

最近の製鋼用アーク炉設備と溶解技術の動向

© 1991 ISIJ
技術資料

野田 孝昭*・和泉 喜久磨*2

Recent Trend of Electric Furnace Steelmaking Equipment and Operation Technology

Taka-aki NODA and Kikuma IZUMI

1. はじめに

最近の日本における鉄鋼業は、1985年から約3年間にわたり低操業を余儀無くされたが、1988年（昭和63年）1.05億t、1989年（平成元年）1.07億t超と好調に推移している。このうち電気炉鋼の生産比率は、約30%を占め、今後も鉄リサイクルの重要プロセスとしての位置付けもあり、今世紀末までに40%まで増加すると予想されている。電気炉製鋼は、1899年にポール・エルー（P. H'EROUULT）がアーク炉を発明し今日の基礎をつくり、下記の特長がある。

- (1) 安価な鉄屑を主原料として利用できる。
- (2) 容易に稼動/休止ができ設備稼動に柔軟性がある。
- (3) 高炉に比べて少ない投資額で比較的大量生産ができる。

わが国でも、電気炉製鋼は1916年（大正6年）から実施され、表1に示すような過程で発展を遂げ、努力の結果世界トップレベルの生産性、原単位を達成するに至った。しかし、今後は三相交流アーク炉をベースとした従来の延長線上では大きな改善を期待する項目は残っておらず、大きな転換点を迎えており、新技術および新設備の開発が注目されている。

ここでは、最近の製鋼用アーク炉設備および溶解技術について整理することにした。

2. 最近のアーク炉設備

重要な転換点を迎えている電気炉製鋼において、現在注目されている新設備について以下に整理する。

2.1 直流アーク炉

2.1.1 現状

生産現場における生産性向上などを狙いとして、多大な努力が続いている。しかし、三相交流アーク炉（以下AC炉）をベースにした諸革新技術は相当な高水準に達しており、大幅な改善は困難と思われる。

このような背景にあって、20世紀初期に存在したケラー（Keller）式などの導電炉床式アーク炉¹⁾と、大容量サイリスターを組み合わせた直流アーク炉（以下DC炉）がヨーロッパを中心に開発された。わが国では、1959年東北特殊鋼（株）において、スクラップ溶解はAC、精錬はDCで行う「電解電磁攪拌法」に使用するAC/DC切換型アーク炉（上部電極三本、炉底電極一本）が実用化されていたが、1988年トピー工業（株）において、溶解・精錬共DCで行う本格的なDC炉が導入され、生産コストを大幅削減できる設備として注目を集めた。日本における導入は、表2に示すように1991年3月までに6基が稼動する予定で、さらに数基計画され、DC炉に対する期待は諸外国以上のものがある。

2.1.2 設備概要と特徴

DC炉の基本的な設備構成を図1に示す。

基本的には、直流変換装置および炉底電極が付加された点を除き、AC炉と大きな違いはない。しかし、電気的にはAC炉が三相交流を用い、三本の可動電極と中性点を構成するスクラップまたは溶鋼の間でアークを発生するのに対し、DC炉は三相交流から変換した直流を用い、陽極側炉底電極と陰極側上部可動電極との間で、スクラップまたは溶解を介してアークを発生する。

AC炉とDC炉の電気設備構成を表3に示す。

DC炉の利点についてすでに検証されているものを以下に示す。

(1) フリッカー大幅減

平成2年10月15日受付（Received Oct. 15, 1991）（依頼技術資料）

* 大同特殊鋼（株）機械事業部鉄鋼設備第1グループ部長（Mechinery Division, Daido Steel Co., Ltd., 1-2-5 Rokuno Atsuta-ku Nagoya 456）

*2 大同特殊鋼（株）機械事業部鉄鋼設備第1グループ課長（Machinery Division, Daido Steel Co., Ltd.）

Key words : electric arc furnace ; electric steelmaking ; DC arc furnace ; EBT ; spray cooled roof ; electrode control system ; bottom bubbling.

表 1 日本における電気炉製鋼の発展課程

年	1950～1954	1955～1959	1960～1964	1965～1969	1970～1974	1975～1979	1980～1984	1985～1989
トピックス				いざなぎ景気	石油危機	第二次石油危機	物価安定型経済	円高不況 景気回復
炉容量		50t (18.75MVA)	70t (20MVA) 80t (25MVA) 200t (40MVA)	[360t, 32フィート (163MVA)]		[400t, 38フィート (163MVA)]		
変圧器容量 のUHP化			W. E. SCHWABE UHP 操業提唱	120t (42MVA) 70t (56MVA) 77kV 直落とし 変圧器	70t (45MVA) 120t (56MVA) 60t (60MVA)		85t (65MVA) 80t (75MVA)	130t (100MVA) DC
炉体構造	誘導攪拌装置 炉蓋旋回 炉頂装入	AC/DC 切換型アーク炉	炉壁水冷BOX	水冷ケーブル 二次導体の三 相バランス化	傾斜電極	水冷炉蓋		EBT 底吹きガス攪拌 DC 炉
電極昇降 装置	アンプリダイ ン式			サイリスター一 次電圧制御方式 電磁カップリン グ制御方式				VVVF (ベクトル) 制御
関連設備	酸素精錬	高Cr鋼O ₂ 精錬	連続铸造 DH脱ガス	RH脱ガス 助燃バーナー普 及	VOD, ASEA- SKF, LF, AOD, VAD など炉外精 錬設備	SPH 酸素富化設備 Cインジェクシ ョン設備	特殊鋼連続铸造	
省力および 自動化		副原料装入装置	最適電力制御 装置	副原料自動装入 装置	成分分析自動化 電極自動接続装 置 プロセスコンピ ューター導入	製鋼オンライン システム	最適送電法 真空スラグク リーナー	
公害防止		直接集じん	フリッカー制御 装置 (同期調相機)		建屋集じん フリッカー制御 装置 (サイリスター・ リアクトル)		炉体包囲式 集じん	フリッカー制御 装置 (アクティブフ ィルター)

表 2 DC アーク炉設置状況

社 名 (工場名)	トビー工業 (豊橋製造所)	大同特殊鋼 (星崎工場)	東京製鉄 (九州工場)	共 英 製 鋼 (和歌山事業所)	大和電機製鋼 (水島工場)	中山製鋼所 (船町工場)
炉容量 稼動時 炉径 変圧器容量	35 t 1988 4 572 mm 15 MVA	20 t 1989 4 000 mm 15 MVA	130 t 1989 7 000 mm 100 MVA	60 t 1990 6 100 mm 76 MVA	100 t 1990 6 700 mm 100 MVA	40 t 1991 6 400 mm 68 MVA
上部 電極	本 数 径 (インチ)	1 本 18	1 本 14	1 本 28	1 本 24	1 本 24
炉底 電極	本 数 冷却方式	1 風冷	1 水冷または風冷	1 風冷	1 風冷	3 水冷

