

製鋼用電気炉の最新技術

Recent Advances in Electric Arc Furnaces for Steelmaking

高橋 誠^{*⁽¹⁾} 本宮 光^{*⁽²⁾} 本多 通保^{*⁽³⁾}
Makoto TAKAHASHI Akira HONGU Michiyasu HONDA

抄 録

最近、製鋼用電気炉は交流電気炉から直流電気炉に移行しつつある。又、エネルギー効率向上のためスクラップ予熱の技術改善が望まれている。そこで、まず、新日本製鐵の直流電気炉の特徴として、炉底電極、アーク挙動制御、スクラップ高速溶解の各技術と一電源二炉方式を紹介した。つぎに、関西ビレットセンター(株)における一電源二炉方式の直流電気炉の操業実績として、とくに、スクラップ予熱や底吹溶鋼攪拌の効果及び炉底電極の使用実績について紹介した。最後に、一電源二炉、シャフト炉、スクラップ連続搬送のスクラップ予熱の三方式について予熱温度を数値解析し、予熱効果を相互比較し、評価した。

Abstract

In recent years, DC electric arc furnaces for steelmaking have been replacing AC furnaces. Moreover, there has been a need for the improvement of scrap preheating technology to enhance energy efficiency. The present paper first describes the technological features of the DC electric arc furnaces constructed by Nippon Steel Corporation, including the bottom electrode, arc behavior control, high-speed scrap melting, and one-power supply, two-furnace system. Then, the operation results of the one-power supply, two-furnace type DC electric arc furnace at the Kansai Billet Center Co., Ltd. are introduced with emphasis on the effects of scrap preheating and bottom blowing bath agitation and the results of use of the bottom electrode. Finally, the effects of three scrap preheating systems—one-power supply two-furnace system, shaft furnace and continuous scrap transfer—are compared and evaluated through the numerical analysis of preheating temperature.

1. 緒 言

製鋼用電気炉は大電流、低電圧の電気エネルギーを原料であるスクラップに供給し、そのエネルギーによりスクラップの溶解、精錬をおこなう設備である。交流電気炉がその主流であったが、近年直流電気炉が開発され、交流電気炉に対する数多くの長所が確認されるに至った。このため最近の電気炉は世界的に直流電気炉の設置が多くなり、電気炉として交流電気炉から直流電気炉に移行しつつある。

新日本製鐵は、数年前にこの技術動向を予測し直流電気炉の開発に着手し、その技術を確立した。開発は、大同特殊鋼(株)、フランス Usinor-Sacilor 社との共同で実施したものであり、開発完了後は、新日本製鐵-大同グループとして着実に直流電気炉を受注してきている(表1参照)。

本稿では、新日本製鐵の直流電気炉の特徴を述べるとともに、新日本製鐵が納入した関西ビレットセンター(株)(以後 KBTC と記す)の直流電気炉の操業実績とその技術評価について述べる。

表 1 新日鉄式直流電気炉主仕様

| | 炉 容 [ton] | 炉 径 [m] | トランス容量 [MVA] |
|-----------------|--------------|------------|-----------------|
| 大同特殊鋼/星崎 | 25 | 4.0 | 9 |
| 中山製鋼所 | 75 | 6.4 | 60 |
| 関西ビレットセンター | 120 | 7.0 | 85 |
| 拓南製鐵 | 40 | 5.8 | 50 |
| HYLSA/Monterrey | 135 | 7.0 | 150 |
| 豊興鋼鐵 | 85 | 6.1 | 80 |

2. 新日本製鐵電気炉設備の特徴

2.1 直流電気炉の特徴

直流電気炉の開発にあたり、安定した操業が可能な信頼性の高い

*⁽¹⁾ 機械・プラント事業部 精練プラント部 部長代理

*⁽³⁾ 関西ビレットセンター(株) 参与

*⁽²⁾ 設備技術センター 製鋼プラントエンジニアリング部 掛長

設備として従来にない生産性を高める技術の付加を目標とした。その結果として次に示す特徴を持つ直流電気炉が完成した²⁾。

- (1) 長寿命で信頼性の高い炉底電極技術
- (2) アーク偏向を防止するアーク挙動制御技術
- (3) 生産性を向上させるスクラップ高速溶解技術

2.1.1 炉底電極技術

新日本製鐵が採用している炉底電極は、Usinor-Sacilor社(フランス)が開発した水冷銅モード式ピレット電極を基本とし、さらに独自技術を付加して長寿命化を図り、又、設備の信頼性を高めたものとなっている(図1参照)。特に、直流電気炉でスクラップから溶解沈殿した鉛による絶縁破壊は大きな設備トラブルにつながる可能性があるが、新日本製鐵は図2に示すような絶縁対策構造と絶縁監視システムを採用しており、絶縁破壊によるトラブルは全く無くなっている。

