

討 8

旋回ランス式転炉法の攪拌と冶金特性

日本鋼管株式会社技術研究所 河井良彦 工博 川上公成 碓井 務
京浜製鉄所 豊田剛治 福山製鉄所 長谷川輝之

1. 緒 言： LD転炉製鋼法はその優れた吹錬特性により飛躍的に発展したが、近年、鋼浴及びスラグの攪拌不足が認識されると共に各種の改良プロセス¹⁾が実機化された。当社は以前より転炉の火点の役割に注目し、小型転炉で研究を進めた過程から、上吹ランスを吹錬中に旋回することによつて火点を有効に利用し、浴内混合攪拌の強化をはかる独自の旋回ランス式転炉法(LD-CL法)を開発し²⁾、京浜製鉄所の250t転炉にスケールアップし、以来良好な結果を得ている。本報ではLD-CL法の冶金特性と水モデル実験で得た攪拌指標を基に脱C特性値の定量化を試みた結果について述べる。

2. LD-CL法の冶金特性： LD-CL法の効果は、(1)鋼浴中Fe, Mnの過酸化の抑制、(2)脱P, 脱Sなどスラグメタル間反応の促進であり、これらによつて転炉吹錬の自由度が拡大されたことを特徴とする。表1は250t転炉で得られたLD-CL法の冶金特性を、福山で実機化した上下吹き吹錬法(NK-CB法)と対比した結果であるが³⁾、スラグ中(T, Fe)のコントロール巾及び脱P, 脱S特性にその特徴が表われている。尚、両法の設備、操業条件は表2に示した。

2.1 脱C特性：脱C特性は炉況、装入条件あるいは送酸速度やランス高さなどの送酸条件により異なる。これらの条件を一定とする4つの吹錬水準で回転速度

1 rpmのLD-CL法とLD法の脱C特性を比較したのが表3である。いずれの吹錬条件においても、1 rpmのLD-CL法はいわゆるハードブロータイプの吹錬となる傾向がわかる。

一方、回転速度を5 rpmまで増すと後述するように脱P特性は向上するが、1 rpmと異り、ハードブローの傾向は消滅する。(図1) 図1の吹錬水準での倒炉時の[C]と[O] (EMF測定)の関係を図2に示した。LD-CL法の[O]はLD法に比べ低下するが、図中に併記したNK-CB法のレベルはこれよりさらに低い。これは底吹きガスによる攪拌力を付加したNK-CB法の脱C機構の差、あるいは不活性ガス使用時のPco低下の効果に由来するものと考えられる。

終点スラグ、メタル間のMn分配と(T, Fe)あるいは[O]の関係は、ほぼ一義的で、吹錬法による差は少ない。但し、(MnO)/[Mn]と[O]の関係をLD法、LD-CL法及びNK-CB法について終点温度で層別した結果、(MnO)/[Mn]の[O]に対する温度依存性が明瞭に認められた。(図3) この関係はBardenheuer⁴⁾らの高(MnO)/[Mn]での実験傾向とほぼ一致する。

2.2 脱P特性：LD-CL法では1 rpmと5 rpmのいずれの条件においても修正Healyの式⁵⁾から求めた脱P特性が向上する。(表3, 図4) 前述したように旋

Table.1 Comparison of metallurgical characteristics in LD, LD-CL and NK-CB processes

| Item | LD | LD-CL | NK-CB |
|--|------------------------|---|---|
| (T,Fe) (C)=0.05% | 16~23% | 17~17% (through blast) 15~23% (after L. at 1.5% C) | 16~16% |
| Dephosphorization | inferior at high [C]vp | superior at high [C]vp | inferior at high [C]vp |
| Desulfurization (Desulfurization ratio) | — | 10% superior to the level of LD process | slightly improved as compared with LD process |
| (Mn)vp (C)=0.05% | 0.05~0.18% | 0.13~0.19% | 0.16~0.51% |
| [O]vp (C)vp=0.05% | 600~800ppm | 500~650ppm | 300~500ppm |
| [N]vp ([T])M=0.01% | 8~17ppm | 8~15ppm | 7~14ppm |
| Limit of decarburization | 0.02% | 0.02% | 0.01% (through Ar blown) |

