

が、将来の原燃料事情、地球環境問題などを考慮すると、今後これらの点に関して制約、問題の少ない新プロセスの開発が望まれる。

NKK では純酸素送風により微粉炭の多量吹き込みを可能とした酸素高炉法を開発し、試験高炉規模でその実証試験を行った。また住友金属工業(株)では羽口から微粉炭と同時に粉鉱石を直接、炉内に吹き込む試みが実施された。また抜本的な新プロセスとして現在、各国で精力的に熔融還元法が開発が進められつつあり、日本では DIOS 法のパイロットプラント試験 (500 t/d 規模) が平成 5 年 10 月より開始された。諸外国では豪州の HIsmelt 法、米国の AISE 法、欧州の CCS

法の開発も進捗しつつある。コークス炉に関しても同様な背景から、次世代コークス炉の構想造りもなされている。炉室コークス炉の大型化の極限を狙ったものとしてドイツでは JCR が提唱され、パイロット試験が平成 5 年より開始されている。また日本でも急速加熱、中温乾留、CDQ 内改質を組み合わせたプロセスの事前研究がナショプロとして平成 6 年度から始まり、将来のコークス炉の改修の際にも適用しうるものとして注目されている。

以上のように将来の製鉄プロセスのつながる技術がこの 10 年の間にも生まれつつあり、今後の展開が期待される。

2.2 高炉内の気固液粉体の移動現象理論の展開

高炉内では気体、液体、粉体の流れに加え、重力により充填粒子が降下運動をするので、4 相の流体が存在する。これら 4 流体の運動は相互に運動量、物質、熱の交換という形で影響しあいながら移動している。高炉の安定操業の確保や操業効率の改善のため、プロセス内における各相の流動状態を予知することは極めて重要であり、モデル化とシミュレーションに関する研究が進められている¹⁾。

歴史的には、高炉のプロセス解析は実炉の直接調査やワールドモデル実験による炉内現象の把握とともに進歩してきた。初期における高炉の解析は区分的熱収支法に基づいていたが、その後移動現象論に基づく方法が主流となり、コンピュータならびに数値計算法の進歩とともに 1 次元モデルからの多次元化、および、定常モデルからの非定常モデル化が進められてきた。近年、高炉への微粉炭の多量吹き込みの進展に伴い、4 相の移動現象を記述するため、連続の式と運動の方程式に基づく統一的な 4 流体モデルが提案されている。

2.2.1 4 流体の流れの定式化

4 流体が共存する充填層において、各流体の占有率を容積分率 ε により表すと、次式が成立する。

$$\varepsilon_g + \varepsilon_f + \varepsilon_l + \varepsilon_s = 1 \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

この 4 流体モデルにおいては、運動の方程式について数値解を得ることを可能にするため、Navier-Stokes の式に基づく連続体モデルが採用されている。

連続の式:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_m \rho_m) + \nabla \cdot (\varepsilon_m \rho_m \mathbf{u}_m) = \sum_i \sum_k S_{m,i}^k \quad (m = g, f, l, s, \quad k \neq m) \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

$\sum_i \sum_k S_{m,i}^k$ は変化経路 "i" による k 相からの湧き出しあるいは吸い込み項で、ガス相の連続の式の場合には ($m = g$)、液

相、粉体相、粒子相による物理・化学変化によって生じる。他の 3 相の連続の式も同様に取り扱われている。

運動の方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon_m \rho_m \mathbf{u}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_m \rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m) \\ = \nabla \cdot (\varepsilon_m \mu_m \nabla \mathbf{u}_m) - \varepsilon_m \text{grad } P_m + \sum F_m^n + \varepsilon_m \rho_m \mathbf{g} \\ (m = g, f, l, s, \quad n = g, f, l, s, \quad n \neq m) \dots\dots\dots(2-3) \end{aligned}$$

式中の F_m^n は相間の相互作用項であり、(2-4)~(2-12) 式で表されている。

充填層中のガス流れの場合、充填粒子とガスの相互作用力 F_g^s は (2-4) 式で示される Ergun の関係式で与えられる。

$$\begin{aligned} F_g^s = - \left[150 \mu_g \cdot \frac{a_{gs}^2}{36 \varepsilon_g} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) \right. \\ \left. + 1.75 \rho_g a_{gs} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s| \right] \dots\dots\dots(2-4) \end{aligned}$$

気液間の相互作用力は抵抗係数を用いて (2-5) 式で表されている。

$$F_g^l = - \frac{a_{gl}}{a_{gl} + a_{sl}} \left[\frac{3}{4} C_d \rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l) / d_l \right] \dots\dots\dots(2-5)$$

