

© 1982 ISIJ

高炉内での SiO ガスを介した Si 移行の数学的モデル

論 文

田口 整司*・久保 秀穂*²・槌谷 暢男*³
一藤 和夫*²・岡部 俠児*³

Development of a Mathematical Model of Silicon Transfer via SiO in the Blast Furnace

Seiji TAGUCHI, Hideho KUBO, Nobuo TSUCHIYA
Kazuo ICHIFUJI, and Kyoji OKABE

Synopsis :

A mathematical model for the simulation of Si transfer process in the blast furnace was developed. The whole regions of the furnace from the stock level to the hearth were one-dimensionally simplified, and mass and heat transport and main reaction rates in each region were included in the simulation. The feature of the model is that instead of the slag-metal reaction in the hearth the reaction between SiO-gas and iron-droplets in the dropping zone is exclusively taken into account as the Si transfer reaction. When the temperature distribution is so simulated as to be well coincide with the actual in-furnace distribution, the calculated Si contents in hot metal are proved to be in good agreement with the observed values.

1. 結 言

高炉内での Si 移行反応に関しては、実験的研究、実操業データ解析あるいは高炉解体調査など、数多くの報告がある。これらの総括から、Si 移行について次の二点があげられる。第一に炉床湯溜り部でのスラグ-メタル反応によるメタルへの Si 移行はほとんど無視できる。第二はメタルへの Si 移行量は炉内の溶融帯高さ、溶銑 t 当たりの入熱量といつた因子と強い関連を有する^{1)~3)}。したがって炉内での Si 移行過程を反応工学的に定量化するには、高炉の総括的なプロセスを対象に考えなければならない。

高炉の反応工学的研究については、館によるすぐれた解説⁴⁾があるが、その後の多くの研究は炉内の二次元的な物質の流れに力点がおかれている。ここでは著者らの Si 移行モデルに関連する二、三の研究に触れる。高炉内の主要プロセスを一次元的にとらえ、反応工学的に炉の特性を正確に表したモデルとして鞭らによる羽口より上部の数学的モデル⁵⁾がある。このモデルでは滴下帯領域の融体の挙動に触れていないので、Si 移行機構は含まれないが、反応工学的数学モデルの原型としてその後のモデルの基礎となった。炉頂ガス分析値、装入物分析値および送風条件などから、物質および熱バランスによつ

て、銑鉄中 Si 濃度の短時間の変化を予測しようとしたものに IRSID の二段階収支モデル⁶⁾がある。これは炉内に蓄積された熱量の増減を Si 濃度の変化に結びつけるものであり、長期的に Si 濃度レベルを制御するためのものではない。わが国では、観測された操業データから酸化鉄の還元反応速度およびコークスのソリューションロス反応速度を算出し、短時間後のこれらの変化を考慮した伝熱および反応速度モデルによつて、溶銑温度を予測しようとする試みがある⁷⁾⁹⁾。このモデルは羽口レベルの固体温度の変化を溶銑温度の変化に結びつけるもので、短時間内の動きに着目している。一方、FIELDEN⁹⁾らは一次元非定常モデルを報告し、炉床でのスラグ-メタル反応による Si の溶銑中への移行量を求めている。このモデルでは滴下帯域での融体の挙動や反応を考慮せずに短時間内での変化を論じており、結果として得た Si 濃度変化は溶銑温度の変化のみに依存している。さらに、操業データの統計解析を基に炉下部での反応が平衡にあると仮定して、Si 濃度を予測するモデルも提出されている¹⁴⁾。

以上のように、炉内での Si 移行の主要経路である SiO ガスと融体との反応機構を組み入れたモデルは少ない。著者らは製鋼プロセスに供給する溶銑中の Si 濃度低下の必要性が増している現状を考え、低 Si 濃度の銑

昭和 56 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 3 月 16 日受付 (Received Mar. 16, 1982)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

*² 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)技術研究所 工博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

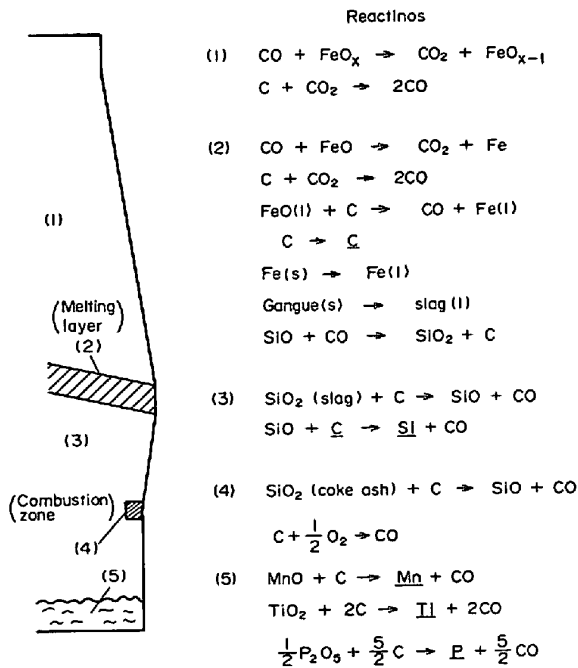


Fig. 1. Reactions and regions.

鉄を製造する高炉操業法を検討するためのモデルを作成した。その際、Si 移行が炉内の広い領域での変数分布と関連することを考慮し、炉頂ストックレベルから湯溜りまでの全領域を一次元的にとらえたものとした。モデル化にあたっては短時間内での溶銑温度や Si 濃度の変動も検討できる非定常モデルとした。

2. 高炉内過程のモデル構成

実操業解析によると、シャフト部における還元ガスの利用効率、固体とガスの熱流比や複合送風条件が溶融帯高さに影響し、ore/coke や送風量が融体の流下速度を決める³⁾。したがって、これらの過程を速度論的にとらえたモデルが必要であり、炉内を便宜的に5つの領域にわけた。それぞれの領域で取りあげる反応を Fig. 1 に一括し、反応速度および熱と物質の移動速度を以下に示す。

