

チタンおよびチタン合金の製造技術

Manufacturing Technology in Titanium and Titanium Alloy

八 並 洋 二*
Yoji YATSUNAMI

高 梨 健太郎
Kentaroh TAKANASHI

抄 録

日本製鉄(株)のチタン事業は鉄鋼で培った高度な製造技術に基づいてチタン製品を効率的に製造しており、一般工業用の純チタン分野では他社を凌駕する高品質かつ広範囲なサイズのチタン製品を提供している。特に、より高い品質を要求される航空機向け分野では、機体およびエンジンのプレミアムグレードにも対応できる製造技術力を有する。さらに、日本製鉄は商品としては薄板、厚板、溶接管、線材、ビレット、丸棒および熱押材などのほぼ全てのチタン製品の製造を手掛け、かつ製造プロセスとしては溶解から鍛造・圧延・製品までの一貫製造工程を有する世界でトップクラスのチタンの一貫製造メーカーである。

Abstract

Nippon Steel Corporation efficiently manufactures of titanium products based on the advanced manufacturing technology developed in steel and provides high quality and wide products range of sizes that surpass competitors in the field of commercial pure titanium for general industry. Especially in the field of aircraft where higher quality is required, Nippon Steel have manufacturing technology for airframes and premium quality of engines. Furthermore, Nippon Steel is one of the world's leading titanium manufacturers with almost all titanium products such as sheets, plates, welded pipes, wire rods, billets, bars and extrusion and with an integrated manufacturing process such as melting, forging, hot rolling and cold rolling.

1. はじめに

日本製鉄(株)のチタン製品出荷ミルとしては、東日本製鉄所の直江津地区、関西製鉄所の製鋼所地区、および九州製鉄所の八幡地区(光チタン含む)の3地区体制となっており、それらの技術開発を支える研究所は、富津のREセンターおよび尼崎の研究開発センターの2箇所体制となっている。ここでは、日本製鉄におけるチタンの製造体制・技術について紹介する。

2. 日本製鉄におけるチタン事業の歴史と特徴

日本におけるチタンの生産は、W.J.クロールがMg還元法による工業化に成功をおさめた6年後の1952年に大阪チタニウム製造(株)(当時)にてスポンジチタンの試験生産を開始、1954年にその量産を開始した。その後、日本製鉄では1968年に直江津地区にてチタン薄板の生産を開始し、その後1984年には八幡地区(光チタン)(以降、光と記す)にてチタン薄板、溶接管および線材、八幡地区にてチタン

厚板の生産を開始している。

直江津地区では純チタン薄板を中心に製造し、高品質かつ厳しい品質管理体制が要求される航空機向け純チタン薄板についてのエアバス社の認証を受け、純チタン薄板を製造出荷している。

一方、光と八幡地区で製造しているチタン薄板、溶接管、線材、および厚板の多くは一般工業用向けの純チタンである。

また、1984年に製鋼所地区にてチタン合金用の製造設備を設置し、1985年に国内の航空機関連重工業メーカーからの認証を取得し、高品質を要求される航空機エンジンのファンブレード用チタン合金を製造出荷している。

3. チタン需要と今後の展望

国内でのチタン展伸材の出荷量の推移を図1に示す。東日本大震災や欧州のユーロ危機、直近ではコロナ禍による一時的な景気落ち込みもあるが、近年での出荷数量は年間20千トンに迫る規模であり、大局的には右肩上がりが増加

* チタン事業部 チタン技術部長 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

傾向にある。同じく国内の2019年の需要分野別の出荷比率を図2に示す。

チタンは、特に海水に対しての耐食性に優れているため、海水との熱交換器に多く使用され、プレート式熱交換器(Plate Heat Exchanger : PHE)や発電所復水器に多くが使用されている。

国内需要の多くは純チタンであり、国内での航空機向け需要は13%程度である。一方、世界のチタン需要の半分は航空機向けと言われており、その多くはチタン合金である。現在はコロナ禍で低迷している航空機分野も数年後には需要回復が期待されている。

