

給鉍装置を用いて垂直下降流による実験を行なった。還元温度 900°C における結果を Fig. 6 に示す。比較のため前述の上昇流還元における Fe₂O₃ 1 モル当りの H₂ モル数が 17.1~73.4 と大きい場合をも示した。この図からモル比が 4.27, 2.82, 1.70 と小になる割合に還元速度の低下の割合は少ない。とくにモル比 2.82 までの還元速度の低下は小さいことがわかる。われわれの行なった流動還元実験においてモル比として 0.5~1.0 のとき還元率 90% に達するのに 30~60 min を要したとことと比較して輸送層還元の反応の迅速でありガス利用率の高いことが推察された。

6. 結 言

以上の実験結果からつぎのことが明らかとなつた。

- (1) 輸送層還元によつて微粉鉍石を焼結させることなく迅速に還元することができた。
- (2) その機構は 600~800°C では界面における化学反応が律速であり 850°C 以上ではガス境膜の影響があらわれた。
- (3) 鉍石当りのガス量が小になつても還元速度の低下の割合は少なくガス利用率は高い。

文 献

- 1) W. A. LLOYD et al.: Industrial and Engineering Chemistry, 53 (1961), p. 19
- 2) N. J. THEMELIS et al.: A. I. Ch. E. Journal, 8 (1962), p. 437

焼結炉の数学的モデル*

名古屋大学工学部

樋口 充蔵・工博 鞭 巖

Mathematical Model of Sintering Bed

Jyuzō HIGUCHI and Dr. Iwao MUCHI

1. 緒 言

焼結鉍は高炉原料として次第に重要視されるようになってきている。焼結炉に関連した研究は、層内における現象が複雑なために、理論解析の発表が少なく、実験研究が主流をしめている現状である。焼結炉の理論的取扱はガスと粒子の熱交換に着目した研究¹⁾があるが反応については考慮されていない。廃触媒の再生炉についてはコークスの燃焼反応を考慮した理論解析が発表されているが²⁾³⁾、これらの研究でも水分の乾燥については考慮されていない。本研究においては焼結炉の主要な反応として、コークスの燃焼速度を基礎式に組み入れ、さらに粒子の乾燥過程についても理論式を誘導して、これらを電子計算機(HITAC5020E)によつて同時に解いて数値解を得た。

2. 理 論 式

理論展開にあつて、次の仮定をおく。

- i. 熱伝導とふく射伝熱を無視する。
- ii. 粒子の融解と凝固過程は考慮しない。
- iii. 反応はコークスの燃焼反応だけを考慮する。
- iv. コークスや鉄鉍石の熱的諸性質はこれらの平均値を採用する。
- v. 反応熱はすべて粒子の温度変化に寄与するとする。

- vi. 乾燥は恒率期間と減率第一段階とで記述する。
- vii. 粒径が小さいために、粒子温度は均一とする。

2.1 燃焼反応を伴う場合

粒子側、ガス側についての熱および物質収支より

$$-\partial(GC_g t_g)/\partial Z - 6(1-\epsilon)h_p(t_g - t_s)/d_p = \partial(\epsilon \rho_g C_g t_g)/\partial \theta \dots\dots\dots (1)$$

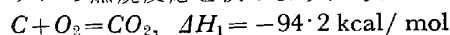
$$6(1-\epsilon)h_p(t_g - t_s)/d_p + R_1^*(-\Delta H_1^*) = \partial\{\rho_s C_s(1-\epsilon)t_s\}/\partial \theta \dots\dots\dots (2)$$

$$\partial(GC_0 f/\rho_g)/\partial Z - R_1^* = -\partial(\epsilon C_0 f)/\partial \theta \dots\dots\dots (3)$$

$$-\partial(\rho_c 4\pi r^3/3M_c)/\partial \theta = R_1^*/n_c \dots\dots\dots (4)$$

$$R_1^* = n_c 4\pi r^2 \bar{k}_s C_0(1-f) \dots\dots\dots (5)$$

コークスの燃焼反応を次のように考える。



総括反応速度定数として、 $\bar{k}_s = 1/(1/k_1 + 1/k_f)$

k₁ は反応速度定数であり、文献⁴⁾によれば

$$k_1 = 4.32 \times 10^8 e^{-4400/RT} / \sqrt{T} \dots\dots\dots (6)$$

境膜内物質移動係数 k_f は次式⁵⁾で求められる。

$$Sh = 2.0 + 0.60(Re)^{1/2}(Sc)^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