(1) 塊状層領域

酸化鉄の還元反応速度は八木ら¹⁰⁾と同様な1界面の未反応核モデルを適用した。還元は Fe_2O_3 から Fe_3O_4 , FeO , Fe へと段階的に進むとし、ガス境膜拡散と粒子内ガス拡散も考慮している。コークスの CO_2 ガスによるソリューションロス反応は粒径の影響とガス境膜拡散を含む著者ら¹¹⁾の速度式によつた。簡単のため、炉内で発生する H_2 および H_2O ガスに関しては CO および CO_2 ガスに含めて考え、独立な速度式は与えない。炉内ガス圧力損失については、ERGUN の式¹²⁾を用いた。羽口レベル以下はガス圧力一定とした。これらの諸式の

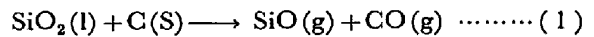
詳細は別報¹³⁾に譲る。

(2) 溶融帯

この領域は鉱石、コークス層と溶融メタル、スラグの混在領域であり、温度が $1250^\circ C$ 以上、かつメタル、スラグの溶け落ち温度 $T_{drop}^\circ C$ 以下の範囲で特徴づけられる。反応は塊状層での2反応に加え、鉱石の溶融とそれに伴う溶融酸化鉄のメタルへの還元およびメタルへの浸炭反応が同時に進行するとした。このとき反応はガス相から固相へ供給される伝熱量に律速され、溶融メタルとスラグは $T_{drop}^\circ C$ まで加熱され、炉内の微小高さ dz 内の鉱石の溶融が完了した後に流下し始めるとした。溶融帯の下端ではガス中に残留する SiO ガスが全量 CO と反応して SiO_2 と C を析出するとし、反応熱は気相に与えた。

(3) 滴下帯

流下スラグ中 SiO_2 とコークスとの反応による SiO ガスの発生速度は角戸²⁰⁾らによる(2)式で与えられる。



$$R_5 = k_5 A_{s, s1} a_{SiO_2} \dots\dots\dots (2)$$

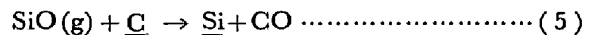
$$k_5 = 3.57 \times 10^{18} \exp(-177000/RT) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、(3)および以下に示す(7)式中の温度 T は Kelvin, K, であるが、その他の式においてはすべて $^\circ C$ である。 a_{SiO_2} は J. TAYLOR の線図¹⁵⁾からスラグ組成と温度の関数で与えた。

$$-\log a_{SiO_2} = (8.0 \times 10^{-6} T + 0.0228) B + 9.31 \times 10^{-4} T - 0.797 \dots\dots\dots (4)$$

$$B = \%CaO + \frac{\%Al_2O_3}{2} + \frac{\%MgO}{3} - \%SiO_2$$

上式は $B < 25\%$ の範囲に適用できる。 SiO ガスからメタルへの Si 吸収反応の速度は榎谷らの報告¹⁶⁾から(6)式で与えた。



$$R_5 = k_5 A_{g, m} P_{SiO} \dots\dots\dots (6)$$

$$k_5 = 4.77 \times 10^8 \exp(-66500/RT) \dots\dots\dots (7)$$

(4) 燃焼帯

ここでは実容積を持たず、羽口レベルに到達した温度 T_s のコークスが送風中酸素と燃焼して理論燃焼温度 TFT のガスを生成する領域として扱う。コークス中灰分からの SiO の発生についてはつぎのように考えた。基礎実験によるとコークス灰分が溶融しない状態では灰分のガス化減量が認められない。したがって、燃焼帯でコークス温度 T_s と $SiO_2-Al_2O_3-CaO$ 3元系状態図¹⁷⁾上の灰分凝固点 (Fig. 2) とが等しくなるまでは灰分が溶融状態にあるので、灰分中の SiO_2 が還元され SiO

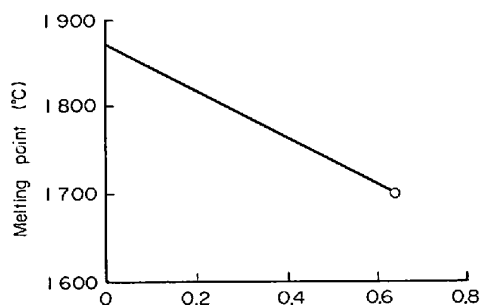


Fig. 2. Melting temperature of residual ash in coke.

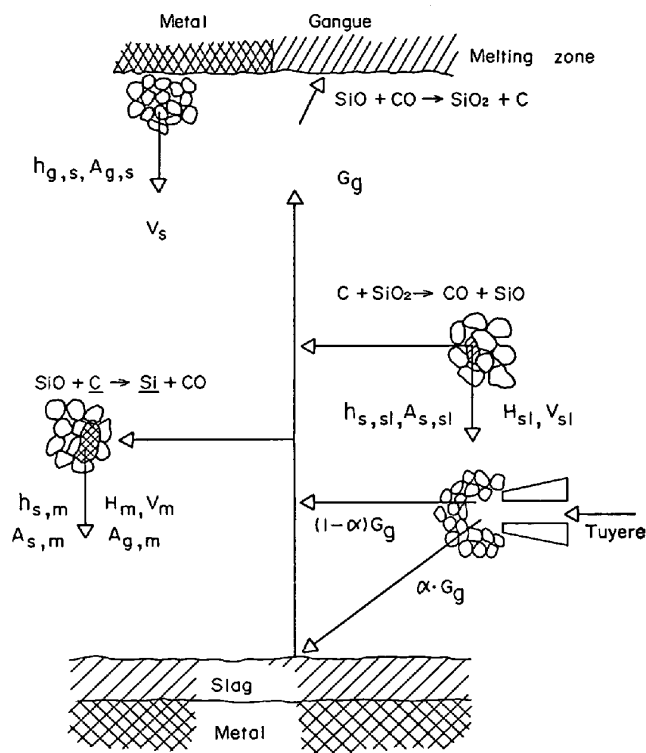


Fig. 3. Mass and heat transfer in dropping zone.

