

# 討13

## 転炉内熱源付加技術の開発

新日本製鐵㈱ 君津製鐵所

中村皓一、原田俊哉、村上義男

大森正直

君津技術研究部 ○辻野良二、平居正純

1. 緒言 当所では低溶銑比操業に対処するため、転炉工程での屑鉄溶解能力の向上を目的に、転炉内石炭吹込技術、二次燃焼促進技術の研究開発を推進し実操業に適用している。本報ではそれらの開発過程で得られた実験結果および諸知見について報告する。

### 2. 転炉内石炭吹込技術の開発

#### 2.1 本プロセスの特徴

従来の塊状コークス上方添加法に比べてより高い着熱効率を得る為のプロセスでありその特徴を以下に示す。

- (1) 高速で石炭粉を鋼浴中に吹込むため炭素添加歩留が高い。
- (2) 酸素吹込の主孔と副孔を有するデュアルランスの使用で二次燃焼の促進が図れる。
- (3) 既設の上吹転炉に適用する際、改造が容易である。
- (4) 安価な粉石炭の利用が可能である。

また設備概要をFig.1 に示す。

#### 2.2 着熱効果

従来のコークス添加法（普通ランス使用）による着熱効果がスクラップ増分として0.30%/kg-Cであるのに対し、本法では0.50%/kg-Cが得られた（Fig.2）。この差異は以下に示すように①炭素添加歩留の向上②二次燃焼率の向上の結果であると考えられる。

##### 2.2.1 炭素添加歩留の向上

本法とコークス添加法のそれぞれの二次燃焼率および実績酸素原単位から炭素歩留の推定を行った結果、本法ではほぼ100%であるが、コークス添加法では約86%となった。コークス添加法の炭素添加歩留が悪い理由としては排ガス中への飛散ロス、スラグ中への未反応ロス等が考えられる。

##### 2.2.2 二次燃焼率の向上および着熱効率

二次燃焼率は普通ランス使用の場合の約9%に比べ、本法では約13%で約4.2%の向上が認められた。同じデュアルランスを使用した場合の石炭吹込有無の二次燃焼率の差はあまりないが、石炭添加歩留の悪くなるような吹込条件の場合には飛散した石炭によるCO<sub>2</sub>の還元反応によって二次燃焼率が低下することがある。熱バランス計算から二次燃焼の着熱効率は70%前後と考えられる。

##### 2.2.3 熱量計算による着熱量評価

本法とコークス添加法について二次燃焼率を各々13%、9%、炭素添加歩留を各々100%、86%、二次燃焼の着熱効率は両法とも70%とし、炭素源 10kg-C/t・s 添加時の発生熱量を計算した結果をFig.3 に示す。本法ではコークス添加法に比べ高い着熱効果が得られているのがわかる。

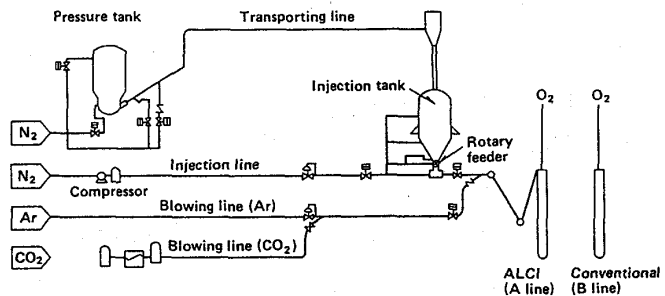


Fig. 1 Outline of the equipment for coal injection.

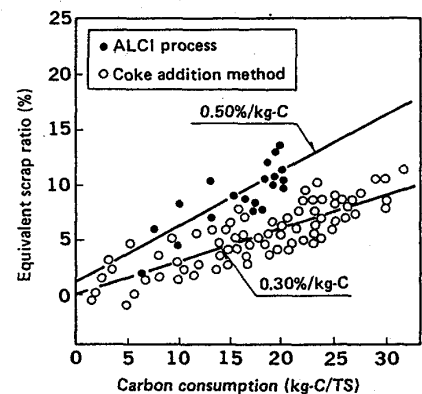


Fig. 2 Heat efficiency of ALCI process and Carbon Consumption.