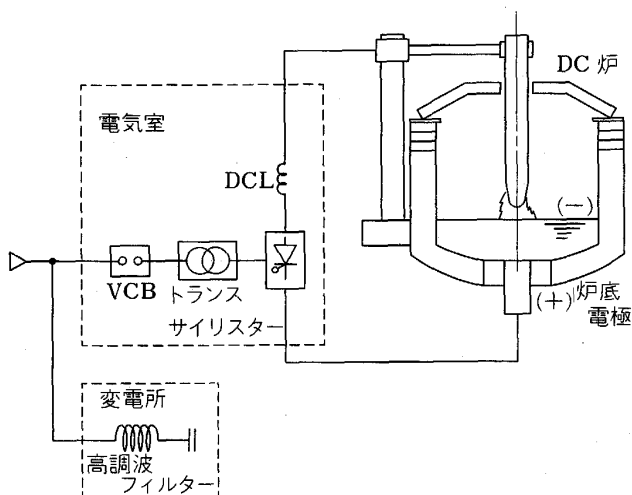


図 1 DC アーク炉設備構成

(2) 上部黒鉛電極原単位向上

(3) 溶鋼攪拌力向上

(4) 溶解時間短縮

(5) 電力原単位向上

(6) 炉の操作性向上

2・1・3 実験炉操業実績

大同特殊鋼(株)星崎工場に設置された大同特殊鋼(株)、新日本製鉄(株)およびフランス Usinor-Sacilor 社の共同開発用実験炉における AC 炉/DC 炉比較テスト結果を表 4 に示す。

(1) アークの挙動

DC 炉および AC 炉におけるアークの形を図 2 に示す。AC 炉においては他電極からの電磁力によりアークは 30～45° で炉壁側に傾く。一方、上部一本電極 DC 炉では 15～30° の角度で溶鋼に向く。そして、アーク

表 3 DC 炉/AC 炉電気設備構成

項 目	DC 炉	AC 炉
特高機器	炉用 VCB 避雷器/サージ吸収器	炉用 VCB 避雷器/サージ吸収器
電源	整流器用変圧器 サイリスター整流器 直流リアクトル	炉用変圧器
タップ切換装置	無電圧タップ切換装置 または 負荷時タップ切換装置 (5~10 点)	負荷時タップ切換装置 (5~10 点)
二次導体	大電流母線 (直流用陽極側, 陰極側)	大電流母線 (AC 三相分)
電極	上部 黒鉛電極 1 本	黒鉛電極 3 本
	炉底 水冷ピレット式 1~数本 ケラー式 1 式 (ピン 60~200 本)	なし
電極昇降装置	電動機式 液圧式	電動機式 液圧式
制御監視盤	監視盤 サイリスター制御盤 DC 制御盤 低圧動力盤 電極制御盤 計器制御盤	監視盤 低圧動力盤 電極制御盤 計器制御盤
その他	力率改善コンデンサー } 兼用 高周波フィルター } (フリッカー制御装置)	力率改善コンデンサー } 兼用 高周波フィルター } (フリッカー制御装置)

表 4 操業テスト結果

		実験用 DC 炉	AC 炉
設備諸元	炉容量 (T)	20	20
	炉殻径 (mm)	4 000	3 650
	上部電極	14"×1 本	14"×3 本
	炉容量変圧器 (MVA)	9/15	10/12
	2 次電圧 (V)	265/465	260/400
	2 次電流 (A)	Max 40 000	Max 17 000
	投入電力 (MW)	10	9
電極昇降		VVVF (Max 8 m/min)	
操業ヒート数 各 20 ヒート交互出鋼			
鋼 種		SUS304	SUS304
出鋼温度 (°C)		1 550	1 550
平均溶解量 (t/HT)		23	23
TAP-TAP (%)		95	100
電力原単位 (%)		93	100
電極原単位 (%)		38	100
騒音	溶解初期	115dB	115dB
	溶落ち以降	85dB	95dB
フリッカー (%)		~50	100

は 1 s に数回電極を中心に回っている。上部電極先端形状は、AC 炉が常に炉壁側が損耗した尖形であるのに対し、DC 炉は、アークの飛び方により水平、凸状、凹状とさまざまな形態をとる。また、アーク長に関しても、

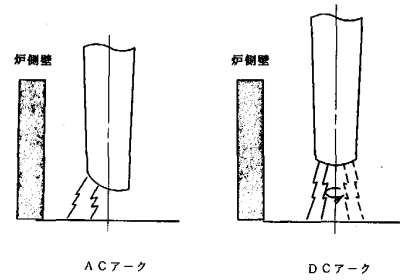


図 2 アークの形状

AC 炉では 1 mm/V ということが知られているが、実験炉においてスラグなしの溶鋼における測定結果は、30~40 kA のアーク電流において 1.1 mm/V であった。ただし、測定方法は、電極先端と溶鋼面の距離を測定したもので、アークの真の長さを測定したものではない。

(2) スクラップの溶解特性

DC 炉におけるスクラップ溶解パターンを観察結果を図 3 に、溶解期の電力投入例を図 4 に示す。溶解期における電力投入効率が、DC 炉は AC 炉に比較して 17% よく、アーク長がアーク電圧の差もあり、同じ電圧タップでは AC 炉の約 2 倍となるが、アークは安定している。また、上部一本電極のため、スクラップがアークを包囲して溶解が進む時間が長い。したがって、炉壁や天井への熱ロスが少なく、熱効率が高くなるため溶解時間は短縮される。加えて、DC 炉では同心円状に均一に溶解し、AC 炉にみられるコールドスポットは発生しない。よって、O₂ バーナーなどによるコールドスポット対策は不要となる。

(3) 溶鋼の精錬特性

AC 炉においては、“上熱”と呼ばれる溶鋼内の偏熱傾向がしばしば見られ、大型スクラップや合金の溶け残りが発生したり、ひどいときにはボイリング現象を起こす。このため、大型炉においては、最近底吹きガス攪拌を行っている例もある。しかし、炉床や羽口の損耗が著しく、安定操業は技術を要する。一方、DC 炉においては、電磁力による溶鋼攪拌力により、スクラップや合金の溶け残りは発生しにくい。実験炉において、二次精錬を AOD で行うステンレス鋼を O₂ 吹精なしで溶解したが、溶け残りは見られなかった。図 5 に出鋼前温度と鍋上温度の関係を示す。このテストは DC 炉、AC 炉共測

