

## 誌 上 討 論

(論文) 「高炉内での SiO ガスを介した Si 移行の数学的モデル」

田口整司・久保秀穂・槌谷暢男  
一藤和夫・岡部俠児

鉄と鋼 68 (1982) 15, pp. 2303~2310

## 【質問】

新日本製鉄(株)第三技術研究所 田村 健二

貴モデルによる推定結果の例によると、羽口直上部にかけて指数関数的に増大したメタル中の Si 濃度が、羽口燃焼帯以下のレベルで急に増大しなくなるようになっていますが、このような Si 濃度分布が得られる原因は、ガス中の SiO 濃度とコークス温度  $T_g$  の分布と関係があると思われまますので、これらの推定法についてお伺いします。

1. 熱流比が比較的大きいシャフト上部でも、固体温度  $T_s$  は約 4 m でガス温度  $T_g$  と一致するようになっていますが、熱流比が低く、FeO の直接還元反応も終了した滴下帯で、 $T_s$  と  $T_g$  が一致しない理由はなぜでしょうか。

2. 滴下帯の気固間伝熱係数  $h_{g,s}$  として、塊状帯の約 1/10 の値を用いておられますが、滴下帯の  $T_s$  と  $T_g$  に及ぼす  $h_{g,s}$  の影響をお教え下さい。貴論文では、 $h_{g,s}$  を大きくすると溶融帯が下方へ下がることと記述しておられますが、モデル上、溶融帯の位置を朝顔部下端まで下げたときの  $h_{g,s}$  の値はおおよそどのくらいでしょうか。また、溶融帯の位置の下限についてはどのようにお考えでしょうか。

3. 溶銑温度の計算値と実測値が一致するように、固液間伝熱係数  $h_{s,m}$  を  $30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  としておられますが、本来  $h_{s,m}$  は、貴論文にも記述されているように約  $3000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  の値をとるべきと思われる。  $h_{s,m}$  をこのように過小評価しなければならない原因は、コークス温度  $T_g$  を高目に推定して、 $T_s$  と融体の温度との差を過大に評価されているためではないかと思いますが、 $T_s$  をもつと低目に推定した場合に生ずる問題点をお教え下さい。

4. メタル中の Si 濃度はほぼ羽口レベルで決まっていると記述されていますが、これはモデル上、羽口レベル以下の領域で、MnO などの直接還元反応(吸熱)を行わせることによつて、 $T_s$  を急低下させ、SiO の発生を抑制しているためと推察されます。しかし実際には、羽口レベル直下のコークス温度  $T_g$  は、燃焼帯で加熱されるため、燃焼帯へ供給される直前の  $T_g$  より、むしろ高くなっている可能性があります。もし、 $T_g$  を羽口レベルで急低下させないようにした場合には、メタル中の Si 濃度の異常上昇を抑制するために、Si 移行のモデル構成をどのように修正すべきとお考えですか。

5. 東大試験高炉で、ほとんど灰分のないピッチコークスを用いた場合でも、銑鉄中の Si 濃度が通常コークス使用時とほぼ同じであつたこと<sup>1)</sup>を考えると、滴下帯でのスラグからの SiO の発生あるいはスラグ・メタルの反応が Si 移行に関して重要な役割を果たしていると考えざるを得ません。貴モデルでは、銑物銑吹製時のスラグからの SiO の発生速度を、製鋼銑の場合の約 15 倍になるように調整されていますが、製鋼銑吹製時のスラグからの SiO の発生反応速度式を、銑物銑の場合と同じ式にした場合には、銑鉄中の Si 濃度の推定値はどのくらいになるでしょうか。

## 文 献

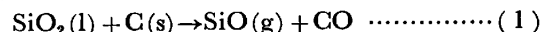
- 1) 鈴木吉哉, 桑野芳一, 中村成子, 館 充, 雀部実: 鉄と鋼, 68 (1982), A121

## 【回答】

川崎製鉄(株)技術研究所 田口整司・槌谷暢男

1. 高炉滴下帯でのガスとコークスの温度変化を求めるとき、融体(溶銑, スラグ)への伝熱も考慮しなければならぬ。融体を含めた凝縮相の熱容量流量と気相のそれとの比(熱流比)は以下にみるようにシャフト部とあまり変わらない。さらに、引用文献 1), 2) の中で述べたように、羽口近傍の高温領域で種々の物質が反応、ガス化するとすれば、凝縮相の熱容量流量はみかけ上より大きな値となる。滴下帯でのガス温度とコークス温度の分布に影響を与える気-固間の伝熱係数  $h_{g,s}$  およびガス化反応熱  $d$  をとり挙げ、一次元微分熱収支式に基づいて温度分布の計算を行つた。結果を Fig. 1 に示す。

Case(a) 高温域で大きな吸熱反応を生じ ( $d \neq 0$ ), 伝熱係数を RANZ ら<sup>2)</sup> の式で与えた場合。



たとえば Si 移行のシミュレーションにおいて(1)式の反応を生ずる領域で、その 10 倍の吸熱反応を生ずるとした場合、ガス温度、コークス温度の分布は Fig. 1 中の  $T(a)$ ,  $t(a)$  のようになる。ここで、羽口レベルの境界条件として  $T$  および  $t$  を与えた。溶融帯下端位置を  $t = 1400^\circ\text{C}$  となる点で定義すれば、羽口からの高さは  $H_M(a)$  である。羽口より上方に向かつてガス温度  $T(a)$  は急激に低下するが、これは伝熱係数が大きく、気相から凝縮相への移行熱量が大きいためである。一方、凝縮相の得た熱量のうち大部分は反応による吸熱量を補充するために費され、 $t(a)$  の温度勾配は  $T(a)$  のそれに比べ小さい。結果として、滴下帯上部では  $T(a)$  と  $t(a)$  の温度差は小さくなり、伝熱速度も小さくなる。