Table.2 Specification of equipments and operational conditions in LD-CL and NK-CB processes

| | LD-CL | NK-CB |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| equipment | | |
| capacity | 250t (Kaimei) | 180t (Fukuyama) |
| operational conditions | | |
| lance nozzle | 3holes (45~51φ) | 3holes (40φ) |
| lance height | 2,000~2,600mm | 1,600~2,000mm |
| oxygen flowrate | 43,000~50,000Nm ³ /Hr | 25,000~32,000Nm ³ /Hr |
| H.M.R. | 90~100% | 90~100% |
| temperature | 1,300~1,400°C | 1,250~1,350°C |
| operation | | |
| hot metal composition | | |
| Si | 0.3~0.5% | 0.3~0.5% |
| Mn | 0.4~0.5% | 0.4~0.5% |
| P | 0.10~0.12% | 0.10~0.12% |
| S | <0.04% | <0.04% |
| flux | | |
| burnt lime | 15~35kg/t | 25~35kg/t |
| acid burnt Dolomite | 20~35kg/t | 15~25kg/t |
| Fluorspar | — | 1.0~1.5kg/t |
| temperature in converter | 1,640~1,710°C | 1,600~1,700°C |

Table.3 Comparison of decarburization and dephosphorization characteristics at blow end in LD and LD-CL processes

| Blowing condition | k (min ⁻¹) | | % [C] | | Average % (T,Fe) at 0.05% [C] | | λ = ([P]cat)/([P]) | |
|-------------------|------------------------|-------|-----------|-----------|-------------------------------|-------|--------------------|-------|
| | LD | LD-CL | LD | LD-CL | LD | LD-CL | LD | LD-CL |
| A | 0.95 | 1.29 | 0.80 | 0.60~0.70 | 26 | 22 | 0.48 | 0.52 |
| B | 1.30 | 1.40 | 0.50~0.60 | 0.50~0.60 | 21 | 19 | 0.49 | 0.74 |
| C | 1.48 | 1.60 | 0.60 | 0.50 | 17 | 15 | 0.69 | 0.90 |
| D | 1.14 | 1.35 | 0.40~0.50 | 0.30 | 17 | 13 | 0.51 | 0.74 |

$\frac{d[C]}{dt} = -k(C)$; C: Critical [C] where %C=100%; λ : Oxygen efficiency for decarburization

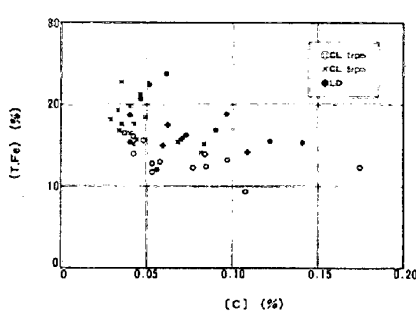


Fig.1 Relation between [C] and (T.Fe) at turndown

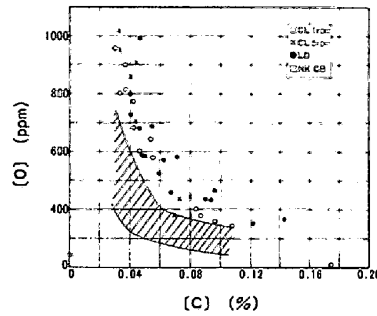


Fig.2 Relation between [C] and (O) at turndown

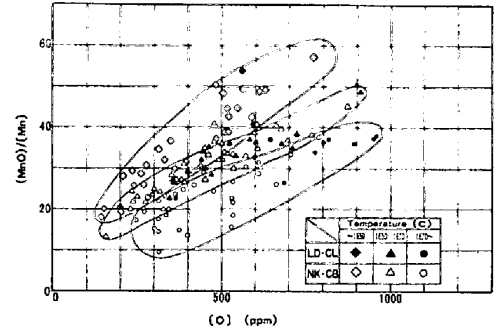


Fig.3 Relation between (O) and (MnO)/(Mn) at turndown

回速度が 1 rpm では (T. Fe) が低下するが、5 rpm では LD 法と同レベルに維持されるため、脱 P 強化並びに高 C 材の吹錬には高速回転条件が適している。図 5 には高 C 材吹錬時の [C] と [P] の関係を例として示した。また実炉での脱 P 反応は滓化状態、酸素ポテンシャルや温度の推移と共に進行しているため回転速度の影響度合は明らかでないが、ランス回転によつて (T. Fe) レベルに無関係に終点での脱 P 特性が向上することは、川合ら⁶⁾の脱 P 反応律速段階をスラグ層中 P の移動とする説に拠り、スラグ層の攪拌状態の改善として

