論 説

UDC 669.187.2:621.365.2

アーク炉製鋼法の現状と将来

岸田 壽夫*

Present Status and Future of Electric Arc Furnace Steelmaking

Toshio Kishida

Development in electric arc furnace operation technologies. Progress in secondary steelmaking technology. Forecast of steelmaking.

1. はじめに

わが国における戦後の特殊鋼生産の伸びは著しく、昭和52年には粗鋼1400万tに達し、過去15年間で約5倍の増加を示している。これを溶製炉別でみると、本誌“鉄鋼業の発展を展望して”に述べられているごとく、転炉鋼の急速な進出には目覚しいものがあるが、同時にアーク炉鋼も着実な伸びを示している。

このようにアーク炉鋼が拡大している原因の一つには、アーク炉法がつぎのような利点を有していることが挙げられる。

- (1) 第1図¹⁾に高炉—転炉法とアーク炉法の粗鋼生産所要エネルギー量の試算結果を示したが、これから明らかなように、“エネルギーの缶詰”とも呼ばれるスクラップを原料にした場合のアーク炉法は鉄鉱石を原料とする高炉—転炉法や、還元鉄を使用するアーク炉法に比べ所要エネルギーは非常に少なくてすむ。
- (2) 設備投資額が高炉—転炉法よりも割安である。
- (3) 温度、成分の調整が容易であるなど、操業に柔軟性がある。

また、転炉に大きな水をあけられていた生産性

も、最近では炉容量の大型化、大電力操業技術の開発、助燃法の採用などによって飛躍的な向上を示してきたが、なかんずく、炉外精錬法導入の影響は大きい。炉外精錬法は、アーク炉での精錬時間短縮のみならず、ユーザーニーズに応える品質の安定確保という観点からも不可欠なものとなりつつある。

本報では、アーク炉製鋼法に関し、アーク炉および炉外精錬の現状を紹介すると同時に、将来の展望について私見の一端を述べることにする。なお、ここでは真空アーク炉、エレクトロスラグ再

第1図 粗鋼トン当りエネルギー使用量
(モデルプラント試算値)

昭和53年12月2日 受付

*大同特殊鋼㈱取締役, 知多工場長

第1表 溶解時間ならびに電力原単位に及ぼす電力水準の影響（装入量72 t）

電力水準	1次電力 〔MW〕	炉内入力 電力〔MW〕	送電～出鋼 時間〔min〕	電力原 単位 〔kWh/t〕	電気 効 率	平 均 熱効率	平 均 全効率	全製鋼 時間* 〔min〕	理 論 的 生産能率 〔t/hr〕
RP 操業	20	17.4	129	595	0.87	0.70	0.61	159	27
HP 操業	30	26.0	75	518	0.87	0.80	0.70	105	41
UHP 操業	50	43.5	40	464	0.87	0.895	0.78	70	62

* 全製鋼時間は送電出鋼時間に炉修、装入などによる止電時間 30min を加えたものである。

溶解炉、プラズマ誘導炉などによる特殊溶解については触れることができなかったが、これらについてはつぎの機会に譲りたい。

2. アーク炉操業技術の発展

従来のアーク炉製鋼法では、スクラップ溶解にはじまり、酸化精錬を経て還元精錬にいたる一連の作業を行うのが通例であったが、最近の炉外精錬の発達と炉装備のユーティリティ向上志向が相まって、還元精錬は炉外精錬炉の役割へと移行してきた。したがって、アーク炉は溶解専用炉としての機能を強め、アーク炉操業に関する最近の技術も溶解能率の向上に重点がおかれている。

2. 1 UHP 操業

1965年、W. E. Schwabe ら²⁾によって提唱されたUHP (Ultra High Power) 操業は、従来のいわゆるRP (Regular Power) 操業の思想から脱却した新しい理念の導入であり、これによってア

ーク炉の生産性は長足の進歩を遂げることが可能となった。第1表は Schwabe ら³⁾が求めた、溶解時間、電力原単位の理論計算結果であるが、これからも明らかなようにUHP 操業における生産性、エネルギー原単位の優位性が認められる。

UHP 操業の最大の特徴は炉容量に対する投入電力量が従来の2～3倍と高いことである。第2図に、RP、HP、UHPの各操業に対応する変圧器容量を炉容量との関係で示した。また、UHP 操業における電力投入条件については、第3図に示すように耐火物侵食指数のより小さい低力率大電流側が提唱されていた。しかし、最近では後述するアーク炉耐火物の諸改善に伴い、低力率操業の見直しが行われつつある。大同特殊鋼㈱（以下当社という）では、アーク炉の動特性を利用した熱収支解析を行って最適操業の指針としている。溶解時間および所要電力の算出式を下記に示すが、これらをミニマムにする条件で操業することが望ましい。解析によれば、省エネルギーの観点からの最適電流値は Schwabe の提唱する値よりもやや小電流側に存在している。

$$\text{溶解時間: } t = \frac{E - Q}{Pa - q_e}$$

$$\text{所要電力: } P = \frac{Pi(E - Q)}{Pa - q_e}$$

Pi : 接入電力 (MW)