国外では近年、中国の台頭が著しい。チタン展伸材の出荷量は2019年には2018年から19%増の75千トン/FYと同年の我が国の国内出荷量の約5倍に達しており、近年増加の一途にある。日本のチタンとしては品質を特に要求される航空機や自動車向けなどの高付加価値用途での拡販を

志向する事が望ましい。

今後のチタンの展望としては、環境対応を基軸とした燃料電池、水素社会、あるいは空飛ぶ自動車などの市場ニーズが新たに創出されてくると予想されている。

また、チタンはその耐食性能により高寿命でLCC観点でも優れている金属であるが、昨今の環境問題に対応するカーボンニュートラルにおいては、スポンジチタン製造時に更なる改善が求められると考える。

特に、チタンの原料であるスポンジチタンを製造するクロール法(図3²⁾)においては、直接的な炭素量排出(鉱石の塩化過程にて $TiCl_4$ 生成時に CO_2 排出)、および間接的な炭素量排出(電力、特に $MgCl_2$ の電気分解でMgと Cl_2 を再生)が大きな課題である。物質・材料研究機構での調査によると、スポンジチタン製造工程においてはスポンジチタン1トン製造にあたり6.9トンの CO_2 を排出しており、その内の6割程度が $MgCl_2$ の電気分解時の電力である³⁾。今後、チタン鉱石(TiO_2)からの金属チタンTiの還元技術

