



日本の電気炉の将来

牧 敏道
Toshimichi Maki

NKK プラントエンジニアリング本部
製鋼圧延部 主幹

Prospective Electric Arc Furnace Technology in Japan

1 はじめに

我が国の電気炉製鋼は、今後、経済の成熟化が進む中で、生産量の増大よりもコスト・環境に重点を置くことになるだろう。電気炉は、鉄源(スクラップ)リサイクルの大きな一翼を担っており今後もその役割は大きくなることはあっても小さくなることはないだろう。この視点における技術的な課題は、コスト競争力を強化しつつ、ダイオキシン類の排出規制など環境問題の改善に対応することであろう。エネルギーに関するコスト競争力強化は、エネルギー単位の改善と同じ意味であり、これは電気炉製鋼における炭酸ガス排出量の低減に繋がり、地球環境改善の一助となる。つまり、将来の電気炉に対するキーワードは、環境に対する課題を解決することとコスト競争力を強化することである。

まず、環境に対しては、以下の課題があり、

- 1) 排ガス中のダイオキシン類排出規制をクリアすること
 - 2) 炉周り作業場の浮遊ダスト、騒音、ダイオキシン類の削減による環境改善
 - 3) エネルギー原単位の低減やエネルギーミックス最適化によるCO₂の発生量の改善
- コスト競争力強化のためには、
- 1) エネルギー費最小化のための省エネルギー・省電力
 - 2) 安定操業と生産性の向上
- などがある。

上記の課題を解決する電気炉のイメージは、次の要件を満足するものであろう。

- 1) ダイオキシン類対策を容易にするために排ガスを最小化し、炉前の作業環境を改善するために騒音を低減し、浮遊ダストを最小化できる電気炉、すなわち密閉型の電気炉
- 2) 排ガスの排出エネルギー最小化のための強化されたスクラップ予熱型電気炉

3) 安定操業を達成できるシンプルな電気炉

4) リサイクルの観点からスクラップを選ばない電気炉

ここでは、現状の電気炉と比較しながら、将来の電気炉のあるべき方向について述べたい。

2 現状

我が国における電気炉製鋼において、先ず早急に解決しなければならない課題は、環境面における集塵機出口排ガス中のダイオキシン類濃度を規制値以下にすることである。さらに、炉周り作業環境の改善すなわち浮遊ダスト濃度、雰囲気中のダイオキシン濃度を低減することである。もちろん、競争力強化のためのコストダウンについては言うまでもない。

2.1 環境問題—ダイオキシン類問題

我が国におけるダイオキシン類問題は、1983年都市ゴミ焼却炉の集塵灰からダイオキシン類が検出されたことに端を発している。

電気炉業界においては、1996年に排出抑制のガイドラインが策定された。また、大気汚染防止施行令の一部改正により指定物質にダイオキシン類が追加され、製鋼用電気炉が指定物質排出施設に指定されるとともに、表1に示す指定物質抑制基準が制定された¹⁾。今後、規制は広がり、土壌、水質、ダストについても環境基準が設定されることになるであろう。この状況において電気炉業界は、ダイオキシン類の規制値対策が急務となっている。

最近の研究によると「ダイオキシン類は排ガスの二次燃焼によって作られる800℃以上の雰囲気で約2秒間滞留すると分解される。その後、排ガスを急冷却することによりダイオキシン類の再合成を抑制し、かつ、集塵装置入口の排ガス温度を70℃以下にすることによりダイオキシン類排

表1 電気炉の指定物質抑制基準

指定物質排出施設(政令)	指定物質抑制基準(告示)
製鋼の用に供する電気炉(铸鋼または鍛鋼の製造の用に供するものを除く) であって、変圧器の定格容量が1000kVA以上のも	新設: 0.5ng-TEQ/m ³ N 既設: 5.0 ng-TEQ/m ³ N

付則: 既設施設に係わる基準は、平成10年12月1日より平成14年11月30日までは、80ng-TEQ/m³Nとする

出基準を満足できる」との成果が日本鉄鋼連盟の「電炉排ガス研究委員会」によってなされている。すなわち、技術的には上記条件を作ることは可能であるので、この課題は解決できる。しかし、現実の電気炉排ガス量は決して小さいものではなく、また、二次燃焼装置および冷却装置の容量が排ガス量にほぼ比例するため、設備設置の費用や設置スペースが相当大きくなるので、設備化を実施することは、容易なことではないと考えられる。

