

## 多量スラグ型溶融還元炉内での伝熱機構

河村 隆文\*・片山 裕之\*<sup>2</sup>・佐藤 健朗\*  
松尾 充高\*・平田 浩\*・遠藤 幸平\*<sup>3</sup>

## Mechanism of Heat Transfer in Smelting Reduction with a Thick Layer of Slag

Takafumi KAWAMURA, Hiroyuki KATAYAMA, Kenrou SATOU,  
Michitaka MATSUO, Hiroshi HIRATA and Kouhei ENDOU

### Synopsis:

High efficiency of heat transfer has been obtained in a smelting reduction furnace which has an essential feature of a thick layer of slag coexisting with carbonaceous materials, when stirring intensity by bottom bubbling is higher than 2 kW/t-metal.

Heat transfer mechanism in this process has been examined both theoretically and experimentally.

(1) Heat transfer by radiation and gas convection was calculated by using a mathematical model and was compared with actual data. This model was constructed by dividing the furnace into three regions depending on the modes of reaction and heat transfer and by taking the mass and heat balances over each region. When the gas temperature is as high as 2170°C, the actual heat transfer can be explained mainly by radiation. But, under practical conditions (gas temperature  $\leq 1765^\circ\text{C}$ ), the contribution of radiation and gas convection to heat transfer is only 20-30%.

(2) In order to explain the heat transfer when the temperature of exhaust gas was relatively low, the heat transfer by circulation of super-heated carbonaceous material was assumed. The assumption coincides with other data on the reducing reaction and on the combustion in the smelting reduction.

**Key words:** smelting reduction process; heat transfer; radiation; convection; circulation of carbonaceous material.

## 1. 緒 言

溶融還元法の一つとして、『多量スラグを利用して上吹き酸素ジェットと攪拌状態のメタル浴を遮断し、高二次燃焼（すなわち、酸化性雰囲気）とスラグ還元反応を両立させる』という方式の開発が進められている<sup>1)2)</sup>。

その方式においては、炉内の状況は、『多量に存在するスラグと、スラグの異常フォーミングを抑制するための炭材の共存、および酸素ジェットとメタルの遮断という点からきまる比較的小さい底吹き攪拌力の組合せ』という点に特徴がある。この状態で、二次燃焼による発熱をいかに効率的に酸化物還元反応に利用し、結果として排ガス温度をどこまで低くできるかが課題である。すでに、着熱効率として 90% 前後という高い値が得られる

ことが報告されている<sup>1)~4)</sup>。しかし、その伝熱機構については定説がない状態にある。

そこで、本報では、溶融還元炉での伝熱が従来製鋼転炉で言われているように、輻射、対流という機構で説明できるのか、あるいは、共存している多量の炭材が伝熱に関係しているのかに着目して、モデル計算と溶融還元炉試験の両面から検討を行った。

## 2. 溶融還元炉試験

### 2.1 試験方法

溶融還元試験には上底吹き転炉を使用した。設備、操業方法、および二次燃焼率、着熱効率などの特性値の算出方法は別報で報告したものと同一である<sup>2)</sup>。主な試験条件を Table 1, 原料条件を Table 2 に示す。

平成元年 4 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 5 月 28 日受付 (Received May 28, 1991)

\* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)技術開発本部 (Technical Development Bureau, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Experimental conditions.

	5t furnace	10t furnace
Bath surface area : A (m <sup>2</sup> )	1.13	30
Amount of slag : W <sub>s</sub> (t)	0.2~2.5	30~45
Amount of metal : W <sub>m</sub> (t)	3~5	80~120
Top blowing O <sub>2</sub> : F <sub>O<sub>2</sub></sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	700~900	20 000~30 000
Bottom bubbling F <sub>O<sub>2</sub></sub> , F <sub>CO<sub>2</sub></sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	O <sub>2</sub> : 25~300 CO <sub>2</sub> : 1 800	
Amount of coke in slag : W <sub>c</sub> (t)	0.05~0.4	18~47
Lance nozzle type	8.9 mmφ×7	52 mmφ(Center) +70 mmφ×6

Table 2. Chemical composition of raw materials.

a) Ore (%)				
T. Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
66.8	3.00	0.51	0.05	0.01
b) Carbonaceous materials (%)				
	VM	Ash	FC	S
HVM coal	36.5	8.3	55.2	0.50
MVM coal	21.7	6.9	70.1	0.52
Coke	0.6	12.1	84.9	0.36

スラグ量は、いずれの場合にも 350~450 kg/t-メタルと多くして、上吹き酸素ジェットとメタル浴の接触を抑制している点に特色がある。なお、スラグフォーミング抑制のために炭材量はスラグ重量の 10% 以上共存させている。

特性値は次のとおりである。

二次燃焼率：

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

着熱効率：

$$\eta_{pc} = \left[ 1 - \frac{\text{排ガススーパーヒート}}{\text{二次燃焼発生熱量}} \right] \times 100(\%) \dots\dots\dots(2)$$

2.2 試験結果

Fig. 1 に、二次燃焼率と着熱効率におよぼす底吹き攪拌強さの影響を示す。底吹き攪拌強さが 2 kW/t-メタル未満では着熱効率が低い、2 kW/t 以上では着熱効率として 90% 前後の値が得られている。

Fig. 2 は二次燃焼率、着熱効率の関係におよぼす炭材の VM 含有量の影響を示す。炭材の VM 含有量によってきまるある二次燃焼率までは高い着熱効率が得られるが、それ以上では二次燃焼率が高いほど着熱効率が低下している。

石炭原単位を下げて必要熱量を供給するには、『高二次燃焼率、高着熱効率の両立』が重要である。そのためには、Fig. 2 において着熱効率を高く保ちながら二

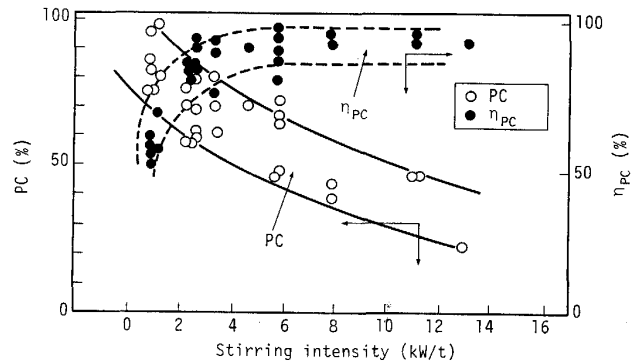


Fig. 1. Effect of stirring intensity on post-combustion ratio and heat efficiency (5 t scale).

