



アラカルト

電炉操業におけるエネルギーバランスとCO₂排出抑制の最適化に関する一考察

Optimization of Energy Consumption and CO₂ Reduction in Electric Arc Furnace

東北大学
大学院工学研究科
学術研究員
山口一良
Kazuyoshi Yamaguchi

東北大学
多元物質科学研究所
教授
植田 滋
Shigeru Ueda

東北大学 副学長
東北大学未来科学技術共同研究センター
センター長
東北大学大学院工学研究科 教授

長坂徹也
Tetsuya Nagasaka

1 経緯

電炉法は高炉・転炉法に比べてCO₂排出量の少ないプロセスであるが、日本においては、高価な電気代を節減し製造コストを低減するために、積極的にC源燃焼、酸素吹き込みを行っている。製造コスト低減は達成しているものの、排ガス量増加による熱ロス増加、ダスト発生量・スラグ生成量増加を招き、これらの処理コスト負担が製造コストに上積みされている。

このため、電炉操業においては、排ガスによるスクラップ予熱等を実施し、ダスト中Zn濃度上昇による産廃処理から有価物販売への転換、スラグの積極的なリサイクル処理を推進しているが、現状の電炉製鋼法が鋼の再生にとってのベストテクノロジーとは未だ言い難い¹⁾。

CO₂排出量増加に大きな影響を及ぼすC源燃焼量、酸素吹き込み量を減少させたときに、電炉操業がどのように変わる

か、CO₂排出、製造コストにどのような影響を及ぼすかに関して、電炉操業に関する詳細な測定データ²⁻⁴⁾を再度解析し、考察を行った。

2 現在の標準的な電炉操業におけるエネルギーバランス

産業機械 (2012.2) にスチールプランテック (株) の関が報告⁵⁾しているデータによると、130ton電気炉のエネルギーバランスはFig.1のように表示されている。電炉操業データの詳細は不明であるが、C源燃焼熱 (260kWh/ton)、バーナーによる燃焼 (30kWh/ton) を、それぞれ石炭、LNGと想定して原単位に換算すると、90kg/ton, 2.634Nm³/tonと算出される。これらの値を用いて、Table1のエネルギー価格、Table2のCO₂排出原単位を乗じると、Table3に示すCO₂排出原単位、エネルギーコストが算出される。なおTable1の値

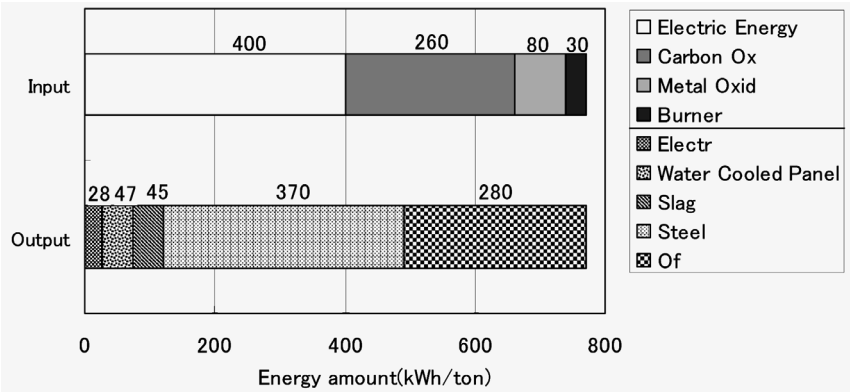


Fig.1 Normal energy balance in the electric arc furnace.

は、直近の代表的な値、Table2の値は、環境省のデータ⁶⁾を用いた。

1960年の電炉操業に関する情報⁷⁾によると、電気炉容量10～20ton、平均電気原単位728kWh/tonのデータが示されており、他のエネルギーは使用していない。この時点からみると、種々の設備改善、操業改善により、電気エネルギーは実に45%の節減を達成しているが、一方で、C源燃焼等を含む総エネルギー原単位は低減しておらず、むしろ増加傾向にある。現在の操業の最適化を図る必要があると認識される。

3 10ton 電気炉を用いた電炉操業解析

笹本³⁾は、Znリッチなスクラップ（亜鉛表面処理鋼板自動車用加工屑；以降Zn-NPと称する、スクラップ中Zn含有量＝0.80～0.88%）、Znの少ないスクラップ（自動車廃車シュレッダー加工屑；以降C/Sと称する、スクラップ中Zn含有量＝0.23～0.24%）の2種類を10ton電気炉で単独溶解を行った。操業条件として、石炭と酸素を吹き込むケース（O₂有と称する）と、極少量の石炭添加と酸素吹き込み無しのケース（O₂無と称する）を行い、4種類の操業条件を比較検討している。

Table1 Price of energy.

