

Development of DC Arc Furnace by CLECIM-KSC



高柴 信元
Nobuyoshi Takashiba
水島製鉄所 プロセス
開発部開発設計室 主
査(課長)



高橋 清志
Kiyoshi Takahashi
水島製鉄所 プロセス
開発部開発設計室



大坪 俊治
Shyunji Otsubo
鉄鋼技術本部 銑鋼技
術部製鋼技術室 主査
(部長)



大岩 美貴
Yoshitaka Oh-iwa
水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(課
長)



沼田 弘二
Hiroji Numata
ダイワスチール(株) 水
島事業所製造部 (部長
補)



上田 新
Arata Ueda
ダイワスチール(株) 水
島事業所製造部 (部長
補)

1 緒 言

直流電気炉は、その概要を Fig. 1 に示すように、上部黒鉛電極を陰極、炉床に設けた炉底電極を陽極としてアークを発生させスクラップの溶解および溶鋼の昇温を行う装置であり、従来の交流電気炉に対して次のような優位性が確認されている¹⁻³⁾。

- (1) 原単位(電極、電力、耐火物)が低い。
- (2) フリッカーが低い。
- (3) 騒音が低い。

しかし上部電極を1本とした大型直流電気炉(100t/ヒート規模)の場合にはいわゆる大電流アークの偏向現象が考えられ⁴⁾、この現象は上記各原単位の悪化を招くのみでなく設備トラブル、生産性低下の原因にもなる。

また今後の労働力事情を考慮するといわゆる3K作業である炉周り作業の自動化や快適な作業環境の実現は必須であり⁵⁾、直流電気炉の宿命ともいえる炉底電極交換、補修はより安全かつ簡易に行うことが必要である。当社はCLECIM(仏)社と共同で大型直流電気炉に求められるこれらの課題を解決した、CLECIM-川鉄式直流電

要旨

CLECIM(仏)-川鉄式直流電気炉は、炉底電極の個別電流制御法の開発・採用に加えて、電磁力解析に基づいた炉底電極および導体配置の最適化により、アーク偏向現象の抑制のみならずアーク方向をも自在に制御できる特長を有している。この技術をダイワスチール(株)の100t炉に適用した結果、均一溶解性ととも到低原単位操業を達成した。また、IRSID(仏)社開発の水冷式炉底電極には新たに伝熱解析を施し、十分な安全性を確認しその長寿命法を見出した。電炉付帯設備は生産性向上や作業の快適化を重視し、専用機による炉外側からの炉底電極交換方法、自動送酸、炭材吹き込み装置の開発、流動解析にもとづいた建屋集塵装置の仕様決定等、独創的技術で構成している。

Synopsis:

Kawasaki Steel Corp. (KSC) has, in cooperation with a French company called CLECIM, developed a new type of DC arc furnace and achieved uniform melting with a 100-ton unit. The main features of the CLECIM-KSC DC arc furnace are: (1) Arc deflection is prevented by an appropriate layout of three water-cooled electrodes and bus tubes and (2) arc direction also is controlled by individual control of each of the three bottom electrodes. The safety of IRSID water-cooled bottom electrodes was confirmed by the heat transfer analysis. The service life of these electrodes is extremely long, and their simple structure facilitates repairs of the furnace bottom refractory. To improve safety and working environment around the furnace and increase productivity, the bottom electrodes can be replaced from outside the furnace shell. Oxygen blowing and other operational tasks have been automated, and the dust collection system in the building which houses the furnace was designed on the basis of the flow analysis and model experiments.

気炉を開発、ダイワスチール(株)水島工場に納入し良好な操業成績をおさめている⁸⁻¹¹⁾。本報では主にCLECIM-川鉄式直流電気炉の開発の考え方および水冷式炉底電極の溶解機構解析について、また電

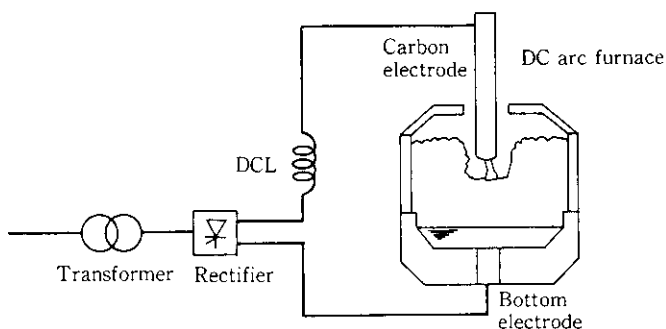


Fig. 1 Schematic diagram of DC arc furnace

* 平成4年7月31日原稿受付

気炉の炉周り作業の自動化、省力化装置および、環境の快適化技術について報告する。

2 新たに開発した技術

CLECIM-川鉄式直流電気炉は、炉底電極として寿命が長くコスト面からも有利な IRSID (仏) 社開発の水冷式炉底電極を採用し、低コスト、低原単位、高生産性および快適な作業環境の実現を狙いとし数々の新技術を開発・具体化している。

