



日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-8

# 主として普通鋼のアーキ炉製鋼における生産性向上の歴史

—LF導入からEBTの普及に至るまで—

Successful Story in Electric Arc Furnace Steel Making Process

—The Installation of the LF, the Spread of the EBT, and Improvement of the Productivity—

トビー海運(株) 代表取締役  
社長

花田裕司 Yuji Hanada

トビー工業(株) 豊橋製造所  
開発技術部 製鋼技術グループ 課長

中村 毅 Tsuyoshi Nakamura

## 1 はじめに

我が国の製鋼法から平炉法が姿を消したのは1977年であった。その後、図1<sup>1)</sup>に示すように転炉、電気炉が並存して発展伸長を続け現在に至っている。電気炉操業は、戦後の復興期から1980年代における技術の飛躍期を経て、1990年代の技術多様期に至っているが、この経緯については既に「ふえらむ」<sup>2)</sup>にも詳しく述べられているので参照されたい。

普通鋼電気炉業界については、生産性の向上をはじめとして、アーキ炉操業技術の集大成は、まさしくアーキ炉から取鍋精錬炉(LF)への精錬機能の分離にはじまり、偏芯炉底出鋼方式(EBT)の普及で一応の仕上がりを見たと思われている筆者の独断と偏見をお許しいただき、表題のテーマで執筆させていただくこととした。なお、電気炉とアーキ炉の区分けについて若干のいきさつを述べたい。筆者は日本鉄鋼協会編による「アーキ炉製鋼法の進歩」第一版のとりまとめ小委員会の末席を汚した。ここでの企画編集会議において、電極アーキを熱源とするアーキ炉と電磁誘導作用のジュール熱を熱源とする電磁誘導炉及びその他の特殊溶解炉を区分する必

要があるとの結論に達した。以降共同研究会電気炉部会で論ずる電気炉は、アーキ炉と称することにしたことを、ここでお断りしておきたい。

## 2 アーク炉操業技術の動向と生産性

図2<sup>3)</sup>に示すように、1980年代から1990年代前半までの技術的動向を見ると、景気に左右されず発展、飛躍が計られている。これは、景気の伸び悩み時期は低コスト化、拡大期には量産化の希求という、基本的な二つの流れに沿った改善、改革を指向してきたことを物語っている。この底流と、鋼質の良化、環境改善などの要求が相俟って、我が国アーキ炉固有技術の発展・飛躍が計られたといつてよい。

アーキ炉とその周辺をとりまく固有技術の源流は、その多くが主にヨーロッパ発の要素技術から派生したものであった。しかしながら我が国鉄鋼業の目覚ましい発展期における『高生産性の追及』、『コスト縮減への挑戦』という大命題遂行にあたり、これら要素技術を萌芽として、我が国独自の固有技術を開花させた諸先輩の慧眼と努力に対しあらためて敬意を表するものである。

このように我が国のアーキ炉固有技術は、ある目的に限定した技術として論ずることは甚だ妥当性を欠くが、本稿ではあえて生産性向上という側面に拘泥して、各固有技術について論じたい。

### 2.1 我が国のアーキ炉における生産性向上技術の原点

アーキ炉業界においては、すでにあまりにも周知の生産性を主唱した式がある。この式は、我が国にはじめてアーキ炉の高生産性を標榜した理論式であろう<sup>4)</sup>。

$$t = P \times W \times 60 / (T \times \cos \theta \times \eta) + t' \quad \cdots \cdots (2-1)$$

ここで、tは製鋼時間、Pは溶鋼1tあたりの電力使用量

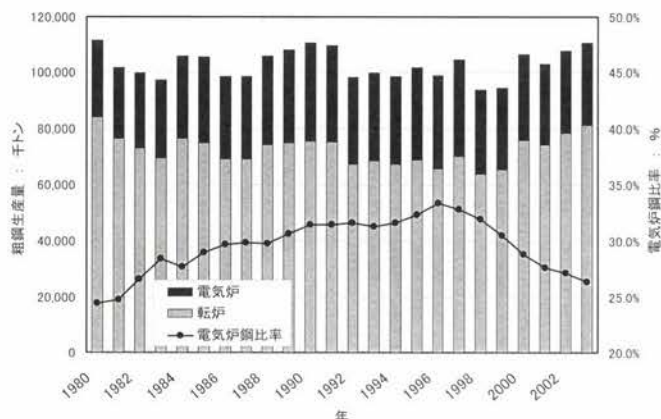


図1 日本における粗鋼生産の推移

(kwh/t)、Wは溶鋼総重量(t)、Tはトランス容量(KVA)、 $\cos \theta$ は操業効率、 $\eta$ は投入効率、 $t'$ は非通電時間を示す。

