

融着層シミュレーターによる高炉通気性に及ぼす コークス層厚の影響の評価

Evaluation of Effect of Coke Layer Thickness on Permeability in Blast Furnace by Using Cohesive Zone Simulator

市川 和平 ICHIKAWA Kazuhira JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員 (副課長)
廣澤 寿幸 HIROSAWA Toshiyuki JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
石井 純 ISHII Jun JFE スチール スチール研究所 環境プロセス研究部 主任研究員 (課長)

要旨

高炉の装入物分布制御にあたり、鉱石とコークスの層厚分布は重要な因子である。特にコークス層については融着帯の通気性を維持する下限値があることが知られているが、論理的な評価はなされていなかった。そこで本研究では融着層シミュレーターを開発し、本装置で得た結果を用いて融着帯の通気抵抗に及ぼすコークス層厚の影響を定量化することで、コークス層厚の低下により融着帯の通気抵抗が悪化することを明らかにした。この検討で得た知見を装入物分布設計に活用中である。

Abstract:

In controlling the burden distribution of blast furnace, layer thickness distribution of ore and coke is an important factor. Especially for coke layer, it is known that there is a minimum layer thickness to maintain the permeability of cohesive zone. Though, the minimum coke layer thickness had not been theoretically quantified. Therefore, in this study, the cohesive zone simulator was developed. By the results obtained by this simulator, the effect of coke layer thickness on permeability was quantified, and it was revealed that the decrease of coke layer thickness deteriorates the permeability of cohesive zone. The results obtained in this study are being utilized for burden distribution control.

1. はじめに

高炉では、コスト削減の観点から、コークス使用量の少ない低コークス比操業が求められる。一方で、コークスは、高炉内の通気性を確保するためのスペーサーの機能を有するため、低コークス比操業時には炉内圧力損失増加¹⁾およびそれに伴う吹抜け、スリップなどの問題が生じる²⁾。

さらに、コークス層厚下限の存在が指摘されている。Geerdes らは高炉炉腹部における高炉半径方向のコークス層厚は、少なくともコークス粒子3粒子ほど確保することが望ましいと指摘している³⁾。また、室蘭2高炉について、高炉炉腹部における平均塊コークス層厚が190 mm以下になると融着帯通気性が悪化することが示された¹⁾。

以上から、安定した低コークス比操業を達成するには一定のコークス層厚を維持し、特に融着帯における圧力損失を増加させないことが重要である。しかし、コークス層厚下限値を理論的に検討した例はなく、コークス層厚の下限値を決定するメカニズムを明らかにすることが課題であった。

千葉1高炉、川崎2、3高炉の高炉解体調査時の融着帯形状の測定結果によると、いずれの高炉も融着した鉱石層と

コークス層が交互に存在している^{4,5)}。融着した鉱石は高通気抵抗であるため⁶⁾、ガスは融着した鉱石層を流れずコークス層に対し水平方向に流れると考えられる。このことから、コークス層厚が融着帯の圧力損失に与える影響を評価するには、コークス層に水平にガスを流せる反応装置が必要である。

従来、融着帯の鉱石軟化溶解挙動を模擬した、圧力損失の評価に用いられている荷重軟化試験装置は、融着鉱石層に対して垂直方向に強制的にガスを流す装置構成であり⁶⁾、前述のような融着鉱石層とコークス層へのガス分配挙動を再現していない。岩永は、外筒にコークス層を、内筒に鉱石層を配置しコークス層と鉱石層へのガス分配を評価できる荷重軟化試験装置を開発したが⁷⁾、本装置も融着帯の水平方向のガス流れを再現するものではなく、コークス層厚の絶対値が融着帯の圧力損失に及ぼす影響を評価できていない。

以上の背景より、本研究では、試料層に対して水平方向にガスを流し融着帯のガス流れを模擬できる融着層シミュレーターを開発し、本装置を用いてコークス層厚が融着帯圧力損失に与える影響を評価した。

