

# 加圧転炉型溶融還元炉内の二次燃焼 技術の開発

高橋 謙治\*・田辺 治良\*・岩崎 克博\*  
室屋 正廣\*・菊地 一郎\*・川上 正弘\*

## Key Factors to Improve Post-combustion in Pressurized Converter Type Smelting Reduction Vessel

Kenji TAKAHASHI, Haruyoshi TANABE, Katsuhiko IWASAKI,  
Masahiro MUROYA, Ichiro KIKUCHI and Masahiro KAWAKAMI

### Synopsis :

Improving the heat efficiency in converter is very important for the development of high scrap ratio operation and scrap melting process in BOF and also in-bath smelting reduction processes.

Essential conditions to improve heat efficiency in an in-bath smelting reduction furnace, SRF, are described, based on the integrated operation with 5t scale SRF directly connected to a pre-reduction furnace, PRF, in NKK Fukuyama Works. Control method of the SRF operated under the high level of post-combustion and the performance of the bubbling bed type PRF are also mentioned.

Under post-combustion in the SRF, slag is considered to be a major heat transfer medium. To obtain high heat transfer efficiency from hot gas to slag,

- (1) the height adjustment of a top blowing lance.
- (2) intensive stirring of slag layer by bottom blowing are essentially important.

For the sake of high post-combustion degree, operation should be carried out under ultra soft blowing of oxygen through a double flow lance. Pressurized operation of the SRF is also effective to increase post-combustion degree.

As the result, post-combustion degree of 50% with high heat transfer efficiency of more than 85% was attained.

**Key words :** ironmaking; steelmaking; post-combustion; smelting reduction; prereduction; foaming; fluidized bed; in-bath smelting reduction; decarburization; heat transfer; scrap melting.

## 1. 緒 言

転炉へのスクラップ増装入<sup>1)</sup>あるいは転炉を用いたスクラップ溶解<sup>2)</sup>さらには転炉型鉄浴式溶融還元技術<sup>3)~5)</sup>の開発のため近年転炉内の熱補償技術が検討されている。熱源としては脱炭あるいは溶融還元反応によって炉内で発生する一酸化炭素ガス(CO)を上吹き酸素によって燃焼(二次燃焼)させているが、鉄浴中炭素を補うためにコークスあるいは石炭を装入する。熱補償の効率は炭材原単位で評価することができるが、炭材原単位が高いと炭材からPなどの不純物元素が持ち込まれるため後工程での処理が必要になり、また省エネルギーの観点からも効率の良い熱補償技術の開発が必須である。

NKKにおいては昭和53年度から鉄浴式溶融還元法

の調査、検討を開始し、昭和59年度までに高炉法を代替する転炉型溶融還元プロセスの構想を固めた。これは転炉型溶融還元炉と予熱・予備還元炉からなり、溶融還元転炉内の二次燃焼率を50~60%に、着熱効率を90%程度に設定することで鉄鉱石の予熱・予備還元工程を簡略化するというものである。

昭和60年から転炉型溶融還元炉での高二次燃焼率、高着熱効率を得るための条件を明らかにするため基礎実験を開始し<sup>6)7)</sup>、この結果をもとに昭和61年には福山製鉄所に5t多目的転炉を設置、本格的開発を開始した。この結果、溶融還元炉の熱効率を向上させる見通しが得られたため、昭和63年4月には粉鉱石の予熱・予備還元流動層(上)を転炉型溶融還元炉(下)に直結した上一貫試験設備とした。本報告はこの試験設備による試

昭和63年10月本会講演大会にて発表 平成2年3月12日受付 (Received Mar. 12, 1990)

\* NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

験結果のうち溶融還元転炉での試験結果を中心にのべる。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験設備

試験設備の概要を Fig. 1 に、仕様を Table 1 に示す。溶融還元炉 (SRF) はれんが積み後の内容積  $7\text{ m}^3$  で、溶湯からの放熱量を最小限にするために断熱れんがを配した上下吹き転炉である。SRF からの排ガスは加圧密閉フードにより予備還元炉 (PRF) へ導入する。鉄鉱石は PRF で予熱・予備還元すると同時に分級され、粗粒および微粒鉄鉱石はそれぞれの装入系列から SRF に装入される。また石炭と造滓剤は塊状で SRF に装入される。これら SRF への装入ホッパーはおおの2基ずつあり、交互に操作することで、SRF へ所定の速度で連続装入することが可能である。この装置の主たる特徴は以下のとおりである。