2.1.2 アーク挙動制御技術

導体を流れる大電流がつくる磁界により、アークが特定の方向に偏向し、その程度が大きいと操業に支障がでてくる。新日本製鐵では開発当初よりこの重要性を認識し、解析、テストを繰り返しアーク偏向解析プログラムを確立した。

このプログラムでは、アークに作用する力の大きさ、及び力の方向は勿論のこと、アークの静的変位量まで求めることができる(図3参照)。

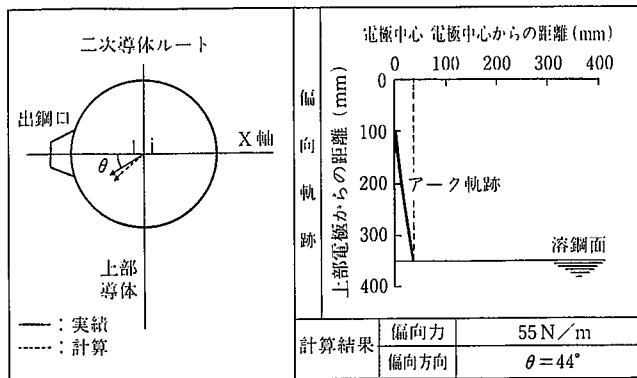


図3 N社アーク偏向計算結果

この技術を適用した新日本製鐵の直流電気炉では、アーク偏向のトラブルはなく、立上げ当初より設備能力をいかに発揮している。

2.1.3 スクラップ高速溶解技術

新日本製鐵では転炉で多様な底吹き技術を保有しているが、スクラップ高速溶解技術は、この技術を電気炉に応用して炉底よりガスを吹き込み溶鋼を攪拌し、スクラップ溶解時間の短縮、電力原単位の低減を図るものである。このため炉体プロフィールは、ガスのエネルギーの有効活用という視点から、従来のものに比べ鋼浴が深いもの(図4参照)を採用している。試験炉でのテスト結果を図5に示すが、通電時間短縮率は約5%が得られている。

2.2 一電源二炉方式

電気炉での生産性また製造コストの向上を図る上で、操業中の電気炉からの排ガス保有熱をいかに回収するかが重要な技術課題である。新日本製鐵は、この技術課題に対する設備としてKBTCに新日鐵式一電源二炉方式の直流電気炉を納入した。この方式は、高温排ガスでスクラップを予熱するもので、予熱効率を向上させ、従来の

