玉野製錬所自電炉におけるエネルギー回収と 代替燃料技術の確立*

柴田 隆 顕¹

〔UDC 669.33:662.994:620.97〕

Energy Recovery and Substitute Fuel Technology in the Flash Smelting Furnace with Electrodes (FSFE) at Tamano Smelter

by Takaaki SHIBATA¹

1. Director, General Manager, Tamano Smelter, HIBI KYODO SMELTING CO., LTD.,
6-1-1, Hibi, Tamano, Okayama 706

The Tamano Smelter is a large scale coastal facility which started operations in 1972 employing the FSFE process. The FSFE is a Outokumpu type flash smelting furnace to which electrodes have been added to the settler and the up-take is equipped with a water-cooled jacket. With respect to hearth maintenance and the elimination of boiler trouble, this type is superior to the conventional type flash smelting furnace.

In the initial start-up, the Tamano Smelter was producing 101,000 tons of anodes a year, and through the introduction of a two step oxygen enrichment, process production has been increased to the present 196,000 tons per year. During this period the two so called oil shocks of 1973 and 1979 resulted in a dramatic rise in energy cost. To cope with this an energy saving program was instituted to reduce production costs.

This paper focuses on the energy savings associated with the flash smelting furnace. First, the water-cooled up-take was replaced by a boiler from which waste heat could be recovered, and secondly, the fuel was changed from heavy oil to coke. In addition, the fuel change resulted in an auxiliary benefit. Through the development of a FSFE operational technology called carbon monoxide concentration control, the special qualities of coke could be utilized and the charging of the electrodes in the settler was eliminated.

KEY WORDS: Tamano Smelter, FSFE, Substitute Fuel Technology, Energy Recovery

1. 緒 言

玉野製錬所は、昭和47年に操業を開始した自電炉法および高電流密度電解法を特徴とした大型臨海共同製錬所である。昭和59年に第2次増産工事が完成し電気銅137,000 t/年、粗銅196,000 t/年の体制が確立した。

当所では、操業当初より熔錬炉としてOutokumpuタイプ自溶炉のセトラに電気炉を備え、水冷ジャケット式アップテークを用いた「自電炉」を採用した。本方式は一般の自溶炉方式と比べコスト、炉床維持、ボイラでのダストトラブル防止の面で優れており、当所では操業開始以来、これらの特徴を活かしながら順調な操業を行ってきた。

しかしながら、昭和48年の第1次オイルショック、昭和54年の第2次オイルショックにより、重油、電力価格が高騰し、受託製錬所としての競争力を維持するため、省エネルギーによるコスト削減が重要な課題となった。

自電炉における省エネルギー技術を開発する中で、水冷ジャケット式アップテークのボイラ化による廃熱の回収とともに重油か

ら石炭、石炭からコークスへの燃料転換を進め、これら炭材の特徴を活かした自電炉操業技術を開発し、最終的には当初設置した電気炉を使用せずに操業できる技術を確立した。

以下、これら技術開発の経緯ならびに効果について説明する。

2. 工 程 概 要

玉野製錬所の工程フローシートを図1に示す。

各種銅精鉱はベッディング方式で調合し、気流乾燥を通った後に自電炉へ装入される。自電炉では精鉱（銅品位 約29%）の溶解と、鉄、硫黄の酸化が行われ、銅品位約60%のマットに濃縮される。マットは転炉、精製炉を経て銅品位約99%まで濃縮された後にアノードとして鋳込まれる。