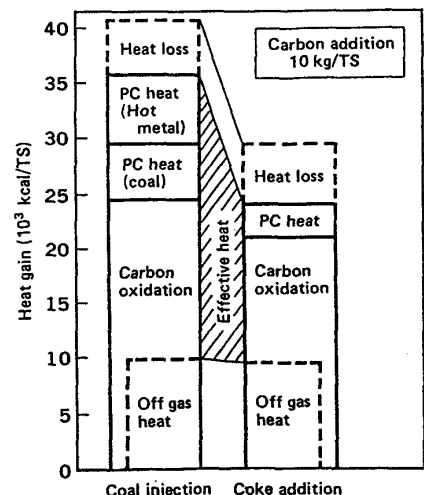


Fig. 3 Heat gain in the case of 10 kg/TS of carbon addition.

## 2.3 冶金反応への影響

2.3.1 脱C挙動 吹錬中のサブランス測定による[C]推移をFig.4に示す。石炭吹込時と非吹込時の脱炭速度は明らかに異なっており各々の傾きを送炭速度および石炭吹込速度から求めた傾きと一致している。このことから本法では吹込まれた石炭が瞬時に鋼浴中に溶解またはC燃焼に寄与していることが推定される。

2.3.2 脱S挙動 本法では低S石炭を使用しているため、従来のコークス添加の場合よりS上昇が小さい。Sバランス検討の結果、不明分はほとんどなく、気化脱S等は認められなかった。

2.3.4 脱N挙動 本法とコークス添加法における吹錬中のN推移をFig.5に示す。コークス添加の場合には塊コークスの溶解に時間がかかるため、コークスからのN上昇に時間遅れがあり、吹錬中の脱N速度が比較的小さいのに対し、本法では石炭吹込中は石炭中NとキャリアガスのN<sub>2</sub>から加Nされるが、吹込後速やかに脱Nが進行する。したがって吹錬末期の脱N時間確保によってコークス添加法に比べ鋼中Nを低く抑えることができる。

## 2.4 モデル実験による主孔O<sub>2</sub>噴流と微粉炭流の干渉調査結果

実験方法としてFig.6に示すように1/5相当ノズルを用い、粉体は微粉炭の代用として川砂をリシガンで空気より吹込んだ。主孔噴流は空気とし、粉体流との干渉の可視化には感圧紙を用いた。また干渉により飛散する粉体の量および粒度分布は、粉体流のみをバグフィルターで回収し、元の粉体との比較から求めた。

Fig.7に感圧紙上の粉体飛散状況の一例を示す。主孔ノズル角度によっては粉体は主孔噴流の中心部まで巻込まれ飛散することにより石炭添加歩留が悪くなることが推定された。また主孔噴流に巻込まれた粉体の粒度分布をみると、粉体の粒径が小さいほど巻込みが多いことがわかった。

以上の知見をランス設計に反映させ、石炭噴流が主孔O<sub>2</sub>噴流にできるだけ干渉されないように主孔、副孔断面積比率の変更および主孔傾角の拡大を図り、炭素歩留と熱効率を向上させた。

## 3. 二次燃焼に関する考察

### 3.1 二次燃焼モデルの検討

転炉内の二次燃焼率は脱炭反応によって発生したCOのCO<sub>2</sub>への酸化反応と生成したCO<sub>2</sub>のCOへの還元反応のバランスで決まり非定常で複雑な不均一反応群の結果もたらされることが考えられる。ここでは二次燃焼の主反応は酸素ジェットと炉内雰囲気中COとによるCO<sub>2</sub>生成反応であると考え、Fig.8に示すような反応モデルで二次燃焼率の検討を行うことにした。すなわちランスノズルから吐出した酸素ジェットは超音速域、遷移域を経て、自由噴流域となるが、この自由噴流と自由噴流への同伴によって巻込んだCO（脱炭反応生成ガス）との反応（ $CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$ ）

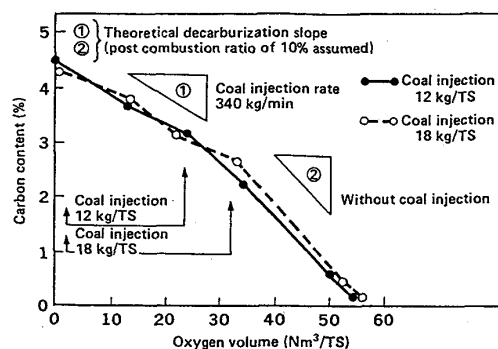


Fig. 4 Behavior of carbon content in ALCI process.

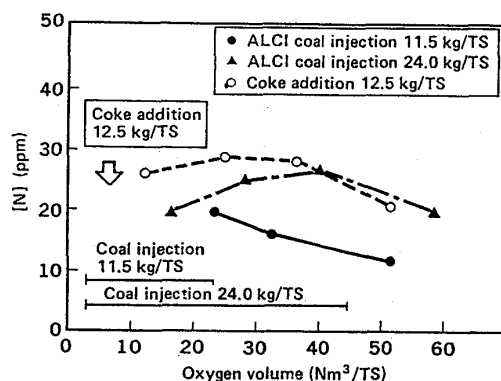


Fig. 5 Behavior of nitrogen content in blow.