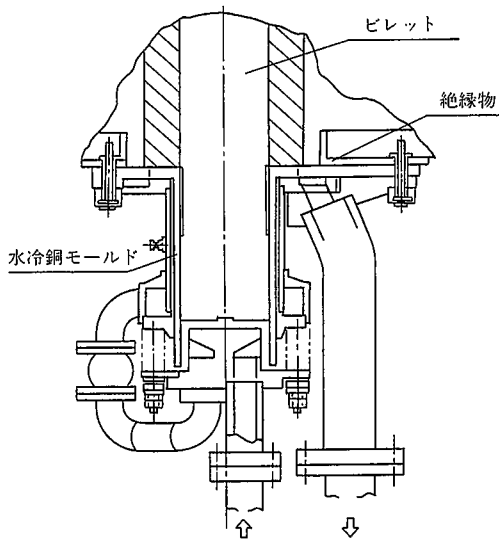


図1 水冷銅モード式ピレット電極

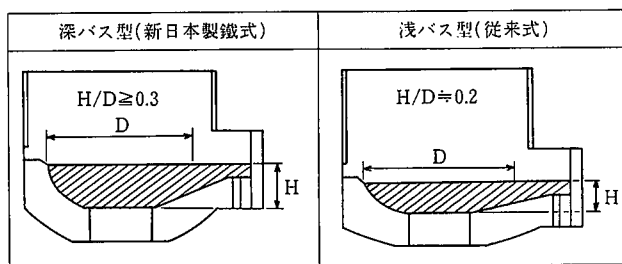


図4 炉体プロフィール比較

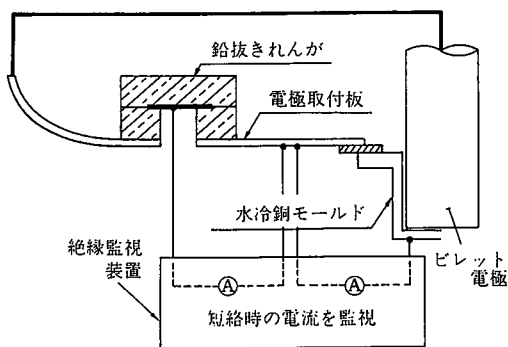


図2 絶縁対策と監視システム

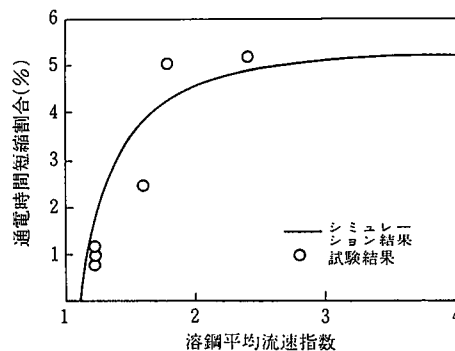


図5 通電時間短縮

スクラップ予熱装置の白煙・悪臭問題を解消するものである。

設備構成図を図6に示すが、操業中(溶解中)の炉の排ガスが炉蓋に設置したダクトを介して予熱炉へ導入される。特徴は予熱効率を高めるため、二炉の距離を極力縮めた炉の配置とし、又、予熱炉からの排出部は極力炉体の下部に置かれる。予熱操業の安定化のためには、集塵能力を安定化させることが必須であり、二炉間を連結するダクト部、及び予熱炉ガス排出部には粉塵、スラグなどによる集塵能力の低下防止対策が施されている。

3. KBTCにおける操業

3.1 設備計画の基本思想

KBTCは、ユーザーにピレット及びスラブ等の半製品を供給することを目的とし、1990年4月に設立され、電気炉工場の建設を経て、1992年1月から操業を開始した。その設備計画の基本思想は、高生産性の追求、極限省力化、及び徹底した環境対策にある。

高生産性追求の考え方は、新日本製鐵の電気炉の特徴を十分に採用して構築された。それは第一に、一電源二炉操業(ツインシステム)による製鋼時間と準備時間の短縮。第二に、直流電気炉をベースとした一電源二炉方式での高温スクラップ予熱、及び底吹攪拌導入による通電時間の短縮。その他に、偏心炉底出鋼(EBT)方式、取鍋精錬炉(LF)設備導入による溶解機能と精錬機能の分割などが挙げられる。

省力化の具体例としては、天井クレーン、装上台車の自動化による全自動スクラップ装入システムがある。この結果、炉前オペレータは4人で二炉の運転が可能となった。又、1993年7月には新日本製鐵の長年の転炉操業技術をもとに開発した水冷ランスを導入し、溶解作業中の炉前作業を解消した。

環境対策の具体例としては、スクラップ予熱時の白煙・悪臭対策として、一電源二炉方式採用による高温スクラップ予熱システムがある。その他、従来の直引集塵、建家集塵に加え、スカイハウス*を導入し、粉塵、騒音対策による作業環境の改善を図ったのが特徴である。

3.2 立上げ操業実績

KBTC製鋼工場の生産実績を図7に示す。1992年1月の操業を開始し、ツイン操業は6月から開始した。ツイン操業比率の増加による準備時間の大幅低下と予熱操業による電力原単位削減効果により生産量が大幅に増加した。市況低迷のため、10月からは、夜間操業(3直3交替;乙番休止)を余儀なくされたが、稼働1年後の1993年1月には、ツイン比率80%、準備時間2分/ヒート、予熱比率70%