- (1) おおのこの炉底電極電流値を個別に制御できる給電方法を考案・採用し、アーク方向の制御を可能としている。
- (2) アークの偏向現象を防止するため、電磁力解析により炉底電極および給電導体配置を適正化している。
- (3) 炉底電極の交換および、補修を安全かつ容易に短時間でできるようにするため、炉底電極、鉄皮および耐火物を一体構造物のボトムとして構成し、炉外側から専用の交換装置を用いて遠隔・自動での着脱を可能としている。
- (4) ワンマンオペレーションが可能な大容量 (120 m³-norm./min) の送酸および炭材吹き込み装置を開発し安定して使用している。
- (5) 電気炉からの発塵および建屋内の含塵ガス流れを数値解析でシミュレーションし、1/10 モデルの模型実験と合わせて最適なフード形状や配置および集塵装置の仕様を決定している。

3 均一溶解技術 (アーク方向の制御)

直流電気炉においては給電導体周りに直流磁場が形成され発生アークも直流電流であるため、給電導体配置が不適切な場合には常にアークに水平な電磁力が作用しアークが一定方向に向く、いわゆる偏向現象が発生する。たとえば Fig. 2 のように、炉底電極と上部黒鉛電極が炉体の中心に、給電導体が最低距離で配置された場合には、アークに図中矢印の方向、すなわち反給電側方向の電磁力が作用する。このアークの偏向現象は炉内円周方向への熱供給を不均一にしスクラップの溶け残りや炉壁水冷パネルへの過大な熱負荷の原因となるばかりでなく各原単位を悪化させ、直流電気炉の優れた特長を消失させる。したがって、アークの偏向を防止することは大型直流電気炉を建設する場合にはぜひとも解決しなければならない課題である。

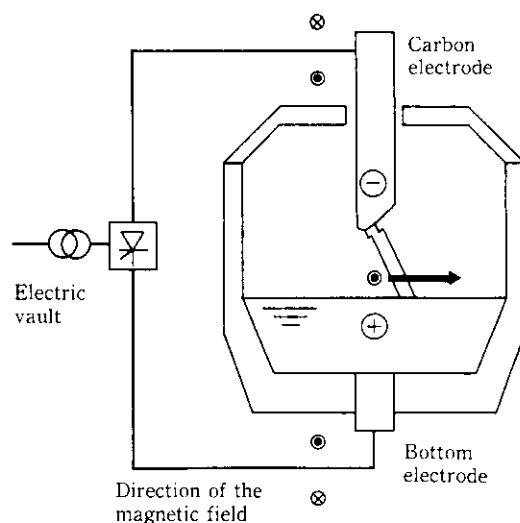


Fig. 2 Schematic diagram of arc deflection phenomenon in DC arc furnace

3.1 アークに作用する電磁力の解析

アークの偏向現象は給電導体周りに生じる直流磁界によるものであり、アーク発生位置における磁界の強さと向きを電磁気理論にもとづいて解析し求めることができる。CLECIM-川鉄式直流電気炉の開発・設計にあたっては、水冷式炉底電極と給電導体の本数および設置位置について、アーク発生位置における磁界の強さと方向を磁気シールド効果のある鉄皮の影響も含めて解析し決定している。

3.2 炉底電極の個別電流制御

CLECIM-川鉄式直流電気炉は、アーク偏向防止技術に加えてさらに積極的にアークの方向を制御するために、Fig. 3 に示すような炉底電極ごとに個別電流制御が可能な給電方法を考案・採用している。これを適用したダイワスチール㈱の 100t 炉ではアーク偏向現象の高い解析精度とも合わせて、3本の炉底電極のいずれか1本の電流値を数%増減させるだけでよく、投入電力量にほとんど影響を与えない。さらに、上記電流値を 10% 程度増減させれば任意の方向に制御可能である。また、個々の炉底電極の電流値を制御・監視できるため、不導通炉底電極を検出し、導通している炉底電極を許容電流値以下に確実に抑えることができ、安全性が維持できる。