①PRF はバブリング流動層であり、広粒度範囲の焼結用粉鉄鉱石 (粒径  $5\text{ mm}$  以下のシンターフィード) の処理が可能。

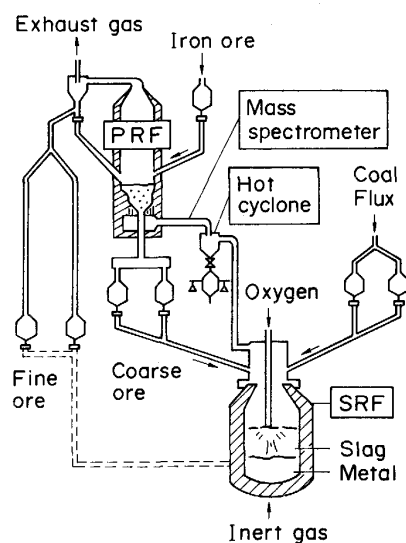


Fig. 1. Schematic diagram of the smelting reduction test plant in NKK.

Table 1. Specifications of the smelting reduction test plant in NKK.

PRF	Type Diameter Capacity SRF gas Iron ore	Bubbling bed Average $1.1\text{ m}\phi$ Maximum $6.5\text{ t Ore/h}$ $4\,000\sim 8\,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ Sinter feed ( $-5\text{ mm}$ )
SRF	Type Volume Oxygen	In-bath smelting reduction furnace $7\text{ m}^3$ as lined $2\,500\text{ Nm}^3/\text{h}$

②SRF からの排ガスはホットサイクロンで除塵後、PRF で流動層を形成するため SRF は  $1.7\text{ kgf/cm}^2$  以下の加圧状態で運転される。

③SRF の炉体、原燃料の受払いホッパーおよびホットサイクロンのダストホッパーにはロードセルが設置されており、これらによる物流の定量的管理と質量分析計および水分計による排ガス組成、量の連続測定をもとに、*in-situ* に精度の高い物質収支をとることが可能。

④試験データ約 120 点は  $30\text{ s}$  ごとに計算機でロギングされ、効率の良いデータ解析が可能である。

### 2.2 試験方法

$1\,000^\circ\text{C}$  以上に予熱した SRF に種湯として  $3\sim 4\text{ t}$  の溶銑を装入後、SRF に加圧密閉フードを締結し全系を窒素ガスで置換した上で送酸を開始する。鉄浴を昇温しつつ高炉スラグを徐々に添加し、造滓を行う (昇温期)。最終的に約  $300\text{ kg/t}$ -溶銑のスラグを造り、SRF からの放熱が安定した後、 $1\,500\sim 1\,550^\circ\text{C}$  の浴温度を維持しつつ、所定の速度で粗粒鉄鉱石と炭材を連続的に炉口から SRF に添加し、 $2.0\sim 3.0\text{ h}$  の溶融還元を行う (溶融還元期)。この間スラグの塩基度は  $1.2\sim 1.5$  となるように造滓剤を添加し、スラグ比は  $300\sim 400\text{ kg/t}$ -溶銑であった。また操業は  $1.7\text{ kgf/cm}^2$  以下の加圧下でおこなった。

SRF 操業においては、高着熱効率を維持しつつ高二次燃焼率を得るため底吹き攪拌を強化し、送酸は低動圧ダブルフローランスを用いて超ソフトブローとしている。

PRF 内の鉄鉱石滞留量は  $1.5\sim 3\text{ t}$  で平均滞留時間は  $20\sim 30\text{ min}$  とした。操業中  $10\text{ min}$  ごとに浴の测温、サンプリングを行い、また製錬条件の変更時点で適宜ホットサイクロンのダストホッパーからダストを抜き出し、SRF からの飛散量の調査をおこなった。

Table 2 に供試材の代表組成、粒度を示す。炭材は二次燃焼におよぼす揮発分の影響を評価するためにコークスのほか中揮発分炭 (MV 炭)、高揮発分炭 (HV 炭) および HV 炭に  $20\%$  コークスを混合したもの (Table 2 の中で HV\* coal と表示) を使用した。

Table 2. Chemical compositions and grain size of materials used.