(2-1) 式の主張するところは、アーク炉の高生産性を実現するためには、大量の原料あるいは溶鋼に、大電力を高い効率をもって間断なく投入せねばならないことを強力に提起しているものであり、爾来多くの先人が、この理論式の極小化を目指して専心努力を重ねてきた。図3にはその一例としてアーク炉生産性とトランス容量との関係を示す。現在では100 MVAにも及ぶACアーク炉も現れ、トランスの大容量化が顕著となってきている。

## 2.2 エネルギーの投入技術

### 2.2.1 通電技術の進化

1965年米国のW.E.Shwarbeによって提唱された大電流(低力率)・大電力操業は、アーク炉の大容量化を引き起こし、その後順次大型化の傾向を強め、UHPの時代を迎える。表1<sup>5)</sup>に示すように、このことはとりもなおさず生産性向上の具現化そのものであったが、操業コストの面では不利な点も多く、次第に大電圧(高力率)・大電力操業へと移行し低コスト・高生産性操業を指向するようになった。

### 2.2.2 電力代替エネルギー投入技術

(2-1) 式の思想をより強力にサポートする手段として、より安価な代替エネルギーの希求に呼応した技術が次々と実用化された。その中の主なものは、下記の3点である。

- (1) オイルバーナと酸素富化操業
- (2) 助燃剤の吹き込みあるいはバケット内への入れ置き

- (3) 自己排出エネルギーのリサイクル(スクラッププリヒーター)

特に(1)、(2)については、共同研究会電気炉部会参加各社間で切磋琢磨しあい、また研鑽を重ね、アーク炉操業のコア技術として大成された。とりわけ(2)については、炭材の吹込みによって溶解から精錬に至るプロセスに、『精錬律速』に替わって『昇温律速』という新しい概念を生み、サブマージドアークの活用により溶鋼中のカーボン管理、炉壁保護技術を発展させ、生産性の向上に大きく寄与した。