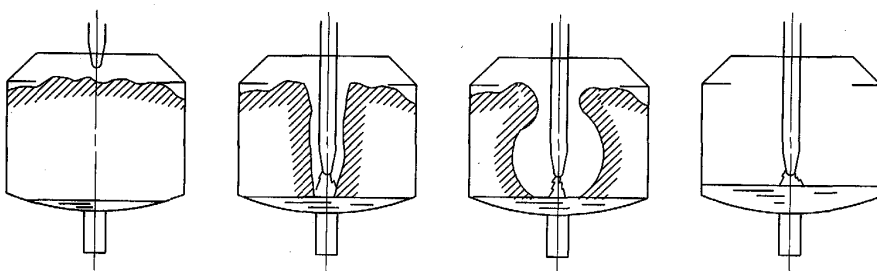


図 3 スクラップパターン観察結果

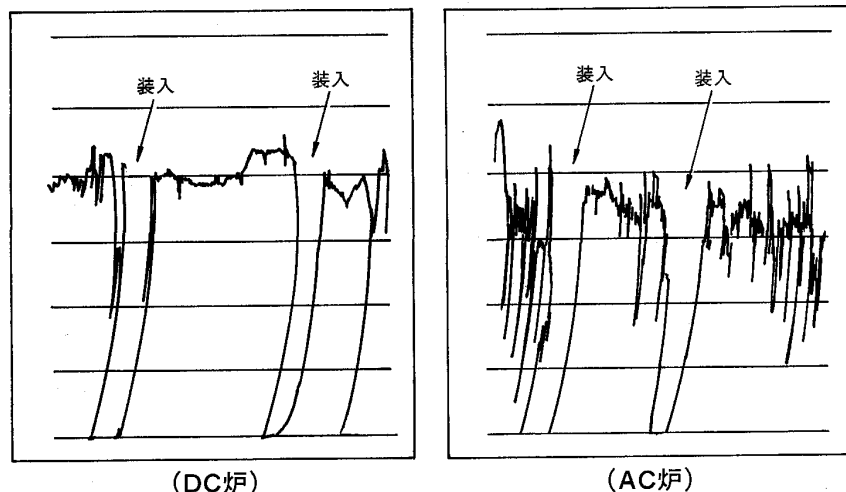


図 4 電力投入例

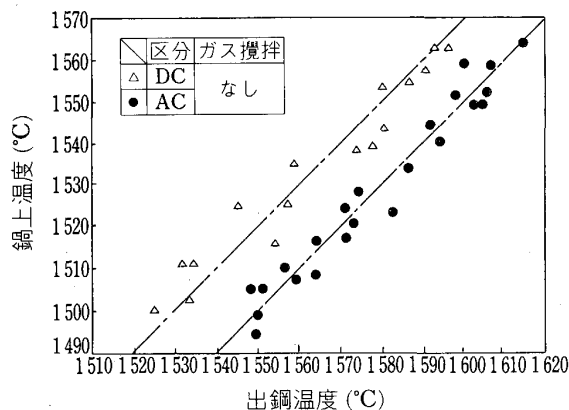


図 5 出鋼温度と鍋上温度の関係

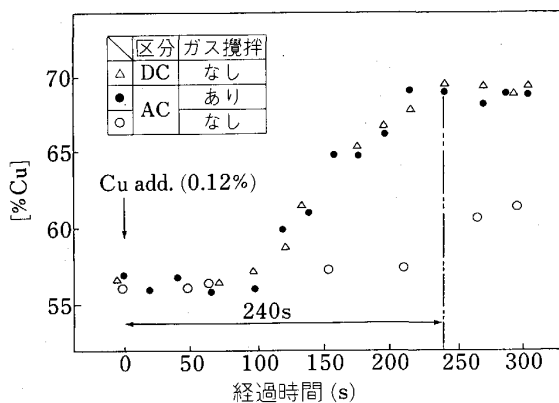


図 6 均一混合時間比較

温深さをそろえて測定したもので、DC 炉の温度降下が小さいことがわかる。これは、DC 炉の炉床回りの溶鋼温度が比較的高いことを示す。DC 炉の攪拌力を評価するため、銅をトレーサにし均一混合時間を測定した結果を図 6 に示す。

AC 炉は、ガス攪拌しない場合と、流量 100 l/min で N_2 底吹攪拌（炉底中央一本羽口）を行った場合を測定した。この結果、DC 炉においては、240 s で均一とな

り、AC 炉底吹きガス攪拌を行った場合と同程度となった。また、AC 炉でガス攪拌しない場合は、600 s 経っても均一とはならなかった。図 7 に攪拌エネルギーと均一混合時間の関係²⁾を示す。この関係から均一混合時間 240 s の点を求めると DC 炉の攪拌エネルギーは、ほぼ VOD と同じレベルであることになる。このことから、上部一本電極 DC は、溶鋼攪拌において、非常に効率的であるといえる。

(4) 上部黒鉛電極

14 インチの上部電極を DC 炉および AC 炉でテストした結果を図 8 に示す。結果は、DC 炉において、最高 40 kA と AC 炉の許容電流の 130% を流したにもかかわらず、50% 以上も電極原単位は良い結果を得た。これは、電極消耗モデルが示す先端消耗および側面消耗において、上部電極を陰極にしたことにより、陽極における電子衝突による“Anodic spot”がなくなり、先端消耗が少なくなったこと、また、三本電極が一本電極になったことにより表面積が小さくなり側面消耗が減ったためと思われる。

(5) フリッカー

実験炉におけるフリッカーの比較を図 9 に示す。フリッカーは、無効電力変動により発生することは良く知られているが、DC 炉の場合、非常に応答性の速いサイリスター装置により、電流一定制御を実施すると、有効電力-無効電力時性 (P-Q 円線図) は図 10 のように 4 分円となり、一方 AC 炉は、よく知られるように半分円となる。よって、最大無効電力の比は、下式のようになる。このとき、 $\cos \theta = 0.85$ とするとフリッカーは約半分となることがわかる³⁾。このことは、実験炉のケースとよく合致する。

$$[Q_{max}(DC)]/[Q_{max}(AC)] = \sqrt{(1 - \cos^2 \theta)} = 0.527$$

(6) 騒音

溶解初期の騒音を周波数解析した結果を図 11 に示す。DC 炉における騒音は、溶解初期（ボーリングが終

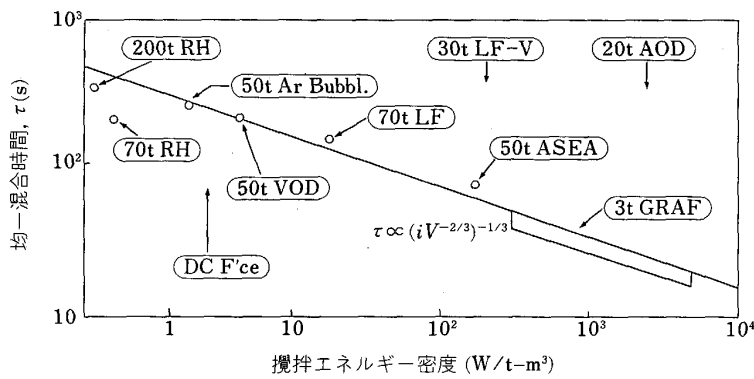


図 7 攪拌エネルギー比較

	先端ロス	側面ロス	合計
DC 炉	0.72kg/t (60%)	0.48kg/t (40%)	1.20kg/t (100%)
AC 炉	1.2kg/t (38%)	2.0kg/t (62%)	3.20kg/t (100%)

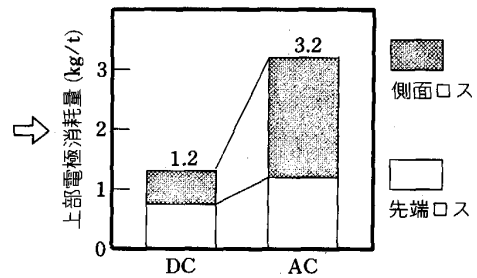


図 8 上部電極テスト結果

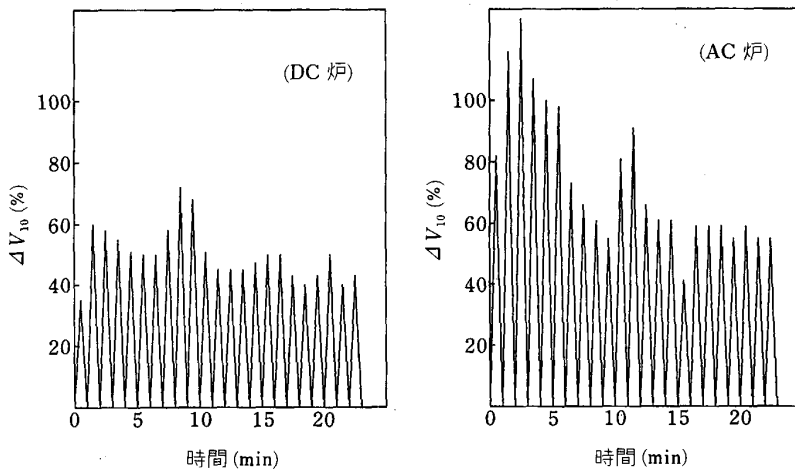


図 9 フリッカー比較

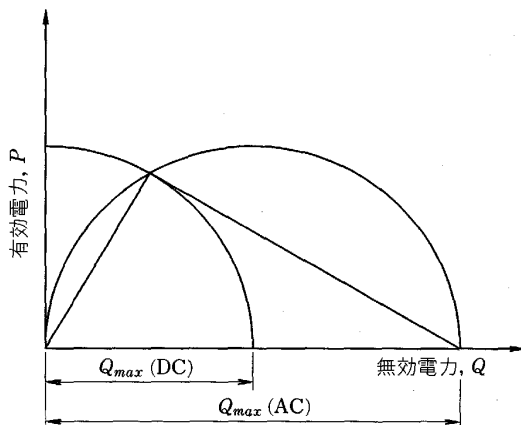


図 10 有効電力-無効電力特性

了するまで)は、AC 炉と同じ 115 dB 程度であるが、その後、急激に音が小さくなり、精錬期では 85 dB にまで低くなる。また、溶解初期においても、DC 炉の中心周波数は、AC 炉に比較して高周波であり、このことは騒音対策上も望ましい。

