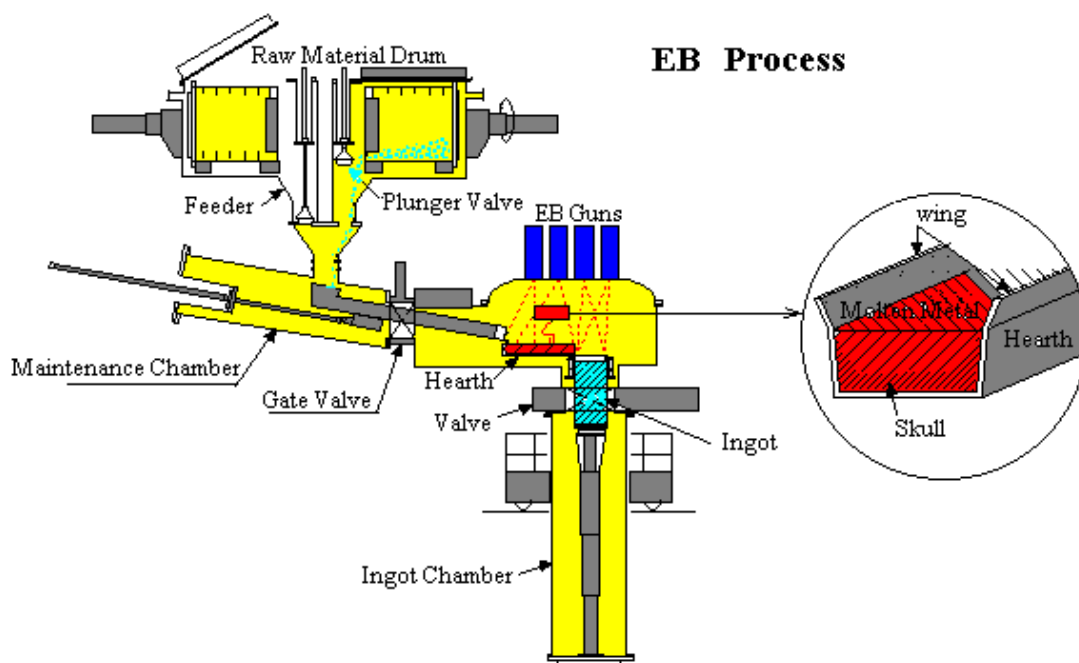


図2-3 EBM法による溶解・ casting<sup>2)</sup>

[3] PPC (Plasma Progressive Casting) 法、PAM (Plasma Arc Melting) 法<sup>3)</sup>

非消耗電極としてプラズマトーチを用いた溶解法で、プラズマトーチの特徴によって低真空(0.1～10Pa)から大気圧まで広い範囲の圧力で溶解がなされる。この溶解法はEBと同様に、丸型や角型などいろいろな形状のインゴットを製造することができる。またEBと同様に、チタンスクラップを容易にインゴットにできる点もVARに比べて有効な点である。

[4] 最近の溶解・ casting 技術

日本ではVARによる溶解・ casting がインゴットの製造に用いられているが、米国では大型のEBM炉の導入が進められている。Allvac社は1999年に生産能力6,000トン/年のEB溶解炉を設置した。EB溶解でのAl蒸発の課題は、ビーム電力、溶解速度及び溶融面の表面積と蒸発速度の関係を把握し、目標範囲内に含有量を的中させる溶解法を確立したとしている。また、宇宙航空分野向けのTi6Al4V合金厚板が、このEBM炉により1回のみ溶解と熟間圧延で製造でき、かつ材料歩留まりが改善し、低コストが達成され、1回溶解インゴットからの圧延製品は、成分均一性、清浄度、組織、特性等において、WR2回溶解材と同等であることを確認した。

米国RMI Titanium/Galt Alloys社は2001年にTwo torch Plasma Arc Cold Hearth Melting炉を



設置した。EBM炉と同様に、1回溶解、熱間加工による低コスト化が達成された。

また、米国Rectrotherm社はcold hearth melting法をさらに発展した形態であり、非消耗型アーク溶解と精錬プロセスを組み合わせた溶解炉SNAPP(Simultaneous Non-consumable Arc-melting Plasma-refining Process)を設置した。中央に通常の水冷銅製の1次ハース、その両側に2次のハースを各1個配置し、1次ハースの溶湯を左右の2次ハースへ順番に注ぎ込んで、連続的に鑄造していく方法である。

国内では神戸製鋼所がCCIM(Cold Crucible Induction Melting Furnace)の大型化を目指し、研究開発を行っている。VAR炉と同等規模(~10トン鑄塊)の大型化の技術確立を目指して、500kg鑄塊が鑄造できる製できるCCIM炉(スカル式・るつぼ底部からの出湯方式)を開発した。CCIM方式の特徴は、溶湯が顕著に攪拌するために、高融点添加合金元素の完全熔融や均一溶解が可能、溶解・鑄造時間が短い、などにある。

以上の新しい溶解・鑄造方法ではスポンジチタンなどの原料をプレスしてブリケットまたはコンパクトを作成し、これをプラズマアーク溶接して消耗型電極を製造する必要がなく、2回溶解・鑄造を1回の溶解・鑄造で済ますことができるため、製造コストの低減に寄与すると考えられる。新製錬法で述べたJTS法でもTiO<sub>2</sub>などの原料から直接インゴットを製造できるため、ブリケットまたはコンパクトの製造、VARの1次溶解を省略でき、製造コストの低減に寄与すると考えられる。

## 2-2 加工技術

### 〔1〕 熱間圧延、冷間圧延技術

図2-4に示すようにVAR溶解で製造された円筒状のチタンインゴットは鍛造プレス機で分塊鍛造を行い、角柱状のブルームとし、その後、圧延機、鍛造機でさらにスラブ、ビレットに加工される。純チタンの場合は円筒状インゴットを直接分解圧延機でスラブに加工することも多くなっている。

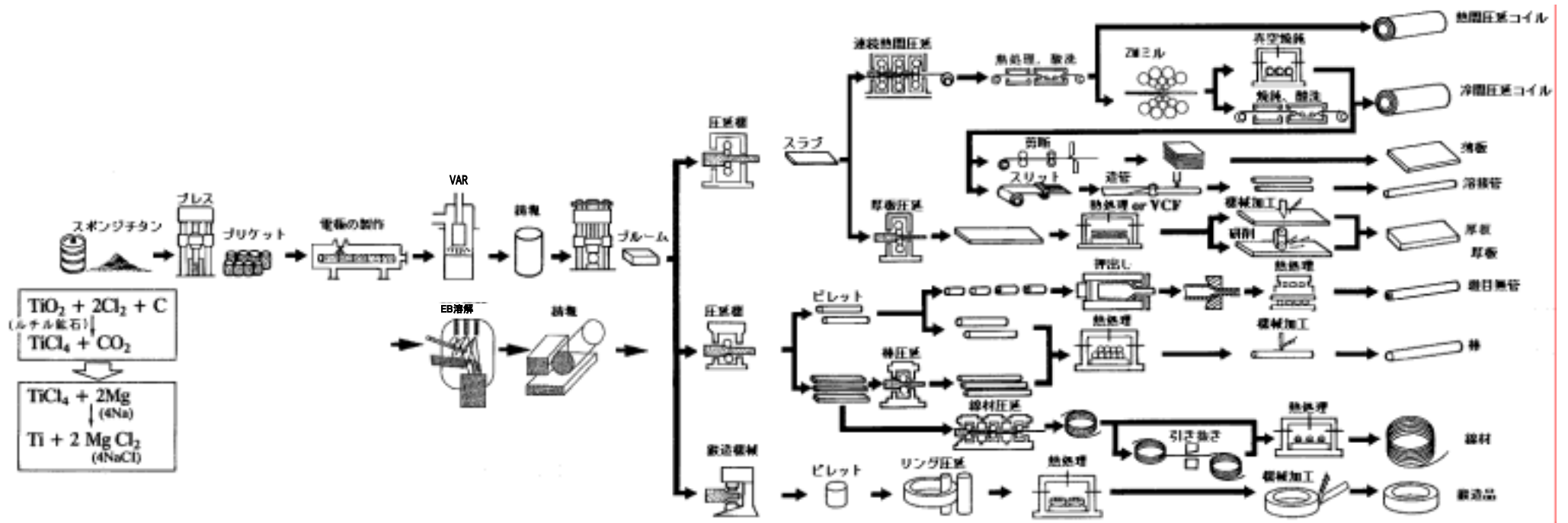


図2-4 チタン材の製造工程の例-1<sup>4)</sup>

EBMで製造された矩形インゴットスラブを用いると加熱や分解圧延作業での取り扱いが容易であり、歩留まりも向上するため、EBM矩形断面スラブを展伸材の材料とする割合も増えつつある。

図2-4に示すようにスラブ、ビレットはさらに連続熱間圧延、冷間圧延、押し出し線引きなどの工程を経て厚板、薄板、管、線、鍛造品などの素材に加工される。これらの工程は主に鉄鋼メーカーの大型設備により、効率的に行われており、製造プロセスのコスト低減は生産量の増加によりもたらされるものと考えられる。

## 〔2〕 鍛造技術

チタンが比較的高価な素材であることから、できるだけニアネットシェイプに成形することが要求されるので、鍛造加工してから、さらに機械加工で成形するのは、歩留りコストの面、工程短縮という観点から避ける必要がある。チタンに採用されている鍛造方法を分類すると、鍛造工程、鍛造方法、鍛造設備、鍛造温度などにより、表2-2のように分類される。一般にいくつかの鍛造方法の組み合わせによることが多い。

表2-2 チタン鍛造方法の分類<sup>4)</sup>

工程	方法	設備	温度
分解鍛造	自由鍛造	プレス	熱間鍛造
仕上げ鍛造	自由鍛造	プレス	
		ハンマー	
		GFM	
	型鍛造	プレス	恒温鍛造 熱間鍛造 冷間鍛造
		ハンマー	
		回転鍛造	
	リング圧延		

自由鍛造は分塊鍛造と同様に金型を用いず、ブルーム、スラブを素材として、プレス、ハンマーで仕上げ鍛造する方法である。自由鍛造は鍛造品の寸法精度が低く素材に対する製品の歩留りが低いが、金型費用が節約できるので、たとえばビレット・棒・円板・リング品のように比較的単純な形状の鍛造品の少量生産に適用されることが多い。

長尺チタン材の自由鍛造は、近年、GFM(オーストリアの会社名:Gesellschaft für Fertigungs technik und Maschinenbau)鍛造機のような高速自由鍛造機(全自動4面鍛造機)を使用することにより、鍛造精度の向上とともに、素材の繰り返し加熱をなくして組織の均一な微細化が得られている。

型打鍛造は鍛造品の寸法精度が高く素材に対する製品歩留りが高いが、金型費用が掛かるので、例えば航空機部品や自動車部品、タービンブレードなどのように比較的複雑な形状の鍛造品の大

量生産に適している。

図2-5に模式的に示される恒温鍛造は、金型温度を素材と同じ温度に保ちながら低速度で加工することにより、低い変形抵抗で、均一な品質を得る加工方法である。鍛造荷重は従来鍛造の1/5～1/8の能力で加工でき、ニアネットシェイプ化により、素材投入重量は1/5～1/6で済むが、恒温耐熱性の金型費用が高く生産性が低いので、実用例が少ない。

