

新日本製鐵（株）における鋼材製造プロセス¹

上島良之²

Current state of steel production processes of Nippon Steel

Yoshiyuki UESHIMA

Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation

Abstract

Nippon Steel Corporation, of which annual production amount is over 30 million tons, supplies various steel products to customers. Our steel products are manufactured by integrated steel production processes with large size blast furnaces. The author introduces the current state.

Keywords: steel, blast furnace, converter, casting, rolling.

1. 結 言

2008 年の世界の粗鋼生産量は 13 億 t、国内生産量は 1 億 2 千万 t であった。2009 年は世界不況で減少したが再び生産量が徐々に回復している。製造プロセスは鉄鉱石を還元溶解する高炉法による銑鋼一貫製鉄法が量的に最も多く、現在世界で 800 基以上の高炉が稼働している。国内には 34 基の高炉があり、当社は炉内容積 5775m³ で世界最大の分第 1 高炉はじめ 9 基を稼働、年間約 3 千万 t の鋼材製品を供給している。以下に、当社の鋼材製造プロセスを紹介する。

2. 高炉法による銑鋼一貫製鉄プロセス^{1~4}

2.1 プロセスの概要

高炉一貫製鉄プロセスを Fig.1 に示す。鉄鉱石、石炭、石灰石を原料として高炉で鉄鉱石を還元、一旦、炭素飽和溶銑すなわち溶銑を作る。これを転炉で純酸素吹錬を行い酸化反応で炭素を燃焼除去したあと必要な合金元素を添加して溶鋼を作る。次に連続鑄造機によりスラブ、

ブルーム、ビレットと呼ぶ鑄造半製品を作る。これを熱間圧延して種々の形状の鋼材に加工する。用途によってさらに冷間圧延、焼鈍、メッキ表面処理を施し、各種薄板製品に加工する。

当社製鉄所の例を Fig.2 に示す。鉄鉱石と石炭は豪州、インド、ブラジルなどから全量輸入しており、原料岸壁から荷揚げする。鉄鉱石を高炉で還元、溶解して溶銑を作り、これを製鋼工程で炭素を酸化除去して成分調整したのち鑄造する。そのあと圧延工程と焼鈍メッキ工程で用途に応じた形状、表面状態に加工する。最終検査後、製品を製品岸壁から出荷する。原料から製品まで、スムーズな物流になるようにレイアウトしている。

2.2 原料事前処理

原料である鉄鉱石は豪州、インド、ブラジルから、石炭は豪州、中国から全量輸入している。鉄鉱石は天然資源であるので産地により鉄分や SiO₂、Al₂O₃ などの脈石濃度、粒度が違う。そこで複数の鉄鉱石を銘柄を混合して、さらに脈石を低融点化させるための石灰石と燃料となる粉コークスを加えて、1300℃以上の高温に加熱、高い気孔率と強度を備えた焼結鉱に加工する。石炭も、

1. 平成 22 年 6 月 3 日本会第 124 回例会において発表

2. 新日本製鐵(株)技術開発本部

平成 22 年 3 月 26 日受理

>> 製品のできるまで

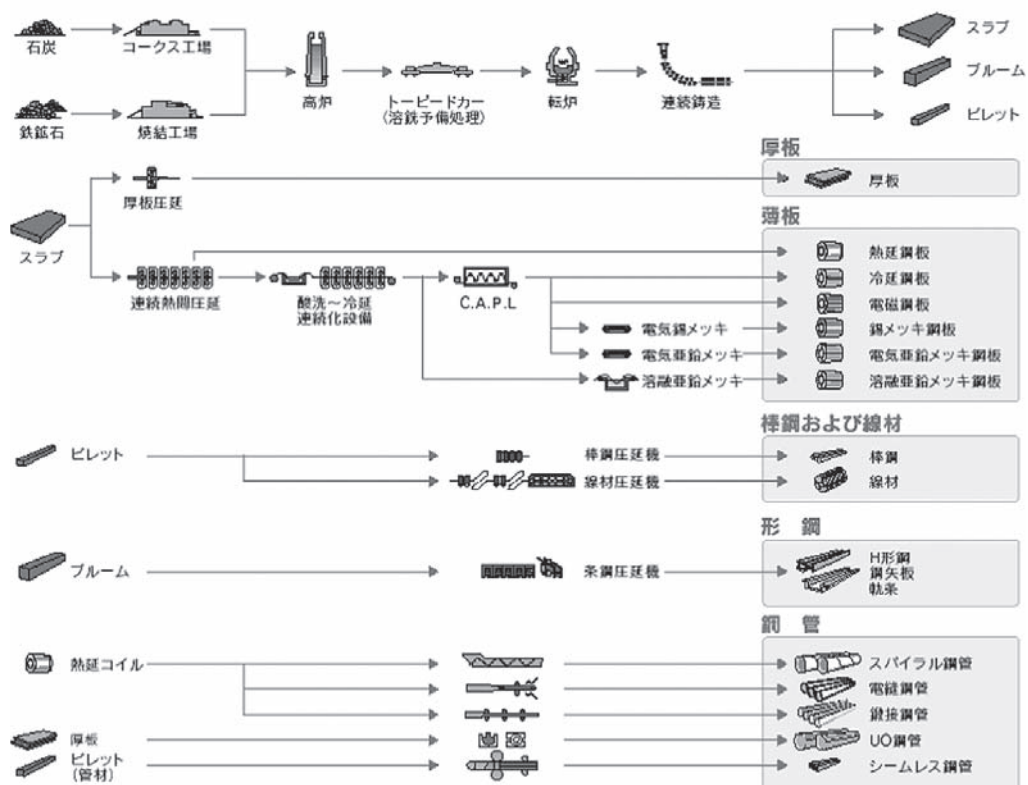


Fig.1 Steel production processes of Nippon Steel.



Fig.2 Layout of Kimitsu Works.

1300℃に密閉炉で24時間高温加熱してタール、軽油、SOx、H₂などを除き炭化度を上げて還元力と強度を備えたコークスにする。なお、コークス製造時の発生ガスにはH₂が50%以上含まれ、製鉄所内装置の加熱用ガスとして有効利用している。さらにコークスの生産性を2倍以上に上げたSCOPE21型炉、高温コークスの冷却時熱回収CDQなどによりエネルギー原単位低減、発生CO₂量削減を推進している。

2.3 高炉

高炉の断面模式図をFig.3に示す。高炉は、炉上部から原料の焼結鉱と還元剤のコークスを層状に装入、炉下部側壁に円周状に配置した羽口から1300℃に加熱した空気を吹き込む向流反応装置である。この空気でコークスを燃焼、この酸化発熱で羽口先で生成した還元ガスを2200℃に加熱、炉上部から投入された焼結鉱とコーク

ス冷塊と熱交換され、酸化鉄の還元を連続的に行うことができる。酸化鉄の還元反応は、1000℃以下の高炉上部ではCOガスによる間接還元(1式)が主で、高温の高炉下部では溶融した酸化鉄がコークスと直接接触して固体Cによる直接還元(2式)も起こる。高炉全体でおおむね、間接還元が7割、直接還元が3割である。

高生産性とエネルギー原単位ミニマムを両立するために高炉大型化、炉内加圧操業、炉頂圧発電、吹き抜け・棚つりと呼ばれる円周方向の不均一な化学反応を防止するために圧力温度センサーによるコンピューター操業制御3D-VENUSを開発、実用化している⁵。炉内容積5555m³の世界最大級の君津第4高炉と操作室をFig.4に示す。本高炉は20年の連続操業を前提に設計している。

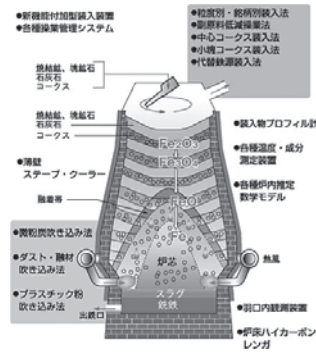
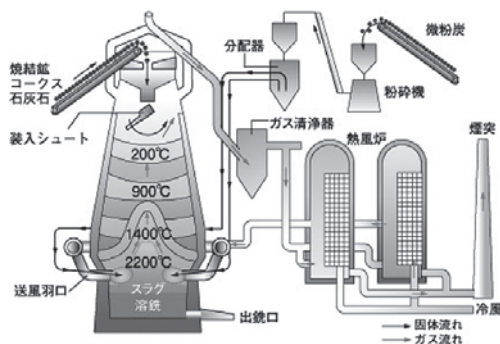
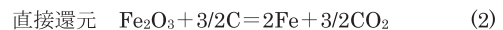
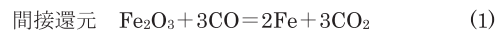


Fig.3 Schematic view of the cross section of a blast furnace (left) and developed technologies (right).

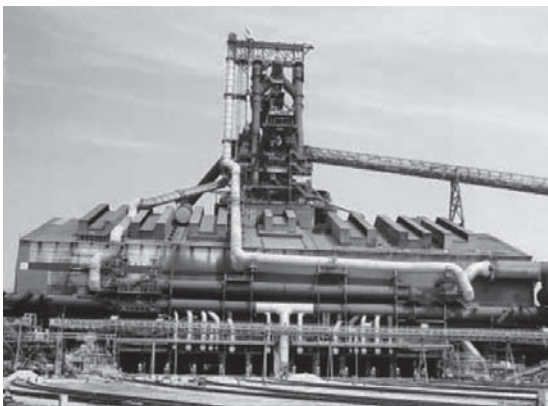


Fig.4 Kimitsu No.4 blast furnace (left) and its operation room (right).

2.4 製鋼

製鋼工程では、溶銑に含まれる 4%以上の高濃度 C と、鉄銑石と石炭由来の P、S の不純物を精錬除去して、必要な合金限度を加えて用途に応じた最終製品に必要な成分を作る。まず、転炉に溶銑を装入、純酸素を吹き付け、酸化反応で脱炭して C 濃度 0.03~2%の溶鋼を作る((3)式)。このときの CO 酸化発熱で 1400℃の溶銑が 1600℃まで昇熱するので、脱炭して鉄の融点が上がっても固化することなく溶融精錬できる。純酸素上底吹き転炉の模式図を Fig.5 に、300t 転炉の例を Fig.6 に示す。精錬時間は通常 30 分である。より短時間で精錬するために溶鋼攪拌用に炉底部からも数%の酸素ガスを吹き込む。

P、S の不純物は CaO を使ったスラグ精錬により除去する((5)(6)式)。当社では、副産物の鉄鋼スラグを最小化するために最小限の CaO 量で高効率の脱 P、脱 S 精錬を行う新しい溶銑予備処理精錬法 MURC、LD-ORP を開発、実用化した。

自動車用外板など IF 鋼と呼ぶ深絞りプレス加工用の薄板を作る場合は、C 濃度 10ppm まで脱 C する必要がある。そこで、転炉吹錬後に 300t 溶鋼を真空処理して極低炭素域まで 10 分で効率的に脱 C 処理を行う。真空脱炭装置の模式図を Fig.7 に、転炉脱炭と真空脱炭時の CO 平衡を Fig.8 に示す。

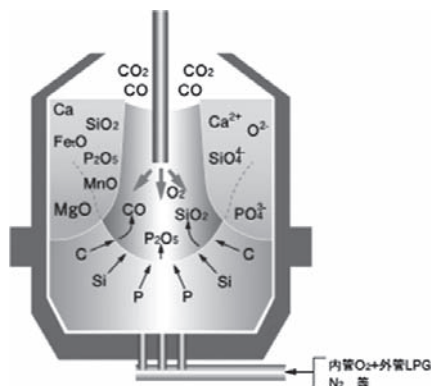
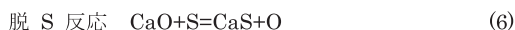
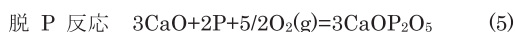
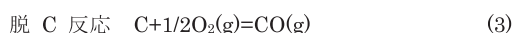


Fig.5 Schematic view of a converter.

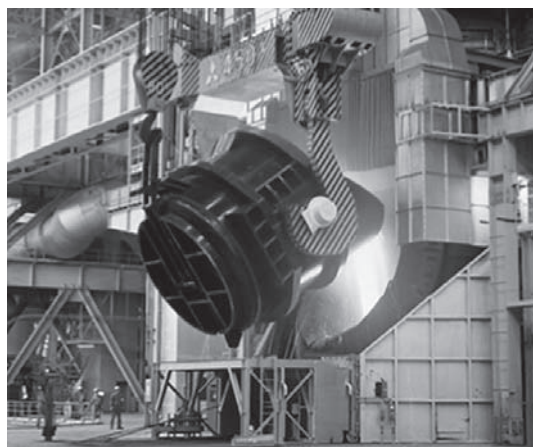


Fig.6 Charge of molten pig iron into 300t-converter.

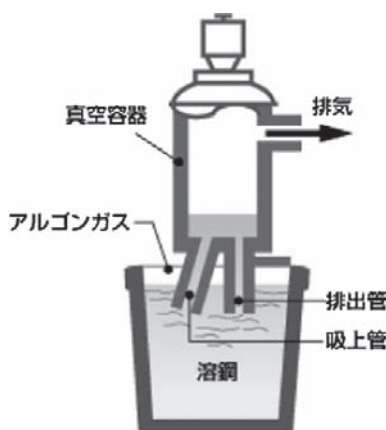


Fig.7 Schematic view of vacuum refining.

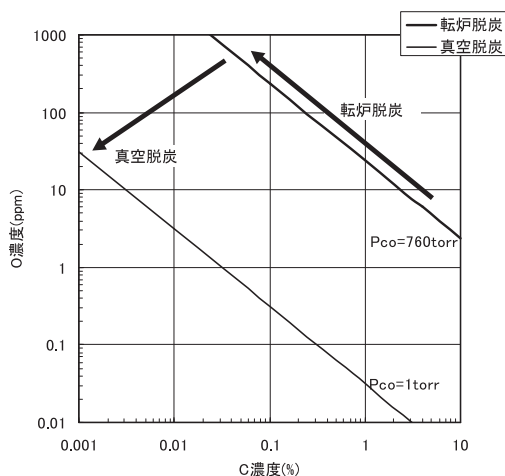


Fig.8 CO equilibrium in molten iron.