自電炉、転炉から排出される高濃度のSO₂ガスは硫酸工場で硫酸として回収され、その他の希薄なSO₂ガスは排脱工場で石膏として回収される。

熔錬工場で生産されたアノードは電錬工場で精製され、99.99%の電気銅となる。また、金銀スライム等が副産物として産出される。

3. 自電炉の採用とその特徴

3・1 自電炉の採用経緯

玉野製錬所の基本設計に際して、乾式製錬の中心である熔錬炉

* 平成2年(1990年)3月29日、本会総会にて第64回渡辺賞を受賞された。

1. 正会員 日比共同製錬(株)専務取締役、玉野製錬所所長
キーワード: 玉野製錬所, 自電炉, 燃料転換技術, エネルギー回収

図1 玉野製錬所フローシート

の選択については、硫黄回収ならびに公害防止の有利性、燃料の経済性、操業コントロールの容易さ、労働生産性の高いこと等を考慮し自熔炉を採用することとした¹⁾。

しかし当時自熔炉方式にも、

① ダストを伴った高温排ガスのため、廃熱ボイラにおいてダストトラブルが起り、操業度が低下する。

② 産出スラグは銅品位が高く錬鋳炉等による後処理を要する。などの問題点が残されていた。

一方、当時古河鋳業足尾製錬所では、テスト用として自熔炉セ
ットラ部に電極を設置した方式の小型試験炉（自電炉）が稼動し
ていた。

この試験炉の設備および操業データよりこの方式は、

① 水冷ジャケット方式によるアップテークにより、廃熱ボイラのダストトラブルを大幅に減少させる可能性がある。

② 電極をセトラ内に設置することにより、水冷ジャケット式アップテークより落下するダストのセトラ内での溶解とともに、スラグの錬鰐が同時に行え、そのため設備がコンパクトになるとともに、自熔炉（および錬鰐炉）でのエネルギーコストが削減できる。

等の大きな利点があると判断された。

小型試験炉から、一挙に大型のコマーシャル炉へ拡大するに当たっては、大型設備の設計、建設、および炉の実操業面で種々の

リスクが伴うことも懸念されたが、本方式の利点が大いことにより新しい玉野製錬所の熔錬方式として、本自電炉方式の採用に踏み切った。

図2に玉野自電炉概略図を示す。

3・2 水冷ジャケット式アップテーク

(1) 採用理由 通常の自熔炉排ガスは、レンガ積みのアップテークを通して付属の廃熱ボイラに導入されるが、ダストによるアップテークの閉塞を避けるためにアップテーク内部を高温に保持し付着ダストを溶融させる。このため廃熱ボイラに入る排ガスは溶融ダストを含むことになり、これがボイラ管壁に付着成長して伝熱を悪化させ、ボイラ出口排ガス温度を上昇させたり通気抵抗を増大させたりする。また、場合によってはダストの大塊がホッパ部に落下し設備を損傷するケースもある。

このようなボイラトラブルを解決するには、

- ① ボイラ入口ガス温度を低下させること。
- ② ボイラ内のガスフローを適正にすること。
- ③ ボイラ内管壁構造をダストが落ち易いものにすること。

などの対策が必要となる。

その中でも①が最重要課題であり、その対策として、従来法とは根本的に異なる水冷ジャケット式のアップテークを採用することとした。炉の排ガス温度を、アップテーク部で約200℃下げて1,100℃程度にしてボイラへ導入することによって、ボイラ放射

図2 自電炉概略図

部でのダストトラブルを解消することを狙ったものである。

(2) 構造 水冷ジャケット式アップテーク表面には炉排ガス中の熔融ダストが集中的に付着することが想定されるため、その基本構造は垂直円筒型とし、表面が平滑で、ダストが剝離し易い構造のものとした。

実際製作面から、一体にするか分割にするか、分割の場合はどのように分割するかを検討し、製作面と現場組立面との関係を加味し、高さ方向で7分割、全体では22ブロックに分割する構造とした。

(3) 材質 材質の決定に当たっては、硫黄酸化物を含むガスの腐蝕に強いこと、熱疲労に耐えることの相反する2点について検討したが、当初耐腐蝕性に重点をおき、肉厚鋳鋼を採用した。

ところが実操業の結果、クラック発生等の問題が生じたので検討の結果鋳鋼の限界を知り、並行して試験を進めていた比較的薄肉のボイラ鋼板の結果が良好であったので、操業開始2年後これに変更した。

(4) アップテークの冷却 本アップテークは炉の排ガス温度を低下させるとともに、水冷ジャケット表面温度を百数十度に維持することによって付着熔融ダストがジャケット表面で急冷され、収縮によってジャケット表面から剝離し易い状態になることを狙ったものである。

一方、表面温度が低下しすぎると硫酸化物による腐蝕が心配された。

これらを解決するために、冷却水は一部繰返して冷却水温度をコントロールできるようにした。

(5) ダストの除去 アップテークの機能を十分に発揮させるため、表面に付着する大量のダスト除去を目的にスートブロワ（ショート23本、ロング2本）を設置した。当初はその配置に問題があり必ずしも満足すべき結果は得られなかったが、その後の検討によりスートブロワを下部に重点的に配置するよう改善して以来、ダスト除去は順調に自動的に行われるようになった。

3.3 セトラへの電極の設置

水冷ジャケット式アップテークを採用すれば、自熔炉のセトラ部はアップテークからのバッククーリングと落下固体ダストにより冷却されることになる。この対策として排ガス量、熱効率等を考慮して電極による抵抗加熱を行うこととし、併せて従来方式の錬鋳炉部分を自熔炉内に取り込んで溶湯加熱と錬鋳を行わせることとした。