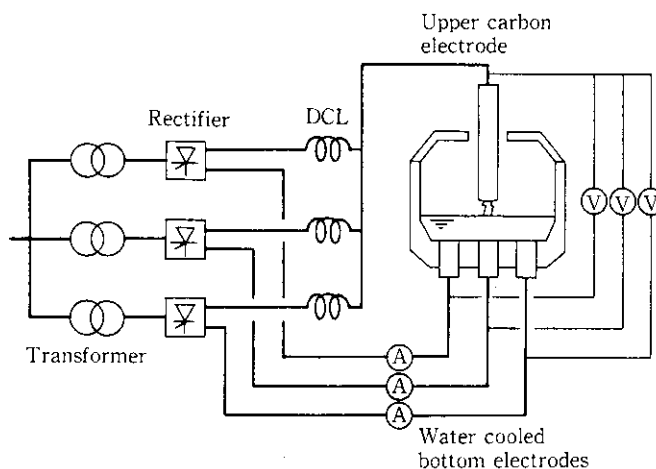


Fig. 3 Skeleton for control of arc direction

3.3 均一溶解性の確認

ダイワスチール(株)水島工場の実炉における均一溶解性の確認・評価を目的に、炉壁水冷パネルへの負荷熱流束分布および、上部黒鉛電極の損耗状況を調査した。その結果、アークの偏向は認められず、均一なスクラップの溶解状態が得られ、交流電気炉や一部の直流電気炉で併用されているバーナー装置などの補助熱源¹²⁾が不要なことを確認した。

3.3.1 炉壁水冷パネルへの負荷熱流束分布

溶鋼浴面直上の各炉壁水冷パネルの1ヒート中の最大の負荷熱流束値を冷却水流量と入出温度差より求めた結果は、Fig. 4に示すように周方向におおむね均一な分布である。若干排気口側および出鋼側に熱負荷の大きい領域が見られるが、これは排滓口から吹き込む酸素と鋼浴から発生するCOガスとの2次燃焼による影響と考えられる。また、アークを鋼浴面上炉中心の点熱源と仮定し、炉壁面に対する負荷熱流束値を計算した結果をFig. 5に示すが、実測値と計算結果は程よい一致が見られアークの偏向は認められない。炉内の目視観察でも溶解初期のボーリング穴がほぼ真円であること、溶け落ち時のスクラップの局部的な溶け残りや出鋼後の大塊スクラップの溶け残りは見られないこと、炉壁水冷パネルへの付着地金厚みも全壁面で50mm以下であること等から目標どりの良好な均一溶解状態を確認している。

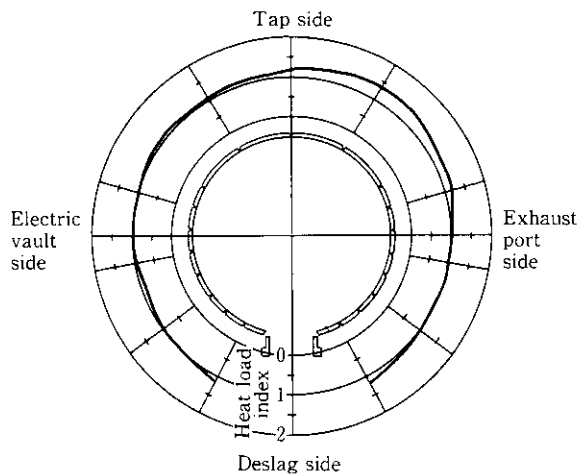


Fig. 4 Distribution of heat load on water cooled panels above hearth line

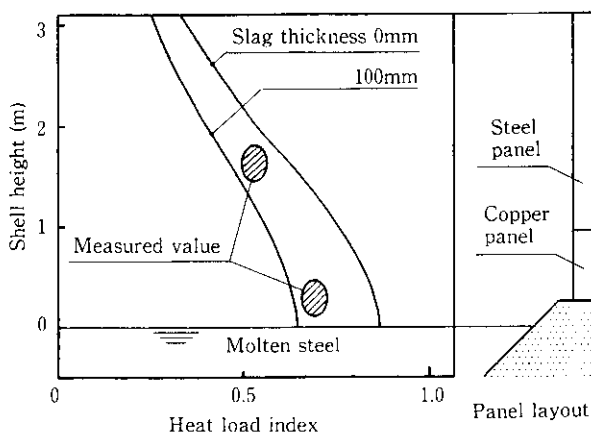


Fig. 5 Results of calculation of heat load on water cooled panels

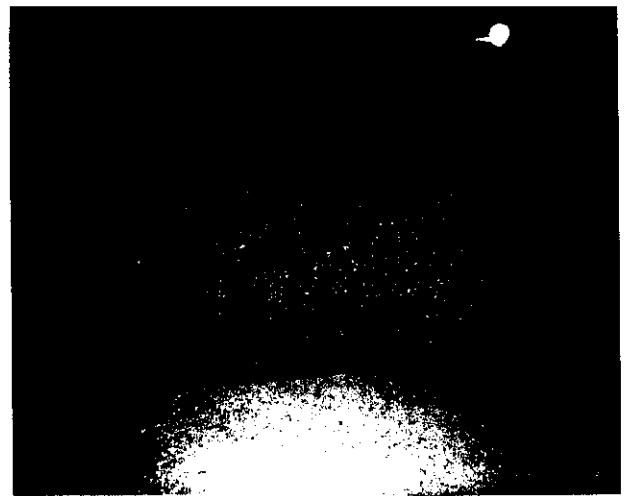


Photo 1 Condition of upper carbon electrode after use

3.3.2 上部黒鉛電極の損耗状況

アークの偏向現象が発生していれば交流電気炉の電極先端のような偏損耗が考えられるが、Photo 1に上部黒鉛電極先端の損耗状況を示すように周方向で一様な損耗状況である。