## 2.3 鉄スクラップの管理

操業技術としては地味な部分であるが、鉄スクラップのかさ比重管理と溶解時間の関係はかなり官能的な側面は持つものの、地道に継続して得られた成果は、生産性向上のみなら

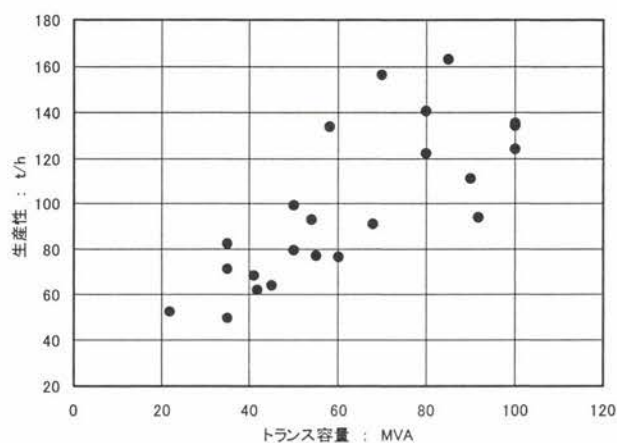


図3 アーク炉生産性とトランス容量の関係

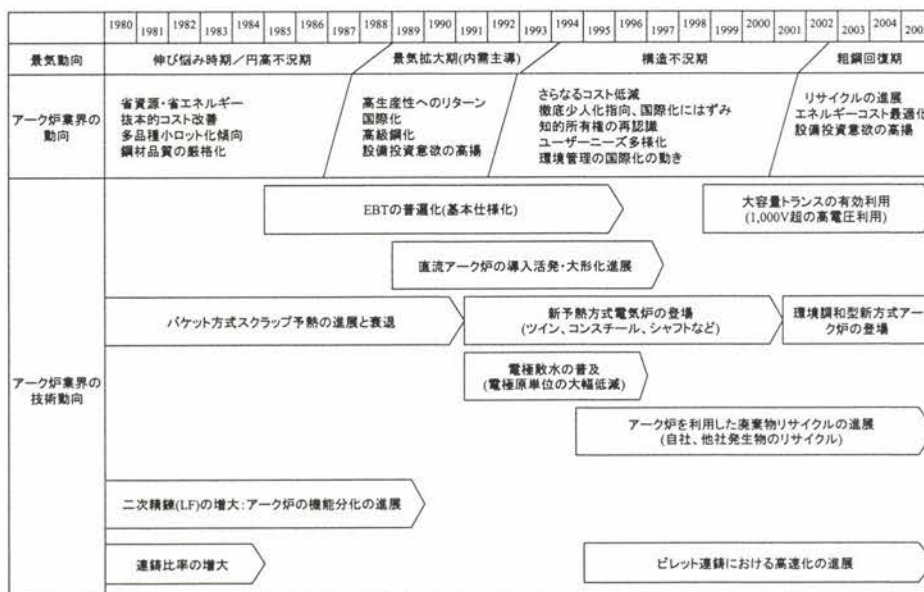


図2 アーク炉業界の技術的動向

表1 大型アーキ炉の技術的動向

| 項目             | UHP初期1960年～                                                 | ～1980年～                                                                               | ～2000年～                                   |
|----------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 比トランス容量(KVA/t) | 400～600                                                     | 増大傾向<br>投入電力は生産性を決定づける                                                                | 増大傾向(～1000)                               |
| トランスタップ電圧(V)   | 低                                                           | 高                                                                                     | さらに高い                                     |
| リアクタンス         | 低                                                           | 低～適正                                                                                  | 高(直列リアクトルによる)                             |
| 力率(%)          | 低(約70%)                                                     | 高(約85%)                                                                               | 中(82～75%)                                 |
| アーキV-I         | 低電圧－大電流                                                     | 高電圧－低電流                                                                               | さらに高電圧－さらに低電流                             |
| アーキプロフィール      | ショートアーキ                                                     | ロングアーキ                                                                                | さらにロングアーキ                                 |
| 考察             | ショートアーキは、<br>・アーキ安定性大<br>・バスへの着熱効率高い<br>・炉壁保護に有効<br>・短絡電流比小 | ロングアーキは、<br>・ポーリング穴を大きくする(放射伝熱大)。<br>・スクラップの位置変動に対する短絡が減少(電極がスクラップから離れるため)<br>・短絡電流比大 |                                           |
|                |                                                             |                                                                                       | ・短絡電流比小                                   |
| 利点             | ・生産性大<br>・フリッカ小                                             | ・生産性さらに大<br>・トランスの有効利用<br>・電極原単位小                                                     | ・生産性さらに大<br>・フリッカ小(アーキ安定傾向)<br>・電極原単位さらに小 |
| 問題点            | ・電極原単位大<br>・トランスの利用率低い<br>・大電流に起因する諸問題                      | ・アーキ安定傾向<br>・フリッカ大                                                                    | ・水冷設備へのスパーク頻度大                            |

ず鉄スクラップの購買政策にも影響を及ぼし、トータルコスト低減に貢献するところ極めて大きいものがあつた。

### 3 アーク炉操業の周辺技術

#### 3.1 連続鋳造技術

連続鋳造とアーキ炉操業との関係において、生産性という側面から特筆すべきは、高速鋳込みと鋳込速度の可変性に対する自由度及び多連鋳技術の飛躍的な向上であつた。アーキ炉サイドの弛まないサイクル時間の短縮努力は、そのまま連続鋳造サイドへの高速鋳込み化への要求となつた。

さらに、コストセーブには必須条件である多連鋳化とあわせて鋳込速度の広幅化も希求され続けてきたが、これら連続鋳造技術に厚恩を忝したがために、アーキ炉の生産性は一段と伸長したと言ってよい。