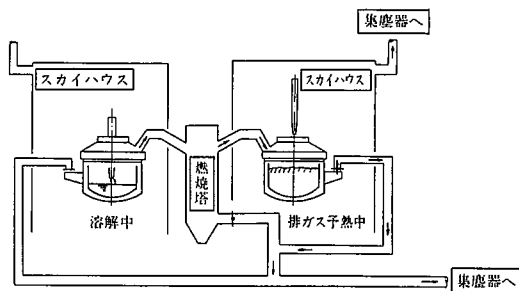


図6 一電源二炉方式の設備構成

* 電気炉周辺遮へい壁

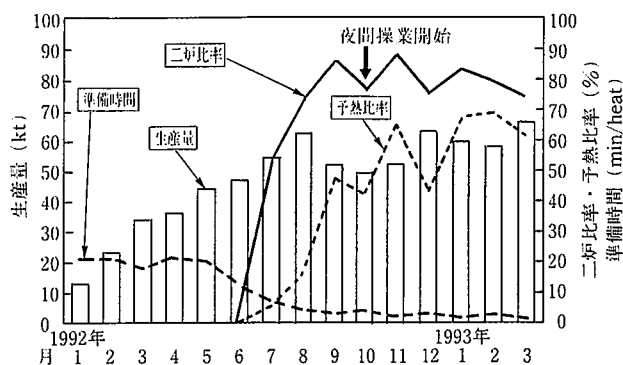


図7 生産量、一電源二炉比率、予熱比率の推移

となり月産6万tの生産を達成した。操業形態別の生産能力実績を表2に示す。ツイン操業の導入により生産能力が、一炉操業と比較して約20%増加した。

3.3 一電源二炉操業実績

3.3.1 一電源二炉操業パターン

一電源二炉操業時の稼働炉、非稼働炉の操業ステータスを図8に示す。この操業では、A炉溶解中にB炉では初装装入、炉補修等の作業が可能で、準備時間が短縮できること、A炉溶解終了後、直ちにB炉通電開始が可能であることにより前項に実績を示したように生産性の向上が実現される。一方、A炉溶解炉から発生する高温の排ガスは、隣接するB炉に誘導され、次ヒートの初装スクラップを効率よく予熱し、エネルギー原単位の低減が可能である。

3.3.2 予熱効果

一電源二炉操業の予熱システムの排ガスフローを図6に示したが、稼働炉から発生する高温の排ガスは、燃焼塔を経由して隣接する予熱炉に誘導され、高温ガスでのスクラップ予熱が可能である。その結果、短時間で十分な予熱効果が享受できる。実操業での予熱時間と予熱効果との関係を図9に示す。初装スクラップ(全装入量の60%)を、25分予熱することで約35kWh/tの電力削減効果が得られた。

3.4 底吹攪拌効果

KBTCでは、電炉系メーカー向けにピレットを、高炉メーカー向けにスラブを製造している。スラブの厳しいCu, Sn等のトランプ元素規制には、Cu, Sn含有量の少ない難溶解性の重量屑の配合

表2 操業形態別の生産能力実績

| | 一炉操業 | 一電源二炉操業 | |
|-----------------|------|---------|------|
| 予熱操業 | 無し | 無し | 有り |
| 製鋼時間 (min/heat) | 69.2 | 62.1 | 56.7 |
| 生産性 | 100 | 110 | 120 |

| | | | | | | | | | |
|----|----|----|-------|----|----|----|-------|----|----|
| A炉 | 溶解 | 追装 | 溶解・精錬 | 出鋼 | 補修 | 初装 | 予熱 | 切替 | 溶解 |
| B炉 | 補修 | 初装 | 予熱 | 切替 | 溶解 | 追装 | 溶解・精錬 | 出鋼 | 補修 |

図8 一電源二炉操業時の稼働炉、非稼働炉の操業ステータスの例示

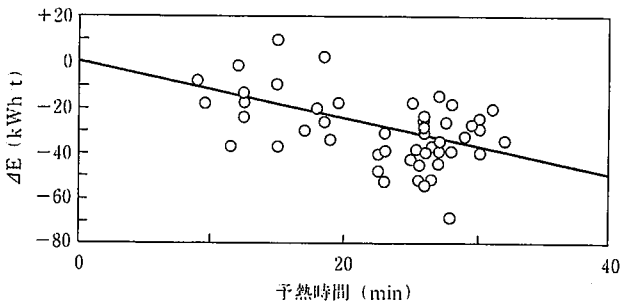


図 9 予熱時間と予熱効果

を増やすことが重要な対策の一つである。そこで、重量屑の溶解を促進するため、上底吹き転炉の設備、操業ノウハウに基づき、電気炉底吹操作を開始した。底吹搅拌による電力削減効果を図10に示す。現在までに溶解期における搅拌力の付与によって約15kWh/tの電力削減効果が得られることが判明した。

その他、溶鋼搅拌の効果として、出鋼時の温度降下量が約5°C減少し、そのばらつきも縮小して、LFでの昇熱必要量も軽減され、操業の安定化もたらされた。

3.5 炉底電極使用実績

3.5.1 炉底電極寿命の実績

KBTC 直流電気炉の炉底電極の寿命推移を図11に示す。立上げ時から、計画的に炉底電極の交換を行い、使用後電極の解体検査を通じて電極の健全性を確認してきたが、炉底電極の寿命は、極めて安