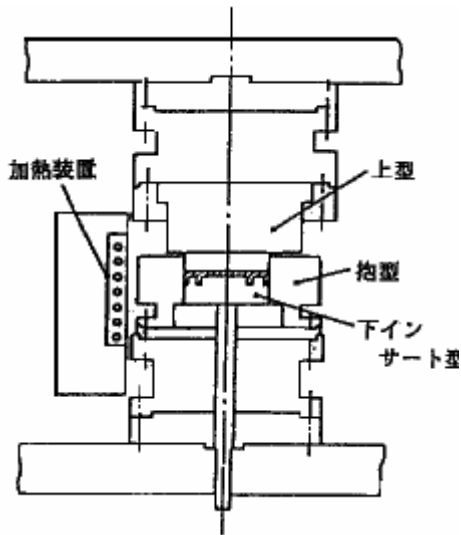


図2-5 恒温鍛造用装置<sup>4)</sup>

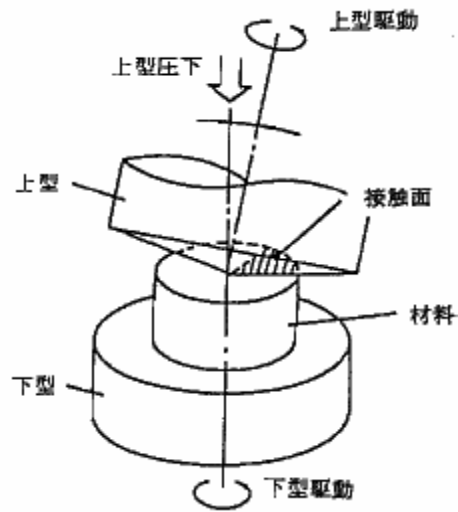


図2-6 回転鍛造加工の原理<sup>4)</sup>

チタン合金製大型環状品の製造でニアネットシェイプ成形をしようとする、極めて大きな加工能力設備を必要とするが、この場合に、図2-6に示す回転鍛造加工法を採用すれば、金型との接触面積が小さいのでプレス鍛造力を1/15～1/20に小さくできる。回転方式の鍛造方法のため、カップ状やリング状など鍛造品の、形状に制約があるが、機械能力が小さくてすみ、経済的な加工方法とされている。

型打鍛造品で、コスト低減のため鍛造後の機械加工を省略するためには、非常に精度の高い鍛造を行う必要があり、また鍛造後の表面のスケールを除去するエッチング加工で多大な工数を必要とするなど困難な問題が多い。これらの点を考慮し、また近年鍛造機械や潤滑技術が著しく進歩したことから、冷間鍛造性の良いβ型チタン合金を使用して、自動車エンジン・バルブ用スプリング・リテーナーのような小物の量産部品では冷間鍛造が採用されるにいたった。今後、チタン素材の価格低下に伴い、チタンの使用量が増加すれば、さらにニアネットシェイプ成形法として、最適な冷間鍛造品の需要量が増加すると見られる。

この他、板材を金型を用いずにレーザーとCADを用いて3次元形状に加工するレーザーフォーミング技術<sup>5)</sup>が研究開発中であり、金型が必要なくなるため、小ロットのチタン製品のコスト低減に役立つと考えられる。

### [3] 鋳造技術

特に高価な材料をニアネットシェイプに成形する場合に適した方法として鋳造技術があり、チタン鋳物として最小限の加工で製品化することができる。従来、化学工業向け、航空機産業向けに加え、ゴルフヘッドなどに需要が伸び、広く使用されている。

化学工業向けの配管、ポンプ部品などに使用される比較的肉厚で、大型の部品に対しては消耗電極を使用し、真空チャンバーに設けた水冷坩堝内でアーク溶解し、黒鉛粉末をバインダーで焼結成形した鋳型や黒鉛鋳型に鋳造する消耗電極式真空アーク溶解(真空スカル溶解法)が用いられてきた。(図2-7)。

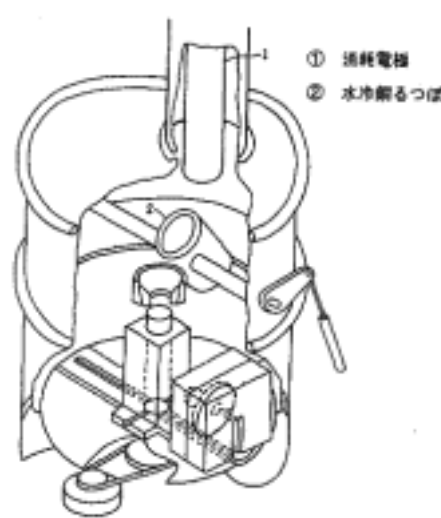


図2-7 チタン鋳物の鋳造装置<sup>4)</sup>

チタンは原料としては、比較的高価であることから、製造時の歩留りを向上させることが重要であり、ニアネットシェイプ成形技術が重要な課題である。チタン鋳造においても、同様にロストワックス法などの精密鋳造法が古くから開発されてきた。チタン鋳造の技術的要点として、チタンは非常に活性なため、チタン溶湯に対して安定な鋳型材、設備費が安価で生産性の良い溶解・鋳造炉の開発の2点が重要である。チタンの精密鋳造においては従来の黒鉛鋳型に加えてジルコニア鋳型、カルシア鋳型、またはそれらの酸化物をベースにした鋳型が使用され、基本的にはロストワックス法と同様な手法で製造されている。

溶解については、るつぼに水冷された銅を用いるインダクションスカル溶解法と、カルシア耐火物(CaO)を用いるカルシア溶解法がある。インダクションスカル溶解法を図2-8に示す。

この方法は、スクラップやスポンジチタンをそのまま溶解原料として用いることができるため、より安価な原料が選択できること、誘導の攪拌力が強く、合金化が容易で、成分、温度の均一化が図れることという利点がある。しかし、設備費が高いわりには生産性があまり高くないという欠点がある。

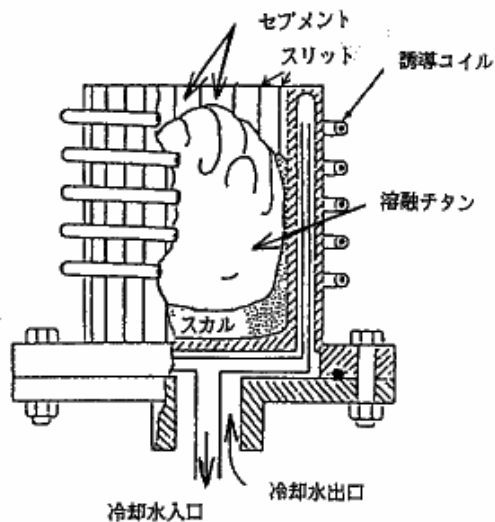


図2-8 インダクションスカル溶解炉<sup>4)</sup>

インダクションスカル溶解をさらに進めた溶解方法として、電磁力による浮揚(レビテーション)溶解法が新たに開発され<sup>6)</sup>、チタン溶解に利用されている。

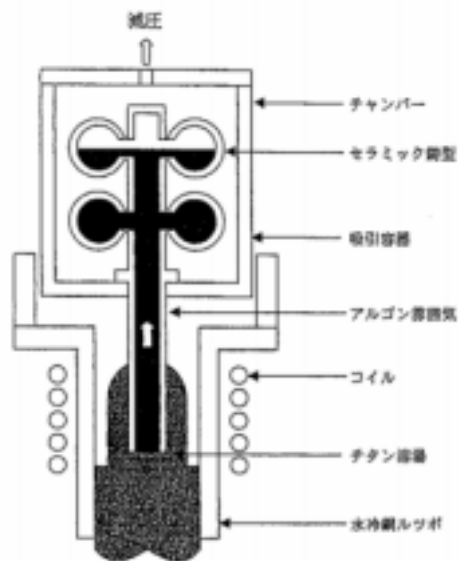


図2-9 レビキャストの模式的説明図<sup>7)</sup>

高周波の電磁力により金属溶湯を浮かせた状態にすることができ、水冷された銅るつぼとチタン溶湯との接触がない状態で、加熱溶解が可能となる。図2-9はこのレビテーション溶解法と減圧鑄造を組み合わせたレビキャスト法<sup>7)</sup>を示したもので、溶解原料の制約がなく、不純物汚染の心配がなく、かつ生産性が高い利点がある。

[4] 粉末成形技術<sup>8)</sup>

粉末成形に使用されるチタン粉末は水素化脱水素 (HDH:Hydride-De-Hydride) 粉末、ガスアトマイズ粉末、プラズマアトマイズ粉末などが使用されている。HDH粉末水素化脆化させたチタン原料を機械的に粉碎した後、加熱し、真空下で脱水素することにより製造される。粉末粒子は角ばっており、軟らかく不定形であるため、成形性に優れている。いっぽう、ガスアトマイズ粉末は棒状のチタン原料を高周波誘導加熱して溶解し、滴下流に高圧のArガスを吹きつけることにより製造される。粒子形状は真球状で、急冷させるためその断面組織は微細な組織となっている。ガスアトマイズ法は量産化に優れ、容器からの汚染がないため、酸素、炭素とも含有量が低く、清浄度が高い。この他、レビアトマイズ法(電磁力による浮揚溶解とArガスアトマイズによる製造方法)によっても製造されている。

粉末の成形加工方法には他の金属粉末の成形法と同様にプレス成形法、射出成形法やゴム型のキャビティーに粉末を充填し、上下のパンチにより、ゴム型内の粉末をゴム型とともに圧縮するRIP法(Rubber Isostatic Pressing)などが用いられる。

また、加圧した粉末にパルス通電を行い、高速でかつ低温で粉末成形を行うパルス通電加圧焼結法も開発されている<sup>9)</sup>。(図2-10)

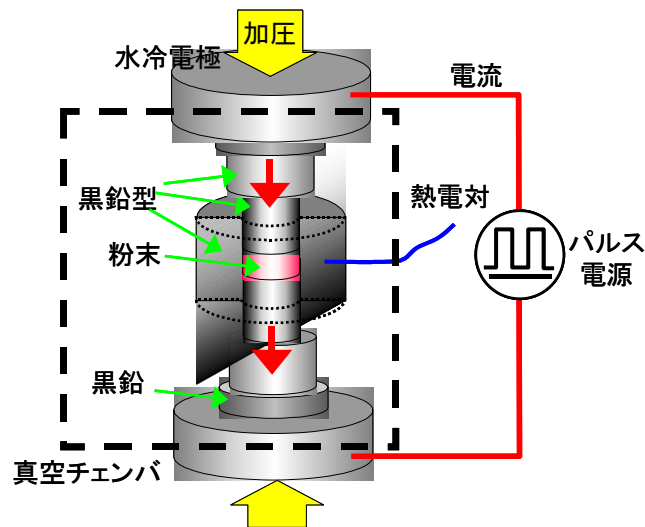


図2-10 パルス通電加圧焼結法<sup>10)</sup>

## 2-3 二次加工技術

### [1] 接合技術

図2-11に示すようにチタンおよびチタンの接合方法は各種溶接法に加えて接着、ろう接、機械的接合など多くの方法がある。最も良く使用されているのは図2-12に示すTIG(Tungsten Inert Gas)溶接法で、化学工業タンク、発電所用復水機、海水淡水化装置などに使用されている。しかし、作業条件の標準化、溶接部品質の基盤データ整備は鉄鋼やアルミニウムに比べて十分ではなく、チタンの用途を拡大するためには他の接合方法を含め、客観的な作業標準と設計のための基準とすべき品質データの整備が必要とされている<sup>11)</sup>。

特に高品質の溶接を要求される場合は高密度エネルギー溶接である電子ビーム溶接、レーザービーム溶接が用いられるが、大型の溶接には適用できず、コストも高い。屋根材や管などの接合には抵抗溶接であるシーム溶接が用いられる。このほか、接合する材料の端面を突合せ、通電溶接する突合せ抵抗溶接、2枚の板を重ねた上に爆薬を置き、爆発の衝撃で接合させる爆発圧接、加熱、加圧して金属元素の拡散により接合する拡散接合など、他の金属で使用されるさまざまな接合方法がチタンにも使用されている。