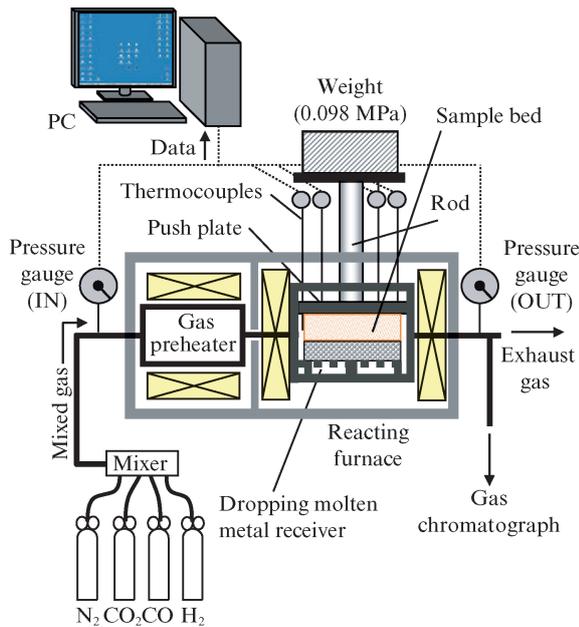


図1 融着層シミュレーターの概略図

Fig. 1 Schematic illustration of cohesive zone simulator

2. 融着層シミュレーターの開発⁸⁾

融着層シミュレーターの概略図を図1に示す。本装置はガス予熱炉と反応炉で構成する。ガス混合器で混合されたガスは予熱炉で加熱後、反応炉内に設置した黒鉛製の試料充填容器に流入する。容器内にはコークス層および鉱石層で構成する試料層を充填する。試料層の上部からは、押し蓋および押し棒を介して荷重を負荷できる。試料層にガスを流した際、押し蓋と試料充填容器の隙間からガスが漏洩することを防止するため、押し蓋上部に充填容器密閉用の蓋を設置した。また、実験中に生成した溶融物は、試料層下部の空洞に滴下できる構造とし、ガスがこの空洞を通り抜けまいよう、整流板を3箇所設置した。これらの機構により、試料充填容器内では、ガスが試料層のみを流れるようにした。炉体の前後に設置した圧力計、試料層内の温度を測定する熱電対、および試料層の収縮量を測定する変位計より得られたデータは、パソコンに取り込まれる。

以上のとおり、高炉融着帯におけるガス流れを再現した融着層シミュレーターを開発し、本装置を用いて融着帯通気性を評価した。

3. 通気抵抗に及ぼすコークス層の影響

3.1 実験方法および実験条件

融着層シミュレーターを用いて融着帯の圧力損失に及ぼすコークス層厚の影響を評価した。試料充填構造を図2に示す。実験では、コークス層厚を13, 20, 40 mmと変化させた。試料層の内寸は幅50 mm、長さ350 mmである。本

実験は融着帯での反応の調査を目的としているため、焼結鉱は、熱保存帯から流出する際の還元率を想定し33%まで予備還元したものを、1448 g用いた。コークスはコークス比が320 kg/t相当となるように302 g用いた。焼結鉱の平均粒径は5.5 mm、コークスの平均粒径は10 mmとした。試料層の上部から、高炉融着帯で原料にかかる荷重を想定し、0.098 MPaの荷重を加えた。図3にガス組成および昇温条件を示す。融着帯での鉱石溶融挙動を模擬するため、1000℃までN₂雰囲気中で昇温し、その後高炉ボッシュ部を想定したガス温度およびガス組成とした。

ガス流量は100 L/min. (S.T.P.)とした。ガス入側と出側にそれぞれ設置した圧力計で圧力を測定し、ガス流通時の融着帯圧力損失を求めた。また1400℃で実験を終えたサンプルの断面観察とEPMA分析を行った。