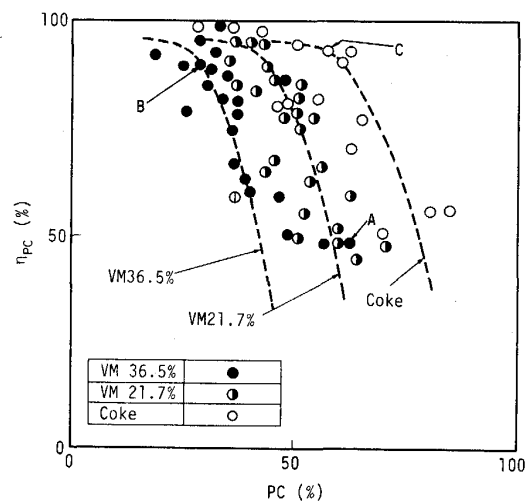


Fig. 2. Influence of volatile matter in carbonaceous material on the relation between PC and η<sub>pc</sub>.

次燃焼率がどこまで高められるかを明らかにする必要がある。

さきに、松尾らは、『固定炭素必要量』の概念を導入して二次燃焼率、着熱効率、石炭原単位を統一的に説明した<sup>4)</sup>。そこでは、Fig. 3 に示すように、二つの線の交点によって、安定操業点が決まる、例えば P 点で操業しようとする、供給される固定炭素分が消費する固定炭素量よりも少ないので炉内の固定炭素量の減少が起こり、ついにはスラグフォーミングを起こす。すなわち安定操業できない。二次燃焼率が低下して Q 点に移行するか、着熱効率の低い R 点でしか安定操業できないという考え方である。そこでは、伝熱機構の問題は考慮されていない。

そこで、本報では、二次燃焼と着熱効率の関係を伝熱機構の面から検討し、上記の『固定炭素必要量』の考え方との整合性を調べた。

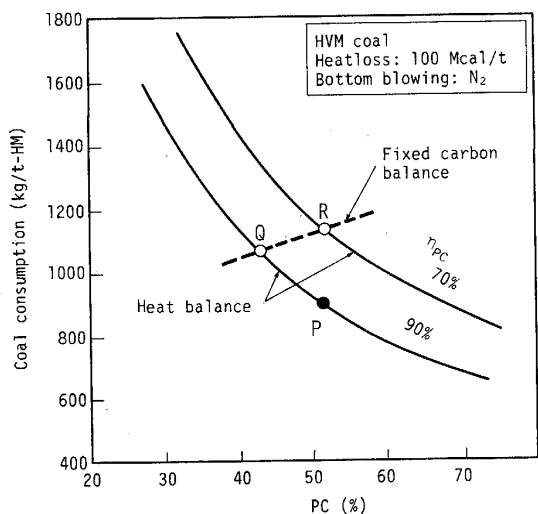


Fig. 3. Relation between coal consumption and PC with regard for necessary amount of fixed carbon (Combustion of fixed carbon by oxygen jet ( $J$ ) = 0.25 kg-C/Nm<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>).

### 3. 伝熱モデルによる計算

#### 3.1 伝熱モデル

すでに転炉，溶融還元炉での伝熱については，いくつかのモデルが提案されている<sup>5)~10)</sup>が，とくに溶融還元炉内の複雑な着熱現象を説明するには十分とは思えない。そこで，本報では，Fig. 4 に示すように，炉内を次の三つの領域に分けて，伝熱モデルの構築を図る。

- (a)酸素ジェットによるガスの燃焼領域
- (b)燃焼ガスとスラグ界面の反応領域
- (c)浴上部排ガス空間の領域

(以下，おのおの(a)『フレーム領域』，(b)『スラグ界面領域』，(c)『排ガス空間領域』と呼ぶ)

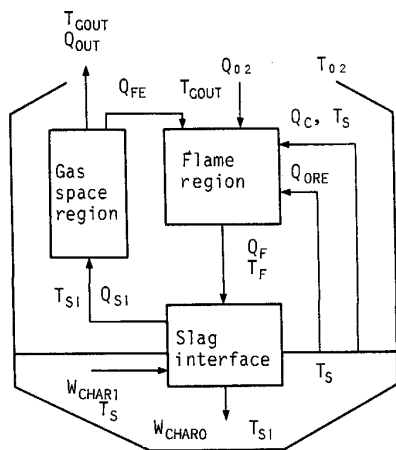


Fig. 4. Model of heat transfer in smelting reduction.