を発生するとした。この反応は吸熱反応であり、TFTの計算にはこの反応熱を考慮していないため、燃焼生成ガス温度 T_g は TFT よりも低くなる。燃焼ガス中の P_{SiO} は次式で与えられる。

$$P_{SiO} = \frac{\rho_g \beta W_{coke} (x_{SiO_2}^0 - x_{SiO_2})}{M_{SiO_2} M_{BV}} \dots \dots \dots (8)$$

$$x_{SiO_2} = \frac{X}{1-X} (x_{Al_2O_3}^0 + x_{CaO}^0) \dots \dots \dots (9)$$

$$X = \frac{\%SiO_2}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%CaO} = \frac{1870 - T_s}{266} \dots \dots \dots (10)$$

ここで (10) 式分母の 266 は Fig. 2 の直線の勾配である。

(5) 湯溜り

MnO, TiO₂ および P₂O₅ の還元反応は速度論的には組み入れない。これらの酸化物のメタル中への還元は物

質バランスと熱バランスを満たすように湯溜りを出鉄成分で与えられた量だけ進むとした。反応に伴うコークス消費量と吸熱量を計上し、この熱量は炉床部に回る羽口前発生ガスにより補償されるとした。また、スラグ-メタル反応による Si 移行は無視した。

つぎに、とくに滴下帯における物質および熱移動に関連する要因については、Fig. 3 に示す次の 3 個を与える必要がある。

- (1) 気相, 固相, スラグ相およびメタル相間の有効接触表面積, $A_{j,1}$
- (2) 上記各相間の伝熱係数, $h_{j,1}$
- (3) 各相の滴下帯での滞留時間と逆比例関係にある流下速度, V_1

SiO ガスと流下メタルとの反応に関する $A_{g,m}$ は気相-液相間の有効表面積を表す馬田ら¹⁸⁾の実験式(11)で与えられる。

$$A_{g,m} = (0.34/D_p) (U_m^2/gD_p)^{-1/2} (D_p \rho_m U_m^2/\sigma_m)^{2/3} \dots \dots \dots (11)$$

流下スラグ中 SiO₂ とコークスとの接触による SiO 発生反応に関する $A_{s,sl}$ はスラグ-コークス間の濡れ面積であり、恩田ら¹⁹⁾の次式が適用できる。スラグ-コークス間の伝熱面積についても同じである。

$$A_{s,sl} = a - a \exp \left[-1.45 \left(\frac{\rho_{sl} U_{sl}}{a \mu_{sl}} \right)^{0.1} \left(\frac{a U_{sl}^2}{g} \right)^{-0.05} \cdot \left(\frac{\rho_{sl} U_{sl}^2}{a \sigma_{sl}} \right)^{0.2} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{sl}} \right)^{0.75} \right] \dots \dots \dots (12)$$

$$a = \frac{6(1-\epsilon)}{\phi D_p} \dots \dots \dots (13)$$

メタル-コークス間の濡れ面積, $A_{s,m}$ も (12) 式と同様に与えられる。粒子表面積 a に対して $A_{s,sl}$ および $A_{g,m}$ が十分小さければ気相-固相間の有効表面積 $A_{g,s}$ は a に等しいとする。

気相-固相間の伝熱係数, $h_{g,s}$ は RANZ ら²⁰⁾の実験式から次式で与えた。

$$h_{g,s} = \frac{\lambda}{\epsilon D_p} Nu \lambda \dots \dots \dots (14)$$

$$Nu = 2 + 0.6 Pr^{1/3} Re^{1/2} \dots \dots \dots (15)$$

ただし、 λ は $0 < \lambda \leq 1$ のパラメータとする。円管内の液体金属流れの実験式²¹⁾から $h_{s,m}$ および $h_{s,sl}$ を推定すると $1000 \sim 5000$ (kcal/m²h°C) となるが、後に述べるように伝熱係数は実高炉の温度分布を良く再現するパラメータとした。

固相の降下速度は Appendix の (A6) 式で与えた。メタル, スラグの流下実速度は容積流量, U_1 , と (A12), (A13) 式の関係にある。それぞれのホールドアッ

Table 1. Integrands in each phase.

Phase.....	GAS	SOLID	METAL	SLAG
integrant	G	ρ_a	H_m^*	H_{sl}^*
	C_{CO}	X_{Fe}	P_{st}	T_{sl}
	C_{CO2}	X_O	T_m	
	C_{N2}	X_C		
	P_{SiO}	X_{sl}		
	P_g	T_s		
	T_g	V_s		

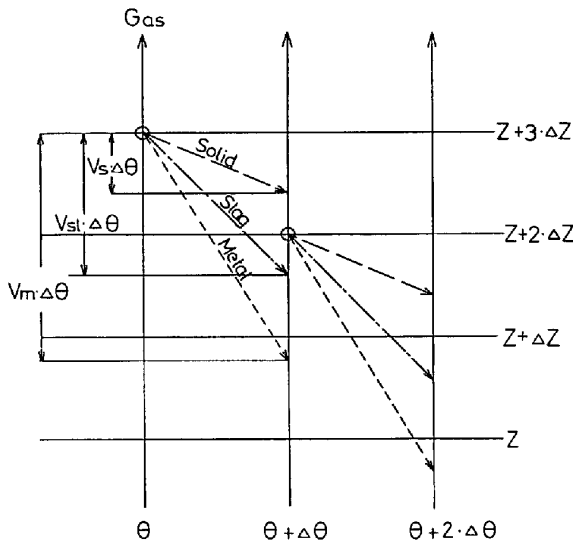


Fig. 4. Characteristic curve.