4 水冷式炉底電極の溶解機構の解明

直流電気炉が交流電気炉に対して唯一劣る点は炉底電極が必要なことであり、具体的には炉底電極寿命が炉床耐火物寿命よりも短いこと、鋼製炉底電極からの漏鋼事故が懸念されること、であろう¹³⁾。しかし鋼製炉底電極の溶解機構や安全性に関する報告は見当たらず十分な評価が行われていない。そこで今回導入した IRSID (仏) 社開発の水冷式炉底電極を対象として設備・操業条件の改善および安全性の評価・確認を目的に伝熱解析による溶解機構の解明を試みた。

4.1 解析モデル

Fig. 6のように1本の鋼製電極周辺を軸対称にモデル化し電極溶解現象と関係のある溶鋼温度、電極径、電流密度、冷却スリーブの冷却面熱伝達率、炉床耐火物厚みなどの要因をパラメータとして伝熱解析および溶解シミュレーションを行った。

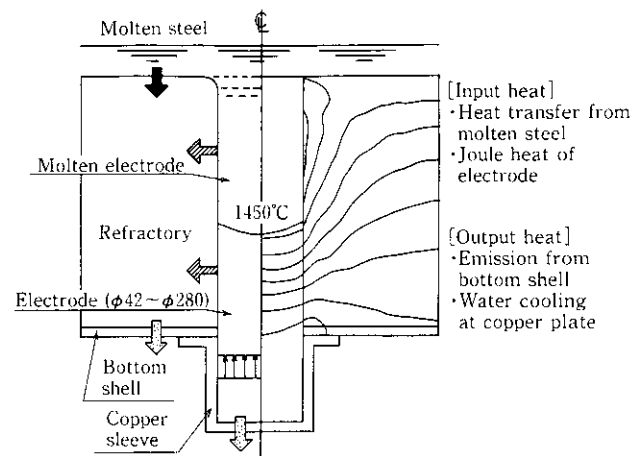


Fig. 6 Model of bottom electrode for heat transfer analysis

4.2 解析結果

解析結果より次のような知見が得られた。

- (1) 電極溶解量におよぼす各要因の影響は、Fig. 7 に示すように、電流密度の影響が最も大きく、次いで電極径、電極水冷能力の順に大きい。すなわち電極溶解量を抑制するには電流密度を許容値以下に確実に制御することが効果的である。
- (2) 耐火物厚みの影響を Fig. 8 に示す。耐火物厚みが一定の厚み以上では電極溶解面の位置は変動しないが、ある厚み以下になると急速に溶解量が増し電極溶解面の位置が低下する。したがって寿命延長を図るには、電極周辺の耐火物の溶損を抑え耐火物厚みを維持することが必要である。
- (3) 電極径 $\phi 280$ mm で解析ケースの中で最大の電流密度を与えた場合においても、電極溶解面は鉄皮面より 200 mm 以上上方に位置しており十分に安全である。

以上のことから水冷式炉底電極は漏鋼事故の危険性は皆無で十分な安全性を備えているだけでなく大径化が容易で炉底電極構造をシンプルにできる。さらに、電極周辺には耐溶損性および寿命延命の面から有利なブリックを使用できるので、直流電気炉用炉底電極として優れている。