2.2 周辺技術

2.2.1 EBT (偏心炉底出鋼)

炉底出鋼方式は、1979 年 Thyssen Werke 社と Mannesman-Demag-社が共同で Thyssen Edelstahlwerke AG Witten 工場の 50 t 炉を改造し開発したのが CBT (中央炉底出鋼-Concentric Bottom Tapping) の始まりである。CBT の目的は、耐火物コストを減少させるため炉壁水冷化率を増加させることにあった⁴⁾。その後、タップホールの保守性改善および清浄鋼製造に便利

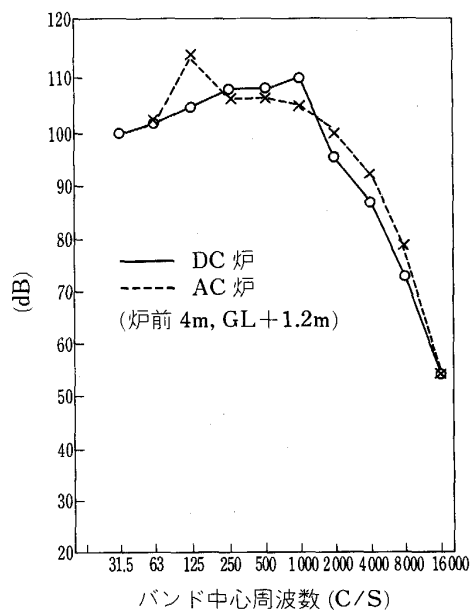


図 11 騒音周波数解析結果

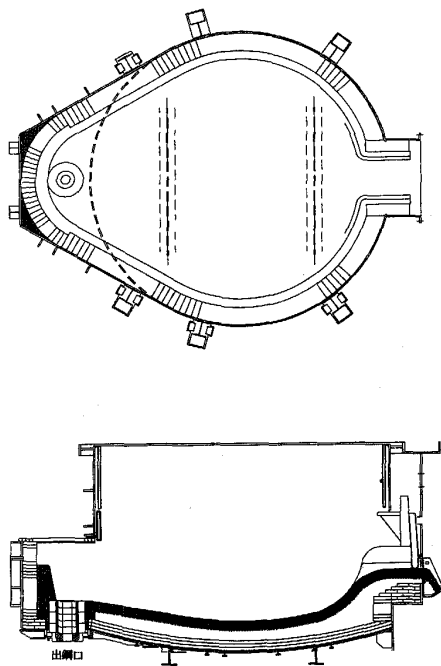


図 12 EBT の構造

なスラグフリー出鋼を目的として改良された EBT (Eccentric Bottom Tapping) が、1983 年デンマークの Det Danske stalvalseværk 社の 110 t 炉でつくられた⁵⁾。その 2 年後の 1985 年に日本で初めてトピー工業 (豊橋) 120 t 炉に EBT が採用された⁶⁾。その後、EBT は注目を集め現在 10 基以上に採用されている。

(1) EBT の特徴

EBT の構造を図 12 に示す。

一般に EBT が従来の傾注式出鋼に比べて有利な点は

下記のとおりである。

- A. 炉壁水冷域拡大
- B. スラグフリー出鋼が可能
- C. 出鋼時間が短い
- D. 出鋼流が整流である

すなわち、耐火物コスト低減はもちろんのこと、清浄鋼を製造しやすいこと、出鋼時間が短縮され生産性が向上することなどがメリットとなる。

(2) EBT 検討項目

上記に示す一般的な評価と共に、日本の現状において議論すべき項目をあげて整理を行う。

(A) 出鋼精錬

一般に、傾注式出鋼においては出鋼スラグと溶鋼が一体となって取鍋に落下し、その際に、落下エネルギーにより、溶鋼が十分スラグと反応し精錬される。しかし、EBT においては溶鋼のみ取鍋に落下し、精錬はできない。この点を十分検討し製鋼法を見直す必要がある。

(B) 取鍋耐火物

一般に湯当たりと呼ばれる出鋼流が取鍋に当たる位置は、EBT では一定位置に定めることができる。また、一方でその位置を取鍋台車の移動により正確に変更できる。このことは、敷れんがの耐用を一般壁やスラグラインとバランスすることが容易となり、取鍋耐火物トータルのコストを低減できる可能性を持っている。

(C) 出鋼時間とスラグカット

スラグ巻き込みを防止してスラグカットができるかどうかは、タップホール径とタップホール上の溶鋼深さの関係によって決まり、ある一定以上の溶鋼厚みがとれない場合、うず流が発生し、スラグが流出することとなる。一方、出鋼時間はタップホール径により決定される。よって、製造する鋼種および二次精錬炉の有無を考慮して、タップホール径を決定することが重要である。

(D) 自然開孔率

EBT において最も問題になるのが、出鋼時にタップホールが閉塞することなく溶鋼が流出するか否かであり、(自然開孔した回数/出鋼回数)×100 を自然開孔率と呼ぶ。現在は 97% 以上といわれている。自然開孔しない原因は、はがれ落ちた電極や未溶解スクラップによりタップホールが閉塞されるケース、およびタップホール充填材が焼結してしまうケースが考えられる。前者は炉芯部とタップホール付近では、溶鋼に温度差が若干あるため (計算値では 150°C) に大型スクラップが溶け残ることによる。また、後者は充填材の材質がポイントとなる。対策としては、大型スクラップの配合率と出鋼温度管理であり、充填材としては、 MgO/SiO_2 と 10% Fe_2O_3 の混合物を用いると良いといわれている⁷⁾。

(E) 残湯操業

EBT においては、残湯操業が前提となる。残湯操業の利点は、溶解期においてアークが早期に安定するこ

と、湯溜まりが早期に形成されるため酸素吹精を早い時期から実施でき、生産性を上げうる。また、前記自然開孔率確保の点でも効果がある。一方では炉を水平にした状態で、タップホールから溶鋼が流出しないことが安全上およびタップホールの保守面からも重要であり、残湯量と炉底形状を十分に考慮する必要がある。

2・2・2 スプレー炉蓋

製鋼用アーク炉の高負荷操業化に伴い、炉蓋は 1973 年から水冷が実施され、広く採用されている。しかし、安定した操業を行うために十分保全をする必要があり、長寿命化には多量の水を用いて熱疲労や熱負荷を減らす必要があった。このため、より少ない水量で壁の温度を下げ、穴あき時の水洩れ量を減らすことが長年の課題であった。1984 年米国マリオンスチールにおいて、穴あき時の漏水を最少にするため、水スプレーで冷却し、その排水をベンチュリーポンプで吸引し内部を大気圧に保った炉蓋が開発された⁸⁾。この技術は、Ucar Cabon 社により改良開発され実用化された。その後、日本において 1989 年 Ucar 社からの技術導入で、大同特殊鋼(株)知多工場 70 t 炉に設置され日本における UHP 操業下での実証運転が行われている。