Coke layer thickness (mm)	Arrangement (Dimension:mm)	Note
13	350 (width), 20 (Ore), 13 (Coke)	Ore Coke
20	350 (width), 30 (Ore), 20 (Coke)	Ore Coke
40	350 (width), 60 (Ore), 40 (Coke)	Ore Coke

図2 試料層の充填条件

Fig. 2 Experimental conditions of packed bed

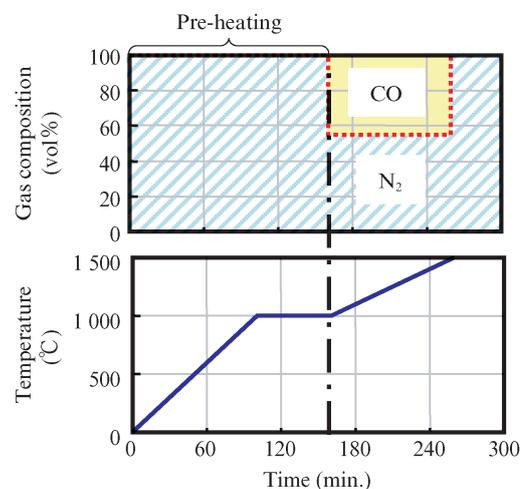


図3 ガス組成と温度の条件

Fig. 3 Experimental conditions of temperature and gas composition

3.2 実験結果

コークス層厚を 13, 20, 40 mm と変化させたときの圧力損失を測定した。図 4 にその変化を示す。いずれの条件でも温度上昇に伴い圧力損失が増加した。また 1300℃以上の温度では、コークス層厚が薄くなるほど圧力損失が増加した。

図 5 にコークス層と鉱石層の界面付近を顕微鏡および EPMA で観察した結果を示す。コークス粒子間に融着した鉱石が入りこんでいることが分かる。また、コークス層に入り込んでいる鉱石は Ca および Si を多く含んでいる。このこ