Electric energy		17 ¥/kWh
Coal	11 ¥/kg	3.80 ¥/kWh
LNG	45 ¥/Nm ³	3.95 ¥/kWh

Table2 CO₂ generation rate.

Electric energy	0.555 kg-CO ₂ /kWh
Coal	0.832 kg-CO ₂ /kWh
LNG	0.183 kg-CO ₂ /kWh

Table3 CO₂ generation rate and energy cost.

CO ₂ generation rate	443.9 kg/ton
energy cost	7907 ¥/ton

これら4種類の操業結果をTable4に示す。

また、関東、中部、関西の3地区で採取した等級別ヘビー屑（HS, H1, H2, H3）を、10ton電気炉で石炭量、酸素吹き込み量一定の条件により、単独溶解実験を行った（12種類）。これらの操業データ解析により、エネルギー原単位、CO₂排出量に及ぼす、石炭添加、酸素吹き込みの影響を評価した。

3.1 Znの少ないスクラップをC源、酸素吹き込み無しで操業した結果の評価

Table4に示すC/S；O₂無の操業結果を用いて、CO₂発生原単位、エネルギーコストを求めた。このTableの値はほとんどが実績値であるが、ガス発生量だけは次のように計算した。少量添加された石炭はCO、H₂Oまで燃焼するとして、ダスト中Zn、ダスト中・スラグ中FeはZnO、Fe₂O₃に酸化されるとしてガス発生量を算出した。その結果ガス発生量は31.42Nm³/tonとなり、排ガス温度を1350℃として排ガス顕熱を計算した。Fig.1と同様に、各項目のエネルギー原単位を算出した。電力ロス、水冷ロスはFig.1の電力原単位、総エネルギー原単位に対する比率を用いた。計算されたエネルギーバランスをTable5に示す。不明項は9.6%存在するが、Fig.1に示す電気炉130tonに対して、Table4は10tonと規模が小さいので、電力ロス、水冷ロス比率は過大に評価されていると思われるため、エネルギーバランスは妥当と考える。

Table5とFig.1を比較すると、C源燃焼、酸素吹き込みの無い場合は、電力源単位は上昇するが、総エネルギー原単位は

Table5 Energy balance in C/S without oxygen (unit : kWh/ton).

Input heat	Electric energy	502.9
	C oxidation	5.2
	Metal oxidation	39.7
	Burner combustion	0
	total	547.9
Output heat	Electric loss	35.2
	Water cooler loss	33.4
	Slag sensible heat	39.5
	Metal sensible heat	370
	Off-gas sensible heat	17.2
	total	495.3
Unclear		52.6

Table4 Operation results in several conditions.

	Electric energy (kWh/ton)	Coal (kg/ton)	O ₂ (Nm ³ /ton)	Gas generation (Nm ³ /ton)	Dust (kg/ton)	Zn in dust (kg/ton)	Fe in dust (kg/ton)	Slag (kg/ton)	Fe in slag (kg/ton)	Input Zn (kg/ton)	Fe(slag)/Fe(dust) (-)
Zn-NP; with O ₂	526.6	16.28	13.16	86.95	22.94	7.88	5.87	117.4	31.1	8.489	5.304
Zn-NP; without O ₂	574.7	2.41	0.00	76.96	17.51	7.83	3.08	135.1	48.7	9.322	15.829
C/S; with O ₂	491.7	14.54	18.09	59.43	13.82	2.30	4.21	116.6	40.7	2.613	9.671
C/S; without O ₂	502.9	1.80	0.00	31.42	12.82	2.50	3.60	71.0	14.0	2.430	3.886

低下しており、またTable6 (Table5より算出したエネルギーコスト、CO₂排出源単位)とTable3の比較により、エネルギーコストは増加するが、CO₂排出源単位は低下する結果が得られた。

3.2 ダスト発生量、スラグ生成量の推定方法

笹本³⁾は、Znのダストへの移行は揮発により、Feのダストへの移行はバブル・バーストによると説明している。後にGuezennec⁸⁾は同様のダスト発生機構を提唱している。この前提を踏まえて、Table4に示す操作結果を基に、ダスト発生量、スラグ生成量の推定を行った。次に示すFigureのうち、Fig.5だけは、3地区の等級別ヘビー屑 (4種類) の操作結果を用いている。

これらのFigureから判明した事項は下記のとおりである。

Table6 CO₂ generation rate and energy cost in C/S without oxygen.