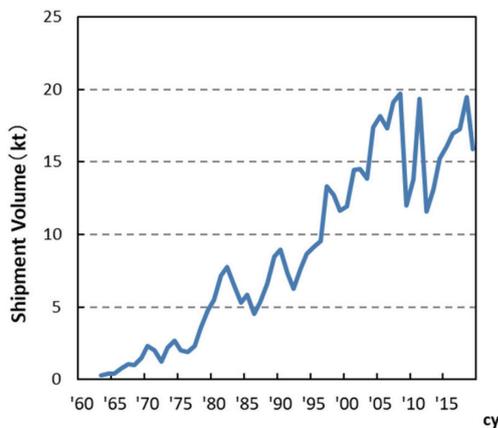


図1 国内展伸材出荷量

Temporal changes in volume of domestic shipment of titanium products

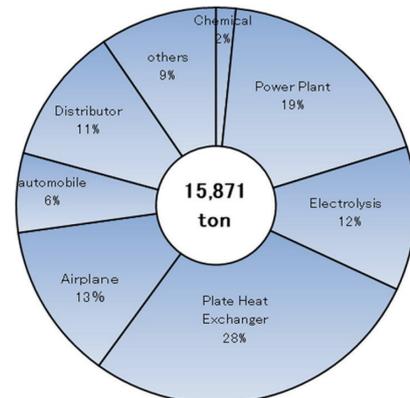


図2 2019年製品形状別の国内出荷量
Domestic shipment of each products in 2019

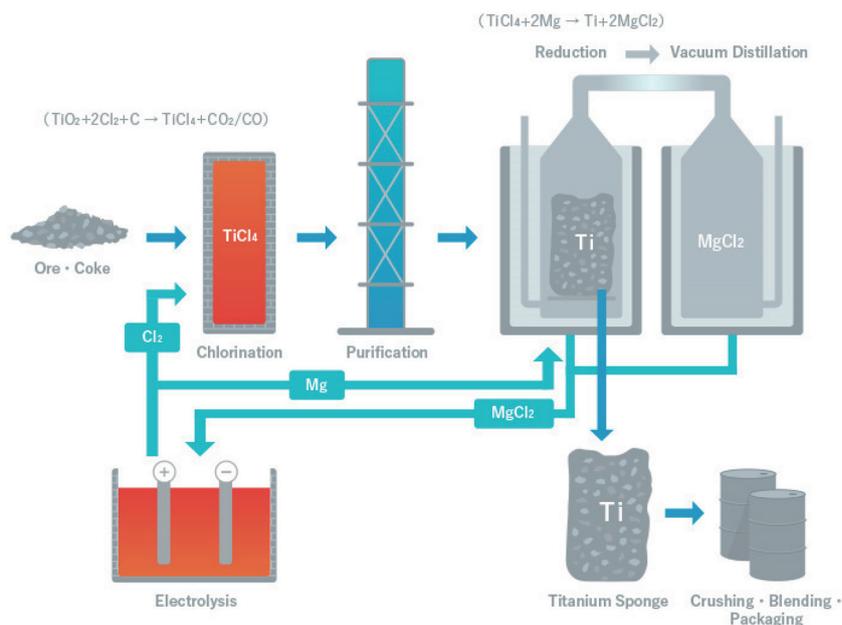


図3 スポンジチタンの製造工程²⁾
Manufacturing processes of titanium²⁾

の改善、精練技術の改善などの技術革新が非常に期待されている。加えて、精練以降の展伸材製造までの工程においても、鉄で培った製造技術により製造効率化が進められているものの、継続した改善は必要である。

4. 製造技術

4.1 製造体制

2019年の製品形状別の出荷数量を図4に示す。薄板、厚板の板系列が約7割を占めている。その他、溶接管・棒・線材と続き、日本製鉄はチタン製品のほぼ全ての品種の製造出荷を手掛けている。

チタンの製造には鉄鋼設備も活用しており、また板・管・線・棒など多品種であるため、冒頭に記した直江津地区、製鋼所地区、および八幡地区（光含む）の3箇所の製品出荷地区に加えて、東日本製鉄所の君津地区および鹿島地区、瀬戸内製鉄所の広畑地区も加えた計6箇所の地区が製造に関わっている。

製造設備的には、チタン溶解炉も保有し、分塊圧延、鍛造、コイルの熱間圧延（以降、熱延と記す）、厚板圧延、薄板圧延、さらには溶接管の造管ライン、棒線圧延といったチタン製品のほぼ全ての品種の製造を手掛けており、日本製鉄はインゴットから様々な製品までの世界でトップクラスの一貫製造メーカーである。

4.2 素材および溶解工程

溶解原料となるスポンジチタンはチタン鉱石を還元して得られる多孔質の金属チタンである。国内では東邦チタニウム(株)および(株)大阪チタニウムテクノロジーズの2社がスポンジチタンを製造しており、これを消耗電極式真空溶解炉（以降、VARと記す）や電子ビーム式溶解炉（以降、EBRと記す）にて溶解し、インゴットを製造している。この2社のスポンジとインゴットの品質は世界のトップクラスであり、日本製鉄は主にこの2社よりスポンジとインゴットを購入している。

VARとEBRの概略図を図5に示す。VARはスポンジチ

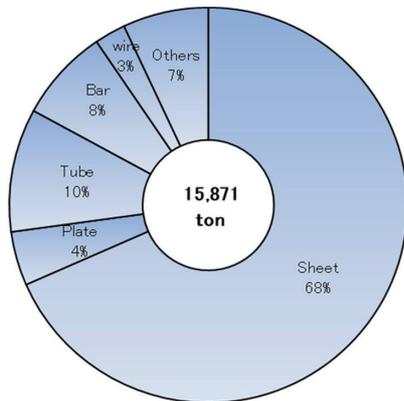


図4 2019年製品形状別国内出荷量
Domestic shipment of each applications in 2019

タンをプレスで押し固めた消耗電極を真空雰囲気下にてアーク加熱により溶解し、水冷式の銅鑄型内でインゴット形状に凝固させる溶解方式である。一方、EBRはスポンジチタンやチタンスクラップ等の原料を真空雰囲気下にて電子ビーム加熱により溶解し、水冷銅ハースにて不純物を除去した上で、鑄型内でインゴット形状に連続的に凝固させる溶解方式である。構造上、EBRではVARよりも原料として多くのチタンスクラップを使用できるというメリットがある一方で、VARには溶湯プールが深いため成分混合がEBRよりも優れるというメリットもある。需要家のニーズに応じて溶解炉を使い分ける事が可能である。