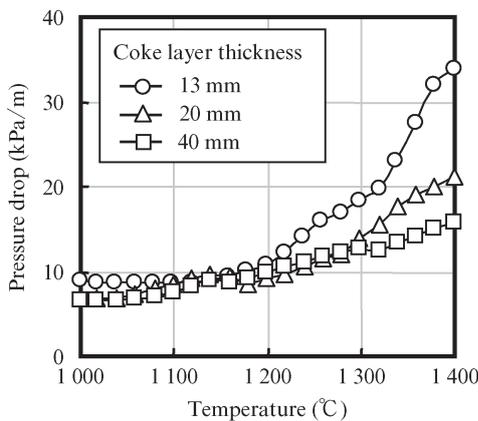


図 4 各温度における圧力損失の測定結果

Fig. 4 Measurement results of pressure drop changing with temperature⁸⁾

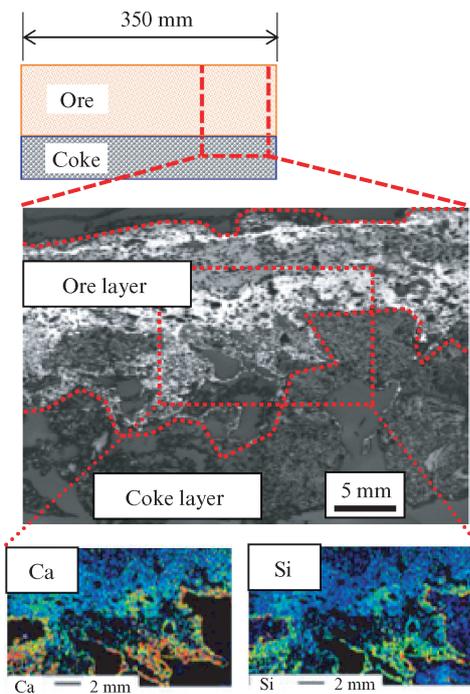


図 5 鉱石-コークス界面の断面像と EPMA 像

Fig. 5 Cross sectional image of ore/coke interface and EPMA image

とから溶融したスラグ成分がコークス粒子の間隙に浸入したことが示唆される。

佐々木らによる広畑 1 高炉の解体調査⁹⁾ および Koch らによる Jesenice 2 高炉の解体調査¹⁰⁾ では、融着層下方からコークス層に垂れ下がったツララ状の半溶融物の存在が確認されている。Koch らはこのツララ状の半溶融物はスラグがコークス層に浸入して形成されたと推定している¹⁰⁾。これらから、融着層シミュレーター試験後に観察されたコークス層への浸入物は、スラグ成分を含む融着した鉱石がコークス層に浸入して形成されたものと考えられる。特にコークス層厚が薄い条件では、コークス層数が増加し融着鉱石とコークス層の界面が増えるため、融着鉱石により閉塞されるコークス空隙が増加し、圧力損失が増加したものと考えられる。

そこで、融着鉱石のコークス層への浸入層厚が融着層の圧力損失に及ぼす影響を評価するため、それぞれの実験後試料の融着鉱石のコークス層への浸入層厚を測定した。ここで浸入層厚は実験前のコークス層厚と実験後のコークス層厚の差より求めた。実験後のコークス層厚は実験後のコークス層の断面積を画像より得て、試料層の水平方向長さ (350 mm) で除すことで求めた。1 界面あたりの融着鉱石のコークス層への平均浸入層厚は 4.4 mm/interface となった。

3.3 コークス層厚が圧力損失に及ぼす影響の定量化

融着鉱石がコークス層へ浸入する現象が融着帯の圧力損失に与える影響を評価するため、その影響を取り込んだ圧力損失推定モデルを作成し、1400℃における融着層シミュレーターの圧力損失を推算した。図 6 に作成したモデルの模式図を示す。ここで鉱石層、コークス層および融着鉱石のコークス層への浸入層は、計算の簡略化のためそれぞれ 1 層として計算した。なお、融着鉱石がコークス層に浸入した層は鉱石層と同等の空隙率と考慮されるため、鉱石層として扱った。

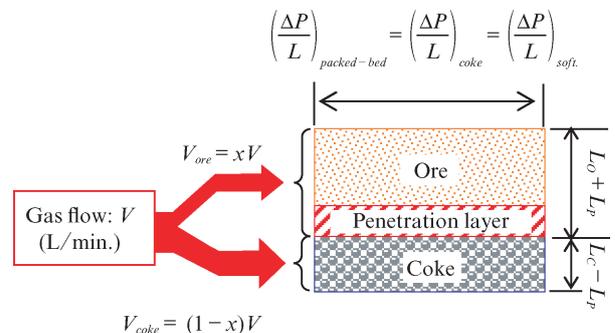


図 6 融着層シミュレーターモデルの模式図

Fig. 6 Schematic view of cohesive zone simulator model

それぞれの層厚の和は、融着後の層厚と総数の積で得られる。なお浸入層は、最下層のコークス層ではコークス層の上面のみに生じるが、最下層を除くコークス層では、コークス層の上面と下面の2面で融着鉱石層と接する。したがって、浸入層はコークス層の層数 n_i に対して、 $2n_i-1$ 層生じることとなる。各層の層厚の和を (1)~(3) 式で表した。

$$L_o = n_i \cdot l_o \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$L_c = n_i \cdot l_c \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$L_p = (2n_i - 1) \cdot l_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 L_c はコークス層厚 (m)、 L_o は鉱石層厚 (m)、 L_p は融着鉱石浸入層厚 (m)、 l_c は融着層シミュレーター試料層中のコークス層1層あたりの層厚 (m)、 l_o は融着層シミュレーター試料層中の鉱石層1層あたりの層厚 (m)、 l_p は融着層シミュレーター試料層中の融着鉱石浸入層厚 (m)をそれぞれ表す。

