

70560

論 文

数学的モデルに基づく焼結過程の解析*

塚本 孝**・嶋田駿作**・田口敏夫**・樋口充蔵**

Analysis of Sintering Process by the Mathematical Model

Takasi TUKAMOTO, Syunsaku SIMADA, Tosio TAGUCHI, and Jyuzo HIGUCHI

Synopsis:

A mathematical model of sintering process has been developed, in which considerations have been given to the combustion of coke, drying process of solid, the composition of lime stone and the melting- and solidifying process of iron ore. Variations of physical properties of gas and solid particles with the change of temperature have been taken into consideration.

The partial differential equations gave numerical values, at various depths in the bed and at various times, of the temperature of solid particles and gas, the radius of coke and lime stone particles, the concentration of O2 and CO2 gas, the combustion velocity, the decomposition rate of lime stone, the moisture content of solid and the melting rate of iron ore. Typical results are illustrated.

(Received Sept. 12, 1969)

1. 結 言

最近高炉原料として生産される焼結鉱のほとんどが、粉石灰を添加した自溶性焼結鉱である。粉石灰を焼結原料に添加した場合の効果については、組織面からみた報告はあるが¹⁾²⁾、速度論的立場での考察は少ない。

鉄鉱石の焼結に関する研究としては、鞭らによる焼結プロセスの数学的モデルの報告がある³⁾。その中ではコークスの燃焼反応、水分の乾燥過程を考慮に入れた非線形微分方程式を数値計算することで、層内の固体温度やコークスの反応速度などの変化が求められている。また最近、鞭らは焼結プロセスの本質を明らかにするために、線形化した数式展開により、パレットスピードに関する結論を誘導している⁴⁾。

ここで鞭らによる数学的モデル³⁾に、石灰石の分解反応速度式と鉄鉱石の溶融・凝固過程を表わす式を組み入れて計算し、それらの影響をしらべた。また同時に点火炉や保熱炉側の条件が変化したときに、層内の固体温度分布にあらわれる影響についても考察した。

2. 理 論

2.1 基礎式

焼結層内微少区間において、物質および熱に関する収支をとり、熱伝導と拡散の項を無視すれば、反応帯および乾燥帯において適用される一連の式を得る。

2.1.1 反応帯, 予熱帯, 冷却帯

-∂(GCgtg)/∂z - Ashp(tg - ts) = ε∂(Cgtg)/∂θ (1)

Ashp(tg - ts) + (-ΔHc)Rc* + (-ΔHi). Rl* - ρsBrm* = ρsB∂(Cstg)/∂θ (2)

-∂G/∂Z + 0.012Rc* + 0.044Rl* = ε∂ρg/∂θ ... (3)

-∂(GC02/ρg)/∂Z - Rc* = ε∂C02/∂θ ... (4)

-∂(GCC02/ρg)/∂Z + Rc* + Rl* = ε∂CC02/∂θ (5)

-Mc·rc* = ρc4πrc²∂rc/∂θ (6)

-Ml·rl* = ρl4πrl²∂rl/∂θ (7)

∂H/∂θ = fm(ts)·∂ts/∂θ (8)

ρg = (28×CN2 + 32×CO2 + 44×CCO2) × 10⁻³ (9)

この一連の式で、反応速度の項をゼロとおけば、予熱帯および冷却帯に適用できる基礎式となる。

2.1.2 乾燥帯

-∂(GCgtg)/∂Z - Ashp(tg - ts) = ε∂(Cgtg)/∂θ (10)

-∂Ws/∂θ + 6·rw*/πdρ³ρs = 0 (11)

-∂(GWg)/∂Z + ns·rw* = ε∂Wg/∂θ (12)

(1) 恒率乾燥期間

rw* = -πdρ³hρ(tg - ts)/(-ΔHw) (13)

ts = constant (14)

* 昭和 44 年 3 月 本会講演大会にて発表

昭和 44 年 9 月 12 日 受付

** 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所

(2) 減率乾燥期間

$$\gamma_w^* = -\pi d_p^3 h_p (t_g - t_s) / (\Delta H_w) \times (W_s - W_e) / (W_c - W_e) \dots (15)$$

$$\partial (\rho_s B C_{st_s}) / \partial \theta = -n_s (-\Delta H_w) \gamma_w^* \cdot (W_c - W_s) / (W_c - W_e) \dots (16)$$

この乾燥過程をあらわす式の計算上の取り扱い、鞭らによる方法⁹⁾、と同様である。

2.2 石灰石の分解反応

石灰石の分解反応は単一粒子については、従来から多くの報告がなされている⁴⁾⁵⁾。また速度論的立場から石灰石単一粒子が分解反応を起こす場合の粒内温度、濃度分布を求める研究もされている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

最近高炉モデルへの石灰石分解反応速度の適用がされ、効果をあげている⁹⁾。ここではその研究にしたがつて、物質移動の解析による反応速度式を用いる。

$$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2 - 42.6 \text{ kcal} \\ r_1^* = 4\pi r_i^2 (C_{\text{CO}_2}^* - C_{\text{CO}_2}) / [1/k_f + r_{10}(r_{10} - r_i) / (r_i \cdot D_s) + (r_{10}/r_i)^2 K / (k_l R t_s)] \\ = 4\pi r_i^2 \bar{k}_l (C_{\text{CO}_2}^* - C_{\text{CO}_2}) \dots (17)$$

ここで、粒内拡散係数⁹⁾； $D_s = D_{\text{CO}_2} \epsilon_v \xi$ ，空気中の炭酸ガス拡散係数¹⁰⁾； $D_{\text{CO}_2} = 8.28(T/273)^2$ ，化学反応速度定数⁹⁾； $k = 9.12 \times 10^3 \exp(-40000/RT)$ ，石灰石の気孔率⁹⁾； $\epsilon_v = 0.2$ ，迷宮度因子⁹⁾； $\xi = \epsilon_v^{0.41}$ ，分解反応平衡定数¹¹⁾； $\log K = -5211/T + 7.35$ ，なお反応はトポケミカルに進行し、分解によつて生ずる CaO 相の体積変化を無視する。流体が粒子のまわりを流れているときのガス境界膜内物質移動係数の推算については、多くの研究があるが¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾，ここでは充填層に適用した式¹⁴⁾を用いる。

$$S_h = 2.0 + 0.60(9.5R_e)^{1/2}(S_v)^{1/3} \dots (18)$$

ただしここでは伝熱と物質移動のアナロジーが適用できるとした¹⁵⁾。

2.3 溶融、凝固過程

焼結原料は数種の鉱石、あるいは砂鉄などの雑原料が配合されている。したがって原料層はガスによる加熱、コークスの燃焼反応とともに高温度になるが、純粋物質と違って明確な融解点を示さない。このことは鉱石の高温度における形状観察²⁵⁾によつてもわかる。焼結原料は溶融開始後、ある温度に応ずる融解量が存在し、それが溶融終了点まで原料に特有な関数形で分布しているとモデル化できる。