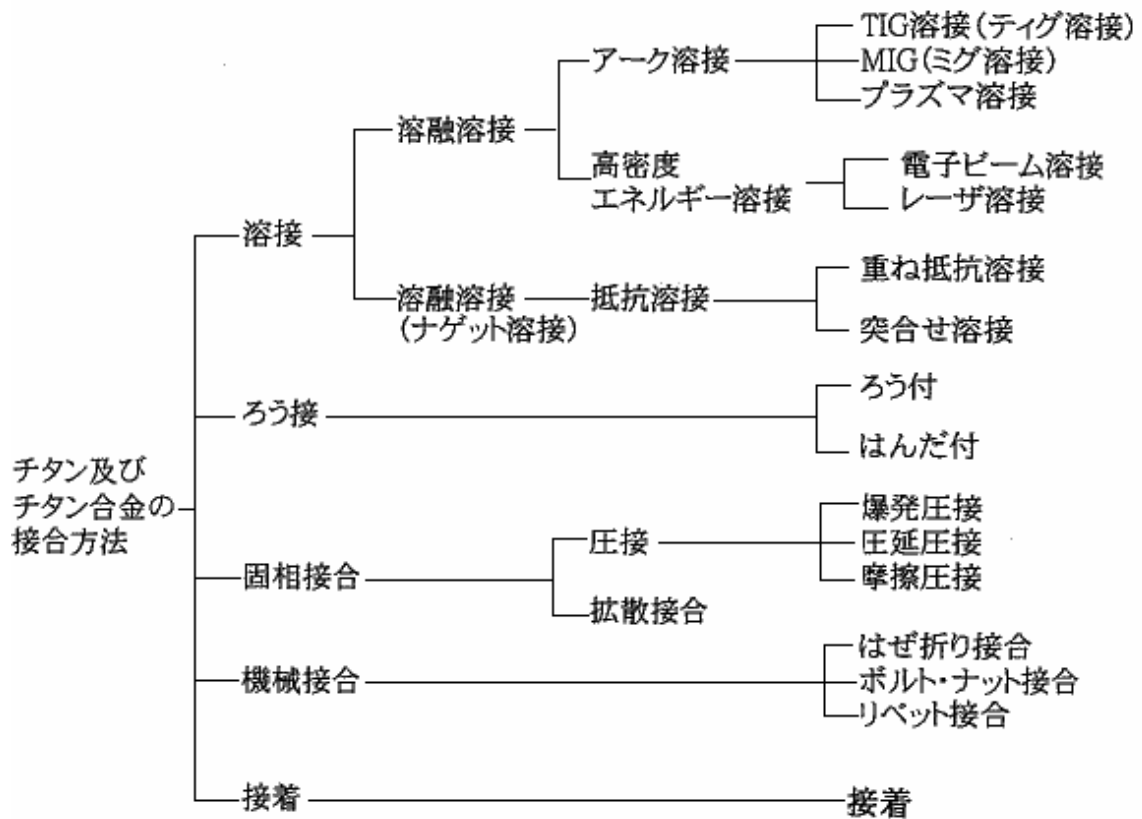


図2-11 チタンの接合方法<sup>4)</sup>

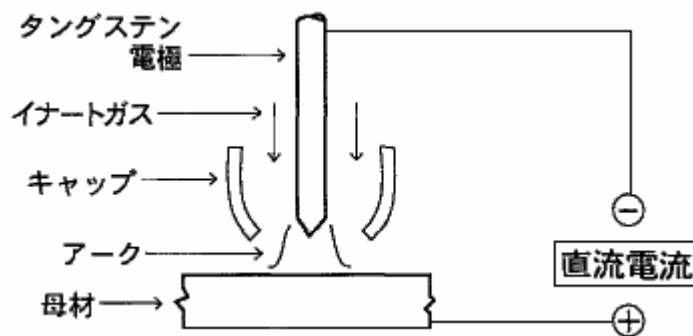


図2-12 TIGアーク溶接法の模式図<sup>4)</sup>

## 〔2〕冷間プレス技術

純チタン、合金のプレス加工は容易であるが、チタン独特の材料特性により、他の金属



には見られない特異な問題が発生することがある。例えば純チタンは非常に深絞り性に優れているが、引出し性や曲げ性にやや難点があり、ポンチやプレス金型の肩部で割れが発生するなどである。トラブルの多くは、従来の金属材料と同じ加工条件でチタンの成形を行った場合に発生している。トラブルを避けるためにはチタンの材質的特性を熟知した上で、加工条件の選定を行う必要がある<sup>12)</sup>。プレス加工技術そのものは他の金属材料と同様な方法が用いられているため、コスト低減にあたってはチタンの用途拡大、使用量の増加が鍵であり、接合方法と同様に、客観的な作業標準の整備が必要とされる。

#### 2 - 4 従来プロセス技術のコスト上の課題と新技術のまとめ

表2-3に従来プロセス技術のコスト上の課題と新技術のまとめを示す。

表2-3 従来プロセス技術のコスト上の課題と新技術のまとめ

分野	従来プロセス	コスト上の課題	新技術	新技術の特徴
製錬	クロール法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ バッチプロセスで生産性が悪い</li> <li>・ <math>MgCl_2</math>からMgの回収にエネルギーを多量に消費する</li> <li>・ 設備が複雑</li> </ul>	Ca還元によるTiの製錬技術(JTS法、OS法、FFC法など)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 連続生産、半連続生産による生産性向上</li> <li>・ エネルギー消費が少ない</li> <li>・ 設備が簡単</li> </ul>
溶解・鋳造	VAR法(消耗電極式真空アーク溶解法)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2回溶解・鋳造によるエネルギーの消費が大きく、コスト高</li> <li>・ 消耗型電極(ブリケット、コンパクト)の製造</li> </ul>	EBM法(エレクトロンビーム溶解法) PAM法(プラズマアーク溶解法) CCIM法(Cold Crucible Induction溶解法) JTS法(日本チタン協会法)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2回溶解・鋳造→1回溶解・鋳造の可能性</li> <li>・ 消耗型電極(ブリケット、コンパクト)の製造が不要</li> <li>・ 材料の形状を問わないため、スクラップの利用が容易</li> </ul>
圧延	熱間圧延 冷間圧延など	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生産量増加によるコストダウン</li> </ul>		
鍛造	自由鍛造 型鍛造 リング圧延など	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 薄肉鍛造品の製造が困難</li> <li>・ 歩留りが低い</li> <li>・ 多大な機械加工</li> <li>・ 金型の製作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 加工性の良い合金の開発</li> <li>・ 冷間鍛造法の拡大</li> <li>・ レーザーフォーミング(レーザーとCADを用いた成形加工方法)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 薄肉製品の製造が可能</li> <li>・ 歩留まりの向上</li> <li>・ 機械加工の削減</li> <li>・ 金型が不要(レーザーフォーミング)</li> </ul>
鋳造	消耗電極式真空アーク溶解 など	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原料形状に制約</li> <li>・ 溶解速度が遅い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ インダクションスカル溶解法</li> <li>・ レビキャスト法(電磁力による浮揚溶解と減圧鋳造の組合せ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原料形状に制約が少なく、安価な原料を使用できる</li> <li>・ 溶解速度が速い</li> <li>・ 誘導の攪拌力が強く、合金化、成分、温度の均一化が容易</li> <li>・ 生産性が高い</li> </ul>
粉末成形	プレス成形法 射出成形法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生産量増加によるコストダウン</li> <li>・ 生産性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ パルス通電加圧焼結法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高速で成形でき、生産性が高い</li> </ul>
接合	TIG溶接法 MIG溶接法 電子ビーム溶接法など	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 用途拡大のため、客観的な作業標準と設計のための基準とすべき品質データの整備</li> </ul>		
冷間プレス	プレス加工 ロール成形	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 用途拡大のため、客観的な作業標準の整備</li> </ul>		

## 参考文献

- 1) 小泉昌明：鉄と鋼、74(1988)2,P.215
- 2) 東邦チタニウムHP(<http://www.toho-titanium.co.jp>)
- 3) 愛知産業株式会社カタログ (RETEC PLASMA MELTING FURNACE)
- 4) 第11回チタン講習会((社)チタン協会主催)資料(2004年11月16日)
- 5) 大津雅亮、小坂田宏造：塑性と加工、42(2001)489, p.1031
- 6) 出向井 登：チタン,47(1998),p.25
- 7) 飯久保知人：Titanium“チタン揺籃期から成長期へ”、(社)日本チタン協会、(2002),p.68
- 8) 日野順三：Titanium“チタン揺籃期から成長期へ”、(社)日本チタン協会、(2002),p.97
- 9) 小林慶三, 松本章宏, 尾崎公洋, 西尾敏幸:”Ti-Al金属間化合物のパルス通電焼結による成形”, 粉体および粉末冶金, 49(2002), 910-914.
- 10) 尾崎公洋(独立行政法人産業技術総合研究所)私信
- 11) 上瀧洋明：Titanium“チタン揺籃期から成長期へ”、(社)日本チタン協会、(2002),p.116
- 12) “チタンの加工技術”、(社)日本チタン協会編、(1992年11月27日日刊工業新聞社発行)

### 第3章 新技術の導入によるコスト変化

#### 3-1 従来プロセス技術のコスト上の課題と新技術

第2章で述べた従来プロセス技術のコスト上の課題と新技術について表3-1にまとめて示す。

表3-1 従来プロセス技術のコスト上の課題と新技術のまとめ

分野	従来プロセス	コスト上の課題	新技術
製錬	クロール法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ バッチプロセスで生産性が悪い</li> <li>・ エネルギーを多量に消費する。</li> </ul>	Ca還元によるTiの製錬技術 (JTS法、OS法、FFC法など)
溶解・ casting	VAR法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2回溶解・ casting</li> <li>・ 消耗型電極(ブリケット、コンパクト)の製造</li> </ul>	EBM法、PAC法、CCIM法、JTS法
圧延	熱間圧延、冷間圧延など	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生産量増加によるコストダウン</li> </ul>	
鍛造、プレス	自由鍛造、型鍛造、リング圧延	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 薄肉鍛造品の製造が困難</li> <li>・ 歩留りが低い</li> <li>・ 多大な機械加工</li> <li>・ 金型の製作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 加工性の良い合金の開発</li> <li>・ 恒温鍛造、冷間鍛造法の拡大</li> <li>・ レーザーフォーミング</li> </ul>
casting	真空アーク溶解	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原料形状に制約</li> <li>・ 溶解速度が遅い</li> <li>・ 不純物汚染</li> </ul>	レビキャスト法 インダクションスカル溶解法
粉末成形	プレス成形法 射出成形法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生産量増加によるコストダウン</li> </ul>	パルス通電加圧焼結法
接合	TIG溶接法 MIG溶接法 電子ビーム溶接法 など	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 用途拡大のため、客観的な作業標準と設計のための基準とすべき品質データの整備</li> </ul>	

#### 3-2 新技術導入による製品コスト変化の推定

チタンの製造コストについて公表された数値はないが、F.H.Froesら<sup>1)</sup>によって、図3-1のようにチタン製品製造の各段階別のコストが示されている。チタン製錬の原料がTiCl<sub>4</sub>からTiO<sub>2</sub>(Ore(rutile))に替わったことにより、原料コストがチタン純分ポンドあたり \$ 1.30から \$ 0.50に \$ 0.8低下するとされている。(キログラムあたりでは \$ 2.9から \$ 1.1に \$ 1.8低下する) 新製錬方法では連続化、インゴットの溶解のコスト低減により、インゴットまでのコストはこの \$ 0.8以上に減少し、相当のコスト低減が見込めるとしている。

薄板までの製造コストはポンドあたり \$ 20から \$ 100であるので、新製錬法の採用による薄板価格の低下はわずかであると考えられるが、歩留まりの良い加工方法の採用やチタン価格低下に伴う生産量の増加によってもたらされるコストダウンにより、チタン製品価格はさらに低下するものと見られる。