2.5 連続铸造

製品成分に調整した溶鋼は、連続铸造機で凝固させて一旦半製品のスラブにする。連続铸造機の概略を Fig.9 に示す。スラブ厚さは通常 250mm、幅は用途に応じて 900~2300mm で可変である。溶鋼は耐火物ノズルを介して約 1m 長さの内部水冷銅製鑄型に注入する。鑄型は溶鋼が固着しないように上下に振動させる。鑄型の溶鋼湯面には保温と、鑄型と凝固シェル間の潤滑を兼ねて酸化物系のフラックス粉体を常時投入する。鑄型下端で内部の溶鋼静圧に耐えるように、厚さ 10~20mm 程度の凝固シェルを作る。そのあとは、気水噴霧冷却を行い完全凝固させる。完全凝固位置は、例えば鑄造速度が 2m/分の場合、鑄型より 40m 前方になる。1960 年代に連铸機が実用化された当初は垂直型が主であったが、生産性の向上と建設費の低減を目的に、曲げ型あるいは垂直曲げ型連铸機が開発され、これが現在の主流である。

介在物、割れ、中心偏析などの品質欠陥は精錬鑄造段階で決まり、圧延以降での修復は負荷が掛かり、歩留が下がる。そこで、アルミナ介在物低減対策として、真空処理による高纯净鋼溶製、大型タンディッシュ、プラズマ加熱、鑄型内流動電磁力制御などを開発、また圧下比

の低い厚板鋼管材では中心偏析対策として凝固末期圧下法の開発して、これらを実用化した。

一方、溶鋼中の介在物を有効利用する開発も行ってきた。例えば、厚板溶接大入熱鋼の Ti オキシド鋼は、微細 Ti 酸化物を溶鋼中に分散させ、製品の溶接継手部の HAZ 部粒成長を抑制、HAZ 靱性を改善するもので、用途に応じた利用拡大を推進中である。

2.6 圧延、焼鈍、メッキ表面処理

スラブを 1200℃まで加熱して 1~19mm 厚まで熱間圧延する。熱間圧延機の例を Fig.10 に示す。仕上げ圧延機出側における通板速度は最高 1500m/分であり、板厚精度を確保するために 6 重圧延機、ペアクロス圧延機を開発、実用化した (Fig.11)。

用途に応じて、そのあと、酸洗、冷間圧延、焼鈍、メッキすることで 0.2mm~1mm 厚の冷間圧延材を製造する。生産性を向上させるために連続焼鈍 C.A.P.L、連続焼鈍メッキライン CGL を開発、実用化している。

3. 環境調和技術の開発¹

当社の地球温暖化対策は、先進技術を機軸としている。

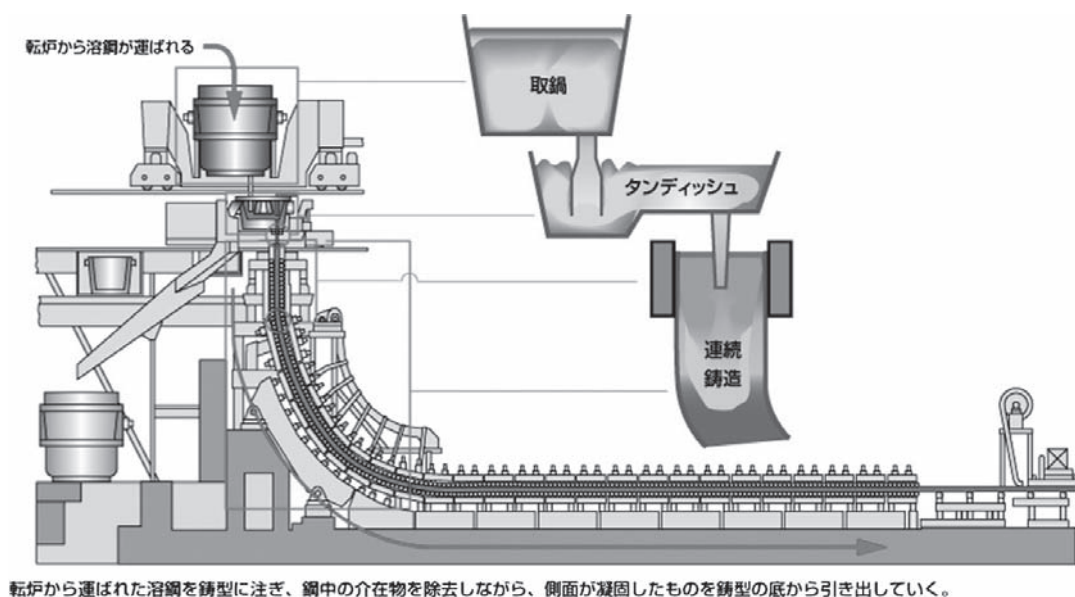
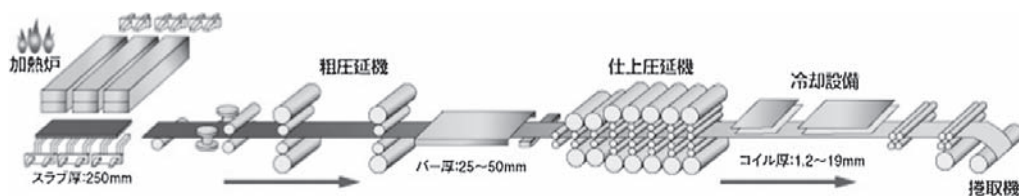


Fig.9 Schematic view of a continuous caster.



1000℃以上に加熱したスラブを一直線に並んだ複数の圧延機で連続的に圧延し、最終的に 1.2～19mm まで薄くしてコイル状に巻き取る。最終スタンドでは時速 100km 近くで鋼板が走る。

Fig.10 Schematic view of hot rolling process.

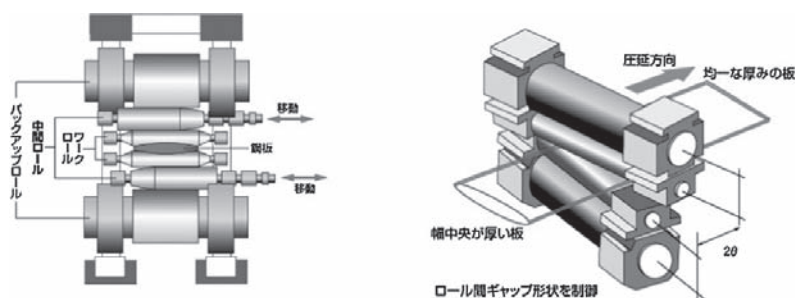


Fig.11 6-Hi mill(left) and pair-cross mill(right).

1970 年代の第 1 次石油危機以降、前述の大型高炉炉頂圧発電、CDQ などの排エネルギー回収、連続铸造などの製造工程連続化を徹底して実行、1990 年代までに 20%超の省エネルギーを達成した。さらなる継続した取り組みにより、2008 年度には 1990 年比で 15%の CO₂ 発生量の削減を実現した。また、製品使用時の CO₂ 削減を目的に、変圧器やモーターに使われる高透磁率低鉄損の高性能電磁鋼板や、自動車車体重量を軽減する TRIP 鋼、DP 鋼と呼ぶ良加工性自動車用超ハイテン鋼板などの高機能製品を開発、実用化した。廃プラスチックのコークス炉へのリサイクルを実施、国内発生量の 3 割を再資源化している。さらに製鉄副産物を使った藻場再生、漁場再生による CO₂ 固定の技術開発⁶に取り組んでいる。

中期的にはこれらの今ある環境技術の世界移転を推進するが、長期的な視点で、革新的な CO₂ 削減技術開発を並行して推進している。世界鉄鋼協会が中心となって各国が分担して CO₂ プレークスループプログラムを実行、当社をはじめとする日本鉄鋼連盟では鉄鋼 6 社共同で、水素還元と CO₂ 分離回収を主要テーマに CO₂ 排出量を 30%下げる次世代製鉄プロセス COURSE50 の開発

を推進している⁷。

4. 結 言

当社における鉄鋼一貫製鉄プロセスによる鋼材製造を説明した。製鉄、製鋼、圧延の原理と実際、大型高炉技術、製鋼高速精錬技術、高精度板厚熱間圧延技術、省エネルギー技術、環境調和技術開発を述べた。会員各位のご参考になれば幸甚である。

References

1. Nippon Steel Corporation HP:<http://www.nsc.co.jp/>
2. Nippon Steel Corporation: Tetsu to Tekkou ga Wakaru Hon, Nippon Jitsugyo Publishing (Tokyo), (2004).
3. ibid.: Tetsu no Mirai ga Mieru Hon, Nippon Jitsugyo Publishing(Tokyo), (2007).
4. ibid.: Tetsu no Usuita Atsuita ga Wakaru Hon, Nippon Jitsugyo Publishing (Tokyo), (2008).
5. ibid. : NIPPON STEEL MONTHLY, 3, pp.13-14 (2008).
6. Nippon Steel Corporation HP:<http://www.nsc.co.jp/eco/recycle/sea.html>
7. The Japan Iron and Steel Federation HP: <http://www.iisf.or.jp/>

上本 和雄²

Kazuo UEMOTO

Abstract

Key words: Electric Arc Furnace, Special Steel, Scrap, Slag, Cleanliness

2. 特殊鋼の製鋼工程

2.1.1 設備とその特長

スクラップから半製品である特殊鋼の鋼塊まで製造するプロセスは一般的に製鋼プロセスと呼ばれ、溶解、精錬、凝固の工程に大きく分けられる。当社では製鋼プロセスを Fig.2 に示すように電気炉、取鍋精錬、RH 脱ガス、連続铸造の4設備で行っており、電気炉は主に溶解プロセスを担っている。



Fig.3 に電気炉設備の概要を示す。電気炉設備はスクラップ溶解容器である炉殻および炉蓋とそれらを支える梁と構造物、傾動装置、溶解のための電気エネルギーを供給する炉用変圧器～電極マスト、支腕、人造黒鉛電極および集塵装置によって構成されている。電気炉内で溶

1. 平成 22 年 6 月 3 日 本会第 124 回例会において発表
2. 山陽特殊製鋼(株)技術企画管理部
平成 22 年 3 月 24 日受理

解されたスクラップは炉底の耐火物上に溜まって溶鋼となり、炉体を傾動させて溶鋼を取鍋に出鋼する。また、溶鋼に接しない炉壁および電極ホール以外の炉蓋は、耐火物を配さず鉄製または銅製の水冷パネルを配置して耐火物使用量の削減を図っている。

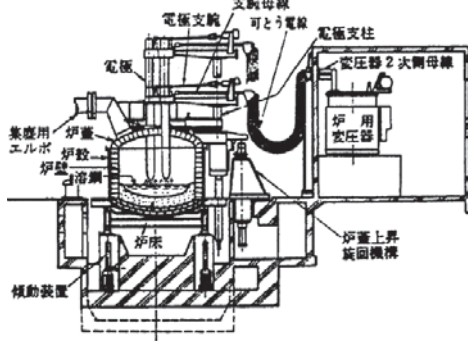


Fig. 3 Schematic diagram of electric arc furnace facilities.¹⁾

Fig.4 に溶鋼を得る手段としての転炉と電気炉の操業の差を整理した。電気炉の機能は、スクラップ溶解炉であり、エネルギーとして、電力の他に炭材やガスの燃焼熱および溶鋼中のカーボンや金属の酸化熱を利用している。また、反応サイトとしては、転炉は溶解工程を高炉で実施しているため気-液（酸素-溶鉄）2元系であるのに対して、電気炉は反応速度や効率が不安定な気-固-液（酸素-スクラップ-溶鋼）の3元系の反応である。この為に、電気炉内でアークと燃焼ガスから受け取る熱の効率は、ヒート毎に異なり、当社では排ガス分析などを駆使し効率向上に努めている。

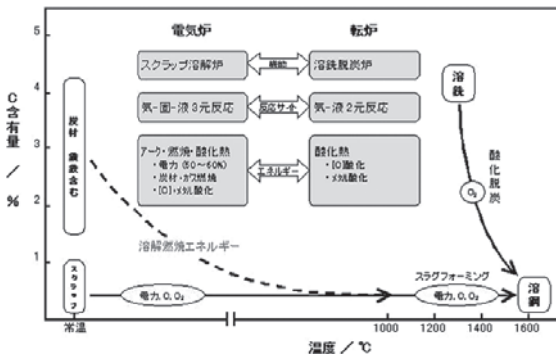


Fig. 4 Operation comparison between BOF steel-making and electrical furnace steel-making.

Fig.5に電気炉におけるエネルギー収支の一例を示す。電気炉の主エネルギーは電気エネルギーであり、電極に電圧をかけ、電極～スクラップ間にアークを発生させ、その際発生するアーク熱を用いてスクラップを溶解する。アーク電力の特長は

- ・ 加熱効率が良い、特に燃焼のように排出ガスを 伴わ

ないので伝達効率がよい。

- ・ 局部加熱、急速加熱が容易
- ・ 超高温加熱性に優れる
- ・ 投入電力コントロールが容易
- ・ 温度コントロールが容易
- ・ 燃焼による生成物が無く、クリーンな加熱が出来るなど、利点が多いと言われている。²⁾

しかし、アーク電力のみの加熱では、局部的に高温となるため、全体の溶解に時間がかかり、放射熱損の発生や耐火物の局部溶損を引き起こす。このため電気炉では電力エネルギーとほぼ同じ量の燃焼・酸化エネルギーを利用している。アークでは加熱出来ないコールドスポットと呼ばれる箇所の加熱を燃焼などによって補うことにより、高効率・低エネルギーでの溶解を実現している。

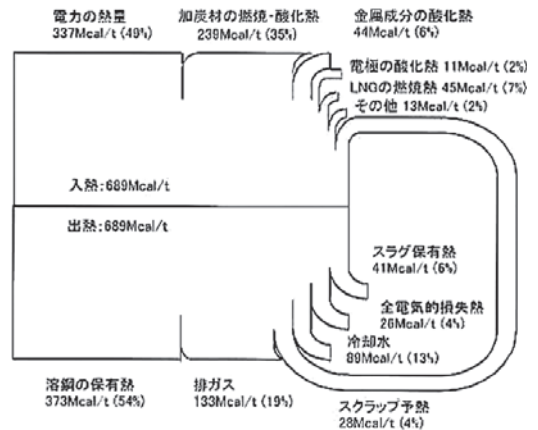


Fig. 5 Energy balance in electric arc furnace process.

Fig.6 に電気炉とその集塵系図を示す。電気炉には付帯設備として直引集塵を設置している。この直引集塵機は電気炉から系外へ排出される粉塵を集塵する環境対策的な設備の意味合いのみでなく、たたら製鉄の鞆や高炉の羽口から吹き込まれる熱風のように炉内の酸化燃焼を補助する役割も担っており、重要な電気炉設備の一つである。また、直引集塵の経路には排ガスの熱を利用するためスクラップ予熱装置を設置している。

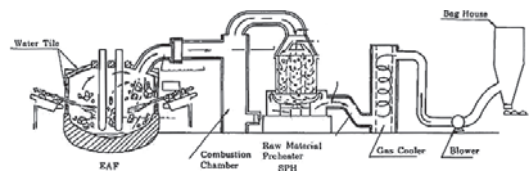


Fig. 6 Incidental facilities of electric arc furnace.³⁾

積極的に燃焼を進めるため加炭材のインジェクション装置や酸素吹精装置なども設置している。

その他の付帯設備として電気炉底部に溜まった溶鋼を

攪拌する底吹きガス攪拌装置を有しており、溶鋼－スラグ間の反応や熱伝達促進を図っている。

電気炉では溶解の他に精錬の一部として酸化精錬を実施している。溶鋼中に酸素を吹き込むことで有害成分となる溶鋼中のリン（P）をリン酸（ P_2O_5 ）としてスラグ中に分離している。

特殊鋼は製品の疲労強度・寿命向上のため、鋼中の酸素量や非金属介在物量を極力低減させた清浄度の高い鋼が要求される。清浄度を向上させる技術の一つとして、出鋼時のスラグ巻き込みを低減させるため EBT（偏芯炉底出鋼装置）を設置している。清浄度の高い溶鋼を得るには、溶鋼への酸素供給源となる酸化スラグを出鋼時に溶鋼中へ懸濁させないことが重要なポイントとなる。

2.1.2 電気炉主原料（スクラップ）

スクラップは電気炉での利用促進のため様々に分類されている。まず供給形態により Fig.7 のように分類している。「自家発生屑」は生産工程内で発生するスクラップで、通常は再度主原料としてリサイクルしている。「市中屑」は「加工屑」と「老廃屑」に分類される。「加工屑」は鉄鋼消費産業の加工工程で発生するスクラップ、「老廃屑」は鉄鋼製品が廃却される際に発生するスクラップである。

自家発生屑や加工屑はその成分があらかじめ分かっている場合が多く、成分調整用として用いられることが多い。

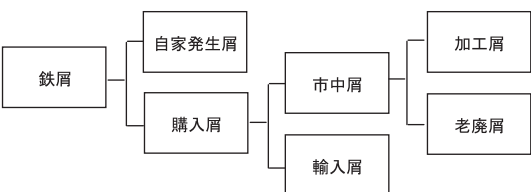


Fig. 7 Classification of scraps according to sources.