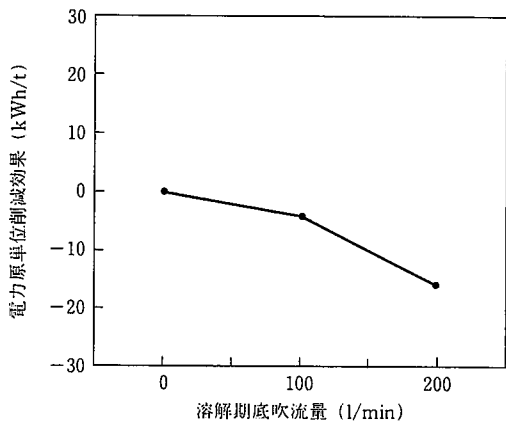


図 10 底吹搅拌による電力原単位削減効果

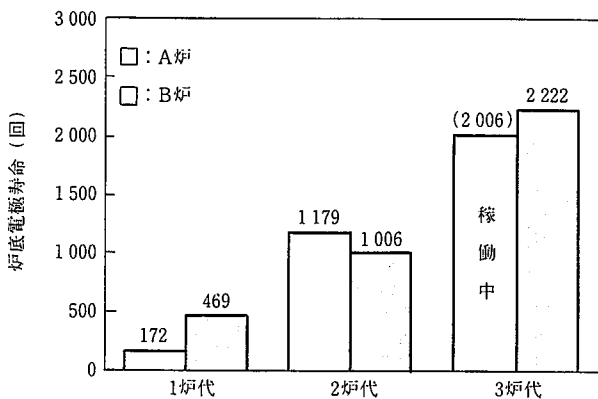


図 11 炉底電極寿命の推移

定しており、炉底電極B炉3代目にて、2222回の寿命を達成した。

又、操業中は、ビレット下部に埋設した熱電対の温度監視により電極の健全性を常時確認している。B炉3炉代の交換直前の電極下部の温度推移を図12に示す。ビレット温度は、伝熱シミュレーションから必要と推定された45°C以下に安定しており、電極の健全性が確認でき、又、設計技術の妥当性が検証された。

3.5.2 炉底電極解体結果

交換した炉底電極の解体後の模様を写真1に示す。溶鋼に接するビレット上部は、通電、非通電により溶解、凝固を繰り返すため電極自体の消耗はないが、電極径が拡大していることが分かる。一方、電極下部は操業中の温度推移から推定できるように、製作・据付時の丸ビレットの状況を完全に維持している。この解体結果から判断して、この炉底電極は、より永い連続使用に十分耐えられるものと考えられる。

立上げ以来の操業実績から、水冷銅モールド式ビレット型電極の信頼性が実証されたので、今後は更に長寿命化に挑戦していく計画である。

3.6 直流アークの挙動

KBTCでは、アーク偏向解析プログラムに基づいて設備計画を行い、その結果、立上げ以降、アーク偏向に起因すると考えられる操業トラブルは全く発生していない。溶解終了後の上部電極先端の模様を写真2に示す。この写真からも判るように、交流炉電極先端の

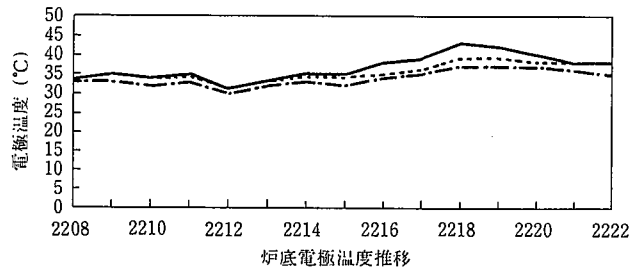


図 12 炉底電極温度推移



写真 1 解体後の炉底電極

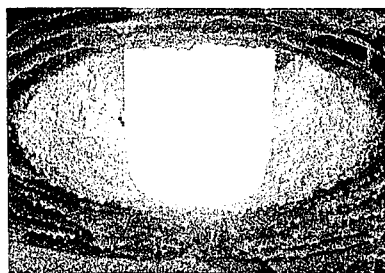


写真 2 溶解後の電極先端の形状

ようなアーク偏向に伴う電極の偏損耗はなく、軸対象のおわん形状をなしており二次導体の最適設計によりアーク偏向量が制御できた。

以上説明したように、KBTCにおける操業は新日本製鐵の直流電気炉の特徴、性能を十分に発揮して順調に稼働し、今後更なる成績の向上が期待される。

4. スクラップ予熱技術の解析と評価

前述したようにKBTCでの一電源二炉操業によるスクラップ予熱効果は、約35kWh/tであったが、この効果について数値解析を実施し、実績の評価を述べるとともに、最近注目されている他のスクラップ予熱方式（シャフト炉方式、スクラップ連続搬送方式）の解析結果との比較を述べることにする。

4.1 一電源二炉方式

4.1.1 解析の考え方

(1) 解析モデルの概要

電気炉内に充填されたスクラップを図13の様に高さ方向に分割して、各々のブロック内での伝熱計算を行うモデルとし、排ガス排出口部以下のブロックの半分はガスが流れないものとして予熱計算の対象外としている。