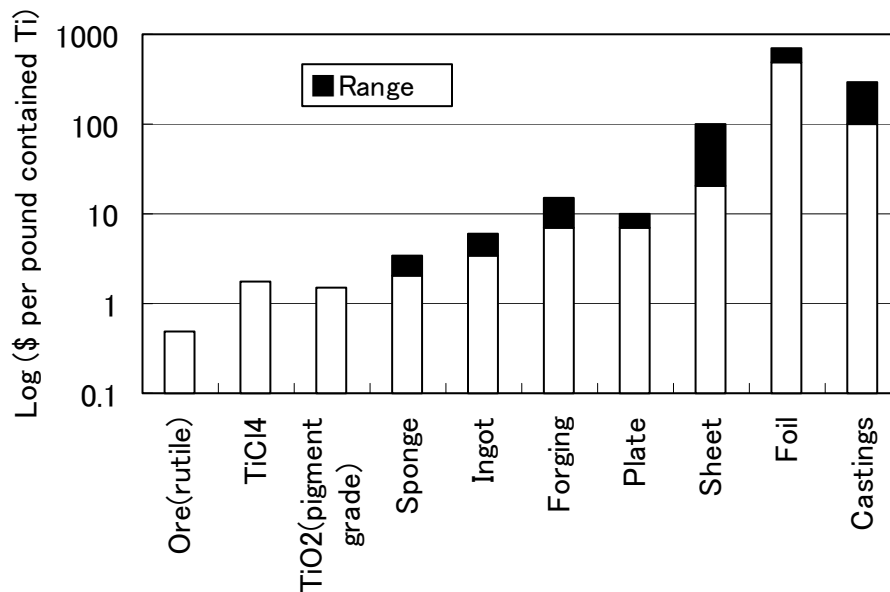


図3-1 各製造段階におけるチタンのコスト<sup>1)</sup>

### 3-3 文献調査によるチタンの用途拡大とコストダウンの調査

チタンの用途拡大とコストダウンについて1989年～2004年までのJICSTのデータベースで検索を行い、54件の関連文献を調査した。以下に文献調査に基づくチタンの用途拡大とコストダウンについてのまとめを示す。

#### [1] 今後チタンの用途が拡大する分野及びチタン製品

- (1) 自動車用途: エンジン部品(コンロッド、吸気・排気バルブ、リテーナー、スプリングなど)、排気系(マフラー、排気管など)、車体構造(サスペンションスプリング、バンパーサポートなど)の用途に最も多い期待感がある。仮に、世界約5000万台の自動車にチタンが素材で1台当たり1kgのチタン材料が仕様されるとすれば、年間5万トンのチタン展伸材の需要となる。ただし、自動車用途は大幅なコストダウンが前提となる。
- (2) 建築・土木用途: 屋根、外壁、モニュメント、更に海洋構造物等を加えれば、自動車以上に用途拡大の期待感がある。この場合、材料のコストダウンのみならず、施工法のコストダウンがカギを握る。
- (3) 海洋関係用途: 海洋温度差発電は、案件ごとのチタン需要が多いので最近の文献ではすべて将来の大型需要と指摘している。海上空港、オフショア石油ガス掘削輸送

関連装置、船舶関係など海水に関連した製品は、価格を除けばチタンが最適材料であるので、コストダウンとともに多量の需要がある。

- (4) 医療福祉用途:人工関節・歯根などのインプラント、非磁性を生かした医療機器類、軽量と非アレルギーを生かせる福祉機器装置にも、今後大きな需要増の期待感が、建築用途に負けずにある。
- (5) 身近な用途:メガネ・時計・カメラに始まる民生品用途は、料理用なべ類など台所用品、装身具、スポーツ用品、家具など、すでに実用化されているチタン製品に続き増加すると考えられる。
- (6) 耐食用途:従来の化学工業用途、各種熱交換器用途は、更に増加すると考えている。新プロセスや材料の価格低減により、ステンレス鋼などの他材料からチタンに代わる期待がある。
- (7) 他の用途:食品工業、耐弾性を生かした用途、パソコンケースなど IT 関連機器、放射性廃棄物関連機器装置などの用途に、将来の需要増の期待がある。

## [2]コスト低減の方法

- (1) 新製錬法によるコストダウンがもっとも多く期待されている。
- (2) スラブ型インゴットなど溶解でのコストダウンの可能性はある。
- (3) インゴット以降では、企業間の壁を越えた設備集約・加工集約によるコストダウンが強く期待され、また、可能性があるとされている。
- (4) 鋳造、粉末冶金、押出しなどによるニアネット化製造によりコストダウンの可能性はある。

## 参考文献

- 1) F.H.Froes, M.A.Imam and D.Fray: “Cost-Affordable Titanium”, Proc.Sym.by TMS(2004), March, Charlotte, North Carolina, p.3

## 第4章 チタン価格低減による導入産業分野の変化

### 4-1 企業へのアンケート調査

#### 4-1-1 アンケート方法

チタン価格低減による使用量増加に関するアンケートを作成し、チタン製品メーカー、ステンレス製品メーカー、および各製品の販売業者、関係所団体など約250ヶ所に配布した。アンケート内容はチタン製品の現状の製造・販売量とチタン価格が低下した場合の製造・販売量の増加予想、新規利用分野、さらに薄肉化が可能となった場合の製造・販売量の増加予想、新規利用分野などである。

アンケートの送付先はチタン協会の法人会員176社、個人会員36名、チタン関係の文献著者12名、スポーツ用品メーカー3社、及び各種協会、団体など36箇所である。

表4-1 アンケート送付先各種協会、団体

団体名	代表者	役職	住所
(社)日本自動車工業会	竹井 英敏	参事	東京都港区芝大門1-1-30 日本自動車会館
(社)日本自動車部品工業会	荒井 宏昭	部長	東京都港区高輪1-6-15 自動車部品会館5階
(社)日本航空宇宙工業会	田崎 雅元	会長	東京都港区赤坂1丁目1番14号 東信溜池ビル2階
宇宙航空研究開発機構	立川 敬二	理事長	東京都千代田区丸の内1-6-5 丸の内北口ビルディング
(社)日本自動車機械器具工業会	北川 不二男	理事長	東京都港区芝公園3?5?8 機械振興会館3 0 4号室
(社)日本自動車車体工業会			東京都港区芝大門1?1?3 0 日本自動車会館1 5階
(財)家電製品協会	庄山 悦彦	理事長	東京都港区愛宕1丁目1番1 1号 虎ノ門八東ビル4 階
(社)ソーラーシステム振興協会	濱岡 平一	会長	東京都中央区八重洲1-6-3 小鉄ビル4階
情報通信ネットワーク産業協会	中村 邦夫	会長	東京都千代田区大手町1-7-2 東京サンケイビル17F
電気事業連合会	藤 洋作	会長	東京都千代田区大手町 1 - 9 - 4 経団連会館 5 F
(社)日本ガス協会	安西 邦夫	会長	東京都港区虎ノ門1-15-12
(社)日本ガス石油機器工業会	中村 出	会長	東京都千代田区神田多町2-11 ガス石油機器会館
(社)日本機械工業連合会	金井 務	会長	東京都港区芝公園3丁目5番8号 機械振興会館
(社)日本工業炉協会	谷川 正	会長	東京都千代田区岩本町3-2-10 SN岩本町ビル4F
日本コージェネレーションセンター	平田 賢	会長	東京都港区西新橋2丁目18番2号 N・K・Kビル6F
社団法人ビジネス機械・情報システム産業協会	桜井 正光	会長	東京都港区虎ノ門一丁目2 1番1 9号 秀和第2虎ノ門ビル
(社)日本照明器具工業会	清野 八洲一	会長	東京都台東区上野3-2-1 エクセレントビル7F
日本暖房機器工業会	福田 公一	会長	東京都千代田区神田錦町 2 - 5 - 19 三幸ビル4F
日本電機工業会	森下 洋一	会長	東京都千代田区永田町 2 丁目4番1 5号
(社)日本電気制御機器工業会	作田 久男	会長	東京都港区浜松町2-1-17 松永ビル6階
社団法人電子情報技術産業協会	安藤 國威	会長	東京都千代田区神田駿河台3-11 三井住友海上駿河台別館ビル3階
(社)日本電子材料工業会	戸井 哲哲郎	会長	東京都港区虎ノ門1-12-1 虎ノ門第一法規ビル4階
財団法人日本自動車研究所	小枝 全	理事長	東京都港区芝大門1-1-30 日本自動車会館 12階
(社)日本内燃力発電設備協会	広瀬 定康	会長	東京都港区芝1丁目5番11号 芝L'sビル 2F
(社)日本熱供給事業協会	安西 邦夫	会長	東京都港区西新橋2-2-2 澤ビル6F
(社)日本バルブ工業会	岡野 正敏	会長	東京都港区芝公園3丁目5番8号 機械振興会館
(社)日本分析機器工業会	矢嶋 英敏	会長	東京都千代田区神田小川町3-22 タイメイビル
(社)日本冷凍空調工業会	檀坂 純二	会長	東京都港区芝公園3丁目5番8号 機械振興会館
(社)日本冷凍空調設備工業連合会	粟屋 利喜男	会長	東京都港区芝公園3丁目5番2 2号 機械振興会館別館
(社)日本ロボット工業会	稲葉 善治	会長	東京都港区芝公園3丁目5番8号 機械振興会館2 1 3号室
(社)日本陸用内燃機関協会	花田 輝夫	会長	東京都新宿区市谷砂土原町1-2-31
日本医療機器関係団体協議会	和地 孝	会長	東京都新宿区下宮比町3-2 飯田橋スカイビル8階B
(社)日本分析機器工業会	矢嶋 英敏	会長	東京都千代田区神田小川町3-22 タイメイビル
(社)電子情報技術産業協会	佐々木 元	会長	東京都千代田区神田駿河台3-11 三井住友海上駿河台別館ビル3階
日本医療器材工業会	和地 孝	会長	東京都千代田区麹町3丁目10番地3号 神蒲麹町ビル3階
(社)日本画像医療システム工業会	桂田 昌生	会長	東京都文京区湯島2-18-12 湯島KCビル4階

#### 4 - 1 - 2 アンケート結果

##### 4 - 1 - 2 - 1 回答率

各企業からの回答は58件で、法人会員からは33件、個人会員からは4件、チタン関係の文献著者からの回答は3件、各種団体からの紹介によるものは18件であった。各種団体からの紹介を除いて227件のアンケート送付に対し、40件の回答が得られたことになり、回答率は $40/227=0.18$ と通常アンケート調査の回答率から見て高いほうであった。又、今回スポーツメーカー3社からの回答は得られなかった。

##### 4 - 1 - 2 - 2 アンケート回答結果

###### 〔1〕チタン製品（パーツとして使用の製品も対象）を製造、販売しているか

- ・チタン製品を製造、販売している : 42社 (72%)
- ・ " を製造、販売していない : 16社 (28%)

###### 〔2〕42社の内、製造、販売されているチタン製品の量はどれくらいか

図4-1にチタン製品を製造、販売している42社の年間のチタン使用量別割合を示す。64%が年間10トン以下の使用量であり、年間10～100トンを使用する企業は24%、100～1000トンを使用する大口の企業は12%であった。また、チタン製品を製造、販売している42社毎の使用量を図4-2に示す。