市中屑は、市場では Fig.8 に示す規格に従って分類されている。規格は主に炉内までのハンドリングや溶解性、歩留まりを重視してスクラップの外観サイズ形状の他、発生源や酸化品位を規定するものである。

スクラップは溶銑と比較して不純物を多く含有しており、鉄よりも酸化しにくい金属元素は電気炉では除去されない。当社ではスクラップ配合比率などを規定し、不純物レベルの安定化を図っている。

分類	品種	等級	寸法(mm)		重量(kg)
			幅または高さ(以下)×長さ(以下)	厚さ	
鉄屑	ヘビー	HS	500×700	6以上	600以下
		H1		6以上	1000以下
		H2		3～6	
		H3		1～3	
		H4		1未満	
	プレス	A	3辺の総和1800以下、最大辺800以下		
		B			
		CS			
	シュレッダー	AS	寸法は同上、下限は3辺総和600以上		
		B			
		C			
	新断	プレスA	3辺の総和1800以下、最大辺800以下		
		プレスB			
		プレスC			
	鋼ダライ粉	A	3辺の総和1800以下、最大辺800以下		
		B			
		プレス			
鉄屑	故銑	A	3辺の総和1800以下、最大辺800以下		
		B			
	鉄ダライ粉	A	一辺1200以下		1000以下

Fig. 8 Receiving acceptance standard for scraps. ⁴⁾

2.1.3 電気炉スラグ

電気炉では酸化精錬の際にスラグ副産物が生成する。それらのスラグは従来から路盤材として利用していたが、スラグに含まれている未反応の石灰の体積を安定化させるため、長期間大気中に放置する「エージング」と呼ばれる処理が必要であった。当社では、日本初となる高圧処理能力をもつ加圧式蒸気エージング設備（Fig.9）を導入し、高温高圧の蒸気でスラグをエージング処理することで、従来に比べ短期間かつ粒度の細かいスラグまで品質の安定したスラグ路盤材を製造する技術を確認した。

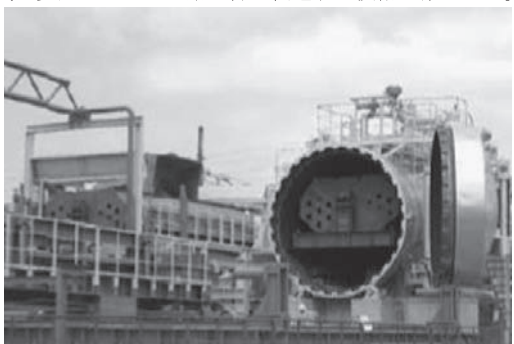


Fig. 9 Appearance of high-pressure type steam aging facilities.

2.2 取鍋精錬（LF）

LF はアーク電極による溶鋼の加熱装置と合金元素の投入装置を持つ設備（Fig.10）である。底部には溶鋼攪拌のための不活性ガス吹き込み装置が付いている。LF では主に溶鋼成分の粗調整、温度調整のほか、脱酸および脱硫など還元精錬を行っている。還元精錬において生成した Al_2O_3 など脱酸生成物は溶鋼中から浮上分離し還元スラグに吸収される。脱酸時に生成した介在物の浮上分離を促進するため、溶鋼のガス攪拌や温度の管理が重要となる。

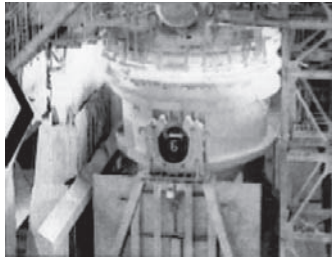


Fig. 10 Ladle furnace.

2.3 RH 脱ガス

RH 脱ガスは真空槽と2本の浸漬管をもち取鍋内の溶鋼を減圧下で真空槽内へ吸引し、片側の浸漬管から不活性ガスを注入することで溶鋼を環流し脱ガスする設備 (Fig.11) である。主な役割として、溶鋼成分の微調整、溶鋼中に溶解している酸素、水素、窒素をガスとして除去するとともに、脱酸時に生成した介在物の浮上分離を促進させる。溶鋼中の介在物は溶鋼との比重差により、浮上して溶鋼から除去されるが、その浮上速度は介在物径が大きいほど速くなることが知られている。⁵⁾ 環流により、溶鋼中の介在物は凝集体として大型化するため、浮上除去される速度が高くなり、より清浄度の高い溶鋼を得ることができる。

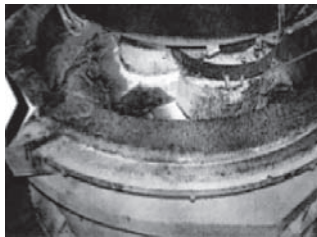


Fig. 11 RH degassing.

2.4 連続铸造

取鍋からタンディッシュと呼ばれる中間容器に溶鋼を注入した後、水冷モールド内に溶鋼を注ぎ、表面が凝固した铸片を下方に引き抜きながら連続的に铸造する工程である。当社では取鍋からタンディッシュを経て铸型に注ぐまで、完全に外気を遮断して溶鋼の酸化汚染防止する完全断気铸造を行っている。取鍋からタンディッシュへの注入部分では、不活性ガスによるシールを実施しており、モールド内に注入した溶鋼が大気と接触することを防止するため、モールドパウダーで溶鋼上面を覆っている。

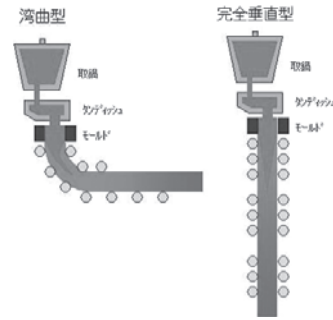


Fig. 12 Continuous caster types.

Fig.12に連铸機の比較模式図を示す。連铸機は湾曲型が一般的であるが、湾曲型の場合、铸造時まで残った介在物は凝固中に浮上し铸片の凝固シェルにトラップされ集積帯として残留するため、清浄度の高い溶鋼を得るためには垂直部を持った連铸機が有利である。⁶⁾ 当社では高洁净化に有利な完全垂直型の連铸機を採用している。

4. おわりに

スクラップから軸受鋼などの特殊鋼に再生されるまでの工程を当社の電気炉操業を中心に紹介した。電気炉の持つ資源循環性を活かしつつ、当社の「高信頼性特殊鋼」を更にレベルアップしていきたい。

References

- 1) *Tekkou Binran II Seitetsu-Tekkou (3rd edn.)*, The Iron and Steel Institute of Japan, 532.
- 2) K.Morii: *Denkiro Seikou Hou*, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, (2000), 19.
- 3) T.Ogura, *No.114, 115 Nisiyama Kinenn Gijyutu Kouza*, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, (1986), 12.
- 4) *Uniform Standards of Ferrous Scraps*, The Japan Ferrous Raw Materials Association.
- 5) Y.Sirota: *No. 143, 144 Nisiyama Kinenn Gijyutu Kouza*, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, (1992), 169.
- 6) T.Mukai, S.Ogibayasi, R.Tsujino, H.Seki, H.Okumura, R.Takahasi and K.Wada: *Tetsu-to-Hagane*, 67 (1981), S850.

小坂製錬㈱における銅製錬¹

星川 嘉彦²

Copper Smelting and Refining at Kosaka Smelter

Yoshihiko HOSHIKAWA

Kosaka Smelting & Refining Co., Ltd.

Abstract

Kosaka smelter started copper production in 1901, and diversified into other products and metallurgical technologies that treat complex concentrate. And main process are composed of copper operation that consist of flesh smelting furnace and PS converter, and lead operation consist of hydrometallurgical treatment plant and electric furnace.

However, social and economical situation changed worldwide in recent year, and Kosaka smelter started restructuring measure to cope with this harsh business environment.

The cores of the plan were improving the performance of complex smelting technologies to precious metal production and expansion to recycling business and waste management business. This paper introduces recent copper operation and describes about an outline of the modification.

Key words: Kosaka smelter, copper smelting, recycling business

1. はじめに

小坂製錬は 1901 年に鉱山付属製錬所として製錬操業を開始し、その後周辺の黒鉱鉱山にて産出される複雑鉱を処理する銅・鉛併設製錬所へ、さらには国内鉱山の閉山に伴い海外の複雑鉱をソースとする買鉱製錬所へと転換を図り、平成元年に同和鉱業㈱（現 DOWA ホールディングス㈱）から分離独立し、小坂製錬㈱小坂製錬所として新たなスタートを切った。

しかし、非鉄金属産業にとって近年の環境変化は厳しく、当所でも製錬事業の生き残りをかけて、複雑鉱製錬技術を基に貴金属・リサイクル複合製錬へ、さらには廃棄物からの有価金属回収へと事業展開を目指している。

本稿では小坂製錬所における銅製錬・貴金属製錬の変遷について述べる。

2. 銅製錬事業の変遷

2.1 銅製錬工程

1. 平成 22 年 6 月 3 日 本会第 124 回例会において発表
2. 小坂製錬㈱小坂製錬所
平成 22 年 3 月 2 日受理

小坂製錬では 1980～90 年代の周辺国内鉱山の閉山に伴い鉱山付属製錬所から買鉱製錬所への変革を図っており、1994 年に最後の黒鉱鉱山が閉山以後は銅精鉱を 100%外部ソースから調達する操業を実施している。海外原料の調達に当たっては銅鉛併設製錬所としての優位性を生かし、これまで培ってきた複雑鉱製錬技術をもとにさらなる高付加価値原料を処理する貴金属製錬への転換を基本戦略とし設備増強と技術開発を実施してきた。

Fig.1 に銅製錬工程のフローを示す。

当所の銅製錬工程は一般的な自溶炉～転炉法であるが

- ・銅原料中の鉛、亜鉛分をダスト中に濃縮し次工程の原料とする
- ・次工程の湿式処理工場で回収された硫化銅、亜鉛工程の二次原料の銀残渣を処理する

等、併設する鉛製錬工程及び秋田製錬㈱飯島製錬所と密接な繋がりを持った操業を実施してきている。

複雑鉱処理に伴うデメリットとして、自溶炉でのダスト発生が増加があるが、銅製錬工程の自溶炉では

1985 No.1 酸素プラント建設（深冷式）
（198 に能力増強）

1992 No.2 酸素プラント建設（PSA 方式）

の 3 回にわたる酸素富化の増強による処理能力の向上と廃熱ボイラーへの負荷低減を実施し、さらには

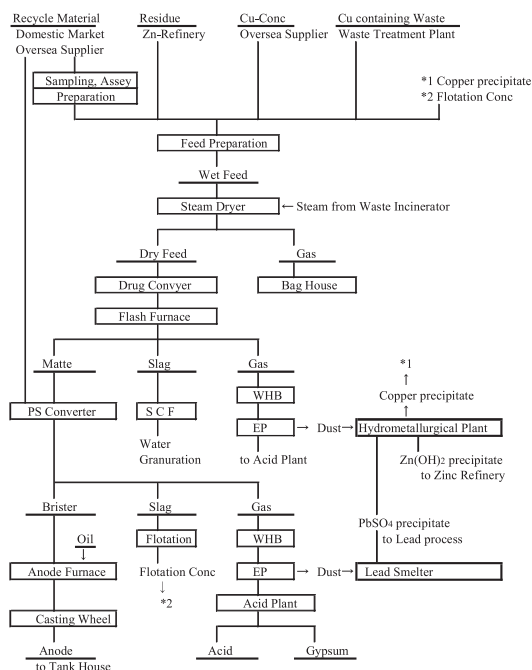


Fig. 1 Copper Smelter Process Flow sheet

1985～ボイラー水管のオメガチューブへの変更

1994～1996 精鉱バーナーの性能向上

機械的に飛散するダスト発生低減^{1, 2}

1998 廃熱ボイラーへの窒素ガスの吹き込み

などのダスト発生低下、ボイラーへのダスト付着防止対策により生産性の向上を達成してきた。

省エネルギー面および環境面では 2003 年新設の焼却設備（後述）で回収した蒸気の有効活用と鉱石乾燥系排ガス量の低減を狙って銅原料鉱石乾燥用のスチームチューブドライヤーの建設を実施し、従来のフラッシュドライヤーからの切り替えを行った³。

金属系リサイクル原料の処理は主に転炉において実施してきた。転炉工程におけるリサイクル品処理の増処理を目的として銅スクラップのプレス整形設備を 1997 年に設置し転炉でのスクラップ処理量の増加を図り、また基本となる転炉工程の酸化能力向上、および環境面での改善を狙い転炉二重フードの設置による漏煙防止～転炉送風量の増加を実施している⁴。

2.2 銅電解工程の増強

銅電解工程の生産能力は複雑鉱処理に伴う高不純物アノードの処理のため長らく 4,500t/M にとどまっていた。銅製錬工程の増産と貴金属系原料処理増加に伴う銅アノードの更なる高不純物化に対応した銅電解工場能力増強、および、貴金属生産性向上、労働生産性向上と作業環境改善を目的とした銅電解増強工事を 1998 年の第一期工

事、2000 年の第二期工事に分けて実施した。

増強工事における主な工事内容は次の通りである。

第一期増強

- ・電解槽 40 槽増設
- ・アノード搬送設備の更新、アノードプレス増設
- ・整流器更新、2,450kw→3,750kw への増強

第二期増強

- ・電解槽 98 槽増設
- ・種板設備全面更新
- ・カソード搬出設備更新

また、第二期増強では小坂製錬の強みである高不純物アノード電解技術をさらに伸ばすことを目的として造酸電解槽も 2 槽増加させて 8 槽体制とし、浄液量を 1,300m³/M から 1,600m³/M に引き上げている⁵。当所における銅電解精製工程のフローを Fig.2 に示す。

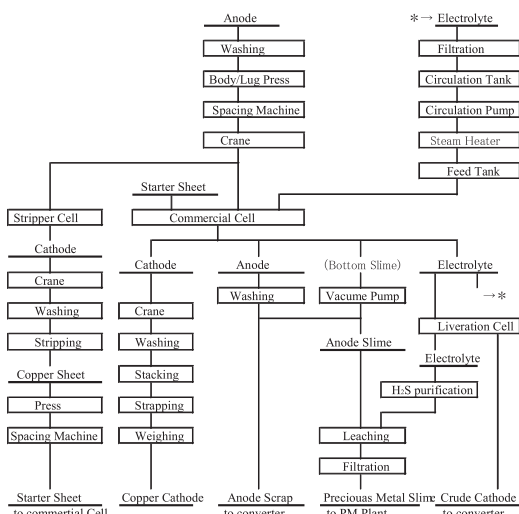


Fig. 2 Copper Tank house Process Flow sheet

これらの設備増強により電気銅は 6,000t/M の生産体制となった。

貴金属生産性に関しては、電極板形状の改善効果からさらなる高貴金属アノード電解が可能となり、Fig.3 に示すように、銅電解工場の貴金属生産性は 1993 年比で 1.8 倍まで上昇し、世界に類を見ない高不純物銅電解操業を達成している。