溶融、凝固速度式としては次式を考える。

$$r_m^* = dH/d\theta = dH/dt_s \times dt_s/d\theta = f_m(t_s) \cdot dt_s/d\theta \dots (19)$$

ただし H_{m0} を相変化にともなうエンタルピー変化とす

$$\text{れば, } f_m(t_s) \text{ は, } H_{m0} = \int_{t_{m2}}^{t_{m1}} f_m(t_s) dt_s \dots (20)$$

とすれば(20)式を満足することが必要である。この溶融特性をあらわす関数 $f_m(t_s)$ の近似は種々の関数形が考えられるが、たとえば溶融を示す変数 H が直線で近似できるときには

$$f_m(t_s) = -H_{m0} / (t_{m2} - t_{m1}) \dots (21)$$

また H が二次曲線で近似できるときには次式となる。

$$f_m(t_s) = -2H_{m0} \cdot (t_s - t_{m1}) / (t_{m2} - t_{m1})^2 \dots (22)$$

そして融解率は(23)式で定義できる。

$$h = (H_{m0} - H) / H_{m0} \dots (23)$$

3. 数値計算法

(1)~(16)式で焼結過程を表示できるが、このなかでガス側についての式で、層内部の空隙内に存在するガス相に基づく非定常項は流体本体の流れによる移動項、粒子流体間の熱交換と反応項にくらべて著しく小さい。これは流体に気体を用いた場合一般的にいえることであるが、焼結層のように層内ガス流速が早い場合は、非定常項は他の項の約 1/1000 の大きさであるので無視することができる。基礎式は次のように整理できる。

$$-G C_g' \partial t_g / \partial Z - A_s h_p (t_g - t_s) - C_g t_g \sum_i (\Delta M_i n_i r_i^*) = 0 \dots (24)$$

$$\{C_s' - f_m(t_s)\} \rho_s B \partial t_s / \partial \theta - A_s h_p (t_g - t_s) - \sum_{i=1}^2 (-\Delta H_i n_i r_i^*) \dots (25)$$

$$-\partial G / \partial Z + \sum_i (\Delta M_i n_i r_i^*) = 0 \dots (26)$$

$$-G \partial (C_{\text{O}_2} / \rho_g) / \partial Z - n_c r_c^* - (C_{\text{O}_2} / \rho_g) \sum_{i=1}^2 (\Delta M_i n_i r_i^*) = 0 \dots (27)$$

$$-G \partial (C_{\text{CO}_2} / \rho_g) / \partial Z + \sum_{i=1}^2 n_i r_i^* - (C_{\text{CO}_2} / \rho_g) \sum_{i=1}^2 (\Delta M_i n_i r_i^*) = 0 \dots (28)$$

$$\partial r_c / \partial \theta = -(M_c / \rho_c) \cdot r_c^* / 4\pi r_c^2 \dots (29)$$

$$\partial r_i / \partial \theta = -(M_i / \rho_i) r_i^* / 4\pi r_i^2 \dots (30)$$

$$\partial H / \partial \theta = f_m(t_s) \cdot \partial t_s / \partial \theta \dots (31)$$

$$R_c^* = 4\pi n_c r_c^2 \bar{k}_c \cdot C_{\text{O}_2} \dots (32)$$

$$R_i^* = 4\pi n_i r_i^2 \bar{k}_l (C_{\text{CO}_2}^* - C_{\text{CO}_2}) \dots (33)$$

$$\rho_g = (28 \cdot 0 C_{\text{N}_2} + 32 \cdot 0 C_{\text{O}_2} + 44 \cdot 0 C_{\text{CO}_2}) \dots (34)$$

$$C_{\text{O}_2} + C_{\text{N}_2} + C_{\text{CO}_2} = 4.464 \times 10^{-5} \dots (35)$$

ガス側の式で非定常項を無視しても固体側に時間微分項があるために、擬定常となりガス側の従属変数も時間に依存する。常微分方程式に比較して、系が偏微分方程式で記述される場合、座標軸が1つ増加したことに相当し数値計算法は飛躍的に増大するが、この非線型連立偏微分方程式もコンピュータを使つて解くことができる。

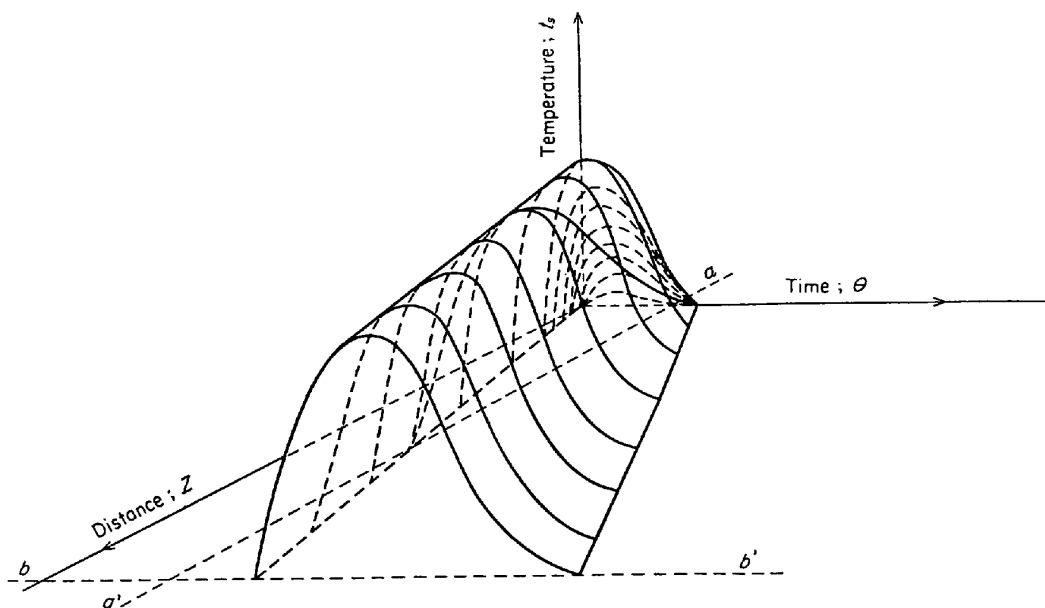


Fig. 1. Integral surface of solid temperature: t_s .