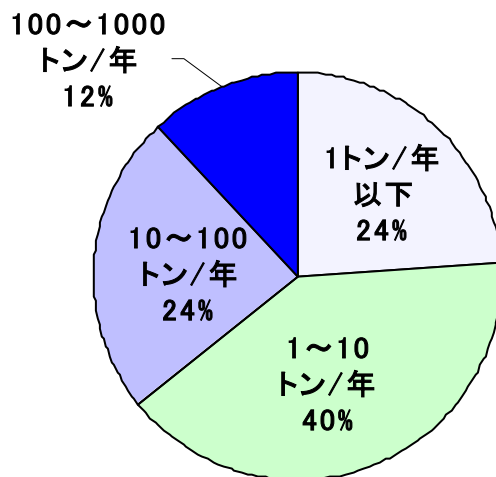


図4-1 チタン製品を製造、販売している42社の年間のチタン使用量別割合



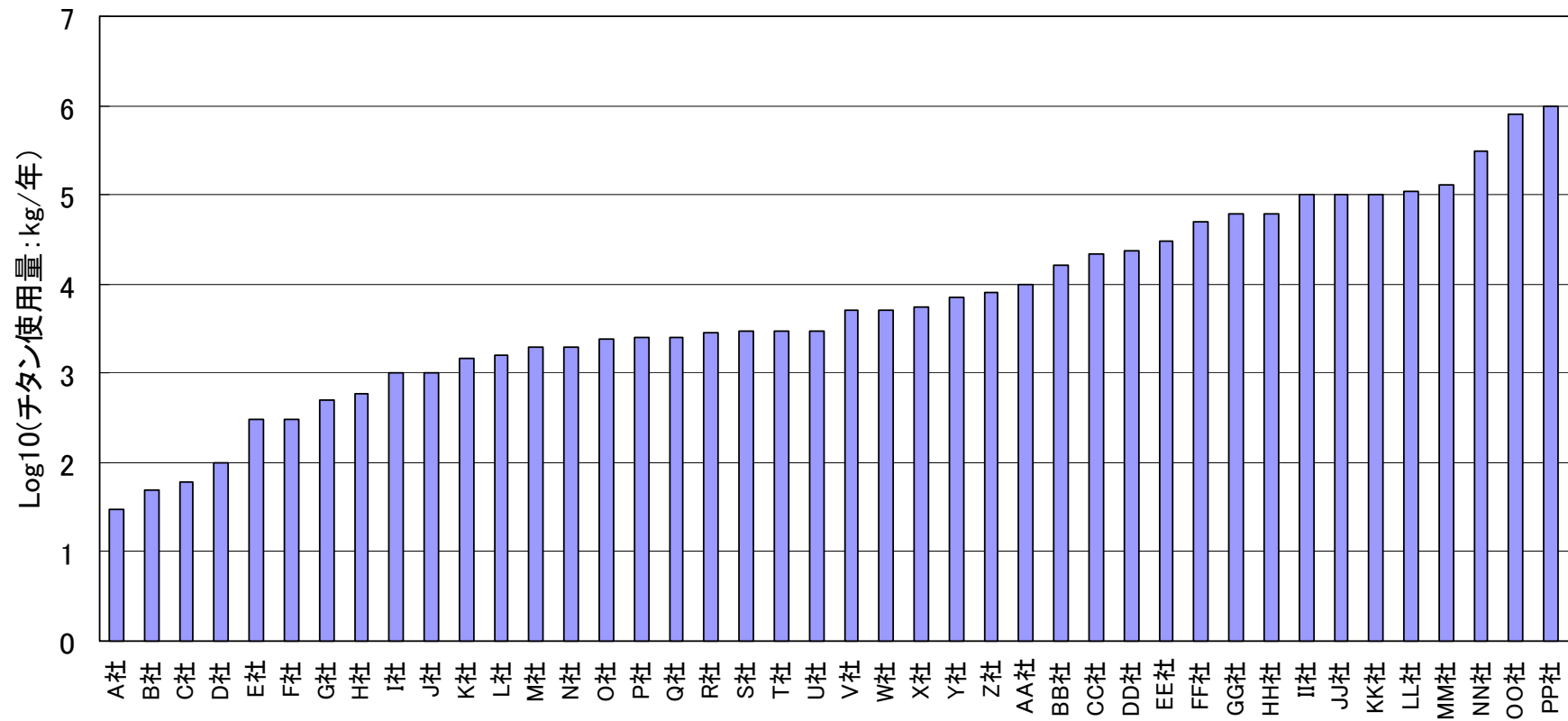


図4-2 アンケート回答会社のチタン使用量

〔 3 〕 チタンを使用しない理由

チタンを使用しない理由を回答した21社の使用しない理由（複数回答含む）35件の内訳を表4-2に示す。21社の内、チタン製品を製造販売している企業は7社、製造販売していない企業は14社であった。

表4-2 チタンを使用しない理由の件数の内訳

	製造販売している企業	製造販売していない企業	合計
機能が不足している	1	2	3
設計基準が無いかあいまい	0	0	0
実績がない	0	3	3
技術情報が不足	1	3	4
加工が難しい	0	2	2
流通経路が分からない	0	0	0
リサイクル性が分からない	0	0	0
加工法が分からない	0	2	2
製造・加工コストが高い	5	7	12
その他	2	7	9
合計	9	26	35

チタンを使用しない理由でもっとも多いのは“製造・加工コストが高い”の12件で約1/3を占めた。ついで多いのは“その他”で9件、“技術情報不足”が4件、“実績なし” “機能が不足している”が3件、“加工が難しい”、“加工法が分からない”がそれぞれ2件であった。

製造販売している企業では“製造・加工コストが高い”が5件と最も多かった。製造販売していない企業でも“製造・加工コストが高い”、“その他”が各7件と多く、ついで、“技術情報不足”、“実績なし”、“加工法が分からない”、“加工が難しい”という理由であった。

〔 4 〕 チタンを使用しない理由が問題となる具体的な用途

〔 5 〕 不使用理由解消時の増加量

表4-3にチタンを使用しない理由が問題となる具体的な用途と不使用理由解消時の増加量を示す。

表4-3 チタンを使用しない理由が問題となる具体的な用途と不使用理由解消時の増加量

企業名	具体的な用途	不使用理由解消時の増加量
QQ社	高耐食性の要求される部材への適用	配管、熱交、容器等への適用可能
RR社	トランスファーレスのトランスファー部の軽量化。 現在はチタンよりアルミ鋳造合金を使用	
W社	鈹螺類	数倍(20トン/年程度)増加
I社	自動車エンジン部品用ボルト	30トン/年増加
JJ社	小型船の船体とパーツ	5～10倍以上(250トン/年～500トン/年以上増加)
O社	腐食性のあるガス等のメタル部品	2トン/年増加
F社	水槽(飲料水用) 熱交換器 圧力容器	700トン/年増加
M社	使用されるであろう潜在マーケットにおいてすべて言えること	価格によるが10倍(20トン/年)増加
MM社	各社成分が不統一 焼鈍で問題出る	30%(49トン/年)増加
VV社	自動車用部品	ステンスが300万t、アルミが400万tの需要の内の5～10%程度
J社	建築用、屋根	
FF社		価格が下がれば自動車業界等には増えると思う
XX社	既存照明器具はアルミ、ステンなどが主流であり、これに相当するコストになれば検討したい	既存照明器具の筐体をチタンに変更する
YY社		不明
ZZ社	照明器具。 家電製品の外装ハウジング、器体、シャフト等	定尺 t0.4～0.6 を500シート/年
AAA社	チタンの機能を要求する部品等がない	
A社	人工骨	
BBB社	海上自衛隊、艦船の船体構造材料	コストが下がれば(鉄鋼並)、非磁性等の非常に有用なメリットが期待される。 50t以下/1隻

不使用理由解消時の増加量について数値を回答した企業は少ないが、回答した各社ともかなりの増加量を予測している。

〔6〕チタンを使用しない理由を解消するため、チタン業界への要望

表4-4にチタンを使用しない理由を解消するためのチタン業界への要望を示す。

表4-4 チタンを使用しない理由を解消するためのチタン業界への要望

	チタン業界への要望
製造販売している企業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 加工方法の公開</li> <li>・ SUS並の機械的特性及び価格</li> <li>・ 製品(材料)のサイズの多様化</li> <li>・ 板材の厚さ、サイズの多様化</li> <li>・ パイプ材のサイズの多様化</li> <li>・ 安価な合金</li> <li>・ ファスターの低価格化と普及</li> <li>・ 製造(材料)コストの削減</li> <li>・ 規格の統一化</li> <li>・ 小ロット対応</li> <li>・ 納期短縮</li> <li>・ 材料不足(納入が決められない、最近材料の価格が大幅上昇)</li> <li>・ 普及活動</li> <li>・ 加工が容易</li> </ul>
製造販売していない企業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ コスト低減(アルミ、ステンルのせめて倍)</li> <li>・ 素材価格が上級グレード ステンル鋼に近づくことが必要</li> <li>・ 製造、加工コストを低減する技術開発</li> <li>・ チタンの成形性、加工性、コストに関して、アルミ・ステンルと比較しての有利性を啓蒙し、市場における汎用素材としての位置付けを確固たるものにする</li> <li>・ 防衛庁、建造所等への製品説明・PR</li> </ul>

価格の低減のほか、サイズなどの多様化、規格の統一、普及・啓蒙活動、加工方法の公開、納期短縮、材料不足の解消などが要望としてあげられている。

〔 7 〕 チタン製品を製造、販売している企業へのアンケート

( 1 ) 製造、販売しているチタン製品の量及びチタン価格低下時の増加量

表4-5 製造、販売しているチタン製品の量 - 1

社名	チタン製品	製品量 (t/年)	価格がステン の3倍時の製品量 (t/年)	価格がステン の2倍時の製品量 (t/年)	価格がステンと 同等時の製品 量 (t/年)
OO社	チタンシート	400	470	940	1,880
	チタンコイル	150	180	360	720
	チタンチューブ	250	300	600	1,200
PP社	純チタン厚板など	1,000	1,800	3,400	6,200
NN社	海洋:収納ケース	10			
	化学石油:各種熱交、圧力容 器、塔槽類、配管、タンク、タンク ローリー、バルブ、ポンプ部品	250			
	環境:タンク装置(浄水場)	10			
	製紙:ター、タンク、熱交、配管	20			
	電極:銅箔、整水器	20			
MM社		130			170
LL社	バルブ	110	110	130~140	470
II社	熱交換器のチューブ、管板	100	100	100	100
KK社	溶接パイプ (3,696円/kg)	80	200	500	1,000
FF社	電極	25	25	30	35
	化学工業用	25	30	50	100
	熱交換器	10	12	15	20
HH社	自転車部品	60	60	60	200
CC社	蒸気タービンの長大動翼	2	2	3	4
	海水冷却式復水器チューブ	20	20	20	20
DDD社	ファスナー(B,N)	1		3	10
	めがね材	10		20	30
	医療用材	3		10	30
AA社	陽子加速器用真空容器	10	10	10	10
Y社	ターゲット材料	5.5		5.5	5.5
	医療材料	0.8		0.8	0.8
	真空装置部品	0.7		1.0	2.0

表4-6 製造、販売しているチタン製品の量 - 2

社名	チタン製品	製品量 (t/年)	価格がステン の3倍時の製品量(t/ 年)	価格がステン の2倍時の製品量(t/ 年)	価格がステンと 同等時の製品量(t/ 年)
O社	コーンロッド	1.2			3
	ノブ	1.2			2
	バルブ	5			10
V社	熱交換器	5	6	8	10
W社	鋸螺類	4~5	10	20	50
Z社	チタン熱交換器	5	6	8	20
	複合材(ブスバー、電極)	3	4	5	8
BB社	電極	1.5	ステンレスは使用 不可		
	貯槽	0.5		10	20
Q社	整形外科用インプラント	2.5	2.5	2.5	2.5
S社	眼鏡枠	1	1	2	1
	電極	2	2	2	2
T社	航空、宇宙向け部品	2~3	2~3	2~3	2~3
K社	小ねじ	数トン			
R社	人工股間接システム	0			価格に関係せず
	プレート・スクリュー	2			価格に関係せず
	髄内釘	1			価格に関係せず
	手術器械	0			1
U社	鋼製小物	1	1	1	1
	鋼製小物のパーツ	1	1	1	1
	インプラント製品	1	1	1	1
M社	ねじ製品	2			
JJ社	小型舟艇パーツ	1~2	3	10	50~100倍
I社	ボルト	1	11	16	19
P社	車椅子	0.5			
H社		0.6		1.2	
J社	屋根材	1	30	100	300
F社	水槽用パネル	0		~100	~300
	圧力容器	0.1	1~3	~50	~150
C社	照明器具	0.06			
A社	医療用	0.03			

E社	扉用のハンドル、蝶番、取手、ケ ース用パッチン錠	0.3	0.4	0.6	3.0
----	-----------------------------	-----	-----	-----	-----

図4-3～図4-6にチタン価格低下時のチタン製品の増加量について各社のアンケート結果を示す。なお、空欄の数値についてはチタン価格低下時に製品量の変化はないとした。