粉体とガス間の相互作用力は抵抗係数 C_d および空間率関数 (2-7) 式を用いて (2-6) 式で与えられる。

$$F_g^f = - \frac{3 C_m \rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_f| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_f) \varepsilon_f}{4 \phi_f d_f} \dots\dots\dots(2-6)$$

$$C_m = \varepsilon_g^{-4.7} C_d \quad \dots\dots\dots(2-7)$$

$$\left. \begin{aligned} C_d &= 24 / \text{Re}_p & \text{Re}_p < 1.0 \\ C_d &= (24 / \text{Re}_p) (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.69}) & 1.0 < \text{Re}_p < 10^3 \\ C_d &= 0.44 & 10^3 < \text{Re}_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2-8)$$

粉体と充填粒子間の相互作用力 F_f^s は (E-9) 式で与えられる。

$$F_f^s = - \left[\frac{1}{2D} \rho_f \varepsilon_f |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s) F_k \right] \dots\dots\dots(2-9)$$

ここで、 F_k は Fr 数の関数で次式により与えられる。

¹⁾ 高炉下部における移動現象、特定基礎研究会充填層中の気固液移動現象部会、1992 年参照

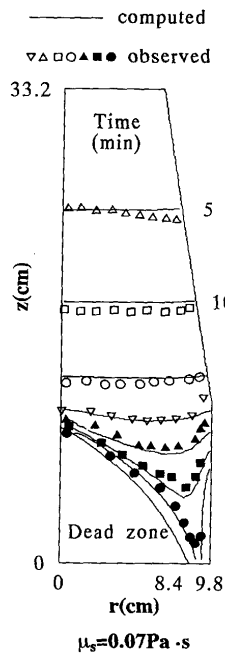


Fig. 2.2. Simulation result of timelines for packed particles descent by gravity. (ISIJ Int., 33 (1993), p. 664)

$$F_k = \begin{cases} 10.5/Fr^{1.33} & (\text{鉛直方向}) \\ 14.98/Fr^{1.33} & (\text{水平方向}) \end{cases} \dots\dots\dots(2-10)$$

充填粒子-液体間の相互作用力 F_l^s は次式で与えられる。

$$F_l^s = - \left[\frac{180 \{ \epsilon_s + \epsilon_l(s) \}^2 \mu_s \epsilon_l^2}{d_s^2 \{ \epsilon_l + \epsilon_l(s) \}^3} \right] (u_l - u_s) \dots\dots\dots(2-11)$$

気相中の粉体と液体の相互作用力 F_l^l については、現在のところ適当な推定方法が報告されていない。

添え字を交換した相互作用項は符号を換えるのみで(2-12)式のように表される。

$$F_m^k = F_k^m \dots\dots\dots(2-12)$$

固体流れについては固体粒子間相互の影響を考慮するため固相粘度を導入しており、 μ_s の値は実験的に決める必要がある。

$$F_s^s = \epsilon_s \mu_s \nabla^2 u_s \dots\dots\dots(2-13)$$

なお、高炉下部現象解明のため熱の移動、化学反応などについても速度論的研究が進められている。

2.2.2 気固液の单相流れ

充填層中のガスの流れについては Ergun 式に移流項を考慮した式により表現されるのが通常であり、高炉内ガス流れ解析への応用も多く報告されている。炉下部におけるようにガスの主流が急激に方向を変化させるような場合には移流項の重要性が増す。

高炉内における充填粒子の降下運動については模型実験による結果に基づき、従来、ポテンシャル流れモデル、粘性流体モデル、Kinematic model、ならびに、粒状体モデルなどが目的に応じて使用されている。ポテンシャル流れモデルを用いた解析例では高炉シャフト部で良好な推算結果を得てい