『フレーム領域』では，石炭熱分解生成ガス ( $Q_C$ )，酸化鉄還元により発生する CO ガス ( $Q_{ORE}$ )，および酸素ジェットに巻き込まれる雰囲気ガス ( $Q_{FE}$ ) が，酸素ジェット ( $Q_{O_2}$ ) により燃焼して，燃焼排ガス ( $Q_F$ ) となる。石炭熱分解生成ガスや酸化鉄還元により発生する CO ガスは，酸素ジェットへの巻き込み量が炉外への排出ガス量に比べて大きいことを考慮して，全量ジェットへ供給されると仮定した。フレームからの伝熱 ( $q_{F,LOSS}$ ) は，フレーム外表面に設けた仮想黒体面への輻射，およびスラグ浴面へ輻射を考える。

『スラグ界面領域』では，フレームからの燃焼ガスが，炭材と反応して，反応生成ガス ( $Q_{SI}$ ) となる。この領域での伝熱機構としては，反応面に供給された炭材が，フレーム中未反応酸素による燃焼および高温フレームによる対流伝熱で昇熱されるとし，その移動によるスラグ浴への伝熱およびフレームからの対流伝熱 ( $q_{SI,LOSS}$ ) を考える。『排ガス空間領域』では，反応生成ガス ( $Q_{SI}$ ) が，一部 ( $Q_{FE}$ ) 酸素ジェットに巻き込まれ，残りが排ガス ( $Q_{OUT}$ ) となって炉外に排出される。この領域における伝熱 ( $q_{G,LOSS}$ ) は，ガス空間からのスラグ浴面(反射面を仮定した炉壁の影響を含む) への輻射，およびフレーム外表面の仮想黒体面への輻射を考える。

Fig. 5 に各領域間の輻射伝熱の授受関係を示す。

各領域の物質収支および熱収支の式を(3)~(18)に示す。物質収支は，C, H, O の元素バランスを考え，各領域の高温ガスは，C, H, O からなるガス (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, H, O, OH) の平衡状態にあると仮定している。

『フレーム領域』

C, H, O 元素バランス (おのおの(3)~(5)式) :

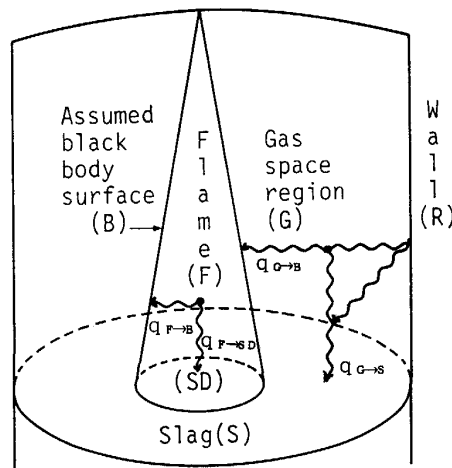


Fig. 5. Model of radiation heat transfer.

$$Q_C(\Sigma C_{C,i}X_{C,i})/2240 + Q_{ORE}/22.4 \\ + Q_{FE}(\Sigma C_{FE,i}X_{FE,i})/2240 \\ = Q_F(\Sigma C_{F,i}X_{F,i})/2240 \dots\dots\dots(3)$$

$$Q_C(\Sigma H_{C,i}X_{C,i})/2240 + Q_{FE}(\Sigma H_{FE,i}X_{FE,i})/2240 \\ = Q_F(\Sigma H_{F,i}X_{F,i})/2240 \dots\dots\dots(4)$$

$$Q_C(\Sigma O_{C,i}X_{C,i})/2240 + Q_{ORE}/22.4 + 2Q_{O_2}/22.4 \\ + Q_{FE}(\Sigma O_{FE,i}X_{FE,i})/2240 \\ = Q_F(\Sigma O_{F,i}X_{F,i})/2240 \\ \dots\dots\dots(5)$$

熱収支:

熱収支は 25°C 基準で考える。ガス成分のエンタルピーは温度の関数として与える。石炭熱分解ガスおよび鉱石還元によるガスは、スラグ温度に等しいと仮定する。

$$Q_C(\Sigma X_{C,i}H_i(T_S))/2240 + Q_{ORE}H_{CO}(T_S)/22.4 \\ + Q_{O_2}H_{O_2}(T_{O_2})/22.4 + Q_{FE}(\Sigma X_{FE,i}H_i(T_{GOUT}))/ \\ 2240 + Q_C(\Sigma X_{C,i}\Delta H_i)/2240 + Q_{ORE}\Delta H_{CO}/22.4 \\ + Q_{FE}(\Sigma X_{FE,i}\Delta H_i)/2240 \\ = Q_F(\Sigma X_{F,i}H_i(T_F))/2240 + Q_F(\Sigma X_{F,i}\Delta H_i)/ \\ 2240 + q_{F,LOSS} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、フレームからの輻射による熱損失  $q_{F,LOSS}$  は次式で与えられる。

$$q_{F,LOSS} = A_B\Phi_{BF}(E_F - E_B) + A_{SD}\Phi_{SDF}(E_F - E_S) \\ \dots\dots\dots(7)$$

右辺の第一項は、フレームからフレーム外表面に設けた仮想黒体面への輻射伝熱、第二項はフレームからスラグ浴面への輻射伝熱である。

『スラグ界面領域』

C, H, O 元素バランス (おのおの(8)~(10)式):

$$Q_F(\Sigma C_{F,i}X_{F,i})/2240 + H_R/12 \\ = Q_{SI}(\Sigma C_{SI,i}X_{SI,i})/2240 \dots\dots\dots(8)$$

$$Q_F(\Sigma H_{F,i}X_{F,i})/2240 = Q_{SI}(\Sigma H_{SI,i}X_{SI,i})/2240 \\ \dots\dots\dots(9)$$

$$Q_F(\Sigma O_{F,i}X_{F,i})/2240 = Q_{SI}(\Sigma O_{SI,i}X_{SI,i})/2240 \\ \dots\dots\dots(10)$$

熱収支:

