

© 1991 ISIJ

技術報告

30t 直流アーク炉の設備と操業結果

中村 毅*・青 範夫*²・石原 弘二*³Equipment and Operation Results of 30t DC Arc Furnace
at Topy Toyohashi Works

Tsuyoshi NAKAMURA, Norio AO and Kohji ISHIHARA

Synopsis:

With aim of reducing production costs, in January 1988, one of 30 t conventional AC furnaces at Toyohashi Works of Topy Industries, Ltd., was changed to a Direct Current (DC) arc furnace which was the first DC melter in Asia. It was jointly developed by M.A.N.GHH and BBC, and then designed and made by NKK.

For reconstruction from AC to DC furnace, thyristor-controlled rectifier, DC reactor and bottom electrode were put additionally to 30 t arc furnace equipment. Electrode control equipment becomes simple, because only one electrode is used. The transformer and other furnace equipments were not changed.

The DC arc furnace operation have brought us the following merits,

- 1) The flicker of DC arc furnace was reduced to under 50%, compared with that of AC arc furnace.
- 2) The problem of harmonics caused by the rectifier was solved by installing harmonic filters, which restrained harmonic component of the current under 5%.
- 3) Any abnormal wear did not occur on the bottom and 330 heats of bottom electrode life was stably achieved in the intermittent operation.
- 4) The decrease in melting cost of 900 yen/t was achieved, which was mainly due to a reduction in the consumption of graphite electrode, furnace refractory and so on.

Key words: DC arc furnace; bottom electrode; flicker level; harmonics.

1. 緒 言

従来、製鋼用アーク炉としては、交流アーク炉(AC 炉)が主体であり、近年ではトランス容量が 700~800 kVA/t のような超 UHP 炉の出現によって、生産性が飛躍的に向上してきた。しかし、トランス容量の増大によるフリッカー障害問題、高力率操業でのホットスポットの問題など数多くの問題を抱えているのが現状である。

このような背景の中で、これらの問題を解決すべく注目されたのが直流アーク炉(DC 炉)である。最近になってパワーエレクトロニクス分野の急速な進歩により大容量のサイリスタ技術が確立されて実用的な直流電源供給設備の建設が可能となったこと、さらに炉底電極の開発が進んだことにより、現在ではいくつかの DC 炉が

実用化されている^{1)~3)}。

トピー工業(株)豊橋製造所では、製鋼工場のコスト低減策の一環として 30 t-AC 炉 2 基のうち 1 基に、1988 年 1 月、日本初の DC 炉を設置した。約 2 か月間の試運転後、3 月から本稼働に入ったが、本稼働後の操業は極めて順調であり、当初計画した以上の効果を得ることができた⁴⁾⁵⁾。

本報では、DC 炉の特徴、設備仕様および操業結果について報告する。

2. 設 備 概 要

2.1 製造工程

Fig. 1 に豊橋製造所製鋼工場の工程フローを示す。30 t 炉のラインは、アーク炉 2 基からの溶鋼を取鋼精錬炉(LF) 1 基で処理し、全量第 1 ブルーム連続铸造機

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 7 月 23 日受付 (Received July 23, 1990)

* トピー工業(株)豊橋製造所 (Toyohashi Works, Topy Industries, Ltd., 1 Akemi-cho Toyohashi 441)

*² NKK 制御技術部 (Electrical and Control Engineering Dept., NKK Corporation)

*³ トピー工業(株)技術本部 (Technical Bureau, Topy Industries, Ltd.)

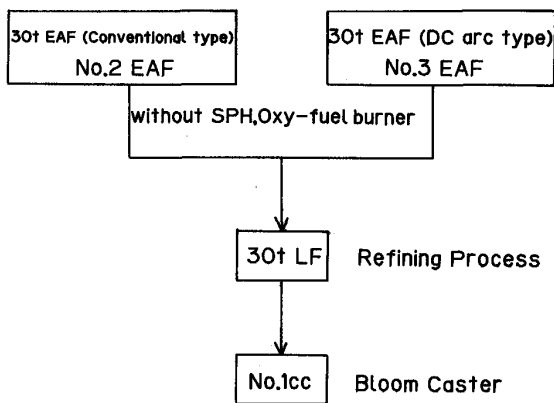


Fig. 1. Process flow of 30 t arc furnaces-No. 1 cc line.

Table 1. Main specifications of DC arc furnace.

