技術資料

電熱モデルから見たアーク炉の生産性・ 電力原単位

和泉喜久磨*, 山本孝幸*, 中西洋一*

Productivity and Specific Power Consumption in Electric Heating Model of Arc Furnace

Kikuma Izumi, Takayuki Yamamoto and Youichi Nakanishi

Synopsis

In recent years, there is great technical progress in electric arc furnaces for steel-making. Steelmakers are looking for further improvements in their equipments and production technology.

This paper discusses the productivity and specific power consumption using the electric heating model. The model shows ways to get more excellent productivity and specific power consumption.

1. はじめに

近年、アーク炉の大型化、高電力化などの設備面での技術進歩に加え、酸素富化操業やカーボンインジェクションなどの操業面での進歩により、アーク炉の生産性や電力原単位は大幅に向上してきた。また、LFなどの炉外精錬設備の導入による製鋼プロセスの機能分化もアーク炉の生産性の向上に大きく寄与している。現在では、これらの新技術は広く一般化し、さらなる高能率生産技術として、DC炉、ツインシェル炉、シャフト炉などが導入され始めている。また、アーク炉の自動化も生産性向上の手段として積極的に進められている。

本報告では、電熱モデルを用いて生産性、原単位

位の検討を行う中で、生産性、電力原単位を構成する項目の役割を再確認し、種々の技術や新設備が生産性、原単位向上に寄与する意味を考察する基本的な考え方を提供することを試みる。

2. 電熱モデル

アーク炉の電熱モデルは、下記の(1)式で定義される。また、通電時間 T (min) は、必要な溶鋼熱 EH より、有効な代替エネルギー熱やスラグ生成熱を差引き、さらにそれを有効な入力電力で除したものである。したがって、(2)式が定義できる。また、そのエネルギーフローを図示したものが、図1である。

$$EH = (PA \cdot T + PL_e \cdot T + OH + HS) - (PA_L \cdot T + Q_L \cdot T + OH_L + HS_L) \quad (1)$$

$$T = \frac{EH - (OH - OH_L) - (HS - HS_L)}{(P - PL_L - PA_L) - Q_L} \quad (2)$$

電力原単位 W (kWh/t) は、(3)式で表せる。

1994年10月20日受付

*大同特殊鋼㈱機械事業部

図1 アーク炉のエネルギーフロー

$$W = P \cdot T / MS$$

$$= \frac{P \cdot \{EH - (OH - OH_L) - (HS - HS_L)\}}{MS \cdot \{(P - PL_L - PA_L) - Q_L\}} \quad (3)$$

ここで、 EH : 溶鋼熱 (kWh)
 P : 入力電力 (kWh/min)
 MS : 溶鋼重量 (t)
 PL : ジュール熱 (kWh/min)
 PL_E : PL の有効分 (kWh/min)
 PL_L : PL の無効分 (kWh/min)
 PA : アーク電力 (kWh/min)
 HS : スラグ生成熱 (kWh)
 OH : 代替エネルギー熱 (kWh)
 Q_L : 輻射ロス (kWh)
 OH_L : OH の未利用熱 (kWh/min)
 PA_L : PA の未利用熱 (kWh/min)
 HS_L : スラグフォーミングによるロス (kWh)

ただし、製鋼における慣用にならい、エネルギー量を kWh、時間当たりのエネルギー量を kWh/min で表現した。

以下では、これらの式の各項を検討していくなかで、生産性や電力原単位向上の手段について、その意味と役割の整理を進めていく。

3. 検 討

3.1 生 産 性

3.1.1 電力以外のエネルギー

生産性は、時間当たりの生産量であるから、非通電時間を最小にしたうえで、(2)式の通電時間 T を小さくすればよい。

そこで、まず式(2)における $(OH - OH_L)$ の意味を検討する。 OH は代替エネルギー熱であり、 OH_L は代替エネルギー熱の未利用分であるから、 $(OH - OH_L)$ を大きくすることは、電力に代わる代替エネルギーの利用効率を高めることを意味する。ここで代替エネルギー有効熱量 $OH_E = OH - OH_L$ とすると、 OH_E と酸素使用量 OX (m^3/t) の間の関係は、(4)式として回帰式より求められている¹⁾。ただし、式中の A は定数である。

$$OH_E = -0.138 \cdot OX^2 + 8.83 \cdot OX + A \quad (4)$$

(4)式は OX に関しての2次式であるから、 OH_E を最大にする酸素使用量 OX_{OP} は、

$$\frac{d(OH_E)}{d(OX)} = 0 \quad \text{より、} \quad OX_{OP} = 32 \text{ (} m^3/t \text{)}$$