	T. Fe (%)	C (%)	Gangue/Ash (%)	VM (%)	Size (mm)
Ore	67.8	—	1.8	—	$\sim 5$
Coke	—	87.4	12.1	—	$8\sim 22$
MV coal	—	77.7	12.3	22.0	$8\sim 22$
HV* coal	—	76.1	10.7	25.4	$8\sim 22$
HV coal	—	73.3	10.4	31.7	$8\sim 22$

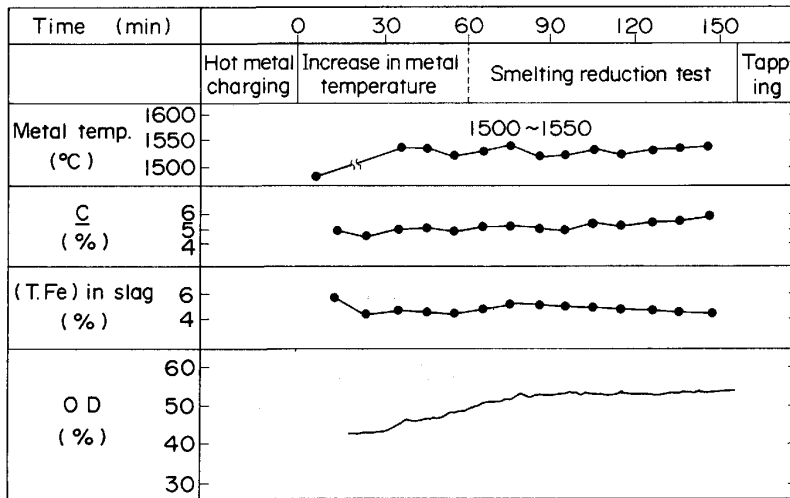


Fig. 2. Operational procedure of the smelting reduction furnace.

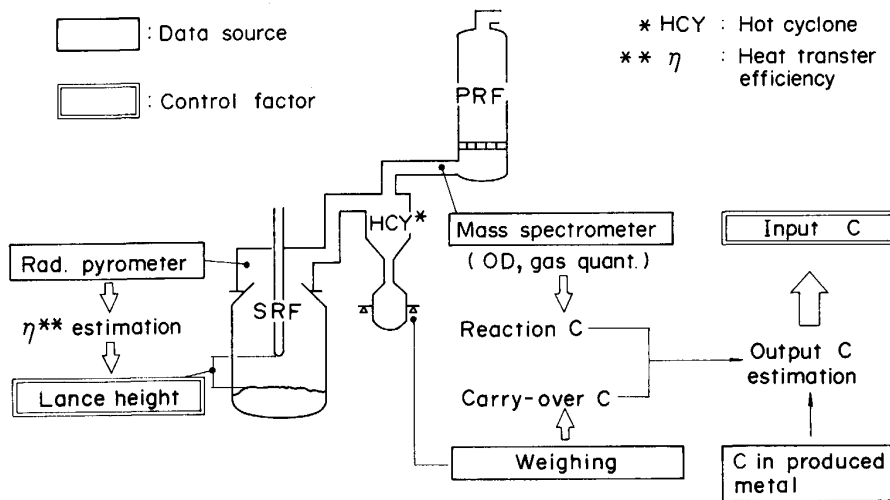


Fig. 3. Control concept of the smelting reduction furnace.

### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 高二次燃焼率下でのSRFの操業

##### 3.1.1 操業の安定

Fig. 2 に操業中の主要データの推移を示す。図中、OD (Oxidation Degree of offgas) は SRF 炉内二次燃焼率の指標であり、排ガス組成から(1)式を用いて求めた値である。

$$OD(\%) = \frac{CO_2 + H_2O}{CO + CO_2 + H_2 + H_2O} \times 100 \dots (1)$$

SRF の安定操業のためには装入鉄鉱石量と炭材装入量のバランスが重要である。SRF 排ガス成分と発生量から反応炭素量を推定するとともにホットサイクロンで集塵されたダスト成分と量から SRF からの炭材飛散量を推定して装入炭材量の制御をおこなっている。これにより鉄浴中 C を飽和に維持し、浴の強撹拌との組合せ

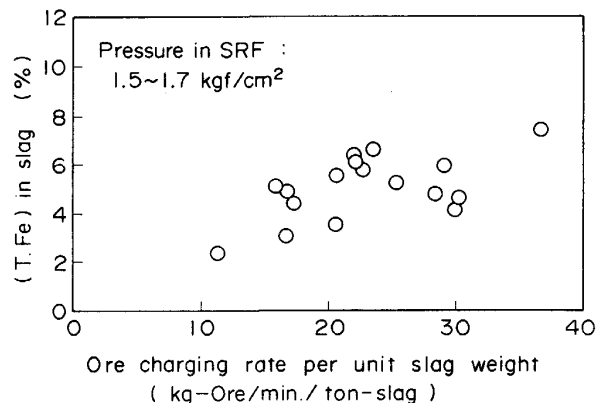


Fig. 4. Change in (%T.Fe) in slag during smelting reduction.

でスラグ中 (T.Fe) レベルの適正化をはかり、スラグの異常フォーミング現象の発生を抑制している。

Fig. 3 に SRF の制御の考えかたを, Fig. 4 に溶融還元中のスラグの (T. Fe) レベルを示す. 全系の密閉化により操業の制御は容易になり異常フォーミング現象の発生は皆無となった. Table 3 に得られた溶銑組成を示す. Si はトレース (tr.) であるほかは, ほぼ高炉溶銑と同組成である.

3.1.2 石炭および鉄鉱石の飛散

SRF からの飛散ダストは, 主として鉄鉱石とチャーである. 鉄鉱石は 0.5 mm 径以下でありチャーは 0.5~3 mm 径のものが主体である. Fig. 5 には, 生鉱石 (粒径 8 mm 以下) と PRF 経由の予熱・予備還元鉄石 (粒

Table 3. Typical compositions of hot metal obtained by smelting reduction.

	C	Si	Mn	P	S
wt%	5.0	tr.	0.2	0.2	0.02

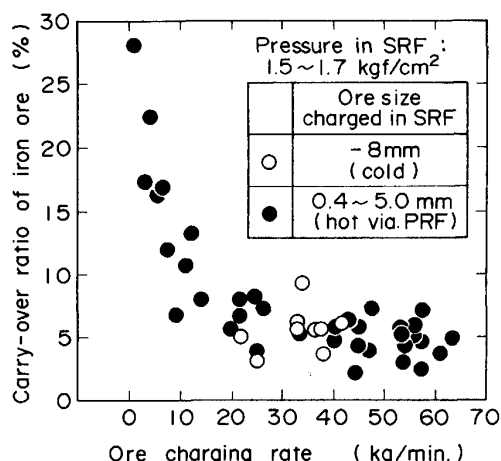


Fig. 5. Effect of ore charging rate on carry-over ratio of iron ore.

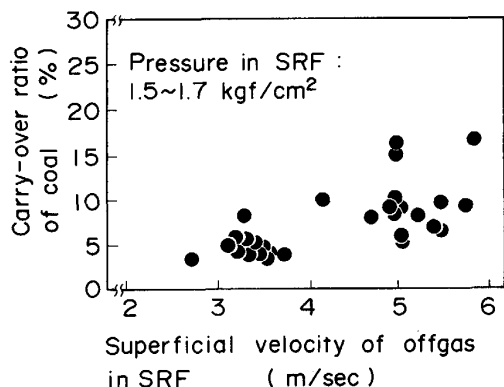


Fig. 6. Effect of gas velocity at the mouth of the smelting reduction furnace on carry-over ratio of coal.

径 0.4~5 mm) を装入した場合の鉄鉱石の飛散率を装入速度に対してプロットしている. 鉄鉱石は 20 kg/min 以上の装入速度では約 5% 程度に収束する傾向が見られる.