#### 3.2 耐火物と水冷機器

アーキ炉のサイクル時間と稼働率に大きく影響し、生産性を左右する要因となるものにアーキ炉耐火物の補修時間がある。2.2.1項で述べたように、アーキ炉操業が大電圧・大電力に傾斜してこられた陰には、耐火物の特性値改善努力と水冷機器の開発があつた。特にロングアーキに曝されるスラグライン付近と、つねに高熱を受け止めている天井耐火物の材質改善およびローカルコンディションを克服して、独創性に富んだ各社独自の水冷機器開発は大いに賞賛される。図4<sup>6)</sup>にはアーキ炉耐火物使用原単位を示す。

#### 3.3 電極

大電力操業の初期は、炉壁耐火物保護のため、大電流すな

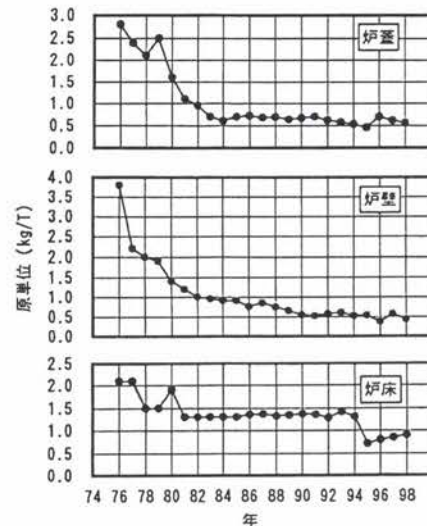


図4 アーク炉使用耐火物原単位の推移

わちショートアーキによる低力率操業をやむなしとしていたが、電極にとっては極めて過酷な使用条件となつていた。このため、過大な電流密度に起因する先端近傍でのスポーリング対策を一義的に考えざるを得ない状況にあつた。

しかしながら、マグネシアカーボンレンガなどの優れた耐火物と水冷機器の開発によって、大電圧すなわちロングアーキによる高力率操業が主流となつたため、電極材質改善努力は必ずしも大電流密度対策に偏る必要がなくなつた。その結果、耐折損、耐酸化消耗への絞り込みが可能となり、電極原単位は漸減した。

反面、アーキ炉操業自体は、エネルギー投入速度の高速化により電極にとっては依然として厳しい条件が続くことになつたが、メーカー、ユーザーのたゆまぬ協調体制により、技術的には種々課題を克服して、生産性の向上はもとよりコスト

トセーブの面でも大きな成果があった。

以上2項、3項に述べた種々の改善効果を図5に示す。

## 4 主として普通鋼における アーク炉操業技術と生産性

個々に独自性を発揮しながら、一方では相互に密接に関わり合いを持ちながら発展伸長してきたアーク炉の操業技術は、1980年代から1990年代にかけて固有技術の主線から離れ側線から広角に四顧して、新しく時を得た設備を体認することとなった。このことが既存の固有技術同士の相乗効果を醸成して、生産性の向上のみならずコストセーブ、鋼質の改善を一段と飛躍させる結果となった。

この時期新しく体認された設備として、筆者の独断と偏見ではあるが、LFとEBTを挙げさせていただきたい。固有技術の主線から離れ側線からの四顧とは、今や熱管理技術、QC技術とともに製造業においては独立した概念ではなく、まさに常識として位置付けられているIEの思想で思考してみることである。言い換えれば、固有技術と管理技術の融合であった。これまで述べてきたアーク炉関連の固有技術とその思潮を生産性という側面からIEの概念をもって俯瞰すれば、下記の式に縫合される。

$$E = M \times P \times T \dots\dots\dots (3-1)$$

ここでEは成果（出来高）で広義の生産性、Mは製造方式（操業技術、設備技術など）で創造的思考の成果、Pは実施効率（労働効率）で実施する人の能力や努力、Tは有効時間を示す。すでに述べた2-1式の思想と結果は、まさしく（3-1）式のMに相当し、アーク炉における生産性の原点である。また、その他有効な固有技術についてもMの重要因子である。