昇温・循環される炭材の温度は、反応生成ガス温度 ( $T_{SI}$ ) に等しいと仮定する。

$$Q_F(\Sigma X_{F,i}H_i(T_F))/2240 + Q_F(\Sigma X_{F,i}\Delta H_i)/2240 \\ + W_{CHARI}C_{PC}(T_S - 25) \\ = Q_{SI}(\Sigma X_{SI,i}H_i(T_{SI}))/2240 + Q_{SI}(\Sigma X_{SI,i}\Delta H_i)/ \\ 2240 + W_{CHARO}C_{PC}(T_{SI} - 25) + q_{SI,LOSS} \dots\dots(11)$$

ここで、フレーム対流による熱損失  $q_{SI,LOSS}$  および炭材循環量と反応界面での炭材反応量の関係は、(12)、(13)式でそれぞれ与えられる。

$$q_{SI,LOSS} = H_f A_{SD}(T_F - T_S) \dots\dots\dots(12)$$

$$W_{CHARI} - W_{CHARO} = H_R \dots\dots\dots(13)$$

『排ガス空間領域』

C, H, O 元素バランス (おのおの(14)~(16)式):

$$Q_{SI}(\Sigma C_{SI,i}X_{SI,i})/2240 \\ = (Q_{FE} + Q_{OUT})(\Sigma C_{FE,i}X_{FE,i})/2240 \dots\dots(14)$$

$$Q_{SI}(\Sigma H_{SI,i}X_{SI,i})/2240 \\ = (Q_{FE} + Q_{OUT})(\Sigma H_{FE,i}X_{FE,i})/2240 \dots\dots(15)$$

$$Q_{SI}(\Sigma O_{SI,i}X_{SI,i})/2240 \\ = (Q_{FE} + Q_{OUT})(\Sigma O_{FE,i}X_{FE,i})/2240 \dots\dots(16)$$

熱収支:

$$Q_{SI}(\Sigma X_{SI,i}H_i(T_{SI}))/2240 + Q_{SI}(\Sigma X_{SI,i}\Delta H_i)/2240 \\ = (Q_{FE} + Q_{OUT})(\Sigma X_{FE,i}H_i(T_{GOUT}))/2240 \\ + (Q_{FE} + Q_{OUT})(\Sigma X_{FE,i}\Delta H_i)/2240 + q_{G,LOSS} \\ \dots\dots\dots(17)$$

ここで、排ガス空間における熱損失、 $q_{G,LOSS}$  は、次式で表現できる。右辺の第一項は、ガス空間からのスラグ浴面 (炉壁の影響を含む) への輻射伝熱、第二項はガス空間からフレーム外表面の仮想黒体面への輻射伝熱である。

$$q_{G,LOSS} = A_S\Phi_{SG}(E_G - E_S) + A_B\Phi_{BG}(E_G - E_B) \\ \dots\dots\dots(18)$$

伝熱モデルの主なパラメーターとしては、ジェット供給  $O_2$  量に対する巻込みガス量倍率 ( $m_E$ )、ジェット供給  $O_2$  量のうち、未反応のままスラグ浴面に到達する割合 ( $\gamma_{O_2}$ )、ガス輻射率 ( $\epsilon_F$ ,  $\epsilon_G$ )、および伝熱に寄与するスラグ内炭材循環量 ( $W_{CHARI}$ ) である。

各領域の高温ガスの平衡計算は、ERICKSON ら<sup>11)</sup>の方法を参考にした。

熔融還元炉上部ガス空間における輻射伝熱計算については、Appendix に記述する<sup>12)~14)</sup>。

### 3.2 解法

3.1 節の物質および熱収支の各式を用いて、未知数  $Q_F$ ,  $Q_{OUT}$ ,  $Q_{SI}$ ,  $X_{FE,i}$ ,  $X_{F,i}$ ,  $X_{SI,i}$ ,  $T_F$ ,  $T_{GOUT}$ ,  $T_{SI}$  に関する非線形連立方程式を Newton-Raphson 法による数値計算で解く。未知数  $Q_{FE}$  は、ジェットへの巻込みガス量倍率 ( $m_E$ ) を与えることで求まる。ガスエンタルピーの温度依存性を考慮すると、熱収支式は、温度  $T_F$ ,  $T_{GOUT}$ ,  $T_{SI}$  に関する  $n$  次方程式となる。

各領域の未知数は、ガス流量、八つのガス成分組成、温度の 10 個であり、解くべき独立な式は、C, H, O 収支式、五つの平衡反応式、熱収支式およびガス成分濃度の総和 = 100% を規定する式の計 10 個となる。

数値計算では、まず、想定平衡温度を与えて、領域の C, H, O 元素濃度 (平衡ガス 1 kg に占める元素の kmol 数) を物質収支式および五つの平衡反応式から求

め、領域の八つのガス成分の平衡組成およびガス流量を計算する。平衡温度が熱収支式で求められる温度に収束するまで繰り返し平衡計算を行うことで解く。

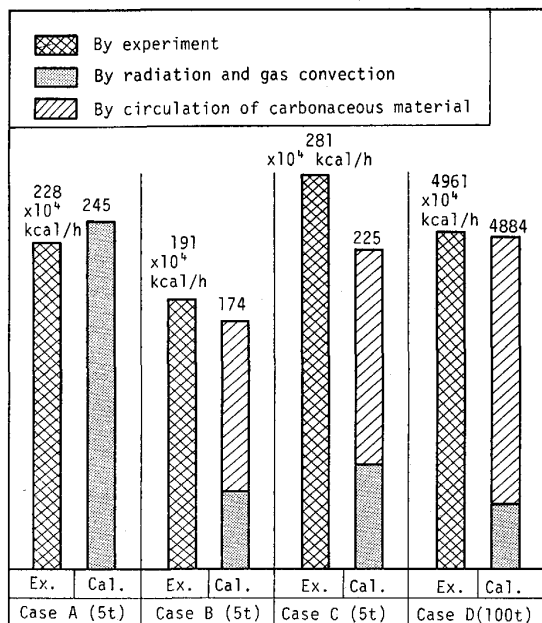
### 3.3 計算結果

作成した伝熱モデル式を用いて、輻射・対流による伝熱量を計算した。スラグ浴面への輻射・対流による伝熱量は、(7)式の第二項、(12)式、(18)式の第一項から求まる。対象としたのは、Fig. 2 の A~C の 3 点 (それぞれ Case A~C)、および 100 t 溶融還元試験炉のデータ (Case D) である。