プ量, H_1 , を与えれば次式から求まる.

$$|V_1| = U_1/H_1 \dots\dots\dots (16)$$

ホールドアップは福武ら²²⁾による(17)式および(18)式で与えられる. ここで $H_{1,s}$ および $H_{1,d}$ はそれぞれ静のおよび動的ホールドアップである.

$$H_1 = H_{1,s} + H_{1,d}$$

$$H_{1,s} = \frac{1}{20.5 + \frac{0.263 \rho_{1g} \phi^2 D_p^2}{\sigma_1 (1 + \cos \theta_1) (1 - \epsilon)^2}} \dots\dots\dots (17)$$

$$H_{1,d} = 6.05 \left(\frac{\rho_1 U_1 D_p \phi}{(1 - \epsilon) \mu_1} \right)^{0.648} \left(\frac{\rho_{1g}^2 D_p^3 \phi^3}{(1 - \epsilon)^3 \mu_1^2} \right)^{-0.485} \cdot \left(\frac{\rho_{1g} D_p^2 \phi^2}{\sigma_1 (1 - \epsilon)^2} \right)^{0.097} (1 + \cos \theta_1)^{0.648} \dots (18)$$

3. 計 算 方 法

前節で述べた炉内のプロセスを数学的に構成すると, Appendix に示す諸式が得られ, 被積分関数としての炉内変数は Table 1 に示す 19 個となる. 常微分方程式群は向流する気相と凝縮相とに分け, それぞれ Runge-Kutta-Gill 法を用いて特性曲線上での数値積分を以下のように実施する. 固相, メタル相およびスラグ相の各変数の初期値が, Fig. 4 に示すように時刻 θ 軸上の各炉内位置 $z, z + \Delta z, \dots, z + n\Delta z$ で与えられていれば,

Table 2. Physical properties of metal and slag.

	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/m·h)	Surface tension (kg/h ²)	Contact angle (rad.)
Metal	6 600	18	1.426×10^7	1.571
Slag	2 600	3 600	6.09×10^6	1.571

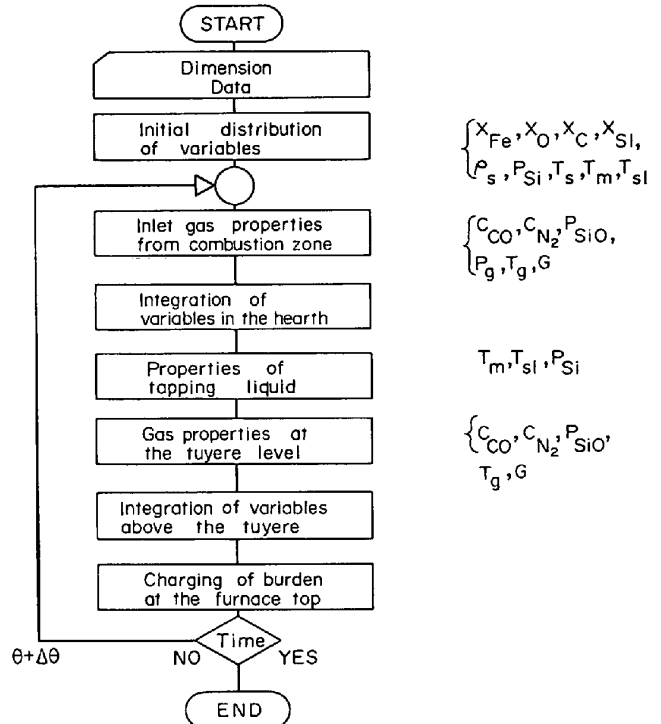


Fig. 5. Calculation flow.

(A6) 式および(16)式によつて V_s, V_m, V_{sl} が求まる. すなわち時刻 θ 軸上の各炉内高さ位置を起点とするそれぞれの相の特性曲線が, 時間 $\theta \sim \theta + \Delta\theta$ 間ですべて決まる. まず時刻 θ 軸上の凝縮相の変数分布を用いて, 気相の各微分式を $z=0$ から Δz 刻みに積分すれば, 同時刻軸上の各 z 位置での気相の各変数が求まる. 次に各特性曲線に沿つて, この時間内では気相側の変数は一定であるとして凝縮相の各微分式を積分すると, 時刻 $\theta + \Delta\theta$ 軸上での凝縮相の各変数の分布が求まる. この時刻軸上で得られた分布は炉高さ方向の各 $z, z + \Delta z, \dots, z + n\Delta z$ での値になつていないので, 内挿法によつて各メッシュポイントでの値を求める. 以上の手続きを繰り返して (z, θ) 面上のすべての変数値が得られる.

計算上必要な反応熱, 潜熱および比熱は主として鉄鋼熱計算用数値²³⁾に, 熱および物質移動に関する定数は PERRY らの Handbook²⁴⁾に, 熱力学定数は KUBASHEWSKI ら²⁵⁾によつた. メタルとスラグの物性は Table 2²⁶⁾に示した. 入力条件としては, 炉体形状, 装入物の化学組成と粒径, 送風条件と炉頂圧力などのほかに, 凝縮相変数の初期炉内分布を与える必要がある. 計

Table 3. Comparison of operational data and calculation.

	Blast volume (Nm ³ /min)	Blast temp. (°C)	Humidity (g/Nm ³)	O/C	CaO/SiO ₂
Actual	2700	1200	30	3.4	1.20
calculated	2700	1250	30	3.4	1.20
	Iron production (t/d)	Hot metal temp. (°C)	Silicon in metal (%)	Gas utilization	
Actual	3800	1490	0.40	50	
calculated	4008	1497	0.44	50.3	

算の概略フローを Fig. 5 に示す。時間刻み $\Delta\theta$ は (1/60)h, 高さ刻み Δz は 0.1m とした。高さ方向の 1 ステップごとに気相と凝縮相に関する積分を行い、炉底スラグ浴表面から炉頂ストックレベルに向かって計算を進める。計算の手順を Fig. 3 と Fig. 5 によつて説明する。まず羽口レベルのークス温度 T_s と送風条件とから燃焼帯での生成ガスの組成と温度を求める。生成ガスの α (分率) は炉床に回り、湯溜りの融体にメタル中 Mn, Ti, P 濃度に対応した還元所要熱量を与えた後、スラグ浴表面から羽口レベルまで上昇しながらその組成と温度を変える。この間に凝縮相の諸変数も $\Delta\theta$ 時間後の値が各高さごとに求まる。すなわち分率 α のガスが羽口レベルまで到達した時、羽口レベル以下の滴下帯内の諸変数の新しい分布が定まる。羽口レベルでは上昇したガスと燃焼帯から出てくる残りの $(1-\alpha)$ のガスとが混合し羽口レベルでの組成と温度が決まる。羽口レベルより上部の領域でもガスの上昇とともに新しい変数分布が定まってくる。溶融帯以上の領域では固相についての特性曲線のみが存在する。計算が炉頂まで達すると固相のストックレベルは $V_s\Delta\theta$ だけ下がっている。この空間に新たに鉱石とークスが、与えられた ore/coke 比で、装入される。このようにして炉内全体の新しい変数分布が定まると、このときの出鉄滓の温度と溶鉄中 Si 濃度を湯溜りでの物質および熱収支から求める。以下時間ステップを進めての繰り返しである。