さらに言えば、操業の現場において、Eを最大ならしめる

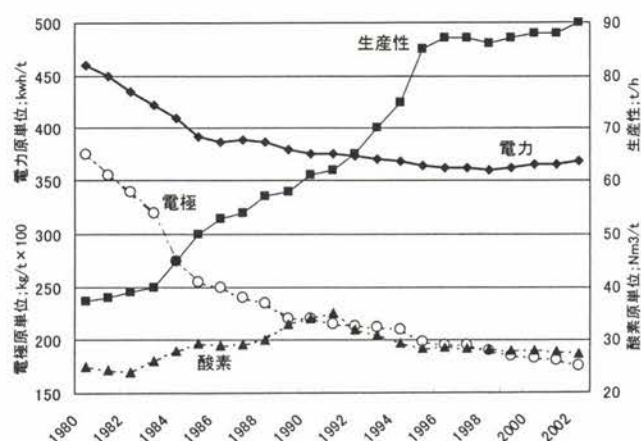


図5 アーク炉の生産能率、各種原単位の推移

ためには、

- (1) 技術、技能を具現化しやすい設備
- (2) 操業者のスキルを極力排除できる設備
- (3) 具備している機能を最大限に発揮できる設備あるいはそれらの配列

の実現が求められた。要するに、設備をスキルレスなものとし、設定した操業標準を簡単に履行できるシンプルなものに変革する必要がある。これらの要求に極めて適合した設備がLFであり、EBTであった。

### 4.1 LFの有効性

すでに周知のように、LFは1971年に我が国の特殊鋼メーカーが開発したものである。その後、開発したメーカーと一部の一貫メーカーで採用されていたが、その採用目的はアーク炉出鋼後の鋼質を改善するものであって、化学成分・溶鋼温度調整は当然のこととして、脱硫・脱酸が主なものであった。また、真空処理機能を併設して、脱ガス処理にも応用されていた。すなわち、鋼質の向上と安定が主目的であって、基本的にはアーク炉操業とは独立した関係にあったが、基本機能はアーク加熱とアルゴンガス攪拌という極めてシンプルな炉外精錬炉であった。

それまでのアーク炉操業パターンは、すでに昇温律速の普及を前提として考えると、アーク炉単独による下記のような操業パターンであった。

- a) 溶解期→昇熱期→出鋼（普通鋼メーカー）
- b) 溶解期→昇熱期→還元期→出鋼（普通鋼メーカー、特殊鋼メーカー）

b) のパターンを前項の主旨に沿って考えると二律背反の操業をひとつの設備で行っていたわけであり、極めて非効率と言わざるを得ないものである。この非効率性を解消するために、1977年、普通鋼メーカーであるトピー工業がLFをアーク炉と並置して、図6<sup>7)</sup>のようにその精錬機能を分離独立させ、変革のニーズに応えた。この選択に当たっての決定的な要因は、LFが極めてシンプルな設備であったことに他なら

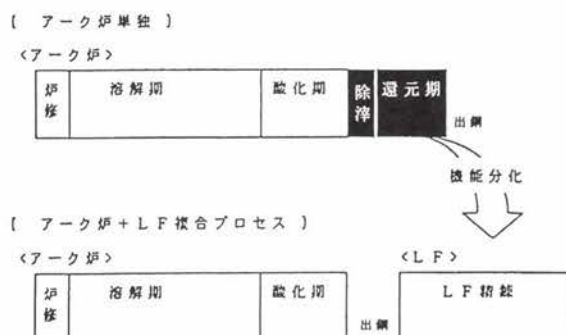


図6 アーク炉の機能分化

ない。もちろん、アーキ炉の機能は二分され二設備に分化されることになるが、アーキ炉自体は4項の(1)から(3)の要素がより深化し、さらにはLFに移行した精錬機能もよりコンパクト化され理想に近づくことになった。

このように、主設備から一部機能を削除してそれ自体を並列化(ならびかえ)することによって、アーキ炉の生産性は必然的に向上し、鋼質の高級化にも絶対的な効果を発揮した。また、LFの強脱酸効果によって溶解期から昇熱期にかけての酸素富化をより強化することが可能となり、アーキ炉の生産性はさらに改善される結果となった。加えて、溶鋼成分、溶鋼温度を極限まで狭幅管理することが可能となり、連続铸造工程でのトラブル軽減、多連铸率の向上など製鋼系全体の生産性に画期的な変革をもたらしたことにより、図7<sup>8)</sup>に示すように1990年代までに多に普及していった。