作業環境に関しても炉前のダイオキシン類調査が進み、まもなく、ガイドラインが制定されるだろう。スクラップを装入するときの発塵、溶解中の吹き出しによる発塵、出鋼時の発塵が現状の電気炉の構造や操業条件では避けられない。炉前の雰囲気は、製鋼工場のレイアウトや集塵の方式によっているので、現状の電気炉およびその操業方法が変わらなければ、多くの場合、この課題解決もまた容易ではない。

電気炉におけるダイオキシン類の発生メカニズムは、未だ十分には解明されていないが、電気炉装入材料中の塩素がダイオキシン類の発生に大きく関与していることは間違いない。今後、現在活動中の「電炉排ガス研究委員会」などで発生メカニズムが解明され、発生の抑制対策の確立が期待される。

2.2 エネルギー費

電気炉製鋼におけるコスト構成は、設備償却費、材料費、エネルギー費、人件費などであるが、ここでは、エネルギー費に注目する。電気炉に投入されるエネルギーは、電力、コークスやオイルなどによる酸化熱源、溶解過程で発生する鉄および非鉄金属の酸化熱源である。一般的に、エネルギー費に占める電力の割合が高く、電力原単位の少ない方が、投入エネルギー費が少ないとの認識があった。ところが、最近では操業の夜間へのシフトが進み電力単価が安価になっているので、これは必ず正しい認識とは言えなくなっている。

電力原単位は1970年当時500kWh/tを越えていたが、1980年代後半には、350~400kWh/tまで改善された。この大幅な電力原単位の削減は、電力代替えとして酸素富化による炭素源やオイルの燃焼熱を増やしたこと、電気炉の大

表2 現状のヒートバランス例

入熱	kWh/t	出熱	kWh/t
電力	380	溶鋼＋スラグ顕熱	420
炭素系酸化熱	236	排ガス	206
金属酸化熱	100	冷却水抜熱＋炉体放熱	60
		回路損失	30
合計	716	合計	716

型化により生産性が向上したこと、高電圧・ロングアーク操業によるロスの低減、電気炉内での還元精錬を最小限とする取鍋精錬の導入などによりもたらされた²⁾。電力原単位の改善・低減は、常に重要なテーマであり、これは、電力(電源)制約を緩和できると共に、フリッカなど電源障害に優しくなる。

現状のヒートバランスの一例を表2に示す。電気炉における有効エネルギーは、出熱の内、溶鋼の顕熱Emとスラグの顕熱Esの和(E_m+E_s)として表される。投入エネルギーの最小化を図るには、まず、有効エネルギー(E_m+E_s)を最小にしなければならない。可能な限り出鋼温度を低くして、温度のみに依存する溶鋼の顕熱Emを小さくしなければならない。高い出鋼温度は、投入エネルギーのみならず製鋼時間が延びることによる生産性に対する悪影響を与える。次に、スラグ量をできるだけ少なくすることによりスラグの顕熱を少なくすることである。これらにより、有効エネルギーが最小化できる。しかし、安定操業や鋼種要求を満たす範囲でなければならない。

無効エネルギー(エネルギーロス)は、排ガスによって持ち出される熱量E_g、炉体からの放熱や炉体冷却水への抜熱量E_w、給電回路でのジュール発熱量E_eの和E_{loss}として表される。表2によればE_{loss}は、296kWh/tであり、その約70%(206kWh/t)が排ガスによってもちだされる熱量E_gである。有効エネルギーを最小化するとともに、E_gの最小化を図ることが、投入エネルギーすなわち、エネルギー費最小化への近道である。

2.3 排ガスエネルギーの回収・ミニマイズ

簡易的に現状のヒートバランスを式で表わすと、入熱P_{in}、出熱P_{out}は式(1)、(2)となる。

$$Pin = Pe + Pc + Pm \quad \cdots (1)$$

$$Pout = Em + Es + Eg + Ew + Ee = Em + Es + Eloss \quad \cdots (2)$$

ここで、 Pe :投入電力量kWh/t、 Pc :炭素系燃焼熱kWh/t、 Pm :金属酸化熱kWh/t

有効エネルギー E_{effec} は、式(3)のように表される。

$$E_{effec} = Em + Es = \eta_e \cdot Pe + \eta_c \cdot Pc + \eta_m \cdot Pm \quad \cdots (3)$$