Pa : アーク電力 (MW)

E : 溶落時における炉内材料の顕熱 (MW h)

Q : 溶落時まで炉内で発生した熱 (MW h)

q_e : 炉体からの放熱 (MW)

UHP 操業の一例として当社知多70 t 炉の生産性推移を第4図に示す。第2表はその内訳を示したものである。生産性が着実に向上してきている

第2図 国内電炉設備の高電力化

(出所：日本鉄鋼連盟，電気炉作業調査表)

第3図 アーク炉の電気特性と耐火物侵食指数

第4図 生産性および製鋼時間の向上

第2表 製鋼時間の内訳(大同70t炉)

期 別	時間短縮(min)		
	46/上	48/上	53/下
補 修	19	10	3
溶 解	64	56	42
酸 化	36	24	17
還 元	17	10	7
電 極 接 続	4	3	3
装 入・除 滓	18	15	14
Tap to Tap	158	118	86

が、この背景には助燃法の有効利用、精錬期の短縮、併行作業の徹底などもまた重要な役割りを果たしている。

2. 2 補助燃焼法

補助燃焼法は、スクラップの溶解に要する電気エネルギーの一部を他のエネルギーで代替する方法で、代表的なものとして酸素富化操業とバーナーによる重油燃焼法がある。酸素富化操業の効果としてつぎのことが挙げられる。

- (1) 炉内スクラップの温度分布は均一でないため、いわゆるコールドスポット部に未溶解材料が残るが、酸素吹込みを行うことにより、材料のカッティングができ、均一溶解が可能となる。
- (2) 溶解の進行に伴って形成される湯溜りに酸素を吹込むことによって

○主としてCの酸化反応が起こり、この際に生じる反応熱がスクラップの溶解に寄与する。

○溶鋼の攪拌による均一な温度上昇と、スクラップへの伝熱効率が向上し、溶解が促進される。

第3表¹⁾は酸素富化操業の実施例であるが、酸素富化により生産性、電力原単位とも向上している。

また、当社知多工場における酸素富化操業の実績を第5図に示すが、電力原単位は約6kWh/Nm³(O₂)の低減を得、省エネルギー効果も大きい。

第3表 酸素吹込み強化による操業実績への影響

酸素原単位 (m ³ /t)	装入始～出鋼完 (min)	電力原単位 (kWh/t)	能 率 (t/h)
1.9	160	561	27.84
5.0	150	551	30.26
13.7	129	519	34.68
21.0	119	473	37.76
27.0	112	463	39.75

第5図 酸素富化操業における酸素原単位と電力原単位の関係

一方、重油燃焼を利用する方法は、コールドスポット部の溶解促進を目的としたものであるが、バーナー形状、重油燃焼方式により多くのタイプが市販されている。

酸素富化操業、重油燃焼法とも、これらを実施することによって大幅な生産性向上が期待できるが、適用を誤るとかえって悪影響が出る面もあるので、集塵能力などに十分な配慮を払うことが必要である。

2. 3 その他の周辺技術

UHP操業の導入に伴い、これを支えるアーク炉周辺技術の発展にも目覚しいものがあり、電力制御、電極品質、精錬技術などのハード、ソフト両面の改善は枚挙にいとまがない。ここでは、耐火物に関する改善の一部を紹介するにとどめる。

UHP操業では高電圧、大電流による耐火物侵食指数の増大、および大型トランスに顕著に現われる三相不平衡のため、ホットスポット現象は避けられない問題である。ホットスポットのれんがには高耐火性、耐スボール性、耐スラグ性が要求されるが、最近実用化されたマグネシアカーボンれんがはカーボンとマグネシアの特性を結合させたもので、比較的良好な成績を示している。

シルレベルより上部については水冷ボックスが使用される傾向が強くなり、当社知多工場では、炉

第6図 炉壁水冷ボックス配置図（大同70 t 炉）

第4表 炉蓋の耐用回数比較（大同70 t 炉）

	耐用回数（ ）は耐火物原単位	
全耐火物	105.8ch	(2.26kg/ch.t)
外周部全水冷	130.0ch	(0.49kg/ch.t)