定性的に説明される。

脱 S 反応も (T. Fe) 低下吹錬の場合向上する。

3. LD-CL 法の攪拌

～水モデル実験～
京浜 250t 転炉の

1/15～1/60 の 4 種類

のプラスチック容器を用い、水-O₂ガス系で行つたモデル実験の結果を⁷⁾述べる。

3.1 浴流動状態：写真 1 は Al 粉を添加して浴中心断面でのフローパターンを撮影したものである。LD 法（写真 A）では、Rote, Flinn⁸⁾らの説と同様、クレーター周辺の上昇流、壁面の下降流を伴つた比較的定常的なパターンが観察される。しかし、クレーター直下の炉底部に、よどみ点が存在する。

低速ランス回転時（写真 B）には、クレーターを中心としたフローパターンは LD 法と同様であるが、クレーター自体が移動しているために、その軌跡より内側の浴下層部にランス回転方向とは逆の渦流れが生じ、LD 法でみられたよどみ点が解消する。

高速ランス回転時（写真 C）には、この渦流れが不明瞭となる。また浴表層ではランス回転方向とは逆の片流れ状態が強く、一方下層部での流動が停滞し、浴全体の混合状態は悪化する方向にある。

3.2 均一混合時間：浴のマクロ的な混合度合を評価するために中和法により測定した均一混合時間は送酸条件のほか、浴形状やスラグ量及び粘性により大きく影響されることがわかつた。⁷⁾ LD 法の場合、均一混合時間 τ は (4) 式で表わされた。LD-CL 法の場合にはさらに回転条件の依存性が加わるが、この依存性はスラグ性状と共に変化する。流動性スラグあるいはスラグなしの条件では低速回転条件で τ の極少となる領域が存在し、LD 法に比べて τ は 0.3～0.7 倍程度となるが高速回転条件では τ は LD 法

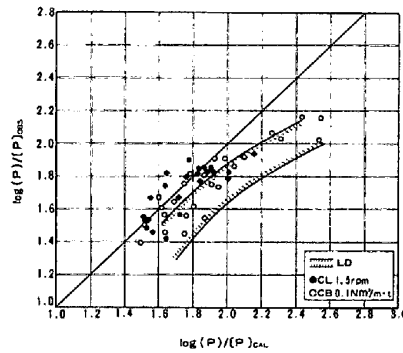


Fig.4 Comparison of observed and calculated (P)/(P)

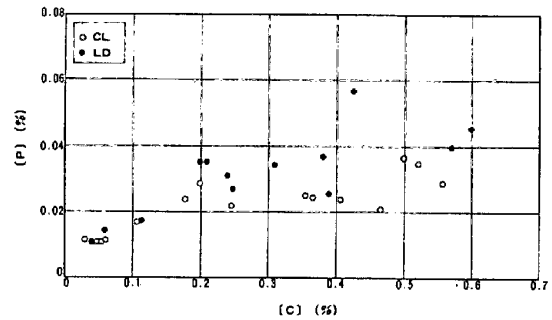


Fig.5 Relation between [C] and [P] at turndown

より長くなる傾向となる。また固体スラグでは高速回転の方が攪拌が良い結果となつた。

$$\tau = k \cdot L^{2.24} \cdot D^{3.02} \cdot H^{1.47} \cdot V_j^{-3.92} \cdot n^{-1.13} \cdot \eta^{0.14} \cdot \delta^{-1.25} \cdot d_j^{-2.55} \dots (1)$$

k : 定数 L : 浴深さ D : 浴径
 H : ランス高さ V_j : ノズル出口ジェット速度
 n : ノズル孔数 η : スラグ粘度
 δ : スラグ厚さ d_j : ノズル出口径