抵抗加熱を行う場合には、スラグ層の厚さを通常の自熔炉より大きく保つので、スラグの滞留時間増による錬鋳効果が得られる。さらに電極周辺にはフラックスおよび固形物を装入可能な装置を設けることとした。

電極の配置はその2本を極力アップテークに近づけるように配慮した。

3.4 自電炉法の得失

自電炉の採用により、プラス面としては、錬鋳炉とその排ガス処理設備が不要のため、

① 建設費が少ない。

② 重油原単位が低く、操業人員が少なく、ランニングコストが小さい。

また、電極をセトラへ設置しているため、

③ 工程中間品処理が可能。

④ 炉内の溶体温度コントロールがやり易い。

など有利な点が多い。

またマイナス面としては、

① アップテーク部の排水温度が50～60℃であるため、この廃熱の回収が難しい。

② 電極が高温のガスに暴露されることによるペースト原単位の増加、電力原単位が錬鋳炉より高くなる。

などがある。

3.5 スタート時の操業状況

操業開始以来、ボイラにおける大きなダストトラブルはなく、また、炉操業面でも初期トラブルを除き、極めて順調に推移した。

自電炉の設備仕様を表1に、操業当初の操業データを表2に示す。

煙灰発生率は通常の自熔炉の8～10%に対し、自電炉の場合は

表1 自電炉設備仕様

名 称	基 数	構 成
乾燥鋳ビン	1基	貯鋳能力 200 t
コンベヤ	2基	能力 80 t/h
精鋳バーナ	4本	—
シャフト部	一式	内径 6mφ×8mH 冷却銅板5段
セトラ部	一式	内径 19.75mL×7mW マットホール6個 スラグホール2個 重油バーナー：正面2本、天井6本
電 気 炉	一式	電極 0.8mφ×3本 自焼性電極 トランス容量 3,750kVA
アップテーク	一式	内径 2.5mφ×9.4mH 水冷ジャケット
熱 風 炉		蒸気加熱式 能力 60,000Nm ³ /h×450℃

表2 操業当初の自電炉操業データ

熔錬工場生産量			
粗鋼	t/y	101,000	
硫酸	t/y	265,000	
装入			
鋳石装入量	t/h	43	
銅品位	%	25	
煙灰発生率	%	5～7	
燃料			
重油	シャフト	L/h	1,500～2,000
	セトラ	L/h	400～500
送風空気酸素濃度	%	21	
産出物			
マット量	t/d	500	
マット品位	%	50～52	
スラグ量	t/d	450	
スラグ中銅品位	%	0.52～0.65	
Fe/SiO ₂	—	1.0	
セトラ電極			
電力使用量	MWh/m	1,500～1,700	
	(kW)	2,100～2,400	
ペースト使用量	t/m	25～30	

5～7%におさまっている。これはアップテークにおける付着ダストが高温のまま直接炉内に落下するため、ボイラ等で冷却されて繰返されるダストが少なくなったものと考えられる。

また、スラグホールはセツトラ後面に2箇所あるが、アップテークより遠い箇所のものを常用している。スラグのFe/SiO₂は1.0程度に調節しており、スラグロスについては、電気炉による鍊鋳も順調に行われ妥当な数値で推移した。また、当時は重油専焼であり、酸素富化を行っておらず、マット品位は50～52%となっている。

4. 自電炉操業改善の経緯

玉野製鍊所は操業開始以来、外的環境変化へ対応して、受託製鍊所としての競争力の強化のために、種々の改善を実施してきた。その中から、ここでは特に自電炉について改善の経緯を示す。

昭和47年 1月	操業開始 重油専焼
昭和54年12月	重油、粉コークス混焼操業実施
昭和56年 4月	第1期酸素富化（マット品位58%） 微粉炭、粉コークス、重油混焼操業実施
昭和57年 4月	アップテーク上部ボイラ化実施
昭和58年12月	CO濃度コントロール開始 粉コークス、重油混焼操業
昭和59年 4月	第2期酸素富化（マット品位60%） 電気炉電力削減開始
昭和60年 9月	電気炉単相使用開始
昭和61年 4月	アップテーク下部給水予熱実施
昭和62年12月	電気炉使用停止