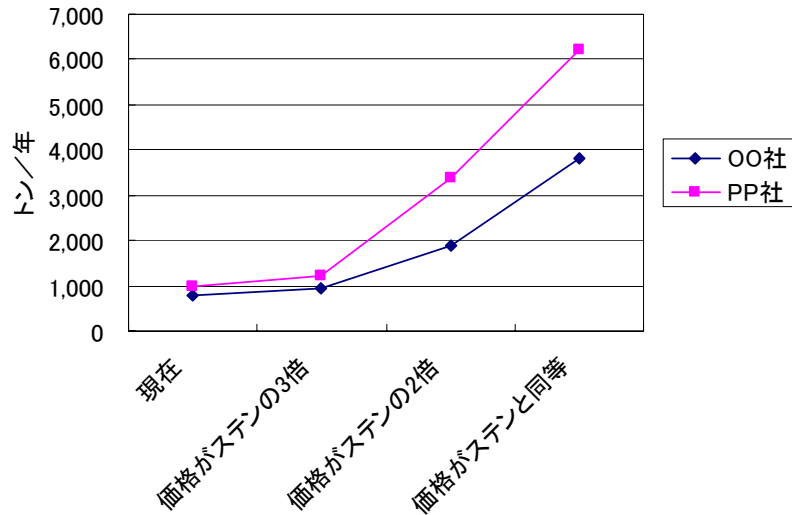


図4-3 現在の製品量500トン／年以上の会社のアンケート結果

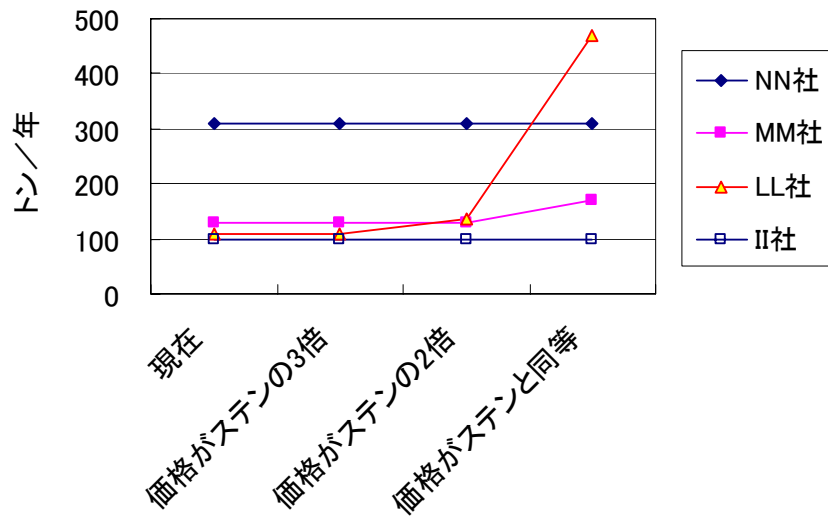


図4-4 現在の製品量100～500トン／年の会社のアンケート結果

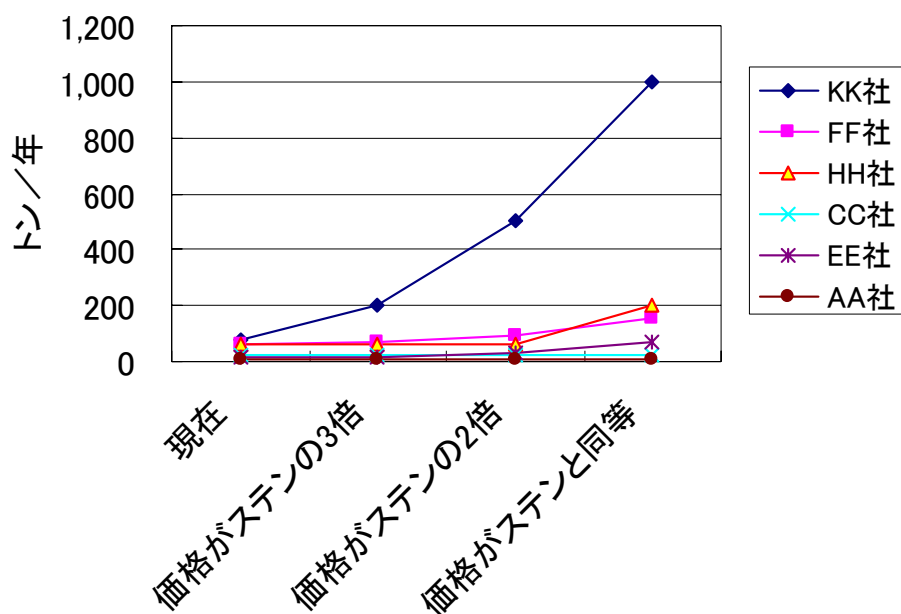


図4-5 現在の製品量10～100トン/年の会社のアンケート結果

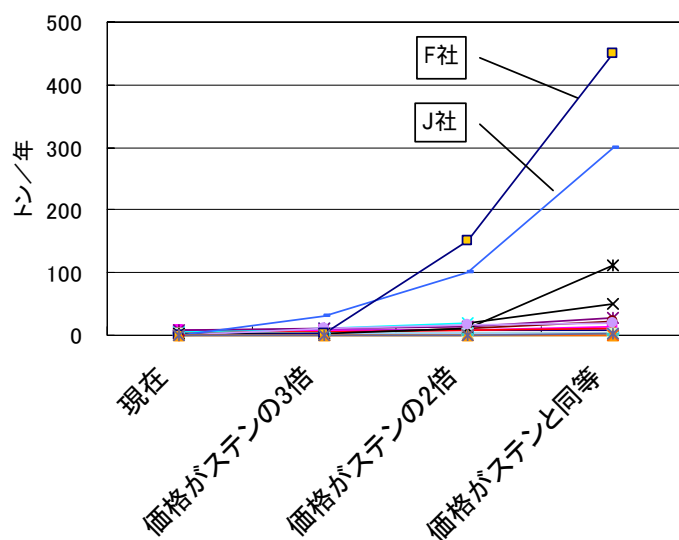


図4-6 現在の製品量0～10トン/年の会社のアンケート結果

チタンの価格低下による各社の製品増加量の推定はかなり差が見られるが、いずれもステンレス価格の2倍程度低下すると大きな増加となっており、ステンレス価格と同等になると10倍以上の増加となるものもある。

チタン価格がステンレス価格と同等になった場合、シート、厚板、管など素材の増加は当然大きい



が、製品関係では圧力容器(1500倍)、屋根材(300倍)、小型舟艇パーツ(100倍)、貯槽(40倍)などが増加率が大きい。

( 2 ) チタンの価格がステンレスと同等の場合でチタンの薄肉化など加工性向上により増加する製品と増加量

表4-8にチタンの価格がステンレスと同等の場合でチタンの薄肉化など加工性向上により増加する製品と増加量を示す。表4-8よりチタンの価格がステンレスと同等の場合でチタンの薄肉化など加工性向上により増加する製品はさまざまな分野にわたっており、増加量は約7千トン／年以上になる。

( 3 ) チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由

回答した29社の使用しない理由(複数回答含む)件の内訳を表4-8に示す。29社の内、チタン製品を製造販売している企業は27社、製造販売していない企業は2社であった。

チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由でもっとも多いのは“製造・加工コストが高い”の26件で約40%を占めた。ついで多いのは“加工が難しい”、“その他”で10件、“機能が不足している”、“実績なし”が7件“技術情報が不足”が6件、“設計基準が無いかあいまい”が3件であった。

製造販売している企業ではステンレスと同等の価格でもなお、“製造・加工コストが高い”と言う意見で、“加工が難しい”が10件と多く、チタンの価格がステンレスと同等の場合でも、加工方法で苦勞し、加工費が高いため、使用できないとしている。“機能が不足している”、“実績なし”も多く、チタンの用途拡大には価格低下だけでなく、機能向上と使用実績の確保が課題となる。

製造販売していない企業では“製造・加工コストが高い”、“技術情報が不足”、“設計基準が無いかあいまい”という意見があり、チタンの用途拡大には価格低下だけでなく、技術情報の公開、設計基準の確立、公開が課題となる。

表4-7 チタンの価格がステンレスと同等の場合でチタンの薄肉化など加工性向上により増加する製品と増加量

製品	増加量(トン/年)
チタンシート	2,760
チタンコイル	1,000
バルブ	ステンレスバルブ全量
ボルト	数百
熱交換器	1、20
真空装置部品	2
鈇螺類	75
複合材(フスパー、電極)	5
屋根材、食器類	数万(全国で)
楽器用部品	0.01~0.05
装飾品	0.01
貯槽	20
扉用のハンドル、蝶番、取手、ケース用パッチン錠	4
自動車関連部品	500
機械部品	200
産業用構造材	100
液晶製造設備	50
液晶関連製品	100
コンビニおでん鍋	40
ボルト	20
舟艇パーツ	10~20
船体	5~50
溶接パイプ	1000
メタルシール、バルブシール	5
水槽用パネル	300
圧力容器	150
ねじ類	20
車いす	25
医療器具	7
陽子加速器用真空容器	10
真空チャンバー	500
海洋関係	現状SUS使用量相当
化学石油関係	〃
環境	〃
製紙	〃
電極	〃
食品	〃

表4-8 チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由の件数の内訳

	製造販売している企業	製造販売していない企業	合計
機能が不足している	7	0	7
設計基準が無いかあいまい	1	2	3
実績がない	7	0	7
技術情報が不足	4	2	6
加工が難しい	10	0	10
流通経路が分からない	0	0	0
リサイクル性が分からない	0	0	0
加工法が分からない	1	0	1
製造・加工コストが高い	24	2	26
その他	10	0	10
合計	64	6	70

(4) チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由が問題となる具体的な用途と不使用理由解消時の増加量

表4-9、表4-10にチタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由が問題となる具体的な用途と不使用理由解消時の増加量を示す。

価格が低下してもチタンへの切り替えが困難な理由として、ユーザーの認知度、加工の困難さ、ステンレスから切り替える場合の実績の必要性などが挙げられている。

(5) チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由を解消するため、チタン業界への要望

回答した24社の要望（複数回答含む）を表4-11に示す。24社の内、チタン製品を製造販売している企業は22社、製造販売していない企業は2社であった。

技術情報の開示、ユーザーへのPR、性能の向上、安定供給体制などが主な要望である。

表4-9 チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由が問題となる具体的な用途と不使用理由解消時の増加量(1)

企業名	具体的な用途	不使用理由解消時の増加量
PP社	ニッチ用途に限られており、一般的な用途へのPR不足	見込める
00社	用途に限らず、ユーザーがチタンを知らなすぎる。ステンレスと比べて加工が難しいものではない	2倍、3倍に増える可能性がある
K社	軽量化だけならMgの方が軽く、実用化されている。Tiに求められる機能は”強度部材”として使えるかで、ボルトなど自動車部品に適用する動きがあるが、特に設計基準、特性値、実績、製造コストが大切	現在特殊鋼が用いられている部分の一部が切り替えられる
D社	曲げ加工を要する製品(手作業で簡単に加工可能にする)	10倍以上増加
W社	鋳螺類	数倍(20トン/年程度)
GG社	製造メーカーに限られており競争相手が少ない	
Z社	食品を直接熱交換する用途 例えば豆乳の冷却	不明
BB社		20-30トン/年、数年間で更新毎に使用
E社	加工しやすい材料における耐摩耗性、強度の不足。逆に強度がある6-4材では加工が難しい。プレス絞りにおける材料の張出し性にも難。	全体量に対して約2割の使用量の増加
DDD社	コンロット等自動車部品	10倍
T社	高速プレスで製造される部品	50トン/年
I社	ボルト	10トン/年
KK社	素材の手当/手配が明確にできない環境では客先に納期回答ができず、営業推進が困難	
O社	メタルシール	5トン/年
F社	水槽素材(耐食性)圧力容器	400~500トン/年
MM社	加工と焼鈍温度	40トン/年
J社	知識、使い方の普及ができていない	ステンレスと同レベル価格で普及が出来ればステンレスの80%は変わる
FF社		現状マーケット以外の分野で大きく増える可能性がある
HH社	ディスクブレーキのローター	200~300トン/年
L社	医療機器	
YY社	防爆製品は検定上の問題(再検定受験)。ステンレスとの比較(材料)要	
C社	採用する部分が少ない	
CC社	弾性強度、ねばり等が採用部品に適合するか検証する必要がある	100トン/年以上
U社	熱処理が必要な製品、刃物・ハネ等	飛躍的に増加