が求められる。

生産価格を最小にする電力と酸素の組み合わせは、(2)式と(4)式を用いることにより求められる。すなわち、生産価格 (CS) は電力価格と酸素価格の和であるから、

$$CS = a \cdot W + b \cdot OX$$

ここで、 a : 電力単価 (¥/kWh)

b : 酸素単価 (¥/ m^3)

この式で酸素使用量を変数とすると、 CS は OX の2次式となるので、

$$\frac{d(CS)}{d(OX)} = 0 \quad (5)$$

を満たす点が、生産価格が最も低くなる酸素使用量 OX_{LC} をあたえるポイントとなる。(5)式を解くと、

$$OX_{LC} = (8.83 - \frac{a}{b}) / (2 \times 0.138) \quad (6)$$

となる。

以上で述べたように、酸素富化操業において酸素使用量を最適化することで、コストを極小化できることをモデル式から導いた。しかしながら、酸素の使用は溶鋼歩留に悪影響をあたえる。溶鋼歩留の低下を防止するには、一般にカーボンインジェクションが用いられ、最近のアーク炉では94~95%の溶鋼歩留が得られるとの報告がなされている。図2に歩留とインジェクション量の関係を表した例²⁾を示す。さらに、カーボンによるスラグ還元時の吸熱反応も考慮すべき項目ではあるが、実際にはスラグフォーミングによる電力投入効率の向上効果によりカバーされて余りある結果が得られている。

図2 溶鋼歩留とカーボンインジェクション²⁾

(2)式および(3)式に立ち戻ると、式には $HS-HS_L$ として示されるスラグ反応有効熱量が、代替エネルギーと同じ効果として、期待できることが示されている。ただし、スラグには溶解熱も必要であり、実質的には冶金の見地を考慮することにより、最小限のスラグを最低限の温度で処理することが望ましい。

3.1.2 電力エネルギー

次いで、(2)式の分母にあたる電力投入有効熱量について検討を行う。基本的には、 P (入力電力)を増大させ、 PL_L (電力ロス)と PA_L (アーク熱ロス)を低減することで、 T (通電時間)は少なくなり生産性は向上する。

(1) P (入力電力)の増大

入力電力の増加は、炉用変圧器の格上げで対応するのが一般的な考え方である。しかしながら、電力システムに対する種々の影響、すなわちフリッカ、高調波、電圧変動などを考慮すると、日本国内の設備では導入可能な変圧器容量は上限に達しており、さらなる炉用変圧器の容量の拡大は極めて困難になってきている。今後、変圧器の容量を大きくするには、

- 1) 工場を電源容量の大きな地域に移転させる
- 2) 専用の給配電線を備える
- 3) 受電電圧の格上げを行う
- 4) アクティブフィルタを導入し、積極的にフリッカを打ち消す
- 5) スクラップ連続投入設備を導入し、アークが安定する精錬期ベースのみの操業に移行する
- 6) DC 炉の採用

などの対策をとる必要がある。これらの対策は大

表1 AC炉における抵抗損の例
(MW)

変圧器	0.4~0.7
ケーブル	0.5
ブスバー	0.6
渦電流損	0.2
電極	0.55
計)	2.25~2.55

きな設備投資をとまうものが多く、 P (入力電力)のアップはかなり難しい状況にあるのが現実である。これらの技術の中で、DC 炉はアーク電流を定電流化する制御が可能であり、同一変圧器容量をもつAC 炉と比較してフリッカが半分になる特性をもつため、炉の更新時にDC 化を行い炉のハイパワー化を進めることが、最近はよく行われるようになってきた。

(2) PL_L (電力ロス)の低減

最近の報告では、電力ロスは全電力量の4%ほどになるという試算³⁾もあり、回路の抵抗損の削減は無視できないテーマであるといえる。電力ロスは、回路上の抵抗損であり、変圧器から電極先端までの電気抵抗値をさげることでロスの低減が図れる。もちろん、回路での損失には渦電流損も含まれるが、これは比較的に小さい値であると考えられる。また、電極での発熱は最終的には炉内の熱になると見なせば、ロスとみなす必要がなくなる。したがって、電力ロスの引き起こす要素は、変圧器、ケーブル、およびブスバーとなる。表1³⁾に80~120tクラスのAC 炉における回路抵抗損の内訳を示す。

抵抗値 R は、(7)式により求められる。

$$R = \rho \cdot l (1 + \delta) / S \quad (7)$$

ここで、 ρ : 導体固有抵抗 (Ωm)

l : 導体長さ (m)