Item	Detail
Type	NKK-DC-4800MH UNARC
Furnace capacity	35 t
Transformer capacity	15 MVA
Primary voltage	22 kV/F365-R305-125 V
Thyristor	
Output power	15 000 kW
Output current	41.8 kA
Output voltage	359 V
Furnace shell diameter	4 572 mm
Furnace height	2 438 mm
Number of electrode	1
Electrode diameter	18 inches
Water cooled side wall	53 %
Water cooled roof	97 %
Bottom electrode	
Number of pin	80
Cooling system	Air cooled system

へ送られる。この製造ラインは、基本的には夜間のみの間欠操業形態となっており、主に一般構造用炭素鋼を製造している。

なお、豊橋製造所の 30 t 炉にはスクラップ予熱装置、助燃バーナー、炉底出鋼は取り入れていない。

2.2 設備仕様

Table 1 に DC 炉の設備仕様、Photo. 1 に DC 炉の外観写真を示す。また、Fig. 2 には AC 炉、DC 炉の電源構成例を示した。本設備は、既設 AC 炉を改造して直流化したもので、トランスおよび炉体設備など使用できる設備はすべて流用し、新たにサイリスター整流装置、直流リアクトル、炉底電極を付加した。

サイリスター整流装置は既設変圧器を流用しているため 6 相整流（純ブリッジ）で、交流電流を直流に変換する。そして、その点弧角制御により、高速に定電流制御している。また、直流回路には水冷式のリアクトルが挿入されており、このリアクトルは炉内での電極とスクラップの短絡が生じた場合の短絡電流の立ち上がりを抑制し、サイリスター素子を過大な電流から保護すると

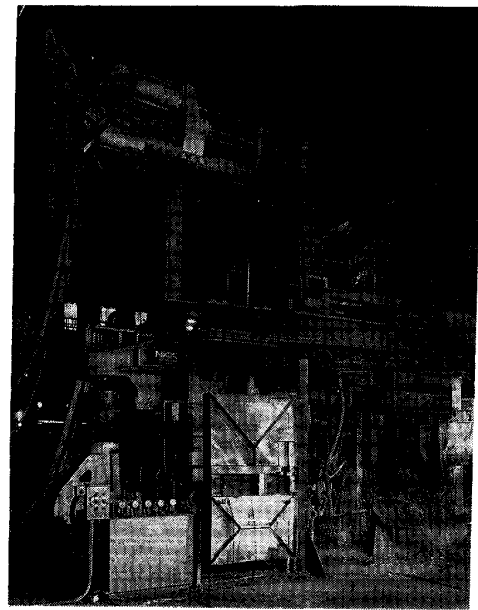


Photo. 1. An outlook of DC arc furnace.

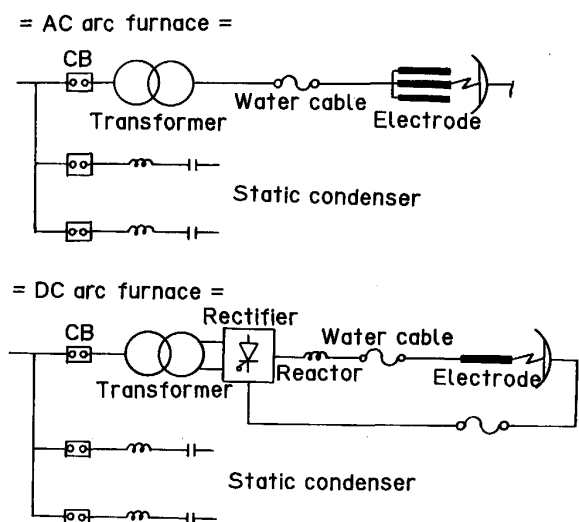


Fig. 2. Electrical circuit diagram of AC and DC arc furnace.

もに、アークを安定化させる働きをしている。

電流は陽極側水冷銅管、水冷ケーブルを通して、炉底電極→溶鋼・スクラップ→アーク→黒鉛電極→陰極側導体→直流リアクトル→整流装置へと流れる。黒鉛電極はアークの安定性および加熱効率の点から陰極（－）に選ばれている。

黒鉛電極については、三つの電極昇降装置の内一つだけを流用し、黒鉛電極が炉の中心に位置するようにホルダーアームを改造した。黒鉛電極は AC 炉の時と同じ 18 インチで、電動機によって昇降しスクラップや溶鋼との間に発生するアークの長さを制御する。黒鉛電極は、

炉の中央に一本しかないので、炉上および電極昇降・制御装置は非常に簡単になっている。

2.3 炉底電極

Fig. 3 に DC 炉の炉底電極の構造図を示す。炉底電極は、直径 1520 mm、高さ 700 mm と炉床の 2/3 を占め、また、導体となる直径 36 mm、80 本の鋼製の丸棒（コンタクトピン）が、鋼製の基盤上に、螺旋状に規則正しく配置されている。そして、そのコンタクトピンの間はマグネシア不定形耐火物で成形されている。この炉底電極基盤底部にコンタクトピンと同じように螺旋型風導板を設置し、コンタクトピン及び耐火物を強制空冷している。従って、万が一溶鋼が漏れた場合の水蒸気爆発の危

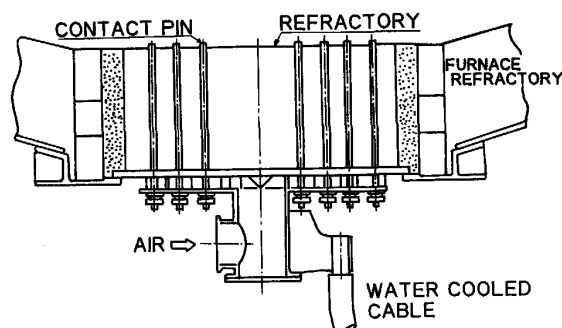


Fig. 3. Schematic illustration of bottom electrode.