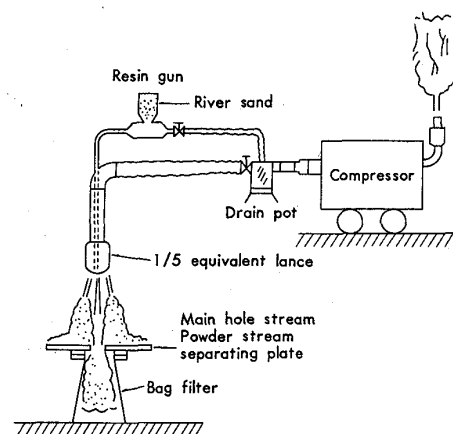


Fig. 6 Experimental apparatus

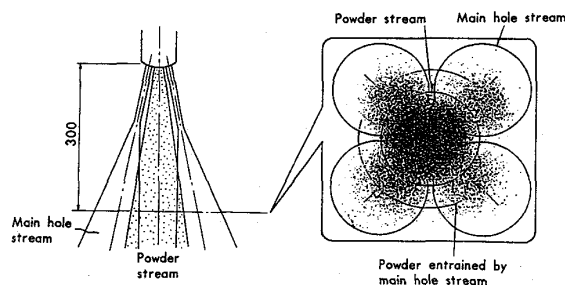


Fig. 7 Results of scattering test

によってCO<sub>2</sub>噴流が生成され、その噴流表層のある限界速度以下のCO<sub>2</sub>が火点から発生するCO流への同伴によって逸散し、逸散しない残りのCO<sub>2</sub>またはO<sub>2</sub>噴流は鋼中Cと反応しCOとなる。ここで逸散するCO<sub>2</sub>は自由噴流中のある限界速度以下の流量に比例し、二次燃焼率は逸散するCO<sub>2</sub>量と脱炭反応によって発生したCO量の比に比例して決まるとした。なお二次燃焼率に対しスラグフォーミングの影響がみられるが、ここでは要因として取り入れていない。また石炭吹込時には主孔O<sub>2</sub>噴流と石炭粉との干渉が見られる場合があるが、ここでは石炭粉を吹込まないデュアルランス、普通ランスの結果をもとに検討した。

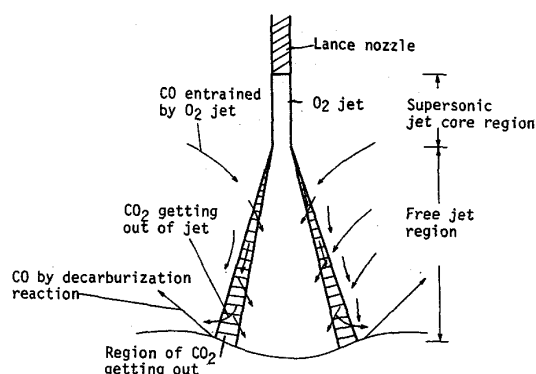


Fig. 8 Schematic diagram of post combustion.

なお以上のモデルの考え方は①酸素自由噴流中に十分な量のCOガスが巻込まれ、<sup>1)</sup>噴流中かなりの組成比でCO<sub>2</sub>が生成することが燃焼実験の結果わかったこと (Fig.9)、②CO<sub>2</sub> + C → 2CO反応が十分速く、鋼浴に達したCO<sub>2</sub>はO<sub>2</sub>ガスと同様全量脱炭反応に使われると考えられること<sup>2)3)</sup>、③自由噴流中の流速の小さい表層部からCO<sub>2</sub>が逸散すると考えられることからほぼ妥当であると言える。以上の考え方にに基づき二次燃焼のモデル式を以下のように導出した。各羽口ごとの酸素ジェット1本当りの二次燃焼率(α<sub>i</sub>)は自由噴流内の速度分布を(1)式のように与えると(2)式で表わされる。

$$U/U_0 = \exp[-Kc(r/x)^2 / (0.16x/d_0 - 1.5)] \quad \dots\dots (1)$$

$$\alpha_i = \{CO_2 / (CO + CO_2)\} = B \int_{r_0}^{r_n} 2\pi U r dr / \left( \int_{r_n}^0 2\pi U r dr + \int_{r_0}^{r_n} 2\pi U r dr \right) \\ = B \int_{r_0}^{r_n} 2\pi U r dr / \int_{r_0}^0 2\pi U r dr \quad \dots\dots (2)$$