壁全面積の60%を水冷ボックス化している。第6図に水冷ボックス配置図の一例を示す。また、炉蓋耐火物についても水冷化が進み、当社では70 t UHP炉に外周部全水冷炉蓋を採用して、第4表⁹⁾に示すように、寿命および耐火物原単位とも向上する好成績を得ている。

3. 炉外精錬技術の進歩

最近の製鋼法は、かつての平衡論に基づく静的な製鋼法から速度論に立脚した動的な製鋼法へと変わりつつあるが、このような変革を可能とした最大の要素は炉外精錬の導入であると言っても過言ではない。

アーク炉の立場から見た場合の炉外精錬法に対するニーズは、おおよそつぎのとおりであろう。

- (1) UHPアーク炉のユーティリティ増大には、精錬を炉外で行うことが望ましい。
- (2) アーク炉の大型化に伴い除滓がより困難になったこと、および集塵が強化されたことにより、十分な精錬に長時間を要するようになった。
- (3) ユーザーの要求品質が厳しくなり、炉外精錬を必要とするものが増加した。

炉外精錬の内容は多種多様であるが、主な炉外精錬法の設置状況とその特徴を第5表⁹⁾、第6表¹⁾に示した。これらの炉外精錬において、混合攪拌特性はきわめて重要な要素で、中西ら⁷⁾の方法に基づいて主な炉の混合特性を比較した結果を第7

第5表 炉外精錬法の設置基数（1976末現在）

	RH	DH	ASEA-SKF	FINKL (VAD)	LF	AOD	CLU	WITEEN (VOD)	計
総計	48	80	25	12	4	59	2	25	255
日本	16	14	3	2	4	10		6	55
米国	5	20	1	2		22		2	52
西欧	26	45	16	7		25	2	16	137
他	チェコ 1	チェコ 1	ソ連 1 中国 2 ブラ 2	南ア 1		南ア 1 豪 1		加 1	11

第 6 表 各種炉外精錬法の特徴

名 称	精 錬 機 能						特 徴
	脱水素	脱 酸	脱 炭	脱 硫	酸化物 還 元	温度制御	
DH法	○	○					迅速、効率的な脱ガス 大量処理 温度降下小 容易確実な合金添加
RH法	○	○					
VOD法	○	○	○		○		極低炭ステンレス Cr 歩留向上 電炉の生産性向上
AOD法		○	○	○	○		
FINKL-VAD法	○	○	(○)		○	○	自由度大きい真空精錬 脱硫、介在物低減 成分、温度の制御
ASEA-SKF法	○	○		○	○	○	
大同一LF法	○	○		○	○	○

第 7 図 各種精錬炉における攪拌強度と均一混合時間の関係

第 8 図 RH処理材の成品〔O〕レベル

図に示す。これによれば、AOD法がきわめて優れた攪拌機能を有していることが理解される。

3. 1 真 空 脱 ガ ス

真空脱ガスは1952年の真空鑄造法にはじまり、その後、取鍋脱ガス法、流滴脱ガス法、Tap時脱ガス法などと相次いで開発されたが、処理能力や脱ガス効果などに問題があった。1956年に開発されたDH (Dortmund Hörder Huttenunion) 脱ガス法ならびに1959年に開発されたRH (Ruhrstahl Heraus) 脱ガス法は、いずれも独特の攪拌機能を有し、処理中の温度降下も少ないことから、現在ではこの2法が最も多く採用されている。RH法とDH法はどちらも高品質鋼の大量処理に適した方法であり優劣をつけがたいが、RH法には溶鋼の環流が連続的であるため操業が容易であることや、溶鋼の環流に不活性ガスを使用するので十分な脱ガス効果が期待できることなどの特色があ

る。RH処理材の品質の一例として、成品〔O〕レベルを第8図⁸⁾に示す。最近ではRH法の特徴を生かして第9図⁹⁾に示すように焼入性のばらつきがきわめて少ない機械構造用鋼が製造されている。

一方、小容量の溶鋼に対しては処理中の温度降下が大きいことから従来の脱ガス法を適用することは困難であったが、1965年に開発されたASEA-SKF法、1967年のFINKL (A. Finkl & Sons)法、1973年の大同-LF (Ladle Furnace)法は、いずれも溶鋼加熱設備を備えたもので、温度降下の問題が解消されただけでなく、スラグ精錬による脱酸、脱硫が可能となったことにより、炉外精錬の機能は一段と高まった。一例として大同-LF法の概略と、脱硫成績を第10図⁹⁾、第11図⁹⁾に