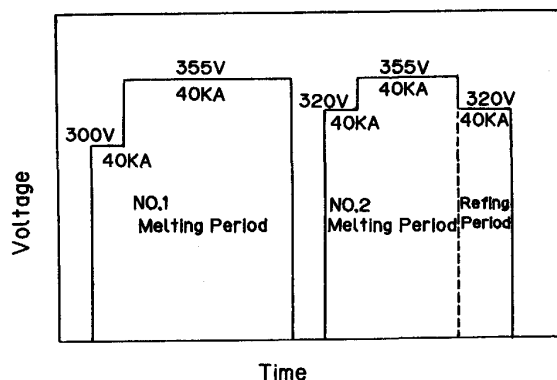


Fig. 4. Operation pattern of DC arc furnace.

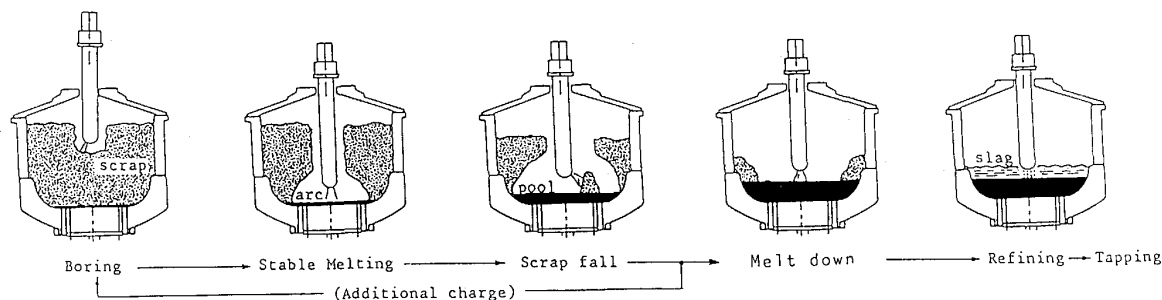


Fig. 5. Assumed melting process in DC arc furnace.

険性はない。炉底電極は導体部分であるから、耐火物で補修することはできないので、一定量溶損すると炉底電極部分だけを交換する必要がある。この交換を容易に行うために炉底電極の周りにブロックレンガと称するレンガを配置し、さらに、炉底電極とブロックレンガの間に目地部を設けた。目地部はマグネシアの不定形耐火物である。上記に示した DC 炉への改造は 1987 年末から 1988 年 1 月にかけて、26 日間で実施され、実際に炉を休止したのはわずかに 16 日であった。

3. 操 業 結 果

3.1 操業パターン

Fig. 4 に DC 炉の操業パターンを示す。溶解期の電圧は 355 V、精錬期は 320 V を使用し、電流は常に 40 kA で一定である。

これまでの観察結果に基づく DC 炉内のスクラップの溶解の進み方の推定を Fig. 5 に示す。ボーリングは約 4 min で終了し、炉床部の溶鋼にアークが飛ぶようになると電力投入は非常に安定して騒音もなくなる。スクラップの溶解はアークの存在する炉の中心から同心状に進む。やがて溶解が進むとスクラップ全体が沈み込むとともに上部の支えきれなくなった部分が崩れ落ちる。こうして、溶解は炉の中心から均等に行われ、炉壁付近にはほぼ均等に溶け残りを残して追加装入を行い、初装と同様のプロセスを経過し炉壁付近のスクラップまで完全に溶解して溶け落ちにいたる。その後はカーボンインジェクションを実施し、昇温、[C%] のみ調整後、所定の温度で出鋼する。

一般的に DC 炉の操業においては、炉底電極とスクラップの接触を確実にするために残湯操業が必須であるといわれており、コールドスタート時のために補助電極を設置している例もある⁷⁾。しかし、操業上の経験から、連続操業時であれば残湯がなくとも出鋼後 10~15 min 以内にスクラップを装入すれば、なんら問題なく通電可能である。

また、コールドスタートの場合には、操業休止前に溶鋼を全量出鋼した直後、炉底電極上に微細なスクラップを1tほど敷いておく。スタート時は従来どおりスクラップを装入し、通常の通電パターンでスタートしている。以上のような、簡単な準備をするだけで、通電不良などのトラブルは生じていない。従って、初期通電のための補助電極は必要ない。

3.2 炉底電極の使用状況

炉底電極の溶損量の確認は、コンタクトピンすべてに取りつけた熱電対による温度監視と、炉底電極溶損量の実測によって実施している。Fig. 6には、炉底電極の溶損パターンを示す。溶損速度はおよそ1.2 mm/Heatであり、全体が臼状に減り異常溶損もなく、まったく問題ない。また、Fig. 7にはコンタクトピン温度と溶損量の関係を示すが、非常によい相関を得ている。これらの結果から管理温度、管理溶損量をそれぞれ650°C、450 mmと設定している。現在炉底電極は間欠操業下で、