チャーの飛散は溶融還元炉の操業の安定のみならず後述するように炉内における二次燃焼率の低下の要因となる. Fig. 6 はダスト中チャーの量から推定した石炭の飛散率を SRF 炉口のガス空塔速度に対してプロットしたものである. 石炭の飛散率は排ガスの炉口空塔速度に依存し, SRF を加圧して空塔速度を低下させると飛散率は低下する. このチャーにはメタルが内包しているものが多く認められる. 鉄浴中にモリブデンをトレーサーとして添加したところ, この内包メタルは鉄浴組成であった.

このことからいったんスラグ中に装入された石炭がチャー化, 小径化して何らかの原因で炉内からの発生ガス流れにのり飛散するものと考えられる. チャー粒子がスラグ浴から飛び出してガス流にのる原因としてはスラグ表面におけるガス気泡の破裂にともなうチャーの飛散が考えられる.

3.2 SRF 炉内の二次燃焼

上底吹き転炉において送酸ランス位置を高くすることで OD を向上させる試みが行われており<sup>8)9)</sup>, 40% 以下の OD では高着熱効率が得られてはいるが, 50% 以上の OD では着熱効率は低下している. SRF の着熱効率を向上させ低石炭原単位を得るためには高着熱効率を維持しつつ OD を向上させる必要がある. 着熱効率を向上させることは石炭原単位の低減のみならず SRF 耐火物の保護の上からも重要である.

3.2.1 着熱効率

二次燃焼の結果生じる高温ガスからスラグ/メタル界面に効率よく熱移動させるためには, スラグを伝熱媒体として作用させることが重要と考えられる<sup>10)11)</sup>.

そこで, スラグ内で二次燃焼させるためランス高さに着熱効率との関係を調査した. Fig. 7 には着熱効率の送酸ランス先端とスラグレベル間相対位置依存性を示す. ここで着熱効率  $\eta$  は (2) 式で定義される.

$$\eta (\%) = \left( 1 - \frac{H_{gas,A} - H_{gas,B}}{H_{total}} \right) \times 100 \dots \dots (2)$$

$H_{total}$ : 全発熱量

$H_{gas,A}$ : スラグ表面から離脱する SRF 排ガスの顕熱

$H_{gas,B}$ : 浴温度相当の SRF 排ガス顕熱

Fig. 7 はランスを下降してスラグ表面に近づける (図中, Lance position index が小さくなる) ほどスラグ内で二次燃焼させ (液中燃焼<sup>12)</sup>), 高着熱効率を得られる

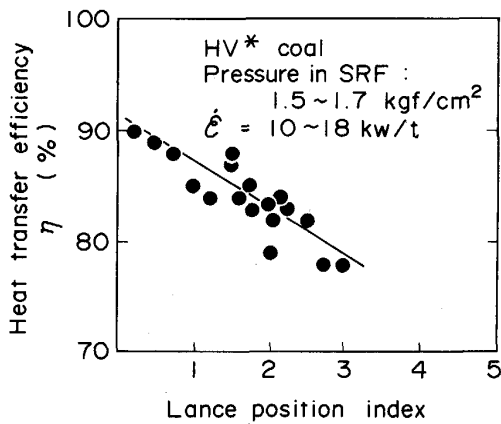


Fig. 7. Influence of lance position on heat transfer efficiency,  $\eta$ .

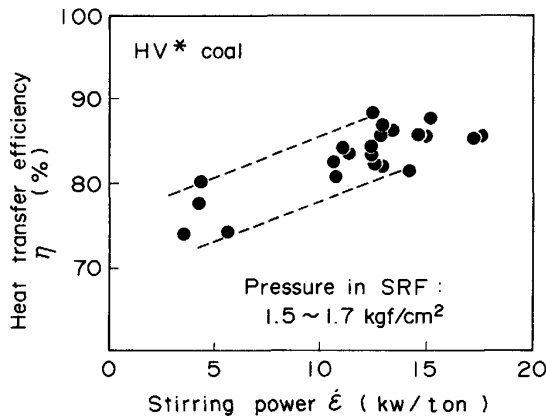


Fig. 8. Influence of stirring power,  $\dot{\epsilon}$ , on heat transfer efficiency,  $\eta$ .