以下にこのシステムの特徴と実証運転の結果を示す⁹⁾。

(1) 炉蓋水スプレー冷却法の特徴

水スプレーによる炉蓋冷却は、冷却水を圧力噴霧し液滴群として熱負荷のかかる面の裏側に衝突させ、衝突後は炉蓋の傾斜面にそって外周へ流れ落ちる噴流として利用する。冷却水の利用効率が良いため従来より少ない冷却水量で済む。ただし、水温上昇による冷却面の水あかが生じない水量以上は必要である。また、液滴の衝突により伝熱面の汚れは生じにくく高い冷却能力が維持できる。一方、小天井周囲や排気口周囲など熱負荷の大きい部分へは、水量密度を増すなど熱負荷に応じて水量分布が変えやすいことも利点である。また、ベンチュリーポンプにて炉蓋内を大気圧に保っているため穴あき時も漏水量は少なく済む。

(2) 実証炉での操業結果

実証炉の水スプレー炉蓋の設備仕様を表 5 に示す。このテストは 1989 年 5 月末から 62 チャージ実施した結果である。炉心から 2 m の A 相近くの鉄皮に K シース熱電対を深さを変えて埋め込み、操業中の温度推移を測定し、そのデータから一次元熱伝導解析により、鉄皮表面温度と熱負荷を求めた結果を図 13 に示す。鉄皮温度は溶落ち時に鋭いピークを示し、炉内側 250°C、スプレー面 80°C に達した。熱流束はピーク時 $55 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 、平均 $18 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ となった。このピーク時の最大熱流束値を用いて、このときの鉄皮温度差から板の変形が完全に拘束されるとして計算した結果を表 6 に示す。水スプレー炉蓋の熱応力は耐力の 70% 以下で、10 万回

表 5 水スプレー炉蓋の設備仕様

	水スプレー炉蓋	従来炉蓋
給水圧力 冷却水量 給水系統	1.6 kg/cm ² G 140 t/h 自動ストレーナー付き	1.6 kg/cm ² G 140 t/h ストレーナーなし
排水系統	ベンチュリーポンプで吸引 駆動水 3.5/cm ² G	給水圧力にて押出し 240 t/h 駆動水不用
炉蓋	一体系、外径 6 120 mm、15 000 kg 内圧は大気圧以下 水冷化率 77%	分割パネル組合せ形 2 200 kg 内圧 0.5~1.0 kg/cm ² G 水冷化率 74%
監視、警報	給水量、排水温度 駆動水圧	排水温度

大同特殊鋼(株)知多工場 70 t

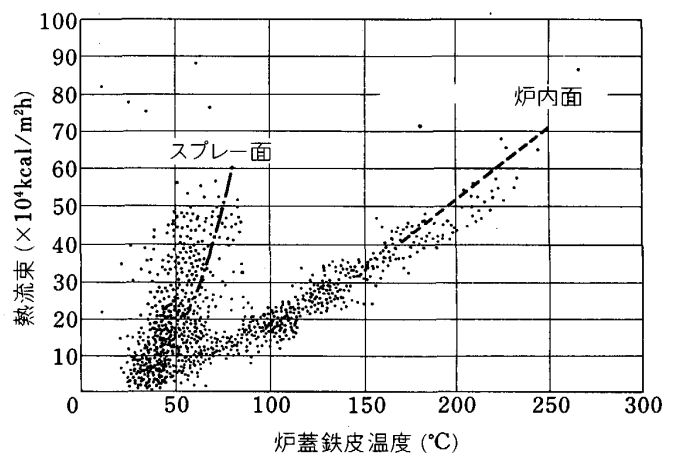


図 13 炉蓋鉄皮温度と熱流束

表 6 炉蓋熱応力比較

	水スプレー炉蓋	従来炉蓋
炉内側鉄皮温度	222°C	325°C
同上温度での耐力	34.5 kgf/mm ²	32.0 kgf/mm ²
温度差による熱応力	23.4 kgf/mm ²	33.5 kgf/mm ²
同上温度での疲れ限度	9×10^4 回	0.3×10^4 回
期待される寿命延長	10 倍以上	ベース

の繰返し限度を持ち、従来炉蓋に比べ格段の改善となっている。以上の結果長寿命化が期待できる。また、従来炉蓋に多発している水漏れ、水配管焼損や折損による操業中断は、炉蓋内が大気圧であることや配管が炉蓋内に設けられていることにより大幅に改善され操業度も向上した。加えて、穴あき時も水漏れは少なく、密閉性も向上し集じん効率も良くなり炉上作業性や安全性も改善されている。また、炉蓋へのホース接続本数 150A-3 本と従来の 50A-12 本に比べて極めて少なく、ノズル点検は各部に設けられた点検口から容易に実施でき、不良の場合は、クイックカプラーから脱着し、スプレーバーごとに交換できる。このため保守費用は従来炉蓋を 100 とするとスプレー炉蓋は 12 と大幅に改善されている。

以上のように、スプレー炉蓋は数々の優れた特性を持っており、今後採用は拡大すると考える。

2・2・3 電極制御装置

電極制御装置は、電極と溶解するスクラップの間に連続して安定したアークを発生させるために重要な役割を持っている。そのため、古くから研究が行われているが、その制御原理は今でも変わっていない。従来からアーク炉の操業状態を現す信号は、アーク電圧とアーク電流が主体であり、これ以外の信号も研究されてきたが、新しい制御原理を開発するに至っていない。しかし、各機器の発展は素晴らしく電極昇降速度や応答性は飛躍的に向上している。

電極制御装置は、制御回路と駆動機構により構成されている。制御回路は、前述のようにアーク電圧とアーク電流の比を一定にするような信号を電極駆動機構に指示するインピーダンス制御方式が古くから使われている。しかし、電子回路技術の進歩にともなって信頼性は大幅に向上した。一方、駆動機構については、直流モーター、交流モーターを直接作動するものおよび電磁カップリングを使用するものなどの電動モーター式と、液圧シリンダーにより電極を上下させるものとがある。現在この駆動機構に新技術が適用され、電極昇降速度も従来の4～6 m/min に対し、6～9 m/min と約1.5 倍程度向上して

いるので、この点を整理する¹⁰⁾¹¹⁾(表7)。

(1)サイリスターレオナード式

直流モーターは、応答時間が短く、制御性が良く以前は製鋼用アーク炉の電極昇降装置として用いられていた。当初は増幅発電機を用いていたが、改良されサイリスター整流器を用いるようになってきた。しかし、整流子のブラシの保守面で問題が多く、誘導電動機を用いる交流方式が多くなっている。

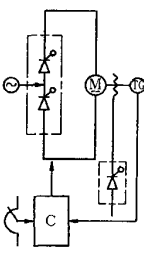
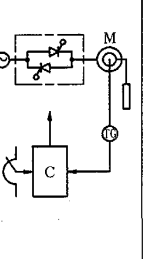
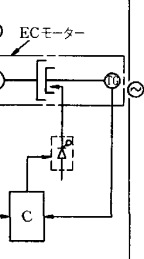
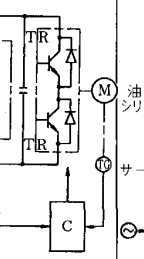
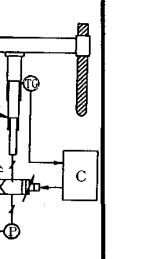
(2)交流サイリスター式