この中から特に改善効果の大きいアップテークボイラ化と、燃料転換、CO濃度コントロールについて説明する。

5. アップテークのボイラ化

5.1 ボイラ化の検討

水冷ジャケット式のアップテークの所期の目的であった排ガスの冷却によるボイラトラブル防止については、操業開始以来その目的を達しており、特に昭和56年の微粉炭混焼以後も順調な操業を続け、その効果は顕著であった。一方、オイルショックを契機にして、銅熔鍊プロセスについても一連の省エネルギーが検討され、対策が進められてきたが、その中で建設以来、自電炉法でのマイナス部分である水冷ジャケット式アップテーク冷却水の熱回収の検討を始めた²⁾。その後昭和56年に酸素プラントを設置して、自電炉に対して酸素富化操業を始めて以来、排ガス量の減少に伴い自電炉の蒸気発生量が減少し、発電量が低下してきたため、このジャケット冷却水の廃熱を蒸気として回収することができれば、廃熱回収と発電設備のフル活用が同時にできる状況になった。

ボイラ化するに当たり、最も懸念したのは次の2点であった。

① 熱負荷が非常に高いための疲労による材料の強度低下（蒸気洩れの発生）

② 水冷ジャケットからボイラチューブに変更した場合、伝熱面の表面温度の上昇（百数十度より約350℃に）により付着ダストの剥離性が低下し、アップテーク内でダストトラブルが発生する可能性がある。

この2点を確認するため、昭和54年にはボイラメーカーの協力を得て、ジャケットの一部をボイラチューブに変更して1年間の耐久テストを行った。

その結果、材質の変化、ダストの付着状況について水冷式ジャケットとほとんど差が見られなかったため、昭和57年に上部半分をボイラ化した。ボイラ内圧力については、低压では腐蝕の問題

があること、また運転操作の複雑化を避けるため、自電炉ボイラの系統と同じ仕様の蒸気圧力48 kg/cm²とし、給水、蒸気循環系統もボイラと同一系統とした。

また、心配されるダストの剥離性に対しては次の対策を取った。

① ダストが剥離しやすいようにオメガチューブを使用し、伝熱面を平滑構造にした。

② 円筒形アップテークの3方向に水冷ジャケット面を残し、この部分にマンホール、スートブロワを設置した。

③ ダスト除去のためにハンマリング装置を取り付けた。

また、この時ボイラチューブにしなかった下部については、最も熱負荷の高い場所であり、ダスト除去時の作業性の問題もあったので、ジャケットそのままとし、この部分の廃熱回収は今後の課題とした。

5.2 ボイラ化後の操業

昭和57年のアップテークのボイラ化後、現在8年目の操業に入っている。図3に自電炉ボイラの操業別の蒸発量の比較を示したが、従来の操業に比べ1時間当たり3～3.5tの蒸発量が増加していることがわかる。

腐蝕、摩耗等によるチューブの損傷については、定修時に肉厚検査をしており、これまで特に問題は起こっていない。

内部へのダストの付着状況は、上部のボイラ化部分はチューブの表面温度、下部のジャケット部は冷却水の排水温度をモニタして把握している。実操業では各部の温度変化をみながらスートブロワの運転を行っている。アップテーク内部にダストが付着すればこれらの温度は下がり、ダストが剥離すれば温度は上昇する。両部共ダストの剥離が順調に行われていれば、図4に示すように周期的に温度変化が起こる。この状況を見ながらスートブロワの運転パターンの採用、変更を行っている。

その後、ジャケットのまま残された下部についての熱回収の検討を進めたが、この部分については、投資利益率の関係から、ボ

図3 操業条件の変化による自電炉ボイラ蒸発量の変化

図4 アップテーク温度測定例

表3 ボイラ化の主な仕様

排ガス量	43,900 Nm ³ /h
アップテーク入口ガス温度	1,200 ℃
ボイラ伝熱面積	47 m ²
給水予熱面積	9 m ²
最高使用圧力	52 kg/cm ²
常用圧力	48 kg/cm ²
蒸気温度	263 ℃
給水温度	110 ℃
蒸気発生量	3.2 t/h
アップテークボイラ回収熱量	1,950 Mcal/h
給水予熱回収熱量	500 Mcal/h
アップテーク排熱量	4,400 Mcal/h
熱回収率	56 %

イラ化することを断念し、昭和61年よりボイラ循環水の給水予熱に利用することとした。その結果、熱回収伝熱面積は約9m²増加し、回収熱量は約500Mcal/h増加した。現状のアップテークでの廃熱回収の仕様を示すと表3のようになる。