日本製鉄では直江津地区のVARおよびEBRにて自社溶解でのインゴット製造も行っている。日本製鉄が導入した新型EBRでは、配合できるチタンスクラップのサイズや形状の制約を解消し、従来のEBRよりもチタンスクラップ配合率を高めた溶解を実施している。これには日本製鉄が製鉄分野で長年蓄積した溶解、精練、および凝固に関する技術と経験、特に数値シミュレーションによる熱流体解析技術が活用されている。

今後はチタンスクラップ配合率を高め、リサイクル率を上げてスポンジチタンの比率を下げる事により、スポンジチタン精練時のカーボン排出量の抑制とコスト削減を目指している。

他社ではプラズマアーク式溶解炉（以降、PARと記す）を用いたチタン溶解も行われている。真空雰囲気下にて電子ビームを照射するEBRに対し、常圧のAr雰囲気中でプラズマアークを照射するため、溶解時の蒸発による原料の損失はEBRよりも抑える事ができる。一方で、常圧での溶解のためスポンジチタンに残留するガスの脱ガスができず、PAR後には脱ガスのためにVAR溶解が必要となる。各溶解方式の特徴を表1に示す。

4.3 薄板製品

薄板生産工程を図6に示す。インゴットからスラブへの鍛造は直江津地区のプレス工程で実施しており、その後、広畑地区および八幡地区にて熱延コイルを製造し、酸洗-

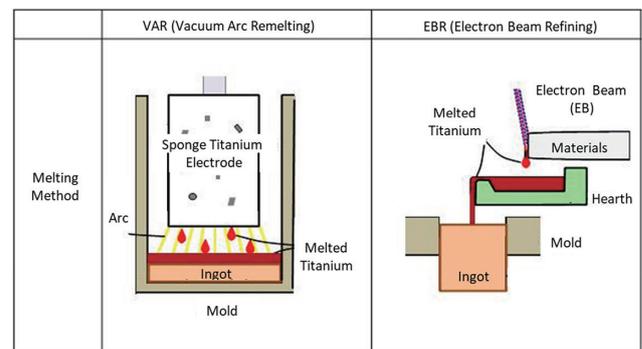


図5 チタン溶解炉 VAR と EBR の概略図
Titanium melting furnace: VAR and EBR

表1 各チタン溶解方式の特徴
Characteristics of melting furnaces for pure titanium and titanium alloys

Type of furnace	VAR (Vacuum Arc Remelting)	EBMCHR (Electron Beam Melting Cold Hearth Refining)	PAMCHR (Plasma Arc Melting Cold Hearth Refining)
Melting process	Melting of consumable electrode by arc	Melting of raw materials by electron beam	Melting of raw material by plasma arc
Raw materials	× Preparation of consumable electrode Block scraps: not available Blend ratio of scrap: low	○ No preparation of consumable electrode Block scraps: available Blend ratio of scrap: high	○ No preparation of consumable electrode Block scraps: available Blend ratio of scrap: high
Number of melting	× Double (mainly) or triple (when necessary) for degassing and improving surface quality of ingot	○ Single (mainly), in addition VAR (when necessary)	× VAR is required after PAM for degassing
Vacuum pressure (Pa)	10 ³ -10 ⁻¹	10 ⁰ -10 ⁻⁴	10 ² -10 ³
Degassing efficiency	△ Insufficient degassing by single melting	○ Sufficient degassing by single melting under vacuum atmosphere	× Insufficient degassing by single melting under atmospheric pressure
Cost for melting	× Number of melting: more than once Blend ratio of scrap: low	○ Number of melting: once Blend ratio of scrap: low	△ Number of melting: more than once Blend ratio of scrap: low
Segregation	△ Solidification time: relatively long	○ Solidification time: relatively short Temperature control of pool is available	○ Solidification time: relatively short Temperature control of pool is available
Uniformity of alloying elements	○ Uniformed by mixing in deep pool	△ Less-uniform Uniform composition of raw materials required	△ Less-uniform Uniform composition of raw materials required
Removal ability of inclusions	△ Dissolution in mold	○ Dissolution or separation in cold heart	○ Dissolution or separation in cold hearth