又、今回の解析モデルでは、KBTCの操業と同じく予熱対象のスクラップ量は初装のみ（全量の60%）として行った。

(2) 排ガス条件、その他

カーボンインジェクションの実施期間（13分）の排ガスの温度は、実測値をベースに900°Cとし、その他の期間（12分）は400°Cとした。又、予熱操業時間はトータルで25分としたが、予熱時間の影響を確認するため排ガス温度が400°Cの期間を5分延長した場合の計算も実施した。なお、ガス量については実績の1300Nm³/minとした。

4.1.2 解析結果と評価

スクラップの予熱温度の解析結果を図14、図15に示す。図14は各ブロックのスクラップ温度が、予熱時間の推移とともに変化していく状況を示したものであるが、予熱最終時、表面のスクラップ温度は約550°Cに達している。この結果は、KBTCで測定したスクラップ表面温度の実測値500~600°Cと良く一致している。

図15は予熱時間とスクラップの平均予熱温度の関係を示したものであるが、今回のKBTCの場合ではスクラップ平均温度は約350°Cまで予熱できることが判る。この結果は、電力換算値として35~40 kWh/t レベルに相当し、実操業の予熱効果とほぼ一致した。又、予

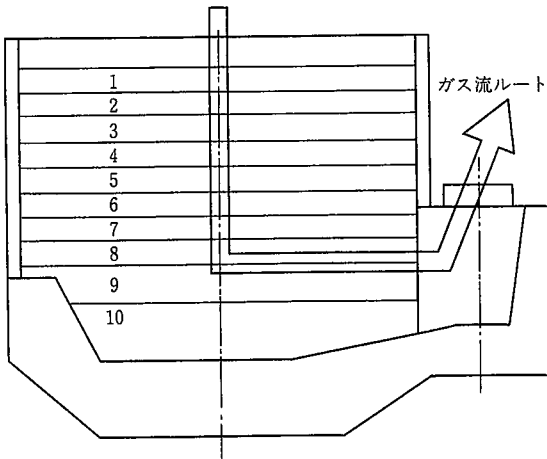


図13 一電源二炉方式のスクラップ予熱解析モデル

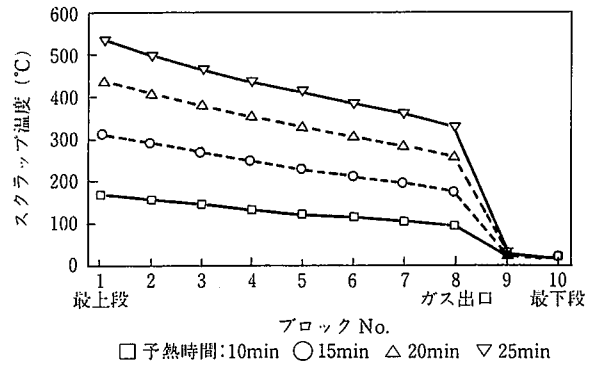


図14 各ブロックのスクラップ温度

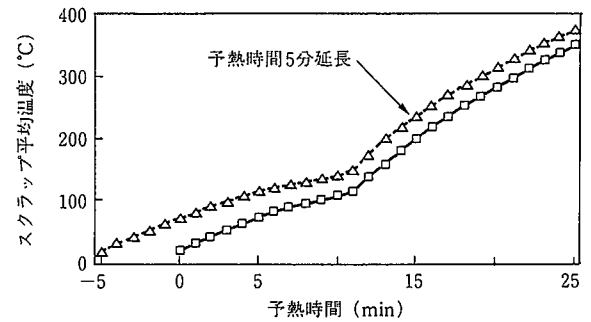


図15 予熱時間とスクラップの平均予熱温度

熱時間を5分延長した場合、スクラップ温度は30°C上昇し約380°C程度になった。

以上の解析結果より一電源二炉方式の場合、従来のスクラップ予熱装置と比べ予熱対象スクラップ比率が小さくかつ予熱時間が短いにもかかわらず、高いスクラップ予熱温度が得られている。これは高温ガスにより予熱効率が向上すること、又、予熱時間の確保及び操業末期の高温ガスの利用が重要なポイントになることを示している。

4.2 シャフト炉方式

4.2.1 解析の考え方

(1) 解析モデルの概要

この方式は電気炉上部に追装分のスクラップを充填するシャフト部を設け、この部位で排ガスとスクラップ間で熱交換を行うものであるが(図16参照)、解析モデルとしてシャフト部は円筒容器に置き