2.3 貴金属工程の増強

小坂製錬では既存の銅・鉛製錬工程をベースとして貴金属の増産を志向してきたが、貴金属工程は従来の工場内での改善で増産に対応していたため設備規模や配置、それによる作業性の問題を抱えていた。

これらの問題を解決するため 2000 年の銅電解第二期増強に合わせて貴金属工場建屋の増築を実施し、2003

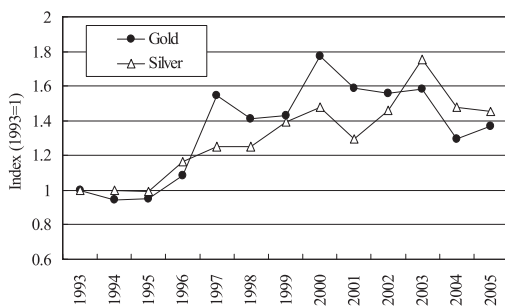


Fig. 3 Precious Metal Throughputs at Tank House

年にかけて生産性向上、品質向上を目的として以下の改善を実施した。主な変更点を次に示す。

- ・ 電解槽 4 槽増設、全 30 槽体制
- ・ 整流器増設、2 系列運転への切り替え
- ・ 浄液設備の全面更新、浄液量の増加
- ・ 製品鑄造設備の大型化
- ・ 計装設備の更新、DCS 化

以上の装置生産性の向上への取り組みにより銀電解工程は 80t/M の生産能力に達している。その後 2004 年にはさらなる装置生産性と労働生産性の向上を狙い電流密度の 30%増加を達成している。

金電解工程もあわせて全面的な移設・更新を実施し、金電解槽数も 8 槽から 12 槽に増、生産能力を 2t/M に上昇させた。

3. リサイクル原料増処理への取り組み

当所では次なるステージとして、既存の複雑鉱処理技術を基盤としたリサイクルビジネスの拡大、新規の貴金属系原料として廃電子基板類、貴金属含有スラッジ類の処理拡大を展開してきた。

リサイクルビジネスの拡大にあたっては

- ・ 原料の受け入れ、
- ・ 原料中の有価金属量の評価（サンプリング・分析）
- ・ 処理工程に供給するための前処理

の充実が急務であり、小坂製錬では 1997 年からこれらの設備の増強と技術開発を実行してきた。しかし、スペース的に扱い量の増加計画への対応が困難になったこと、設備人員配置の分散により効率が悪化していたことから、1999～2003 年にかけて旧内の岱鉱山地域を活用し新規受け入れ、サンプリング・評価設備、前処理設備を建設した。現在までの状況を Table4 に示す。

さらに、産業廃棄物系原料への展開も主要な戦略とし、新規事業にも取り組んできた。小坂製錬では秋田県北部

Table 4 Modification of Sampling and Assay Facilities

Year	Facility	Specification
1996	Expantion of Fire Assay facilities	
1998	Expantion of Strage Yard	390m2
1999	No,1 Waste Circuit Board Milling Plant	50t/M
2000	Installation of New Facilities Sanplng and Strage Yard Weighing Facilities	13,000m2 50t, 2set
2002	Installation of new Sampling Prerparation Plant Installation of new Fire Assay Plant Waste Circuit Board Incineration Plant	60t/M
2003	No,2 Waste Circuit Board Milling Plant	350t/M

エコタウン計画のハードプロジェクトのひとつである製錬拠点形成事業の一環として 2003 年に産業廃棄物である自動車の破砕残渣：ASR(Automobiles Shredder Residue)のサーマルリサイクルとマテリアルリサイクルを目的として導入した焼却設備（現エコシステム小坂㈱）を建設している⁶。サーマルリサイクルとして回収された蒸気は前述の銅製錬工程にて新規導入したスチームチューブドライヤーの熱源として、また小坂製錬所内各工程の加熱用熱源として有効活用され、回収された有価物含有灰は製錬工程にマテリアルリサイクルされている。

この他に秋田県北部地区における DOWA グループのリサイクルの拠点として㈱エコシステム秋田（旧同和クリーンテックス）および㈱エコリサイクルとリサイクルネットワークを形成し

- ・ 廃電子基板を焼却処理した銅焼却灰
- ・ 廃家電を分解・破砕処理し、再資源化銅資源

からの有価金属回収を実施している⁷。

さらに、2004 年には廃棄物の最終処分施設（現グリーンフィル小坂㈱）を建設し、リサイクル原料から廃棄物ビジネスにおける対応力の向上を図っている。

Fig.4 に当所にて処理したリサイクル原料の推移を示

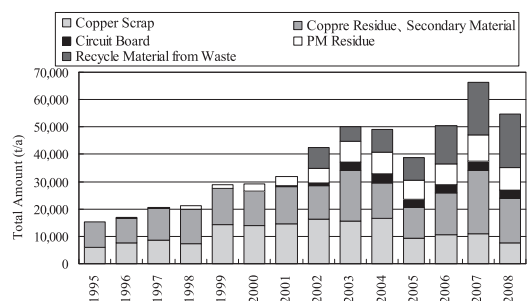


Fig. 4 Annual Feeds of Recycle Material

す。従来から取り組んできた銅スクラップ類、製錬工程の二次原料の処理増加に加え、貴金属系のリサイクル原料、廃電子基板等の増処理を進めてきた結果、ここ10年間で処理量は3倍の増加を達成している。

近年の製品のリサイクル原料からの生産比率を Fig.5 に示した。リサイクル原料由来の生産比率は年々上昇しており、貴金属製品は1/3 がリサイクル原料から生産されている。

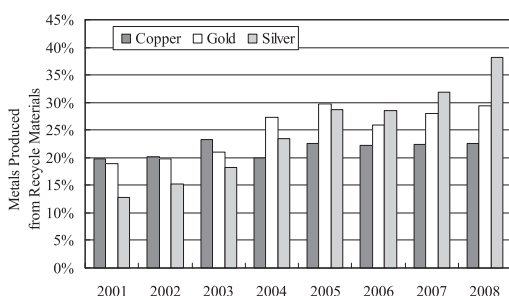


Fig. 5 Expansion of Recycle Business

4. 今後の展望

当所は内陸立地の小規模製錬所としてのハンディキャップを克服すべく貴金属・リサイクル複合製錬を目指してきた。

しかし、非鉄金属産業を取り巻く近年の環境変化は厳しく、これらの経済的環境変化に耐え、幅広い原料・多様な品位に対応して国際競争力を備えた製品を製造し、顧客の要求に答えていくことが我々に課せられた課題である。この中で、当所では2008年にTop Submerged Lance技術・電解採取法を用いた新しいリサイクルプロセスを導入し、原料・製品・技術における全ての面で大きな転換を図っている。新リサイクルプロセスの概要はFig.6に示す。新設備においても解決すべき問題点は多いが、さらなる技術力の向上、安全・環境対策の推進、人材の育成を達成し、世界で唯一の特色ある製錬所を目指し製錬・資源リサイクル事業の発展に取り組んで行く所存である。

終わりに、今までの当所の安定操業、技術開発に尽力

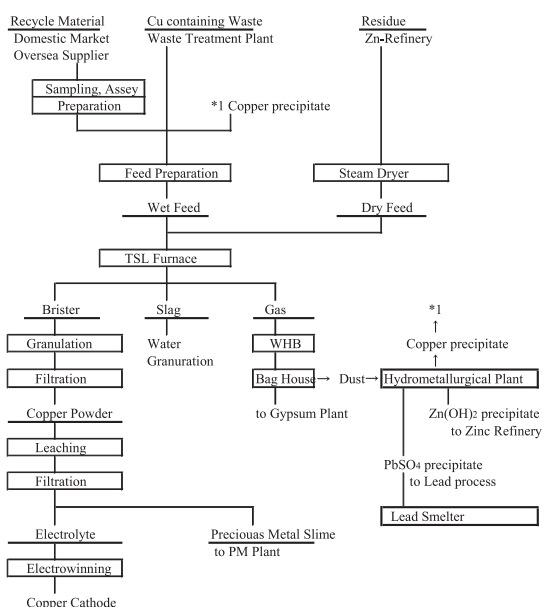


Fig. 6 Process Flow sheet of New Smelter

された先輩諸兄、ならびに社員諸子に対して心から敬意を表したい。

References

1. T. Shirasawa and I. Kawaguchi: Journal of MMIJ, **114**(1998), 335-337.
2. Y. Hoshikawa and I. Kawaguchi: Proceedings of the 9th International Flash Smelting Congress (1999), pp.353-358.
3. Y. Hoshikawa, S. Murakami and T. Nara: Journal of MMIJ, **121**(2005), 170-172.
4. K. Inoguchi, H. Tamanai and K. Yamada: Journal of MMIJ, **118**(2002), 305-308.
5. M. Kimura, S. Kawamura, Y. Matsuya and O. Ishii: Journal of MMIJ, **116**(2000), 425-427.
6. T. Togashi, T. Satoh and T. Atsumi: Journal of MMIJ, **120**(2004), 288-291.
7. Y. Kudo, T. Nakamura, Y. Fukuchi and S. Narumi: Journal of MMIJ, **117**(2001), 420-423.

特 別
講 演

亜鉛製錬の現状について¹

池 信 省 爾²

The current state and Issue of Zinc Smelting

Seiji IKENOBU

Mitsui Mining & Smelting Co., Ltd.

Abstract

Zinc is one of the most important metal elements for our living. In this report the outline of zinc business is discussed. The main contents are as follows: zinc production supply-demand balances, zinc concentrate supply-demand balances, the process for zinc smelting and issues of zinc business. Zinc concentrate production, zinc metal production and zinc consumption in China rise remarkably in these ten years. China's economic growth will have a big impact on the zinc market. The domestic demand for zinc has fallen below 500,000t. The tough business environment will continue for Japan. However, zinc smelters in Japan have overcome a historical crisis up to now. We cannot control the change in the economic environment but in the problem of fluctuations in the market and raw material shortage - these are not the problems of Japan alone, the smelters all over the world have the similar situation. KFS for the zinc smelting industry of Japan to survive is to keep inventing competitive technologies

Key words: Zinc smelting, Zinc concentrate

1. 結 言

亜鉛は、鉄の防錆用として、自動車用の鋼板、電気機器の筐体、ガードレールや橋梁等構造材にめっきされ広く使用されている。亜鉛は、鉄よりも電気化学的に卑な性質をもつことから、犠牲防食作用により、鉄の酸化（腐食）を防いでいる。一方その電気化学的性質が災いし、製錬法は、他の金属に比べ複雑かつ管理すべきパラメーターが多い。代表的な製錬法として、溶鉱炉を用いた ISP 法と電解法が挙げられるが、どちらの方法も選択的に亜鉛を回収させることが難しい。また昨今のエネルギーコスト高騰を背景に、製錬コストは上昇している。特にコークスを利用する ISP 法を採用した多くの製錬所が閉鎖に追い込まれた。

1990 年代の亜鉛相場は、低調に推移していたが、2004 年以降コモディティ価格の上昇に伴い、一時 4000\$/t 台まで高騰した。その後、景気後退に伴い下落し、特にリーマンショック以降急激な景気悪化が進んだ結果、一時

1000\$/t まで暴落した。歴史的に亜鉛相場は、ある周期で高騰、下落を繰り返しているため、2000 年代の大きな変化もその一つと言えなくもないが、BRICKS、NEXT11 など新興国の経済成長、特に中国の生産量、消費量の著しい増加を考えると大きなパラダイムシフトが起きているとも見える。本稿においては、エネルギーコスト高騰、中国をはじめとした新興国の台頭を踏まえた上で、リーマンショック以降の混沌とした需給、原料事情及び製錬法について概観する。

2. 亜鉛の需給について

2.1 国内需給

需給状況については、中元¹が詳細に解析しているので、その一部を引用しながら解説する。Table 1 に国内の需給バランスについて示す。2009 年の内需は、1967 年以来、42 年ぶりに 500 千 t を下回る歴史的な数字になることは確実な状況である。特に自動車の大減産の影響により亜鉛メッキ鋼板を中心とした自動車関連需要の落ち込みが激しかったことや、元々低調であった住宅関連需要も更に減速したことが主因である。2010 年の内需は 500 千 t 台を回復するとみられているが、輸出依存の景

1. 平成 22 年 6 月 3 日 本会第 124 回例会において発表

2. 三井金属鉱業株式会社金属環境事業本部亜鉛事業部
平成 22 年 2 月 19 日受理

気回復のシナリオの中では、大きな回復は望み薄と言わざるを得ない。更には、最近の円高基調の定着により、自動車だけでなく亜鉛メッキ鋼板そのものの輸出も勢いが殺がれかねない状況にある。公共投資との関連が強い溶融亜鉛メッキ向け需要にしても、明るい材料が見当たらないのも事実である。

次に 2009 年の生産については、消費の大幅な落込みを受け、かつてない減産が行われた。通常製錬業は、固定費を希釈するため、可能な限りの生産を実施するが、記録的な消費落込みを前に、減産という苦渋の選択をせざるを得なかったというのが実情であろう。一方輸出は大幅に増加しており、2009 年は、史上初めて十万台を超えており、2010 年に生産が計画通り行われれば、十万台が維持される見通しである。

Table 1 Domestic refined zinc supply and demand (kt-Zn).

単位：千 t

	07 年実績	08 年実績	09 年見込	10 年予測
繰越	93.9	82.1	94.5	87.3
生産量	597.6	615.5	559.0	600.3
輸入量	53.1	45.3	22.2	26.9
供給量	650.7	660.8	581.2	627.2
亜鉛メッキ鋼板向	218.8	205.8	153.0	189.7
その他向	369.5	358.1	286.6	321.1
内需計	588.3	563.9	439.6	510.8
輸出量	74.2	84.5	148.8	116.0
在庫	82.1	94.5	87.3	87.7

*実績値の出所は資源エネルギー庁

*09 年以降は三井金属予測

2.2 世界の需給

ここ数年の中国の動向が日本だけでなく世界の亜鉛需給、延いては亜鉛市況にも強く影響すると思われる。そこで世界の需給について中国を中心に考察する。

Table 2 に 1992 年と 2008 年の国別生産量を比較した。世界の生産量は、1992 年 7,028 千 t であったが、2008 年には 11,649 千 t まで増加している。日本の生産量は、1992 年世界最大の亜鉛生産国であったが、2008 年には 4 位に低迷している。一方中国の生産量は、2008 年に 3,913 千 t まで増加し、世界の 33.6%を占めるに至っている。

続いて Table 3 に 1992 年と 2008 年の国別消費量を比較した。世界の消費量は、1992 年 6,555 千 t であったが、2008 年 11,485 千 t まで増加している。ここでも中国の成長は著しく、1992 年 551 千 t から 2008 年 4,014 千 t

まで増加している。これらのことから中国が世界の工場としてだけでなく、消費国としても重要な位置づけを占めることがわかる。

さて Table 4 に世界の需給バランスを示す。2009 年の世界の亜鉛地金需給見込みは、金融危機後の消費の急激な落込みにより、380 千 t もの大幅な余剰バランスとなっている。2010 年の需給は、消費の回復を受け余剰幅は縮小するとしているが、依然として 200 千 t を超える余剰を見込んでいる。これらのデータは多くの不確定要素を含んでいる。いずれにしても中国の景気動向、政府方針が、世界の亜鉛需給に影響を与えることになるとは、間違いない。

Table 2 Ranking of zinc products in 1992 and 2008.