図6はLD及びLD-CL法のτを上下吹き法(CB法)と比較したものである。上下吹き

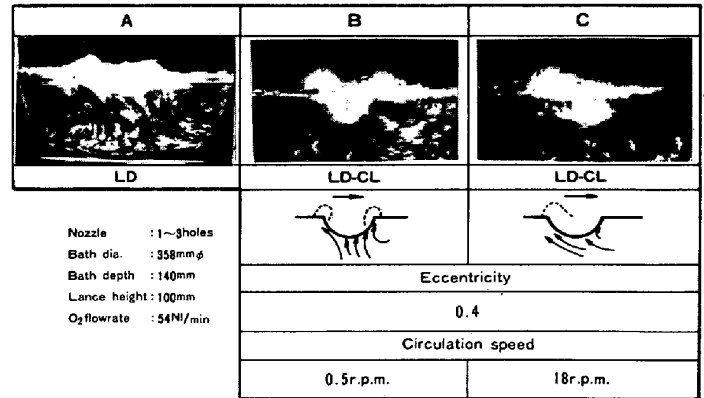


Photo.1 Observation of flow pattern in cold model for LD and LD-CL processes

法の結果をLD法を基準として整理すると測定法は異なるものの、ホットでの実測傾向⁹⁾と良く一致する。スラグなしで、且つガス量増加や温度変化による体積膨張のない系ではあるが、図6ではLD-CL法の強攪拌条件は上下吹き吹錬法の0.1 Nm³/min·t付近の条件に相当する。

4. 攪拌と脱C特性の関連： 乱流域の物質移動に関し従来の化学工業で常用される総括物質移動係数と浴流動の無次元関係式による整理法は、反応容器設計や操業諸元の決定並びにプロセス間の比較において工学的に意味がある。ことに実炉での脱C挙動のように、吹錬末期には物質移動律速で整理されるものの、浴流動や反応サイトの記述が正確にできていない系では有効な手法と思われる。以下は、水モデルとホットモデルとで浴流動パターンが相似であるとの仮定の下に、均一混合時間と脱C特性の関連を検討した結果である。

4.1 実炉におけるLD法の均一混合時間：実炉の鋼浴攪拌の正味の駆動力がクレーター内ガス運動量伝達¹⁰⁾にあるとして、(1)式を超音速ジェットの減衰式とジェットの特性長さ¹¹⁾を用いて変形し、(2)式を得た。但し、(2)式では、ガス、スラグ、溶鋼の物性項は一定としている。

$$\tau_{LD} = C \cdot L^{1.98} \cdot H^{3.08} \cdot d_j^{-4.16} \cdot V_j^{-3.92} \cdot n^{-1.13} \cdot W^{0.26} \cdot W_s^{1.25} \dots (2)$$

C : 物性項を含む定数 W : 溶鋼量 W_s : スラグ量

(2)式から $\tau_{LD}/C = \tau_{cal}(LD)$ をLD法の攪拌指標とする。

4.2 均一混合時間と脱C特性値の関係：図7は異なる吹錬水準の[C]=0.05%における(T.Fe)とτ_{cal}(LD)の関係をLD法及びLD-CL法について一括して示したものである。LD-CL法で計算したτ_{cal}(LD)には巡回条件は考慮されていない。図中LD法での対応(実線)から、均一混合時間と(T.Fe)の関係式として(3)式を求めた。

$$(T.Fe)_{C=0.05\%} \propto \tau_{cal}(LD)^{0.59} \dots (3)$$

当然ながら、(3)式は溶鋼量及びスラグ量が一定の時に成り立つ式である。LD-CL法の場合0.3 rpmと3 rpmではほぼLD法と等しい脱C特性であり1 rpmでハードブロータイプとなる傾向が図7でも表われている。(3)式を用いてLD-CL法の均一混合時間のτ_{cal}(LD)に対する比を求めると0.3, 1, 3 rpmでそれぞれ1.11, 0.65, 1.07であり、これは水モデル実験でのスラグ無しあるいは流動スラグの傾向