S : 導体断面積 (m^2)

δ : 交流抵抗補正係数 (0.3~1.0)

(7)式にしたがい、電力ロス削減の各種の手段について検討を行うことにする。

1) l (導体長さ)の削減

変圧器二次側から電極先端までの幾何学的距離の削減を意味し、AC 炉ではラム方式の採用などで導体長さを短縮できる。また、水冷ケーブルで

のロスも大きな割合を占めるため、炉蓋の旋回や炉体の傾動を妨げない最小長さの水冷ケーブルの採用も、検討の対象となる。換言すれば、水冷ケーブルの長さを短くできる炉形式にまで遡った議論も必要となる。たとえば、EBT方式の出鋼方式の採用は、出鋼時の炉体の傾動角度を小さくできる面では、電力ロス削減に有利な炉形式であるといえる。

この議論は、DC炉にも同様に適用されるが、DC炉ではアーク偏向を制御するため、意識的に距離の長くなる導体配置が採用されることもある。

2) S (導体断面積) の拡大

導体の断面積は、大きいほど電力ロスの削減に有利なことは明らかなことであるが、実際の設計においては、レイアウト上の問題や重量の問題があり、簡単には導体の断面積を大きくすることはできない。

たとえば、水冷ケーブルを太くすると、曲げ半径を大きくすることになり、ケーブル長さが大きくなる。断面積の小さな水冷ケーブルを4本採用することで抵抗損を減じるという手法も取られることがある。

最近話題になっている導体支腕は、アスパーのロスの削減に効果を発揮する。表1からも理解されるように、アスパーでの電力ロスは全体の中で大きな割合を占める。導体支腕の電気抵抗値は、水冷母線管を採用した従来のものと比べ、約半分になるといわれ、リアクタンスの抑制効果と併せ、導入前と比較して有効電力を10%近く増すことができた例も報告されている⁴⁾。

3) ρ (導体固有抵抗) の削減

導体の固有抵抗値は、銀、銅、アルミの順に大きくなるが、機械強度や価格の面から考慮すると実用的には銅を用いることが一般的であり、固有抵抗を下げる目的で銅以外の材料が選択されることは少ない。しかし、重量の制約のある導体支腕などでは、アルミ導体が採用されることが多く、変圧器の二次側の導体が長くなるDC炉でも、重量と価格を考慮してアルミ導体が採用されることもある。

4) 接触抵抗

(7)式には、あからさまには出てこないが、接触抵抗も大きな損失を引き起こすことがある。ボルト

締めで導体を組み合わせる際に、適切な締め付けトルクを用いることが施工上重要であり、不注意な工事をおこなうと思われ場所でのロスが発生することになる。とくに数多くのボルトをもちいる水冷ケーブルの接続部には注意が必要となる。

(3) インダクタンスの制御

インダクタンスは、回路を流れる交流電流により発生する磁界により自回路または他回路を鎖交する磁束の数に関連する値である。交流回路にインダクタンス (自己インダクタンス) が存在すると、電流の変化方向に対し逆向きに起電力が発生する。よって、ACアーク炉の回路においてインダクタンスが大きい場合には、炉用変圧器からの二次電圧の内、逆起電力により打ち消される分が多くなり、アーク電圧が減少する。

正確には上記の効果に加え、他回路からの影響を相互インダクタンス分として合わせて考慮することにより、アーク電圧に対するインダクタンスの効果が見積もられる。

インダクタンスは、二次導体や水冷ケーブルの幾何学的な構成により決定され、近似的に(8)式、(9)式であたえられている⁵⁾。

$$L = 2l \{ \ln(2l/D) - 1 + D/l \} \times 10^{-7} \quad (8)$$

$$M = 2l \{ \ln(2l/D') - 1 + D'/l \} \times 10^{-7} \quad (9)$$

ここで、 L : 自己インダクタンス (H)

M : 相互インダクタンス (H)

l : 導体の長さ (m)

D : 自己幾何学的平均距離 (m)

D' : 相互幾何学的平均距離 (m)

D は、導体の径や同相の導体間の距離に相当し、 D' は相の異なる導体間の距離に相当するものである。

そして、アーク炉の各相電流が等しい時には、有効電力 P_w が(10)式であたえられる。

$$P_w = 3r \cdot I^2 \\ = rE^2 / (r^2 + \omega^2 L_{EQ}^2) \quad (10)$$

また、

$$L_{EQ} = L - M \quad (11)$$

ここで、 I : 電流 (A)

r : アーク抵抗と二次側導体抵抗の和 (Ω)

E : 変圧器の線間二次電圧 (V)