1992年

順位	国名	生産量	シェア
1	日本	729	10.4%
2	中国	719	10.2%
3	カナダ	672	9.6%
4	アメリカ	400	5.7%
5	ドイツ	383	5.4%
6	スペイン	368	5.2%
7	オーストラリア	332	4.7%
8	フランス	304	4.3%
9	カザフスタン	261	3.7%
	その他	2,860	40.7%
	合計	7,028	

2008年

順位	国名	生産量	シェア
1	中国	3,913	33.6%
2	カナダ	764	6.6%
3	韓国	739	6.3%
4	日本	616	5.3%
5	インド	606	5.2%
6	オーストラリア	498	4.3%
7	スペイン	466	4.0%
8	カザフスタン	362	3.1%
9	メキシコ	320	2.7%
	その他	3,365	28.9%
	合計	11,649	

※生産量の単位は千 t

Table 3 Ranking of zinc consumption in 1992 and 2008.

1992年

順位	国名	消費量	シェア
1	アメリカ	1,043	15.9%
2	日本	784	12.0%
3	中国	551	8.4%
4	ドイツ	532	8.1%
5	イタリア	300	4.6%
6	韓国	272	4.1%
7	ロシア	260	4.0%
8	フランス	258	3.9%
9	イギリス	190	2.9%
	その他	2,365	36.1%
	合計	6,555	

2008年

順位	国名	消費量	シェア
1	中国	4,014	34.9%
2	アメリカ	991	8.6%
3	日本	564	4.9%
4	ドイツ	527	4.6%
5	韓国	521	4.5%
6	インド	485	4.2%
7	ベルギー	382	3.3%
8	イタリア	319	2.8%
9	メキシコ	252	2.2%
	その他	3,430	29.9%
	合計	11,485	

※消費量の単位は千 t

Table 4 Global refined zinc supply and demand (kt・Zn).

《暦年ベース》	2005 実績	2006 実績	2007 実績	2008 実績	2009① 見込	②2010 予測	差異 ②-①
鉱石生産計	10,146	10,444	11,143	11,705	11,078	11,873	897
欧州	2,563	2,508	2,516	2,477	2,023	2,389	366
アフリカ	273	257	279	260	267	273	6
北米	1,075	1,093	1,081	1,082	945	1,027	82
南米	804	775	790	790	722	923	201
日本	638	614	598	616	555	600	45
中国	2,776	3,163	3,743	3,913	4,150	4,430	280
その他アジア	1,638	1,778	1,850	2,050	1,964	2,094	130
オセアニア	457	466	502	498	514	528	14
地金生産計	10,223	10,654	11,359	11,686	11,140	12,264	1,124
欧州	2,684	2,786	2,850	2,625	2,003	2,482	479
アフリカ	204	199	210	192	170	190	20
北米	1,253	1,334	1,189	1,163	1,068	1,099	31
南米	647	688	694	695	501	639	138
日本	602	594	588	564	440	511	71
中国	3,041	3,156	3,563	4,015	4,690	5,045	355
その他アジア	1,929	1,988	1,968	1,985	1,739	1,920	181
オセアニア	253	268	214	161	149	151	2
地金消費計	10,614	11,013	11,276	11,400	10,760	12,037	1,277
米国備蓄放出	29	28	7	0	0	0	0
需給バランス	△ 362	△ 331	90	286	380	227	▲ 153

出所：国際鉛亜鉛需要研究会09年10月発表値

3. 亜鉛資源

Table 5 に 1992 年と 2008 年の国別鉱石生産量を比較した。世界の鉱石生産量は、1992 年 7,028 千 t であったが、2008 年 11,649 千 t まで増加している。ここでも中国の生産量の増加が際立っており、2008 年 3,186 千 t 約 27%を占めている。中国、ペルー、オーストラリアの三国で約 53%を占めており、一定地域に集中していることがわかる。日本の鉱山が閉山及び休山しており、すべての製錬所がカスタムスメルターになっている。中国の急成長(資源爆食)は、国内の鉱石生産量で補うことが出来ず、資源の買占めなど世界の原料市場に今後大きな影響を与えると考えられる。また亜鉛鉱山の新規開発があまり進まない一方、Brunswick、Century 等の既存の大型鉱山の閉山を迎え、供給面の伸び悩みが懸念される。亜鉛資源に関しては、西山らによる詳細な検討結果がある²³⁾。その検討を元に概要を示す。埋蔵量/生産量で得られる亜鉛の静的耐用年数は、1970 年で 23 年、1990 年で 18 年となっている。また成長率を考慮した動的耐用年数は、1970 年で 17 年、1985 年で 20 年であり、いずれも耐用年数約 20 年であり、この二十年間変動していない。このことは、生産量に見合った新しい鉱床が発見されたことを意味している。2000 年代に入り、亜鉛相場の高騰により FS 時の亜鉛相場の前提が大きく変わったこと、中国をはじめとする新興国の需要急増、各製錬所での二次原料の処理量増加など、要因が複雑に絡み合い、耐用年数の評価が今後益々複雑になると考えられる。

Table 5 Ranking of zinc concentrate production in 1992 and 2008.

1992年				2008年			
順位	国名	生産量	シェア	順位	国名	生産量	シェア
1	日本	729	10.4%	1	中国	3,913	33.6%
2	中国	719	10.2%	2	カナダ	764	6.6%
3	カナダ	672	9.6%	3	韓国	739	6.3%
4	アメリカ	400	5.7%	4	日本	616	5.3%
5	ドイツ	383	5.4%	5	インド	606	5.2%
6	スペイン	368	5.2%	6	オーストラリア	498	4.3%
7	オーストラリア	332	4.7%	7	スペイン	466	4.0%
8	フランス	304	4.3%	8	カザフスタン	362	3.1%
9	カザフスタン	261	3.7%	9	メキシコ	320	2.7%
	その他	2,860	40.7%		その他	3,365	28.9%
	合計	7,028			合計	11,649	

※生産量の単位は千t

4. 亜鉛の製錬

亜鉛の製錬法は、乾式法と湿式法に大別される。工業的には、湿式法が主流であり、世界の生産量の 90%以上がこの方法で生産されている。亜鉛原料のほとんどが、硫化鉱である。

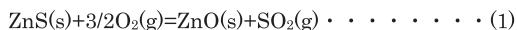
湿式法の場合は、焙焼工程にてまず焼鉱 (ZnO) を製造する。焼鉱は、溶解工程にて硫酸浴中で浸出され、共存する不純物を清浄工程で除去した後、電解工程で析離亜鉛として回収する。析離亜鉛は、デマーク炉により溶解後、鑄造され製品として出荷される。

一方乾式法は、溶鉱炉を使用した ISP 法が主流である。ISP 法は、亜鉛・鉛の同時製錬法として、世界的に工業規模で実施されており、わが国においても二工場が稼働している。ISP 法は、湿式法においては処理が困難である複雑鉱の処理に適しており、不純物への対応力が高いことが特徴である。しかしながら得られる亜鉛の純度が、98.5%程度である。需要の大きい連続メッキ用の亜鉛を製造するためには、さらに精留法により不純物を除去する必要がある。

この章では、電解法と ISP 法について解説し、それぞれの課題、今後の動向について考察する。

4.1 電解法

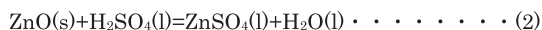
電解法では、硫酸浴を使用するため、溶解工程の滞留時間を短縮し、設備投資を抑制する目的で原料となる硫化鉱を焙焼炉で酸化物とする。



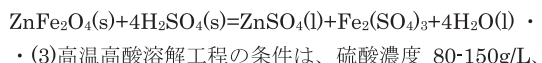
生成した SO₂ ガスは、硫酸として回収される。いくつかの製錬所では、焙焼炉を建設せず、オートクレーブを使用して直接硫化鉱から亜鉛を抽出するダイレクトリーチング法を採用している製錬所もある。

焙焼炉にて生成した焼鉱 (ZnO) は、溶解工程にて硫酸浴にて抽出される。標準的な製錬所では、酸性溶解工程

(pH1.5)と中性溶解工程(pH5)を組み合わせた複式溶解法を採用している。

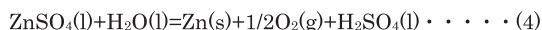


しかしながらこの pH 領域では、焙焼炉で生成した Zn_2FeO_4 は、ほとんど溶解しない。そのため多くの製錬所では、溶解工程で生成した残渣は、高温高酸溶解工程で処理している。



・(3)高温高酸溶解工程の条件は、硫酸濃度 80-150g/L、温度>90℃であり、ほとんどの亜鉛が抽出される。残渣は、硫酸浴で不溶性の鉛、銀を含んでおり、鉛製錬工場で回収されている。高温高酸溶解工程では、亜鉛と同時に鉄を溶出する。この鉄をどのような形態で除去するかによって、プロセス設計が変わる。世界的には、鉄を $\text{MFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ (M は、Na, NH, K など) の形態で除去するジャロサイト法が一般的である。また鉄を一旦還元し、空気酸化することで FeOOH の形態で除去するゲーサイト法を採用している製錬所も少なくない。国内では、飯島製錬所が、オートクレーブを使用し、 Fe_2O_3 の形態で除去するヘマタイト法を採用している。この他、溶解工程の残渣をフィルタープレスで分離後、キルンで亜鉛を還元、再酸化し、製造した ZnO を溶解工程にて回収するウエルツ法を採用している製錬所も増えている。

電解工程では、カソードにアルミ板、アノードに鉛-銀合金を使用し、電気分解をおこなう。



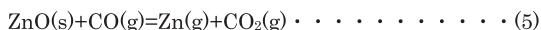
亜鉛は、約 3000kWh/t の電力を使用することから、各製錬所にて電流効率の改善、液抵抗、接触抵抗、スケール抵抗の削減など継続的な改善を実施している。

最近の技術課題としては、精鉱の微粉化問題がある。これは粗鉱中の鉱物が小さい鉱石が増え、選鉱工程で ZnS と脈石の分離が十分にできず、亜鉛の回収率を上げるためにどうしても微粉化しなければならない。微粉な精鉱を処理した場合、粒径が小さいため炉底から吹き込まれる空気の上昇速度よりも粒子の沈降速度が小さいため、精鉱が焙焼炉の流動層に入らず、次工程のボイラーに混入し、つまりの原因となっている。この問題は、世界的に共通の課題になりつつあり、安定して処理するための技術開発が必要である。良質な亜鉛精鉱は、減少しており、微粉鉱問題に限らず、これまでに経験のない不純物品位の高い鉱石の処理に対応する技術が今後求められることになる。

4.2 ISP 法

ISP 法も湿式法と同様に原料は硫化鉱である。この硫化鉱を焼結プロセスにおいて脱硫・焼結し、コークスとともに溶鉱炉に装入し、羽口より熱風を送り還元する⁴。還元された亜鉛は、蒸気圧が高いという亜鉛の性質から

蒸気として炉上部より回収される。亜鉛蒸気は、コンデンサーにおいて溶融鉛スプラッシュコンデンサーにより急冷され溶解度の差の亜鉛が析出し回収される。亜鉛は、鉛の溶解度を有しているため溶解度相当の鉛が含有される。これが ISP 法により生産される亜鉛の純度が 98.5%程度となる理由である。溶鉱炉における亜鉛の炭素還元反応は以下の反応で示される。



亜鉛の還元において重要なことは、原料中に共存する鉄の挙動である。ISP 法においては、炉底部より鉛、スラグをタッピングするため鉄の還元は極力抑える必要がある。(5)式において ZnO は CO ガスによって還元されガスとなるが、比較的低温では逆反応により、亜鉛の酸化が起こる。それを防止するため、ISP 法において炉上部にトップエアを挿入し温度を維持している。また還元に必要な CO ガスは(6)式の Boudouard 反応により供給される。炉上部より回収される亜鉛蒸気を効率よく溶体とするために、コンデンサーには多くの工夫がなされている。

2000 年に入り、石炭、コークスの価格の上昇に伴い、ISP 法の競争力は失われ、いくつもの製錬所が閉鎖に追い込まれている。世界中で稼働している ISP 製錬所は、8 製錬所である(2010 年 2 月現在)。今後 ISP 製錬所が存続するためには、不純物への対応力が大きいという強みを活かし、難処理鉱の比率をいかに高めるかということ、またコークスの代替となる還元剤を見つけることであろう。

5. おわりに

亜鉛の需給、原料事情及び製錬法について概観した。2000 年代に入り、資源インフレが起き、その後リーマンショックによる沈静化など、事業環境が実需と無関係に振り回されていることは否めない。「100 年に一度」といわれる景況感の中で、一時的な「空」を観察し、今後の亜鉛製錬業の方向性を見出すことは困難であるが、地に足をつけ、冷静に世の中の動きを観察し、これからの打ち手を考えなければならない。特に中国の台頭は、需給、原料事情に大きな影響を与えている。また急速に大型の製錬所が立ち上がっており、脅威と捉えることもできるが、果たして競争力のある状態が維持できるかは、疑問である。いずれにしても動向を継続的に観察していく必要がある。国内の製錬所は、オイルショック、プラザ合意後の円高にも耐え、ここまで事業を継続してきた。これらを克服する過程で、省エネ技術及び不純物対応技術の開発、継続的なコストダウン、省力化で競争力を維持してきた。環境変化は、制御できないが、相場の変動、原料不足は世界中の製錬所も同様の悩みを持つ、その中

でいかに競合優位性のある技術を生み出し、維持することが、日本の製錬業が生き残るためのキーであることにかわりはない。

References

1. N.Nakamoto: JGA NEWS, Vol.61 Jan.

p.7-14 (2009)

2. T.Nishiyama and T.Adachi: Shigen to Sozai, 109, p.473-477.(1993)

3. T.Nishiyama: Shigenn Keizaigaku no Susume, Chukoushinsyo(1993)

4. T.Yoshida: Shigen to Sozai, Vol.113, p.967-971 (1997)

特 別
講 演

日本におけるアルミニウム製造の現状について¹

高杉 篤美²

Current Situation of the Aluminium Production in Japan

Atsumi TAKASUGI

Japan Aluminium Association

Abstract

Japanese aluminium industry currently produce semi-fabricated materials by rolling, extrusion, diecasting and so on and make some kinds of fabrications, because aluminium smelting industry has almost died out by twice the oil shock.

But, aluminium has an advantage for coming sustainable and low-carbon society by the recycle property.”Aluminium Strategic Technology Roadmap 2009”by Japan Aluminium Association indicates the main subjects increasing the recycle ratio of aluminium scrap and reducing the amount of the alloy elements to realize the aluminium alloys would be suitable material for sustainable and low-carbon society.