ここで、 Em :溶鋼顕熱kWh/t、 Es :スラグ顕熱kWh/t、 η_e :電力の着熱効率、 η_c :炭素燃焼熱の着熱効率、 η_m :金属酸化熱の着熱効率。左辺の $Em + Es$ は、操業要求により決定されるものであるので、一定と考えて良い。

また、無効エネルギーの総和 E_{loss} は式(4)で下記のように表される、

$$E_{loss} = Eg + Ew + Ee$$

$$= (1 - \eta_e) \cdot Pe + (1 - \eta_c) \cdot Pc + (1 - \eta_m) \cdot Pm \quad \cdots (4)$$

ここで、 Pe と Pc は操業データから得ることができる。また、 Pm は装入材料に依存するが、装入材料データ、排ガスの分析、ダスト分析、スラグ分析値から概略求めることができる。

表2に示したヒートバランスの数値を用いて、それぞれの効率 η_e 、 η_c および総合熱効率 η を著者の考え方に基づいて評価してみると、

$$(\eta_e, \eta_c) = (0.7, 0.24) \quad \cdots (5)$$

$$\eta = E_{effec} \div Pin = 0.59 \quad \cdots (6)$$

が得られる。ただし、ここでは、 η_m は、直接着熱で効率が高いので $\eta_m = 1.0$ とした。

式(5)から現状の η_c は、0.24と低く評価される。これをいかに改善するかが投入エネルギー最小化の最大のポイントである。

Pc 、 η_e を一定として、 $\eta_c = 0.4$ にまで高めると、電力原単位は、約330kWh/tとなり約50kWh/tの低減できることになる。さらに、 $\eta_e = 0.7$ と同様なレベルにまで η_c を改善すると電力原単位は、約230kWh/tとなり約150kWh/tの低減できることになる。

次に無効エネルギー E_{loss} の最小化について考える。 E_{loss} は、回路ロス E_e 、冷却水抜熱と炉体放熱 E_w 、排ガス E_g に分けられる。

E_e は、電流回路の長さや電流密度に依存し、その大きさは、 Pe の8～10%程度である。設備的にこれを大幅に小さくすることは困難である。

E_w は、溶解炉の構造や溶解の過程に依存する。アーク熱がスクラップやスラグで覆われている状態では、炉体冷却水などへの抜熱は小さい。しかし、オープンアーク状態になると、 E_w は極端に増加することが確認されている。常に、アーク熱をスクラップやスラグでできるだけ覆うように努めなければならない。つまり、 E_w は電力(Pe)依存が強いと

いえる。

炭素系酸化熱を主とする炉内で発生した排ガスが炉内でスクラップと熱交換しながら排ガスとして持ち出されるエネルギーが E_g である。炉内に十分なスクラップがない状態では、熱交換が不十分となり、 E_g は大きくなる。つまり、 E_g は Pc と η_c への依存性が高いといえる。

2.3.1 E_g の最小化のために：熱負荷増大と排熱利用

E_g の低減(η_c の向上)は、排ガスと装入材料との熱交換(装入材料の排ガスによる予熱)によってなされる。1980年頃、オイルショックによる省エネルギー設備として電気炉系外に設置された排ガスを利用した「スクラップ予熱装置」が開発され、国内で約50基建設された。これは、 E_g の低減に寄与し、電力原単位で20～40kWh/t低減($\eta_c = 0.31 \sim 0.38$ に向上)をもたらし、ある程度の省エネルギー評価を得た。しかしながら、予熱されたスクラップを炉に装入する間に発生する白煙・悪臭により工場内の環境が悪化したことや集塵機出口から排出される白煙・悪臭が工場周辺の環境問題となった。これらに対する経済的解決方法が見当たらず多くの「スクラップ予熱装置」は運転されず廃棄された。

近年、予熱装置と電気炉が一体化したシステムが開発され少なくとも工場内環境の悪化問題は解決した。さらに、予熱割合の最大化による E_g の最小化のために当ヒート予熱から次ヒート予熱へと予熱率の拡大がなされている。