鉱石層とコークス層の両端部はそれぞれ等圧力である。ゆえに (4) 式で示されるように、コークス層の圧力損失と鉱石層の圧力損失は充填層の圧力損失と等しいと考えられる。

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{packed-bed} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{coke} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{soft} \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお ΔP は各層の圧力差 (kPa)、 L はガス流れ方向の試料層長さ (m) を表し、添え字の *packed-bed* は試料充填層全体を、*coke* はコークス層を、*soft* は融着鉱石層をそれぞれ表す。

この場合、コークス層および鉱石層の圧力損失が充填層の圧力損失測定結果と等しくなるように、コークス層および鉱石層にガスが分配されるので、そのときのコークス層へのガス分配比を求めた。なお各層の圧力損失は (5) 式の Ergun 式により求めた。

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu}{(\phi \cdot d_p)^2} \cdot u + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho}{(\phi \cdot d_p)} \cdot u^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 d_p は各層の粒子径 (m) を、 u は各層を流れるガス流速 (m/s) を、 ε は充填層の空隙率 (-) を、 ρ はガス密度 (kg/m^3) を、 μ はガス粘性 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) を、 ϕ は充填粒子の形状指数 (-) をそれぞれ表す。

Ergun 式を用いて圧力損失を推定するには、コークス層および鉱石層の粒径、空隙率および形状係数が必要となる。ここで、コークスの粒径は 10 mm とした。コークス空隙率および形状係数は、山田らがコークス粒径 10 mm のコーク

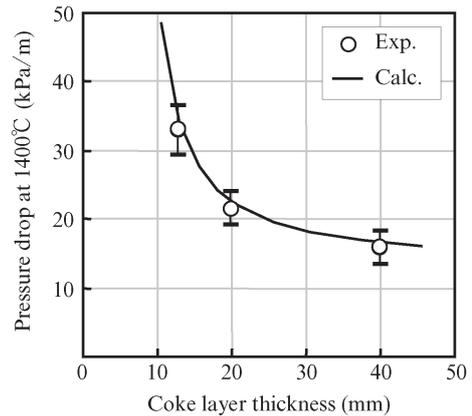


図7 1400°Cにおける実験値と計算値の比較

Fig. 7 Comparison between measurement and calculation results of pressure drop at 1400°C

ス充填層の空隙率と形状係数を評価した結果を用い、空隙率 0.418、形状係数 0.785 とした¹¹⁾。融着層の粒径は実験で用いた 5.5 mm、形状係数は 1.0 とした。また融着鉱石層のコークス層への浸入層厚は前述の測定結果を用いた。

図7に実験結果と計算結果の比較を示す。実験値と計算値はよく一致し、コークス層厚が薄くなるほど圧力損失が増加する挙動を示した。このことから、コークス層が薄くなると、融着鉱石層のコークス層への浸入割合が増加するため、融着帯圧力損失が増加することを確認できた。

4. 高炉圧力損失推定モデルによる評価

4.1 モデルの概要

高炉圧力損失に及ぼすコークス層厚の評価のため、実機に即した圧力損失推定モデルを作成した。モデルは塊状帯と融着帯を考慮した。図8にモデルの概要を示す。塊状帯についてはコークス層と鉱石層が層状に1層づつ積まれた層を所定の流量のガスを流通させ、そのときの圧力損失を推定した。また融着帯については、Kashihara らによる融着帯圧損推定モデル¹²⁾をベースとした。本モデルでは、融着帯圧力損失に与える平均炉腹コークス層厚の影響を評価するため、半径方向の層厚およびコークス混合率の分布は同様とした。融着帯部分の形状については模式的に幅 1 m × 奥行き 1 m の融着層と鉱石層を配し、これらの層の下部にはコークス層を配した。コークス層厚は任意の値を与えた。鉱石層および融着層の層厚はコークス層厚とコークス比の設定値より求めた。また図6に示すモデルと同様に、融着鉱石がコークス層へ浸入した層は鉱石層として扱い、鉱石層の層厚は浸入層厚分だけ厚くなり、一方でコークス層の層厚はその分だけ薄くなると仮定した。

