

モデル実験による融着帯形成挙動の研究

論 文

入田 俊幸*・磯山 正*・原 義明*
 奥野 嘉雄*・金山 有治*²・田代 清*

Model Experiment on the Formation of the Cohesive Zone in the Blast Furnace

Toshiyuki IRITA, Masashi ISOYAMA, Yoshiaki HARA
 Yoshio OKUNO, Yuji KANAYAMA, and Kiyoshi TASHIRO

Synopsis :

In order to clarify the dynamic behavior of the cohesive zone in the blast furnace, a simulation model experiment was carried out.

One-sixth scale sector model unit was built. Quasi ore and coke were charged at the top and hot air (180°C) was injected from the tuyeres. The formation process of the cohesive zone was observed via a glass wall fitted on the front of the unit.

(1) The cohesive zone is found to be classified into inverted U, inverted V and normal W types, each of which seems to be attributable to the characteristics of gas flow around the root of the cohesive zone. Among them, inverted V type is most desirable for its efficient heat exchange and low thermal load.

(2) As concerns burden distribution, a high ore/coke ratio in the periphery makes the cohesive zone inverted U type and a low ore/coke ratio results in W type. In order to obtain inverted V type, an appropriate permeability of the root, especially at the wall side, is necessary.

(3) The cohesive zone tends to become inverted U type with a decrease in the thermal flow ratio. An increase in the blast volume raises the level of the cohesive zone and causes its width to become broad. The permeability of the cohesive layers also exerts a large effect on their formation.

The mechanism of the cohesive-zone formation has been discussed.

1. 緒 言

昭和 40 年代後半を中心に多数の高炉で解体調査が行われ、融着帯の存在が確かめられた¹⁾。その後の研究により、融着帯は炉内のガス分配に重要な役割をはたし、高炉プロセス全体を左右する重要な鍵と認識され²⁾、高炉の操業技術にも大きな転換をもたらした³⁾。しかし、融着帯の炉内挙動に関しては、特に重要と考えられる根部の挙動を中心として、以下の点が必ずしも明らかでない。

- (1) 融着帯根部の位置(高さ)と厚さ(融着層枚数)が装入物分布とともにどう変化するか。
- (2) 炉体損耗などによる炉壁際混合層の発生が、この根部の形成にどう影響するか。
- (3) 融着帯や根部の形状は、熱流比や送風量などの操業要因とどう関係にあるか。
- (4) 融着層にガスは流れるのかどうか。鉍石の高温

性状(溶融時の通気性)とともに融着帯形状はどう変わるか。

以上のことを解明するため、200°C 以下の低温溶融モデル実験⁴⁾により、擬似融着帯を形成させ、その挙動を調査した。

2. 実験方法

2.1 溶融モデル実験装置

モデル装置は、高炉と相似なプロフィールをもつ扇型モデルで(室蘭 4 高炉の 1/6、ただし、炉胸の上半部を省略、Fig. 1)、前面の透明壁から内部が観察できる。炉頂では、ベルとムーバブルアーマーで、装入物分布を調整する。羽口からは加熱空気が吹き込まれ、炉内のコースは金網の排出板に沿ってレースウェイの下方に排出される。装置の前面と背面は断熱構造とし、本来の炉壁に相当する側壁は、羽口部から上方への熱伝導のみを妨げる構造にしている。側壁と背面壁の全面に温度計と

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 3 月 18 日受付 (Received Mar. 18, 1982)

* 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

* 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所(現:新日本製鉄(株)本社) (Muroran Works, Now Head Office, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Physical properties of experimental burden.

	Particle size mm	Bulk density kg/m ³ -bed	Voidage m ³ /m ³ -bed	Specific heat kcal/kg·K (30°C)	Heat of fusion kcal/kg	Pressure drop mmaq		Remarks
						$\Delta P(20^\circ\text{C})$	$\Delta P_{\text{max}}(90^\circ\text{C})$	
Quasi ore	4~7	420	0.50	0.533	44.8	6	223	Low m.p. alloy : 13.2% wt
Coke	10~15	620	0.43	0.250	—	3	—	Coated particles