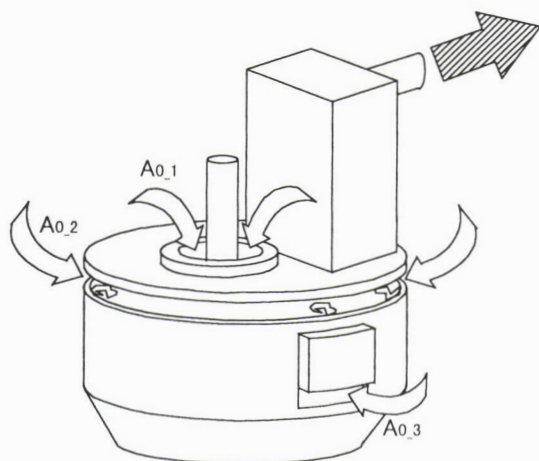
表3に最近のスクラップ予熱装置と一体化した電気炉のヒートバランスを示す。また、表4に η_c の比較を示す。 η_c は最大0.49となり従来電気炉にくらべて約2倍にまで改善されてる。電力の着熱効率も約10%向上し77%となっている。

表3 最近の予熱装置と一体化した電気炉のヒートバランス例

入熱	kWh/t	出熱	kWh/t
電力	270	溶鋼+スラグ顕熱	420
炭素系酸化熱	232	排ガス	100
金属酸化熱	100	冷却水抜熱+炉体放熱	60
		回路損失	22
合計	602	合計	602

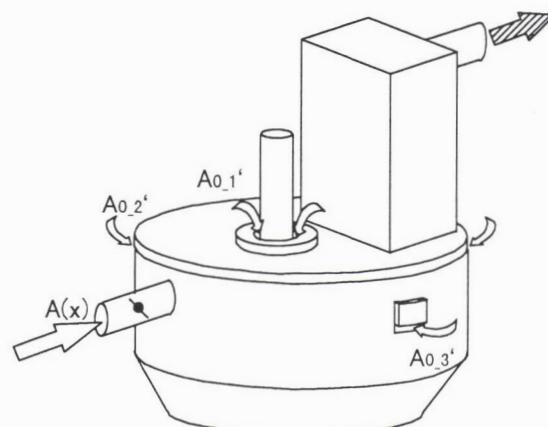
表4 η_c の比較

	η_c
従来電気炉	0.24
系外予熱装置付電気炉	0.31～0.38
予熱装置と一体化した電気炉	0.49
安定運転重点を置いた場合	0.45



A0.1: 電極孔周り開口
A0.2: 炉蓋／炉体間開口
A0.3: 作業口開口

図1 現状電気炉の開口面積



A0.1': 電極孔周り開口の最小化
A0.2': 炉蓋／炉体間開口のシール強化
A0.3': 排滓に特化した作業口
A(X): 可変な開口

図2 侵入空気の最適化

しかし、電力原単位の低減は達成可能となったが、設備に対する熱負荷が増大(熱ロスの増大)し、安定操業には課題がある。安定操業のために、 η_c を0.45程度以上には高められないのが、現状の運転限界のようである。

また、スクラップ予熱による工場内における環境の悪化は解決されたが、集塵機から排出される排ガスによる工場周辺への白煙・悪臭問題は解決されたわけではない。これを解決するためにダイオキシン類対策と同様予熱後の排ガス温度を800℃以上にしなければならない。予熱後の排ガス温度は高々200℃程度である。これを800℃にまで高めるための追加エネルギーが必要となる。

2.3.2 Egの最小化のために：開口面積が大きい

Egは、排ガス流量Qg、排ガス温度Tgと排ガス潜熱分Rlで次のように表される。

$$Eg = Qg \cdot (I(Tg) + Rl)$$

ここで、 $I(Tg)$ ：排ガスのエンタルピー。潜熱Rlは、ほとんど排ガス中のCO濃度で決まっている。

図1に示すように、現状の電気炉は、開放炉ではないが電極孔周り、排滓や炉内観察のための作業口、スクラップを装入するために開閉する炉蓋と炉体との隙間などかなりの開口部がある。とりわけ、炉蓋と炉体の間にはスクラップが挟まり大きな開口部となることが多い。作業環境を考慮して炉からの吹き出し量を少なくするために、炉内を負圧にしなければならない。開口部から炉内への侵入空気量Qiは、概略次のように表わされる。

$$Qi \sim A \cdot p^{0.5}$$

ここで、A：開口面積、p：炉内圧(大気との差圧)