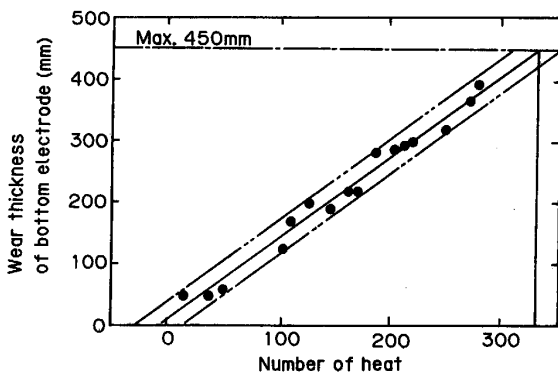


Fig. 6. Relation between wear thickness of bottom electrode and number of heats.

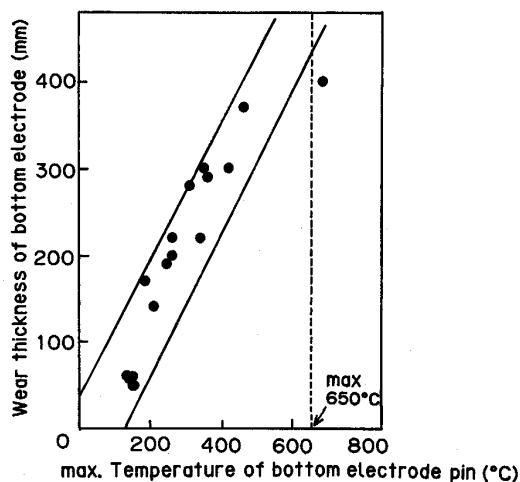


Fig. 7. Relation between wear thickness of bottom electrode and maximum temperature of bottom electrode pin.

およそ330ヒートの時点で交換している。

電極の交換は、冷却後地金を切り、油圧シリンダーで炉底電極ユニットを突き上げ、クレーンで吊り出している。炉底電極はカートリッジ式であるので、交換に要する時間は、冷却後約5hの短時間で行われている。

3.3 電力障害・騒音

豊橋製造所では、DC炉と同一の容量のAC炉が全く同じ条件で操業されており（スクラップ配合、鋼種、変圧器仕様など）、DC炉とAC炉の性能を正しく比較できるという利点がある。従って以下ではこれらの二つの炉を比較して、DC炉の効果を検証する。

(1) 発生フリッカー

AC炉では、電圧および電流の制御を電極昇降装置に頼っているため、その制御性は秒オーダーと遅い。このため、炉内で電極とスクラップが短絡を生じた場合には、定格の約2倍の短絡電流が流れ、無効電力は4倍近くにもなる。フリッカー障害はこのような無効電力変動が引き起こす電源電圧の特に10 Hz付近の変動を問題としている。このため、AC炉では、自分自身では短絡電流を応答良く抑制することができないため、多くはフリッカー補償装置を併設せざるを得なくなっている。

これに対しDC炉では、炉内での短絡時の電流は、直流リアクトルで電流の立ち上がりが抑制され、3 ms以内にサイリスター整流装置の制御が働き電流を抑制するので、無効電力の変動幅がAC炉に対して半減する。

Fig. 8にAC炉、DC炉の発生フリッカーレベルの比較を示す。AC炉のデータはDC炉改造直前に採取したものである。 ΔV_{10} 値はUIEフリッカーメーターで測定した99%フリッカー実効値を、電源短絡容量1 GVAの炉出力に換算し、さらにトランス容量1 MVA当りに換算した数値である。

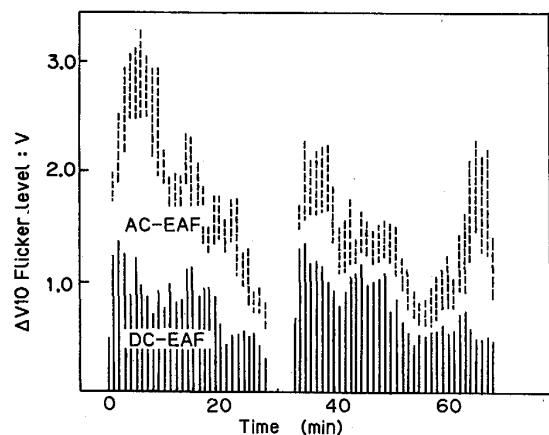


Fig. 8. Comparison of flicker level of AC arc furnace with that of DC arc furnace.

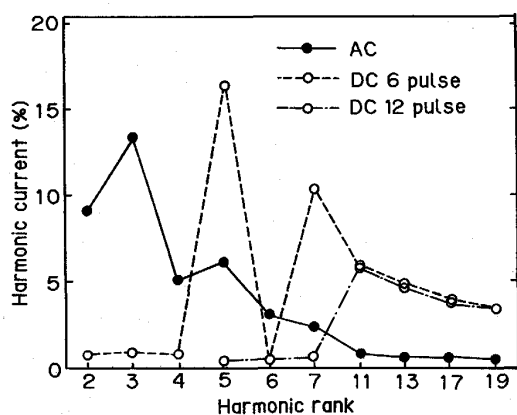


Fig. 9. Comparison of harmonics generated in AC arc furnace with that in DC arc furnace.

