

合金鉄電気炉操業における電力コストの低減

Reduction of Electric Power Consumption in Ferro-alloy Furnace Operation

(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 寺田茂樹*・森本政夫
木口淳平・水口征之

1. 緒言

近年の各種産業の拡大に伴い、わが国の電力需要は急速に増加の一途をたどっている。これに対し電力供給面で原子力発電をはじめとした様々な電源開発が進められているが、まだ十分需要を満たすまでには到っていない。また、電力資源が乏しいわが国にとって原油を海外に依存せざるを得ない体質が電力価格をさらに押し上げ、とりわけ合金鉄メーカー等、電力多消費型産業の国際競争力を著しく弱めている。

こうした中で加古川製鉄所合金鉄工場は、自家発電設備による安価な電力の使用等、一貫製鉄所の中の一工場として有利な条件にはあるが、2基の電気炉による使用電力量は多く、依然、製品価格において大きな影響を受けている。一般に電力原単位は電極位置と密接な関係があり、これを制御できれば大幅なコスト低減を図れるが、電極の正確な位置を常時把握することは極めて困難である。したがって、センサーから得られる情報をもとに電極位置推定技術を向上させ、電極位置を常時把握し、その制御技術確立していくことが合金鉄工場のこれからの重大な課題となっている。

2. 設備概要および製造フロー

(1) 設備概要

当所の合金鉄工場は高炭素フェロマンガニ(FMnH)とシリコマンガニ(SiMn)を年間約70,000t生産しているが、その生産設備は焼結設備、電気炉設備、および製品処理設備に分けられる。焼結設備としては小型のドラムミキサーとドワイトロイド型の焼結機(15m²)一基保有しているが、歩留り向上、省エネルギーをはかるため、成品を篩わずホットチャージで電気炉に装入するようにしている。また、電気炉は出湯口が2ヶ所ある20,000KVAの密閉型炉二基で昼夜連続操業を行っている。製品処理設備としては、鑄鉄機一基、および破碎・整粒系統としてジョークラッシャー1台、2床式スクリーン3台を保有し、0~80mmの粒度範囲で所定の粒度となるよう調整している。

(2) 合金鉄製造工程

電気炉内に装入されたMn焼結鉱およびMn鉱石は消費電力量が90,000~140,000kWhになるまで、コークスにより還元、溶解され、電気炉炉壁の出湯口から排出される。これらの溶湯はスキンマー部でメタルとスラグに分離され、メタルは鑄鉄機へ、スラグはドライピットに導かれる。メタルは鑄鉄機上で水冷された後、ショベルで破碎機まで運搬されて所定の製品粒度になるよう破碎、整粒され、各ユーザーに出荷される。これらの製品の製造フローをFig. 1に示す。

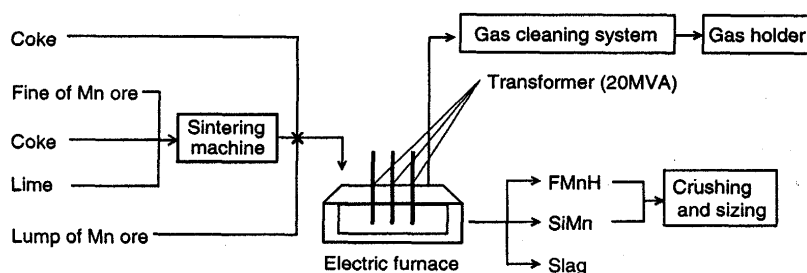


Fig 1. Process flow of FMnH, SiMn

3. 実操業結果および考察

(1) 実操業結果

Fig. 2 に '83年からのSiMn製造時の電気炉操業推移を四半期毎に示す。電力原単位の低減と成分歩留りの向上を目指して'84年より電極先端位置の推定とその制御技術の向上をはかった。電極先端位置を常時把握しそれを制御に活かすことによって、変動の少ない最適な電気炉操業が可能となり溶解電力が大幅に低減できた。一方、原料性状の改質としては焼結鉱のスラグミニマム化を推進しており焼結鉱中のAl₂O₃、CaOを低減することにより焼結鉱を増配し、SiMn製造時のスラグ量を700kg/tから400kg/tまで低減できた。これらの改善により電力原単位は約200kwh、成分歩留りはSi歩留りで約10%向上することができた。