一般に二階の偏微分方程式は3つの型に分類される¹⁷⁾。たとえば x, y の関数 A, B, C を係数とする次式、

$$A(x, y) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 2B(x, y) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + C(x, y) \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0$$

$B^2 - AC > 0$: 双曲型偏微分方程式

$B^2 - AC = 0$: 放物型偏微分方程式

$B^2 - AC < 0$: 楕円型偏微分方程式

放物型の場合には1つの特性曲線をもつ、双曲型では2つの特性曲線をもつ。この焼結過程を表わす連立の式も本質的に双曲型である。双曲型の偏微分方程式は初期値で指定される一端が固定され、他端は領域が開いているのでコーシーの問題とみなされる。たとえば固体温度 t_s の積分曲面の概念図は Fig. 1 のようになっている。この山脈状になった曲面上の値を数値計算して求めることになる。

偏微分方程式の数値解法としては特性曲線による方法と差分法とが使われる¹⁸⁾¹⁹⁾。

3.1 差分法

与えられた偏微分方程式内に表われる微分項を独立変数の有限の変化に対する従属変数の変動で近似する。たとえば反応帯に適用される式のうち偏微分項を含んだ(24)~(31)式を差分方程式に直せば次のようになる。ただし偏微分項の差分近似には種々の方法があるが²⁰⁾²¹⁾、ここでは前進型差分近似をする。

$$\begin{aligned} & (t_{g, k+1, j} - t_{g, k, j}) / \Delta Z + (A_s h_p / GC_g')_{k, j} \cdot \\ & (t_{g, k, g} - t_{s, k, j}) + (C_g t_g / C_g' t_g)_{k, j} \cdot \\ & \sum_{i=1}^2 (\Delta M_i n_i r_i^*)_{k, j} = 0 \dots\dots\dots (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (t_{s, k, j+1} - t_{s, k, j}) / \Delta \theta - \{ (A_s h_p)_{k, j} (t_{g, k, j} - t_{s, k, j}) \\ & - \sum_i (-\Delta H_i n_i r_i^*)_{k, j} \} / \{ [C_s' - f_m(t_s)] \cdot \\ & \rho_s B \}_{k, j} = 0 \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

$$(G_{k+1, j} - G_{k, j}) / \Delta Z - \sum_i (\Delta M_i n_i r_i^*)_{k, j} = 0 \dots\dots (38)$$

$$\begin{aligned} & \{ (C_{O_2} / \rho_g)_{k+1, j} - (C_{O_2} / \rho_g)_{k, j} \} / \Delta Z + (n_c r_c^* / G)_{k, j} \\ & + (C_{O_2} / \rho_g G)_{k, j} \sum_i (\Delta M_i n_i r_i^*)_{k, j} = 0 \dots\dots (39) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \{ (C_{CO_2} / \rho_g)_{k+1, j} - (C_{CO_2} / \rho_g)_{k, j} \} / \\ & \Delta Z - (\sum_i n_i r_i^* / G)_{k, j} + (C_{CO_2} / \rho_g G)_{k, j} \sum_i \\ & (\Delta M_i n_i r_i^*)_{k, j} = 0 \dots\dots\dots (40) \end{aligned}$$

$$(r_{c, k, j+1} - r_{c, k, j}) / \Delta \theta = - (M_c / \rho_c)_{k, j} r_{c, k, j}^* / 4\pi r_{c, k, j}^2 \dots\dots\dots (41)$$

$$(r_{l, k, j+1} - r_{l, k, j}) / \Delta \theta = - (M_l / \rho_l)_{k, j} r_{l, k, j}^* / 4\pi r_{l, k, j}^2 \dots\dots\dots (42)$$

$$\begin{aligned} & (H_{k, j+1} - H_{k, j}) / \Delta \theta = - \{ f_m(t_s) \}_{k, j} \\ & (t_{s, k, j+1} - t_{s, k, j}) \Delta \theta \dots\dots\dots (43) \end{aligned}$$

さらに反応式2つと、密度の式をこれらと連立で解く。

3.2 特性曲線法

双曲型の場合2つの特性曲線をもつが、この特性曲線が数値解法上非常に有力な武器となる²²⁾。この問題の場合は特性曲線としては、

- $\theta = \text{constant}$: 特性曲線 I
- $Z = \text{constant}$: 特性曲線 II

これらの I, II に沿って基礎式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} (dt_g / dZ)_I &= A_s h_p (t_g - t_s) / GC_g' \\ &+ C_g t_g \sum_i (\Delta M_i n_i r_i^*) / GC_g' \dots\dots\dots (44) \end{aligned}$$

$$(dG / dZ)_I = \sum_i \Delta M_i n_i r_i^* \dots\dots\dots (45)$$

$$\{d(C_{O_2}/\rho_g)/dZ\}_I = -n_c r_c^*/G + C_{O_2} \sum_i \frac{(\Delta M_i n_i r_i^*)}{\rho_g G} \dots\dots\dots (46)$$

$$\{d(C_{CO_2}/\rho_g)/dZ\}_I = \sum_i n_i r_i^*/G + C_{CO_2} \sum_i \frac{(\Delta M_i n_i r_i^*)}{\rho_g G} \dots\dots\dots (47)$$

$$(dt_s/d\theta)_I = \{A_s h_p (t_g - t_s) + \sum_i (-\Delta H_i n_i r_i^*)\} / \{C_s - f_m(t_s)\} \dots\dots\dots (48)$$

$$(dr_c/d\theta)_I = -(M_c \rho_c) \cdot r_c^* / 4\pi r_c^2 \dots\dots\dots (49)$$

$$(dr_i/d\theta)_I = -(M_i/\rho_i) r_i^* / 4\pi r_i^2 \dots\dots\dots (50)$$

$$(dH/d\theta)_I = f_m(t_s) \cdot (dt_s/d\theta)_I \dots\dots\dots (51)$$

(44)~(51)式と(32)~(35)式の連立となる。計算して得られる各従属変数の値は、特性曲線 $Z = \text{const}$, $\theta = \text{const}$ の織りなす網目の格子点上で与えられる。この特性曲線 I, II 上で常微分で表わされた基礎式を, RKG 法などの数値積分をすればよい。Fig. 2 はこの網目を示している。

この場合は Euler 法により基礎式を I, II に沿って解いたが、これは基礎式を前進型差分近似をしてその連立の差分方程式を解くことと同じことになる。

3.3 初期条件と解の安定性

初期条件は特性曲線上で与えられる。

$$\theta = 0, Z \geq 0; t_s = t_{s0}, r_c = r_{c0}, r_i = r_{i0}, H = H_{m0} \dots\dots\dots (52)$$

$$Z = 0, \theta > 0; t_g = t_{g0}, G = G_0, C_{O_2} = C_{O_2,0}, C_{CO_2} = C_{CO_2,0} \dots\dots\dots (53)$$

式(53)は $Z = 0$, すなわち層頂において、流入開始するガス側についての値が既知であることを示す。一方(52)

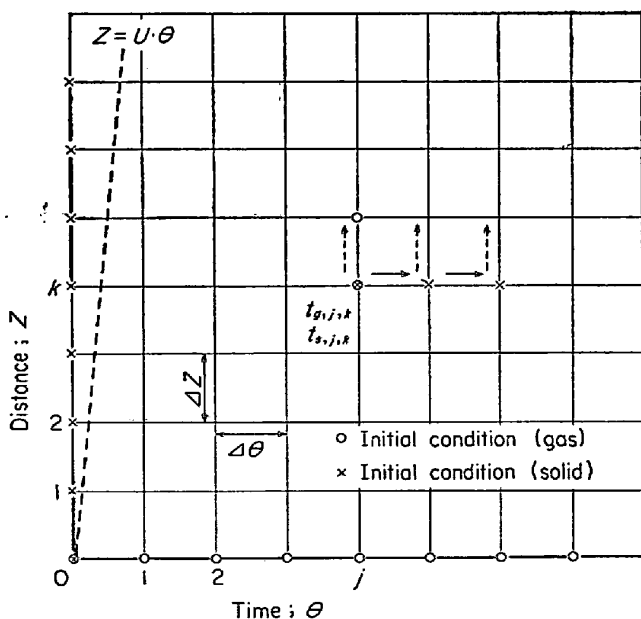


Fig. 2. Network of two families of characteristics for this model.