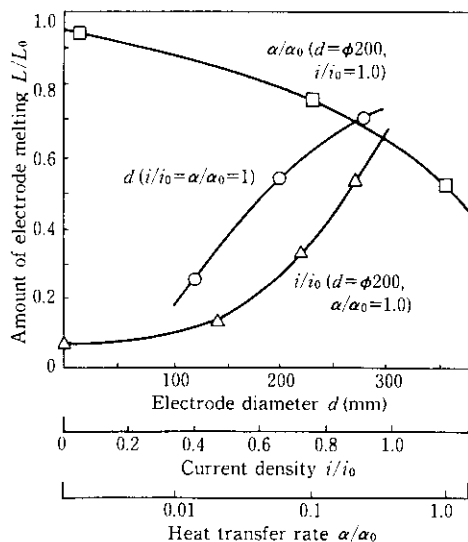


Fig. 7 Effect of each parameter on melting of bottom electrode

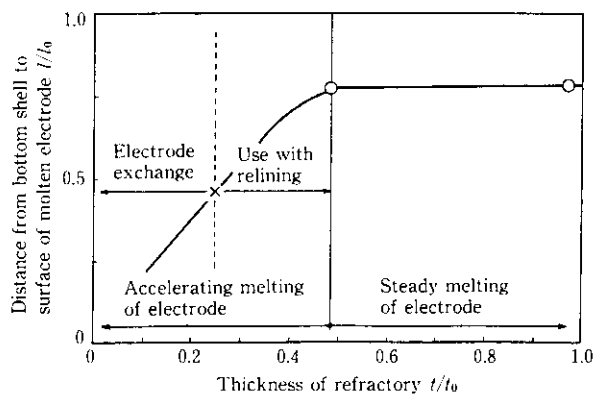


Fig. 8 Effect of refractory thickness on the amount of bottom electrode melting

5 炉底電極の交換

直流電気炉においては、炉底電極とスクラップとの導電性を良好に維持するために、炉内に前チャージの溶鋼を残すいわゆるホットヒール操作を行っている。このため炉底耐火物の損耗速度は他の部位よりも大きく、炉底電極を含む耐火物の更新、交換などの全面的補修が必要となる。CLECIM-川鉄式直流電気炉は、シンプルな構造の水冷式炉底電極を使用しており、炉底耐火物の補修は比較的容易で長寿命化が可能ではあるが、加えて全面的補修および炉底電極交換方法を開発・採用することにより炉の操業停止時間の短縮および交換作業の安全性向上を図っている。

5.1 交換方法

交換方法は、その概要を Fig. 9 に示すように当社の底吹き機能を有する転炉 (Q-BOP, K-BOP) のボトム交換技術を発展させ、電気炉に応用したもので、炉底電極とその周辺耐火物および、鉄皮を一体構造物のボトムとして構成し受鋼台車上に積載した専用機を用いてボトムの移送および炉外側からの着脱、交換を行う。本方法は、

- (1) 高熱下の熱間炉内作業が少ない。
- (2) 耐火物表面が冷却されれば炉内作業が行えるので炉体冷却に要する時間が短い。
- (3) ボトムの移送、着脱を遠隔操作で行う。
- (4) 別方式として行われている下部炉体全体を交換する場合には、クレーンの吊り上げ能力が 200 t 以上必要であるのに対し、本方法では約 50 t で、クレーンおよび建屋の設備費を大幅に抑制できる。

などの特長を有し、安全性および作業性に優れ、いわゆる 3 K 作業の改善とともに短時間での交換が達成されている。

5.2 ボトムおよび炉体鉄皮の設計

ボトムと開口を有する下部炉体をフランジ接合する組み立て構造としたことから、汎用構造解析プログラム「NASTRAN」を用い

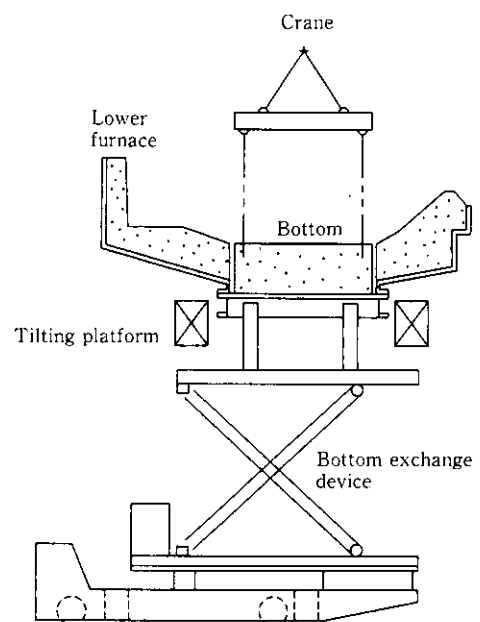
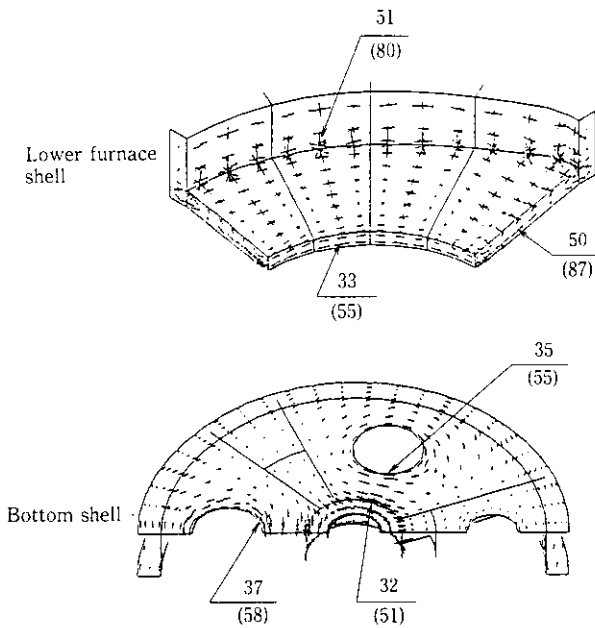


Fig. 9 Schematic diagram of bottom electrode exchange method



Upper figure : Stress generated by static load (MPa)
 (Lower figure) : Stress generated by impact load (MPa)