(2) 装入原料の改善

1) 焼結鉱使用量の拡大

当所合金鉄工場における焼結鉱使用割合は、徐々に増大しており、FMnH製造時には100%、SiMn製造時には60%にまで達している。焼結鉱を使用するメリットは、①安価な粉鉱使用によるコスト低減、②エネルギー原単位の低減、③電気炉操業の安定効果、④落鉱、粉鉱等の利用があげられ、当所もこれらのメリットを最大限に享受するため、焼結機から出る成品を全量電気炉で使用している。

Fig. 3 に電気炉内のガス条件で焼結鉱と塊鉱石を高温試験した時の結果を示すが、塊鉱石の方が低温側で軟化溶解を開始している。¹⁾また、Fig. 4 に塊鉱石を使用した時の炉況変化を示すが、塊鉱石の配合率が多くなれば、ガス温度電極位置が上昇している。これは焼結鉱に比べ塊鉱石の方が軟化溶解が低温で起こり、電気炉上部で鉱石が溶解しているためと考えられる。²⁾

焼結鉱の増配は今まで成分調整、スラグ量、篩下の処理等で制約があったが、需給面の調整、低塩基度焼結鉱の使用や篩下の回収可能な設備改善を実施して焼結鉱の増配が可能としてきた。

2) 低塩基度焼結鉱の利用

当所合金鉄工場は焼結機が一基しかないため、同じ焼結鉱で配合塩基度(CaO/SiO₂)が0.9のFMnHと配合塩基度0.40のSiMnを生産せねばならない。このため塩基度が高いFMnHをベースに原料となる焼結鉱を生産するとSiMn操業時には塩基度を低下させるために珪石等、多量のSiO₂源を入れねばならず、スラグが大幅に増大してしまう。Fig. 5 にスラグ比と溶解電力量、Si歩留りとの関係を示しているが、スラグ比の増大に伴い溶解電力、Si歩留りが著しく悪化している。これはスラグを溶解するのに必要な熱量が増えるのと、スラグ溶解量の増大により炉下部で電気抵抗値が小さくなり電極が浮上するために生ずるヒートロスの増大によるものである。

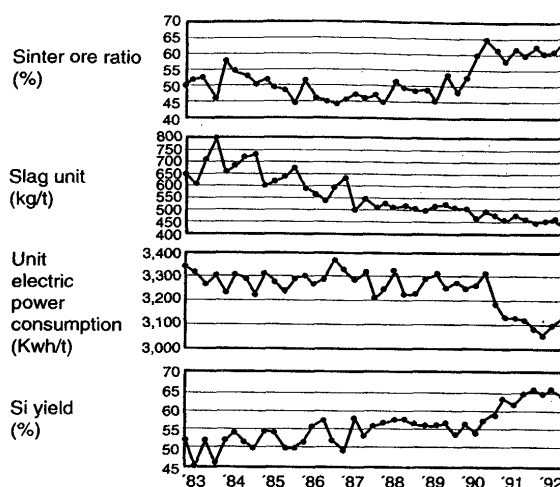


Fig.2 Operation results (SiMn)

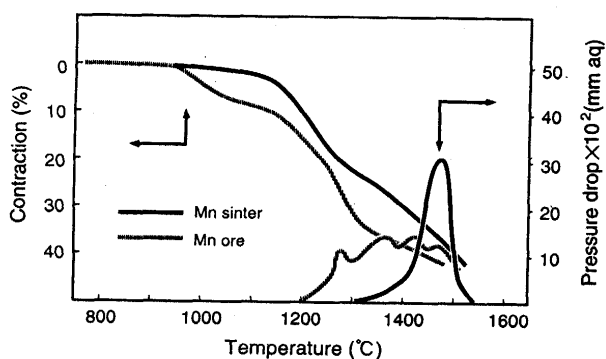


Fig.3 Comparison of high temperature properties under load between sinter and lump ore