## 4.2 EBT効果

旧西ドイツで開発された炉底出鋼方式は、1979年から実操業に入り種々改良が重ねられ、最終的には偏芯炉底出鋼方式(Eccentric Bottom Tapping; EBT)として技術的に確立された。図8<sup>9)</sup>にその外観図を示す。EBT開発の意図するところは下記の4点である。

- (1) アーク炉炉壁水冷域の極大化
- (2) スラッグフリー出鋼
- (3) 出鋼時間の短縮
- (4) 出鋼流の汚染防止

初期の目的は十二分に達成されたことで長足に普及し、世界においてアーキ炉の基本仕様として認知されている。我が国では1985年に普通鋼メーカーであるトピー工業が初めて導入した。導入の主眼とするところは、生産性の向上とコスト削減であり、必ずしも上記4項目と目的を同じくするものではなかった。

生産性の向上については、4項で述べたようにアーキ炉操

業をよりスキルレス化することによって、操業のシンプル化を実現することであった。初期の期待効果では、アーキ炉自体の生産性向上に関するものとしては、ごく機械的に出鋼時間の短縮があるが、(3-1)式で示したPすなわち実施効率(労働効率)の改善が図られた。その主なものは下記の通りである。

- (1) 出鋼樋がノズルに変わったことによる手入れの簡素化
- (2) スラグラインの補修面積が減少したことによるスキルフル時間の短縮

また、(3-1)式のMに属する効果としては下記の3点がある。

- (1) 水冷化の強化によりさらなる高電圧化
- (2) 低温出鋼への移行
- (3) 残湯操業による通電初期からの酸素富化

さらに、後工程への波及効果及びこれに関連して、出鋼量を高位で確保できるというメリットを得た。特にLFを後工程に有する事業所では、LFの有効性を享受し、EBTを並列することで図9<sup>10)</sup>のごとく取鍋耐火物コストの著しい改善を実現した。これは、湯当たり部をごく狭い範囲に限定できか