ここで噴流が乱流拡散火炎と考えられるが、Bは噴流内のCO<sub>2</sub>濃度分布、温度分布、圧力分布を含んだ係数である。

炉内全体の二次燃焼率(α)は(3)式に示すようにランス中の各羽口の噴流間(i, j)の干渉係数をβ<sub>ij</sub>とし各噴流の二次燃焼率(α<sub>i</sub>)を各噴流の酸素流量(F<sub>O<sub>2</sub>i</sub>)比で加重平均して求めた。なお干渉係数は(4)式の関係を有する。

$$\alpha = \sum_{ij} (\alpha_i \times \beta_{ij} \times F_{O_2 i}) / \sum_i F_{O_2 i} \quad \dots\dots (3)$$

$$\beta_{ij} F_{O_2 i} + \beta_{ji} F_{O_2 j} = 0 \quad \dots\dots (4)$$

ここではB=1とし各羽口の噴流間の干渉がほぼないと考えられるランス(β<sub>ii</sub> = 1, β<sub>ij</sub> = 0)についてα<sub>i</sub>の検討を行った。250t転炉、10t取鍋<sup>4)</sup>での脱炭試験の

各試験条件について二次燃焼率の計算値とチャージ平均の実測値が一致するみかけの逸散限界速度(V<sub>1</sub>)を求めFig.10に示す。

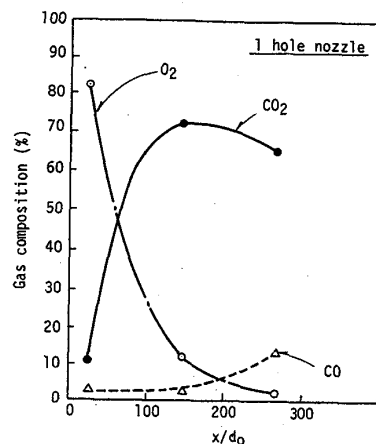
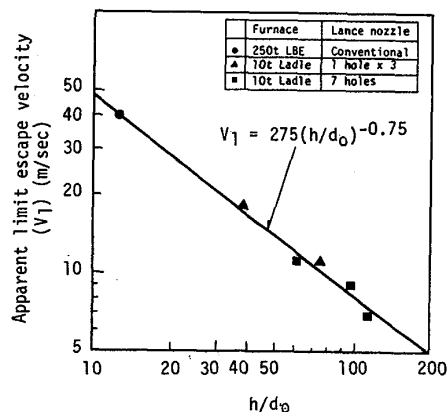
V<sub>1</sub>とh/d<sub>0</sub>との間に(5)式で示す良好な関係が認められ、h/d<sub>0</sub>が小さいほどV<sub>1</sub>が大きい傾向がみられる。なおここでhは(6)~(8)式の計算式によって求めた。

$$V_1 = 275 (h/d_0)^{-0.75} \quad \dots\dots (5)$$

$$h/d_0 = L_c/d_0 - H_c/d_0 \quad \dots\dots (6)$$

$$H_c/d_0 = 4.12P - 1.86 \quad \dots\dots (7)$$

$$F_{O_2} = 58.1 \times n_A \times (P + 1.033) \times 10^4 \quad \dots\dots (8)$$

Fig. 9 Change of gas composition of jet center with jet length (x)/nozzle diameter (d<sub>0</sub>).Fig. 10 Relationship between apparent limit escape velocity and h/d<sub>0</sub>.

$h/d_o$  の値が小さいほどみかけの逸散限界速度が大きくなるのは  $h/d_o$  の物理的意味がソフトブローかハードブローかを表すものであり、 $h/d_o$  が小さいほどハードブローとなり火点周りで  $CO$  ガス流出速度が大きくなることに対応し、逸散限界速度が大きくなるためと考えられる。

$B=1$  の場合の (1) (2) 式から求めた二次燃焼率と  $h/d_o$  の関係は (9) (10) 式で表わされさらに (5) 式より二次燃焼率と  $h/d_o$  の関係を求めると (11) 式が得られる。

$$\alpha_i = a (h/d_o - 10) + 0.01 \quad \dots\dots (9)$$

$$a = 4.8 \times 10^{-4} V^{0.95} \quad \dots\dots (10)$$

$$\alpha_i \approx 0.1 (h/d_o)^{0.3} - (h/d_o)^{0.7} + 0.01 \dots\dots (11)$$

(ただし  $10 \leq h \leq 2120$ 、 $(\alpha_i = 0 (h < 10)$ 、 $\alpha_i = 1 (h > 2120)$ )