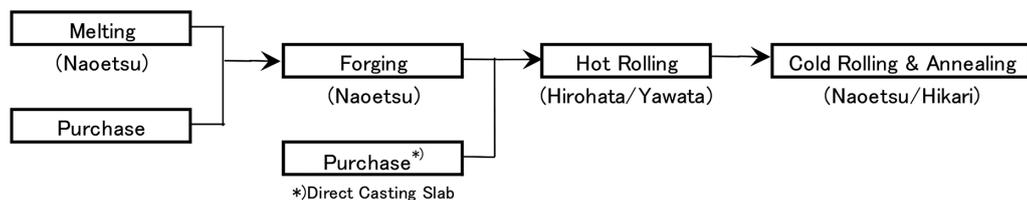


図6 薄板の生産工程
Manufacturing processes of sheet products

冷間圧延（以降、冷延と記す）- 焼鈍 - 精整は、直江津地区と光にて実施している。

直江津地区での鍛造スラブは、加工シミュレーションを活用しつつ、現場での長年の経験をもととした鍛造パススケジュール等にて高い歩留を達成している。

一方、EBRにてインゴットを直接スラブ形状に鑄込む技術の世界に先駆けて東邦チタニウムとともに開発（DCスラブ^{*1}）し、これを直接熱延、その後冷延・焼鈍等を行った冷延コイルの商業生産にも成功している。

チタンスラブの熱延は主に広畑地区にて実施している。広畑地区の熱延ミルはコンパクトなミルながら垂直ロールでの幅方向の圧延スタンド（VRM）や、仕上げスタンドにはペアクロスを採用しており、熱延コイルで生じる幅方向の板厚偏差（クラウン）を抑制する技術をチタンにも適用しており、熱延および冷延製品での幅精度および板厚精度向

上に大きく寄与している。また、BCPの観点から八幡地区においても熱延を一部実施している。

熱延コイルは直江津地区および光にて、脱スケール、冷延、焼鈍、精整等の工程を経て製品出荷する。

純チタンは優れた耐食性により熱交換器等に使用されており、より薄くより幅広い冷延製品が求められる。板厚と幅との関係を図7に示すが、純チタンのJIS1種（ASTM Gr.1）や2種（ASTM Gr.2）においては、板厚0.3mmで幅1219mm、また板厚0.6mmで幅1524mmの冷延コイルまで製造可能であり、世界トップクラスの広い製造可能範囲を有する。

さらに板厚の薄いチタン箔も製造でき、JIS1種相当材では板厚20 μ mまで製造可能であり、板厚100 μ mでは幅600mm（630mmまで協議範囲）まで製造可能である（図8）。

直江津地区では航空機認証のJIS Q9100に加えて、国際航空宇宙産業界の特殊工程認証プログラムであるNadcapも取得しており、優れた品質および品質管理体制が認めら

*1 DCスラブは東邦チタニウム（株）の登録商標

れてエアバス社の認証を取得し、該社で使用する多くの純チタン冷延コイルを製造出荷している。

薄板工程での製造コストダウンについては、工程省略を図るとともに冷延製品の表面疵低減に関して、特に熱延疵低減対策に関して重点的に技術開発してきた。具体的には、熱延疵の発生メカニズムを金属学的に探究し、インゴットの表面手入れにはじまり、分塊スラブの研削基準、熱延条件等の疵発生に及ぼす影響を明確化した。

純チタン薄板の最大の用途であるPHEについては、プレス成形性が重要であり、そのための成分設計、さらに冷延および焼鈍などの品質管理により、顧客が満足する強度・延性で且つ材質ばらつきの小さい薄板を造り込んでいる。