Keywords: Aluminium, Aluminium alloy, Rolling, Extrusion, Diecast, Recycle

1. はじめに

1886年にホール、エルーにより工業的なアルミニウム電解製錬法が発明され、1894年には早くも我が国では地金を輸入し板を製造し軍用品を製造した。多くの技術改善がなされたものの120年経過した現在も基本的には電解製錬法は変わっていないが、この間我が国では1934年に製錬が開始され、最盛期には120万トンを超えるアルミニウム製錬を行っていた。しかしながら二度のオイルショックによる電力料金の高騰で国内製錬はほぼ壊滅し、現在は海外から地金を輸入し国内で主として素材製造および加工（圧延・押出・鋳物・ダイカスト・鍛造、機械加工・表面処理・粉末等）を行っている。これは近年海外のアルミメジャーが製錬に特化し加工を手放しているのと対照的である。

一方、製品需要は、1950年代以降用途開発と社会の高度経済成長により順調に伸び、2006年度には446万トンに達し（過去最高値）、1人当たりの消費量でも日本は約32kg(2007年)と米国とならんで世界トップの水準にある。

今後のアルミニウム産業を展望すると、これまでは、軽量、耐食性、易加工性等の特性により需要を伸ばしてきたが、今後は課題をクリアーすることにより、そのリサイクル優位性

を活かし、来るべき低炭素社会、循環型社会に貢献していくことが大いに期待される。

以下に、アルミニウム産業の特徴、基盤製造技術、課題と対応について概述する。

2. 日本のアルミニウム産業の特徴

国内のアルミニウム需要は、1950年代以降用途開発と社会の高度経済成長により順調に伸び続け（Fig.1）、最近では、1人当たりの消費量でも約32kg（2007年）と米国と並んで世界トップの水準にある（Fig.2）。

この間二度のオイルショックによる電力料金の高騰で国内製錬の地金は国際競争力を失い、国内のアルミニウム製錬業はほぼ壊滅した。現在は世界各地から約200万トン/年の新地金を輸入している（Fig.3）。

国内のアルミニウム産業は、輸入地金から各種素材加工により多くの利用分野に基礎材料としてのアルミニウムを供給している（Fig.4）。

Table1 にアルミニウム材料の主な需要分野とアルミ材料が使用される主な理由を示すが、輸送分野で普及の大きな原動力となってきた「軽量」という特徴は、リサイクル性と相俟って、今後低炭素社会、循環型社会への移行に伴い、益々利点として活かされることが期待される。

3. 基盤製造技術の概要

1. 平成22年6月3日 本会第124回例会において発表

2. 所属先 社団法人日本アルミニウム協会

平成22年3月5日受理

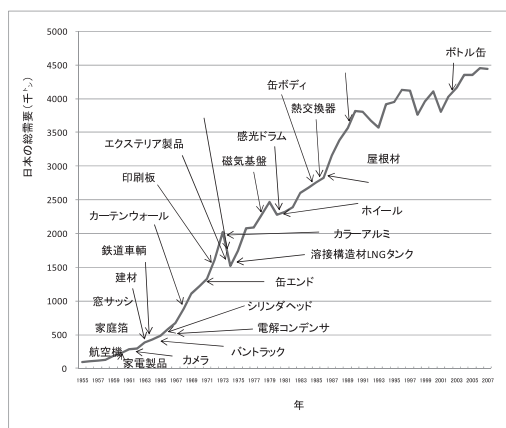


Fig. 1 Trend of Aluminium Demand in Japan

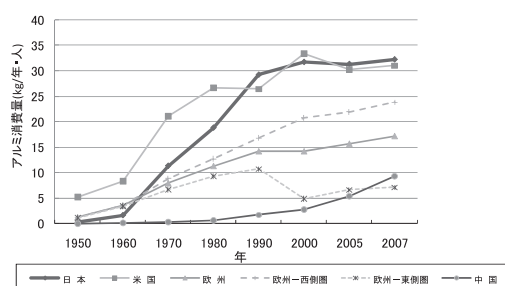


Fig. 2 Trend of Aluminium Consumption per person

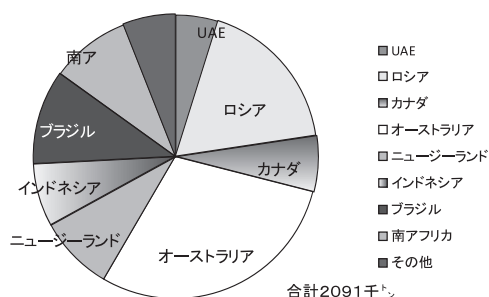


Fig. 3 Aluminium Import of Japan (2008 Fiscal year)

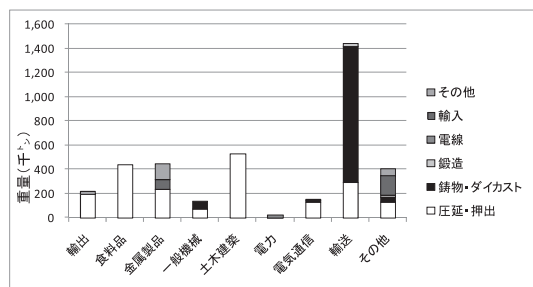


Fig. 4 Details of Aluminium Demand in Japan (2008 Fiscal year)

Table 1 Feature of Aluminium

製品	アルミニウム材料が使用される理由
缶	加工性良、リサイクル優位性、軽量、遮光性、ガスバリア性
箔	高静電容量、防湿性、遮光性、断熱性、熱伝導性
自動車	軽量、鋳造性良
トラック架装	軽量、加工性良
自動車熱交	軽量、熱伝導性、加工性良、耐食処理容易
家電フィン	熱伝導性、加工性良、耐食処理容易
メモリディスク	非磁性、軽量で高速回転に適する、精密加工性良、耐食性
印刷版	強度、表面処理性
建材	軽量、耐食性、気密性良、非磁性、リサイクル性
鉄道車輛	軽量、耐食性、溶接性、断面形状自由度
船舶	軽量、強度、耐食性、リサイクル性
LNG 船タンク	加工性、溶接性、低温脆性なし
航空機	軽量、比強度大
ロケット燃料タンク	軽量、低温での強度低下なし

3.1 アルミニウム合金の種類

実用アルミニウム合金として需要が大きいのは、圧延・押出に使用する展伸材用合金、鋳物用の鋳物合金、ダイカスト用のダイカスト合金である。

(1) 展伸材用合金

1000 系：工業用純アルミニウム。加工性、耐食性、溶接性に優れるが強度は低い。

2000 系：Cu を主成分として含有し、熱処理により高強度が得られる。

3000 系：Mn を主成分として含有、1000 系より高強度。

Mg を添加したものはさらに高強度が得られ、飲料缶の胴体等に用いられている。

4000 系：Si を主成分とし、溶融温度が低いいため、主にろう材、溶加材として用いられている。

5000 系：Mg を主成分として含有し、3000 系と共に非熱処理型の代表的な合金系。

6000 系：Mg, Si を主成分とし、熱処理で比較的高強度が得られる。代表的な押出用合金で建材等に多用されている。

7000 系：Zn, Mg を主成分とし、アルミニウム合金では最

高強度が得られる。

(2) 鋳物用合金

金型鑄造、低圧鑄造等に用いられるが、鑄造性の良好な

Al-Si 系をベース

に多くの合金が使用されている。

(3) ダイカスト用合金

鑄造性の良好な Al-Si 系をベースにしているが、ダイカストの大半は ADC12 であり、量産効果が大きい。

3.2 溶解・鑄造

圧延、押出用のスラブ、ビレットは量産効果を得るために比較的大規模（約 10～100ton/チャージ）な溶解・鑄造を行っている。また、溶解と鑄造の所要時間のバランスから溶解炉と保持炉を対で設置することが多い。アルミニウムは非常に酸化し易く、溶解工程で 2%程度は酸化物となってしまうが、溶湯表面の酸化皮膜は緻密なため大気雰囲気での溶解が可能である。製品の要求品質を満たすために、溶解中に吸収される水素ガスの脱ガスと非金属介在物の物理的なフィルタリングが溶湯処理として実施されている。鑄造は堅型半連続鑄造が殆どであり、長さは約 6～10m が多く、ビレットの場合は所定の長さに切断して使用する。

3.3 圧延

鑄造されたスラブは、外表面を約 10mm 面削し均熱処理した後、まず、再結晶温度以上で熱間圧延し、次に、常温で冷間圧延することにより、加工硬化による強度確保、結晶粒微細化、表面性状の確保を行う。この冷間での圧延速度は 2000m/min.程度である。品質的には、寸法・形状精度を確保するために、非接触式板厚計により板厚を測定しロール間隙、張力、速度を制御したり、ロールの曲げたわりとロール熱膨張の調整を行っている。また、表面品質としてはロールコーティング（アルミニウムが高温高圧下でロールに溶着、アルミニウムとその酸化物と圧延油の層がロール表面に生成）を均一にコントロールすることが重要である。

3.4 押出

押出加工は任意の断面形状が得られることから、これまで窓サッシを始めとする建材分野を中心に大きな需要を生んできた。押出技術の構成要素は多いが、特にダイス技術は重要である。ダイスは押出中は高温下で高圧を受け常に撓んだ状態にあるため、寸法精度・表面性状におよぼす影響を正確に予測することは難しい。しかし、近年はコンピュータシミュレーションが実用化されダイス技術は長足の進歩が期待される。

3.5 鋳物・ダイカスト

鋳物・ダイカストはニアネット製品の製造が可能であり、古くから普及している製造方法であるが、量産用としての実績では低圧鑄造とダイカストに代表される。

低圧鑄造は、密閉された容器内の表面に 0.01～0.05MPa

の空気圧をかけ、溶湯を押し上げて金型内に注入する鑄造法であるが、中子が容易に使用できることから複雑な形状のシリンダーヘッドやタイヤホイールに適用されている。

ダイカストは、高速・高圧力で金型内に溶湯を供給する製造方法で、寸法精度、平滑な鑄肌、量産性等に優れ、ダイカスト材の約 90%は自動車関連の製品に使用されている。

3.6 加工技術

(1) プレス成形

圧延された板は、多くの場合塑性加工されて使用されるが、プレス成形が最も一般的であり、深絞り成形、張出し成形、伸びフランジ成形、曲げ成形、高温ブロー成形がある。

(2) 接合

接合法には、イナートガスアーク（MIG,TIG）溶接、レーザー溶接、抵抗スポット溶接、摩擦撹拌溶接、ろう付け、かしめ（機械的接合法）等がある。

(3) 表面処理

代表的な表面処理は陽極酸化処理（アルマイト）である。また、陽極酸化処理によりアルミニウム表面に形成された酸化膜は多孔質であり、耐食性を向上させるため封孔処理を施したり、皮膜の着色や硬質皮膜形成にも利用されている。

4. 日本のアルミニウム産業の課題と対応

4.1 日本のアルミニウム産業の課題

2009 年 11 月、今後 25 年間のアルミニウム産業の研究・技術開発の方向性を示す「アルミニウム技術戦略ロードマップ 2009」が日本アルミニウム協会より発表された。そこでは、日本のアルミニウム産業の二つの課題が掲げられている。一つは、二度のオイルショックによる電力料高騰で日本のアルミニウム製錬が壊滅し、新地金をほぼ全量輸入している現状において、原料コストが海外に比較して割高であることが海外との競争で足かせになっていること。もう一つは、今後の課題として、アルミニウム合金は Cu、Zn、Mn といった所謂枯渇元素を主要な添加元素として含有しているが、これらの添加元素は今後益々投機の対象になっていくことが予測されることから、価格が乱高下することにより基礎材料としての信頼性が揺らぐ懸念である。

また、これら以外にも、既に国民 1 人当たりのアルミニウム消費量では米国と並んで世界のトップ水準にある日本にとっては、自らの技術開発により需要を開拓する以外には、海外には成長モデルはないことも述べられている。

さらに、他の製造業と同様、これまでアルミニウム産業の基盤技術を担ってきた団塊世代の大量リタイアにより、基盤技術を継承発展させる中核人材の育成が急務である。

4.2 対応

新地金をほぼ全量輸入に依存していることによる原料コスト面の劣勢への対応は、むしろ大きなチャンスとして捉え、弱みを強みに変えていく方向性が確認されている。それは、日本のアルミニウム材料のリサイクル率は大いに改善の余地があり、リサイクルコストを低減する技術開発を推進することでリサイクル率を向上させ原料コストを低減しようとするものである。現在、日本のアルミニウム製造原料に占める新規投入原料（新地金＋輸入合金地金）の比率は約 40%である（Fig.5¹⁾。即ち、投入された原料の 40% はリサイクルされてないことになる。

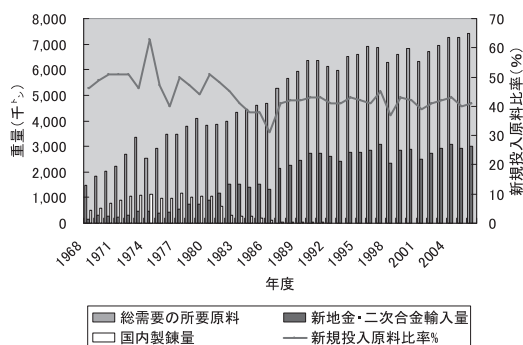


Fig. 5 New Raw Material Ratio(1968-2006 Fiscal year)

この 40%の約半分は本来リサイクルが可能であるが様々な要因でリサイクルされてない。リサイクルを妨げる最大の要因はリサイクルコストと推定されるため、それを解決する技術革新を推進していく。その結果 20 年後の目標値として、本来リサイクルが可能であるにもかかわらずリサイクルされてない量の半分をリサイクルする、即ち総需要 450 万^トの場合には 75 万^トのリサイクル量の増加を見込み、これは総需要 450 万^トに対して約 300 万^トの新地金および合金地金を輸入している実績に対して 75 万^ト新地金の輸入量を削減することを意味する。これは海外製錬での CO2 排出抑制という観点からも大きな意義がある。

添加元素に枯渇元素を使用している課題については、最新の科学技術の進歩を活かし、ナノテクレベルで添加元素の効果を深堀し、その効果を組織制御で代替える方向で

検討を進める。その成果として、添加元素量を削減し、さらには添加元素をユビキタス元素である Fe や Si に代替えることを検討していく。ロードマップでは、アルミニウム材料の基本性能の大幅な向上も目指しているが、この場合も、新しいシーズ、新しい発想が不可欠になる。それが新規需要の開拓に繋がる。

これらの課題解決がなされれば、アルミニウムはそのリサイクル優位性を活かし、来るべき低炭素社会、循環型社会において基礎材料として益々の信頼を得ることが期待される。

基盤技術を継承発展させる中核人材の育成については、経済産業省の委託事業として、平成 19 年度から平成 21 年度までの 3 年間で、製造中核人材育成プログラムを大学とアルミニウム産業が協力して開発してきた。平成 22 年度より日本アルミニウム協会にて「製造中核人材育成講座」が開講される予定であるが、大いに効果が期待される。

5. おわりに

日本のアルミニウム産業は、1890 年代に近代的なアルミニウム製錬法が米国、フランスで発明され、10 年も経ない内にアルミニウム地金を輸入し板材の製造に着手して以来、1930 年代には国内で製錬が開始され、また、戦後は 1950 年代以降、需要開発と社会の高度経済成長により大幅に需要を伸ばしてきた。この間、二度のオイルショックで国内製錬はほぼ壊滅しアルミニウム産業の業態も様変わりした。

来るべき低炭素社会、循環型社会でのアルミニウムの役割を展望したとき、その「軽量」、「優れたリサイクル性」等の特性は、アルミニウムがまさに時代のニーズに応えられる基礎材料であることを確信させる。大きな課題も抱えているが、最新の科学技術を活用して積極果敢に課題に取り組み、未来を切り開いていくことが強く望まれる。

References

1. A.Takasugi : Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 59, No.2, pp.87-93(2009)

特 別
講 演

日本におけるチタン製造の現状¹

西村 孝²

The Present Status of Titanium Production in Japan

Takashi NISHIMURA

Japan Titanium Society, NTC Corporation for Titanium

Abstract

Titanium has been commercially produced since 1946 and used for various applications, especially for aerospace and chemical industries. Titanium is an abundant metal, and fourth place after Aluminum, Iron and Magnesium. Titanium metal is obtained from titanium dioxide using Kroll process which is reduction process from titanium tetra-chloride with magnesium and the only process now used in the world for titanium reduction.