巻線形交流電動機をサイリスターによって制御する方式で、サイリスターの組合せにより、三相交流の相順を変化させ正逆転をさせると共に、サイリスターの点弧角を制御し、電動機の一次電圧を変化させ速度制御する。しかし、モータートルクを直接管理できないので、速度制御の応答性が悪い。また、当初はサイリスターの信頼性が悪く保守面の問題も多かったが、現在は解消されている。

(3)電磁カップリング式

誘導電動機を常時電極上昇方向に回転させ、渦電流カップリング(電磁誘導接手)の励磁電流を調整して、

表 7 電極制御装置の比較表

	サイリスター レオナード	サイリスター 一次電圧制御	ECモーター (DEC)	VVVF (ベクトル)制御	液圧式
システム 構成					
電動機	直流	交流巻線形	交流カゴ形	交流カゴ形 (特殊)	交流カゴ形 (汎用)
制御	三相交流入力を変圧・整流(DC)し電圧制御	三相交流一次電圧をサイリスターにより制御	渦電流とカップリングの励磁電流を制御。モーター・カップリングTG一体系	三相交流入力を整流して三相インバーターで逆変換しベクトル制御	制御装置からの電気信号によりサーボ弁スプールを移動して制御
応答速度 (s) カッコ内以降	0.3～0.4	0.5	0.4	0.3～0.4	0.16
効率	良	悪	普通	良	普通
保守	整流子のブラシ	スリップリング ブラシ	良	良	液圧の管理
発生トルク	大	中	中	大	大

その伝達トルクを加減して電極を上下させ、電極昇降速度は、その励磁電流の加減によってカップリングの滑りが変化することにより制御する。この方式では、他の方式に比べて電動機の慣性モーメントが除外されたことになり、かつ、励磁コイルの時定数も少ないので応答性が良い。しかし、特殊モーターを使用するので保守面で予備機の準備が必要である。

(4) VVVF ベクトル制御式

サイリスター技術の進歩にともない、1985年にインバーターを用いた周波数ベクトル制御が導入され、機能的に直流モーターと同等の制御性があり、電磁カップリングのような低い慣性モーメントも合わせて得られるので注目されている。インバーターは、三相交流を直流に変換し、再度任意の周波数の交流を発生させ、モーターの回転数を制御する。また、正逆転や始動-停止の過渡状態において、ベクトル制御により優れた応答性を与える。この際、回転数-トルク特性が明確になっているので、電極昇降特性は極めて良い。このシステムは電極昇降速度は最大 8 m/min で実施した例があり、非常にスムーズな動作を確認している。

(5) 液圧式

液圧式による電極昇降は、ヨーロッパを中心として長い歴史があり多くのアーク炉に採用されている。液圧は慣性による遅れが小さく、総合的には、電動機方式より慣性が少ない応答性の優れた方式といえる。しかし、日本ではこの例は数えるほどしかない。1985年にサーボ技術を応用した例が実用化され、この場合最大 9 m/min の電極昇降速度であったが、その後 10 m/min を超すものも実用化された。液圧制御方式は、従来常に一定圧力を昇降シリンダーに加えるため、圧縮空気圧を利用しておりリザーブタンクが場所をとっていた。また、液体の蒸発やリークを常に監視することが必要であったため、日本ではその採用に障害となったと思われる。しかし、新しいサーボ回路技術の採用などによりこの方式はいっそう発展するものと期待されている。

以上のように 1985 年以後新たな電極昇降装置が開発され、電極昇降速度の早い、応答性も極めて良い装置の導入が進められてきたが、操業面では、スクラップなど変動要因の多いアーク炉においては明らかな差異を把握

するのは困難である。しかし、装入時間短縮および安定したアークの持続には有効である。今後、ファジー理論などを適用したインピーダンス制御方式を超える電極制御回路の開発が待たれる。

2.2.4 底吹きガス攪拌装置

製鋼用アーク炉において、溶鋼を攪拌することは、スクラップの溶け残り防止およびアーク伝熱の均一化のために必要である。これは、通常操業では酸化期において酸素を溶鋼中に吹き込み十分攪拌させることで行われており、Cr などの合金の酸化を嫌うステンレス鋼溶解においては、炉底にスターラーを設置し電磁力により攪拌を促進させて、溶鋼成分均一化、合金歩留り向上、溶鋼温度均一化を目指していた。しかし、スターラーでは攪拌力が不十分であり SUS 溶解においては、種々の問題が発生していた。これを解決するため底吹きガス攪拌技術¹²⁾が開発され 1980 年代末期に各社で採用された。底吹きガス攪拌は、炉底にガス吹込用の羽口(プラグ)を設置し、そこを通して Ar または N₂ を溶鋼中に送り込み溶鋼を攪拌するもので、転炉においては一般化している。しかし、電気炉の場合には、製鋼時間が長く、冷たいスクラップから 1600°C 程度の溶鋼にするため、温度差が大きく、鋼浴深さが浅いなど転炉と異なる条件となるので、耐火物に与える影響に違いが出る。電気炉におけるプラグ特性は、水モデルによる攪拌テストや取鍋による予備実験の結果、表 8 のように設定されている¹²⁾¹³⁾。

(1) 底吹きガス攪拌の実験結果

20 t AC 炉において炉床の中心部に羽口を一本設置し、9.5 kgf/cm² の供給圧力において 100 l/min の流量でガス攪拌したテスト結果を整理した¹⁴⁾。

図 14 に羽口形状を表 9 に耐火物の化学成分と寿命を

表 8 電気炉底吹きプラグ

ガス流量範囲	75~300 Nl/min
プラグの形状	比較的低流量域での使用が主体となり耐用性の面から細管を複数配列したタイプが有利
細管の孔径	φ1.5 mm 以下 溶鋼侵入抑制のためできる限り小径が望ましい

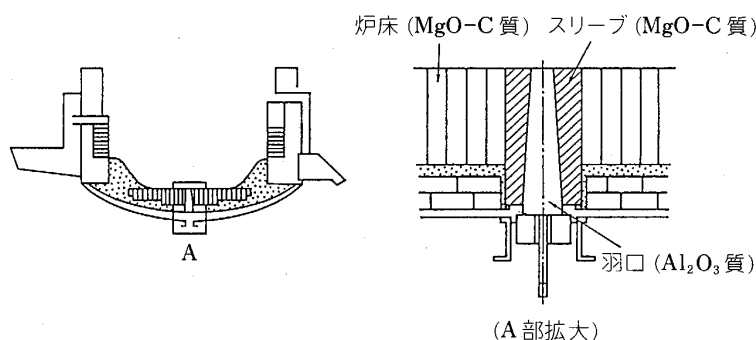


図 14 底吹き羽口形状

示す。

A. 溶鋼の均一化に関して Cu をトレーサーとして均一混合時間を測定した結果は 2・1・3 項図 6 が示すように 240 s で均一となる。

B. Cr の酸化防止については、図 15 に出鋼後の取鍋スラグの (%Cr₂O₃) と塩基度の関係を示す。底吹きガス攪拌を実施した場合、McCoy-Langenberg の平衡式¹⁵⁾に近く、ほぼ平衡値に達している。この結果スラグ中の Cr は、溶鋼 t 当たり約 2.5 kg 減少した。また、同様に Mn も溶鋼 t 当たり 1.5 kg 減少した。