2.2 乾燥過程

焼結プロセスにおいては、燃焼帯のほかに乾燥帯の存在が認められている。本研究においては減率第2段階の影響は小さいものとしてこれを無視し、恒率期間と減率第一段階だけを考える。乾燥過程を伝熱の面から解析する。

2.2.1 恒率乾燥期間

(1) 式のほかに

$$-\partial(GW_g)/\partial Z + 6(1-\epsilon)h_p(t_g - t_s)/(\Delta H_2 \cdot d_p) = \partial(\epsilon \rho_g W_g)/\partial \theta \dots\dots\dots (8)$$

$$-\partial W_s/\partial \theta = 6h_p(t_g - t_s)/(\Delta H_2 \cdot d_p \rho_s) \dots\dots\dots (9)$$

2.2.2 減率乾燥期間

(1) 式のほかに

$$-\partial(GW_g)/\partial Z + 6(1-\epsilon)h_p(t_g - t_s)(W_s - W_e)/(\Delta H_2 \cdot \rho_s d_p)(W_c - W_e) = \partial(\epsilon \rho_g W_g)/\partial \theta \dots\dots\dots (10)$$

$$-\partial W_s/\partial \theta = 6h_p(t_g - t_s)(W_s - W_e)/(\Delta H_2 \cdot \rho_s d_p)(W_c - W_e) \dots\dots\dots (11)$$

$$\partial t_s/\partial \theta = 6h_p(t_g - t_s)(W_c - W_e)/(d_p \rho_s C_s)(W_c - W_e) \dots\dots\dots (12)$$

粒子の温度は減率期間を通じて変化するが、恒率期間中は一定にとどまっている。

2.2.3 境界条件と諸数値

境界条件はこの微分方程式についての特性曲線上で与えられる。すなわち特性曲線は

$$x = 6(1-\epsilon)h_p Z/d_p C_g G \dots\dots\dots (13)$$

$$y = \{6h_p/(d_p \rho_s C_s)\} \cdot (\theta - \epsilon \rho_g Z/G) \dots\dots\dots (14)$$

境界条件は次のようになる。

$$y = 0, x \geq 0, t_s = t_{s0}, r = r_0 \dots\dots\dots (15)$$

$$x = 0, y \geq 0, t_g = t_{g0}, f = f_0 \dots\dots\dots (16)$$

充填層での圧損失に関する実験式⁷⁾から、約600°Kでの物性値を用いて、ガスの質量速度を計算したところ実測と大体一致した。点火炉内でのガス温度についての計算例も発表⁸⁾されているが、ここでは供給される燃料ガスおよび空気量から、点火炉内のガス温度と組成を推算した。粒子一流体間伝熱係数は次式⁵⁾で求められる。

$$Nu = 2.0 + 0.60(Re)^{1/2} \cdot (Pr)^{1/3} \dots\dots\dots (17)$$

その他の物性定数は文献⁹⁾¹⁰⁾によつた。

* 第73回講演大会にて発表 講演番号20 昭和42年5月10日受付

Table 1. Data for calculation.