6. 燃料転換について

6.1 概要

オイルショック以後、図5に示すように、重油価格が高騰したため、玉野製錬所においても重油から安価な燃料への転換を始めた³⁾。

図6に炭材への代替率の推移を示すが、まず昭和54年12月より重油専焼から粉コークスの混焼に切替えた。燃料使用量も多い時期であり、酸素富化前でシャフトでの酸素濃度も低いため代替率は30%程度であったが、セトラの天井バーナを停止し、スラグロスやアップテーク内部へのダスト付着状況にも改善の徴候が見られた。

昭和56年4月より、第1期酸素富化でマット品位を58%まで上げる作業を開始した。このとき、コークスよりさらに安価な石炭を粉砕して使用しはじめ、重油、粉コークス、微粉炭の混焼作業が昭和58年10月まで続いた。この間、シャフトの酸素濃度を28%まで上げたため、シャフト内での炭材の燃焼率も向上し、代替率は80%を超えるようになった⁴⁾。

炭材の使用量が増えるに従い、炉況が以前と異なる様相を呈してきたため、炉内の状況を把握する必要性が増してきた。解析すべき因子を検討したが、炉況に影響を及ぼしている主な要因は、セトラ上の未燃炭素であるという推定をして、CO濃度を測定することとし、昭和56年10月にシャフト出口にCO濃度計を設置し、炉内雰囲気測定をはじめた。

昭和58年10月以降は、微粉炭から粉コークスへ変更し石炭粉砕を停止した。微粉炭をやめ、炭材を全量コークスとした頃から、

炉内における還元効果が顕著になった。

この頃までに、すでにセトラ内のCO濃度の動きを把握しており、還元効果をコントロールすれば炉況を健全に保てることを確認していたので、昭和58年12月よりCO濃度コントロールを開始した。その結果、スラグロスは更に低減でき、セトラ内に設置している電気炉の電力も減少させることができた。

6.2 混焼作業結果

表4に混焼前後の操作データを示す。

52%のマット品位では炭材使用により、シャフト出口のガス温度がわずかに下がり、また、マット温度も低目で作業が可能となっている。加えて、マグネタイトが6.5%から4.8%へ低下したことおよび、酸素分圧が1桁低下したことにより還元が強まっていることがわかる。

この理由は、シャフト内で未反応の炭材がセトラスラグ上に残り、スラグを効果的に還元しながら加熱したためである。

酸素富化した後、マット品位が60%になってからは、マット温度を高くキープするためガス温度も上がっているが、混焼以前よりはやや低い温度でおさまっている。

酸素分圧、マグネタイトの挙動についても未燃炭素の還元効果がよく表れている。

炭素による還元効果の最も顕著な例としてスラグロスへの影響があるが、これはCO濃度コントロールの項で述べることとする。

アップテークにおけるダストの付着状況の変化を示すために、図7に冷却水の入出口温度差（以下 ΔT と呼ぶ）の変化を表した。ダストの付着が少なければ出口温度は高くなるので ΔT は大きくなり、良好な操業状態と言える。

この図より、混焼前に比べ混焼後は ΔT がはっきりと上がって

表4 炭材混焼前後の自電炉操作データ

		混焼後		
		混焼前		
マット品位	%	52	52	60
温度	℃			
シャフト出口ガス		1,270	1,220	1,250
マット		1,190	1,164	1,180
スラグ		1,254	1,253	1,260
アップテーク入口ガス		—	1,190	1,200
スラグ中Fe ₃ O ₄ 品位	%	6.5	4.8	5.4
P _{O2} (セトラ)	atm	2×10 ⁻⁹	4×10 ⁻¹⁰	2×10 ⁻¹⁰
P _{O2} (アップテーク)	atm	—	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰
電気炉投入電力	kWh	2,270	2,140	2,150
ベースト使用量	kg/d	900	840	870

図5 電力価格、重油価格の推移

図6 炭材への代替率の推移

図7 炭材混焼前後のアップテーク冷却水入出口温度差の推移

いるのがわかる。これは混焼後はセトラ内スラグ表面での燃焼熱でアップテーク最下部のダストを溶かすため、ダストの成長が防止でき、また、炉内の還元雰囲気でダストの性状が軟質化し除去しやすくなって、ストブローによりダスト除去が順調に行われていることを示している。

その他、不純物の分配にも変化が表れた。図8にPb, Zn, As, Sbのマット、スラグへの分配を示したが、いずれも混焼後はマット中への歩留が増えており、混焼における数少ない欠点と言える。