式は時間 $\theta = 0$ において、固体側は初期値であることを示す。

一方、偏微分方程式をコンピューターで数値的に解く場合、常に解の安定性が問題となる。一次元の熱伝導あるいは波動方程式については、安定な解を与える差分の大きさを規定する関係がある²³⁾。また久保田らは円筒型反応装置の二次元定常の問題について、RKG 法, Laasonen 法, Crank-Nicholson 法による解法と差分の大きさに関するモジュラスの解の収束性への影響を調べている²⁴⁾²⁵⁾。

一般に数値計算を行なう場合に 3 種類の誤差が存在するといわれる²⁶⁾。

- (1) Stability 安定性に関する誤差
- (2) Truncation 差分近似の切捨て誤差
- (3) Rounding 数値の丸めによる誤差

広い意味では(1)も(2)に含まれよう。微分の差分近似を精度よくするには、差分の大きさは小さくする必要はあるが、電子計算機の所要時間はそれに依りて長くなる。一方きざみを大きくすれば計算スピード増すが、近似の精度が悪くなり極端な場合には解が収束しない。

この焼結プロセスの数値計算上、安定な解を得るためには時間 $\Delta\theta$ と位置 ΔZ のきざみに関して、次の関係があることが明らかになった。すなわち(36), (37)式において、反応項をゼロとした予熱帯に適用する式より、

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z &= (C \cdot C_g' / A_s \cdot h_p) (t_{gk,j} - t_{gk+1,j}) / (t_{gk,j} - t_{sk,j}) \\ \Delta\theta &= (\rho_{sB} \cdot C_s' / A_s \cdot h_p) (t_{sk,j+1} - t_{sk,j}) / (t_{gk,j} - t_{sk,j}) \end{aligned} \right\} \dots (54)$$

一方、1つの差分区間を単段の熱交換器とみなせば、 $t_{gk+1,j} \geq t_{sk,j}, t_{gk,j} \geq t_{sk,j+1} \dots\dots\dots (55)$

(54)式と(55)式とで次式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z_{\max} &\leq G \cdot C_g' / A_s h_p \\ \Delta\theta_{\max} &\leq \rho_{sB} \cdot C_s' / A_s h_p \\ \Delta\theta_{\max} / \Delta Z_{\max} &= w, (w: \text{熱流比}) \end{aligned} \right\} \dots (56)$$

すなわち、この計算法での最大差分きざみの大きさは、系の熱流比という物理的性質に関係づけられる。これ以上のきざみでは、解は発散してしまう。

4. 計算結果

前記の基礎式を電子計算機により計算した結果をFig. 3~9に示す。Fig. 3は石灰石分解反応、溶融・凝固過程を考慮しない場合、Fig. 4は石灰石の反応のみ考慮、Fig. 5は溶融・凝固をも考慮した場合の層内固体温度変化である。Fig. 3とFig. 4の比較をすると、石灰石の反応による吸熱の効果が明らかである。Fig. 4で石灰石

Table 1. Data for numerical calculation.

$$C_{O_2,0} = 0.4172 \times 10^{-5}, C_{CO_2,0} = 0.5203 \times 10^{-5}, d_p = 0.3$$

$$G = 5.17 \times 10^{-3}, r_{c,0} = 0.15, r_{l,0} = 0.15, \theta_1 = 1.1$$

$$t_{s,0} = 300, t_{g,0} = 1533, w_{s,0} = 0.065, \varepsilon = 0.45$$

$$C_s = 0.1606 + 0.922 \times 10^{-4} \times t_s - 2.570/t_s^2$$

$$C_g = 0.2174 + 0.7247 \times 10^{-4} \times t_g - 0.16 \times 10^{-7} \times t_g^2$$

$$C_s' = (\partial C_s / \partial t_s) \times t_s, C_g' = (\partial C_g / \partial t_g) \times t_g$$

Run number	1	2	3	4	5	6	7	8
m_c	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.035
m_l	—	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
H_{m0}	—	—	60.78	60.78	60.78	60.78	60.78	60.78
t_{m1}	—	—	1500	1400	1600	1650	1500	1500
t_{m2}	—	—	1700	1600	1800	1750	1700	1700
$H_m(t_s)$	—	—	eq. (21)	eq. (21)	eq. (21)	eq. (21)	eq. (22)	eq. (21)

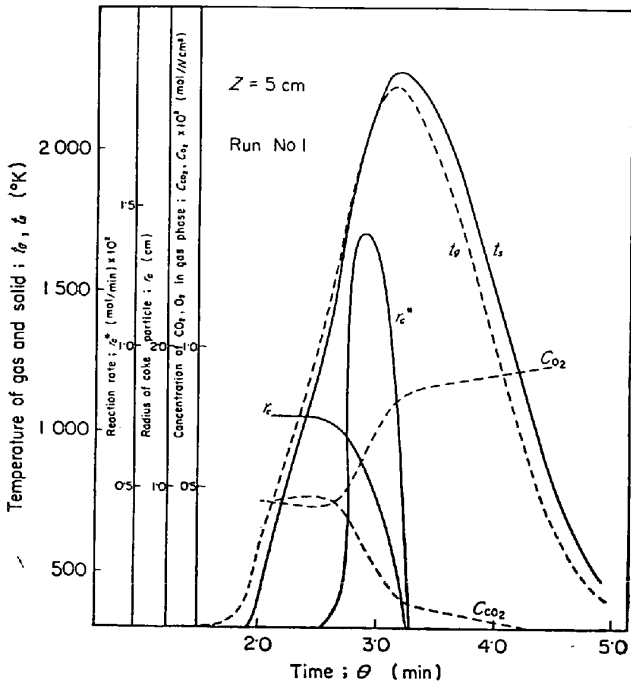


Fig. 3. Calculated results of process variables at $Z = 5\text{cm}$, where the effects of the decomposition of lime stone and the melting- and solidifying process are neglected.