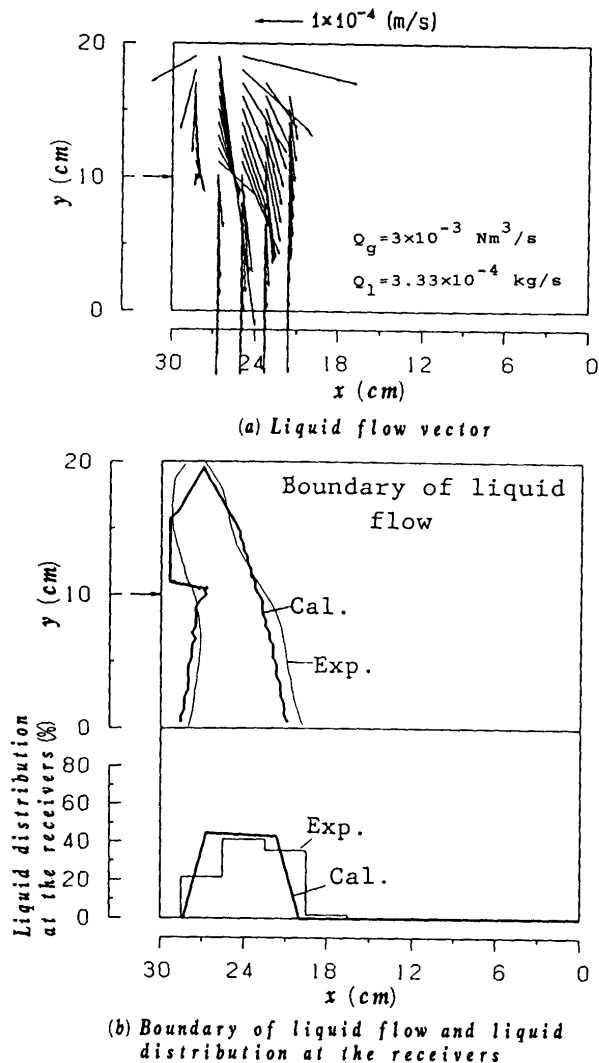


Fig. 2.3. Comparison of measured liquid flow distribution with computed one by the probability-continuous model. (Tetsu-to-Hagané, 77 (1991), p. 1585)

るが、シャフト下端から下方では受動応力状態となるために、Navier-Stokes 式の外力項として Ergun 式に基づく流体抵抗力を考慮し粘性流体近似した運動方程式で記述した方がより精度の高い速度場が得られることが報告されている。

(2-13) 式からわかるように固体-固体間の相互作用力 F_s^s を決定するためには、対象系における粘性係数 μ_s が必要である。砂を使った高炉模型による粒子の降下実験より得られた結果に基づき μ_s の値が求められている。計算結果の一例を Fig. 2.2 に示した。この計算では $\mu_s = 0.07 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ が妥当であることがわかる。

液流れについては、従来から、粘性流体モデル、および、確率モデルが提案されているが、プロセスの総合的解析のためには流速分布を求める必要があるが、確率モデルからは速度ベクトルを求めることができない。しかし、このモデルは液流れの流域をかなりの確に与える。この事実に基づき、連続体モデルと組み合わせ、確率モデルから流域を求め、得られた流域内で連続体モデルにより液体の流速分布を求める方

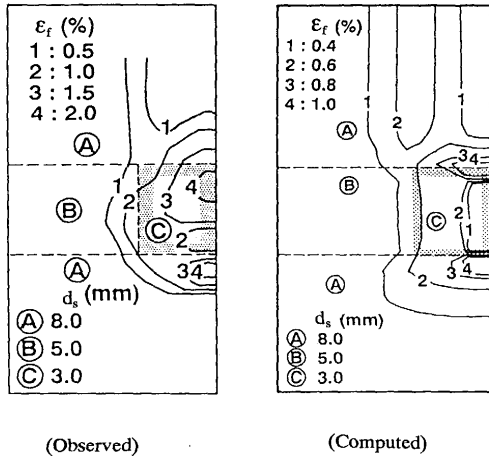


Fig. 2.4. Comparison between observed and computed distributions of powder hold up in two dimensional nonuniform packed bed. (*Tetsu-to-Hagané*, 77 (1991), p. 1267)

法が提案され、Fig. 2.3 に示すように冷間模型実験結果とよく一致することが報告されている。

2.2.3 4 流体の多相流れ

高炉への微粉炭の多量吹込みに関連して、充填層内における粉体の蓄積、滞留挙動の研究が進められている。充填層に粉体を吹き込んだ時のガス流速に対する圧力損失とホールドアップの測定から粉体とガス、および、粉体と充填粒子の相互作用力を求め、連続体モデルに基づき、不均一充填層内の粉体の蓄積挙動が推算されている。計算結果と実験結果の比較を Fig. 2.4 に示した。かなりよい一致が得られている。

充填層内気液向流流れのシミュレーションに前述の連続体-確率モデルが適用されている。確率モデルによって算出したガス吹き込みにより形成されるドライゾーンの推定結果は実験結果と良好に一致している。この結果に基づいて BFC (Boundary Fitted Coordinate) 法を用いて液体流れ領域のメッシュを作成し、領域内の流速分布を連続体モデルによって計算している。

充填層中における固気 2 相流の理論を進展させ、高炉やシャフト炉における粉体の挙動が研究され、移動層におけるダストに起因する棚吊りや高炉炉下部における粉体の蓄積挙動が明らかにされている。