表4-10 チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由が問題となる具体的な用途と不使用理由解消時の増加量(2)

企業名	具体的な用途	不使用理由解消時の増加量
R社	人工股関節の場合摺動面の耐磨耗性の問題	
AA社	真空容器	見込めない
Q社	手術用器械	0.5トン/年
H社	特に食品分野では顧客から使用原料とその組成は開示されない為、テストからの実績づくりとなる。(高級ステンレスでも腐食している設備装置は当然存在すると考えられる為、具体的には装置製造メーカーとタイアップ必要)	腐食環境設備装置使用材質が特定出来ない為、増加量は不明であるが、ハステロイ、高級ステンレス、一般SUS材からの転用可能性は期待大

表4-11 チタンの価格がステンレスと同等の場合でもチタンを使用しない理由を解消するためのチタン業界への要望

	その他の理由
製造販売している企業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 用途開拓へのPR活動</li> <li>・ 普通鋼、ステンレスと比較した実際の加工に即した内容の技術データをWEB上などで無料で公開するなど、ユーザーの視点に立った情報提供をお願いしたい</li> <li>・ 比重、サビ以外で機能面で特殊鋼よりも優れた特性は何なのか示して欲しい(例えば遅れ破壊特性など)</li> <li>・ コストダウンとユーザーへの売込み</li> <li>・ 加工方法の公開</li> <li>・ サニタリー規格を満足する低価格チタン管の開発</li> <li>・ 生体適合性、金属アレルギーが少ない等をアピールし、付加価値を付ける</li> <li>・ 安定した価格とリサイクル性をPR</li> <li>・ SUS304レベルの加工性を有し、強度もあり、チタンの高耐腐食性を有した合金材の開発</li> <li>・ マーケットに合致した新合金の開発</li> <li>・ 金型磨耗性の向上</li> <li>・ 価格低減</li> <li>・ 30,000t、50,000t、100,000t/年を日本で生産する場合、アップストリームからボトム迄、何がネックで何を実行検討するのか素材供給課題を整理してほしい</li> <li>・ 加工に関する情報</li> <li>・ 設計基準の設備加工技術の開発・普及</li> <li>・ 塑性加工による金属塑愛器の変化</li> <li>・ 情報公開</li> <li>・ 自動車産業向けに使うには価格が高い。</li> <li>・ 材料データを整理したものが必要。</li> <li>・ 安定供給</li> <li>・ 熱処理の方法、硬化性の開示</li> <li>・ 新規分野実績での拡大PR</li> </ul>
製造販売していない企業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 材料情報</li> <li>・ 加工性の開示</li> <li>・ 設計基準の設備</li> <li>・ 加工技術の開発・普及</li> </ul>

〔 8 〕 ステンレス製品を製造、販売している企業へのアンケート

( 1 ) 製造、販売しているステンレス製品の量及びチタン価格低下時のチタンへの置換え量

表4-12 製造、販売しているステンレス製品の量及びチタンへの置換え量

社名	ステンレス製品	製品量 (t/年)	チタン価格がステン の3倍時の 製品量 (t/年)	チタン価格がステン の2倍時の製 品量 (t/年)	チタン価格がステン と同等時の 製品量 (t/年)
OO社	ステンレスシート	130,000	100	2,000	8,000
	ステンレスパイプ	8,000	100	500	1,000
	ステンレス条鋼	10,000	100	500	1,000
KK社	溶接パイプ	10,000~14,000	200	500	1,000
QQ社	圧力容器、配管	1,000	0	0	200
W社	鋳螺類	600	20	40	70
II社	圧力容器	500	0	0	0
HH社	自転車部品	400	0	0	100~200
I社	ボルト	400	200	300	350
J社	ステンレス防水屋根	360	30	100	300
CC社	水、空気復水器、チューブ	数百	0	0	40
FF社	化学工業用機器	50			
	熱交換器	15			
L社	ステンレスパイプ	50			
AA社	陽子加速器用部品	50	50	50	50
E社	扉用のハンドル、蝶番、取手、 ケース用パッチ錠	50	0	0	0
LL社	バルブ	40	26	29	48
U社	鋼製小物	10	1	1	1
	鋼製小物のパーツ	5	1	1	1
	インプラント製品	1	1	1	1
O社	コーンロッド、ノブ、バルブ	5	0	0	5
R社	人工股間接システム	0.5	0	0	0
	人工股間接ヘッド	1	0	0	0
	手術器械	1.5	0	0	1
Z社	チタン熱交換器	1	0	0.5	1
N社	医療用手術器械	1			
Q社	医療用手術器械	0.5			
S社	眼鏡枠	0.5	0.1	0.2	0.5
G社	医療用手術器械	0.2			

図4-7～図4-9にチタン価格低下時のステンレス製品のチタンへの置換え量についての各社のアンケート結果を示す。なお、空欄の数値については製品置換え量は0とした。

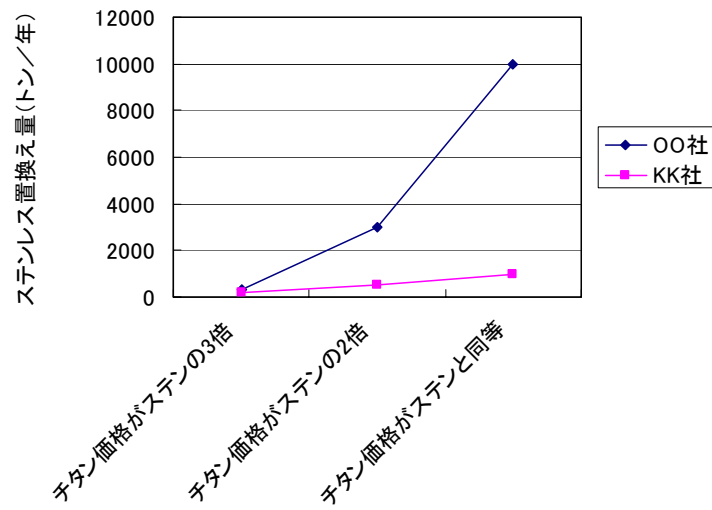


図4-7 現在のステンレス製品量製造・販売量が1万トン/年以上の会社のアンケート結果

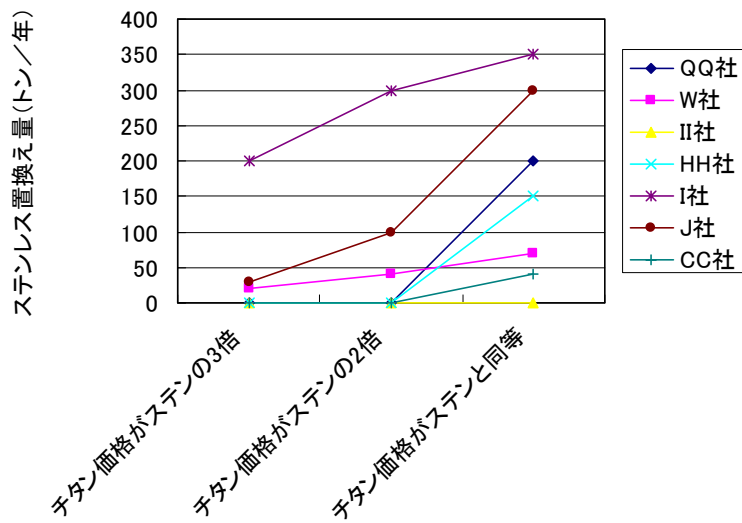


図4-8 現在のステンレス製品量製造・販売量が100～1万トン/年の会社のアンケート結果



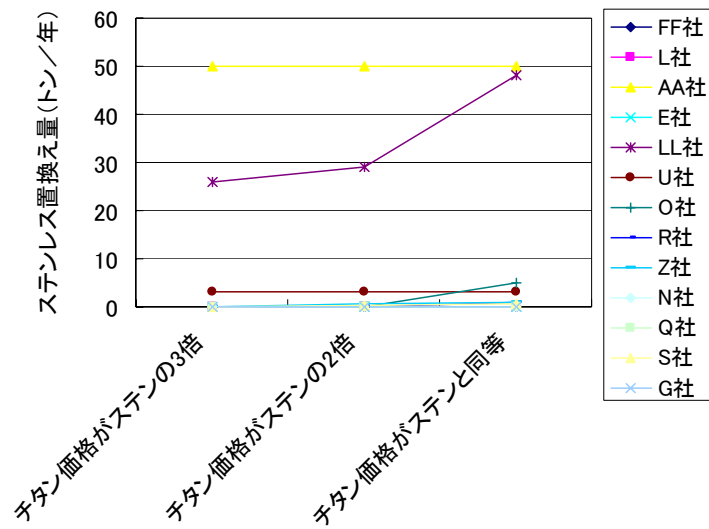


図4-9 現在のステンレス製品量製造・販売量が100トン/年以下の会社のアンケート結果

会社によりチタン価格低下に伴う置換え量に特に傾向は見られないが、ステンレス製造・販売量の多い(1000トン/年以上)会社では置換え割合が少ない傾向がある。逆にステンレス製造・販売量の少ない会社では置換えを一気に進め易いことを示している。

〔 9 〕 チタン価格低下に伴うチタンの使用量増加に対するチタン業界への要望

表4-13～表4-15にチタン価格低下に伴うチタンの使用量増加に対するチタン業界への要望をまとめて示す。

表4-13 チタン価格低下に伴うチタンの使用量増加に対するチタン業界への要望 - 1

	チタン業界への要望
製造販売している企業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 生産能力が1万7千トでは需要拡大に応じきれない。新製錬法の開発と設備改善（連続圧延）による大量生産を目指した技術革新を要望する。原材料を確保し、供給に支障なきよう努めていただきたい</li> <li>・ 価格低下。加工性の向上。流通ルートの簡便化(一般鉄鋼並)</li> <li>・ コストダウンとマーケット探索。車輛（海岸近くを走る）などへの適用。</li> <li>・ コスト低減。材料供給の迅速対応(材質、寸法、数量)</li> <li>・ 一般市場への特性PR(知名度アップ)</li> <li>・ 価格低下 加工方法の開発開示</li> <li>・ 短納期(1ヶ月以内)に調達出来ると、素材の在庫量の低減が出来、使用しやすくなる</li> <li>・ 低コスト、溶接性の向上</li> <li>・ 価格です。耐食材料としても使用しているが、安価な製品用には現価格では使用し難い。</li> <li>・ コストダウンと安定供給。特に材料の種類(1種、4種の板材)を希望しても入手が困難</li> <li>・ 矽は高価で加工困難のイメージがあるので、払拭する</li> <li>・ 価格低減、耐熱性の向上</li> <li>・ 素材供給の安定化</li> <li>・ ねじ類はあらゆる機械や金属加工のアッセンブには欠く事の出来ない部品であるが、当社のようなストック化し、見込み生産、在庫をする商社(卸)を出来るだけ利用してもらう</li> </ul>

表4-14 チタン価格低下に伴うチタンの使用量増加に対するチタン業界への要望 - 2

<p>製造販売している企業</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低価格</li> <li>・ 小口対応業者に対する需要開拓の支援</li> <li>・ 材料の場合は米、中、ロシアより輸入可</li> <li>・ 使い方など普及活動をして欲しい。設計事務所へのPR。</li> <li>・ 加工性の向上</li> <li>・ 材料形状の多様化</li> <li>・ 熱処理による硬化性情報の提供</li> <li>・ 低価格、安定供給、納期短縮（3ヶ月）</li> <li>・ Ti-6Al-4V ELIの製造リードタイムの短縮。</li> <li>・ 購入単価の値下げ</li> <li>・ 材料の安定供給を望みます。全体の需要量が少ない関係かは分かりませんが、在庫を備蓄していただけるような対応も少なく、航空機産業等の需要が高まると極端に納期が遅れる状況が見られます。原料等の備蓄を業界内で分担して負担するなどの対応をしていただき、安定供給を確保していただきたいと思います。</li> <li>・ 値下げ、安定供給。ただし、安全性耐久性での実績がアピールされないといざこざが無い。ティタニウムはコストが高い。例えば、原潜やロケットの外殻がチタンでも排水ポンプやモーターの需要はあったか？生体親和性の高いことが、安全性とコストでどうしてもチタンで無いと環境に影響するような事実があれば、ステンレス同等値段でも給水ポンプが売れるかもしれない。</li> <li>・ 高級ステンレス価格レベル以下のコストダウン化</li> </ul>
-------------------	--