CO ₂ generation rate	283.5	kg/ton
energy cost	8570	¥/ton

- (1) ダスト中Zn量は装入Zn量でほぼ一義的に決まる。装入Znのほぼ全量がダストへ移行する (Fig.2)。
- (2) 生成ガス量はダスト中への (Zn + Fe) 移行量を律速している (Fig.3)。
- (3) ダストへの (Zn + Fe) 移行量が決めれば、ダスト発生量はほぼ一義的に決まる (Fig.4)。バブル・バーストはFeだけでなくZnの移行量をも支配している。
- (4) ダスト中Fe量は、Feのスラグとメタルの分配比の関数である (Fig.5)。これにより、スラグへのFe移行量が決まる。
- (5) スラグ中へのFeの移行量が決めればスラグ生成量が決まる (Fig.6)。

3.3 ダスト発生メカニズムに関する考察

Table4に示すC/S ; O₂無の操作結果を用いて、ダスト発生メカニズムに関する考察を行った。10ton電炉操作中に15分間隔でダストを採取し、ダスト中Zn、Feを分析した。ダストは溶解初期より発生し、溶解期最後で急激に量が増加し、

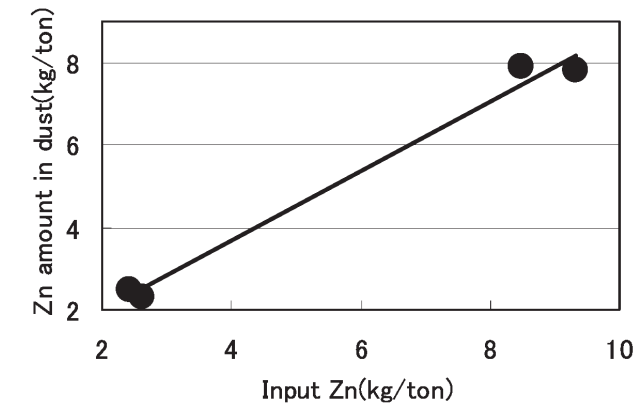


Fig.2 Relation between input Zn and Zn amount in dust.

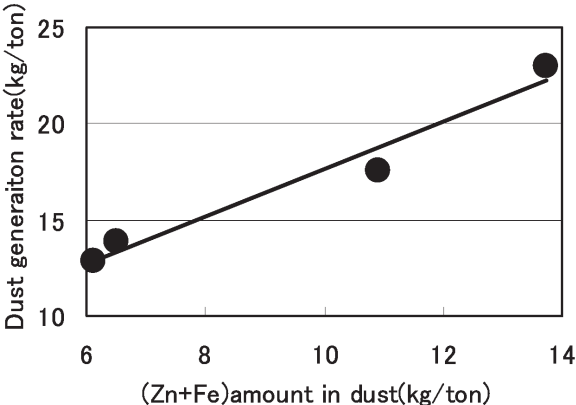


Fig.4 Relation between (Zn + Fe) amount in dust and dust generation rate.

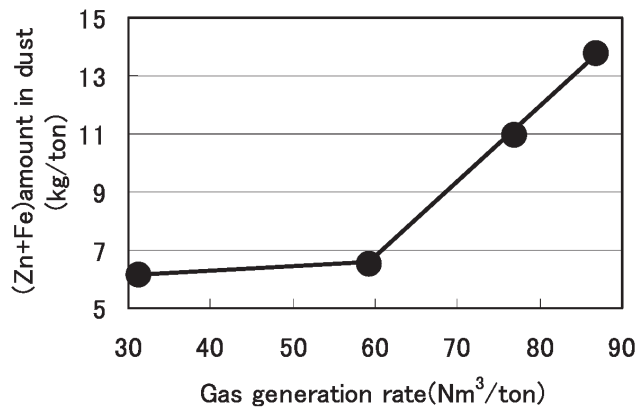


Fig.3 Relation between gas generation rate and (Zn + Fe) amount in dust.