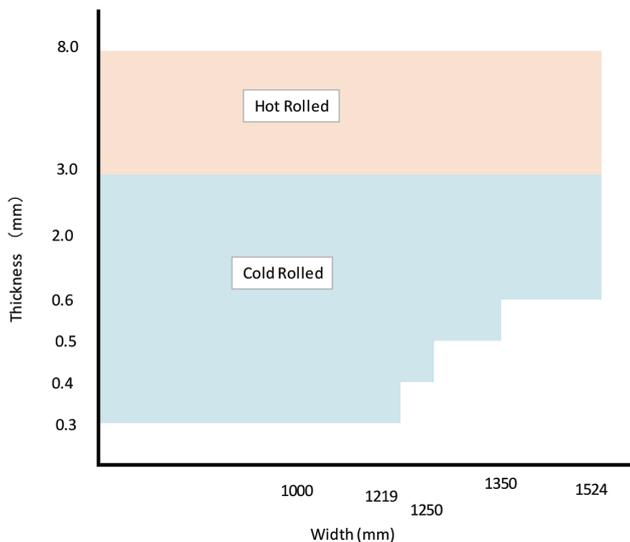


図7 熱延および冷延板の製造可能範囲 (JIS 1, 2種)
Available size of sheet (hot and cold rolled products) JIS Class1&2 CP titanium

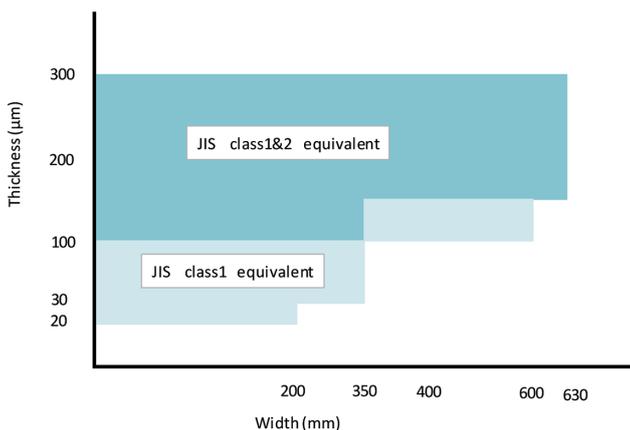


図8 箔の製造可能範囲
Available size of thin foil (JIS Class1&2 CP titanium)

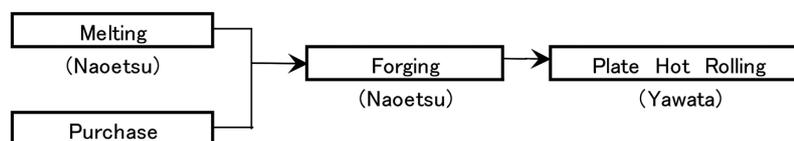


図9 厚板の生産工程
Manufacturing processes of plate products

また、日本製鉄が長年にわたり開拓してきた屋根および外壁等の建材向けチタン薄板については、表面の意匠性が重要であり、設計デザイナーの趣向に応えられる様々な表面仕上げメニューを開発している。代表的な表面仕上げとしては、スキンパスの圧延ロールにショットブラストで凹凸を施して、それで圧延する事によってチタン表面に凹凸をプリントさせてダル仕上げとしたものや、アルミナブラスト材および陽極酸化による発色材なども開発している。その結果、この分野において高いシェアを占め、近年では、使用面積 73000m² と日本製鉄としては最大規模の案件となる中国の江蘇大劇院の外装への採用や、国内では小田急電鉄片瀬江ノ島駅舎屋根に日本製鉄のチタン発色技術を活かした緑青チタンとイオンプレATINGチタンが採用されている。

軽量化による燃費向上やチタンの意匠性の観点から、二輪車や四輪車の排気系部材にチタンが採用されており、高温高強度のニーズにも対応すべく、日本製鉄の独自合金として Super-TIX[®]10Cu (Ti-1Cu) や Super-TIX[®]10CuNb (Ti-1Cu-0.5Nb)、および Super-TIX[®]10CSSN (Ti-1Cu-1Sn-0.35Si-0.25Nb) 等の銅添加型の合金薄板を開発している。