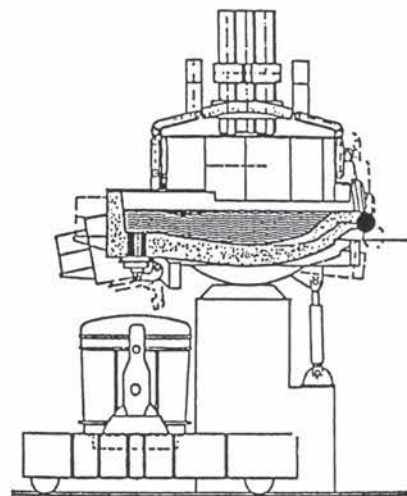


図8 EBTの概略図

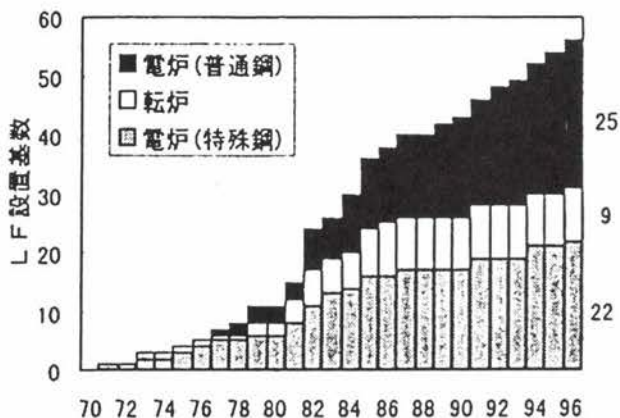


図7 日本におけるLF設置基数の推移

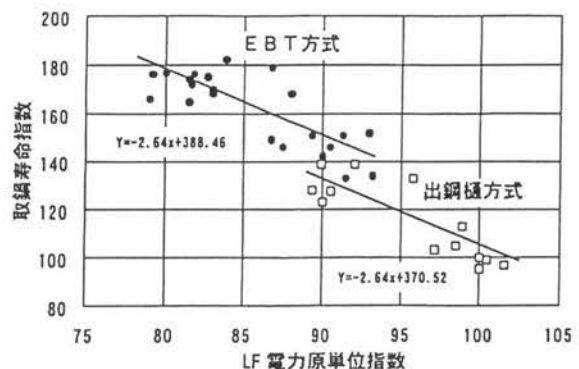


図9 LF電力原単位と取鍋寿命の関係

つ移動が可能であることと、取鍋底部が常に湯当たりとなり、溶鋼そのものが出鋼流に対して緩衝作用を提することによるものである。これらのことにより取鍋の中間補修はスラグラインと底部の局所に集約でき、一般壁のコストが著しく削減された結果によるものである。このことは、耐火物コストの縮減にとどまらず、一般壁の寿命延長は、とりもおさず、受鋼量の高位持続を意味し、生産性の向上に大きく寄与する結果となった。また、出鋼口の直径と炉体傾動角度の調整で排出酸化スラグをコントロールすることで、LF操業の鋼質選択の自由度が増し、さらなるスキルレス操業が可能となっている。

このように、EBTはアーク炉製鋼系の中において生産性の向上はもとより、製鋼コスト、鋼質の改善あるいは調整の容易さから急速に普及し、現在ではアーク炉の基本仕様となっている。表2<sup>11)</sup>にEBTの効果を示す。

## 5 今後の展望

これからもアーク炉の操業改善は、ひとえにコスト低減のための種々の原単位削減と生産性向上対応が繰り返されていくものであろう。すなわち、(2-1)、(3-1) 両式のあくなき極小化と最大化を目指していくものと言える。これに加えて今後重要となるのは、環境課題への取り組みである。生産性向上とコスト改善活動とは離れたところでの取り組みであった環境課題が、生産性向上・コスト改善を含んだ3つの要素がすべて交わった狭い範囲での取り組みに、軸足を移動しなければならないということを意味する。これは、すなわち前述の(3-1) 式の右辺にKという環境課題という因子を考慮した(3-2) 式を最大化するということを意味する。従って、Eを最大ならしめる4項の、3つの項目のうち(3)の項目を書き換えれば、『具備している機能で環境負荷をも最小化し、さらにその機能を最大限に発揮できる設備あるいはそれらの配列』ということになる。

$$E = M \times P \times T / K \cdots \cdots (3-2)$$

21世紀は環境の時代と言われている。アーク炉の世界も環境課題からは離れられないが、(3-1) 式を進展させた(3-2) 式を持って俯瞰すれば、アーク炉製鋼法は大きな発展を遂げるものと期待できる。

## 6 おわりに

我が国のアーク炉製鋼の技術は、主として海外に端を発した数多くの要素技術から進展し、鉄鋼業の振興期に我が国の固有技術として見事に開花した。特に、生産性向上に関する技術は、コスト削減の技術と相俟って大いに発展した。本稿では主として物的生産性について述べてきたが、広義に解釈すれば当然労働生産性についても論じなければならないが、勝手ながら本稿の主旨は物的生産性の歴史と判断させていただいた。従って、労働生産性については、4項のごく一部で触れるにとどめた。なぜならば、労働生産性については各社各様の思想があり、物的生産性とバランスさせながらトータルで独自に評価されているものと判断するからである。よってここでは、図10<sup>12)</sup>にあるように、アーク炉製鋼工場の労働生産性のごく一端を紹介するにとどめたい。