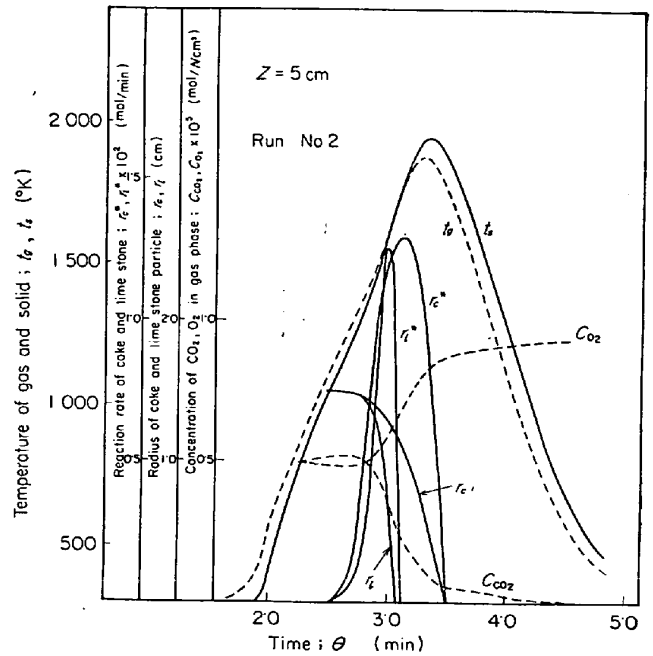


Fig. 4. Calculated results of process variables at $Z = 5\text{cm}$, where the effects of the decomposition of lime stone are considered.

の粒子径の変化は CaCO_3 相と CaO 相との界面の、中心からの距離の時間的な推移をいう。

Fig. 4 と Fig. 5 を比較することにより、溶融・凝固現象の層内プロセス変数に及ぼす影響がわかる。固体温度を示す t_s をみると、溶融・凝固過程を考慮した場合には、層内温度が 5cm の位置において約 150°K 低くなっている。そして溶融・凝固を考慮すると、温度分布は高温部においてならされて、広がる傾向がある。

Fig. 5 には融解率 h の時間変化を示した。 $h = 0$ のときは原料は完全に凝固、 $h = 1$ のときは溶融していることを示す。そして h が 0 と 1 の中間の値では、固相と

液相の共存していることを意味する。 Fig. 5 に示してあるガス通気量 G の変化は反応による影響である。ここでは溶融による原料の物理的形状の変化と形状変化にともなう通気抵抗の増大については考慮していない。溶融・凝固過程の熱量的な効果を解析の対象としている。

また溶融の関数形が異なる原料の場合についての結果を Fig. 6 と 7 に示す。 Fig. 6 では溶融関数を一次で近似できる場合と二次の場合の比較である。ただし溶融開始温度、終了温度および他の数値はすべて同一にしてある。 Fig. 7 は原料の溶融開始温度が異なる場合について調べた。これによると一定位置での温度分布は大きな差異はないが、融解率の履歴は異なり、低温度で溶融し始

Table 2. Data for numerical calculation.

Run number	9	10	11	12	13
$t_{g,0}$	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300
$C_{O_2,0}$	0.50×10^{-5}	0.50×10^{-5}	0.50×10^{-5}	0.50×10^{-5}	0.50×10^{-5}
θ_1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
$t_{g,1}$	673.2	1173.2	573.2	523.2	873.2
$C_{O_2,1}$	0.9375×10^{-5}	0.9375×10^{-5}	0.9375×10^{-5}	0.9375×10^{-5}	0.9375×10^{-5}
θ_2	2.6	1.6	3.1	4.1	2.1
t_{m1}	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
t_{m2}	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700
m_c	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
m_l	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
$w_{s,0}$	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065

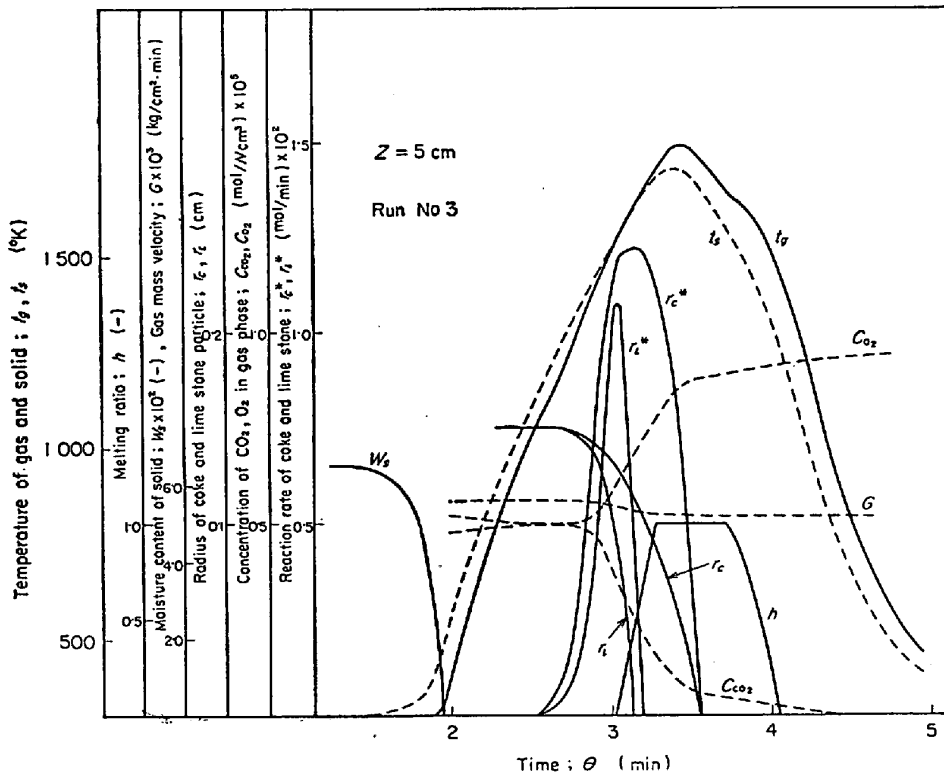


Fig. 5. Calculated results of process variables at $Z=5\text{cm}$, where the effects of the decomposition of lime stone and the melting-and solidifying process are considered.

める原料ほど溶融している時間が長いことがわかる。

5. 点火炉, 保熱炉の検討

最近, 焼結装置の点火炉の後に, 保熱炉あるいは二次点火炉を設置して, その能力を補うことが, 検討されている²⁷⁾²⁸⁾. ここでは点火条件を固定して, 保熱(二次点火と同意とする)条件を種々変化させた場合の検討を行なった. 計算に用いた数値を Table 2 に, 計算結果を Fig. 8 に示す. 文献²⁹⁾によれば 焼結鉱の品質はある必要温度以上に保たれている時間, あるいはその温度以上の温度分布の面積に大きく影響されることがいわれている.