Fig. 10 Results of stress analysis of lower furnace shell and bottom shell

て強度解析しボトムを設計した。溶鋼とスクラップの静荷重およびスクラップ装入時の衝撃荷重を検討・評価して荷重条件を与えた。Fig. 10 に解析結果を示すが、熱応力および低サイクル疲労の面からも評価して主要部材の最大応力値を 90 MPa (スクラップ装入時) 程度に抑え安全性を十分に確保した。

6 自動化および省力化装置

電気炉における炉周り作業は自動化しにくく、高熱高粉塵下で人力に頼っているのが一般的であるが、当社の電気炉付帯設備は Table 1 に示すようにそのほとんどを自動化している。なかでも送

Table 1 Automatic devices

Item	Features
Oxygen blowing and powder injection device	<ul style="list-style-type: none"> One man operation Oxygen flow rate 120 m³-norm./min Lance pipes <ul style="list-style-type: none"> Oxygen blowing 40A × 4 Powder injection 40A × 1
Additive feed system	<ul style="list-style-type: none"> Storage capacity 6 brands Orientation Furnace, ladle
Upper electrode connection device	<ul style="list-style-type: none"> IHI type Electrode dia. 28 in Cycle time 3 min
Tap hole sand fill device	<ul style="list-style-type: none"> Swing and cut gate type
Refractory gunning device	<ul style="list-style-type: none"> Gunning rate 150 kg/min Swing and rotary type
Sampling and temperature measurement device	<ul style="list-style-type: none"> Cycle time 1 min Swing type

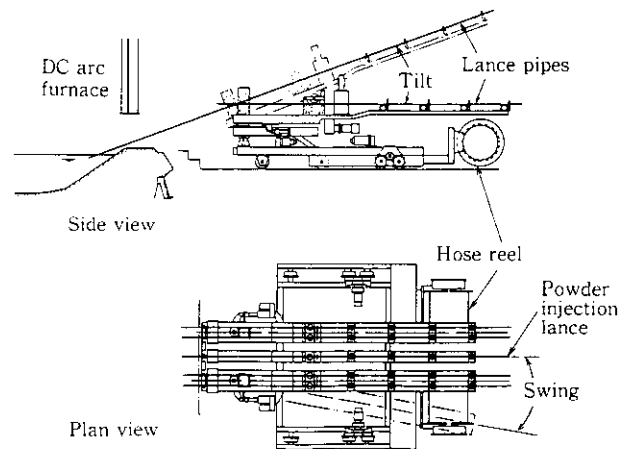


Fig. 11 Schematic diagram of oxygen blowing and powder injection device

酸装置は、その構成概要を Fig. 11 に示すように、4本の酸素吹き込みパイプと1本の粉体吹き込みパイプを遠隔で一人操作することが可能で 120 m³-norm./min の高速送酸を実現した。

7 制御システムの考え方

電気炉の自動溶解制御システムなど各装置単体の自動制御はもちろんのこと、電気炉プロセス全体としての自動化および省力化を追求した制御システム構成とした。その特徴は次のとおりである。

- (1) 先に述べたような炉周り作業の自動化装置も含め各装置は独立した制御システムを持ち、中央自動制御モードにおいては単に運転ボタンだけで全自動制御・運転できる。
- (2) 全体を通信ネットワークで結び、中央操作デスクとCRTによる中央集中操作監視システムを採用した。Fig. 12はそのCRT操業用画面の一例である。

この結果、オペレータによる監視のみの電気炉操業を可能としている。

8 環境の快適化技術

電気炉工場ではスクラップ装入時および出鋼時の発塵を効率よく集塵して快適な作業環境を整えることは今や必須の課題である。当社では建屋内での発塵の流動状態をシミュレーション解析と模型実験から解明し、快適な環境を維持する集塵装置と容量を決定する考え方を構築した。

8.1 集塵装置の構成

電気炉の集塵装置は高温の炉内ガスを直接吸引する直引系集塵と、スクラップ装入時および出鋼時の発塵を吸引する建屋系集塵とから構成される。実設備としては Fig. 13 に示すように直引系と建屋系の合流式が望ましく、運転費および設備費とも有利で、高温ガスの希釈冷却を行うこととも合わせ火災防止など安全性からも優れている。

8.2 建屋系集塵の考え方

集塵技術に関しては定量的な評価が難しいが、汎用流動解析プログラム「PHOENICS」を用いた建屋内含塵ガス流れのシミュレーションと 1/10 モデルの模型実験により、天井フードの形状、配置