6.3 CO濃度コントロールと電気炉電力の削減

微粉炭、粉コークスの使用を開始して以後、約2年間にわたって自電炉セトラ内のCO濃度の測定を行いながら、炉内温度状況、スラグ組成および物質収支等を調査した。

これらの結果より、炉内CO濃度をコントロールすれば排出スラグ中の銅品位を低下させること、セトラ内の温度保持にも有効であることが判明したため、それ以後はCO濃度を自電炉操作の重要なコントロールポイントの1つとして取上げて操作を行うこととした⁵⁾。

(1) CO濃度測定結果とコントロール方法 CO濃度計は赤外線式とし、ガスはシャフト排ガスを代表する場所としてシャフ

図9 COガスプローブ取付図

図10 自電炉炉内CO濃度測定例

ト出口のセトラ湯面上約30 cmのところから吸引し、フィルタを通し冷却後CO濃度計におくる。

吸引管内のダスト除去のために、定期的にガス吸引を停止しエアージする方法をとった。図9にその設置場所を示す。

シャフト排ガスが、平衡値に達していると仮定して、当所の操作条件で排ガス中のCO濃度を計算してみると、0.5~0.8%程度となる。実際に測定してみると、通常0~0.1%程度で、操業条件によっては0.2~0.3%まで上昇することが見られた。

自電炉においては、マット温度およびマット品位をコントロールするために送風量、補助燃料を調整しているが、通常のバランス点から粉コークス量をわずかに多くしてやるとCO濃度が上昇し、そのコントロールも可能である。0.2~0.3%程度にコントロールした例を図10に示す。CO濃度コントロールとは、CO濃度をモニタし、それをフィードバックさせて炭材量を調整することにより最終的にマット温度、マット品位、CO濃度の3因子を同時にコントロールするものである。

(2) CO濃度コントロールの効果①<スラグ中銅品位の低下> CO濃度コントロールのスラグ中銅品位に及ぼす効果をスラグ組成Fe/SiO₂およびマット品位に対して示したのが図11である。CO濃度コントロールに

図8 マット、スラグ中微量元素の分配

図11 銅ロスに対するCO濃度コントロールの効果

図12 スラグの粘度とFe/SiO₂の関係

より、スラグ中銅品位が低下していることがはっきりわかる。

これらの結果より、実操業においては従来スラグ中のFe/SiO₂を1.0~1.1程度でコントロールしていたものを1.2以上にあげてスラグ量を減少させて操作を行っているが、スラグ中の銅品位は0.6%前後でおさまっている。

実際のスラグの粘性を調査した結果を図12に示す。この図は、CO濃度コントロールによるスラグ組成の変更と、マグネタイトの減少によりスラグ粘性が低下したことを示したものであるが、これもスラグ中銅品位低下の一因となっていると考えられる。

その他の効果としては、セトラ内のスラグ温度の水平分布も調査したが、セトラ全体にわたって、かなり温度が均一化されている傾向が見られた。

(3) CO濃度コントロールの効果②〈電気炉電力の削減〉

自電炉における燃料の代替率と電気炉電力の推移を図13に示す。

混焼を開始してから、シャフト部における重油と炭材の代替と並行して、セトラ部での保温用重油が減少し、昭和56年には自電炉での全セトラバーナを停止できた。電気炉電力については、昭和58年にCO濃度コントロールを開始してから急激に電力を減少させることができた。

図13 自電炉電気炉投入電力、炭材への代替率の推移

図14 セトラ内スラグ中の銅およびマグネタイトの変化

昭和60年下期以降は、従来3相3本の電極を使用していたのを電気炉単相使用に踏み切り、昭和62年下期にはついに完全停止を実現し、以後セトラ部は電気炉を停止したまま操作を行っている。

これまで自電炉にはセトラへの電極の設置により、鉍石組成の変動、シャフト内部での反応の不均一等によるスラグの流動性の悪化に対して即座に加熱による対応ができる強みがあったが、炭材使用開始後はCO濃度コントロールにより、この電気炉の機能を代替できる操作方法を確立することができた。

(4) セトラ内スラグ銅品位 電気炉使用時と、停止時でのセトラ内での錬鍍状況を調査してみた。セトラ内の数カ所でサンプリング(各箇所深さ方向に5個のサンプルを採取)した結果を図14に示す⁶⁾。

この図は、電気炉使用時(重油専焼時)と停止時(CO濃度コントロール後)での比較である。

電気炉使用時は、銅についてみると第1電極前のA点ではバツキはかなり大きく、それが第2電極後のB点ではかなり小さくなり、スラグホール前のC点ではほぼセトラリングが完了している事がわかる。また、マグネタイトは減少しているとは言えずバツキも大きい。