C. 底吹きガス攪拌によりステンレス鋼溶解の作業方法も図 16 に示すように変更された。すなわち、従来は、大型スクラップの溶け残りが発生するため酸素吹精を

行ってきたが、溶鋼攪拌が十分に行われることにより溶け残りはなくなり、酸素吹精は不必要になり、「適正酸素-適正スラグ操業」と呼ぶ操業になっている。各種原単位価格の比較をまとめると表 10 のようになり、底吹きガス攪拌はステンレス鋼溶解において効果を上げている。

一方、底吹きガス攪拌により溶鋼のスクラップに対する伝熱効率が向上するという報告¹⁶⁾もあり、普通鋼溶解においても普及する可能性が期待される。

2・2・5 自動化設備

自動化設備については、従来から研究が進められており、個別の製鋼作業についてはすでに省力装置が開発されているが、信頼性に欠けるのが実情であり、総合的な製鋼の系統的省力化は、まず不十分である。表 11 に自動化の現状と課題を示す。

表 9 電気炉床耐火物成分

使用部位	化学成分 (%)					寿 命 (ビート数)
	%MgO	%CaO	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%C	
か床	81.0	—	0.1	0.7	16.2	750
スリーブ	81.4	—	0.1	0.4	13.5	400
羽口	—	0.3	96.5	1.9	—	150
側壁	84.0	—	0.1	0.6	12.0	150

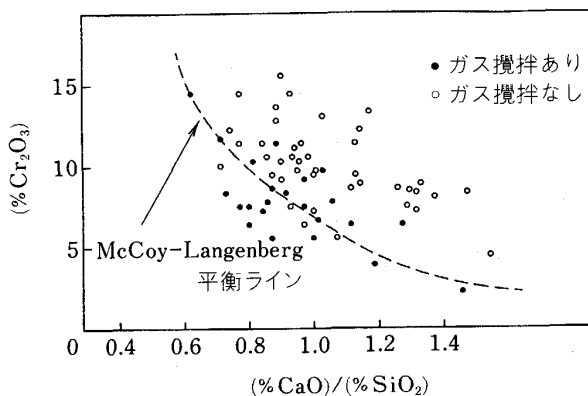


図 15 取鍋スラグ中の (%Cr₂O₃) と塩基度の関係

3. 溶解技術の動向

わが国の電気炉製鋼は、生産性向上、コスト低減、加えて品質の向上を目指して、試行錯誤を重ねての独自の技術開発や海外からの技術導入を実施し、関係者の不断の努力の結果、世界最先端に位置すると考えられる。ここで、1990 年代を節目として製鋼新時代へ入ろうとしている溶解技術について整理した (表 1 参照)。

3・1 炉体大型化指向

1950 年代後半に 50 t 以上の炉が登場し、それまでの 30 t 以下であった炉容量が、50 t~80 t が主流になってきた。しかし 1964 年においても、50 t 以上の炉は、全

表 10 底吹きによる各種原単位比較

比較項目	底吹きガス攪拌	攪拌なし
電力原単位 (%)	106	100
電極原単位 (%)	106	100
酸素使用量 (%)	37	100
Fe-Si 使用量 (%)	33	100
Al 灰使用量 (%)	45	100

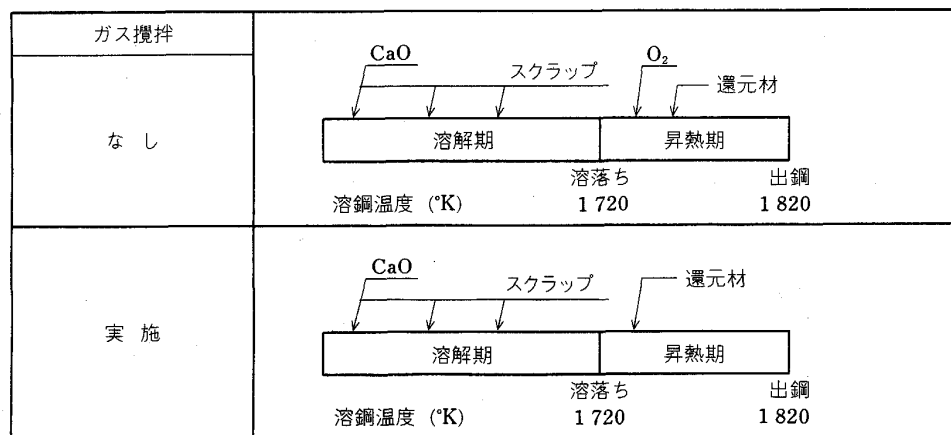


図 16 ステンレス溶解操業方法比較

表 11 製鋼自動化設備の現状

製鋼作業	省力装置	操作人員	操作方法	今後の課題
原料装入	—	—	装入バケットをクレーンで炉頂より投入	スクラップ連続投入 (スクラップ前処理と費用連続投入と信頼性)
送電	最適電力制御装置	1	溶解の進行に合わせて電圧タップ、電流を切り換える	トリップ時自動復帰 トリップなし通電 (DC 炉)
合金造滓剤添加	合金自動投入装置	1	操作室にて受入れ 貯蔵、秤量、投入を指示して自動的に行う	
测温サンプリング	测温サンプリング装置	1	操作室にて指示し自動的に行う	信頼性向上 (プローブ曲がり、サンプリングミス)
電極接続	電極接続装置	1	炉前からクレーンに吊り下げた装置を制御する	スピードアップ 位置決め精度
酸素吹精	自動送酸装置 (台車式)	1~2	ランスをセットし操作室などで操作、吹精中はランス自動引き伸ばし	ランス交換頻度低減 ランス変換時間短縮
炉修作業	熱間補修機	1~2	炉蓋旋回し、炉頂よりランスを下げ円周方向吹付けを行う	補修時間短縮 放熱ロス低減
除滓	真空スラグクリーナー	1~2	炉内に水冷された吸込口を入れ、スラグを吸引して除滓する	安全対策 (水漏れ) 熱ロス

体の 3% しか設置されていなかった。

3.2 超高電力操業 (UHP 操業)

1960 年代後半米国 W. E. SCHWABE 博士により、炉の大型化に対して、大容量変圧器を設置し、従来に比して高密度の電気エネルギーを投入し、生産性を上げる超高電力 (Ultra-high power) 操業が提唱され、時間当たりの生産性増大に多大な効果を上げた。しかし、炉体耐火物の消耗が著しく、電力原単位、電極原単位も悪い、エネルギー多消費型の操業法であった。

3.3 水冷炉壁、水冷炉蓋の採用

高電力操業によるアークフレアーが炉壁を局部損耗させる。いわゆるホットスポット部に、水冷したボックスを取り付ける方法が実施され、炉壁耐火物の消費量を著しく低下させた。当初は安全面から疑問視する意見も多かったが、現在では、炉蓋も含めて、ほぼ全面に装備する炉が多い。

3.4 電力フリッカー問題

高電力操業において、耐火物の問題は水冷ボックス、水冷炉蓋によりほぼ解決されたが、一方で、高電圧を使用するため電力フリッカーの問題が発生し、フリッカー制御装置の研究が進められ、非常に高価なフリッカー制御装置をアーク炉と共に設置し、環境問題に対応した。しかし、この装置にも限界があり、高電力操業をさらに進めることはあきらめざるを得なかった。

3.5 酸素富化操業、カーボンインジェクション

1970 年代中頃、よりいっそう生産効率を高めるため、電気エネルギー以外の代替エネルギーの研究が盛んになり、全溶解期を通じてスクラップ中にランスやバーナーを用いて、酸素を吹き込み、一部の鉄分を酸化させて熱源とし、溶解を促進する酸素富化操業が広く採用されはじめた。しかし、鉄分を酸化させるため、溶鋼歩留りが悪化するという欠点もあった。そこで、酸化された鉄分