計算の条件および結果を Table 3 に、スラグ浴への伝熱量を Fig. 6 に示す。用いた主要なパラメータのうち、酸素ジェットへの巻込みガス量倍率 ( $m_E$ ) は、

Table 3. Conditions for calculation.

	Case A	Case B	Case C	Case D
Scale (t)	5	5	5	100
Coal	HVM	HVM	Coke	HVM
Model parameters				
*Ratio of entrained gas into O <sub>2</sub> jet, $m_E$	8	8	8	8
*Ratio of unreacted O <sub>2</sub> within O <sub>2</sub> jet, $\gamma_{O_2}$	0.3	0.3	0.3	0.3
*Emissivities of flame, $\epsilon_F$ , and gas, $\epsilon_G$	0.5	0.5	0.5	0.5
*Circulating rate of carbonaceous materials contributing to heat transfer (t/h)	0	10	10	240
Post combustion ratio (%)	60.0	30.4	55.0	38.3
Temperature of exhausted gas (°C)	2171	1707	1765	1755



Ex. : Experimentally obtained heat transfer amounts to a slag layer

Cal. : Calculated results

Fig. 6. Comparison of calculated heat transfer amounts with experimental ones under the conditions indicated in Table 3.

自由噴流の巻込みガス割合から、ガス輻射率 ( $\epsilon_F, \epsilon_G$ ) については、輝炎輻射を想定して、妥当な値を与えた。未反応酸素割合 ( $\gamma_{O_2}$ ) は、平居ら<sup>5)</sup>の実験結果を参考にした。

①5 t 規模試験で高 VM 炭を使用し、2 次燃焼率が高く、着熱効率が低い場合 (Fig. 2 の点 A, Case A)

実際に起こった伝熱量のほとんどすべてを、ガス輻射で説明することが可能である。ただし、排ガス温度としては熱バランスから計算された 2171°C を用いている。このような高温は耐火物への負荷が大きすぎ、また、着熱効率が低すぎるので実用的ではない。

②5 t 規模試験で高 VM 炭を使用し、着熱効率が高い場合 (Fig. 2 の点 B, Case B)

この場合、排ガス温度は 1707°C (着熱効率; 93%) としているが、輻射・ガス対流によって説明できるのは、全伝熱量の約 30% にすぎない。

③5 t 規模試験でコークスを使用し、着熱効率が高い場合 (Fig. 2 の点 C, Case C)

排ガス温度は 1765°C (着熱効率; 93%) であるが、②の場合と同様、輻射・ガス対流で説明できるのは実際の伝熱量の 30% 程度である。

④100 t 炉で高 VM 炭を使用し、着熱効率が低い場合 排ガス温度は 1755°C (着熱効率; 91%) であるが、輻射・ガス対流で説明できるのは実際の伝熱量の約 20% である。

以上のように着熱効率が低く、排ガス温度が耐火物から許容できないほど高い場合以外は、輻射・ガス対流で説明できる伝熱量は 20~30% で、伝熱の大半はその他の機構で起こったと考えざるを得ない。

その機構として、炭材循環による伝熱を考える。炭材循環による伝熱量は、炭材の循環量とスーパーヒートの積によってきまるが、上記の②~④のケースについて、

- a) 炭材温度は、スラグ界面での排ガス温度と等しい
- b) 炭材循環量は、5 t 炉では 10 t/h, 100 t 炉では 240 t/h

と仮定すると、Fig. 6 に示したように、実験で得られたスラグ浴への伝熱量をほぼ説明できる。

## 4. 考 察

### (1) 伝熱モデル式のチェック

本報の伝熱モデルで計算したところ、溶融還元炉で着熱効率が低い条件では、輻射・ガス対流で説明できるのは、実際の伝熱量の 20~30% にすぎなかった。そこで、まず、伝熱モデル式の妥当性をチェックするために、すでに大半の伝熱が輻射によって起こっていることが知ら

Table 4. Calculated conditions and results for 10t slagless decarbonization furnace.

Scale (t)	10	
Model parameters		
*Ratio of entrained gas into O <sub>2</sub> jet, $m_E$	8	
*Ratio of unreacted O <sub>2</sub> within O <sub>2</sub> jet, $\gamma_{O_2}$	0.3	
*Emissivities of flame, $\epsilon_F$ , and gas, $\epsilon_G$	0.5	
Post combustion ratio (%)	16.5	32.8
Temperature of exhausted gas (°C)	1700	2000
Experimental heat transfer amounts (10 <sup>4</sup> kcal/h)	113	153
Calculated total heat transfer amounts by radiation and convection (10 <sup>4</sup> kcal/h)	101	153
*By flame convection	7	7
*By flame radiation	34	39
*By gas space radiation	60	107

れているスラグレス脱炭の条件<sup>15)</sup>に適用して計算を行ってみた。

計算は二つの2次燃焼率レベル(16.5%, 32.8%)について行った。計算の条件, 結果を Table 4 に示す。いずれの場合にも, ガス空間からの輻射が60~70%, フレームからの輻射が25~35%, フレーム対流伝熱が約5%という内訳である。これは, 西村らが報告している, 熱解析結果とほぼ一致している。