本計算では炉半径 r は一定とし、 $\alpha=0.05\sim 0.1$, $h_w=12$ kcal/m²h deg, $Q=8000$ kcal/m²h とした。これらから見積られる鉄鉄 t 当たりの炉体損失熱は、たとえば内容積 1845 m³ の高炉では 1.3×10^5 kcal/t 程度となり、実績値に合う。

定常状態での炉内変数分布を得るために、初期炉内分布を与えて計算を開始すると、初期の装入物が溶融帯まで置換される 4 h 後から炉頂ガス組成が急速に収束値に近づく。およそ 24 h 経過すると溶融帯位置も定まり、その後は 48 h 程度まで計算を延長しても出鉄温度の変化は 2~3°C 程度である。一部の場合を除いて、24 h の計算で得られた解を定常解とした。

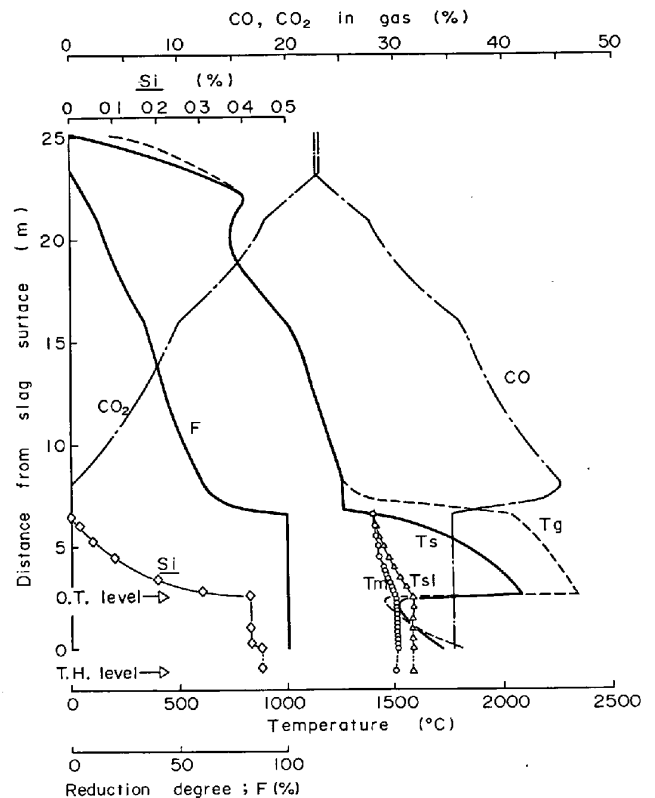


Fig. 6. Distribution of in-furnace variables by calculation (Chiba No. 3 B. F.).

4. 計算結果および考察

シミュレーションのための基準操業として千葉第 3 高炉 (内容積 1845 m³) のオールークス操業時の実績値を用いた。実績の操業条件と近い計算結果の例を Table 3 に示したが、溶鉄中の Si 濃度はほぼ実績に合う結果が得られる。このときの炉内変数分布を Fig. 6 に示す。炉頂から装入物層内の数 m までの温度上昇曲線は $A_{g,s} \cdot h_{g,s}$ を従来から用いられている 5000~6000 kcal/m²h deg とすれば適切に表すことができ、(14) 式において $\lambda=0.2$ を選ぶことに相当する。図中の温度分布もゾンテ等による実測結果²⁷⁾とよく合う。溶融帯高さは滴下帯での $h_{g,s}$ の値に大きく依存し、 $h_{g,s}$ が大きいと溶融帯は羽口直上まで下がる。製鋼鉄吹製のシミュレーションにおいて溶融帯下端位置がボッシュ上端~シャフ

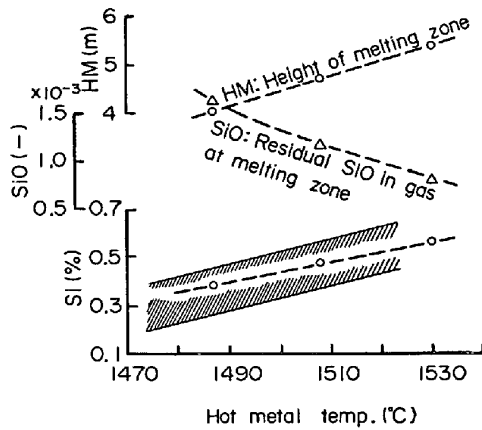


Fig. 7. Change of factors relating to Si content in hot metal.

ト下端の範囲に入るよう滴下帯での λ を求めると 0.02 となる。実炉での炉内温度分布測定値および $h_{g,s}$ に関しては統報²⁸⁾で詳述する。さらに与えられた炉内温度分布において溶銹温度の計算値と実績値とが等しくなるように $h_{s,m}=30 \text{ kcal/m}^2\text{hdeg}$ を選び、かつ $h_{s,sl}=h_{s,m}$ とした。このとき図に示すようにスラグ温度は溶銹温度より約 80°C 高くなつた。炉内でのメタル中 Si 濃度の変化は羽口レベルより上で大きい。出銹時の Si 濃度はほぼ羽口レベルまでで決まっておき、融体の温度についても同様である。これは炉床部を流れるガス量が融体の流量に比べて小さいことと、炉床壁からの熱損失によりガスから融体に与えられる顕熱が融体を十分加熱するほど多くないため、むしろガス温度が融体温度に近づく結果である。また図ではガス流れを上向きに 1 次元としてとらえているので、羽口レベルで T_g, T_s が低く、炉底方向に高くなっている。実際には炉床内ではガス流は羽口近傍の炉壁側から入り、炉底を回つて羽口レベルの中心領域から出て行くので、高さ方向のそれらの分布よりも炉床部全体での反応や伝熱の総括結果の算出に意味がある。なお、 α は 0.05 とし、スラグからの SiO 発生反応はスラグ温度に依存するとして(3)式の温度を T_{sl} で与え、反応熱もスラグが得るとした。すなわち、 $\alpha_{sl}=1, \alpha_s=0$ である。