Run	No. 1	No. 2
d_p	0.36	0.34
f_{01}	0.4	0.3
f_{02}	0.15	0.2
G	5.17×10^3	5.17×10^3
m_c	0.03	0.03
r_0	0.18	0.17
t_{s0}	300	300
t_{g01}	1300	1300
t_{g02}	1000	1100
ε	0.45	0.40
ρ_s	4.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}
W_{s0}	—	0.15
W_{g01}	—	0.014
W_{g02}	—	0.010
W_c	—	0.05
W_e	—	0.0
Δz	0.10	0.05
$\Delta \theta$	0.05	0.05

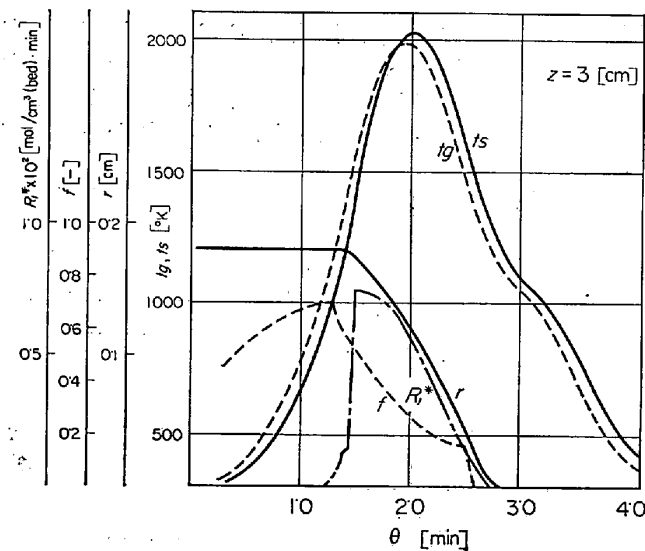


Fig. 1. Analytical results obtained according to our mathematical model from No. 1 data, where, t_g, t_s : temperatures of gas and solid particles, r : radius of coke particles, f : fractional conversion of oxygen, R_1^* : combustion rate of cokes.

なお、操業データはA社のものを使用した。

t_{g01}, t_{g02} はそれぞれ第1次、第2次点火中のガス温度を示す。 m_c は配合コークスの重量比である。

3. 計算結果と考察

この計算では物性定数の温度変化を考慮して、反応速度は(5)式を使って、基礎式と境界条件を差分近似して数値計算を行なった。Table 1のRun No. 1についての結果がFig. 1, 2であり、No. 2についての結果がFig. 3, 4である。

Fig. 1は層頂より3cmにおける位置での時間的変化を示す。実線が粒子側、破線がガス側の変化、鎖線は燃焼速度を表わしている。コークス粒子径の変化は、反応速度定数とガス中酸素濃度が一定ならば、理論的には直線的に減少することになるが、図ではほぼ直線に近い変

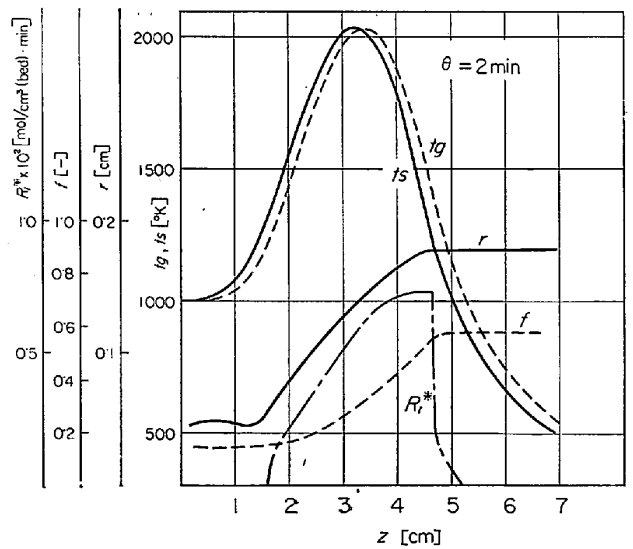


Fig. 2. Longitudinal distributions of process variables at $\theta=2$ min, where the effects of drying process are neglected.