Fig. 8 において, 溶融開始温度を 1227°C としてい

るので, この温度以上の面積で熱履歴の判定をすると, 保熱は高温度で短時間の場合が, 必要温度以上の面積を拡げる効果があると思われる. 低温度の長時間の加熱は温度分布のすそを拡げることに熱量が使われて, 焼結時間の延長をまねくことが, この計算結果から予想されるからである.

一般に焼結鉱の品質は層内位置により異なる. これは各位置での熱履歴の差異によるものと思われる. Fig. 9 に示す計算結果でも, 層内位置による熱履歴の差異は明らかである. 物性的な研究によりいかなる熱履歴が最もよい品質の焼結鉱をつくるか知つて, 生産率との関連から最適温度分布を決め, その温度分布を与える操作条件

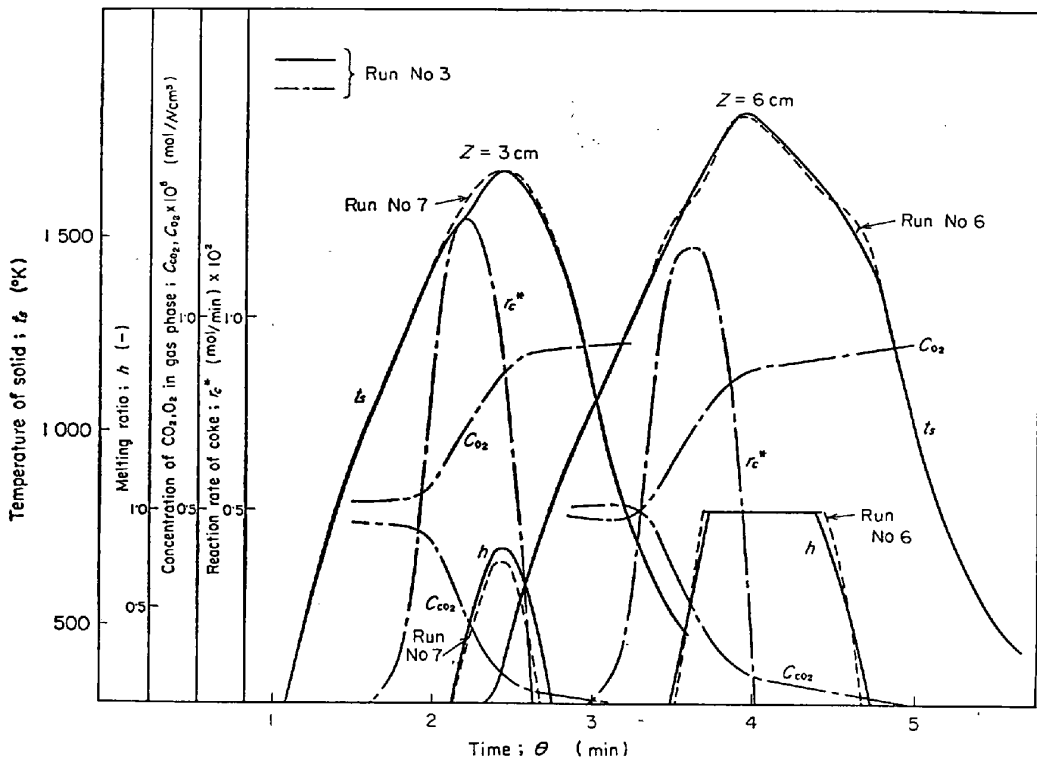


Fig. 6. Calculated results of process variables at $Z=3$ cm and 6cm.

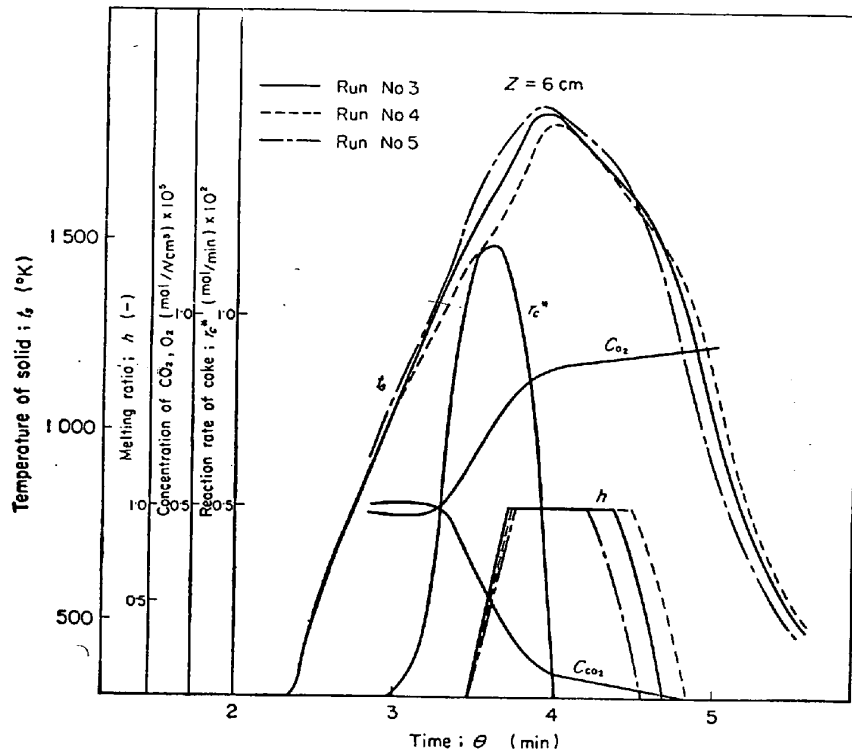


Fig. 7. Calculated results of process variables at $Z=6$ cm.