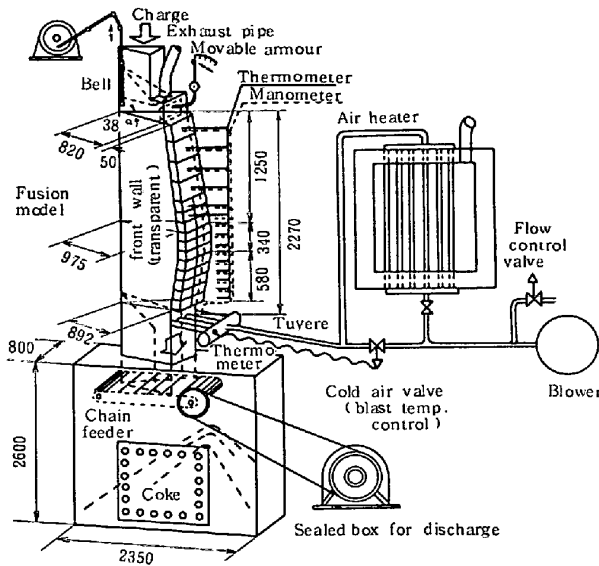


Fig. 1. Experimental apparatus.

圧力測定孔を 160 点配置し、側壁の内側に荷重受圧板、外側に熱流センサーを各、数ヶ所取り付け付けた。

2.2 装入物試料の調整

用いた擬似鉱石とコークスの物性を Table 1 に示す。擬似鉱石はステアリン酸系ワックスを造粒したもので、軟化温度で白色から淡黄色へ変化し、滴下温度ではほぼ透明な液となった。また、荷重軟化試験でも軟化開始と滴下終了の温度が明瞭で、実鉱石の類似の圧損パターンを示し、その圧損値はワックスの組成により調整できた (Fig. 2)。このうち、焼結鉱石の特性に最も近い鉱石 B を実験の標準試料とした。なお、擬似鉱石には低融点合金を核として含め、モデル装置内での粒子の流動化を防止した。

2.3 実験条件

実験条件を Table 2 に示す。送風量 9 Nm³/min のとき、計算炉口風速が実炉と同等 (1.0 m/s) である。送風温度 180°C で実炉ともモデルの温度分布が相似となる (Fig. 3)。なお、熱流比は、コークス排出速度で調整した。

コークスペースは、炉内の層厚方向の粒子数から定め、Ore/Coke (以下、O/C) は、滴下帯の液量が 2 次元フラディング限界⁵⁾を越えない範囲とした。ここで、実験の O/C 値は、鉱石とコークスの嵩比重を 2.0、0.5

Table 2. Experimental condition.

	Standard	Range
Blast volume Nm ³ /min	9	6~12
Blast temperature °C	180	150~200
Thermal flow ratio*	0.85	0.6~1.0
Coke base l/ch	32	24~32
Ore/Coke	2.25	1.5~3.2

* Water equivalent flow ratio of burden to gas

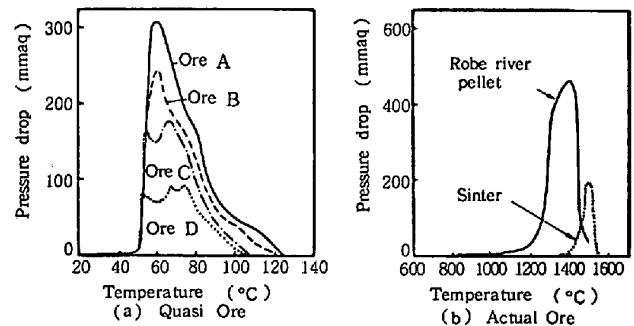


Fig. 2. Comparison between quasi ore and actual ore for the elevated temperature property.

t/m³ と仮定した計算重量比である。

3. 実験結果

3.1 融着帯の形成

モデル実験では、炉内の装入物が一巡すると融着帯形状がほぼ安定した。炉内各点の温度や圧力が平衡に達すると操業を終了 (送風と荷降下を停止) し炉頂より散水した。冷却後の炉内からコークス層にはさまれた岩盤状の融着層を一枚ずつ取り出すことができたが、その外見は高炉解体調査で確認されたものと酷似していた (Photo. 1)。

本論文では、この融着帯各部の名称を Fig. 4 のごとく定め、以下、これを用いて融着帯の挙動を記述した。

3.2 装入物分布と融着帯形状の対応

装入物分布と融着帯形状の対応を Fig. 5~7 に示す。Fig. 5 に示されるごとく、中心部 O/C の減少により頂層が上昇、相対 O/C が最大となる位置が中心側に寄るにつれてその位置で融着帯が低下し、炉壁部 O/C の増大により根が上下に厚くなるなど、融着帯形状は装入物分布によつて敏感に変化した。しかし、根下端は羽口に近い低位置からほとんど動かず、炉壁部 O/C の減少