この融着帯に高炉炉腹部の平均ガス流速を流通させることで、融着帯部分の圧力損失が推定できると考えた。なお本モデルでは反応による粒径の変化は考慮していない。融

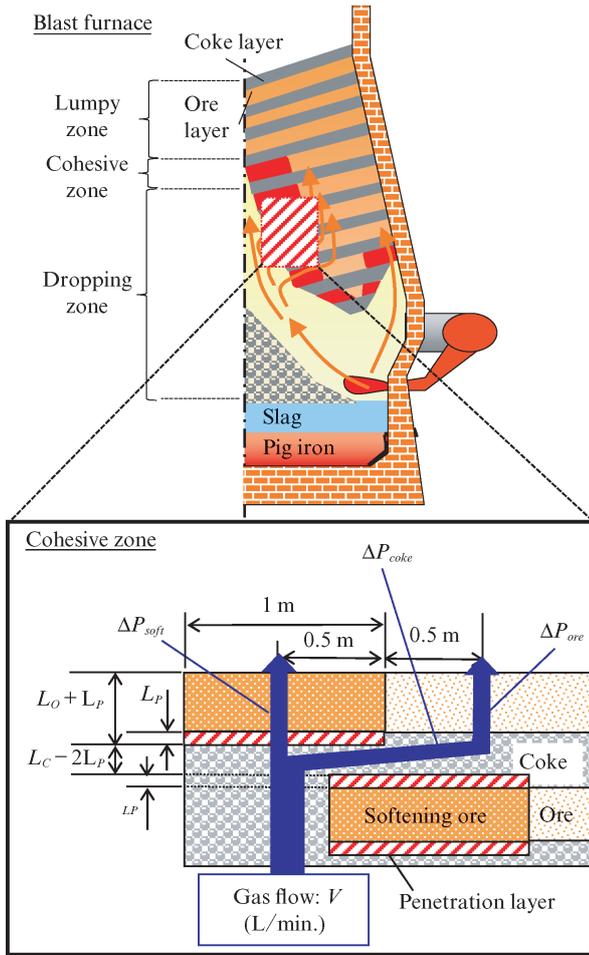


図8 モデルにおける融着層配置

Fig. 8 Arrangement of cohesive zone assumed in model

着帯の圧力損失の算出では、融着層を通過するガス流路と、コークス層を通り鉱石層を通るガス流路を考え、この2つのガス流路の圧力損失が(6)式で示されるように等しくなる時のガス分配比を求めた。なお各ガス流路の圧力損失は(5)式で表されるErgun式によって求めた。

$$\Delta P_{soft} = \Delta P_{coke} + \Delta P_{ore} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで添え字の *soft* は融着鉱石層を、*coke* はコークス層を、*ore* は鉱石層をそれぞれ表す。

4.2 高炉圧力損失に及ぼすコークス層厚の影響評価

前述のモデルを用いて、高炉圧力損失に及ぼすコークス層厚の影響を評価した。本モデルはErgun式により圧力損失を推定しているため、コークス層、鉱石層および融着鉱石層それぞれの層について、平均粒径、形状係数および空隙率を求める必要がある。コークス層および鉱石層の平均粒径は、実機高炉で用いる原料のサンプリング結果に基づき調和平均径を求めた。形状係数および空隙率は、山田ら⁴

表1 計算条件

Table 1 Calculation condition

		Lumpy zone	Cohesive zone
Height of zone	(m)	17	2
Temperature	(°C)	720	1 300
Pressure	(MPa)	0.33	0.385
Gas velocity	(m/s)	0.7	1.0