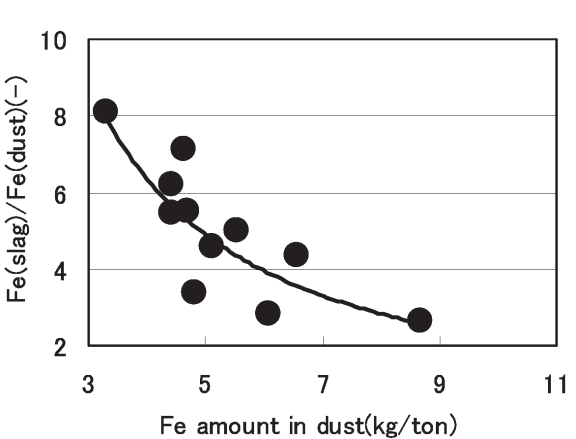


Fig.5 Relation between Fe amount in dust and Fe (slag) /Fe (dust) .

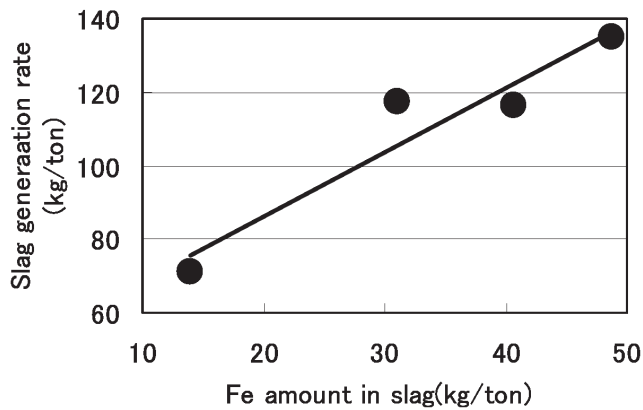


Fig.6 Relation between Fe amount in slag and slag generation rate.

酸化期に入ると減少する。ダスト中Zn、Fe組成から、ZnO、Fe₂O₃、ZnO・Fe₂O₃（亜鉛フェライト）量を算出する。亜鉛フェライトの等モル組成に対して、余剰の亜鉛と鉄はZnO、Fe₂O₃量単独で存在するとした。Fig.7に示すように、溶解初期は、ZnO・Fe₂O₃とFe₂O₃が存在するが、それ以降は少量のZnOとZnO・Fe₂O₃の組成となっている。Mは溶解期、Oは酸化期を示し、最後は平均組成である。

これらの時系列組成から、ダスト発生メカニズムを次のように考えた。

溶解初期よりアーク熱でスクラップFeとスクラップ中Znの酸化が起り、両酸化物がZnO・Fe₂O₃を生成する。ZnO生成はFe₂O₃生成よりも少し遅れ、溶解初期はZnO・Fe₂O₃とFe₂O₃が、バブル・バーストによりダスト中へ移行する。その後もZnO・Fe₂O₃の移行は続くが、ZnO・Fe₂O₃とならない少量のZnOは、少量添加したC源（石炭）により還元されてZn（g）としてダストへ移行する。スクラップ中Zn量が少ないのでZnO生成量は少なく、結果としてFe₂O₃生成量も少なく、ダスト発生量が少ないと考えた。この考察では、バブル・バーストによりダストへ移行するのは、Fe₂O₃だけではなく、ZnO・Fe₂O₃も移行する可能性を示唆している。

4 容量130tonの電炉操業におけるダスト発生量、スラグ生成量の算出

Fig.1に示す標準的な電炉操業（C源、酸素吹き込み有り）におけるダスト発生量、スラグ生成量を算出した。スラグ顕熱（45kWh/ton-steel）の値を用いると、スラグ比熱、スラグ温度（1600℃）より、スラグ生成量は81kg/tonと算出される。一方ダスト発生量に関しては、ダスト中Zn量、Fe量を電炉の標準的な値として、それぞれ3.3、4.6kg/tonと設定し、3.2で述べた推定方法を適用すると、15.0kg/tonと算出される。