表5 スラグロスの形態分布推定

	重油専焼		CO濃度 コントロール
マット品位(%)	50	60	60
酸化態Cu(%)	0.19	0.28	0.19
硫化態Cu(%)	0.25	0.20	0.20
懸垂Cu(%)	0.14	0.18	0.14
合計Cu(%)	0.58	0.66	0.53

電気炉停止後については、銅はマット品位が高いためもあるのか、A～B点は平均的に高くなっているが、D点の排出スラグは健全な数値まで下がっていることがわかる。

マグネタイトの数値には還元効果が如実に表れている。A点では、はるかに高かったものが、B、C、D点と行くにつれて減少している。さらにバラツキについては、CO濃度コントロール後の方が小さく、シャフト内での反応そのものが以前より、より均一な雰囲気で行われていると言える。

このことから電気炉では、懸垂マットのセッティングには有効であるが、炉内雰囲気調整はできないため、マグネタイトのコントロールにはそれ程効果はない。しかし、炭材使用によるCO濃度コントロールでは、スラグ流動性の向上によるセッティングとともに雰囲気調整を行えるため、電気炉以上の機能をもっていると言え得る。

最後にスラグロスを熱力学、実験式、操業データ等から計算し、推定してみた。

計算結果および操業実績の銅品位を用いてCO濃度コントロール下における酸化態の銅品位を推定すると、表5のようになる⁷⁾。この表にみられるように、酸化態の銅の減少が全体のスラグロスに大きく寄与していることが推定される。

以上より、CO濃度コントロールのスラグロスへの効果を要約すると、次のようになる。

- ① スラグ中銅品位の低下は、電極による錬鋳より大きい。
- ② スラグ中のマグネタイトが減少したため、スラグ組成、すなわちFe/SiO₂を1.0より1.2程度に上げ、スラグ量を減少することができる。
- ③ スラグの錬鋳作用を行わせるのに必要なエネルギーコストが大幅に削減できる。

6・4 現在の自電炉操業状況

表6 操業当初と現在の自電炉操業データ

		操業当初		現 在
熔錬工場生産量				
粗銅	t/y	101,000		196,000
硫酸	t/y	265,000		450,000
装入				
鉍石装入量	t/h	43		72
銅品位	%	25		28
煙灰発生率	%	5～7		5～7
燃料				
重油	シャフト	L/h	1,500～2,000	60～100
	セトラ	L/h	400～500	0
炭材		kg/h	0	2,000～3,000
送風空気酸素濃度	%		21	28～30
産出物				
マット量	t/d		500	700
マット品位	%		50～52	60
スラグ量	t/d		450	800
スラグ中銅品位	%		0.52～0.65	0.50～0.65
Fe/SiO ₂	—		1.0	1.2
セトラ電極				
電力使用量	MWh/m		1,500～1,700	0
	(kW)		2,100～2,400	0
ペースト使用量	t/m		25～30	0

表6に操業開始当初と現在の自電炉操業データの比較を示す。

粗銅生産量は約2倍となり、当初シャフト、セトラへ多量に使用していた重油はシャフトにわずかに残るのみで、ほとんどが炭材に置きかえられた。

二度の酸素富化の後、マット品位も50～52%から60%に上昇したが、スラグロスは以前のマット品位の低い時期と同レベルであり、逆にFe/SiO₂は1.0から1.2に上げて操業している。

電気炉においては、炭材使用後のCO濃度コントロール以後、段階的に電力を削減し、遂に完全停止した。

また、還元と炉内の均一加熱の効果により、炉底のビルドアップが防止でき、アップテークへのダスト付着成長が防止され、炉内点検時間が減少するなど、ただ単に電気炉を停止しただけでなく操業の安定に大きく寄与している。

7. 改善の成果

自電炉プロセスは廃熱ボイラトラブルの回避を主目的として、従来の自熔炉法を改良したものであるが、次の2点が弱点として残っていた。

① アップテークがジャケット構造のため低温冷却水の廃熱回収ができない。

② 電極をセトラに内蔵したため、ペースト消費量、電力消費量が錬鋳炉より高くなる。

これまで述べた改善は上記2点を解消したもので、自電炉法の所期の目的であるボイラトラブルを回避しつつさらに改善できたことから、本来の自電炉法の有利性が確認できたと言える。

個々にはアップテークボイラ化で、ボイラ入口温度を上げることなく年間約5,000MWhの発電量をアップさせ、最近ではジャケット部でボイラ用給水を予熱しており、さらに省エネ効果を増幅させている。