Titanium mill product is produced by using iron & steel mill from titanium ingots which are made from titanium sponge and scrap usually by vacuum arc remelting process(VAR). Now electron beam melting(EB) and plasma arc melting(PAM) are also used for titanium melting. Properties of titanium material and various kind of titanium material are also written in this paper.

Key words: Titanium, Titanium Alloy, Titanium Sponge, Kroll Process

1. はじめに

チタンは18世紀の終わりごろに初めて見つかったが、酸素との親和力が高いために純粋な金属チタンを得るのに100年を越える年月がかかり、1910年にアメリカの化学者ハンターがNaを使用して純度99.9%のチタンを抽出することに成功した。チタンが金属材料として実際に実用化され始めたのは1946年ごろからで、ルクセンブルグの冶金学者クロルがMgを使用して大量生産が可能な製錬法を開発した。この方法をクロル法と呼び、金属チタンの工業的製錬法は例外を除き全てクロル法で製造されている。

チタンはその埋蔵量がAl、Fe、Mgに次いで4番目に多い。それにもかかわらずレアメタルの中に入れられているのは生産量が他のコモンメタルのように多くなく、世界の年間生産量がたかだか10万トン以下であったためである。しかし、原料が無尽蔵といってもよいくらいあることや、軽くて強く耐食性がよいなど優れた特性を

生まれながらに有していることから21世紀には汎用材料として広く使用されることが期待される。本稿では、チタン材料の特性、製造方法、用途を含めたチタン産業の現状等について述べる。

2. チタン材料の特性

チタン材料の中でもっとも多く使用されている純チタン(JIS2種板TP340)とチタン合金Ti-6Al-4Vの特性を他金属と比較してTable 1に示す。その特徴をまとめると以下のとおりである。

(1) チタンは、融点が高いのに軽い純チタンの密度は4.51g/cm³で、鉄・ステンレス鋼の56~57%、銅の51%である。チタンは軽いといわれるが、アルミニウムはチタンの56%、マグネシウムはチタンの39%とさらに軽い。しかし、これらの軽い材料は、融点が660℃以下でチタンの融点より1668℃より約1000℃も低い。

(2) チタンは比強度が高く、高低温で利用できる純チタンの引張り強さは、JIS規格では270~750N/m²の範囲であるが、不純物元素の含有量を増やすことにより1000N/m²の純チタンを得ることができる。軟らかな純チタ

1. 平成22年6月3日 本会第124回例会において発表
2. 社団法人日本チタン協会、有限会社チタンのNTC
平成22年3月28日受理

Table 1 Titanium properties with other metals

		純チタン (TP340)	チタン合金 (Ti-6Al-4V)	普通鋼 (SPCC)	ステンレス鋼 (SUS304)	アルミ合金 (A5052P)
物 性 値	溶 融 点 (°C)	1,668	1,540~1,650	1,530	1,400~1,427	476~638
	密 度 (g/cm ³)	4.51	4.43	7.90	7.90	2.80
	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /K)	8.4	8.8	12.0	17.0	23.0
	熱伝導率 (w/m・K)	17.0	7.5	63.0	16.0	121.0
	比熱 (J/kg・K)	519	585	460	502	962
	電気伝導率 (% 対 Cu)	3.1	1.0	18.0	2.4	30.0
	電気比抵抗 ($\mu \Omega \cdot m$)	0.550	1.702	0.097	0.720	0.058
材 質	ヤング率 (Gpa)	106.3	113.2	205.8	199.9	71.5
	耐力 (N/mm ²)	277	909	179	206	101
	引張強さ (N/mm ²)	393	999	315	588	212
	伸び (%)	39	18	48	59	24
	硬さ (Hv)	140	310	126	174	60
	比強度 (引張強さ/密度)	87.1	225.5	40.1	74.4	75.7

ンは、強度は低いが普通鋼やステンレス鋼並みに成形等の冷間加工ができる。Ti-6Al-4V で代表されるチタン合金は、1000 N/m²前後の引張り強さを持ち、比強度は 600 近くまで他材料より高い。この特徴を活かして航空宇宙材料として使用される。また、純チタンと Ti-5Al-2.5Sn 合金はアルファ相単相組織であり、低温脆化がなく、液体ヘリウムの温度 4.2°K まで使用できる。

(3) チタンの線膨張係数はもっとも小さいチタンの線膨張係数は、金属の中でもっとも低いほうに属し、アルミニウムの約 1/3、ステンレス鋼や銅のおよそ半分、普通鋼の約 70%と小さいセラミックスや複合材料と一緒に使用するときには有利である。

(4) チタンの熱伝導率は低い純チタンの熱伝導率は低く、銅の 1/23、アルミニウムの約 1/7、鉄の約 1/4 であり、ステンレス鋼より少し良い程度である。純チタンが低い熱伝導率にもかかわらず熱交換器に多く使用されるのは、耐食性がよいため表面が初期に近いまま保持され、界面における熱伝達がよくシステム全体の熱交換率が良いためである。

(5) チタンは熱しやすく冷めやすいチタンの比熱は、アルミニウムが特別ほかの金属より高いのを除き、銅や銅と大きく変らない。これは同じ重量の場合、加熱冷却に必要な熱量はほぼ同じ事を意味する。チタンの密度は小さいので、同じ体積の熱容量はチタン場合小さい。1 cm³の材料を 1°K 上げるのに必要な熱量を体積比熱とすれば、チタンの体積比熱は銅やステンレス鋼、銅のおよそ 6 割であり、アルミニウムより小さい。これは同じ寸法の場合、少量の熱量で加熱または冷却するので、熱しや

すく冷めやすい。

(6) チタンの電気抵抗は大きく、電気伝導率は低い純チタンの電気抵抗は純金属の中では高く、合金化のより更に大きくなる。銅の 33 倍、アルミニウムの 20 倍、鉄の 6 倍であるが、ステンレス鋼より少し小さい。電気伝導率は電気抵抗と逆の関係にある。

(7) チタンはたわみやすく、スプリングバックが大きい純チタンのヤング率はステンレス鋼や鋼の約半分であり、弾性範囲内でたわみやすいといえる。すなわち、同じ応力で変形量は約 2 倍である。チタン材料はまた耐力と引張り強さの比 YS/TS が高く、弾性範囲が大きくなるのでスプリングバック量も大きくなる。

(8) チタンは磁石につかない、非磁性である。純チタンは完全な非磁性体にちかい非磁性を有する。ステンレス鋼、アルミニウム、銅も非磁性であるが、チタンは透磁率は 1.0 に限りなくちかく、完全非磁性体にもっともちかい。

(9) チタンは耐食性に優れている

- ・ チタンは本来の化学的性質は活性であるので、環境とすぐに反応しやすいが、そのような多種多様な環境で極めて安定した不働態被膜で保護され、優れた耐食性を示す。不働態被膜は酸化チタン TiO₂の極薄い緻密な被膜であり、機械的に除去しても環境下の酸素と反応してすぐに生成する。
- ・ 一般的に酸素を与えるような環境、硝酸などの環境下では特に優れた耐食性を示す。一方、酸素を奪うような環境、塩酸・硫酸のような環境下では耐食性を示さない場合があるので注意が必要である。

- ・ 自然界にある中性の海水、天然水などに対して沸騰温度まで完全耐食性である。流動海水中において、10m/秒の高流速下でもエロージョンを起こしにくく、完全耐食である。
- ・ 酸化性の塩化物水溶液では優れた耐食性を示す。
- ・ 冷間加工材や溶接部もほぼ同様の耐食性を示し、不純物の影響もほとんどない。
- ・ 水素ガス雰囲気下では、水素吸収の恐れがあり、吸収すると水素化物を生成して脆化するので注意を要する。
- ・ 異種金属と接触すると、チタンの電位は白金に近く貴であるので、チタンより電位が卑な相手金属である普通鋼などの腐食が加速されるので注意を要する。

3. チタン材料の種類

チタン材料は大別して2種類あり、それらは純チタンとチタン合金である。同じチタン材料でも強度面や加工

面から大きく異なり、純チタンは軟らかく加工しやすいが、チタン合金は硬くて加工しにくく、異なる材料のようである。さらに、チタン合金の種類は、その結晶構造によりα合金、α-β合金、β合金に大別される。

Table 2 に純チタンとチタン合金の種類を示す。

(1) 純チタン

工業用純チタン材料は、強度レベルにより4種類に分類されており、不純物量特に酸素含有量で調整されている。Table 2 に示す JIS1 種から4種の化学成分の範囲は広いが、実際の材料についておおよそいえば、1種は酸素含有量が約0.06%、2種が0.1%、3種が0.2%、4種が0.3%である。

純チタン材料はα相だけの単相組織であるので、強度と延性の引張り性質は、不純物量と結晶粒度で決る。α相は稠密六方晶であり、集合組織により影響を受けることも考えられるが、実際は製造工程が同じになるのであれば同じ集合組織になることもあり、その影響は前述の2因子と比較して小さい。

Table 2 Commercially Pure Titanium and Titanium Alloy

区 分	種 類	記 号	化学成分(%)					熱処理	引張強度 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	伸 び (%)	特 徴
			N	C	H	Fe	O					
純チタン	JIS H 4600 1種 (ASTM Gr 1相当)	TP 270 H (TP 270 C)	0.03≦	0.08≦	0.013≦	0.20≦	0.15≦	焼きなまし	270~410	165≦	27≦	成形加工性良好
	JIS H 4600 2種 (ASTM Gr 2相当)	TP 340 H (TP 340 C)	0.03≦	0.08≦	0.013≦	0.25≦	0.20≦	焼きなまし	340~510	215≦	23≦	代表的なチタン材料
	JIS H 4600 3種 (ASTM Gr 3相当)	TP 480 H (TP 480 C)	0.05≦	0.08≦	0.013≦	0.30≦	0.30≦	焼きなまし	480~620	345≦	18≦	中強度のチタン材料
	JIS H 4600 4種 (ASTM Gr 4相当)	TP 550 H (TP 550 C)	0.05≦	0.08≦	0.013≦	0.50≦	0.40≦	焼きなまし	550~750	485≦	15≦	最高強度純チタン材
	JIS H 4600 12種 (ASTM Gr 7相当)	TP 340 Pd H (TP 340 Pd C)	0.03≦	0.08≦	0.013≦	0.25≦	0.20≦	焼きなまし	340~510	215≦	23≦	耐腐蝕耐食性耐食合金
α合金	Ti-5Al-2.5Sn (ASTM Gr 6相当)	(5-25)	Ti-5Al-2.5Sn					焼きなまし	828≦	795≦	10≦	低温塑性、溶接性
α-β合金	JIS H 4600 60種 (ASTM Gr 5相当)	TAP 6400 H (6-4)	Ti-6Al-4V					焼きなまし	895≦	825≦	10≦	代表的なチタン合金
	JIS H 4600 61種 (ASTM Gr 9相当)	TAP 3250 H (TAP 3250 C) (Half Alloy)	Ti-3Al-2.5V					焼きなまし	620≦	485≦	15≦	冷間加工性
β合金	JIS H 4600 80種	TAP8000H (TAP 8000 C)	Ti-22V-4Al					溶体化処理	640~900	850≦	10≦	冷間加工性大、時効硬化性大
	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	(15-3)	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al					溶体化処理	745~945	690~835	12≦	冷間加工性大、時効硬化性大

記号の説明 (JIS 4600)

TP 270 H	Titanium Plate (引張強度下限) Hot rolled
TP 270 C	Titanium Plate (引張強度下限) Cold rolled
TP 340 Pd H	Titanium Plate (引張強度下限) Pd添加 Hot rolled
TAP 6400 H	Titanium Alloy Plate (整理番号) Hot rolled

純チタン 1 種はもっとも軟らかい材料で、成形性など加工性が必要な用途に使用される。プレート式熱交換器など優れた成形性が要求される用途には、酸素含有量が 0.05% 以下のような高い純度のチタン板が使用されている。

純チタン 2 種がもっとも汎用的に使用されており、純チタン材料の 70% 以上がこの材料である。原材料のスポンジチタンとスクラップがもっとも製造しやすいこと、強度と冷間加工性の組合せが良いことから、通常の純チタン用途は 2 種を使用する。

さらに強度が必要な場合、純チタン 3 種と 4 種を使用する。特に、航空宇宙用途に使用する場合が多い。このように強度が高くなると、冷間加工性が悪くなり、加熱して成形など加工する場合がある。

(2) 耐食チタン合金

純チタン材料の耐食性を改善した耐食性のチタン合金が使用されている。これは、弱点である非酸化性環境での耐食性を改善したもので、少量の合金元素を添加している。Ti-0.15%Pd 合金 (JIS12 種) がもっとも一般的で、そのほかに Ru、Co、Ni、Mo などを少量加えた耐食合金が開発され、一部、使用されている。これらの耐食合金は、純チタン材料とほとんど同じ機械的性質を有しており、工業的には純チタンに分類される。

(3) α チタン合金

結晶構造が α 単相の合金で、Ti-5Al-2.5Sn 合金がある。α 相を Al と Sn で固溶強化した合金で、低温度環境における強度・靱性に優れているが、鍛造など高温での加工性に難があり、製造するのが難しい合金である。

(4) α-β チタン合金

航空宇宙用途をはじめチタン合金の中で主として使用されているのが α-β チタン合金であり、その中でも Ti-6Al-4V 合金がチタン合金全体の 7 割以上使用されている。チタン合金の中では、強度・延性・靱性などあらゆる機械的性質のバランスが取れたよい性質を有し、製造上も鍛造品、板、棒、線材など製造上も確立されており、まさに万能合金である。

Ti-6Al-4V 合金のおよそ半分の合金元素を含有した Ti-3Al-2.5V 合金はハーフ 6-4 と呼ばれ、純チタン材料との中間の強度・延性を所有している。

そのほかに、500~600℃ 近い温度まで使用可能な耐熱チタン合金が、航空機エンジンに使用されているが、これらはクリープ性質が良くするため Al、Sn、Zr などで強化した α 相に、10% 以下の少ない β 相の共存した組織で、α 相リッチの合金であることからニア α 合金と呼ばれている。Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金がその代表である。