これらの値を、10ton炉操業結果であるC源、酸素吹き込

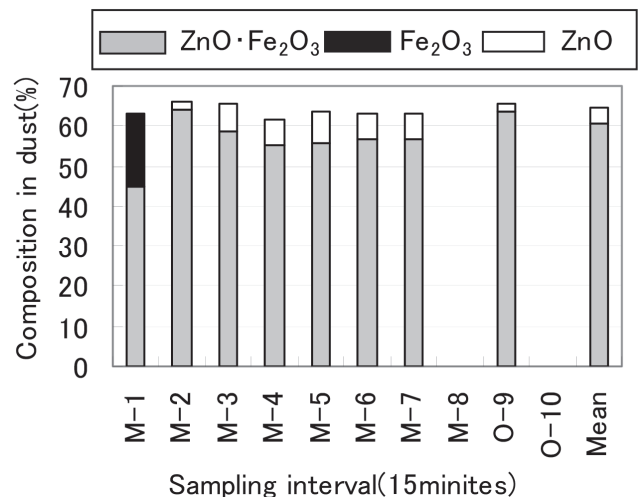


Fig.7 Composition in dust with the passage of time.

み無し（Table4のC/S；O₂無）と比較すると、ダスト発生量、スラグ生成量共に増加しており、C源、酸素吹き込みは、これら両者の量を増加させていることが分かる。Table4のC/S；O₂無とC/S；O₂有との比較でも同様の傾向が分かる。

5 本考察の纏めと今後の方向性

現在の標準的な電炉操業（容量130ton級）においては、高価な電気代を節減するために、C源、酸素吹き込みを実施している。この操業の特徴は下記のとおりである。

- (1) 電気代節減によりエネルギーコストは低下しているが、C源使用によりCO₂排出量は増加している。
- (2) またダスト発生量、スラグ生成量も増加しており、これらの処理コストが製造コストに上積みされている。
- (3) 排ガスのロスが極めて多く、総エネルギー量の36.4%を占めている⁵⁾。
- (4) 排ガス量の多いことが、ダスト発生量、スラグ生成量増加に繋がっている^{3,4)}。
- (5) 排ガスによるスクラップ予熱を積極的に実施しているが、それでも排ガスのロスは24.4%とまだ多い⁵⁾。

上記特徴（課題）を解決するために、下記の操業改善を行う必要があると考えられる。

- (1) 電炉の最大の特徴である低CO₂排出プロセスを最大限に生かすために、使用しているC源、酸素吹き込み量を減少させるアクションを実施し、エネルギーコストとCO₂排出量の両者を鑑みた最適エネルギーバランスを見出す必要がある。
- (2) ただし、C源使用には電気代節減の他に、スラグ中酸化鉄を還元することによりスラグ中Feを15～25%に維持する役割を持っており、その役割の評価を踏まえる必要

がある。

- (3) また、酸素吹き込みは、アークによるスクラップ加熱領域（ホットスポット）以外の領域のスクラップを効率的に加熱する役割を持っており、同様にこの役割の評価も踏まえる必要がある。
- (4) ダスト発生に関しては、これまでの揮発、バブル・バーストの機構をベースにして、Zn、Feのダスト中への移行機構の基礎研究が必要であるとする。その研究シーズからダスト発生量低減、ひいてはスラグ生成量低減の導出に繋げる。
- (5) 排ガスによるスクラップ予熱は、ダスト発生量低下をもたらしているが、スラグ生成量は低下しておらず、かつダスト中Zn濃度は40%程度に止まっており、未だ産廃処理の域を出ていない。さらなるZn濃度向上の開発が必要である。

参考文献

- 1) 長坂徹也：第205・206回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(2011)，83.
- 2) H.Sasamoto and A.Fujisawa：Proc. Electric Furnace Conf. Proc., Iron and Steel Soc., (1997)，123.
- 3) 笹本博彦：東北大学学位論文，(2003年3月24日)。
- 4) EAF Dust Treatment, ed. by K. Matsubae and T. Nagasaka, ISIJ Innovative Program for Advanced Technology, The Iron and Steel Institute of Japan, (2012)。
- 5) 関隆太郎：産業機械，(2012) 2, 16.
- 6) http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf
- 7) 鉄鋼技術共同研究会特殊鋼部会報告書：鉄と鋼，46(1960) 13, 1605.
- 8) A.-G.Guezennec, J.-C.Huber, F.Patisson, P.Sessiecq, J.-P.Birat and D.Ablitzer: Powder Technol., 157 (2005), 2.

(2021年9月16日受付)