Qiが多くなり、Qgが必要な流量の数倍に達することも多く見られる。炉内での二次燃焼は、侵入空気中の酸素によってなされるべきであり必要なものであるが、過度な侵入空気は、炉内から熱を持ち出し、Egを増加させるだけでなく酸素濃度が高くなり炉内での意図しない酸化反応により操業に悪影響を及ぼすことが多い。侵入空気量は、開口面積Aと炉内圧pとにより決定されるが、炉内圧の制御は過去において試みられたが安定せず現在使用されていない。開口面積Aは、次式を満足するべきである。

$$A = A0 + A(x)$$

ここで、A0：固定の開口面積、A(x)：炉内の状況に応じて変化する可変な開口面積である。

現状の電気炉では、可変項は、作業口回りの開口面積のみである。その他の開口面積は、制御できない項であってその値が十分に大きいので問題があるのである。侵入空気量の最適化のためには、固定の開口部が十分に小さい炉構造とし、また、スクラップの装入方法など操業の見直しが必要となる(図2)。

2.3.3 Egの最小化のために：課題解決対策

2.3.1で述べた課題は、排ガスに接触する機器が熱負荷のため不安定になったり、予熱スクラップの酸化・融着が発生することにより操業が不安定になることに対する対策である。この原因は、制御できない開口部からの侵入空気により排ガスの二次燃焼に必要な酸素より多くの酸素が存在するために、酸素濃度が高くなることであり、かつ、炉内排ガス燃焼空間にはスクラップがなく排ガス温度が2,000℃を超えるためである。熱負荷への対応は、機器の耐

熱性を上げることであるが、機械的強度と耐熱強度は相反する性質があり両者を満足できる材料・構造設計は簡単ではない。機器を無くするか、高温排ガスと直接接することがないような工夫、たとえば、つねにスクラップがあるような工夫が必要であろう。次に、排ガス中の酸素濃度を低く保つことにより予熱スクラップの酸化を抑制し融着を起こさないことが知られているので、酸素濃度を低く保てば良い。2.3.2で述べた開口面積に対する課題は、制御できない十分に大きい開口面積に対する対策である。従来電気炉のスクラップの装入方法、出鋼方法、炉内点検・補修の方法などからの構造に対するイメージを変え、炉体と炉蓋との隙間としての開口面積をミニマイズしなければならないし、センサーの利用や自動化・省力化設備の導入によりその他の開口面積も小さくしなければならない。

3 将来に向けての対策

環境およびエネルギーの観点で、将来に向けての対策を以下に示す。

3.1 ダイオキシン対策

排ガス中のダイオキシン類は、同じく排ガス中のダストに吸着される。とりわけ、排ガス温度が低くなるとダイオキシン類の凝集によりこの傾向は強くなる。すなわち、集塵装置入口の排ガス温度を70～90℃に冷却することにより、吸着効果が高まり規制値を満足できる。排ガスの冷却は、①冷却水の吹き込みによる直接冷却、②水冷ダクトなどによる間接冷却、③建屋集塵(外気)との混合による希釈法の何れかによる。冷却水の直接吹き込みによる冷却は、排ガス中の水分濃度が高くなり露点の問題を考慮しなければならない。間接冷却では、設備費および設置スペースに問題がある。建屋集塵併用型で現状でも排ガス温度が70℃と低い集塵装置を除いて希釈法は処理風量が増加することになり、現実的な排ガス冷却は上記の組み合わせとなる。しかし、この排ガス温度を下げる方法は、排ガス中のダイオキシン類濃度を規制値以下にするだけで、ダイオキシン類そのものがなくなったわけではなく、ダストに集約されるだけである。これは、将来のことを考えると根本的な解決策とは言えない。

前述したように、排ガスの温度を800℃以上で約2秒間維持するとダイオキシン類は、熱分解する。現実には、排ガス系統で常に排ガス温度が800℃以上というところはない。スクラップ予熱後の排ガス温度が800℃以上であるとは考えられない。つまり、何らかの熱源を付加することによって排ガス温度を800℃以上にしなければならない。炉容量・

生産性にもよるが数例の試算によればこの付加エネルギーは、灯油で約20l/tと評価されている。燃料コストだけではなく、排ガスが2秒間滞留できる燃焼室や急冷のための冷却室などの設備の新設となる。この付加増の軽減には、集塵風量の最小化が最も効果的である。