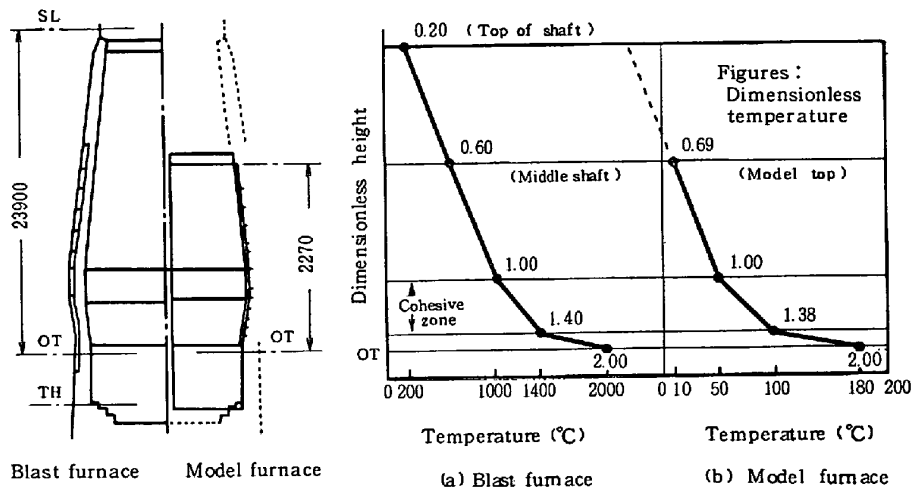


Fig. 3. Similarity in temperature distribution.

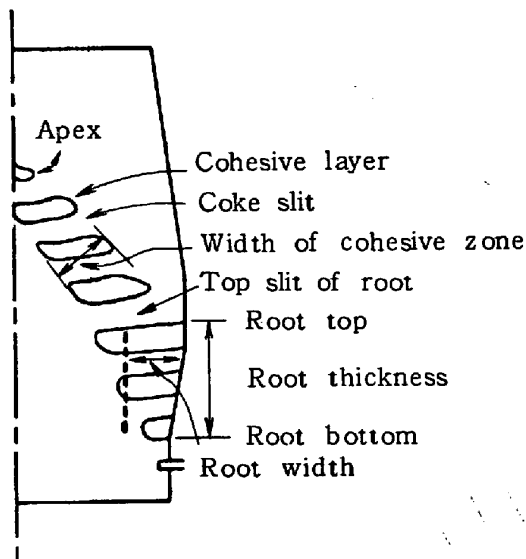


Fig. 4. Denomination of each part of the cohesive zone.



Photo. 1. The model cohesive zone.

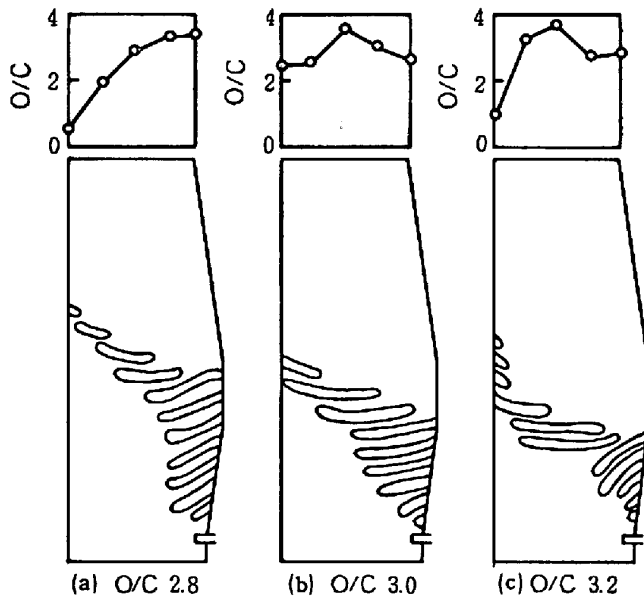
に伴い根上端が低下した。こうして融着帯は概して中心流型の形状のまま、主として根の厚みが増加した。しかし、炉壁部 O/C を極端に減少すると融着帯はW型化し、根上端が上昇した (Fig. 6)。なお、以上のアーマ操作の他に装入方式も大きく変更した。Fig. 7 は装入物の層厚を半分にしたもので、高熱流比にもかかわらず融着帯レベルが高く、逆に根部は付着物状に炉壁部で溶け残りその下端は低くなった。また、鉱石とコークスをベル上で均一に混合して装入した場合もこれと全く同じ形状の融着帯になったが、その中には根下端が羽口の下まで達するものもあつた。