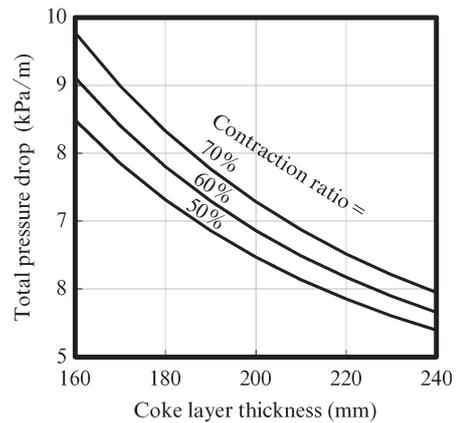


図9 全圧損におよぼすコークス層厚の影響についての計算結果

Fig. 9 Calculated results of relationship between total pressure drop and coke layer thickness

得た式¹¹⁾に基づき求めた。コークス層の調和平均径は0.032 mとした。鉱石層の調和平均径は小中塊コークスの混合も考慮し、0.011 m、形状係数は1.0とした。コークス層の形状係数は0.785、空隙率は0.42とした。鉱石層の空隙率は、実機高炉に装入する焼結鉱へコークスを混合したときの空隙率の測定値を用いた。融着層の粒径と形状係数は鉱石層と同様とし、空隙率は0.07とした。

また、塊状帯と融着帯の高さと、それぞれの層における平均ガス温度および圧力は高炉2次元定常モデル¹³⁾より求めた。その結果を表1に示す。この条件を用いて実機高炉の圧力損失を推定した。

なお、融着鉱石層のコークス層への浸入層厚は、著者ら既報に基づき、鉱石層収縮率に応じた値を仮定して用いた¹⁴⁾。

図9にコークス比360 kg/tの圧力損失と高炉炉腹部におけるコークス層厚の関係を示す。この結果からコークス層厚が薄いほど圧力損失が増加することが分かる。この結果から、高炉においても一定のコークス層厚を確保することが圧力損失の増加の回避に有効であることを示唆される。

一方で、既往の知見によると、鉱石層厚には経験的に上限値があること¹⁵⁾、鉱石層厚の増加により鉱石層の平均還元率が低下することが知られている¹⁶⁾。一定のコークス比では、コークス層厚を増加させると鉱石層厚も増加することから、鉱石層の還元性の観点からは、コークス層厚の確保

が還元性を悪化させ還元材比の上昇を招く可能性がある。これらの知見から、コークス層厚には最低限の通気性を確保できる適正値があることが示唆される。コークス層厚を適正値まで低減し、鉬石層の還元性を維持することで、安定した高炉操業に貢献していきたい。

5. おわりに

本研究では、まず試料層に対して水平方向にガスを流すことができる、融着帯のガス流れを模擬した融着層シミュレーターを開発した。次に、融着層シミュレーターを用いてコークス層厚が融着帯通気性に与える影響を評価した。さらに、その影響を考慮した融着帯圧力損失推定モデルを作成し、コークス層厚が高炉通気性に及ぼす影響を定量化することで以下の知見を得た。

- (1) コークス層厚が薄層化すると圧力損失が増加した。これはコークス層厚が薄いときは充填層中のコークスと鉬石の界面数が増加するため、コークス層への融着鉬石の浸入量が増加し、ガスが流れやすいコークス層が減少したためと考えられる。
- (2) 融着鉬石のコークス層への浸入を考慮した融着帯圧力損失推定モデルより、通気性の確保に必要なコークス層厚があることを見出した。