そのほかに、β 相の割合を増加すると熱処理性をもつようになり、高強度が得られるので多くの α-β 合金が開発され、特に航空宇宙用途に使用されている。

(5) β チタン合金

チタンの高温相である β 相を、Mo、V など β 相を安定化する合金元素を 10% 以上の多量添加して常温まで持ち来し、純安定ではあるが β 単相にした合金である。β 相は体心立方晶であり、高低音の加工性がよい。もっともよく使用されている Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al は冷間圧延で箔まで加工できる。また、β チタン合金は、純安定の β 相を時効硬化して高強度にすることができ、1500N/mm² レベルにすることができる。

(単位：千トン)

Table 3 Potential Estimated Reserves of Titanium Ore and Production

	チタン鉱石埋蔵量					チタン鉱石生産量				
	ル対ル		ルル		TiO ₂ 換算計	ル対ル		ルル		TiO ₂ 換算計
		TiO ₂ 換算		TiO ₂ 換算			TiO ₂ 換算		TiO ₂ 換算	
米 国	59,000	29,500	1,800	1,710	31,210	300	150	0	0	150
豪 州	130,000	65,000	32,000	30,400	95,400	1,100	550	220	209	759
カナダ	36,000	18,000	0	0	18,000	950	475	0	0	475
インド	38,000	19,000	7,700	7,315	26,315	250	125	15	14	139
ノルウェー	40,000	20,000	0	0	20,000	350	175	0	0	175
南 ア	63,000	31,500	8,300	7,885	39,385	950	475	105	100	575
ウクライナ	13,000	6,500	2,500	2,375	8,875	250	125	56	53	178
その他	84,000	42,000	17,000	16,150	58,150	390	195	4	4	199
合 計	463,000	231,500	69,300	65,835	297,335	4,540	2,270	400	380	2,650

4. チタンの原料と鉱石

チタンはクラーク数で9番目に多い元素で、金属の中ではAl、Fe、Mgに次ぐ4番目の位置を占めている。チタンは地殻中に酸化チタン TiO_2 の形で存在しているが、鉱石としては天然ルチル、イルメナイトなどがあり、前者は TiO_2 含有量が90%以上あるが、後者は酸化チタンと酸化鉄が半分半分である。チタン埋蔵量は酸化チタン換算で約3億トンと推定されている。チタン鉱石の埋蔵量をTable 3に示す。

金属チタン用に使用しているのはほとんどがイルメナイト鉱石であり、 TiO_2 の含有量が50%前後から約95%にアップグレードして使用する。酸化チタンを約95%まで濃縮したものを人工ルチルと呼ぶ。日本のスポンジチタンメーカーは、人工ルチルをインド、オーストラリア、カナダ、南アフリカなどから輸入している。

一方、高純度の酸化チタンは白い粉であり、その用途は主として塗料である。金属チタン用に使用しているのは、酸化チタン生産量のわずかに5~10%である。このことから、金属チタンの需要が増大しても、原料の酸化チタンは豊富にあることが理解できる。

5. 金属チタンの製造法

原料の酸化チタンは、チタン元素Tiと酸素元素Oの結びつきが強固のために、工業的に直接、酸素を除去することはできない。酸化チタンを一旦塩化して四塩化チタン TiCl_4 にして、それをMgで還元して金属チタンをつくる。その金属チタンはスポンジ状であるため、金属

チタンのことをスポンジチタンと呼ぶ。スポンジチタンの製造工程をFig. 1に示す。

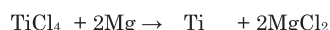
現在、スポンジチタンの製造はMg還元を利用するクロル法だけが、世界で工業的に利用されている。その製造方法はTable 3に示すように以下の工程で行われる。

(1) チタン鉱石(人工ルチル、天然ルチル鉱石)とコークスを塩化流動炉の上部から装入し、下部から塩素を吹き込んで反応させる。塩化炉内で次の反応が起きて四塩化チタンを得る。



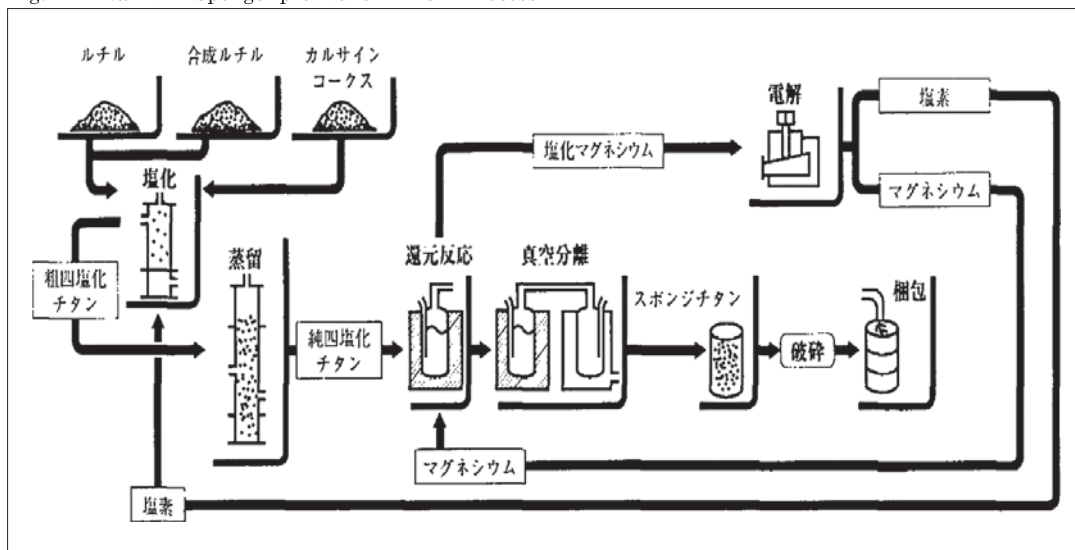
(2) 四塩化チタンを冷却して液体とし粗四塩化チタンを得る。それを蒸留塔にて精製し、99.99%以上の純四塩化チタン TiCl_4 を得る。ここで、純度のよい四塩化チタンを得ることが、品質の高い不純分の少ないスポンジチタンを得るポイントである。

(3) ステンレス製の還元炉の中に前もって溶解したMgを装入して上部から四塩化チタンを滴下すると、次に示す還元反応が起きてスポンジチタンが生成する。



この反応は発熱反応であり、800~1000℃の温度に調節しながら、四塩化チタンを滴下する。反応温度が上がりすぎると、炉壁からの汚染によりスポンジチタンの品質が劣化することや炉寿命短縮に結びつくので、反応温度の調節は重要である。

Fig. 1 Titanium Sponge production Kroll Process

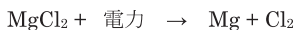


還元反応により生成した塩化マグネシウム $MgCl_2$ は、反応中に炉内から抽出して再利用する。還元炉内には、金属チタンのかたまりと未反応の Mg 、および残留した塩化マグネシウムがのこる。

(4) 還元反応により生成した金属チタンを約 1000 \square 真空中で加熱して、残留した未反応の Mg と $MgCl_2$ を除去する。これを真空分離と呼ぶ。炉内にはスポンジ状の金属チタンの塊が残る。この塊は還元炉容器の大きさで決まり、大きいものは 10 トン以上である。一般に大きいものほど不純物が少なく、スポンジチタンの品質がよい。

(5) スポンジチタンの塊は、通常、破碎されて約 12mm 前後のサイズにして混合し、均質にした上で Ar ガス雰囲気下のドラム缶につめ、溶解の原料にする。スポンジチタンに少し残留する塩化マグネシウムは吸湿性であるので、不活性ガス雰囲気中で保管することは重要である。

(6) 還元反応で生成した塩化マグネシウムは溶融塩電解により塩素とマグネシウムに分離し、塩素は原料の酸化チタンの塩化に、マグネシウムは四塩化チタンの還元反応に再利用する。



(7) クロル法は、還元反応と真空分離工程がバッチ工程で連続化できないため、生産能力が低くコスト高の原因の一つになっている。アルミニウムの電解精錬法のような酸化チタンの直接還元法など革新的な新しい精錬法の工業化が今後の課題である。

6. チタン展伸材の製造

チタンは普通鋼・ステンレス鋼やアルミニウムと同様に、板、溶接管、丸棒、型材、線材、継目無管、鍛造品、鋳造品等さまざまな形状と寸法の製品を製造することができる。

(1) スポンジチタンを真空または Ar ガス雰囲気中で溶解して鋳塊にするが、通常は消耗電極式真空アーク溶解法 VAR (Vacuum Arc Remelting) で溶解する。この方法はスポンジチタンをプレスで固めてブリケットを作り、これを溶接して電極棒とし、真空中で水冷銅坩堝の中でチタン電極棒に多大の電流を流してアーク溶解しチタン鋳塊を製造する方法である。溶湯保持に限界があり均質化のため、通常、2 回溶解する。円柱状鋳塊で大きいものは 15 トンの鋳塊が製造できる。

近年は電子ビーム溶解法 (EB)、プラズマアーク溶解法 (PAM) が盛んに使用されるようになってきた。これらの溶解法は、熱源が VAR のようにチタン電極でないので、溶解原料の形状が規定されないことや鋳塊が円断面だけでなくスラブ型鋳塊などが製造できる利点がある。

特に、スクラップ溶解が容易になることとスラブ鋳塊の利点を活かして、特に板製品の多い純チタン材料に今後多く利用が期待される。

鋳塊の組成は使用する原料により決まり、チタンの溶解は均質化と成形化のためだけである。

(2) 鋳塊以降は、チタン専用設備がある場合を除いて、主として鉄鋼設備を利用してチタン展伸材を製造する。ステンレス鋼とほとんど同じように製造できるが、チタン材料加工の特徴を以下に述べる。

純チタンの熱間変形は高温変形抵抗が普通鋼なみで熱間加工性がよいことから容易であり、冷間加工も 90%以上の冷延率が可能であり条件を適切にすればあらゆる形状の製品が製造可能である。一方、チタン合金の場合は、高温変形抵抗が大きく、また、割れやすいので純チタンと比較して非常に加工が難しい。チタン合金鍛造品の場合、組織制御の面から加熱温度範囲に制限があり、 B 変態点以下の温度で加熱する必要がある、温度が低くなると割れやすいので特に注意が必要である。

チタン材料の加熱は大気中で可能であるが、水素吸収を防止するため、酸化性雰囲気で行う必要がある。燃焼炉の場合、雰囲気中に過剰な酸素が存在するように燃焼に必要な量より少し大目の空気を供給する。

鉄鋼用の加熱炉を使用する場合、鉄の酸化スケールを除去して加熱することが望ましい。加熱したチタン材料の取り扱い時にチタンの酸化被膜が除去され、チタンが鉄スケールと高温で接するとテルミット反応が起き、瞬時に爆発的に燃焼することがあるので注意を要する。

7. チタン産業の現状

(1) スポンジチタンの生産

2008 年のスポンジチタン生産能力は約 22 万 5 千トンであり、生産量は 17 万 6 千トンであった。これは、航空機や電力・化学など一般産業用途需要の急増加によるブームの結果であり、2003 年の世界生産量は 69,400 トンであった。実に 5 年間で 2.5 倍の増加であった。

Table 4 Titanium sponge Capacity and Production in 2008

Country	Capacity (ton)	Production(ton)
Japan	46,400	40,900
USA	35,100	17,300
CIS	72,000	68,300
China	71,000	49,600
World	224,500	176,100

Table 5 Titanium Shipment in Japan

		2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年*1	
国	既 存	電力・造水	488	805	886	601	806	891	584	1,020	431	1,500
		化学・電解・PHE	1,641	2,043	2,199	2,006	2,910	3,323	3,509	4,038	4,605	3,200
		建築・土木	113	72	43	166	36	26	98	263	680	1,500
		販売業者	1,279	1,325	1,135	1,257	1,733	2,011	1,475	1,767	1,289	3,600
		民生品・スポーツ	1,287	1,352	1,335	1,045	971	1,088	1,130	1,099	921	3,000
		航空機	254	554	447	491	409	603	592	500	397	200
		小 計	5,062	6,151	6,045	5,566	6,865	7,942	7,388	8,687	8,323	13,000
	新 規	自動車	473	499	571	767	1,098	1,382	1,503	1,408	1,285	700
		船舶・海洋・エネルギー	24	154	194	149	145	280	193	231	113	1,700
		環境関連	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800
		医療・福祉機器	18	17	30	33	37	47	62	51	52	1,000
		その他	472	487	416	297	428	435	431	607	391	800
		小 計	987	1,157	1,211	1,246	1,708	2,144	2,189	2,297	1,841	5,000
	国 内 計		6,049	7,308	7,256	6,812	8,573	10,086	9,577	10,984	10,164	18,000
	輸 出 計 (輸出比率)		5,897 49.4%	7,127 49.4%	7,225 49.9%	7,026 50.8%	8,814 50.7%	8,061 44.4%	7,740 44.7%	8,103 42.5%	9,563 48.5%	12,000 40.0%
	総 合 計		11,946	14,435	14,481	13,838	17,387	18,147	17,317	19,087	19,727	30,000

*1 1999年での予想値

日本では、大阪チタニウムテクノロジーズと東邦チタニウムの 2 社でスポンジチタンを生産しており、2003 年では 18,923 トンであったが、2008 年では 40,946 トンと急増した。日本のスポンジチタン生産技術は世界の中でももっとも優れており、世界の航空宇宙分野の最重要部品には日本のスポンジチタンが使用されている。

(2) チタン展伸材の生産

板・棒などチタン展伸材の生産は、2003 年では世界で約 5 万 8 千トンであったが、2008 年では約 12 万トンまで増加した。生産国は、米国が 27%、ロシアが 24%、中国が 22%、日本が 17%、欧州が 10%である。

日本のチタン展伸材は、純チタンが 90%以上である。2007 年の生産量 19,087 トンを形状別にみると、熱冷延板が 41%、条および溶接管が 45%、棒・線・鍛造品などその他が 14%であり、圧倒的に板およびその製品が多い。これは、鉄鋼の熱間連続圧延機で製造した純チタンストリップ製造技術が世界的に優れており、その純チタン製品が多いためである。

(3) チタンの用途

チタン材料の用途は世界的にみれば約 45%が航空宇宙分野で、約 55%が化学・電力など一般産業分野である。欧米では伝統的に航空宇宙分野が多いが、日本では 10%以下である。Table 5 に日本におけるチタン展伸材の用

途別出荷量を示す。

チタン展伸材の輸出量は 45~50%である。日本の最大の用途は、国内・輸出ともに電力及び電解、プレート熱交を含む化学プラント分野が中心で全体の約 60%になる。今後は、自動車、海関係用途、環境関連、医療など新規需要を増大することが重要となる。

8. 結 言

チタンが工業的に使用されるようになってから 60 年が過ぎた。今までチタン材料が使用されてきた分野は、航空宇宙分野をはじめチタン材料が高価であってもチタン材料でなくてはならない用途がほとんどであった。しかし、チタンの埋蔵量は金属元素で 4 番目に多く豊富であり、チタン材料の特性は生まれながらに良いので、今までの特殊な用途でなく、もっと多くの一般用途に使用されるべきである。それには、特殊な高価な材料のイメージを破り、安価にいつでもどこでも供給できることが必要である。20 世紀に産業の発展と共に大きく発展した鉄鋼、アルミニウム、ステンレス鋼、プラスチックに続き、21 世に汎用材料として唯一期待できるのはチタン材料である。これを一刻も早く実現するのがチタンに携る者の使命であると考えている。