3.2 投入エネルギーミックスによるエネルギー費対策

投入エネルギーは、電力・炭素系燃焼熱・金属酸化熱である。現状の電気炉において炭素系燃焼熱の着熱効率は概略0.24～0.49であり、電力の着熱効率は、0.7である。炭素系燃焼熱を増やせば、電力を減らすことができる。エネルギーコストでの評価は、それぞれの着熱効率と単価を考慮してそれぞれの使用量比を決定すべきである。コークス：15円/kg、酸素：10円/m³N、電力：5円/kWhとして試算すると、 $\eta_c=0.40$ (一般的には、 $\eta_c/\eta_e=0.57$)が炭素系燃焼熱と電力の使用量境界となる。表2に示したヒートバランスでは、 η_c は0.24であった。この場合、電力に十分な供給能力があれば投入エネルギーを電力にシフトすべきということになる。一方、 $\eta_c>0.40$ であれば、炭素系燃焼を増やせばトータルコストを低減できることになる。炭素系燃焼は、どこまで増やすことができるかが課題である。

現状の予熱型電気炉における炭素系燃焼熱は、安定操業の観点から250kWh/t(それに使用する酸素原単位で35m³N/t程度)が限界と評価している。さらに、 η_c を高め、炭素系燃焼を増やし、電力原単位を低減できる電気炉が次世代への電気炉の課題である。

この課題を解決するキーワードは、なぜ炭素系燃焼熱(酸素の使用量)が限定されるのかということである。設備の破損につながらないようなプロセスの提案が必要となる。

金属酸化熱を増やすことに関しては、装入材料の単価と製造鋼種の関係が複雑なのでここでは、言及しない。

3.3 炭酸ガス削減の観点での評価

エネルギーコスト最小化の観点で述べてきたが、ここでは地球環境・炭酸ガス排出削減での観点で見ると、投入エネルギーの内、電力の炭酸ガス発生量 V_{CO_2} をいくらに評価するかである。我が国の現状における発電割合において、[電気事業連合会調べ]によると、 $V_{CO_2}=0.36\text{kg/kWh}$ とされている。

炭素系燃焼熱においては、炭化水素も考慮して、0.31kg/kWh、酸素製造の電力原単位は0.5kWh/m³Nであるので、単位あたり発生炭酸ガスVTは、

$$VT=0.36 \times (Pe+0.5 \times Qo)+0.31 \times Pc+ETC \cdots (7)$$

ここで、 Qo ：酸素原単位、ETC：輸送やその他の工程で発生する炭酸ガス。簡単にするためにETCは一定とする。

式(7)から電力の代替えとして炭素系燃焼熱を増やすのは、 $\eta_c > \eta_e$ を満足しない限り $V(T)$ の意味では得策ではなくなる。しかし、 V_{CO_2} が変わればもちろん評価は変わる。つまり、発電割合、発電効率つまり、国・地域により VT の評価は異なることになる。

いずれにしても各種着熱効率を高め $V(T)$ の最小化を図らなければならない。

4 まとめ

我が国の将来の電気炉は、環境規制要求とコスト競争力強化ということを同時に満足しなければならない。これを達成するための要件を以下に挙げると、

- 1) ダイオキシン類排出基準や白煙・悪臭問題を簡単かつコストミニマムでクリアするために、排ガス量を必要最小限にする。
- 2) 排ガス量を制御できる構造、すなわち、できるだけ一

体化した構造にし、予熱による問題点を排除するために電気炉内排ガス中の酸素濃度を一定値以下にする。

- 3) 炭素系燃焼熱の着熱効率 η_c の最大化を図り、電力原単位を最小化する。
 - 4) 炉内の高温雰囲気に対して予熱効率を高めるとともに安定運転を可能にするため予熱機構をシンプルにする。
 - 5) スクラップの装入による発塵や通電中の発塵を最小化できる構造とし、炉前の作業環境を改善する。
- となる。これが、筆者の考える我が国の将来のあるべき電気炉の姿である。

参考文献

- 1) 電気炉排ガス対策技術開発成果報告書, 日本鉄鋼連盟: (1999)
- 2) 第114・115回 西山記念技術講座 最近の電気炉操業技術の進歩, 日本鉄鋼協会, (1986)

(2000年2月28日受付)