を還元する目的で、カーボンを吹き込むカーボインジェクションが考え出された。この還元反応は吸熱反応であり、電力原単位を悪化させることになるが、研究の結果この際に同時に通電を行うと、アーク効率が増加し、電力原単位に影響を与えないことがわかった¹⁷⁾。これは、吹きこまれたカーボンと過剰酸素が反応し、CO ガスを発生し、スラグを泡立たせる、いわゆるフォーミングスラグ操業となり、スラグがアークを包み込みアークエネルギー効率をあげるためである。これにより、製鋼時間は 70 年代初期の約 180 min から 70 年代末期には 50 min 近く短縮して、約 130 min となった¹⁷⁾。

3.6 レードルファーネス (LF) 法の導入

1971 年に日本特殊鋼(株) (現: 大同特殊鋼(株)) で開発された LF 法は、電気炉製鋼に大きな影響を与えた。開発当初は、単に品質向上を目的とする高級鋼用炉外精錬炉とみられていたが、溶解炉と精錬炉とに機能分化する考え方を定着させた。

すなわち、製鋼用アーク炉から還元精錬を分離し、炉外精錬炉に移行することにより、溶解炉たるアーク炉の生産性が向上し、一方、炉外精錬においては、温度、成分の調整能力が飛躍的に向上した。80 年代初期には、連続 casting (CC) の普及率も高まり、特殊鋼のみならず、普通鋼においても設置するケースが増加した。

3.7 省エネルギー送電法

70 年代中頃の第 1 次、80 年代初期の第 2 次エネルギー価格高騰を通して、省エネルギーの考え方は、コスト低減と合わせて、わが国全体に広まった。その中で、1980 年初期に、アーク炉の電気特性と数多くの実験をベースにした省エネルギー送電法が、大同特殊鋼(株)において開発された¹⁸⁾。この送電法は、電力原単位が、溶解期の操業電流に対して二次曲線によって近似でき、ある電流値で最小となることを利用している。その後、

各社で実施され 5~10% の電力原単位低減を達成した。

3.8 スクラップ予熱

酸素富化操業、カーボンインジェクション等により、アーク炉排ガスの温度は高温になっており、省エネルギーの点からその顕熱回収を目的として、スクラップ予熱が 80 年代に普及した。

アーク炉全出熱の 20% を占める排ガス保有熱をスクラップを装入したバケット内に排ガスを通すことによりスクラップの温度を上げることに利用する省エネルギー装置である。この方法により排ガスが有する全熱量の 20~30% が回収され、平均 30~40 kWh/良塊 t の電力原単位の節減がみられる。

しかし、スクラップ予熱装置へ導入される排ガス温度は 500~1000°C で、出口ガス温度は 150~400°C 程度となるため、スクラップ中の油分、塗料等が仮焼され、オイルミスト、アセトアルデヒド、スチレン、硫化水素系のガスを生成し、臭気や白煙となって集じん装置から放出されるケースもある。これは、予熱されるスクラップを選択すれば発生を防止できる。しかし、スクラップを選択することはコスト高となるので、対策としては、白煙や臭気の原因となる成分をバーナーで燃焼分解させるアフターバーニング方式をはじめ、数多くの研究が行われている。

なお、高温のアーク炉排ガスを有効利用する排熱ボイラーによる熱回収も成功している。

3.9 今後の動向

90 年代に入り、わが国においても直流アーク炉が実用化され、電気炉製鋼における生産性向上、コスト低減および品質向上の三大テーマに対して、新しい武器を持ったと考える。そこで、今までの溶解技術の進歩を振り返り、もう一度見直す時であろう。さて、直流アーク炉が実用化されると、フリッカーは半減するといわれている。現在の規制値を変えないとするならば、理論的に現状の約 2 倍の電気エネルギー密度が利用できることになる。この場合、酸素富化操業以前まで立ち戻り、すべてを見直す必要がある。すなわち、生産性向上は電気エネルギーを今以上に利用し、超超高電力操業を主体に置き、炉体を密閉化し、必要以上に酸素を使用しない酸素適正操業を実施すれば、アーク炉排ガス量も減少し、必要な集じん電力を削減でき、環境面からも CO₂ ガス排出抑制にも良いと思われる。現在、大同特殊鋼(株)星崎工場の DC 実験炉において、酸素を全く使用せずステンレス鋼溶解が行われ、電磁力による溶鋼攪拌の効果により均一溶解について良好な結果を得ている。

また、普通鋼についても、東京製鉄(株)九州工場において、130 t DC アーク炉の変圧器容量が 100 MVA と従

来の AC アーク炉の 70 MVA に比して大型化され、製鋼時間が 58 min に短縮されたと報告されている¹⁹⁾。21 世紀までの十年間、電気炉製鋼における溶解技術は、以前にも増して技術革新が加速されていくものと思われ、21 世紀には、素晴らしい電気炉製鋼法となることが期待される。

4. ま と め

電気炉製鋼法は、操業技術が設備に改革をもたらし、また設備技術の発展が操業技術を革新するといった、設備技術、操業技術が互いに推進力となりながら発展してきた。また、もう一つの大きな課題として、作業条件の改善(省力、自動化)、環境問題の克服なしに電気炉製鋼法の未来がないことも忘れてはならない。1990 年 6 月には、「21 世紀におけるハイテクスチールプラントを目指して」という報告書²⁰⁾も出されており、21 世紀に向けた活動は着々と進んでいる。この報告にある新製鋼プロセスを目指して関係各位と協力していきたいと願っている。最後にこの稿で参照させていただいた資料を提供された各位に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 向山幹夫: 工業用電気炉 (1939) [共立社]
- 2) 湯浅悟郎: 第 100・101 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 255
- 3) 丸山和美: 工業加熱, **25** (1988) 2, p. 31
- 4) A. JUNKER: Iron and Steel Engineer (1981) Dec., p. 25
- 5) 最近のアーク炉製鋼法の進歩 (共同研究会電気炉部会編) (1986)
- 6) 花田裕司, 高橋昭一, 岡崎金造: 日本電熱協会技術報告 (1988) 8, p. 77
- 7) 京田 洋: 第 114・115 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1986), p. 139
- 8) 特願昭 60-504735
- 9) 金藤絃一郎, 岡本徹夫, 亀井伸幸: 電気製鋼, **61** (1990) p. 69
- 10) 岡田竹司: 第 114・115 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1986), p. 63
- 11) 稲垣悦郎: アーク炉の電熱 (私信) (1984)
- 12) 植 昌久: 鉄と鋼, **73** (1987), S 268, S 269
- 13) 市川健治, 西尾英昭, 湊 邦夫, 岡本伸一: 品川技報, **33** (1990), p. 141
- 14) 大同特殊鋼(株)技術資料 (私信) (1990)
- 15) C. W. MCCOY and F. C. LANGENBERG: J. Met., **16** (1964), p. 421
- 16) NKK: 私信 (日本鉄鋼協会共同研究会第 88 回特殊鋼部会) (1990)
- 17) T. KISHIDA, G. YUASA and K. SHINA: 47th Electric Furnace Conference (1986)
- 18) M. ICHIKAWA and E. INAGAKI: UIE10/Stockholm (1984), N. 2. 2. 16
- 19) 石原弘二: 鉄鋼界, **40** (1990) 8, p. 21
- 20) 通商産業省基礎産業局製鉄課: 鉄鋼界 **40** (1990) 8, p. 30