4.4 厚板製品

厚板向けスラブについても薄板と同様に直江津地区にてインゴットをスラブに鍛造、その後八幡地区にて厚板に圧延している (図9)。2012年の旧日本製鉄(株)と旧住友金属工業(株)の統合を契機として、直江津地区での厚板ミルを休止し、直江津地区にて培った厚板製造技術を伝承し、八幡地区での製造に集約している。

八幡地区の厚板圧延機は製造可能範囲が広く (図10)、品質的にも世界的にトップクラスであり、さらにチタン専用として、高い平坦度を確保するため焼鈍と熱間での形状矯正が同時に行える真空クリープ矯正装置 (Vacuum Creep Flattener : VCF) を導入している。その高い形状矯正能力はユーザーからも高い評価を得ている。

IT機器用のプリント基板に用いられる電解銅箔製造用ドラム向けの純チタン厚板は市場の高い評価を得ている。電解銅箔は硫酸銅水溶液中でチタン製ドラムを陰極として電解し、ドラム上に金属銅を析出させ、それを連続的に巻き取る事により製造される。そのため、チタン製ドラムとして高い品質が要求されている。このような要求特性を満足するため、インゴットの造り込みをはじめスラブ製造以降の各製造工程にて厳格な工程設計を行い、製品の要求性能

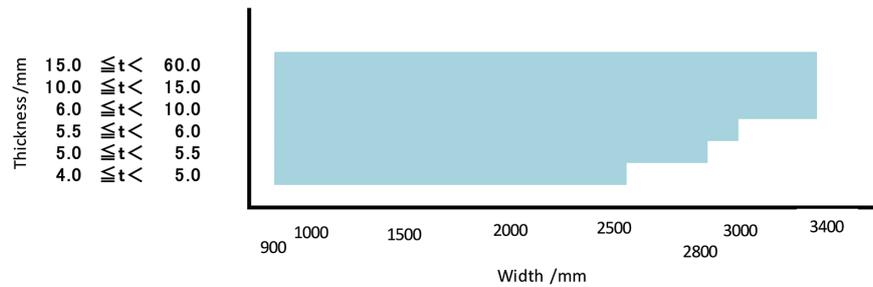


図10 厚板 (JIS2種) 製造可能範囲
Available size of plate (JIS Class2 CP titanium)