本モデル作成時にも, 輻射伝熱量を過小に計算するおそれがないように, 例えばフレーム側面を黒体面と仮定などの配慮をしているが, このチェックの結果から見ても, 輻射およびガス対流による伝熱量を過小に計算しすぎるといような問題は含まれていないと言える。

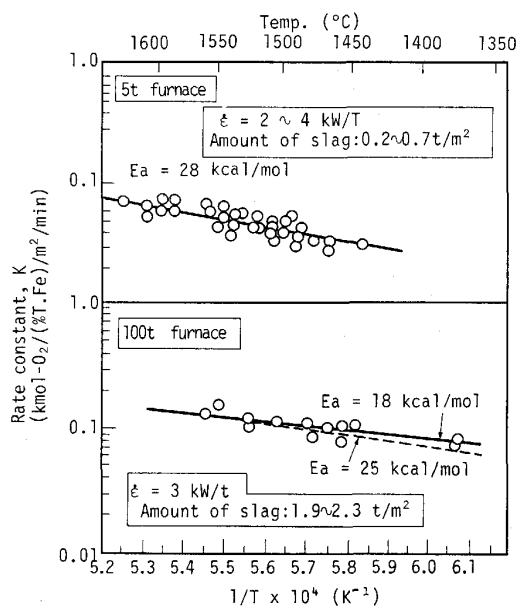
## (2) 炭材循環による伝熱量

着熱効率が低い場合, 炭材循環により伝熱量(炭材スーパーヒートと循環量の積で近似される)で実際の伝熱量の70%程度を説明できるかどうかを, 炭材のスーパーヒート, 循環量のおおのについて検討してみる。

熔融還元においては, 燃焼ガスが持つエネルギーがスラグに伝えられ, 結果的に鉍石の熔融および還元反応のエネルギーとして用いられると, 有効に利用されたことになる。還元反応のサイトは,

- ①スラグと炭材の界面
- ②スラグと粒鉄の界面
- ③スラグとメタル浴との界面

の三つに分けられる。各サイトでおこる還元反応の比率が5t炉では0.18:0.27:0.55, 大型炉ではほぼ1:1:1と推定されている<sup>2)</sup>。上記の②, ③の場合には熱がいったんスラグに伝えられることが必要であるが, ①の場合には, 炭材が加熱され, スラグと接触する界面で還元反応がおこれば, 有効に伝熱されたことになる。



The dotted line: The case where the average temperature of carbonaceous materials is 150°C

Fig. 7. Influence of temperature on rate constant.

Fig. 7 に, 還元反応の見掛けの反応速度定数と温度の関係を示す。温度はメタル浴の測定値を用いたが, スラグ浴についても温度は±10°Cではほぼ一致していることが確認されている。Fig. 7においてその勾配である見掛けの活性化エネルギーが試験炉規模によって大きく異なることが注目される。

その解釈の一つとして, 炭材の温度がスラグ温度より高く, 大型炉では, 炭材-スラグ界面の反応比率が高いので, 全体として, 大型試験の方が炭材スーパーヒートの影響を受けやすいと考えてみる。スラグに巻き込まれる前の炭材温度を排ガス温度に等しく(スーパーヒートとして250~300°C), スラグ内の炭材の平均スーパーヒートを150°Cと仮定して, Fig. 7の関係を修正すると点線のようになる。すなわち, 100t規模試験の見掛けの活性化エネルギーは5t規模のものにほとんど一致することになる。すなわち, 伝熱説明のための炭材スーパーヒートの仮定は, 活性化エネルギーの試験規模依存性をも同時に説明できることになる。

一方, 炭材循環のイメージは, スラグ表面の過熱炭材が攪拌されたスラグ浴に巻き込まれ, スラグ中で炭材の表面に, 酸化鉄還元によって生成したCOガスおよびスラグ内に存在する気泡が付着し, それが浮袋となり炭材が浮き上がり気泡を離すという挙動を繰り返すというものであるが, 熔融還元炉内現象は複雑であり, スラグ中での炭材挙動, スラグ自体の挙動などについては直接の測定データはない。したがって, 炭材循環量について

は十分に定量的な議論ができる状態ではないが、さきに示した 5 t 炉での 10 t/h という値は、例えば、炉内の全炭材 (約 500 kg) の 50% (約 250 kg) がスラグ内に巻き込まれ、サイクルタイムが平均 90 s という組合せに相当する。

スラグ内の 10 mm 以上の気泡の浮上速度は X 線透視法による観察<sup>16)</sup>によれば、9 cm/s 程度である。炭材 (かさ比重 0.7 とする) に気泡が炭材と同じ体積だけ付着し、5 t 炉のスラグ厚み 1 m を上昇するとすれば、平均比重 1.0<sup>17)</sup> のスラグの底から浮上するに要する時間は、密度補正によって約 16 s となる。この値と上記のサイクルタイム平均 90 s を比較すると、炭材循環量についての仮定は過大ではないと思われる。

### (3) 『固定炭素必要量<sup>4)</sup>』の考え方との整合性

操業条件によって輻射による伝熱と炭材循環による伝熱の比率が変化する。二次燃焼率が限界値以下で炭材循環が十分におこる条件 (例えば、Fig. 6, Case B~D) では、ガス温度が低くても炭材循環によって必要伝熱量が確保され、高着熱効率の操業が可能である。一方、二次燃焼率が限界値以上では、(例えば、Fig. 6, Case A) 松尾らの『固定炭素必要量』の考え方が示しているとおり、炉内の炭材量が減少してゆくの炭材循環による伝熱量が減少する。その結果、ガス温度が上がって輻射伝熱量が増えるが着熱効率が低くなる。このように、二次燃焼と着熱効率の関係についての『固定炭素必要量』の考え方<sup>4)</sup>と本報で提案した伝熱機構は整合している。