示す。本法はわずかな設備変更で真空脱ガスとの併用も可能であり、低S、低H、低O鋼の製造に適した炉である。

3. 2 ステンレス鋼の特殊精錬法

最近のステンレス鋼の精錬は従来のアーク炉法による単一方式から、2次精錬炉を結合した多連方式に移行しつつある。この種の2次精錬プロセスとして、真空脱ガス炉を利用したVOD

第9図 溶製法と焼入れ硬さのばらつき（ジョミニー試験）

第10図 LF法の概略

第11図 LF法における脱硫実績

(Vacuum Oxygen Decarburization) 法, RH-OB (Oxygen Blowing) 法や、希釈ガスを利用したAOD (Argon Oxygen Decarburization) 法, CLU (Creusot Loire Uddeholm) 法などがある。これらはいずれも炉内 CO 分圧を真空あるいはアルゴンなどのガス希釈により十分低く保持し, Cr の酸化を抑えて低C域にいたる脱炭を比較的低温で行う方法である。従来のアーク炉精錬の一部はこうして2次精錬炉に委ねられるので、生産性が大幅に向上するばかりでなく、高価な低炭Fe-Cr 合金を使用せずに極低炭素ステンレス鋼が製造できるなど数々の利点が生じる。最近はずきの理由によりAOD法が主流になっている。

- (1) 大気操業であるため、設備費が安くメンテナンスも容易である。
- (2) 精錬作業が単純で、再現性にも優れているため自動制御がしやすい。
- (3) 溶鋼攪拌が強力であるため、脱硫が容易に行える。
- (4) 高C域からの脱炭が可能である。

CLU法はAOD法に類似した方法であるが、開発されてまだ日も浅いため設置基数は少ない。今後の発展に注目したい。以下にAOD法に関する最近のトピックスを紹介する。

i アルゴン脱炭操業

AOD法では、脱炭反応の進行に伴って酸素とアルゴンの吹込量、吹込比率を変化させてCrの酸化を防いでいるが、低C域のCr酸化は避けられない。アルゴン脱炭操業は低C域で酸素の吹込みを止め、アルゴンのみを吹込んで溶鋼を攪拌することにより、溶鋼中およびスラグ中の酸素との間で脱炭反応を行わしめる方法である。第12図⁹⁾には、アルゴン脱炭操業におけるアルゴン吹込量と脱炭速度との関係を示した。本操業によれば、Crの酸化量が低減するため還元剤の使用量が節減できるばかりでなく、C ≤ 0.01% の極低炭素ステンレス鋼の溶製も比較的容易にできるようになる。

ii NiO シンターの利用

AODでは、第1ステージの脱炭速度は酸素の供給速度に律速されるため、この時期に羽口から吹き込まれる酸素ガス以外の酸素源を添加することは脱炭速度の増大すなわち処理時間の短縮に有効である。NiO シンターの利用はこの考えに基づ

第12図 Ar 流量と脱炭反応速度の関係

第13図 AODスタート[C]と脱炭速度の関係

くものであり、第13図¹⁰⁾にその実施例を示す。

4. 将来の展望

これまで述べたように、アーク炉製鋼法は高度成長経済に伴う旺盛な需要を背景に、UHP炉の出現と炉外精錬技術の発展に支えられて近年著しい進展を示してきた。今後は従来のような量的拡大に基盤を置いた発展こそ困難とはいえ、安定成長経済時代に対応した質的変革の必要性はますます増大しており、“量から質への変革”を追求して、アーク炉製鋼法は今後ともたゆまぬ発展を続けていくであろう。

以下に筆者の私見の一端を述べてみたい。

(1) フロー改善 —Total 効率の追求—

アーク炉製鋼作業は、固体—液体—固体という相変化を伴う1サイクルを担当するものであって、圧延以後の工程に比べれば最終鋼材製品の品

質に及ぼす影響は決定的な重大さを持っている。他方、製造工程のうちで最も多くの資材を使い、従って最もコストのかかる工程がまた、製鋼作業である。物理化学的な難解さも加わって、製鋼作業における品質付与にも一定の限度があり、とくに特殊鋼の分野にあっては“特殊鋼の製造はきず取りに始まり、きず取りに終る”ともいわれ、整備検査部門に多大の設備と膨大な人員をかかえてユーザーの品質要求に応じてきたのが実状である。整備検査部門効率化の最も有効な手段は、言うまでもなく鋼材に欠陥を作らないことである。品質の付与は、最近とみに厳しさを増しつつあるユーザーの要求に応じていくのみならず、それが一定のレベルを越えれば整備部門の大幅省略が可能となり、鋼材生産工程における物流(フロー)の改善をとおしてわれわれ製造者側にも Total としての効率アップがもたらされる。最近、Hot Direct Rolling, P. S. I. (Perfect Surface Ingot), N. D. B. (Non Defect Billet) 等々、各社各様に従来の常識的品質レベルを打ち破る指向が芽ばえてきたのは好ましいことであるが、いまだ整備工程の省略にはいたっていない。近い将来、これらの努力が実り、ユーザーは安定した高品質を、メーカーは高い生産効率を享受することを目指し、たゆまぬ努力が必要である。