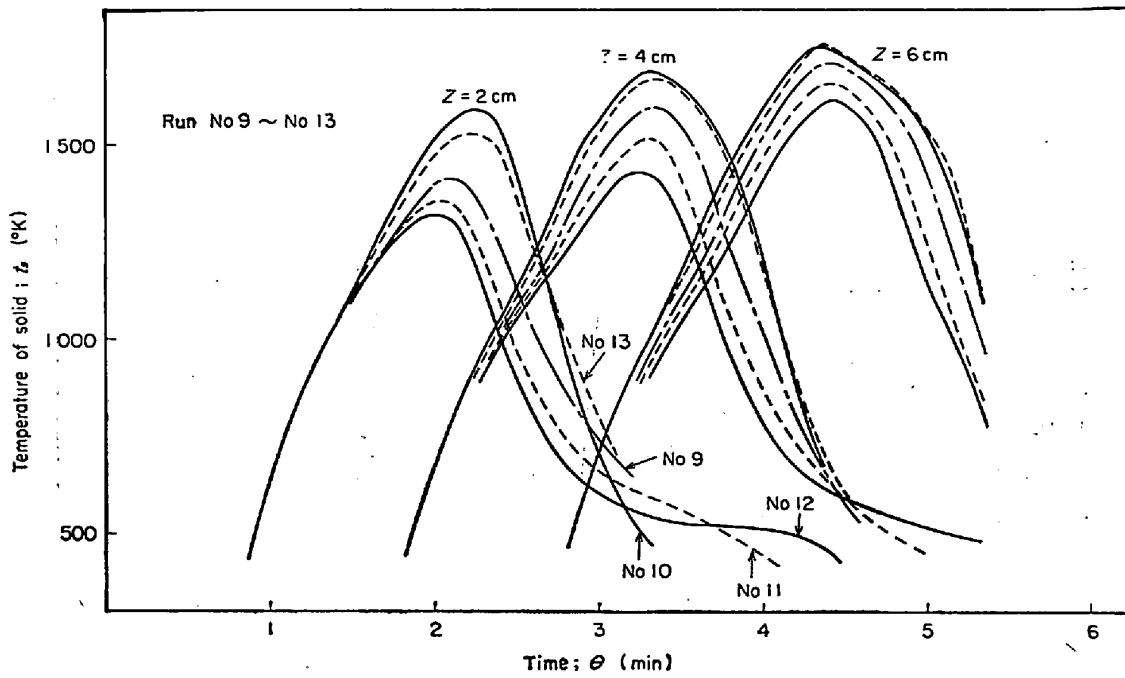


Fig. 8. Calculated results obtained according to some different after-heating conditions. (The melting process of solid are considered.)

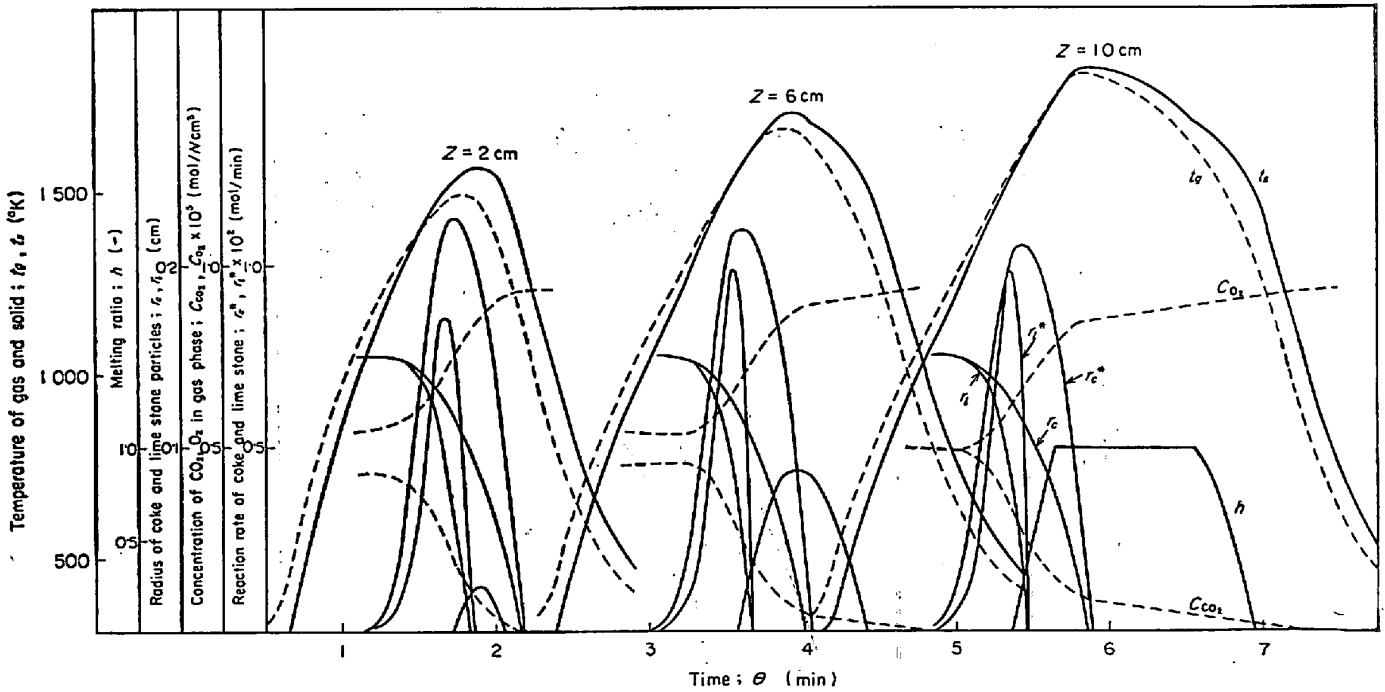


Fig. 9. Calculated results obtained according to this mathematical model from Run No 8 data in Table 1.

が決められることが必要である。点火炉，保熱炉も単に着火のみでなく，ガス側からの熱量供給による粉コークスの節減，さらに表層部の熱履歴改善による歩留の向上をはかるといふ観点から検討される必要がある。

6. 結 言

鉄鉱石の溶融・凝固過程をあらわす式を作成した。この溶融・凝固の式と石灰石分解反応速度式⁹⁾を従来より報告されている数学的モデル³⁾に組み入れた。その結果層内固体温度分布と石灰石反応速度および鉄鉱石の融解率の時間的変化の関係が明白になった。

また石灰石の反応と鉄鉱石の溶融・凝固を考慮して，保熱条件が変化したときに，層内固体温度分布に及ぼす影響についても考察した。

さらに連立の非線形偏微分方程式の数値解法についても考察を行なった。

最終にこの研究を進めるにあたって，ご指導いただいた名古屋大学鞭教授に厚く感謝いたします。

記 号

A_s : 層単位体積当たりの伝熱面積	($\text{cm}^2/\text{cm}^3(\text{bed})$)
C_{CO_2} : 炭酸ガス濃度	($\text{mol}/N\text{cm}^3$)
$C_{\text{CO}_2}^*$: 分解反応平衡濃度	($\text{mol}/N\text{cm}^3$)
C_g : ガス比熱	($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
C_{N_2} : 気相中窒素濃度	($\text{mol}/N\text{cm}^3$)
C_{O_2} : 気相中酸素濃度	($\text{mol}/N\text{cm}^3$)
$C_{\text{O}_2,0}; C_{\text{O}_2,1}$: 第一次，第二次点火酸素濃度	($\text{mol}/N\text{cm}^3$)
C_s : 固体比熱	($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
D_{CO_2} : 空気中炭酸ガス拡散係数	(cm^2/min)
D_g : 拡散係数	(cm^2/min)
D_s : 炭酸ガス粒内拡散係数	(cm^2/min)
d_p : 平均粒子径	(cm)
$f_m(t_s)$: 原料溶融曲線	($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
G : ガス質量速度	($\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$)
H : 溶融を表わす変数	(kcal/kg)
Hm_0 : 原料の溶解熱	(kcal/kg)
$Hm(t_s)$: 原料に特有な溶解熱分布曲線	(kcal/kg)
H_w : 水分の蒸発潜熱	(kcal/kg)
h : 原料の溶解率	($-$) ($= (Hm_0 - H)/Hm_0$)
h_p : 粒子-流体間伝熱係数	($\text{kcal}/\text{cm}^2\text{min}\cdot^\circ\text{C}$)
$i = 1$: コークス粒子に関する添字	($-$)
$i = 2$: 石灰石粒子に関する添字	($-$)
j : 時間のきざみに関する添字	($-$)
K : 石灰石分解反応平衡定数	(atm)
k : 層内距離のきざみに関する添字	($-$)