高い着熱効率を得るためには、少なくともスラグに炭材を巻き込むための攪拌が必要である (Fig. 1)。その条件下で炭材が十分に存在していれば伝熱量の確保のほかに、スラグの異常フォーミング抑制、酸化鉄還元速度定数を大きくして T. Fe を低下できることなども同時に満足させることができる。

## 5. ま と め

多量スラグ共存型溶融還元炉での伝熱機構をモデルと試験の両面から検討した。

(1) 溶融還元炉試験では攪拌エネルギーが 2 kW/t 以上では着熱効率 90% 前後の値が得られた。しかし、二次燃焼率がある限界値以上では、着熱効率の低下が起こった。

(2) 炉内を三つの領域にわけ、各領域ごとに物質と熱の収支をとる方式で伝熱モデル式をつくり、輻射伝熱を過小に計算しないように境界条件の設定に考慮して、輻射およびフレーム対流による伝熱量を計算した。

(3) ガス温度が約 2 200°C と高い場合のみ、輻射で、

実際起こった伝熱量の大半を説明できた。しかし、この条件では着熱効率が低く実用的ではない。

(4) 着熱効率が高い場合 (ガス温度は 1 700~1 765°C) では、輻射およびフレーム対流で説明される伝熱は 20~30% 程度である。

(5) 残りの伝熱は炭材の循環によって行われていると推定された。スラグに対する炭材の過熱温度を 250~300°C とすると、還元反応の見掛けの活性化エネルギーの試験規模依存性と整合した。

(6) 二次燃焼率が限界値以下で着熱効率が高い場合には、炭材循環によって、ガス温度が低くても必要伝熱量が確保される。一方、二次燃焼率が限界以上では炭材量が減少するため、ガス温度があがって輻射で伝熱量が確保され、結果的に着熱効率が低下する。

すなわち、本報の伝熱機構の考え方と、二次燃焼率、着熱効率についての固定炭素必要量の考え方は整合している。

本報告をまとめるにあたって、鉄鋼基礎共同研究会界面移動現象部会 (部会長東北大学徳田昌則教授) で有益な議論をしていただいたことに感謝します。

## Appedix

溶融還元炉上部ガス空間における輻射伝熱計算

溶融還元炉の上部ガス空間における輻射伝熱計算は、Fig. 5 に示すように、フレーム外表面に仮想黒体面を設けることで、フレーム領域と排ガス空間領域を二つの系に分割して行う。フレーム領域は、円錐形の燃焼フレーム (F)、仮想黒体面 (B)、および受熱面である溶融スラグ面 (SD) からなる。排ガス空間領域は、円筒型の炉構造を考え、炉壁面はすべて反射面 (R) とする。この領域は、ガス空間 (G)、反射面 (R)、仮想黒体面 (B)、および受熱面である溶融スラグ面 (S) からなる。各面の温度は、一定である。以下に二つの領域について、総括熱放射吸収率 ( $\Phi_{ij}$ ) を求めて、熱収支計算に必要な輻射伝熱量の計算式を得ることにする。

フレーム領域 (B-F-SD 系) における総括熱放射吸収率は、次のようになる。

$$\Phi_{BSD} = \epsilon_S(1 - \epsilon_F)A_{SD}/A_B \dots\dots\dots (A1)$$

$$\Phi_{SDF} = \epsilon_S\epsilon_F \dots\dots\dots (A2)$$

$$\Phi_{BF} = \epsilon_F \{1 + (1 - \epsilon_S)(1 - \epsilon_F)A_{SD}/A_B\} \dots\dots (A3)$$

本文(7)式のフレームからの輻射による熱損失、 $q_{F,LOSS}$  は上述の式を用いて計算できる。

排ガス空間領域 (S-G-B-R 系) における総括熱放射吸収率は、次のようになる。

$$\Phi_{SG} = \epsilon_S\epsilon_G(1 + F_{SR}/F_{RR}) \dots\dots\dots (A4)$$

$$\Phi_{BG} = \epsilon_G(1 + F_{BR}/F_{RR}) + \epsilon_G(1 - \epsilon_S)(1 - \epsilon_G)$$

$$(F_{BS} + F_{BR}F_{RS}/F_{RR})(1 + F_{SR}/F_{RR}) \dots\dots\dots (A5)$$

$$\Phi_{BS} = \epsilon_S(1 - \epsilon_G)(F_{BS} + F_{BR}F_{RS}/F_{RR}) \dots\dots\dots (A6)$$

ここで、 $F_{ij}$  は、角関係である。 $\Sigma F_{ij} = 1$ ,  $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$  の関係を用いると、独立に求めるべき角関係は一つ ( $F_{RB}$ ) となり、他のすべての角関係は求まる。独立に求めるべき角関係  $F_{RB}$  は、近似的にフレーム長さの  $L/2$  における半径をもつ内筒と炉半径を持つ外筒からなる二重円筒の形状を想定して、外筒から内筒を見る角関係として求めることにする。排ガス空間における熱損失、 $q_{G,LOSS}$  は、本文(18)式で表され、上述(A4)~(A6)式を用いて、計算できる。

仮想黒体面における熱放射エネルギー量  $E_B$  は、仮想黒体面における熱収支から求める。

$$q_{F \rightarrow B} + q_{SD \rightarrow B} = q_{B \rightarrow G} + q_{B \rightarrow S} \dots \dots \dots (A7)$$