一方、FMnH製造時のスラグMnレベルはスラグの流動性や³⁾合金鉄製造諸原単位に大きな影響を与えることから、重要な操業管理項目の一つである。スラグMn%とスラグ複合塩基度 ($\text{CaO} + \alpha \times \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \beta \times \text{Al}_2\text{O}_3$) との関係を図6に示すが、スラグMn%はスラグ複合塩基度の一次関数で表され、むしろ配合塩基度よりもスラグ複合塩基度との相関が強い。しかも、 α 、 β の値によっても相関係数が変化し $\alpha=2$ 、 $\beta=0.5$ の時、最も両者の相関が強い。 Al_2O_3 、 CaO を低減し複合塩基度を一定にすることによってスラグMn%を維持し、低スラグ焼結鉱の製造を可能とした。これによりFMnH用の焼結鉱を使用してもスラグ量を増やすことなくSiMn操業ができるようになったが、 SiO_2 - CaO - MnO - Al_2O_3 系スラグでは、スラグ Al_2O_3 を下げるとスラグの流動性は一般的に悪化する。このため、スラグ中 Al_2O_3 の低下については出湯時の作業性等を考慮しつつ、実操業の中で13%のレベルから8%まで徐々に Al_2O_3 を下げるようにした。

(3) 電気炉操業技術の改善

1) 電極先端位置推定技術の向上

電気炉における原料の熔融熱、還元熱等は電極先端付近で生じる電気抵抗熱によって供給されるため、電極先端が炉内状況に応じて最適位置にある時、供給電力が最大限有効に活用されると共に安定した炉の状態を維持することができる。⁴⁾

電極位置を把握するためには、金棒を炉内に挿入し必要な時に実測する手段があるが、電気炉の稼働率低下、作業性等の面から頻度多く測定することはできない。そこで、電極位置を常時把握し電気炉の操業に活かしていくために計算により電極位置を推定することにした。今までの過去の経験から電極位置と関係があると推測されている炉底温度、2次電流値、 $\text{CO}\%$ 等、実炉から得られる14項目の測定値を選び、これらの中で主成分分析を行い整理した。その結果、主成分として電気炉発生ガス温度、 $\text{CO}\%$ に絞られ、推定式として①式を得ることができた。

$$\text{電極深度指数} = 9.1 \times \text{主成分} - 456 \quad \text{①}$$

$$(\text{主成分} = 0.7 \times \text{ガス温度} + 0.71 \times \text{CO}\%)$$

①式より得られた電極深度位置指数を縦軸に、実測の電極深度位置を横軸にプロットしたものを図8に示す。図7から明らかなように両者の相関係数は0.85と非常に高い値を示し、よく一致している。この式を用いることにより電極先端位置の推定が常時可能となった。

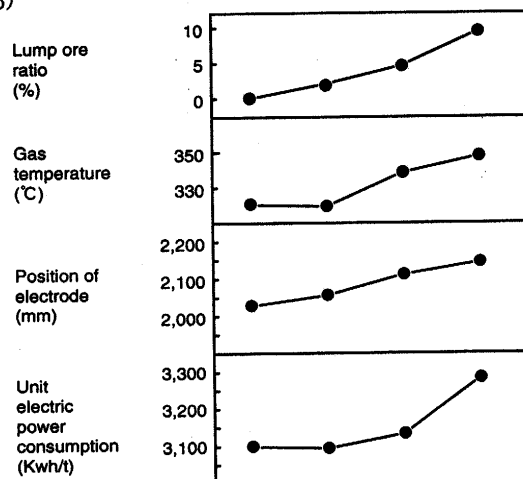


Fig 4. Effect of lump ore ratio on operational condition

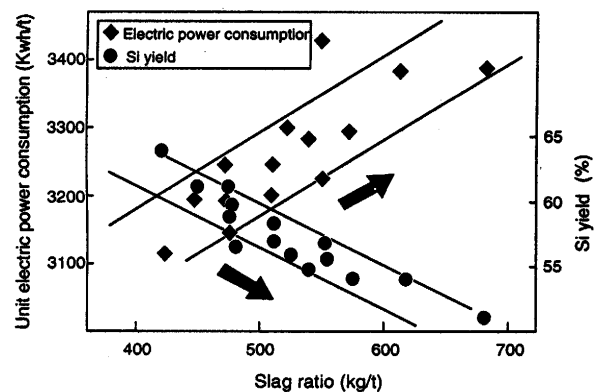


Fig 5. Relationship between slag ratio and unit electric power consumption, Si yield