(2) 自動化、機械化

アーク炉は、電極の存在、炉形状の制約などから同じ製鋼炉である転炉に比べて機械化が著しく遅れていたが、近年にいたりいくつかの周辺設備の機械化に成功している。合金自動添加装置、電極継足し装置、全自動水冷酸素ランス、各種のインジェクションなどである。アーク炉製鋼作業のうち最も労働負荷の高いものは除滓作業であり、機械式、真空式といくつかの試作がなされているが、十分な解決にはいたっていない。

最近発展の著しいものに、アーク炉製鋼作業へのコンピュータの導入がある。ミニコンを使い、送電操作など単一の仕事を行うもの(例えば当社のARMS-II)、大型事務用計算機を使い、後工程の進捗をもふまえた上で溶解方案を指示するもの、専用コンピュータを使い、配合から出鋼までオペレーターをガイドするもの等々が採り入れられている。いまだ経験と勘に依存する部分を残し個人差が入りやすいアーク炉作業にあって、コン

ピュータの果たす役割は今後ますます増大してゆくであろうが、他方、日々の作業の中で刻々標準を変化させながら発展しつつあるのが、今日のアーク炉製鋼法である。

コンピュータの導入にあたっては、導入されたが故に標準が固定されることのないよう。自由度の大きなソフトウェアの開発に専心することが肝要である。

(3) 省エネルギー

アーク炉製鋼における省エネルギーを大別すると、電力、助燃オイルなどの入力エネルギーをいかに少なくするかということと、集塵排ガス、冷却水など廃熱をいかに有効に利用するかということになる。前者は炉容量、使用スクラップが決まればほぼ一義的に製鋼能率で決まってしまうものである。生産性については、UHP、酸素富化操業、バーナー助燃と、場合によっては炉外精錬を利用した精錬時間の短縮をも含めて、現在すでに相当な高レベルに達しており、これ以上の向上は容易なことでない。

今後のアーク炉省エネルギーに対する一つの可能性として考えられるものにスクラップ予熱がある。スクラップ予熱は雪害対策として北欧のアーク炉で実用化されているものであるが、これはアーク炉が溶解作業中に併行して予熱できること、熱源がオイルであることの2点から省エネルギー効果が大きい。ハード面で解決しなければならない問題が多いが、つぎの省エネルギー手段として早急に実現していかなければならない。

廃熱利用については、アーク炉の廃熱が1サイクルの中で大きく変動するため熱源としては使いにくい部類のものである。上述のスクラップ予熱への利用、フレオン発電など、いくつかの試みが始まったところであり今後の発展を注目したい。

(4) 還元鉄の利用

還元鉄は、品位が高くかつ安定入手が可能なことから有望な鉄資源であるが、わが国の現状はスクラップが比較的豊富にあり価格的にも割安であることから、わずかにスクラップの価格安定効果の範囲内で利用されるにすぎない。しかし、中近東をはじめとする資源保有国では、直接還元アーク炉溶解設備によるミニミルの建設が活発であり、世界全体ではアーク炉原料としての還元鉄の利用は高まっていくであろう。

当知多工場でもすでに10年来、既存の各種の直接還元鉄の試用を実施しており、それぞれの特性とアーク炉溶解技術の蓄積を行って有事に備えている。

文 献

- 1) IISI "A Technological Study on Energy in the Steel Industry", (1976)
- 2) W. E. Schwabe et al.: J. of Metals, 17 (1965) 1, 75
- 3) W. E. Schwabe et al.: J. of Metals, 19 (1967) 4, 67
- 4) 中山製鋼所: 第3回電炉部会第1分科会 (1974)
- 5) 大同特殊鋼: 第13回電炉部会第2分科会 (1978)
- 6) 高梨: 学振19委第3分科会 (1977)
- 7) K. Nakanishi et al.: Ironmaking and Steelmaking, (1975) 3, 193
- 8) H. Ushiyama et al.: Electric Furnace Proceedings, 35 (1977), 141
- 9) J. Ishida et al.: International Iron and Steel Congress, (1978), 26
- 10) 福本ら: 鉄と鋼, 63 (1977) 2, A 5