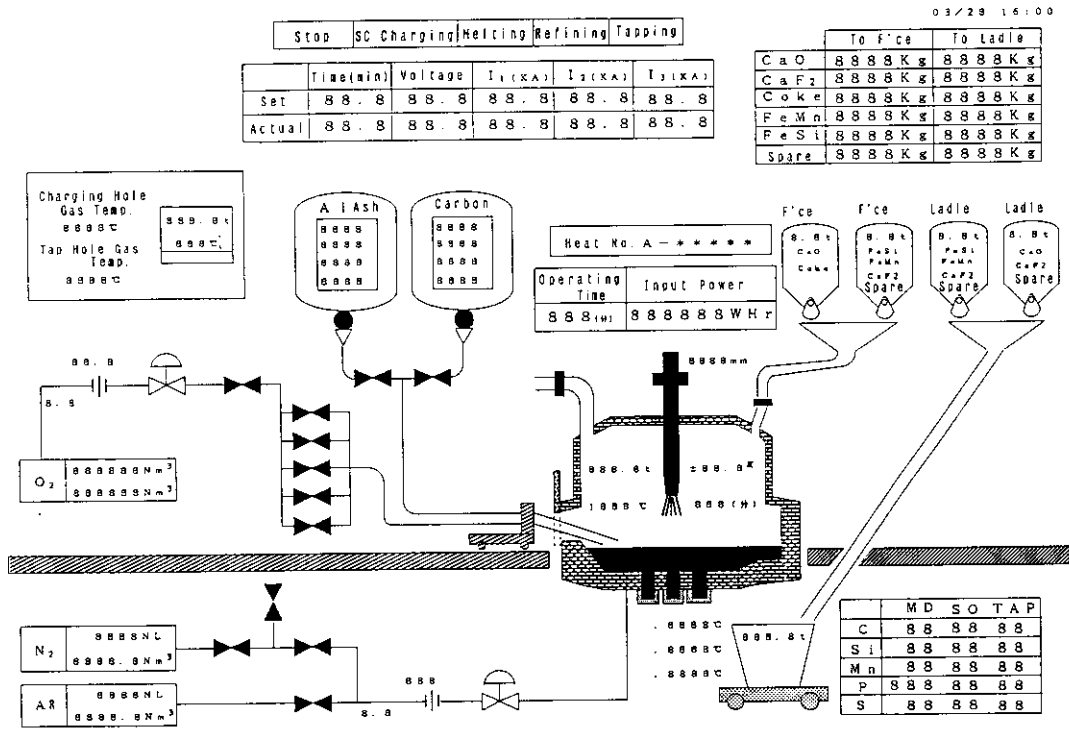


Fig. 12 Example of CRT monitor for operation

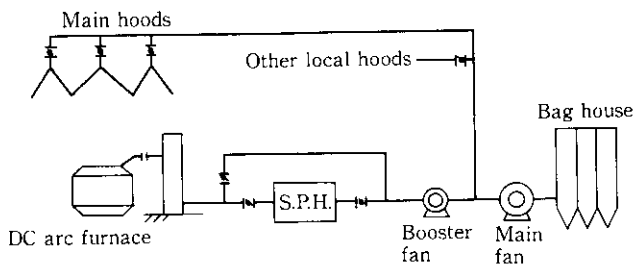


Fig. 13 Schematic diagram of dust collection equipment

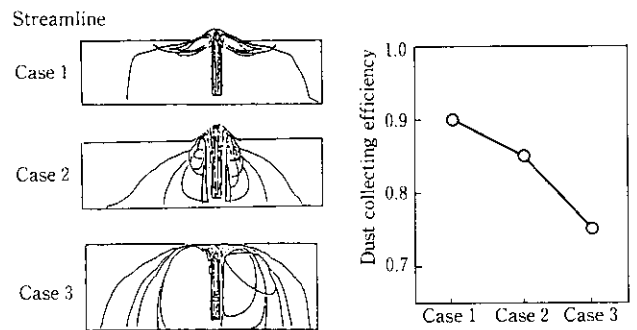


Fig. 15 Effect of shape of hood on dust collection efficiency

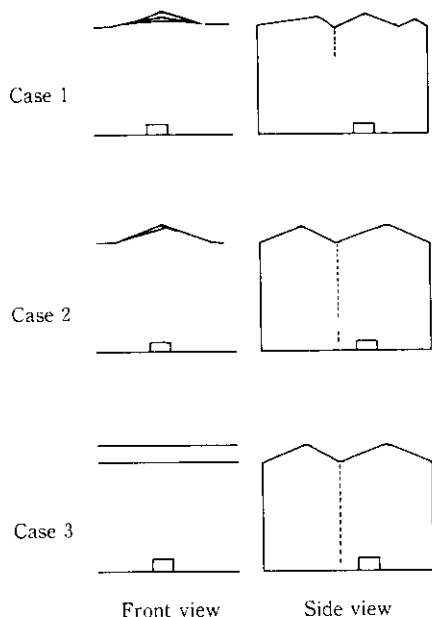


Fig. 14 Shapes of dust collection hood used in flow analysis

および集塵風量が集塵効果におよぼす影響を定量評価した。解析ケースとして Fig. 14 に示すような3種類の天井フード形状を与え集塵風量と合わせてその集塵効果を求めた。解析結果として Fig. 15 に建屋内含塵ガスの流線図、集塵効率（発塵開始から一定時間後の含塵ガスの捕捉率）を示すが、電気炉直上に角錐フードを設けた Case 1 が最も優れていることがわかる。また模型実験から天井フードの傾斜角と集塵効率の関係を見出し、これらを体系化して建屋系集塵技術の考え方を構築した。ダイワスチール(株)水島工場には多点吸引式の角錐フードを設け集塵風量は 12000 m³-norm./min 以上の仕様で反映し、快適な作業環境を維持している。