ことを示している。しかし、あまりランスを下げて二次燃焼ジェットがスラグ/メタル界面に近づくると二次燃焼率が低下し、逆にランスを上昇させスラグ表面の上方から送酸すると二次燃焼ジェット/スラグ間の界面積が減少し着熱効率は低下する。

一方、スラグ/メタル間の伝熱は底吹き攪拌ガスにも影響される。Fig. 8 に浴の攪拌動力  $\dot{\epsilon}$  と着熱効率  $\eta$  との関係を示す。これらのデータにもとづき、85% 以上の着熱効率を得るためには、強攪拌域 ( $\dot{\epsilon} > 10 \text{ kW/t}$ ) での操業を基本条件としている。

### 3.2.2 二次燃焼率

高着熱効率の得られるランス/スラグ間距離および浴攪拌条件を拘束条件として、OD を向上するためには①送酸ランスノズル構造の適正化、②炭材飛散率の低減をはじめとする SRF の加圧下での操業が重要である。

まずランスはスラグ/メタル界面近傍の粒鉄あるいは鉄浴と  $\text{O}_2$  の反応を抑制するため、ソフトブローができ

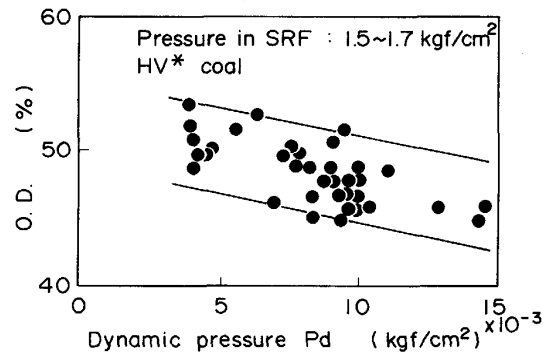


Fig. 9. Effect of dynamic pressure,  $P_d$ , of oxygen jet at bath surface on OD in the smelting reduction furnace.

る構造であることと炉内で発生する CO ガスと十分に混合すべく多数の酸素ジェットを炉の径および高さ方向に構成する構造であることが重要である。Fig. 9 に鉄浴表面における酸素ジェットの動圧  $P_d$  と OD との関係を示すが、低動圧化により高二次燃焼率が得られている。 $P_d$  はランス高さの関数でもあることを考慮すると、スラグ/メタル界面からランスを遠ざけても前述の液中燃焼の条件が満たされるようにするために、スラグのフォーミングレベルを安定して高く維持することが高二次燃焼率、高着熱効率の同時達成のために重要である。熱効率が向上すると鉄鉱石の添加速度も向上し、スラグレベルが高く維持されるためますます熱効率が高位に安定することになる。

所定の溶融還元反応を進行させるためには必要な固定炭素量を炉内に確保する必要がある、SRF から飛散した固定炭素相当分は石炭の形で補充せねばならない。このために SRF からの飛散ロスが多いと炉内に持ち込まれる石炭の揮発分 (VM) が相対的に増えることになる。装入された石炭はスラグにより浴温度近傍まで急速に上昇し、この過程で VM が自由炭素、水素などに分解した形で発生する。このようにして発生した VM は二次燃焼フレーム ( $\text{CO}_2$ ) に混合されると CO に還元されるため、炉内に投入される VM 量が多いと OD を低下させることとなる。Fig. 10 に各種炭材を使用した場合に得られる二次燃焼率の SRF 炉内圧による変化を示す。加圧操業により OD が向上している。これは加圧により、炭材の飛散ロスの低減のみならず酸素ジェットの低動圧化やスラグ内のガス流れの均一化などが寄与しているためと考えられる。

以上のべた OD、着熱効率の向上因子の組合せにより、Fig. 11 に示すように揮発分の高い石炭を使用した場合でも高二次燃焼率、高着熱効率が同時に達成されている。

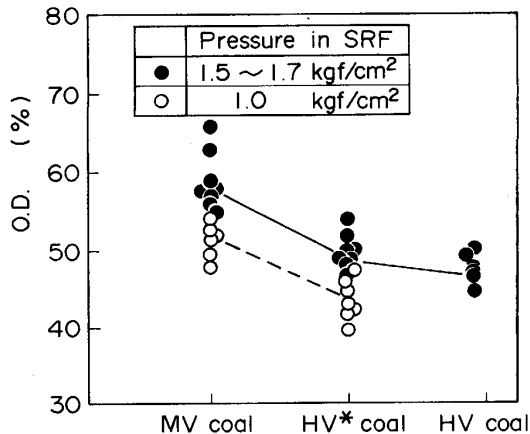


Fig. 10. Influence of volatile matter in coal and atmospheric pressure on OD in the smelting reduction furnace.