この式の左辺は、フレーム領域から仮想黒体面への輻射伝熱量、右辺は、仮想黒体面からガス空間領域への輻射伝熱量である。(A7)式を整理すると、仮想黒体面における熱放射エネルギー量  $E_B$  が以下のように求まる。

$$E_B = (\Phi_{BF} E_F + \Phi_{BSD} E_S + \Phi_{BG} E_G + \Phi_{BS} E_S) / (\Phi_{BF} + \Phi_{BSD} + \Phi_{BG} + \Phi_{BS}) \dots \dots \dots (A8)$$

## 記 号

$A_i$ :  $i$  面の伝熱面積 ( $m^2$ )

$C_{j,i}$  ( $j = C, FE, F, SI$ ): 石炭熱分解ガス ( $j = C$ ), 酸素ジェットへの巻込み雰囲気ガス ( $j = FE$ ), フレーム燃焼ガス ( $j = F$ ), スラグ界面反応生成ガス ( $j = SI$ ) に含まれる  $i$  成分の C 原子の数

$C_{PC}$ : 炭材平均比熱 (kcal/kg/deg)

$E_i$ :  $i$  面からの黒体熱放射エネルギー量 (kcal/ $m^2$ /h)

$$E_i = 4.88 (T_i/100)^4$$

$H_f$ : フレーム-スラグ間の対流伝熱係数 (kcal/ $m^2$ /h/deg)

$H_i(T)$ : 温度  $T$  における  $i$  ガス成分のエンタルピー (kcal/kgmol)

$\Delta H_i$ : 25°C における  $i$  ガス成分の生成熱 (kcal/kgmol)

$H_{j,i}$  ( $j = C, FE, F, SI$ ):  $C_{j,i}$  と同様、各ガス流の  $i$  成分ガスの H 原子の数

$H_R$ : スラグ中炭材とフレーム燃焼排ガスとの反応量 (C ベース) (kg/h)

$m_E$ : ジェット供給  $O_2$  量に対する巻込みガス量倍率  $m_E = (Q_C + Q_{ORE} + Q_{FE})/Q_{O_2}$

$O_{j,i}$  ( $j = C, FE, SI$ ):  $C_{j,i}$  と同様、各ガス流の  $i$  成分ガスの O 原子の数

$Q_C, Q_{ORE}, Q_{FE}, Q_{O_2}, Q_F, Q_{SI}$ : それぞれ石炭熱分解ガス, 鉄鉱石還元によるガス (CO), 酸素ジェットへの巻込み雰囲気ガス, 酸素ジェット, フレーム燃焼ガス,

スラグ界面反応生成ガスの流量 ( $Nm^3/h$ )

$q_{F,LOSS}, q_{SI,LOSS}, q_{G,LOSS}$ : フレーム, スラグ界面, 排ガス空間の各領域における熱損失 (kcal/h)

$T_i$  ( $i = F, GOUT, O_2, S$ ): おおのフレーム排ガス, ジェット巻込みガス, ジェット  $O_2$  供給, スラグ温度 (°C あるいは K)

$W_{CHARI}, W_{CHARO}$ : 炭材の反応界面への供給および反応界面からの排出循環量 (kg/h)

$X_{C,i}, X_{FE,i}, X_{F,i}, X_{SI,i}$ : それぞれ石炭熱分解ガス, 酸素ジェットへの巻込み雰囲気ガス, フレーム燃焼ガス, スラグ界面反応生成ガスの  $i$  成分濃度 (vol%)

$\Phi_{ij}$ :  $i$  面から  $j$  面への総括熱放射吸収率 (—)

$\epsilon_F, \epsilon_G, \epsilon_S$ : それぞれフレーム, ガス空間ガス, スラグの放射率 (—)

$\gamma_{O_2}$ : ジェット供給  $O_2$  のうち、未反応のままスラグ浴面に到達する割合 (—)  $\gamma_{O_2} = Q_F X_{F,O_2} / 100 / Q_{O_2}$

## 文 献

- 1) 片山裕之, 桑原正年, 平田 浩, 八木治郎, 斎藤 力, 藤田正樹: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1855
- 2) 松尾充高, 斎藤 力, 片山裕之, 平田 浩, 金本通隆, 茨城哲治: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1871
- 3) 茨城哲治, 山内雅夫, 金本通隆, 平田 浩, 松尾充高, 片山裕之: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1076
- 4) 松尾充高, 斎藤 力, 片山裕之, 平田 浩, 小川雄司: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1879
- 5) 平居正純, 辻野良二, 向井達夫, 原田俊哉, 大森正直: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1117
- 6) 加藤嘉英, J. C. GROSJEAN, J. P. REBOUL and P. RIBOUD: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 478
- 7) 馬淵昌樹, 国分春生, 中戸 参, 野崎 努: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 1139
- 8) J. P. MOODIE, M. P. DAVIS and M. CROSS: 7th Process Technology Division Conference, Toronto (1988)
- 9) 杉山峻一, 阿部正弘, 西岡信一, 中村英夫, 高橋謙治, 河井良彦: 鉄と鋼, **72** (1986), S1029
- 10) 篠竹昭彦, 高本 泰, 林 洋一: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1050
- 11) W. D. ERICKSON and R. K. PRABHU: AICHE J., **32** (1986), p. 1079
- 12) 例えば, 矢木 栄, 国井大蔵: 工業窯炉 (1963), p. 7 [共立出版]
- 13) 例えば, 国井大蔵: 熱的単位操作 (上) (1976), p. 61 [丸善]
- 14) H. C. HOTTEL and A. D. SAROFIM: Radiative Transfer (1967), p. 54 [McGraw-Hill Inc.]
- 15) 西村光彦, 小島政道, 桜田盛勝, 石川英毅, 阿部泰久: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 653
- 16) 小川雄司: 私信
- 17) 山内雅夫, 茨城哲治, 金本通隆, 松尾充高, 平田 浩, 大野剛正: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1075