操業条件として装入鉱石量とコークス量との比 ore/coke を変えた場合の Si 移行量およびそれに関連する因子の変化を Fig. 7 に示す。溶銹温度 1490°C のプロットは ore/coke=3.6 の場合であり、順次 3.5, 3.4 と ore/coke を下げると溶銹温度、Si 濃度ともに上昇する。これに伴つて溶融帯下端に達する気相中 SiO ガスのモル分率は低下する。すなわち、この場合にはメタルへの Si 移行量はメタルが羽口レベルまで流下する間に SiO ガスから Si を吸収する速度に律速されている。な

お図において Si 濃度の温度依存性はおよそ 0.04% (ΔSi)/10°C であり、千葉各高炉での実績³⁾にはほぼ等しい。

5. 結 言

高炉内での Si 移行プロセスの数学モデルを作成した。モデルは一次元非定常とし、炉頂ストックレベルから炉床湯溜りにいたる全領域での主要な反応および物質、熱移動を速度論的に構成した。炉床スラグ-メタル浴での Si 還元反応を無視し、SiO ガスを經由した滴下帯での Si 移行機構を組み入れた。計算温度分布を実高炉の炉内温度分布に適合させると、計算 Si 濃度は現実操業の場合とよく一致した。

Appendix

一次元的な物質の流れを仮定して、炉内単位断面について微小高さ dz 内での単位時間当たりの物質収支は次のように与えられる、(体積内の蓄積量の時間変化) = (着目相の流入, 流出量の差) + (他相から着目相への移動) + (反応による発生量)。異相間の拡散による物質移動を無視すれば、次の微分方程式を得る。

$$\partial x_k \rho^* / \partial \theta = -\partial x_k \rho^* V_1 / \partial z + \sum_j \sum_i \beta_{k,i}^{(j)} R_i \dots\dots\dots (A1)$$

同様にして、微分熱収支式が次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \partial C_1 \rho^* T_1 / \partial \theta = & -\partial C_1 \rho^* V_1 T_1 / \partial z + \sum_j h_{j,1} A_{j,1} (T_j - T_1) \\ & + \delta_1 (2h_w/r) (T_w - T_1) + \sum_j C_j T_j \sum_k \sum_i \beta_{k,i}^{(j)} R_i \\ & + \sum_i \alpha_i (-\Delta H_i) R_i \dots\dots\dots (A2) \end{aligned}$$

上式は時間 θ と高さ z に関する偏微分方程式となつているが、これを特性曲線法を用いて数値積分するために以下のように変形する。

(1) 気相の微分物質収支式

気相については蓄積量は対流項に比べて無視できるので次式を得る。ただし、 $G = \rho_g^* V_g$ である。

$$dG/dz = d\rho_g^* V_g/dz = \sum_k \sum_j \sum_i \beta_{k,i}^{(j)} R_i \dots\dots\dots (A3)$$

$$dx_k/dz = (\sum_j \sum_i \beta_{k,i}^{(j)} R_i - x_k \sum_j \sum_i \beta_{k,i}^{(j)} R_i) / G \dots\dots\dots (A4)$$

(2) 気相の微分熱収支式

気-液間の伝熱は気-固間および固-液間のそれに比べて無視しうるとし、 $dC_g/dz \approx 0, \alpha_g = 0, \delta_g = 1$ を考慮して次式を得る。

$$\begin{aligned} dT_g/dz = & \{ \sum_j (C_j T_j - C_g T_g) \sum_k \sum_i \beta_{k,i}^{(j)} R_i \\ & + h_{g,s} A_{g,s} (T_s - T_g) + (2h_w/r) (T_w - T_g) \} / C_g G \dots\dots\dots (A5) \end{aligned}$$

(3) 固相の微分物質収支式

気-固間および固-液間の反応によつて固相中の物質が消失しても、鉱石およびコークスのかさ密度、 ρ_o および ρ_c は一定とすれば次式が成り立つ。

$$\partial V_s/\partial z = \sum_j \sum_i \beta_{j,i}^{(s)} R_i/\rho_o + \sum_j \sum_i \beta_{j,i}^{(c)} R_i/\rho_c \dots\dots\dots (A6)$$

逆に反応消失しても体積不変ならば、 $\partial V_s/\partial z=0$ 、すなわち固相の降下速度は一定となる。(A1) 式に(A6) 式を代入して次式を得る。

$$\partial \rho_s^*/\partial \theta + V_s \partial \rho_s^*/\partial z = (1 - \rho_s^*/\rho_s) \sum_j \sum_i \beta_{j,i}^{(s)} R_i + (1 - \rho_s^*/\rho_c) \sum_j \sum_i \beta_{j,i}^{(c)} R_i \dots\dots\dots (A7)$$

$$\partial x_k/\partial \theta + V_s \partial x_k/\partial z = \{ \sum_j \sum_i \beta_{j,i}^{(s)} R_i - x_k \sum_j \sum_i \beta_{j,i}^{(s)} R_i \} / \rho_s^* \dots\dots\dots (A8)$$

(4) 固相の微分熱収支式

微分収支に関する固相の反応は消失のみであり、(A2) 式の右辺第4項は $C_s T_s \rho_s^* \partial V_s/\partial z$ と等しく、また、 $\partial C_s/\partial z \approx 0$ および $\delta_s = 0$ として次式を得る。

$$\partial T_s/\partial \theta + V_s \partial T_s/\partial z = \{ h_{g,s} A_{g,s} (T_g - T_s) + h_{s,m} A_{s,m} (T_m - T_s) + h_{s,sl} A_{s,sl} (T_{sl} - T_s) + \sum_i \alpha_s (-\Delta H_i) R_i \} / C_s \rho_s^* \dots\dots\dots (A9)$$