参考文献

- 1) 一田守政, 松崎眞六, 田中毅, 小泉文夫. 焼結鉬品質改善と装入物分布調整による高微粉炭比操業. 鉄と鋼. 2001, vol. 87, no. 5, p. 342-349.
- 2) 川田仁, 岸本純幸, 牧章, 西条義夫, 若井造, 山本健一. NKK 福山第5高炉における吹抜け機構. 鉄と鋼. 1993, vol. 79, T5-T8.
- 3) Geerdes, M.; Chaigneau, R.; Kurunov, I.; Lingardi, O.; Ricketts, J. Morden Brast Furnace Ironmaking An Introduction. 3rd ed., IOS Press, Amsterdam, 2015, 101 p.
- 4) 橋爪繁幸, 高橋洋光, 奥村和夫, 富田貞雄, 小坂橋寿光, 小西行雄, 近藤幹夫, 森岡恭昭. 千葉1高炉の解体調査結果. 川崎製鉄技報. 1979, vol. 11, no. 3, p. 388-409.
- 5) 伊沢哲夫, 里見弘次, 中島龍一, 梶川脩二, 宮本建彦, 隅田昇, 福島

- 勤. 吹卸し高炉の炉内状況について—1 (川崎2, 3高炉の解体調査報告—1). 鉄と鋼. 1975, vol. 61, S399.
- 6) 斧勝也, 肥田行博, 重見彰利, 児玉惟孝. 高炉の軟化溶解帯における装入原料の収縮および圧損について. 鉄と鋼. 1975, vol. 61, no. 6, p. 777-786.
- 7) 岩永祐治. 微粉炭吹き込み時の高炉内装入物挙動. 鉄と鋼. 1993, vol. 79, no. 8, p. 927-933.
- 8) 市川和平, 柏原佑介, 大山伸幸, 廣澤寿幸, 石井純, 佐藤道貴, 松野英寿. 融着帯圧力損失推定モデルによる通気性に及ぼすコークス層厚の影響の評価. 鉄と鋼. 2016, vol. 102, no. 1, p. 1-8.
- 9) 佐々木稔, 斧勝也, 鈴木明, 奥野嘉雄, 吉沢謙一, 中村隆. 高炉融着帯の形成と溶落ち (高炉解体調査—3). 鉄と鋼. 1976, vol. 62, no. 5, p. 559-569.
- 10) Koch, K.; Lamut, J.; Renner, H. J.; Schliephake, H. Bläherscheinungen beim Erweichen und Abschmelzen der Möllerstoffe im Hochofen. Stahl u. Eisen. 1982, vol. 102, no. 8, p. 411-414.
- 11) 山田孝雄, 佐藤正明, 宮崎伸吉, 嶋村鉄郎, 田口整司. 大型高炉の装入物分布と通気性. 川崎製鉄技報. 1974, vol. 6, no. 1, p. 16-37.
- 12) Kashiwara, Y.; Iwai, Y.; Sato, T.; Ishiwata, N.; Sato, M. Effect of Unconsumed Mixed Small Coke on Permeability in Lower Part of Blast Furnace. ISIJ Int.. 2015, vol. 55, no. 6, p. 1237-1244.
- 13) 佐藤健, 野内泰平, 木口満. 高炉操業シミュレータの開発と溶鉄シリコン低減への適用. 川崎製鉄技報. 1997, vol. 29, no. 1, p. 30-36.
- 14) Ichikawa, K.; Kashiwara, Y.; Hirokawa, T.; Ishii, J.; Nouchi, T.; Fukada, K. Quantifying the Effect of Coke Layer Thickness on the Permeability of the Cohesive Zone in the Blast Furnace by Using a New Simulator. Iron & Steel Technology. 2020, vol. 17, no. 11, p. 88-95.
- 15) 村尾明紀, 柏原佑介, 佐藤健, 渡壁史朗, 佐藤道貴. 低コークス比操業に向けた層構造制御. 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 2012, vol. 25, no. 2, p. 559-562.
- 16) 折本隆, 内藤誠章. 焼結鉬の還元性及び鉬石層厚の影響. 材料とプロセス (CAMP-ISIJ). 2000, vol. 13, no. 4, p. 894.



市川 和平



廣澤 寿幸



石井 純