移動層におけるダストの運動、蓄積についての研究においては、ダストの充填粒子への付着速度と充填粒子からの剥離速度を考慮して蓄積量を評価し、その結果に基づき空隙率を求め、ガスの圧力損失を推算している。また、移動層の棚吊りの発生はガスの圧力損失と充填粒子に作用する重力の大きさにより評価している。

移動現象論的モデルによる高炉の解析については 1 次元および 2 次元モデルがいくつか報告されているが、気・固・液・粉体の 4 相のうち 1 相あるいは 2 相に注目した研究がほとんどである。

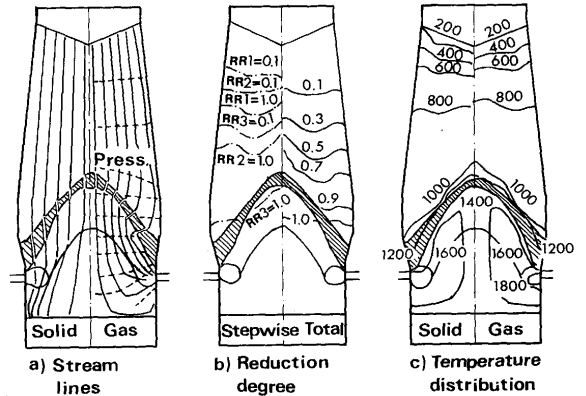


Fig. 2.5. Numerical simulation of a blast furnace process. (*CAMP-ISIJ*, 1 (1988), p. 22)

高炉の総合的なモデルには従来 1 次元モデルと 2 次元モデルが開発され実用化されている。1 次元モデルでは流れ現象より、反応や伝熱現象が重要視されているが、2 次元モデルにおいては不均一流れが重要な役割を果たす。しかし、総合的なモデルにおいては、温度分布や濃度分布も同時に推算するため熱移動や化学反応も考慮しなければならない。したがって、必ずしも最新の研究に基づく流動方程式が組み入れられているとは限らない。現段階で総合的にみて高炉の炉内状況を最もよく表現できると考えられる杉山らのモデルは運動の方程式として、ガス流れについては Ergun の式、充填粒子の降下挙動にはポテンシャル流れの式、液流れには Darcy の式にガス流れの影響を組み入れた式を採用している。さらに、このモデルには伝熱、物質移動の基礎式ならびに化学反応の速度も含まれている。計算結果の一例を Fig. 2.5 に示した。ガス、固体、液体（スラグ、溶銑）の流線、ガスの等圧線など 3 相の流れに関するもののほかに鉍石の反応率分布やガス・固体の温度分布も同時に算出されている。これら 3 相の流れは相互に影響を及ぼし合っているが、特に温度や反応率の分布が融着層の形状を初めとする充填構造を変化させることによる 3 相の流動に及ぼす影響が顕著であり、融着層の近傍に流れの急激な変化が現れるという結果になっている。

4 流体を考慮した高炉の数学的モデルの数値解は現段階ではまだ求められていないが、日本鉄鋼協会特定基礎共同研究会「4 流体の移動現象部会」で、このテーマについて取り組んでいるので近い将来結果が示されることが期待されている。

記号

- a_{ij} : 層単位体積中の i, j 相の接触界面積 [m²/m³ (bed)]
- C_d : 抵抗係数 [-]
- D^k : 水力学的等価直径 (= $2\phi_s d_s \epsilon_g / 3\epsilon_s$) [m]
- d_p, d_f : 充填粒子と粉体の粒子径 [m]
- d_s : 随伴する粉体、液体も考慮した粒子径 [m]
- d_l : 液滴の直径 [m]
- Fr: 粉体の流れのフルード数 {= $u_f / (\sqrt{D^k g})$ } [-]

F_k : (2-10) 式で与えられる係数	[-]	t : 時間	[s]
F_j : i 相から j 相に及ぼす相互作用力	[N/m ³]	u_i : i 相の実速度 ($i=g, s, l, f$)	[m/s]
F_i : i 相内における応力項	[N/m ³]	z : 軸方向座標軸	[m]
g : 重力の加速度	[m/s ²]	ギリシャ文字	
P_m : m 相の圧力	[Pa]	ε_i : i 相の体積占有率 ($i=g, s, l, f$)	[-]
r : 円柱座標系における半径方向の座標軸	[m]	$\varepsilon_i(d), \varepsilon_i(s)$: 液体の動的および静的ホールドアップ	[-]
Re_p : 粒子レイノルズ数 ($=\phi_s d_s u_g \rho_g / \mu_s$)	[-]	μ_i : i 相の粘度 ($i=g, s, l$)	[Pa·s]
$\sum_i \sum_k S_{ij}^k$: 変化 i による k 相から j 相への質量の移動速度 ($k=g, s, l, f$ ただし $k \neq j$)	[kg/m ³ (bed)·s]	ρ_i : i 相の密度 ($i=g, s, l, f$)	[kg/m ³]
		ϕ_s, ϕ_f : 充填粒子と粉体の形状係数	[-]