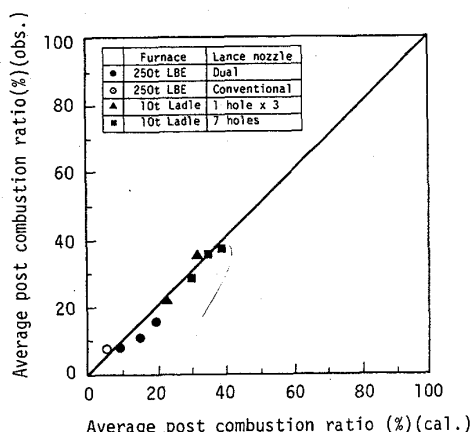


Fig. 11 Comparison of average post combustion ratio between calculated value and observed value.

### 3. 2 二次燃焼モデル式と実測値との対応

(3)、(11) 式を用いて 250t 転炉、10t 取鍋の各試験条件について二次燃焼率を計算し、チャージ平均実測値と対応させ Fig. 11 に示す。計算値と実測値との間には良い一致が得られた。

二次燃焼率に対する送酸速度の影響に関しチャージごとの二次燃焼率の計算値と実測値との関係を Fig. 12 に示す。主孔酸素流量が少ないほど二次燃焼率が高い傾向は計算値と実績値が一致している。スラグフォーミング高さが高いほど実績の二次燃焼率が低くなる傾向があるが、実績値が計算値ほど二次燃焼率が高くないデータがあるのは、スラグフォーミングが大きくなった影響と考えられる。

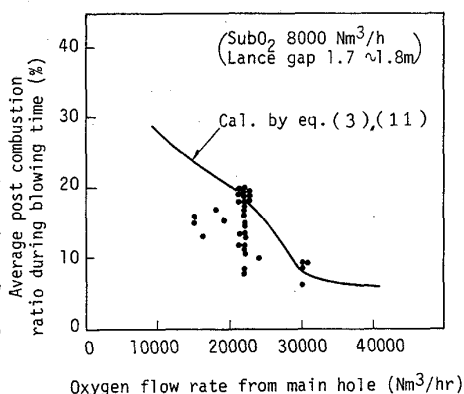


Fig. 12 Effect of oxygen flow rate from main hole on average post combustion ratio.

また ランスギャップの二次燃焼率への影響に関し、スラグレスの吹錬試験を行った 10t 取鍋脱炭の結果では計算値と実測値はよく一致した。

さらに吹錬中の二次燃焼率の推移については①脱炭 I、III 期について脱炭速度の低下に伴う  $CO$  発生量の減少②吹錬中の雰囲気温度上昇による超音速コア長さ増大の影響の補正をモデル式に行なうことによってマクロ的には説明できた。

### 4. 結言

(1) 溶鉄比低減対策としてデュアルランスによる石炭吹込法の研究・開発を行い、実用化した。従来のコークス添加法に比べ炭素添加歩留(ほぼ 100%)、二次燃焼率が向上し着熱量が大きい。

(2) 二次燃焼に及ぼす要因を検討し、二次燃焼モデル式を作成した。実験で得られた二次燃焼率は、同モデル式によりほぼ矛盾なく説明できた。

<記号>  $U$ 、 $U_o$  : 自由噴流内及び自由噴流入口での速度 (m/sec)、 $r$ 、 $x$  : 自由噴流内半径方向距離 (m)、同羽口からの距離 (m)、 $r_n$ 、 $r_o$  : 自由噴流内の流速  $n$  m/sec、 $0$  m/sec の  $r$  の座標、 $h$  : 自由噴流の羽口側から湯面までの距離 (m)、 $L_g$  : ランスギャップ (m)、 $H_c$  : 超音速コア長さ (m)、 $A$  : ノズル羽口断面積 ( $m^2$ )、 $P$  : ノズル羽口前圧力 ( $kg/cm^2$ )  $K_c$  : 85~89 の定数、ここでは 87 とおいた。

### <参考文献>

- 1) Beer、Chigier : 燃焼の空気力学 (1974) [日本エネルギー技術協会]
- 2) P. A. DISTIN 他 : JISI August (1968)、P.821
- 3) 坂本六郎 : 鉄と鋼、52 (1966)、P.1738
- 4) 馬場他 : 鉄と鋼、70 (1984)、S1029