表4-15 チタン価格低下に伴うチタンの使用量増加に対するチタン業界への要望 - 3

<p>製造販売していない企業</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 価格の明確化。業界をオープンにする。身近な民生品(スプーン、フォーク等)にSUSの代替ではなく投入する</li> <li>・ 低コスト化</li> <li>・ 用途、使用拡大に期待</li> <li>・ 公的なデータ集の拡充を望む</li> <li>・ 安価な製造プロセス、低コスト化</li> <li>・ 「チタン商品開発研究会」を組織し、地域企業14社、1大学の研究室と共同開発を進めているが、材料コストが問題となっている。純チタンでも民生用(耐食性が多少悪くても)の低コストチタンがあれば良いと考える</li> <li>・ 特殊環境だけでなく、一般環境、家電製品外装部分などの用途例の紹介。装飾表面処理例、見た感じ、質感、風合いなど工業的な機能以外でチタンでしか出来ないことのPR</li> <li>・ 質量、強度の面より有利な材料であるのは認知。</li> <li>・ 価格・加工等から船舶分野では機運がない</li> <li>・ 今後のPR、相互技術交換に期待。</li> <li>・ チタン製造のコスト、販売価格引下げ</li> </ul>
--------------------	---

これまでの要望と同様に、価格の低減の要望が最も多い。そのほか、安定供給、普及・啓蒙活動、加工方法の公開などが主な要望として挙げられている。

#### 4 - 2 チタン価格低減による導入産業分野の変化

企業へのアンケート調査結果から以下の点が明らかになった。

##### 〔1〕チタンを使用しない理由と対象となる製品

図 4-10 にチタンを使用しない理由を示す。製造コストが高いことが第 1 の理由で 33%、次いで使いたいが、技術情報が不足している、加工が困難、加工方法が不明という意見が合計で 23%、実績がない、機能不足という意見は合計で 18%であった。その他の意見にもチタン価格、加工方法についての意見が含まれているので、チタンの価格を低減し、加工しやすい材料を提供し、加工方法を広く開示すれば、50%を越えることになる。

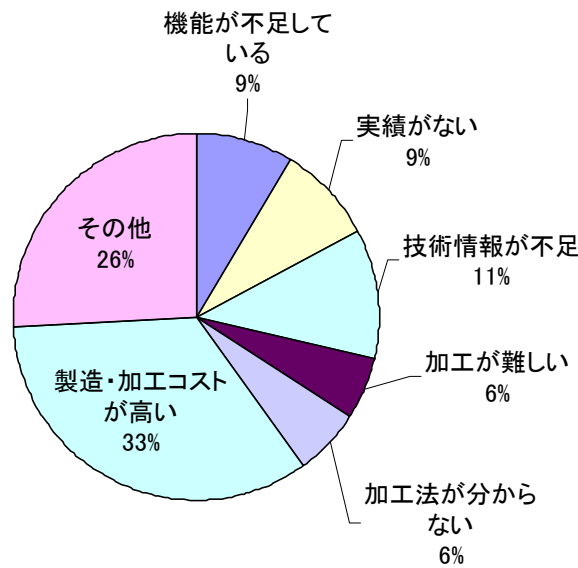


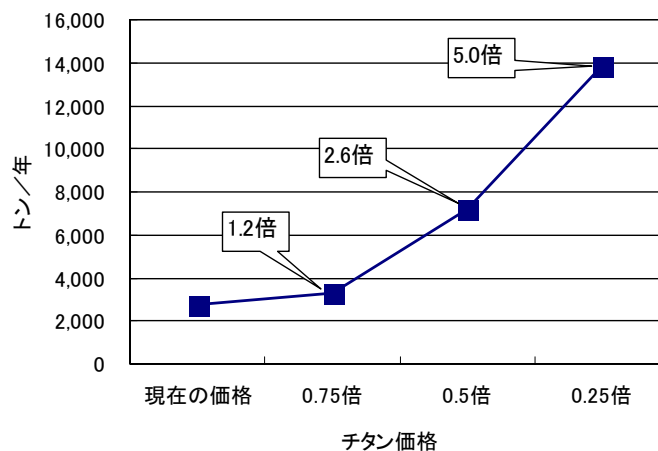
図4-10 チタンを使用しない理由

チタンを使用したいと考えている対象製品は配管、熱交換器、容器、自動車部品、屋根材、船体、船部品、照明器具など多岐にわたる。

〔 2 〕 チタン価格低下時の増加量

現在のチタン価格からどれくらい低減すると、増加量はどのようになるかをアンケート調査した結果、回答が得られた分を合計すると、図4-11に示すように価格が3/4倍になるとチタン使用量は1.2倍になり、価格が半分になると2.6倍、1/4倍でステンレスと同等になると5倍にも増加する。ここでは現在のチタンの価格をステンレス価格の4倍としている。

図4-11 チタン価格低減時のチタン使用量の変化



### 〔 3 〕 チタン価格が低減しても使用しない理由

図4-12に示すように、チタン価格が低下し、ステンレスと同等の価格でもなお、使用しない理由で最も多いのが、製品・加工コストが高いという理由である。これは、“製造・加工コストが高い”と言う意見で、“加工が難しい”と合わせて52%になり、チタンの価格がステンレスと同等の場合でも、加工方法で苦勞し、加工費が高いため、使用できないとしている。

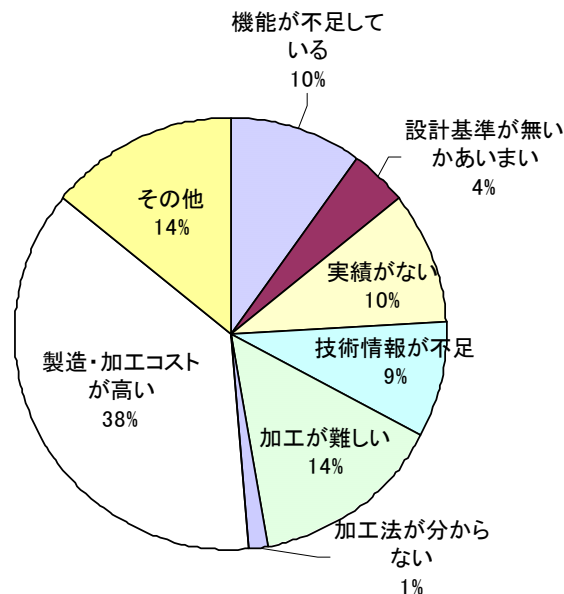


図4-12 チタン価格低下時でも使用しない理由

### 〔 4 〕 チタンの薄肉化など加工性向上による増加量

チタンシート、コイル、バルブ、熱交換器、自動車関連部品、機械部品、水槽など広い製品分野にわたって増加が見込め、今回アンケート調査の回答が得られた企業だけで年間約7千トン以上の増加が見込める。これは現在のチタン展伸材の年間生産量約1万4千トンの半分にも及ぶ。

### 〔 5 〕 チタン価格低減時のステンレスから置換え量

チタン価格低減時のステンレスからの置換え量を調査した結果、回答が得られた分を合計すると図4-13に示すように価格が3/4倍になるとチタンへの年間置換え量は980トンになり、価格が半分になると4,100トン、1/4倍でステンレスと同等になると12,300トンに増加する。回答した企業のステンレスの年間使用量合計は164,000トンであるので、置換え量は0.6%~7.5%と低い。特に大量にステンレスを扱う企業ではステンレスへの根強い需要があるものと見られる。いっぽう、ステンレス製造・販売量が年間400トン以下の企業では価格

低減とともに一気に置換えが進むと回答している企業が多く、製品、ユーザーによってばらつきがある。

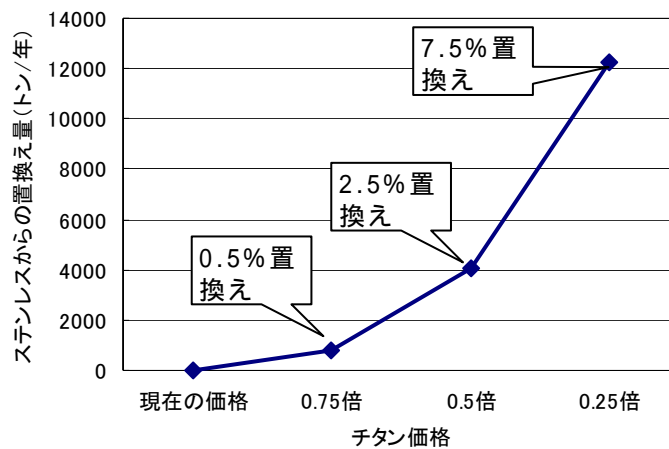


図4-13 チタン価格低減時のステンレスからの置換え量の変化

#### 〔6〕その他チタン業界への要望

チタン価格が低減し、需要が増加した場合に納入に対処できるのか、という不安があり、その際の安定供給などの対応についての要望が強くある。また、設計基準、加工方法の開示、拡充、加工性向上、チタンが使用しやすい材料であることのPRの要望などがある。

#### 〔7〕まとめ

チタン価格低減に伴い、各製品分野で相当量のチタン使用量の拡大、ステンレスからの置換えが見込める。しかしながら、需要増加時際の素材製造メーカーの安定、迅速な供給を不安視する声も多いので、チタン価格低減技術の開発を進めていく際に、生産量の展望を業界へ示してPRし、同時に加工性の向上、加工方法、設計基準の開示など、ユーザーがチタンを使いやすいように情報を広めていく必要がある。

## 4. 調査研究の今後の課題及び展開

前記の成果を踏まえ、チタンの製造コスト低減に向けて、次のような課題と展開が必要と考えられる。

### 4-1 今後の課題

#### (1)チタンの製造コスト低減に向けて必要な技術開発課題

##### a)チタンの製錬、造塊工程におけるコスト低減に必要な技術課題

- ①Ca還元による製錬技術の開発(JTS法、OS法など)
- ②VARの2回溶解・鑄造工程を1回溶解・鑄造工程にする技術開発(JTS法、EBM法、PAC法)

##### b)チタンの加工工程におけるコスト低減に必要な技術課題

- ①加工性の良い合金の開発
- ②不純物汚染がなく、歩留まりの良い、ニアネットシェープ成形技術の開発(レビキャスト法、インダクションスカル溶解法、パルス通電加圧焼結法など)

#### (2)チタンの用途拡大のための課題

- ①現状の価格の半分になれば、使用量が2倍以上に増加するので、製錬から加工にわたる一貫したコスト低減が必要。
- ②チタンの用途拡大のため、設計基準の整備、加工技術の開示の方法の検討
- ③チタンの需要増に対応するための素材メーカーの体制の検討

### 4-2 今後の展開

製造コストが低減できる新たなチタンの製錬、造塊、加工工程の開発、実用化については、設備投資規模が大きくリスクが高いため、関連業界が協力して取り組むことが好ましい。

- ②同上システムの実用化推進にあたっては、さらなるコストダウンの可能性や、需要動向に応じた戦略的な取り組みについても検討する必要がある。





禁無断転載

システム技術開発調査研究 16 R 4

チタン製造コスト低減に関する調査研究

(要旨)

平成17年3月

作成 財団法人 機械システム振興協会  
東京都港区三田1丁目4番28号

TEL: 03(3454)1311(代)

委託先 財団法人 金属系材料研究開発センター  
東京都港区西新橋1丁目5番11号

TEL: 03(3592)1284