2.3 新コークス製造技術の展開

2.3.1 はじめに

新コークス製造技術の開発は、既存炉の平均炉命が25年に達しており (Fig. 2.6), 次のコークス製造法の開発が少しずつ現実的になってきた。その最も大きな刺激は、国家プロジェクトとして推進された「成形コークス製造プロセス (FCP)」の開発とドイツで、単位炭化室容積を従来の6~7倍にする「JCR (Jumbo Coking Reactor)」の開発であろう。

一方基礎的な研究としては、1977年から始まった日本鉄鋼協会、特定基礎研究会の一連の石炭・コークスの基礎研究がある。この中で、1990年からは「コークス製造のための乾留制御」部会として、新しいコークス製造技術のシーズの発掘に努めた。その結果を基にして、「次世代コークス製造技術の開発」が1994年から国家プロジェクトとして推進されている。

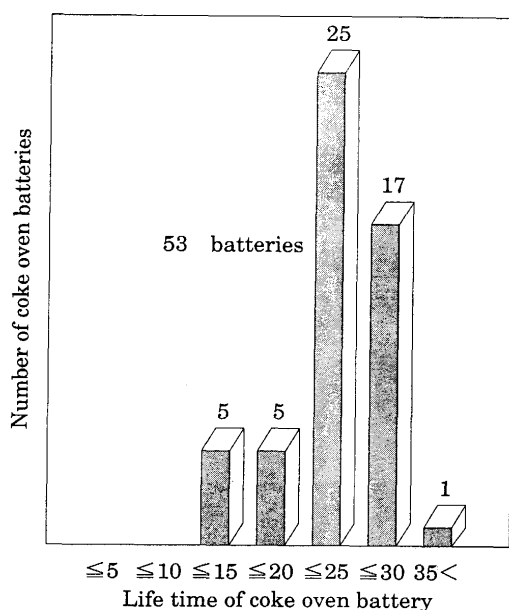


Fig. 2.6. Distribution of life time of coke oven batteries.

2.3.2 成形コークス製造法

バッチ式である室式コークス炉に対して、連続式成形コークス製造法は、環境規制への対応が容易なこと、高速乾留が行えるなどの利点があり、1960年代から1970年代にかけて世界中で数多く検討されが、日本鉄鋼連盟方式の成形コークスプロセス (FCP) が最も新しい。

このFCPは、国家プロジェクトとして、1978年から始まり、1980年から新日本製鐵(株)八幡製鉄所に200 t/dの設備 (Fig. 2.7) の建設を進め、1984年から3年間の操業試験を行った。操業試験は、9次にわたり延べ日数579日、総生産量は9.3万t、高炉使用試験用6.1万tのコークスを生産した。

高炉試験は、新日本製鐵(株)戸畑4高炉 (内容積4,250m³) で、1986年10月から翌年1月初めにかけて行われ最大30%まで使用できることを示した。

FCPでは、使用石炭の範囲が広いことが特徴であり、揮発分 (VM) 23~35%、粘結性 (C.I.) 50~70の配合炭を使用できる。これは、非・微粘結炭の使用量が65~100%の範囲にあることを示す。

NKKは、埋蔵量の比較的多い、高揮発分非粘結炭のFCPでの多量使用を検討し、2 t/dのマイルドチャー技術 (低昇

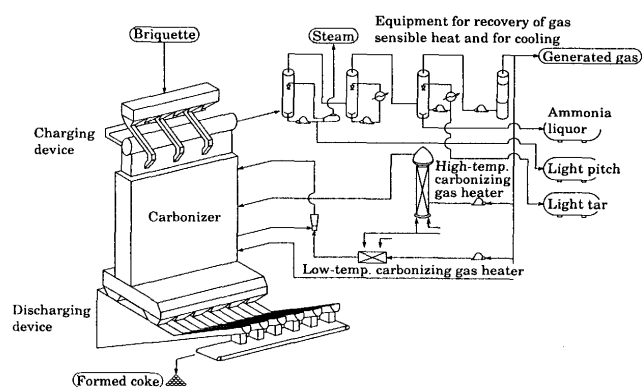


Fig. 2.7. Flowchart of the formed coke process. (M. Tateoka, et al.: 2nd Int. Cokemaking Cong., London, (1992))