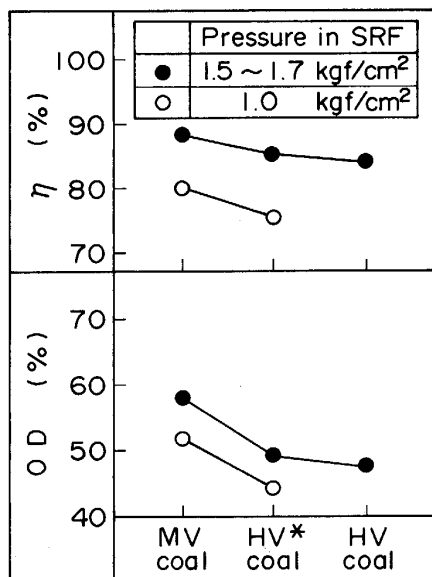


Fig. 11. Attained levels of post-combustion degree, OD, and heat transfer efficiency,  $\eta$ .

また着熱効率が高いため50%以上の高二次燃焼率での操業においてもSRF炉体耐火物の異常溶損も発生していない。

#### 4. 結 言

5 t 規模の転炉型溶融還元炉加圧操業試験から熱効率向上に関し、以下の知見がえられた。

(1) 炉内での二次燃焼率、着熱効率を向上させる加圧、浴攪拌、送酸方法の影響を明らかにした。

(2) その結果、高揮発分炭使用下でも高二次燃焼率、高着熱効率を同時に達成することができた。

(3) SRF を密閉加圧することで SRF の高精度な制御と安定操業が可能となり、高度の熱補償、高生産速度(2.5 t/h)での安定操業が可能であった。

#### 文 献

- 1) たとえば岡村祥三, 中島英雅, 丸川雄浄, 姉崎正治, 戸崎泰之, 森 明義, 加藤木健, 市原 清: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1787
- 2) L. BOGDANDY, K. SCHÄFER, K. BROZMANN and H. G. GECK: Stahl Eisen, 104 (1984) Nr. 22, s. 1143
- 3) J. A. INNES, J. P. MOODIE, I. D. WEBB and K. BROZMANN: Proc. 7th Process Technology Conf, ISS/AIME, 7 (1988), p. 225
- 4) D. JANKE and R. STEFFEN: Stahl Eisen, 108 (1988) Nr. 23, s. 1130
- 5) J. O. EDSTROM: Japan-Sweden Seminar, Tokyo, April (1985), p. 23
- 6) 中村英夫, 高橋謙治, 河井良彦, 杉山峻一, 阿部正広, 尾関昭矢: 鉄と鋼, 72 (1986), S182
- 7) 西岡信一, 高橋謙治, 中村英夫, 河井良彦, 杉山峻一: 鉄と鋼, 72 (1986), S1030
- 8) 奥田治志, 武 英雄, 山田隆康, E. FRITZ: 鉄と鋼, 71 (1985), S186
- 9) 斎藤 力, 中村康久, 石川英毅, 山本里見, 馬場賢一, 京島良幸: 鉄と鋼, 70 (1984), S1030
- 10) S. SUGIYAMA, M. ABE, S. NISHIOKA, H. NAKAMURA, K. TAKAHASHI and K. KAWAI: Trans. Iron. Steel Inst. Jpn., 27 (1987), B-49
- 11) Y. KAWAI, S. NISHIOKA, S. SUGIYAMA, K. TAKAHASHI, T. USUI and A. OZEKI: Proc. 7th Process Technology Conf. ISS/AIME, 7 (1988), p. 83
- 12) D. N. RAO, M. F. MOHTADI and M. A. HASTAOGLU: Canadian J. of Chem. Eng., 62 (1984), p. 319