化を示している。ガスの酸素転化率 f の曲線で2個の折点が現われているが、これは第1次と第2次点火終了時の条件の急変によるものである。Fig. 2は、同じ条件で計算した結果を、点火時より2min後における層内位置について示した分布である。すなわち、この時間には燃焼帯の温度の極大点約3.5cmの位置にある。この位置より上方では粒子はすでに反応の最盛期をすぎて、ガスにより冷却を受けていることがわかる。燃焼速度の分布は温度よりもむしろコークス粒径変化と類似の傾向を示している。これは温度が1500°K以上では反応は境界内拡散律速の範囲にあるので、温度の影響よりも粒子径の影響の方が強くあらわれるためと推察される。なお、コークス粒子は $Z=1.5$ cm位の所までは残留する

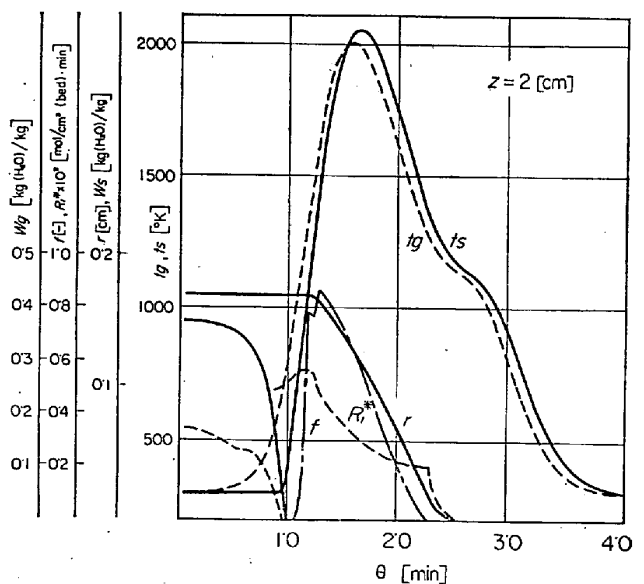


Fig. 3. Analytical results obtained according to our mathematical model from No. 2 data, where, W_s : moisture content of solid particles, W_g : humidity of gas.

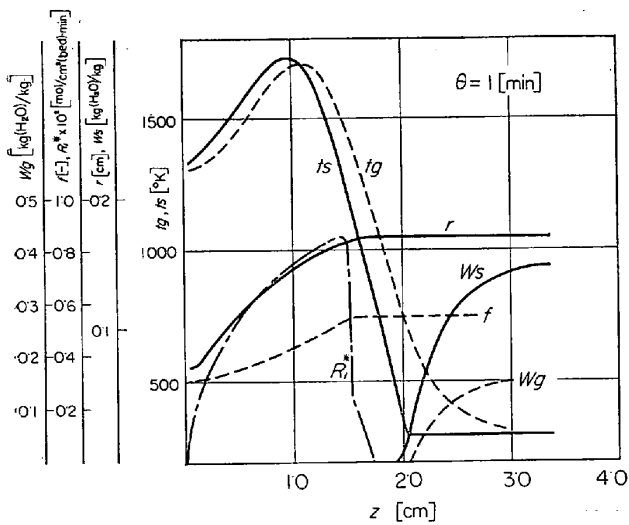


Fig. 4. Longitudinal distributions of process variables at $\theta=1$ min, where the effects of drying process are considered.

ことをグラフは示している。

Fig. 1, 2 では乾燥を考慮しない場合であるが, Fig. 3, 4 は No. 2 の値を用いて, 乾燥を考慮して計算した結果である。Fig. 3 は層頂より 2cm における分布を示している。粒子中の水分がなくなると直ちに温度は急激な上昇を示し, 乾燥を考慮しない場合よりもかなり著しくなっている。しかし乾燥終了後の各数値の分布には顕著な相違は認められない。Fig. 4 は $\theta=1.0$ min 後の層内分布を示した。乾燥帯は燃焼帯と同じくらいの中をもつて存在することがわかる。

4. 結 言

焼結過程についてコークス燃焼反応と乾燥過程を表わす連立の基礎偏微分方程式を誘導し, 差分計算の結果得られた安定な数値解の例を Fig. 1~4 に示した。これより, 粒子とガスの温度, 酸素ガスの濃度, コークス粒子の半径と反応速度, 粒子の含水率とガスの湿度の層内における位置的变化あるいは時間的变化が明らかとなった。この種の解析結果は焼結炉の実際操業条件の決定に当って有用になるものと思われる。