3.3 炉壁際混合層の形成による融着帯根部の変化

シャフト下段の炉壁内面から邪魔板を突き出し、炉壁際に混合層を形成させた。Fig. 8 に示すように、邪魔板を 20 mm 突き出すことにより根の下端が上昇、上端が低下し、根が薄くなった。突き出し長さ 40 mm では根が更に薄くなる傾向を示したが、安定に至る前に根部の円周バランスが崩れた。なお邪魔板によらず、アーマ操作でごく炉壁際の O/C を減少した場合にも根の下端が上昇した (Fig. 9)。

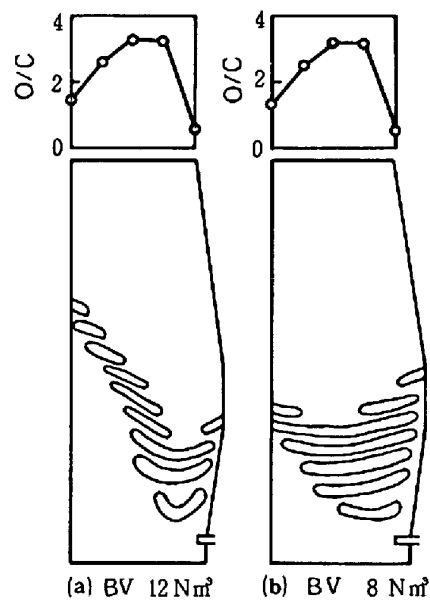
3.4 熱流比による融着帯形状の変化

熱流比と融着帯形状の関係を Fig. 10 に示す。図のごとく熱流比の減少とともに融着帯上面 (頂層 ~ 根上端) が上昇した。しかしこの時も根下端の上昇は鈍く、根の厚みが著しく増加した。なお、実験中の変化として、低熱流比条件では、まず根上端のすぐ上の融着層 (その炉壁側に鉱石粒子層が連なる) のみが炉壁の方に向かって急速に成長 (融着が進行) し、それが炉壁まで達すると (すなわち根部になると)、つづいて、そのすぐ上の融着層が同じように急速な成長を開始するという具合にして根部が1枚ずつ殖え、みるみるうちに厚い根



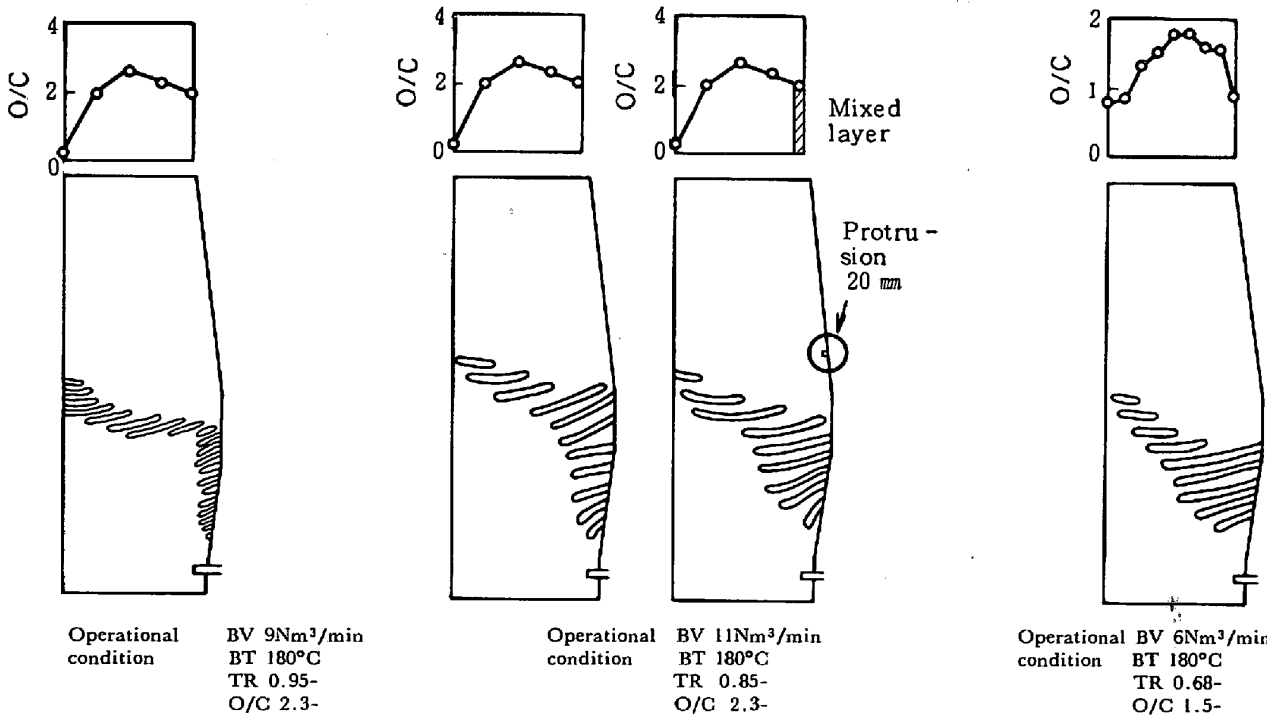
Operational BV (blast volume) 12Nm³/min
 condition BT (blast temperature) 180°C
 TR (thermal flow ratio) 0.85-