その結果、DC 炉の ΔV_{10} 値は AC 炉に比べて 50% 以下になっていることがわかる。

(2) 高調波

整流回路を含む電源系統では、必ず高調波が発生する。DC 炉は、電源側から見れば大容量の高調波発生源であり、この高調波は DC 炉稼働前の数倍となるため、この状態での機器の安定した動作は望めず、その対策が必要となってくる。

Fig. 9 に AC 炉、DC 炉の高調波発生パターンを示す。

AC 炉ではアークの定電圧特性によってアーク電流がサインカーブから歪み、2, 3, 5, 7 次といった低次の高調波が多く発生する。これに対し、DC 炉の場合は AC 炉のトランスを流用したために、巻線の構成上 6 パルスの整流器となり、高調波の発生次数 n は、(1) 式で表される。

$$n = 6k \pm 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots (1)$$

このため、第 5, 第 7 調波以上の高次数の高調波が発生する。

従って、これらの高調波による障害を防ぐためには高調波フィルターを設置する必要がある。豊橋製造所の場合、第 5, 7, 11 次の次数に高調波フィルターを設置した。しかし高調波フィルターによって高調波を完全に吸収するには膨大な容量と費用が必要となり、現実には不可能である。したがって、フィルター容量の検討に当たっては、どの程度まで高調波を抑えるかを示す管理指標を設定する必要がある。豊橋製造所の場合、この管理指標を電圧歪み率 5% 以下に設定し、フィルター容量を決定した⁹⁾。フィルター構成は

第 5 調波フィルター：1 バンク × 6 MVA

第 7 調波フィルター：1 バンク × 2 MVA

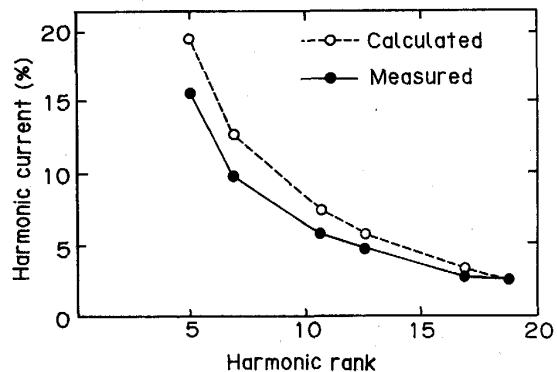


Fig. 10. Comparison of harmonics estimation with actual results.

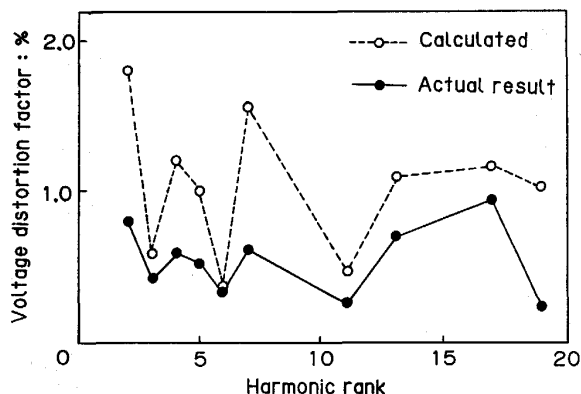


Fig. 11. Comparison of voltage distortion factor estimation with actual results.

第 11 調波フィルター：1 バンク × 2.5 MVA
とした。

Fig. 10 に DC 炉稼働後に採取した高調波の発生状況と、理論高調波から計算した計画値を示す。Fig. 10 から、実測値は計算値である理論高調波よりほぼ同等かそれ以下である。また、Fig. 11 には DC 炉の電圧歪み率の計算値と実測値の比較を示す。電圧歪み率は、計算どおり 5% 以下に抑えることができた。これらの結果から、高調波フィルターは設計どおりの効果を發揮していることを確認した。

以上の結果から、DC 炉新設または改造時にも高調波フィルター容量を設計する場合は、理論高調波をもとに行えば、まちがいに設計することができる。

(3) 騒音

炉蓋開口部の減少および、均等溶解によってアークがスクラップに囲まれ遮音されるので騒音レベルの低い期間が増加した。アークが飛んでいることがわからないほど静かな時期もある。

3.4 諸原単位の比較

Table 2 に、DC 炉導入によるコスト改善効果を示す。

Table 2. Effect of AC to DC arc furnace conversion.

Item	AC	DC
Unit consumption		
Electric power	100	95
Electrode	100	47
Gunning material	100	70
Others	100	100
Total*	—	900 yen/t improved
Bottom electrode life	—	330 heats
Flicker level	100	46

* The cost of bottom electrode is included into account in this figure.