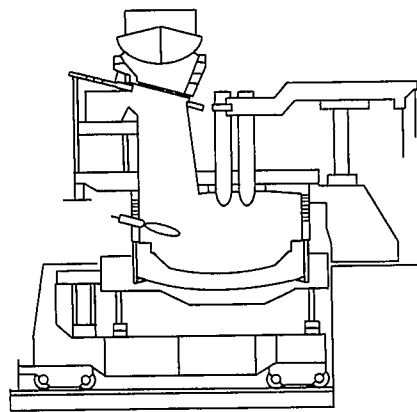


図16 シャフト炉の縦断面図

換え、断面は相当直径の円断面とした。シャフト内のスクラップは操業に伴い減少していくこととなるが今回は文献⁹⁾をベースに図17のように考え、スクラップ3装目でシャフト部充填率100%、スラグ排出の開始時点で0%とした。又、計算は充填率をステップ状(5段階)に変化させた近似法を採用した。

(2) 排ガス条件

初装スクラップの溶解中は500°C、追加装入以後は1000°C一定の排ガス温度とし、排ガス量は直接吸引風量の1000Nm³/minとした。

4.2.2 解析結果と評価

解析結果を表3に示すが、5段階に分割した予熱対象のスクラップ量と予熱温度を示している。この結果から予熱対象のスクラップ平均温度としては約325°Cとなる。これは電力換算値としては28~33kWh/tレベルの予熱効果となり、文献⁹⁾の70kWh/tと差異がある。この理由は、LNGの多量使用による排ガス温度上昇が予熱効果を高めているものと推定される。

4.3 スクラップ連続搬送方式

4.3.1 解析の考え方

(1) 解析モデルの概要

この方式の一例として電気炉に直結したスクラップ予熱帯で、搬送中のスクラップを電気炉から出た高温排ガスで予熱するコンスティール法⁴⁾がある(図18参照)。

解析モデルとしてはスクラップ搬送装置を長手(進行)方向及び層厚方向に分割し、各々のブロックでの伝熱状態を図19のごとく考えた。

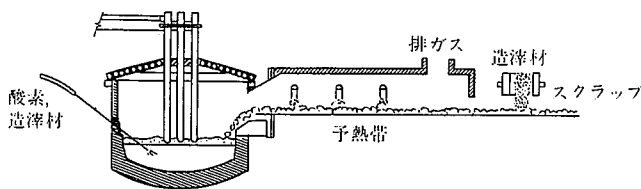
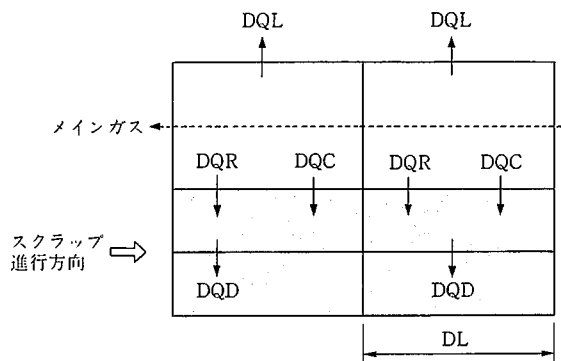


図18 コンスティール法



DQC: メインガス流体からスクラップへの対流伝熱(管内乱流熱伝達)
 DQR: メインガス流体からスクラップへの輻射伝熱
 DQL: メインガス流体からコンベアカバーへの対流+輻射伝熱
 DQD: 層内スクラップ間の伝導伝熱

図19 スクラップ連続搬送方式のスクラップ予熱解析モデル

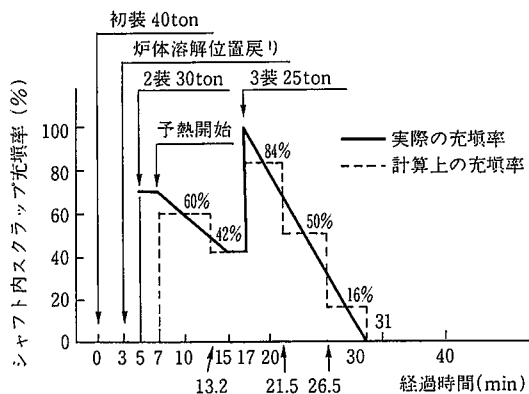


図17 シャフト内スクラップ充填率の変化

表3 シャフト炉の予熱計算結果

| 段階 | 予熱対象スクラップ (ton) | | 溶解スクラップ量 (ton) | | 溶解スクラップの予熱温度 (°C) | |
|-----|-----------------|------|----------------|------|-------------------|-----|
| | 2装 | 3装 | 2装 | 3装 | 2装 | 3装 |
| I | 25.8 | — | 7.7 | — | 146 | — |
| II | 18.1 | — | 6.9 | — | 214 | — |
| III | 11.2 | 25.0 | 11.2 | 3.4 | 410 | 179 |
| IV | — | 21.6 | — | 14.7 | — | 363 |
| V | — | 6.9 | — | 6.9 | — | 520 |
| 合計 | | | 25.8 | 25.0 | | |