Fig. 5. Relationship between burden distribution and the shape of the cohesive zone.



Operational BT 180°C
 condition TR 0.80-
 O/C 2.3-

Fig. 6. Burden distribution and W shaped cohesive zone.



Operational condition BV 9Nm³/min
 BT 180°C
 TR 0.95-
 O/C 2.3-

Fig. 7. Cohesive zone formed with half layer thickness.

Operational condition BV 11Nm³/min
 BT 180°C
 TR 0.85-
 O/C 2.3-

Fig. 8. Influence of the mixed layer at the wall on the formation of the cohesive zone.

Operational condition BV 6Nm³/min
 BT 180°C
 TR 0.68-
 O/C 1.5-

Fig. 9. Ascent of the root bottom of inverted V shaped cohesive zone by a decrease in O/C at the wall side.

が形成された。この根上端の上昇は、明らかに、根上端のスリットコークス層からの強い高温ガス流によりもたらされたものである。また、この後、熱流比を高いレベルに変更しても根の厚みは容易に減少せず、融着帯の上

面とともに厚い根が低下し、その下端がレースウェイに接触して崩壊した(多くの場合、そのまま操業不調に陥った)。このように、根部は一旦肥大化するとその制御性が著しく低下した。

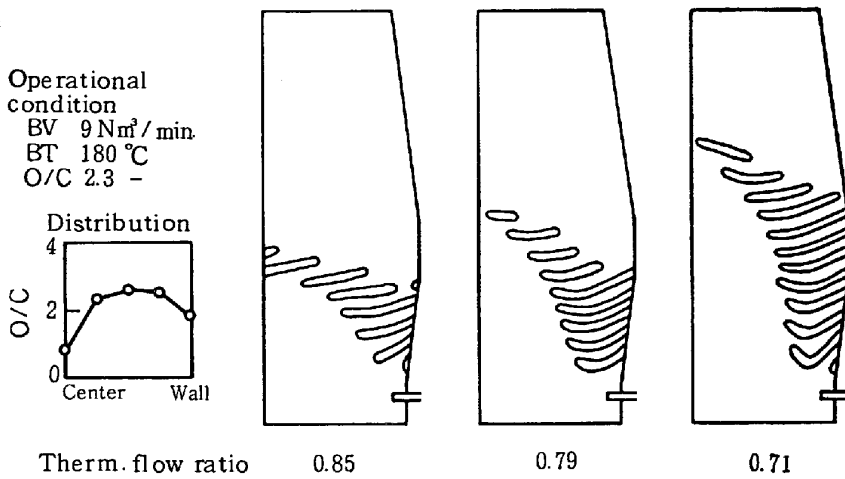


Fig. 10. Relationship between the thermal flow ratio and the shape of the cohesive zone.