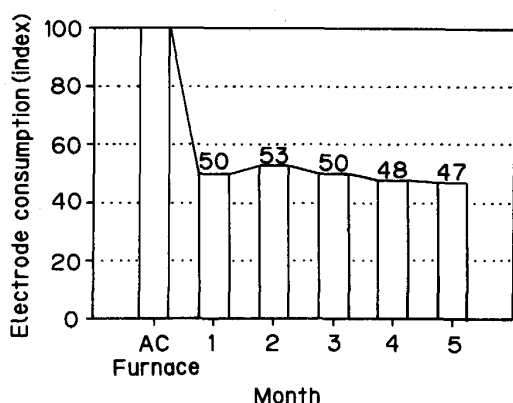


Fig. 12. Change in electrode consumption index of DC arc furnace.

これは、炉底電極のコストマイナス分を含んだ値である。このように、DC 炉導入による効果は大きく、900 円/t 以上のコストダウンを達成している。特に電極原単位の低減効果は著しく、Fig. 12 に示すように、導入前に比べて現状では約 40% になっている。また、既存のトランスを流用したことによる生産性の低下すなわち、製鋼時間の変化はまったくなかった。

(1) 電極原単位

電極の側面消耗と先端消耗とに分けて、AC 炉と比較する。これまでの試験によって、電極の酸化消耗機構は交流も直流も差が無いことがわかった¹⁰⁾。従って側面消耗量の違いの主な要因は酸化消耗を受ける電極表面積となる。容易に分かるように、DC 炉では電極本数が一本となったので、側面消耗は約 1/3 に減少している。

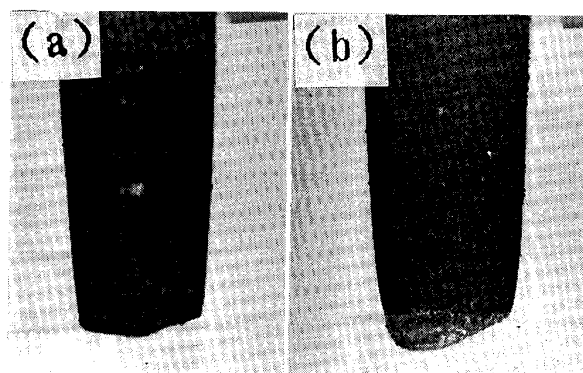
先端消耗について考えてみる。AC 炉、DC 炉の電流密度を、各炉の電極先端直径を考慮して求めると、それぞれ 0.44 A/mm^2 、 0.53 A/mm^2 となる。電極先端消耗量と電流密度の関係は、一般的に(2)式で表すことができる¹¹⁾。

$$V_t = K \cdot J_t^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで V_t は電極先端消耗量 (kg/min), J_t は電極先端

Table 3. Difference of electrode consumption between AC and DC arc furnace.

Item	AC arc furnace	DC arc furnace
Current (kA)	AC 28.4	DC 40
Arc resistance ($\text{m}\Omega$)	5.6	8.5
Electrode size (inch)	18	18
Current density (A/mm^2)	0.44	0.53
Electrode tip loss ($\text{kg/min}\cdot\text{pole}$)	1.4	2.3
Total tip loss (kg/min)	5.2	2.3
Electrode consumption (Index)		
Tip	37	23
Side	63	24



(a) Dc arc furnace (b) AC arc furnace

Photo. 2. Difference of shape of electrode tip between AC and DC arc furnace.

直径を考慮した電流密度 (A/mm^2), K は定数である。本 DC 炉での測定結果は(2)式の $K = 7.5$ としたときによく一致し、AC 炉、DC 炉の電極先端消耗量は、それぞれ約 $1.4 \text{ kg/min}\cdot\text{本}$ 、 $2.3 \text{ kg/min}\cdot\text{本}$ となる。

従って、電極先端消耗量は、1 本当たりの量で比較すると DC 炉の方が約 1.5 倍と大きい、AC 炉の 3 本合計と DC 炉とを比較すると、AC 炉の方が約 2 倍となる。以上を Table 3 に示す。また、Photo. 2 には AC 炉、及び DC 炉における代表的な電極形状を添付した。