(5) メタル相、スラグ相の微分物質収支式

微少高さ dz 内で生成した融体は全量の溶融が完了するまでは(すなわち溶融率1)充填層の空隙中に保持されるとすれば、充填層中に占めるメタル、スラグの容積率 H_m^* 、 H_{s1}^* は (A1) 式から次式で与えられる。

$$\partial \rho_m H_m^*/\partial \theta + V_s \partial \rho_m H_m^*/\partial z = \beta_{Fe,s}^{(s)} R_3 / P_{Fe} - \rho_m H_m^* \partial V_s/\partial z \dots\dots\dots (A10)$$

$$\partial \rho_{sl} H_{s1}^*/\partial \theta + V_s \partial \rho_{sl} H_{s1}^*/\partial z = \sum_{sl,g} \beta_{k,i}^{(s)} R_i - \rho_{sl} H_{s1}^* \partial V_s/\partial z \dots\dots\dots (A11)$$

上式に (A6) 式を代入し、溶融帯で積分すれば、溶融帯下端ではメタル、スラグの流下容積流量 U_m 、 U_{s1} を与えることになり、 V の符号を含めて次式が成り立つ。

$$U_m = -H_m V_m = -H_m^* V_s \dots\dots\dots (A12)$$

$$U_{s1} = -H_{s1} V_{s1} = -H_{s1}^* V_s \dots\dots\dots (A13)$$

ここで流下開始後の Si 移行反応による U_m 、 U_{s1} の変化が小さければ、 U_m 、 U_{s1} 、したがって H_m 、 H_{s1} も同一流線上では一定とみなされ次式が得られる。

$$\partial \rho_1 H_1/\partial \theta + V_1 \partial \rho_1 H_1/\partial z = -\rho_1 H_1 \partial V_1/\partial z = 0 \dots\dots\dots (A14)$$

上式と (A1) 式とから、メタル中 Si 濃度は次式で与えられる。

$$\partial P_{si}/\partial \theta + V_m \partial P_{si}/\partial z = \beta_{s1}^{(g)} R_6 / \rho_m H_m \dots\dots\dots (A15)$$

(6) メタル、スラグの微分熱収支式

滴下帯内のように高温の領域では、気相-液相間の伝熱は固相-液相間のそれに比べて無視しうるとすれば、(A2) 式と (A14) 式とから $\delta_m = \delta_{s1} = 0$ として次式を得る。

$$\partial T_m/\partial \theta + V_m \partial T_m/\partial z = \alpha_m (-\Delta H_6) R_6 / C_m \rho_m H_m + h_{s,m} A_{s,m} (T_s - T_m) / C_m \rho_m H_m \dots\dots\dots (A16)$$

$$\partial T_{s1}/\partial \theta + V_{s1} \partial T_{s1}/\partial z = \alpha_{s1} (-\Delta H_5) R_5 / C_{s1} \rho_{s1} H_{s1}$$

$$+ h_{s,sl} A_{s,sl} (T_s - T_{s1}) / C_{s1} \rho_{s1} H_{s1} \dots\dots\dots (A17)$$

メタル、スラグが湯溜りに落下後、出銑時に測定される温度としては湯溜り側面および底面からの熱損失を考慮する。この温度と成分の時間ごとの変化はそれぞれの浴内での完全混合を仮定して求めた。

以上の諸式のうち、(A7)~(A11) 式および (A15)~(A17) 式の左辺はいずれも $\partial/\partial \theta + V_1 \partial/\partial z$ の偏微分形式を有するが、 $V_1 = dz(l)/d\theta$ の関係から、1 相の流線に沿つての積分は次式のように常微分形式になる。

$$\partial Y_1/\partial \theta + V_1 \partial Y_1/\partial z = (dY_1/d\theta)_{(1)} \dots\dots\dots (A18)$$

したがって、各相の流線、すなわち特性曲線が与えられれば上述の諸式は常微分方程式群となる。

記号

- a : 充填層の比表面積 (m^2/m^3 (bed))
- $A_{g,s}$, $A_{g,m}$, $A_{g,sl}$: 気-固間の, 気-メタル間の, 気-スラグ間の有効比表面積 (%)
- $A_{s,m}$, $A_{s,sl}$: メタル, スラグとコークスとの濡れ比表面積 (%)
- a_{SiO_2} : スラグ中シリカの活量 (-)
- B : 補助変数 (%)
- C_g , C_s , C_m , C_{s1} , C_j : ガスの, 固体の, メタルの, スラグの, j 成分の比熱 (kcal/kg deg)
- C_k : ガス種 k のモル濃度 ($kmol/Nm^3$)
- D_p , D_{p0} : 全粒子の, 鉱石粒子の平均径 (m)
- F : 酸化鉄の還元率 (-)
- g : 重力の加速度 (m/h^2)
- G : ガスの質量速度 (kg/m^2h)
- $h_{g,s}$, $h_{s,m}$, $h_{s,sl}$, h_w : 気-固間の, 気-メタル間の, 気-スラグ間の, 炉壁の伝熱係数 ($kcal/m^2h$ deg)
- $H_{1,d}$, $H_{1,s}$: 1 相の動的, 静的 ホールドアップ (m^3/m^3 (bed))
- H_1 , H_m , H_{s1} : 1 相の, メタルの, スラグの全ホールドアップ (%)
- H_m^* , H_{s1}^* : 溶融帯に保持されているメタル, スラグ量 (%)
- i , j , k : 反応, 元素または相, ガス種に関する添字
- k_5 , k_6 : 反応式 (1), (5) の速度定数 ($kmol/m^2h$), ($kmol/m^2h$ atm)
- l : 相を表す添字
- M_{SiO_2} : SiO_2 の分子量 ($kg/kmol$)
- M_{BV} : 羽口前で発生するガスのモル流量 ($kmol/h$)
- Nu : ヌッセルト数 (-)
- P_{Fe} : メタル中の Fe 分率 (%)
- P_g : ガス圧力 (atm)
- Pr : プラントル数 (-)
- P_{Si} : メタル中の Si 分率 (-)
- P_{SiO} : SiO ガスの分圧 (atm)
- Q : 炉床湯溜り部での炉床壁への熱流束 ($kcal/m^2h$)
- r : 炉半径 (m)
- R : 気体定数 (cal/mol deg)
- R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 : 鉱石の CO ガス還元, CO_2 によるカーボン・ソリュージョンクロス反応の, メタルおよび FeO 溶融の, スラグ分の溶融の, 流下スラグからの SiO 発生の, SiO ガスからメタルへの Si 吸収の反応速度 ($kmol/m^3$ (bed)h)
- Re : レイノルズ数 (-)
- T_{drop} : 鉱石の溶け落ち温度 ($^{\circ}C$)