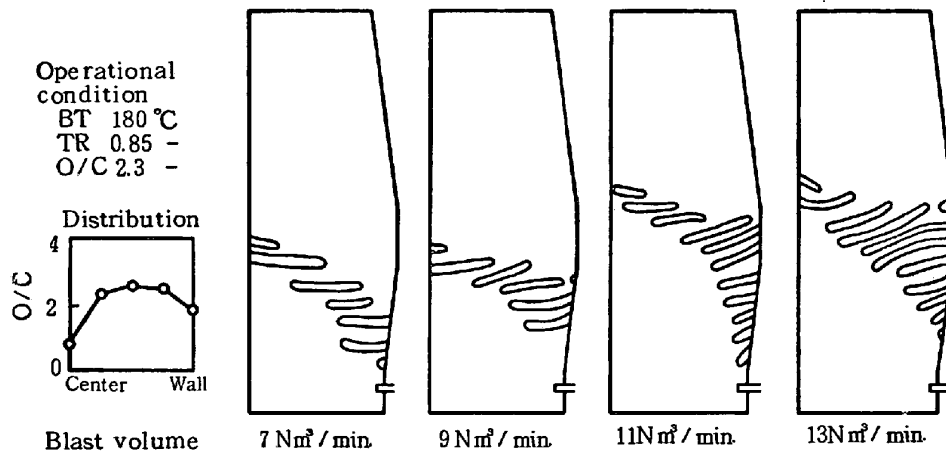


Fig. 11. Relationship between the blast volume and the shape of the cohesive zone.

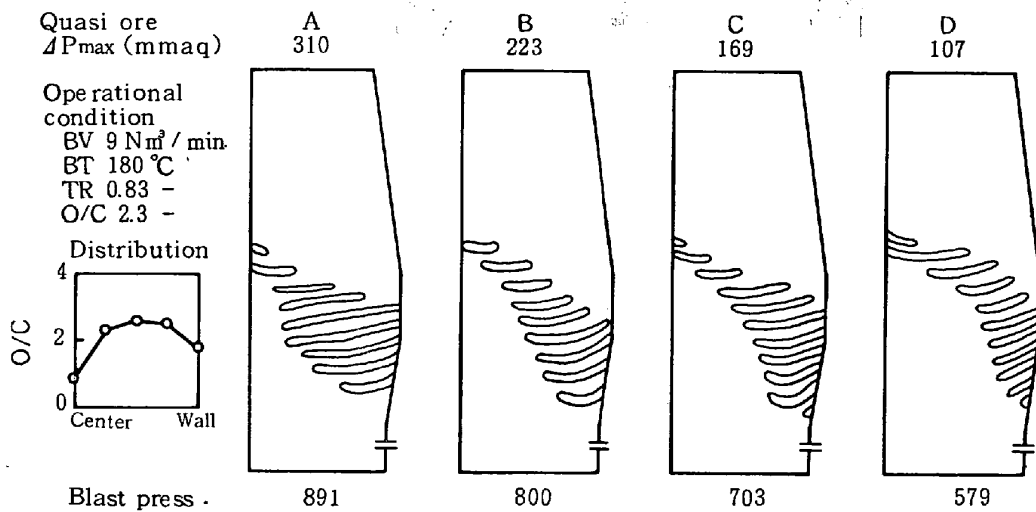


Fig. 12. Effect of the high temperature property of the quasi ore on the formation of the cohesive zone.

3-5 送風量と融着帯形状の対応

熱流比を一定に保って送風量を変更した。送風量の増加とともに融着帯が上昇し、その幅（融着開始面～滴下面間距離）が全体に広がった (Fig. 11)。

W型融着帯の場合には送風量が減ると周辺ガス流が強くなり、融着帯形状が著しく変化した (Fig. 6)。

3-7 鉍石の高温性状と融着帯形状の対応

擬似鉍石 A~D (Fig. 2) を用いて実験を行った。擬似鉍石の特性により融着帯形状や送風圧力が著しく変化した (Fig. 12)。融着時圧損の高い鉍石では根部が炉芯側に大きく張り出し、また、他より滴下温度が高いにもかかわらず (Fig. 2)、根下端の位置が高かった。しかし圧損の低い鉍石では融着帯の幅が狭く、炉の中間部で融着帯が溶け上がり根が炉壁部で溶け残る傾向を示した。