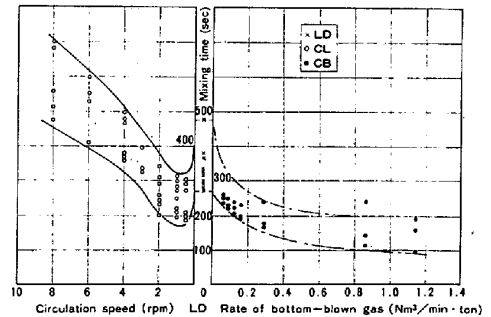


Fig.6 Comparison of the mixing time

とよく類似している。図8は底吹きガス量と(T.Fe)の関係を各種複合吹錬法のデータからもとめたものである。図中には250t炉でスラグ原単位を一定として(4)式及び、水モデル実験から得た τ と底吹きガス量の関係を使つて計算した値も示した。CO発生によるガス量変化のプロセスもあるが、(4)式のような関係は異なるプロセスでも成立すると思われる。また図8には計算及びNK-CB法との対比実績からLD-CL法(ハードプロタイプ)の適用範囲も示したが、LD-CL法は巡回条件の選択により巾広い(T.Fe)をコントロールできることがわかる。

脱C速度式とO₂バランス式から脱C容量係数(kc)と均一混合時間の関係を求め、(4)式を得た。

$$kc \propto \tau^{-0.461} \dots \dots \dots (4)$$

cal(LD)

4.3 スラグレス吹錬への適用：予備処理浴銑使用時のスラグレス脱C特性がLD法とLD-CL法でどのように変化するかを(2)、(4)式とO₂バランスから遷移[C](C*)を特性値として予測した結果と実機(250t)結果を図9に示した。

スラグ量減少による攪拌効果の向上程度が非常に大きいため計算では、C*は吹錬法によらず10kg/tのスラグ量では[C]=0.10%程度に収束する。尚、最適条件については操作性や鋼種設定など全体的に検討すべき課題が未だ多く残されている。

5. 結 言： LD-CL法の冶金特性及び脱C特性をマクロ的に攪拌指標を使つて評価することの意義を示した。定量精度をあげるためには脱C機構あるいは炉内流動の正確な把握努力が今後とも必要である。

6. 文 献： (1)村上，日本金属学会会報 20('81)725
 (2)板岡ら，日本鋼管技報 82('79)29
 (3)楯ら，鉄と鋼 67('81)S8
 (4) Bardenheuer et al., Archiv Eisenhüttenw 42('71)525
 (5)河井ら，鉄と鋼 63('77)S156
 (6)川合ら，鉄と鋼 63('77)391
 (7)河井ら，鉄と鋼 65('79)S673
 (8) Rote et al., Met. Trans. 3('72)1373
 (9)江見ら，第一回製鋼学術会議報告(中国金属学会) 259
 (10) Kleppe et al., Arch. Eisenhüttenw 48('77)193
 (11) Chatterjee, Iron & steel ('72)627

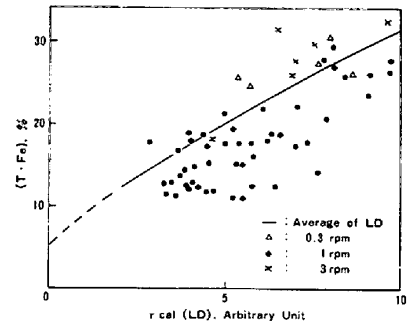


Fig.7 Relation between rcal(LD) and (T.Fe) at 0.05% [C] on LD-CL practice

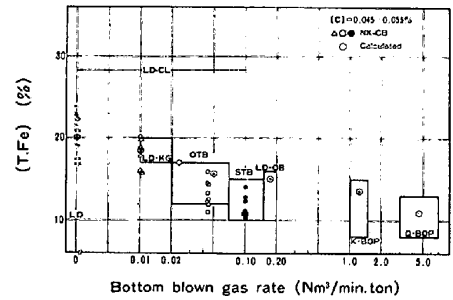


Fig.8 (T.Fe) range in various processes

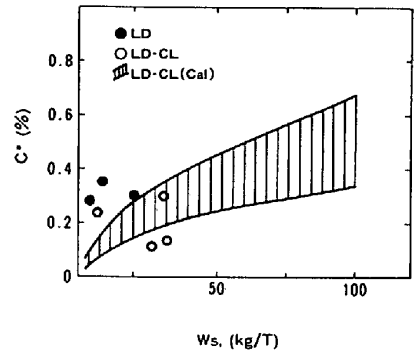


Fig.9 Relation between Ws and C*.