k_f : ガス境膜内物質移動係数	(cm/min)
\bar{k}_c : コークス総括反応速度定数	(cm/min)
k_g : ガス相熱伝導度	($\text{kcal}/\text{cm}\cdot\text{min}\cdot^\circ\text{C}$)
k_l : 化学反応速度定数	(cm/min)
\bar{k}_l : 石灰石分解総括反応速度定数	(cm/min)
M_j : i 成分の分子量	(kg/mol)
m_c : コークス配合率 (wt%)	($-$)
m_l : 石灰石配合率 (wt%)	($-$)
n_c : コークス粒子数	($1/\text{cm}^3(\text{bed})$)
n_l : 石灰石粒子数	($1/\text{cm}^3(\text{bed})$)
n_s : 全粒子数	($1/\text{cm}^3(\text{bed})$)
R : ガス定数	(kcal/mol)
R_c^* : コークス反応速度	($\text{mol}/\text{cm}^3\cdot\text{min}$)
R_l : レイノルズ数	($= Gd_p/\mu$) ($-$)
R_l^* : 石灰石反応速度	($\text{mol}/\text{cm}^3\cdot\text{min}$)
r_c : コークス粒子半径	(cm)
r_l : 石灰石分解面の中心よりの距離	(cm)
r_{l_0} : 石灰石粒子外半径	(cm)
r_c^* : コークス反応速度	(mol/min)
r_l^* : 石灰石分解反応速度	(mol/min)
r_m^* : 溶融(凝固)速度	($\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{min}$)
r_w^* : 乾燥速度	($\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{min}$)
S_c : シュミット数	($= \mu/\rho_g\cdot D_g$)
S_h : シャーウッド数	($= k_f d_p/D_g$)
t_g : ガス温度	($^\circ\text{K}$)
$t_{g,0}; t_{g,1}$: 第一次，第二次点火温度	($^\circ\text{K}$)
$t_{m_1}; t_{m_2}$: 鉄鉱石の溶融開始温度，終了温度	($^\circ\text{K}$)
t_s : 固体温度	($^\circ\text{K}$)
u : ガス層内速度	(cm/min)
$w_c; w_l$: 限界，平衡含水率	($\text{kg}-\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$)
w_g : 絶対湿度	($\text{kg}-\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$)
w_s : (固相内)含水率	($\text{kg}-\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$)
$w_{s,0}$: 初期含水率	($\text{kg}-\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$)
$Z, \Delta Z$: 層内距離，きざみの大きさ	(cm)
ε : 層空間率	($-$)
ε_p : 気孔率	($-$)
$\theta; \Delta\theta$: 操業時間，きざみの大きさ	(min)
θ_1 : 点火時間	(min)
θ_2 : 第二次点火終了までの時間	(min)
μ : ガス粘度	($\text{kg}/\text{cm}\cdot\text{min}$)
ξ : 迷宮度因子	($-$)
ρ_c : コークス粒子見掛密度	(kg/cm^3)
ρ_l : 石灰石粒子見掛密度	(kg/cm^3)
ρ_g : ガス密度	($\text{kg}/N\text{cm}^3$)
ρ_s : 固体見掛密度	(kg/cm^3)

ρ_{sB} : 層かさ密度 (kg/cm³(bed))

文 献

- 1) 浅田, 大森, 三本木: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 15
19
- 2) 佐々木, 中沢: 鉄と鋼, 54 (1968) 12, p.1217~
1225
- 3) 樋口, 鞭: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, p. 1171~1173
- 4) G. NARSIMHAN: Chem. Eng. Sci., 16 (1961),
p. 7~20
- 5) 原: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, p. 1179~1181
- 6) 杉山, 長坂: 化学工学, 25(1961)4, p. 265~273
- 7) 杉山, 架谷: 化学工学, 28(1964)5, p. 355~361
- 8) 杉山, 架谷: 化学工学, 29(1965)3, p. 158~165
- 9) 八木, 田村, 鞭: 日本金属学会誌, 31(1967) 2,
p. 102~109
- 10) 佐藤: 物性定数推算法, (1965), p. 125, p. 125
[丸善]
- 11) PERRY: Chemical Engineer's Handbook, Fourth
Ed., McGraw-Hill p. 3-69
- 12) 白井, 吉留: 化学工学, 29(1965)11, p. 880~884
- 13) P. N. ROWE, K. T. CRAXTON, and J. B. LEWIS:
TRANS. ICE, 43 (1965), p. T14
- 14) 藤田: 化学工学 I (1963), p. 322[東京化学同人]
- 15) BIRD, STEWART, and LIGHTFOOT: Transport
Phenomena, (1960), p. 593 [Wiley]
- 16) 児玉, 稲垣, 肥田, 高橋: 鉄と鋼, 53 (1967) 3,
p. 248~251
- 17) 犬井, 宮島, 木原: 現代応用数学講座 (偏微分方
程式の応用 I), p. 1 [岩波]
- 18) 赤坂: 数値計算, (1967), p. 377 [コロナ]
- 19) 高田: 日本機械学会誌, 71 (1968), p. 927~939
- 20) L. LAPIDUS: Digital Computation for Chemi-
cal Engineers (1962), p. 131 [Mcgraw-Hill]
- 21) 触媒学会編: 触媒工学講座 3 (1967), p. 99
[地人]
- 22) A. ACRIVOS: IEC., 48 (1956), p. 703
- 23) 森口, 高田: 現代応用数学講座 (数値計算法 II)
p. 114 [岩波]
- 24) 久保田, 明島: 化学工学, 28 (1964) 4, p.284~
289
- 25) 久保田, 山中: 化学工学, 31 (1967) 10, p. 951
~955
- 26) L. O. GONZALEZ and E. H. SPENCER: Chem.
Eng. Sci., 18 (1963), p. 753~766
- 27) N. E. SEDOROV and V. K. ANTONOV: Stal in
English (1960), P. 715~719
- 28) A. BASHKOV and V. M. ROMANOV: Stal in
English (1966) 2, p. 90~92
- 29) W. DAVIS: International Mineral Dress. Cong.,
Stockholm (1957), p. 305
- 30) 鞭, 樋口: 鉄と鋼, 56 (1970) 3, p. 371