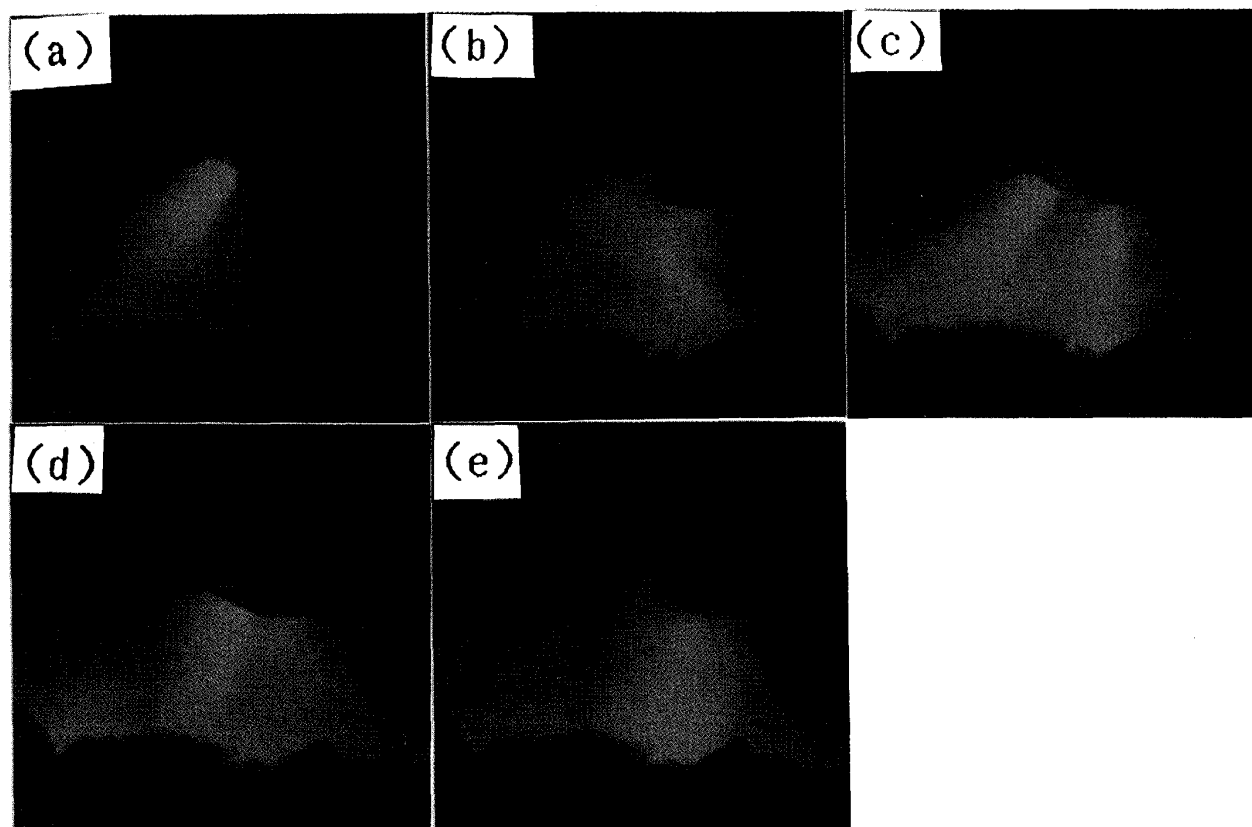
以上に加えて、運転による電極の折損事故はほとんど起こっていない。

(2) 電力原単位

電力原単位は約 5% 減少した。その要因として、①交流炉に見られる誘導損失がないことと給電回路での損失が少ない。この効果は 2% と推定される。残りの 3% の要因は、②アークが電極軸を中心として偏向なく発生しており、このため溶解が同心円状に均等に進み、炉壁への出熱が減少した。③アークジェットが常に溶鋼に向かっていてロングアークにしても上熱にならず溶鋼への伝熱効率が低い⁸⁾ などが考えられる。

(3) 耐火物原単位

電極が 1 本になったことで、炉蓋の水冷化率は向上し



(a)Stable arc (b)Mobile arc (c)Double arc (d)Unstable arc (e)Diffused arc DC 30 kA, 300 V, Furnace arc

Photo. 3. Variation of DC arc models.

97% を達成している。

また、溶解が同心円状に均等に進みホットスポットが無くなったので、炉床耐火物の損傷が減少し、吹付材の使用が減少したことによって、耐火物原単位が向上した。

4. 大電流直流アーク⁶⁾

設備や操業の最適化を図るには、アーク現象を良く把握し、その特徴を活かすことが重要である。このために、スクラップが溶け落ちた後の鋼浴に対して発生させたアークを高速度 VTR により撮影した。代表的な直流アークの形態を Photo. 3 に示す。黒鉛電極からは強いアークジェットが形成され常に溶鋼に向かって吹きつけ、溶鋼面の激しい波立ちやスプラッシュを発生させており、さらにアークは高速で運動している。また、黒鉛電極上の陰極点は 10 m/s 程度の速度で移動し、瞬間速度は 100 m/s にも達する。一般的にカーボンのような熱電子放出型陰極では安定な陰極点を形成する傾向にある。しかし、アーク炉では VTR で見るとアークは高速に変化しているのがわかる。この理由としては、①電極先端全面が高温になっており、どこからも電子放出しやすくなっている。②陰極点での電極材料の消耗が激しく

陰極点近傍の形状の変化が激しい。③大電流のため強いジェットが誘起された陰極点付近での流体の乱れを生ずる。④アーク柱のねじれによる電磁力がアーク柱に働くことによって陰極点の移動が引き起こされている。などが考えられる。

アークジェットは常に溶鋼に向かっており、平均的には電極軸に対し約 30° の広がりを持って軸対称に発生している。そして、特定の方向への偏向は見られないし、電極先端の形状も AC 炉に見られる傾きはない。特に電極の先端周辺部からよく発生する傾向が見られる。