ω : 角周波数 ($2\pi f$)、 f は周波数 (Hz)

(10), (11)式より, 有効電力 P_w , すなわち入力電力 P を大きくするには, 自己インダクタンス L を小さくするか, 相互インダクタンス M を大きくすればよいことが理解される。

1) 自己インダクタンスを小さくする

自己インダクタンス L を小さくするには, (8)式から D を大きくすればよいことが導かれ, 具体的には水冷ケーブルの本数を増したり, 同相ケーブルの間隔を広げることで実現できる。

実際に, 水冷ケーブルや二次導体の構成や配置を変更するには, かなりの困難が予想される。比較的容易に回路の自己インダクタンスの低減を得る手段としては, 導体支腕の導入がある。導体支腕は自己インダクタンスを抑制する上でも非常に有用である。導体支腕は, 導体の断面積が従来のものと比べ, 5倍以上大きくとれ, 自己インダクタンスが60%程に削減できたことが報告されており⁴⁾, 抵抗値の削減と併せて, アーク炉への入力電力の増加を図るうえで, 大きな効果が期待できる。表2に導体支腕を導入した際の仕様比較, 表3に導体支腕と従来支腕の電気特性の比較を示す。なお, リアクタンス X とインダクタンス L の間には,

$$X = \omega L \quad (12)$$

の関係がある。したがって, インダクタンスを削減すると, 結果としてリアクタンスが減少する。表3では, 支腕本体のインダクタンスの削減が, リアクタンスの減少として示されている。

2) 相互インダクタンスを大きくする

相互インダクタンス M を大きくするには, (9)

式の D' を小さくすればよい。すなわち, 異なった相のケーブル, 導体を接近させることであり, 電極ピッチサークル (P. C. D) の縮小化が, よく実施される対策となる。

3) PA_L (アーク熱ロス) の低減

アークによって発生した熱は, スクラップばかりでなく, 炉壁や炉内の空気の加熱もする。したがって, スクラップがアークを取り囲む溶解期とスクラップが溶け落ちフラットパス状態になった精錬期では, アーク熱ロスの様子は異なってくる。溶解期にはロングアーク操作を行い, 精錬期ではショートアーク操作を行うのが一般的ではあるが, 精錬期にカーボンインジェクションを用いてのスラグフォーミングでロングアークによるロスを抑えるなど, 他の操業技術と複合させた対策を個別に議論する必要がある。

3.1.3 Q_L (放熱ロス)

有効な入力電力を増すと共に, 放熱によるロスを抑制することも非常に重要なテーマである。冷却水持去熱をふくむ炉体放散熱や排ガス持去熱, 追装時ふく射熱の低減および有効利用については, 数多くの検討がなされてきた。例えば, 追装時間の短縮, 排ガス保有熱の回収がこれにあたる。

最近のアーク炉での入力熱量に対する放熱ロスの割合を表4²⁾に表す。アーク炉に投入されたエネルギーの内, 1/4~1/3がロスとして排出されていることになっていることが, 同表より了解される。

表4に示した放散熱の内, 冷却水持去熱は設備の寿命や安全性との関連があり単純に低減できないが, 排ガスや炉体からの放散熱は極力その低減

表2 導体支腕と従来支腕の仕様比較例

仕様項目	導体支腕	従来支腕
対象炉	140t取鍋精錬炉	
電極径 (mm)	406	406
電極長 (mm)	5500	5500
電極P.C.D (mm)	950	1100
取鍋内径 (mm)	3550	3550
支腕重量 (kg)	2500	4200
導体材質	アルミ合金	水冷銅母線
導体断面積 (mm ²)	40000	7800

表3 導体支腕と従来支腕の電気特性比較

(mΩ)			
特性項目		導体支腕	従来支腕
リアクタンス	電 極	0.64	0.69
	支 腕 本 体	0.53	0.85
	水冷ケーブル	1.35	1.41
	二 次 母 線	0.37	0.37
	変 圧 器	0.40	0.40
	合 計)	3.28	3.72
支腕部抵抗値		0.01	0.02

表4 アーク炉の放散熱 (%)

炉体放散 追装時ふく射熱	5～8
冷却水持去熱	4～7
排ガス持去熱	14～18
合計)	23～33

を推進できる性質のものである。この中でも、排ガス持去熱の割合が目だっている。

排ガス持去熱の低減の施策としてはSPH(スクラップ予熱装置)がその代表であり、国内の多数のアーク炉に設置されているが、回収エネルギー量は20kWh/t程度であり排ガス熱量の回収率は十分でない。また、予熱に伴う環境の悪化や設備の保守での問題が残っている。最近では、従来とは異なる新しい方式のスクラップ予熱プロセスが開発されつつあり、今後、より効果的な排ガスエネルギー回収システムが設置されていくものと考えられる。