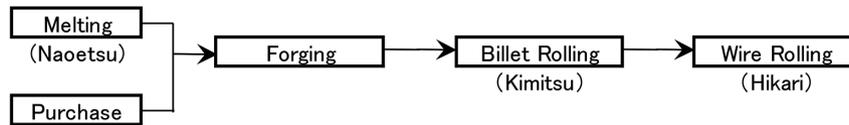


図11 線材の生産工程
Manufacturing processes of titanium wire

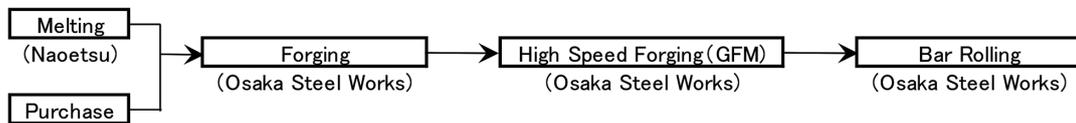


図12 ビレット・丸棒の生産工程
Manufacturing processes of titanium billet and bar

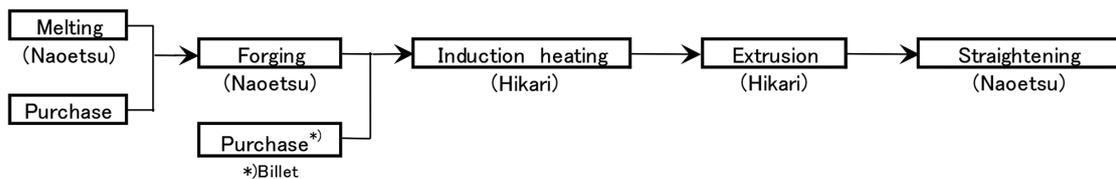


図13 熱押材の生産工程
Manufacturing processes of extruded titanium

を満たすチタン厚板の製造技術を確立している。電気自動車および家電の小型化等に伴う需要増により、今後の更なる拡販も期待される。

4.5 線材製品

インゴットを製鋼所地区にてブルームに鍛造した後、君津地区の条鋼圧延ミルにてビレットに圧延し、このビレットを光の鉄鋼設備である高速圧延機にて線材に圧延している(図11)。薄板と同様に、線材の製造プロセスについても一貫での製造技術の最適化に取り組んでいる。

製造可能範囲はφ6mm～φ15.5mmで、表面仕上げとしては、特殊皮剥きのSF(スーパーフィニッシュ)仕上げや酸洗仕上げなどのメニューを有し、様々な顧客ニーズに対応している。

線材の用途は眼鏡用が中心で、純チタン以外にTi-3Al-2.5Vや高強度で細径化が可能なTi-15V-3Cr-3Sn-3Alも眼鏡のリムに使用されている。

4.6 ビレット、丸棒製品

製鋼所地区では3000トンプレスのほか、高速鍛造機、さらに孔型圧延機を有しており、純チタンおよびチタン合金もそれらの設備を用いて製造している(図12)。主に航空機向けチタン合金の製造を手掛けている、極めて高い品質が要求されるエンジン回転部材向けのPremium Grade Ti-6Al-4Vビレットについて製造技術および品質保証体制を確立し、航空機メーカーからの認証も取得した。

4.7 熱押製品

日本製鉄では、新たにチタン合金の熱押材の製造プロセスを確立した(図13)。光にて従来から製造しているステンレス熱押材の製造技術も活用しつつ、チタン合金の特性を考慮した熱押しダイスの材質や形状、加熱温度、および潤滑剤の選定を行い、チタン合金ビレットの様々な断面形状への熱間押し出しを実施する。

熱間押し出し・酸洗後に、直江津地区にて曲がりや捻じれ等の熱間矯正を行う。矯正においては形状だけでなく、残留応力の低減も重要となる。

熱間押しおよび熱間矯正の各種条件設定にはFEM解析を活用し、様々な断面形状の製造条件を決定、品質の安定化を図っている。

航空機のシートレールへの適用に向け、航空機メーカーからの認定対応を進めている。ニアネットシェイプ化により航空機メーカーでの加工コスト削減にも貢献する。

5. 結 言

日本製鉄のチタンは工程としては溶解から最終製品まで、薄板、厚板、溶接管、線材、ビレット、丸棒、および熱押材といったあらゆる品種を手掛けている。これらの製品は一般産業用途のみならず、特に品質が要求される航空機、自動車、建材および医療等の分野や、今後新たにニーズが期待される燃料電池、水素社会対応、あるいは空飛ぶ

自動車といった様な新規分野においても、その技術力をもって高い品質と低コスト化を指向していく。これからも世界のトップランナーとして、需要家の期待に応えるべく今後も邁進していく。

参照文献

- 1) 伊藤喜昌：2019年の中国チタン工業の状況. チタン. 69 (1), 23-29 (2021)
- 2) 東邦チタニウム株式会社 Web サイト：製品・サービス情報
スポンジチタン製造工程 <https://www.toho-titanium.co.jp/en/products/sponge.html>
- 3) 独立行政法人物質・材料研究機構エコマテリアル研究センター：金属元素の精錬・精製段階における環境負荷算定に関する調査報告書. 2003年3月, p.36-39



八並洋二 Yoji YATSUNAMI
チタン事業部 チタン技術部長
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



高梨健太郎 Kentaroh TAKANASHI
チタン事業部 チタン技術部 チタン技術室長