本研究の遂行にあたり焼結炉のデータをご提供いただいた富士製鉄(株)に感謝いたします。

記 号

- C_g, C_s : ガス, 粒子の比熱 [kcal/kg·°C]
- C_0 : 送風ガス中の酸素濃度 [mol/cm³]
- d_p : 平均粒子径 [cm]
- D : ガス中酸素拡散定数 [cm²/min]
- f : 酸素ガス転化率 [-]
- G : ガスの質量速度 [kg/cm²·min]
- h_p : 粒子-流体間伝熱係数 [kcal/cm²·min·°C]
- ΔH_1 : コークスの燃焼熱 [kcal/kg]
- ΔH_2 : 水の蒸発潜熱 [kcal/kg]
- k : ガス熱伝導度 [kcal/cm·min·°C]
- \bar{K}_s : 総括反応速度定数 [cm/min]
- M_c : 炭素の分子量 [g/mol]
- n_c : コークス粒子数 [1/cm³(bed)]
- N_u : ヌセルト数 ($=h_p \cdot d_p/k$) [-]

- P_r : プラントル数 ($=C_g \cdot \mu/k$) [-]
- r : コークス粒子半径 [cm]
- R_1^* : コークスの燃焼速度 [mol/cm³(bed)·min]
- R_e : レイノルズ数 ($=G \cdot d_p/\mu$) [-]
- S_c : シュミット数 ($=\mu/\rho \cdot D$) [-]
- Sh : シャーウッド数 ($=k_f \cdot d_p/D$) [-]
- t_g, t_s : ガス, 粒子の温度 [°K]
- W_g : ガスの湿度 [kg(H₂O)/kg(dry gas)]
- W_s : 含水率 [kg(H₂O)/kg(dry solid)]
- W_c, W_e : 限界, 平衡含水率 [kg(H₂O)/kg(dry solid)]
- Z : 層頂からの層内距離 [cm]
- ϵ : 空間率 [-]
- θ : 時間 [min]
- μ : ガスの粘度 [kg/cm·min]
- ρ_c, ρ_s : コークス, 鉍石の粒子密度 [kg/cm³]
- ρ_g : ガス密度 [kg/cm³]

文 献

- 1) 深川, 石川, 野口, 楯岡: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 338
- 2) G. F. FROMENT, et al.: C.E.S., 17 (1962), p. 835
- 3) L. O. GONZALEZ and E. H. SPENCER: C.E.S., 18 (1963), p. 753
- 4) LEVENSPIEL: "Chemical Reaction Engineering", Wiley, N. Y., (1962), p. 356
- 5) P. N. ROWS, et al.: Trans I. C. E., 43 (1965), p. T14
- 6) A. ACRIVOS: I. E. C., 48 (1956) 4, p. 703
- 7) S. ERGUN: C. E. P., 48 (1952) 2, p. 89
- 8) 古賀, 石川, 小林, 渡辺: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1330
- 9) J. H. PERRY, et al.: "Chemical Engineer's Handbook", Mcgraw-Hill, 4th. ed., (1963)
- 10) 化学工学協会編: "化学工学便覧" 丸善, (1958)

高炉内付着物の鉍物組成と生成機構について*

八幡製鉄東京研究所

理博 近藤真一・佐々木稔・中沢孝夫

On the Mineral Composition and the Formation Mechanism of Scaffolding at the Blast Furnace Shaft

Dr. Shin-ichi KONDO, Minoru SASAKI and Takao NAKAZAWA

1. 緒 言

高炉の操業技術の進歩に伴って, 最近とくに炉内付着物が与える影響に大きな関心が払われるようになったが, それとともにいろいろな角度から付着物の生成原因を究明するための努力がなされている。高炉内付着物は金属鉄やコークスを随伴しているが, 主体は珪酸塩鉍物

* 第73回講演大会にて発表 講演番号30 昭和42年5月9日受付