3.1.4 EH (溶鋼保有熱)

EHは、スクラップが溶解開始温度から熔融を経て、出鋼温度にいたるまでに必要な熱量であり、熔融点までに必要な熱量と融解熱、および熔融点から出鋼温度までの昇熱に必要な熱量の和となる。EHを引き下げること、生産性の向上に寄与する。

$$EH = MS\{(MP - ST) \cdot SSH + TSH + (TT - MP) \cdot MSH\} \quad (13)$$

ここで、MP：熔融温度

ST：スクラップ溶解前温度

TT：出鋼温度

SSH：スクラップ溶解比熱

MSH：溶鋼比熱

TSH：スクラップ融解熱

(1) ST (スクラップ溶解前温度) の高温化

SPHやシャフト炉、ロータリーキルンなどにより、スクラップをプレヒートして、EHを引き下げる努力が行われている。排ガス以外の熱源を用いれば、原価アップにつながるため、排ガスをもちいたSTの高温化が今後とも主流になると思われる。

(2) 出鋼温度の引き下げ

図3 アーク電流に対する電力原単位と通電時間の計算例

出鋼温度の引き下げは、出鋼温度1600℃近傍で0.5kWh/(t・℃)、1700℃近傍で0.6kWh/(t・℃)の効果がある。

3.2 電力原単位の低減

電力原単位については(3)式を検討すればよい。明らかなことではあるが、生産性の向上は、電力原単位の低減に結びつくわけであり、前章までに述べた多くが、電力原単位の低減に結びつく。しかしながら、電流量に関しては生産性と電力原単位の動向が、完全には一致しない。

AC炉について、動的な力率変動を考慮したアーク炉の電気特性式を(3)式に適用すれば、図3に示すような電力原単位のVカーブ特性が、個々のアーク炉に対し計算で求められる¹⁾。このVカーブに示される最低電力原単位電流は、最短通電時間電流より小さくなっており、最小通電時間と最小電力原単位をもたらすアーク電流との間に相違がある。したがって、生産性と電力原単位のバランスを考慮したアーク電圧と電流の設定が、実操業において求められることになる。DC炉についても同様な議論が必要であるが、二次導体配置が一般化されていないため、十分な検討がなされていないのが現状である。

電力原単位の低減について、計算式に直接反映されないファクターとしては以下の項目があげられる。

- 1) 炉蓋開閉時間の迅速化→油圧回路の高性能化、比例調整弁の採用
- 2) 追装後の通電開始の迅速化→CRTや表示灯を用いた作業員への適切なガイダンス
- 3) 電極引き上げ時間の短縮→電極引き上げ速度の向上

- 4) 電極急速引き上げ装置の感度鈍化→最大限の電力投入
- 5) 出鋼時間の短縮→出鋼口の拡大と出鋼制御精度の向上
- 6) スクラップ準備時間のマッチング→段取り、クレーン速度上昇
- 7) 取鍋待ち時間の削減→台車受鋼方式の採用
- 8) 予定外休止の削減→メンテナンスのレベル向上と炉蓋・排ガス系水冷機器のスプレー化

これらの項目は、全て非通電時間の短縮につながり、生産性の向上とロス削減が実現される。個々の項目での時間短縮量を多くは期待できないが、ARMS（アーク炉最適電力制御装置）などの計算機により操業実態を的確に把握し、地道な改善の積み重ねを進めることが求められる。

4. ま と め

電熱モデルからアーク炉の生産性、電力原単位削減の方向に議論をおこなってきた。これは、生

産性や原単位向上に対する施策を、基本に立ち帰り再考し、その位置付けを明確にするために有用と思われるからである。

ここで述べてきた各施策は、過去に数多くの検討がなされてきたものであるが、電熱モデルのなかに記述することで、生産性・原単位にたいする関係が明確にできたと考えられる。今後の設備改善、操業技術の改善を試みる上で参考になれば幸いである。

(文 献)

- 1) 稲垣, 和泉, 市川: UIE (1988) A6, 2
- 2) 鉄鋼協会電気炉部会: 最近のアーク炉製鋼法の進歩 (1993), [日本鉄鋼協会]
- 3) B. Bowman: Iron & Steelmaker, 20 (1993) 10, 55
- 4) 電気製鋼, 65 (1994), 76
- 5) 日本電熱工学委員会: 工業電気加熱ハンドブック (1968), 83 [電気書院]