燃料転換は燃料コストの削減はもちろん、電気炉コスト、すなわち電力、ペースト、ケーシング、さらにメンテナンスに要する工数等の削減を行うことができた。

図15に自電炉における総燃料コストの推移を示す。昭和53年を100%とすると、第2次オイルショック後は220%まで急上昇した。この後改善の効果が徐々に現れ、昭和63年には昭和53年の50%、昭和55年と比較すると実に25%まで減少している。この中にはエネルギー単価自身の値下がりも含まれてはいるが、高価な電力、重油から安価な炭材へのシフトがスムーズに行われたことがわかる。また炭材についても、使用量は少しずつ増加しているものの、安価な銘柄に切替えているため、総コストを増加させ

図15 自電炉総燃料コストと粗銅生産量の推移

図16 粗銅t当たりの自電炉燃料コスト推移

ずにすんでいる。この間の粗銅生産量が約2倍になっていることから粗銅単位原価は図16に示したように、大幅に減少している。

上述した効果は日本国内におけるエネルギー価格体系に適應した操業方法の改善であるが、別の見方をすれば、自電炉法はエネルギー価格条件に柔軟に対応できるプロセスになり得たとも言える。

すなわち、相対的に電力エネルギーの安価な地域ではオリジナルの自電炉法を主体とした操業方法が、また日本と似たような条件の地域であれば改善した操業方法がフルに適用できることになる。

8. 結 言

高度成長時代末期に操業を開始し、順調な立ち上がりで推移し

てきた当所は、第1次オイルショックにより大きな打撃を受けた。その後、銅市況および銅価低迷の中で第2次オイルショックや円高の影響を受け、製錬所として非常に厳しい状況にさらされたが、すばやく省エネルギー・燃料転換に取組み、幾多の問題を解決することにより、「アップテークのボイラ化」・「重油、電力より炭材へのエネルギー転換」の技術を確立した。

自熔炉プロセスは、かなりの歴史を有するが、これらの改善によって今日の時代に適應した銅製錬プロセスの1つに育てることができてきたものと考えている。

最後に、これら技術改善の基礎を築いていただいた三井金属鉱業および古河機械金属の諸先輩、筆者の前任者ならびに、この技術確立に当たり絶大なるご努力とご協力を賜った関係各位に、この紙面を借りて深く感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 北村：日本鉱業会誌，91〔1049〕，465，(1975)
- 2) 丸山・上川：非鉄製錬技術と省エネルギー，246-252，(1985)，日本鉱業会
- 3) S. Okada, M. Miyake, A. Hara and M. Uekawa: Sulfide Smelting Symposium, San Francisco, USA, 855-874, (1983)
- 4) S. Okada, M. Hashiuchi and M. Uekawa: The 4th International Flash Smelting Congress, USA, Mexico, 299-314, (1981)
- 5) 柴田・丸山・上川・老田：非鉄製錬技術と省エネルギー，151-158 (1985)，日本鉱業会
- 6) T. Watanabe, S. Okada and S. Muto: Australia Japan Extractive Metallurgy Symposium, Sydney, Australia, 31-39, (1980)
- 7) T. Shibata, Y. Oda and T. Maruyama: The 5th International Flash Smelting Congress, Finland, Poland, 249-262, (1986)

新刊紹介

日本金属学会編 金属物性基礎講座

“半導体と半金属 基礎と応用”

アグネ技術センター 1990 < A5・532頁・8,240円 >

本書は、近年めざましいまでの展開を示しつつある半導体と半金属を対象とし、主として物性物理学、材料科学の立場から解明と展望を与えたものである。

産業の米といわれるまでに発展した半導体、その技術向上は止まるところを知らないようで、数年前の新鋭技術がすでに現在では色あせて見えさえるのである。

現在のわが国の高度技術は、国外からの基礎技術導入によって築き上げられたものが多く、これを巧みに消化し、改良して、今や世界の第一線にあるのだが、先頭を走り続けるためには、自らの創造による基本的な独自の新技術の開拓が必要とされる。

基礎のないところから、新しい展開の芽は生まれない。本書は基本に立ち帰っての

学習に役立つことを目的として編まれたもので、基礎の理解から応用への展開につながることを期待している。(序より抜粋)

目 次

- 1 電子と正孔
- 2 キャリヤーの輸送
- 3 光学的性質
- 4 発光とエキシトン
- 5 接合
- 6 界面現象
- 7 ビスマス-半金属の典型として
- 8 化合物半導体
- 9 半導体の照射効果
- 10 強磁場下におけるインジウム・アンチモナイド

(株)アグネ技術センター：03(409)5329