9 操業実績

ダイワスチール(株)水島工場に納入した 100t 直流電気炉の主仕様を Table 2 に、操業実績を Table 3 に示す。各原単位は十分に低く、直流電気炉の優位性をあらためて裏付ける結果が得られると同時に、CLECIM-川鉄式直流電気炉の特長である均一溶解性の効果もその優れた操業実績に反映されている。炉底電極もオンライン寿

Table 2 Main specifications of 100 t DC arc furnace of Daiwa Steel at Mizushima

Item		Main specifications
Transformer capacity		100 MVA
Arc voltage, arc current		800 V, 100 kA
Electrode	Upper	28 in × 1
	Bottom	Water cooled billet × 3
Furnace shell (dia. × height)		φ 6 700 mm × 3 100 mm
Tapping system		LVT and ladle car
Scrap charging		1 or 2 buckets

Table 3 Operational results of 100 t DC arc furnace of Daiwa Steel at Mizushima

Item		Result
Productivity	Tap to tap time	57 min (average) 46 min (record)
	Carbon electrode	1.1 kg/t
Unit consumption	Electric power	300 kWh/t
	Oxygen	25 m ³ -norm./min
Life	Bottom electrode	1 500 heats

命は 1200 ヒートを超え、炉体の冷却と昇温に必要な時間を含めても 24 時間以内に交換を完了しているなど当初の目標を達成し、かつまた高い生産性に大きく寄与している。

10 結 言

均一溶解性、炉底電極の保守性、安全性に優れた大型直流電気炉である CLECIM-川鉄式直流電気炉を開発し、設計の考え方について実炉の実績と評価を交えて報告した。その内容は以下のとおりである。

- (1) 炉底電極および給電導体の適正配置によりアークの偏向を防止し、大型直流電気炉における均一溶解を達成した。さらに各炉底電極の個別電流制御が可能な給電系統の構成によりアーク方向の制御を可能としている。実炉においても、周方向にほぼ均一な炉壁熱負荷と上部黒鉛電極の均一な損耗状況が得られ、均一溶解性が確認できた。
- (2) 水冷式炉底電極の溶解機構を解明し各要因が溶解量におよぼす影響の把握、安全性の確認を行った。その結果、長寿命化には電極周辺の耐火物損耗の抑制が有効であり、この点から構造がシンプルな水冷式炉底電極は電極周辺の耐火物にブリックを使用できることから直流電気炉用炉底電極として優れている。
- (3) 炉底電極の迅速かつ安全な交換方法として、当社の転炉で実績のあるボトム交換方式を発展させ、鉄皮の強度解析も含めて電気炉に適用した。
- (4) 送酸、炭材吹き込み等ほとんどの炉周り作業の自動化を図った。また、環境の快適化技術として、建屋系集塵装置の仕様を建屋内発塵ガスの流動解析により決定する技術を構築した。

参 考 文 献

- 1) 今井卓雄: 第 135 回西山記念技術講座, (1990), 77-110
- 2) 小倉貞一: 第 114, 115 回西山記念技術講座, (1986), 1-28
- 3) J. Davene: *Steel Technology International*, (1988), 159-164, [Sterling Pub. Ltd.]
- 4) 南條敏夫, 吉田弘信: 工業加熱, 28 (1991) 6, 23-38
- 5) 蕎麦田勝利: 「アーク炉に於ける日本, 欧米の最新技術」, (1988), 21-56, [日本電熱協会]
- 6) 上田 新, 加藤敏雄, 米田洋康, 沼田弘二, 上野清博: 材料とプロセス, 4 (1991) 4, 1274
- 7) 上田 新, 加藤敏雄, 米田洋康, 沼田弘二: 材料とプロセス, 4(1991) 4, 1275
- 8) 上田 新, 米田洋康, 加藤敏雄, 田中 修: 材料とプロセス, 4(1991) 4, 1276
- 9) 小出勝英, 高橋清志, 溝田久和, 有吉政弘, 上田 新: 材料とプロセス, 5 (1992) 1, 296
- 10) 小出勝英, 植島好紀, 溝田久和, 沼田弘二: 材料とプロセス, 5(1992) 1, 297
- 11) 小出勝英, 高橋清志, 大岩美貴, 沼田弘二, B. Cretion: 材料とプロセス, 5 (1992) 1, 298
- 12) 上杉浩之: 「ヨーロッパに於ける電気製鋼の技術動向」, (1990), 198-203, [日本電熱協会]