T_g, T_s, T_w : ガスの, 固体の, 冷却水の温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_m : メタルの温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{sl} : スラッグの温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 U_m, U_{sl} : メタルの, スラッグの容積流量 ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$)
 V_m, V_s, V_{sl} : メタルの, 固体の, スラッグの流下速度
 <上向きを正> (m/h)
 W_{coke} : 羽口でのコークス消費速度 (kg/h)
 X : 補助変数 (-)
 $x_{\text{Al}_2\text{O}_3}^0, x_{\text{CaO}}^0$: コークス灰分中の高炉装入時の Al_2O_3 ,
 CaO 重量分率 (%)
 x_j, x_k : 固体中 j 成分の, k 種ガスの重量濃度分率 (%)
 $x_{\text{SiO}_2}^0, x_{\text{SiO}_2}^0$: コークス灰分中の, 高炉装入時の SiO_2 重量分率 (%)
 Y_1 : 1 相の一般分布変数
 z : スラッグ浴表面からの炉内高さ<上向きを正> (m)
 α_1 : 1 相の反応熱取得率 (-)
 β : コークス中灰分の重量分率 (%)
 $\beta_{k,1}^{(3)}, \beta_{k,1}^{(4)}$: 反応によつてコークス層, 鉍石層から j 相へ出て行く成分の質量の総和 <ここにおいてのみ出量を正とする> (kg/kmol)
 $\beta_{F,3}^{(3)}, \beta_{F,4}^{(4)}$: それぞれ反応 3, 反応 4 によつて固相から溶融メタル, スラッグ相に移る Fe 分, スラッグ分の質量<入量を正> (%)
 $\beta_{k,1}^{(i)}$: 反応 i によつて j 相から着目相 l へ移る k 成分の質量<入量を正> (%)
 γ : 補助変数 (-)
 δ_1 : 1 相の炉壁熱損失の取得率 (%)
 ε : 充填層の空隙率 (%)
 ρ_c, ρ_o : コークス, 鉍石のかさ密度 ($\text{kg}/\text{m}^3(\text{bed})$)
 $\rho_g^*, \rho_l^*, \rho_s^*$: 充填層単位体積中に存在する気相の, 1 相の, 固相の質量 ($\text{kg}/\text{m}^3(\text{bed})$)
 ρ_m, ρ_{sl} : メタル, スラッグの密度 (kg/m^3)
 θ : 時間 (h)
 Θ : 融体の接触角 (rad)
 μ_{sl} : スラッグの粘度 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{h}$)
 σ_m : メタルの表面張力 (kg/h^2)
 σ_c : カーボンの臨界表面張力 (%)
 ϕ : 粒子の表面形状係数 (-)
 χ : 補正係数 (%)
 $-\Delta H_i$: i 反応の反応熱 (kcal/kmol)

文 献

- 1) 羽田野道春, 山岡秀行, 山縣千里: 鉄と鋼, 62 (1976) 11, S391
- 2) 田口整司, 槌谷暢男, 高田至康, 岡部俠児: 同上, 64 (1978), p. 691
- 3) 槌谷暢男, 田口整司, 河合隆成, 一藤和夫, 佐藤政明: 川崎製鉄技報, 13 (1981), p. 557
- 4) 館 充: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1402
- 5) 鞭 巖, 田村健二, 八木順一郎, 森山 昭: 日本金属学会誌, 30 (1966), p. 1109
- 6) C. STAIB and J. MICHARD: J. Metals, 17 (1965), p. 33, p. 165
- 7) 槌屋 治紀: 学振 54 委-No. 1156 (昭和 45 年 7 月)
- 8) 羽田野道春, 美坂佳助, 的場祥行, 大塚宏一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 518
- 9) C. FIELDEN and B. WOOD: JISI, 192 (1968), p. 650
- 10) 八木順一郎, 佐々木恵一, 鞭 巖: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1019
- 11) 田口整司, 岡部俠児: 川崎製鉄技報, 2 (1970), p. 358
- 12) S. ERGUN: Chem. Eng. Prog., 48 (1952), p. 89
- 13) 久保秀穂, 西山哲司, 田口整司: 川崎製鉄技報, 14 (1982), p. 134
- 14) 田村健二, 斧 勝也, 西田信直: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2635
- 15) J. TAYLOR: JISI, 202 (1964), p. 420
- 16) 槌谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1927
- 17) E. LEVIN, C. ROBBINS, and H. McMURDIE: Phase Diagram for Ceramists, ed. by M. RESER (1964), p. 219 [The American Ceramic Society]
- 18) 馬田次郎, 篠原 久, 椿原 元: 化学工学, 27 (1963), p. 978
- 19) 恩田格三郎, 竹内 寛, 小山恭章: 同上, 31 (1967), p. 126
- 20) W. RANZ and W. MARSHALL: Chem. Eng. Prog., 48 (1952), p. 141
- 21) 化学工学便覧 (化学工学協会編) (1978), p. 276 [丸善]
- 22) 福武 剛, V. RAJAKUMAR: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 157
- 23) 鉄鋼熱計算用数値 (日本学術振興会, 日本鉄鋼協会編) (1966) [日刊工業新聞社]
- 24) R. PERRY, C. CHILTON, and S. KIRKPATRICK: Chemical Engineers' Handbook (1963) [McGraw-Hill]
- 25) O. KUBASCHEWSKI, E. EVANCE, and C. ALCOCK: Metallurgical Thermochemistry (1967) [The Pergamon Press]
- 26) 福武 剛, 岡部俠児: 鉄と鋼, 66(1980), p. 167
- 27) 岡部俠児, 浜田尚夫, 渡辺昭嗣: 同上, 55 (1969), p. 764
- 28) 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
- 29) 角戸三男, 槌谷暢男, 岡部俠児: 私信