Case(b) 反応熱を考慮せず ( $d=0$ ), 伝熱係数を RANZ らの式で与えた場合。

伝熱係数が大きく、かつ気相と凝縮相との熱流比が 1 に近い場合ガスとコークスとの温度差は縮まらない。その結果、気相から凝縮相への伝熱速度は大きい値に保たれ、 $T(b)$  および  $t(b)$  の温度勾配は急になり、溶融帯

下端高さも  $H_M(b)$  のように低くなる。溶融帯下端での  $T(b)$  の値は気相と凝縮相との熱流比に依存し、熱収支から定まる。

Case(c) 反応熱を考慮せず ( $d=0$ )、伝熱係数に補正係数 0.138 を乗じた場合 ( $h_{g,s}=2.9$ )。

伝熱速度が小さいため、ガス、コークスの温度勾配は緩やかになり、溶融帯下端高さ  $H_M(c)$  は  $H_M(a)$  とほぼ等しい。溶融帯下端での  $T(c)$  はこの場合も熱収支のみによつて定まり、 $T(b)$  に等しい。注目すべきは、 $t(c)$  の分布が  $t(a)$  とあまり変わらないことである。

以上に述べたように、気相と凝縮相の熱流比が 1 に近い場合には、ガス温度とコークス温度の差は熱収支によつて定まる温度差を保持しながら、熱交換が進む。Case(a) で  $T(a)$  と  $t(a)$  が近づくのは反応吸熱量分だけ  $T(a)$  が低下するためである。すなわち、ガス相にはガス化反応による吸熱によつて顕熱が一時的に潜熱として蓄えられ、溶融帯もしくはそれ以上の酸素ポテンシャルの高い領域で、再びガス相からの析出反応による発熱量として固相に熱を放出することになる。

2.  $h_{g,s}$  の値が変わると  $T$  と  $t$  の分布も変化するが、この場合主として、Fig. 1 の Case(b) と (c) のように溶融帯下端高さがどのレベルになるかの違いをもたらす。Si 移行の数学モデルにおいて、 $h_{g,s}$  を変えた計算の結果、溶融帯高さは Fig. 2 のように変わる。したがつて実高炉の羽口から朝顔部下端までの距離を 0.6m とすれば、図より  $h_{g,s}$  を約  $80 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  とすることにより溶融帯下端が朝顔部下端に位置することになる。

溶融帯の炉内断面平均高さの下限については、通常の製鋼用銑を吹製している場合には炉内温度測定の結果<sup>4)</sup>等から、羽口上 3~4m 程度 (朝顔部上部) と考えている。

3. 固-液間の伝熱係数を  $3000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  のように大きくすると、コークス温度と融体の温度は等しく  $1600 \sim 1700^\circ\text{C}$  となる。この場合には出銑、出滓温度も  $1600^\circ\text{C}$  以上のように高温となり、実際とはかけ離れた値を示す。この理由は既に 1. 項で述べたように、気相から凝縮相に与えられる熱量のバランスから、コークス温度の低下に相当する熱量を融体が得ることになるためである。

筆者らも、コークスと融体とが接触している部分では、両者の温度差はほとんど無いと考えている。しかるに本一次元数学モデルにおいて両者に温度差をつけざるをえないのは、i) 滴下帯内で起こりうる種々の吸熱反応 (スラグからの SiO の発生反応を除く) をモデル化していないため、コークス温度が高くなること、ii) とくにレースウェイ近傍では融体の流下しないドライゾーンが存在するなど、コークス流の平均温度と融体と接触する部分のコークス温度とに差があること、が原因と考えられる。

4. 羽口レベル以下でメタル中 Si 濃度の上昇が少ないのは、炉床へ回るガス量が全羽口前発生ガス量の 10% と少ないことによつている。すなわち、融体流量がガス流量に比べて大きくなるため、ガス中の SiO 量が総流量として少ないことと、ガス温度が急速に融体温度に近く低下し、SiO の発生も著しく少ないことによる。したがつて、羽口レベル直下のコークス温度が燃焼帯へ供給されるコークス温度より高くなるとしても、燃焼帯から離れた炉床領域でメタル中 Si 濃度が大きく上昇することはない。

本数学モデルにおけるスラグからの SiO の発生反応速度に関しては、結論として製鋼用銑操業と鋳物銑吹製時とで同一の速度式を用いており、操業によつて変えることは考えていない。既報<sup>1)</sup>中の千葉 2 高炉に関する製鋼用銑、鋳物銑および低 Si 操業のシミュレーションはすべて同じパラメータを用いた結果を示している。同一の速度式によつても操業方法の違いにより、製鋼用銑の場合と鋳物銑の場合とでは Si 濃度は大きく異なつてくる。その後のシミュレーション計算においても、Si 濃度の広い範囲で適合する千葉 2 高炉の例と同じパラメータ値を用いている。

## 文 献

- 1) 田口整司, 槌谷暢男, 久保秀穂, 一藤和夫, 岡部 俠児: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2311
- 2) 岡部 俠児, 槌谷暢男, 田口整司: 学振 54 委-No. 1608 (昭和 57 年 7 月)
- 3) W. RANZ and W. MARSHALL: Chem. Eng. Prog., 48 (1952), p. 141
- 4) S. TAGUCHI, H. KATAYAMA, N. TSUCHIYA, K. OKABE, K. TANAKA, and K. OKUMURA: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 1173