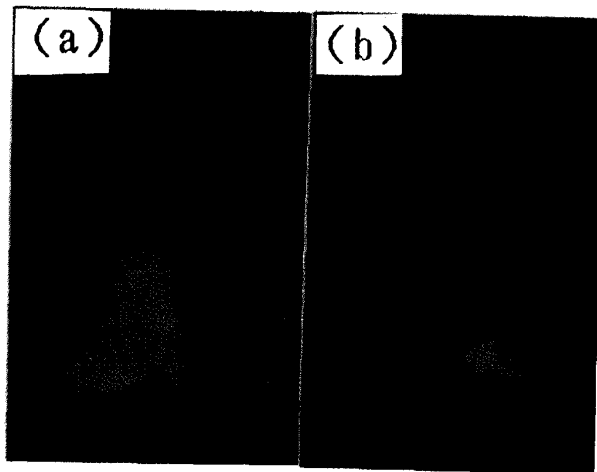
比較のため AC 炉のアークも同様に高速度 VTR で観察した。Table 4 及び Photo. 4 に両者の比較を示す。よく知られているように、交流アークは他の相のアークとの電磁作用によって、炉壁側に振られる。アーク柱は多くの場合 45° 以上外に傾き、電極先端も外側の消耗が激しく斜めに削られている。このため、AC 炉では溶解が不均一になっていた。

これに対し、DC 炉（一本電極）では、電極の先端形状からわかるようにアークは、ほぼ軸対称に発生し均等溶解が実現できている。

さらに大きな違いはアーク長さである。交流アークは

Table 4. Comparison of arc profile of DC with that of AC.

Item	AC arc furnace	DC arc furnace
Current×Voltage	28.5 kA×160 V×3	40 kA×340 V
Arc length (mm)	120	300
Arc resistance (mΩ)	5.6	8.5
Arc jet	To a metal pool or furnace wall Non symmetry	To a metal pool Axis symmetry



(a)DC arc (b)AC arc

Photo. 4. Comparison of arc profile.

約 120 mm と直流アークの半分以下となっている。アーク抵抗と比較すると DC 炉のロングアーク度合いがよくわかる。そして、黒鉛電極を陰極とした直流アークはロングアークでも電気的には安定でアーク切れは問題ない。この他、交流アークでは黒鉛電極が陽極となる半サイクルではアークジェットが弱まるか反対に黒鉛電極の方に向かうことがある。

5. 結 言

DC 炉導入による効果をまとめると、以下のようになる。

(1) DC 炉による発生フリッカーは、AC 炉に比べて 50% 以下である。

(2) DC 炉改造後の高調波対策には、高調波フィルターが必要であるが、理論高調波をもとに設計したフィ

ルター容量で十分防止することができた。

(3) 炉底電極の溶損速度は一定であり、間欠操業下ではおよそ 1.2 mm/Heat である。

(4) また、コンタクトピン温度と溶損量との関係についても良い相関を得ており、これらの関係から管理温度、管理溶損量をそれぞれ 650°C、450 mm に設定している。

(5) 現在の平均炉底電極寿命は、間欠操業下で約 330 ヒートであり、炉底電極の交換は 5 h で可能である。

(6) DC 炉導入によるコスト改善効果は大きく、トピー工業(株)豊橋製造所では 900 円/t 以上のコストダウンを達成しており、特に電極原単位低減効果が大きい。

しかし、今後の課題として、

(1) 炉底電極のさらなる寿命延長

(2) 最適溶解法の確立

(3) 溶鋼攪拌や伝熱形態のメカニズムの解明

などが上げられる。

DC 炉では系が単純になっていることから、現象の把握やモデル化が容易である。従って現状での不明点に対し、今後は計測やシミュレーションにより多くの知見が得られるものと考えている。

文 献

- 1) P. B. SPIVEY and E. G. MVELLER: Iron Steelmaker, **13** (1986), p. 120
- 2) A. VIGNERON, Y. DEFAIX, M. HAMY, M. DEVAUX, J. DAVENE, P. GOUJET and J. C. CHRISTOFFEL: Electric Furnace Conference Proceedings, Dallas, **44** (1986), p. 37
- 3) D. MEREDITH and S. E. STENKVIST: Electric Furnace Conference Proceedings, Dallas, **44** (1986), p. 43
- 4) 花田裕司, 高橋昭一, 岡崎金造: 日本電熱協会技術報告 第 8 号 (1988), p. 77
- 5) 石原弘二, 花田裕司, 中村 毅, 井口憲司, 牧 敏道: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1207
- 6) 石原弘二, 花田裕司, 中村 毅, 井口憲司, 青 範夫, 井ノ口一成: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 286
- 7) S. E. STENKVIST: Iron Steel Eng., **62** (1985), p. 50
- 8) J. SZEKELY, J. MCKELLIGET and M. CHOUDHARY: Iron Steelmaking, **10** (1983), p. 169
- 9) トピー工業(株) (私信) 1987 年 6 月
- 10) トピー工業(株), NKK (私信) 1989 年 10 月
- 11) 松村久雄: 第 114・115 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1986), p. 104