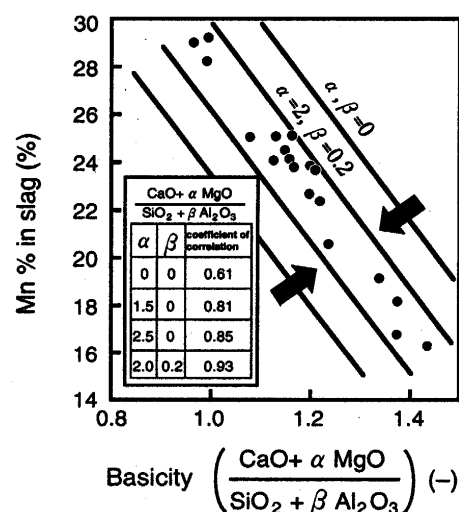


Fig.6 Relationship between basicity and Mn % in slag

2) 最適な電極先端位置管理技術の確立

一般に電気炉内は炉床にスラグメタルが存在しているため、炉下部で電気抵抗が小さく炉上部で大きい。したがって、電極先端が炉内に深く入るとスラグメタルに優先的に電気が流れ、溶解に必要な抵抗熱があまり得られず、逆に浅すぎると抵抗熱は生じるが、その熱が炉床には届かずスラグメタル反応の進行を阻害する。

このことから、電気炉エネルギーコストと電気抵抗とは極値を持つ関数で表され、エネルギーコストミニマムにする最適な電気抵抗値が存在する。従来はこの電気抵抗値を目標に電極を制御し、抵抗値一定操作を実施してきたが、装入原料の変動および炉内での変化が発生した場合、電気抵抗が最適値でも電極位置が深くなったり浅くなったりする場合が生じ、エネルギーコスト的に不利な状態となる。そこで、当所は従来の抵抗値を制御に加え、電極位置を絶えず確認することによってエネルギーコストミニマムを保っている。⁵⁾

さらに、電極先端位置の軌跡を分類すると3つのパターンに分類できた。⁶⁾この分類パターンと炉内状況との関係をTable. 1に示す。タイプAの場合、全電極の電気抵抗値が大きくなり、これに伴い電極位置も深くなりスラグMnが上昇しメタルSiが減少した場合、コークス不足と判断することができる。また、全電極ではない場合は電極位置が浅いと判断できる。3極の電極位置と電気抵抗、各種成分等の情報から電極先端位置の軌跡パターンを分類することにより、炉内状況が推定できタイムリーな操業アクション等適切な処置をとることができるようになった。

4. 結言

低塩基度焼結鉱等、装入原料の改善と電気炉操業技術として電極位置推定、および制御技術を開発することによって、エネルギー原単位を下げ電力原単位を大幅に低減することができた。これにより、電力が安価な諸外国とのコスト競争力が増し、その基盤が構築された。

参考文献

- 1) 寺田茂樹他: フェロアロイVol. 35, No1(1992)P. 73
- 2) 山岸一雄他: フェロアロイVol. 26, No1, 2(1981)P. 17
- 3) J. OM. Bockris他: J. Sci. Instrum., 30(1953)P. 403
- 4) 三森衛他: フェロアロイVol. 15, No5, 6(1966)P. 341
- 5) 森本政夫他: フェロアロイVol. 28, No1, 2(1985)P. 19
- 6) 寺田茂樹他: フェロアロイVol. 28, No1, 2(1985)P. 141

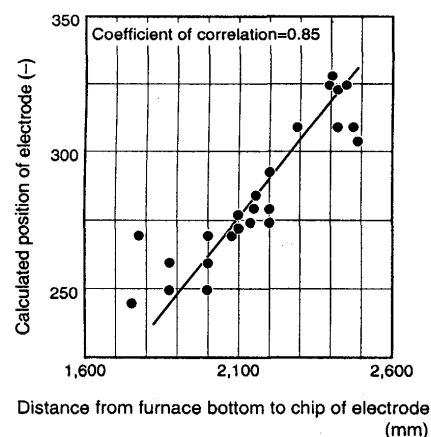


Fig. 7 Relationship between calculated position of electrode and distance from furnace bottom to chip of electrode

Table 1 Relationship between pattern of smelting and operational condition

Type	Pattern of smelting	Electric resistance	Electrode tip position	Result of presumption
A		all rise	all descent	shortage of coke
		high than another electrodes	low than another electrodes	short electrode
B		all descent	all rise	great of coke
		low than another electrodes	high than another electrodes	long electrode
C		good		