(2) 排ガス条件, その他

コンスティール法の操業データとして報告⁶⁾された以下の条件を採用した。

- 排ガス温度(予熱帯入口温度) 900°C
- 排ガス量(予熱帯入口ガス量) 930Nm³/min
- 予熱帯の長さは24mとし、スクラップの移動速度は1 m/minとした。

4.3.2 解析結果と評価

ガスがスクラップ上面を流れて予熱をする解析結果を図20、図21に示す。図20は搬送装置の各位置におけるスクラップの平均予熱温度を示したものである。この結果より電気炉に投入される直前のスクラップ平均温度は約160°C程度となり、報告されている内容⁹⁾と良く一致している。図21は電気炉に投入直前の層厚方向のスクラップ温度を示したもので、表面はガス温度近くまで予熱されているものの、下部は殆ど予熱されていないことが判る。これはスクラップ内部にガス流れが生じず、スクラップの加熱は熱伝導が主体となり伝熱効率が悪くなるためと考えられる。この結果、予熱効果は電力換算値として20~25kWh/t程度となる。

4.4 解析結果の総括

予熱効果の解析結果を整理すると以下ようになった。

- 一電源二炉方式 ; 35~40kWh/t
- シャフト炉方式 ; 28~33kWh/t
- コンスティール方式 ; 20~25kWh/t

各々の予熱方式とも、技術的な面で改善の余地がまだ残っていると考えられるが、現時点での排ガス保有熱の熱回収効率からは一電源二炉方式が勝っている。特にコンスティール方式は予熱対象が全スクラップであることを考慮すると予熱効率は他の方式より劣って

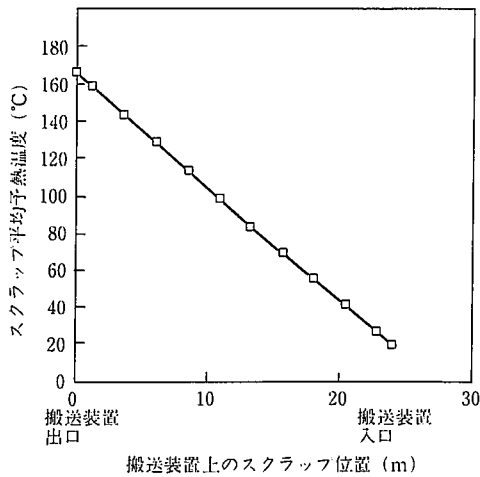


図 20 各位置におけるスクラップ平均予熱温度

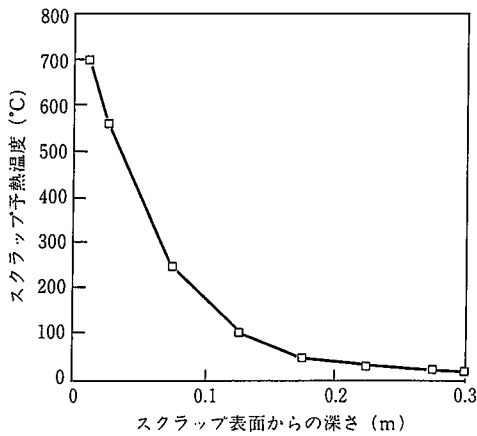


図 21 層厚方向のスクラップ温度分布

いると考えられる。又、一電源二炉方式に比べてシャフト炉方式は、排ガス温度が高いわりに予熱効果が小さいのはシャフト部内スクラップが溶解に伴い減少し、結果として予熱対象スクラップ率が小さくなるためと考えられる。

5. 結 言

KBTCの操業状況において、新日本製鐵の直流電気炉の特徴である長寿命炉底電極、アーク偏向防止技術、スクラップ高速溶解技術、一電源二炉方式が着実にその効果を挙げていることを述べた。又、スクラップ予熱に関して一電源二炉方式と他の方式について数値解析し、それらの予熱効果を定量的に評価して一電源二炉方式の優位性を述べた。

今後も新日本製鐵は、KBTCとともに操業改善を実施し、更なる生産性の向上を図るとともに、操業の自動化、省力化設備の開発を鋭意進めていく所存である。

参 照 文 献

- 1) 野田孝昭 ほか：電気製鋼. 61(2), 142 (1990)
- 2) 高橋誠 : 新日鉄技報. (345), 15, (1992)
- 3) Clayton, J. et al : 4th European Electric Steel Congress. Madrid, Nov., 1992,
- 4) Vallomy, J. A. : 6th Intern. Iron and Steel Congress. Vol. 4, Steel-making II. Nagoya, Oct., 1990
- 5) Klessner, D. E. et al : Electric Furnace Conference Proceeding. 1991