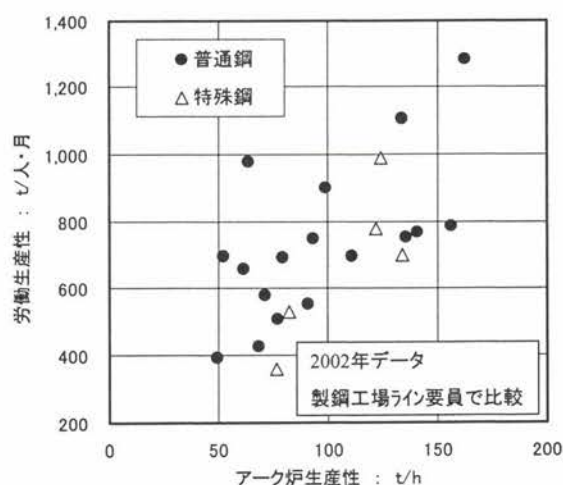


図10 労働生産性とアーク炉生産性の関係

表2 EBT化による効果

| 区分  | EBTの効果        |                               | 効果主要因                |
|-----|---------------|-------------------------------|----------------------|
|     | 項目            | 効果量                           |                      |
| コスト | ・合金鉄の歩留り向上    | Si 15~100 %向上<br>(Mn 2~5 %悪化) | スラグフリー               |
|     | ・出鋼歩留り向上      | Fe 1.1 %向上                    | スラグフリー、残湯            |
|     | ・電力原単位の低減     | 7~25 kWh/t向上                  | 残湯                   |
|     | ・電極原単位の低減     | 0.2~0.4 kg/t向上                | 残湯による電力減と高力率化        |
|     | ・耐火物原単位の低減    | 炉壁:23~64 %低減<br>取鍋:9~54 %低減   | 水冷化率アップ<br>スラグフリー    |
| 生産性 | ・石灰原単位の低減     | 15~25 %低減                     | 残湯                   |
|     | ・Tap-To-Onの短縮 | 1.0~3.0分短縮                    | 熱間補修の短縮<br>出鋼傾動時間の短縮 |
| 品質  | ・On-To-Tapの短縮 | 1.0~7.2分短縮                    | 電極原単位の低減             |
|     | ・脱P能の向上       | 16~28 %向上                     | 残湯                   |
|     | ・介在物の低減       | Total[O] 1~3 ppm低減            | スラグフリー               |

最後になるが、我が国では世界に対し、すでに鉄スクラップの供給国となっており、鉄スクラップの処理に関してアーキ炉業界の使命はますます重たいものになるはずである。後輩諸氏には、温故知新の視座から、さらなる技術革新に邁進されんことを祈念して筆を擱かせていただきたい。

#### 参考文献

- 1) 鉄鋼需給統計月報, (社)日本鉄鋼連盟
- 2) 池見恒夫: ふえらむ, 3 (1998), 182.
- 3) 須田興世: 第27・28回白石記念講座, 日本鉄鋼協会, (1994), 61.
- 4) 最近のアーキ炉製鋼法の進歩, 日本鉄鋼協会, (1981), 9.
- 5) 第4版鉄鋼便覧, 日本鉄鋼協会, (2002), 第2巻, 表 42-10-6
- 6) 第4版鉄鋼便覧, 日本鉄鋼協会, (2002), 第2巻, 図 42-10-17
- 7) 第4版鉄鋼便覧, 日本鉄鋼協会, (2002), 第2巻, 図 42-10-8
- 8) 第4版鉄鋼便覧, 日本鉄鋼協会, (2002), 第2巻, 図 42-10-7
- 9) 小倉貞一: 第114・115回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1986), 22.
- 10) 第4版鉄鋼便覧, 日本鉄鋼協会, (2002), 第2巻, 図 42-10-18
- 11) 第4版鉄鋼便覧, 日本鉄鋼協会, (2002), 第2巻, 表 42-10-9
- 12) 日本鉄鋼協会技術部会電気炉部会, 私信, (2002年10月)

(2004年12月27日受付)

## ブックレビュー

### 「材料学シリーズ 人工格子入門」

新庄輝也 著

2002年3月 (株)内田老鶴圃発行

A5判 146頁 定価2,940円(消費税込)

本書は、人工格子に関し、磁性物理的現象を中心に解説されたものである。人工格子という概念は私達鉄鋼関係者にあまりなじみのないものであるが、近年著しく進歩している分野であることは、新聞、雑誌等の記事等から推察できる。著者の定義によれば、人工格子とは、厚さを原子レベルで制御しつつ積層した人工的多層構造膜である。その構造が新規なばかりでなく、巨大磁気抵抗(GMR)効果のように、画期的な物性を発現することがあり得るところが、多くの研究者を引きつけているようである。先端分野を解説した著書の場合、その専門外の読者には理解が難しい場合が多いが、本書の場合、その点に関する配慮はきわめて行き届いている。磁性物理現象を記述した内容であるにも関わらず、数式をいっさい使用せず説明されている。また、特殊な概念や用語、最新のトピックス等は丁寧なコラムで解説されている。本書は、この分野を開拓してきた著者が、これまでの研究を振り返り、ご自身の言葉で当該分野の進歩を総括したものといえ、その意味でも一読に値するものであると思う。

(新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 山崎修一)