これらは、融着層の通気性がその加熱と溶解に強く影響し、融着帯形状を大きく変化させることを示す。

4. 考 察

4-1 装入物分布と融着帯形状の関係

一般に、融着帯の各部は、炉径方向でのその位置の相対 O/C 比の減少により上昇する。これは、相対 O/C 分布が塊状帯での熱流比分布を強く支配するためである (特にモデル実験では、装入物の粒度範囲が狭いため、粒度偏析の影響が無視できた)。このことから、O/C が中心部で低く炉壁部で高い分布が、逆V型融着帯に対応すると考えがちである。しかし実験では、炉壁部の O/C を最も高くすると必ず根が厚くなり、融着帯が逆U型化した。根の肥大が無い逆V型融着帯を得るには、O/C 分布を炉壁部で低く、その少し炉内側で最も高くする必要があった (Fig. 9)。このように、根部のレベルでは炉芯側にコークスしか存在しないため根の溶解にかかわ

る炉下部のガス流分布は塊状帯の O/C 分布と直接関係しない (cf. Fig. 14)。

炉内ガス流による根の形成・溶解機構として、Fig. 13 に示す3つのケースを考える必要がある。(a)は、炉壁部 O/C が過大などの理由により根の通気が悪い場合である。滴下帯を上昇した高温ガスが根上端スリットから炉壁部の方へ吹きつけ、根は上方に肥大し、融着帯は逆U型化する。(b)は根の通気が保たれている。根の内部で熱交換が行われ、熱を失ったガスが塊状帯の炉壁部に達する。根の上端は下がるが、根内部の昇温は最もスムーズに進みその厚さが減少する。融着帯は逆V型になる。(c)は、炉壁部での融着層の形成が不完全である。その内側で融着帯が垂れ下がり、(a)の場合と同様、コークス帯からのガスが直接塊状帯へ抜け、既に融着した部分が肥大化する。融着帯はW型である。

以上のうち、逆V型融着帯の根部が最も薄く、広い塊状帯を確保するのに適している。

4-2 壁際混合層と根の溶け落ち

一般に融着層の通気性を改善しても根部の炉壁際は溶けにくく、かえって根下端は低くなる。この現象は、装入物の層厚が不十分な場合や、鉍石・コークスの混合物、あるいは融着時圧損の低い鉍石を装入した実験のすべてに共通していた。しかし、壁際混合層の形成により、根下端が上昇し根の厚さが減少した。これは、炉壁際での通気改善により、根内部のコークス層がある程度スリットとして機能し根全体のスムーズな昇温を促したためと考えられる。

4-3 熱流比による融着帯形状の変化

熱流比の減少により融着帯の上面が上昇したが、これは向流熱交換プロセスにおいて自然な現象である。ところがこの時、根下端は上昇せず融着帯は逆U型化した。

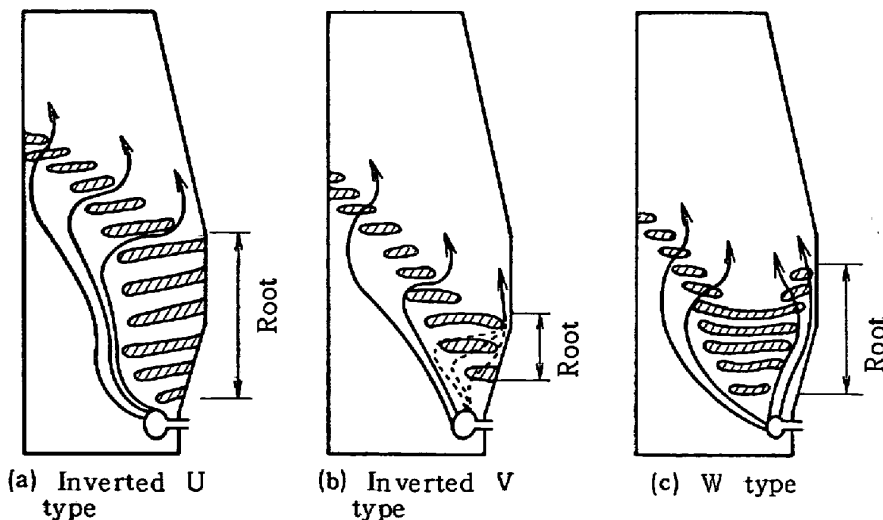


Fig. 13. Formation of three typical shape of the cohesive zone attributable to the characteristics of the root melting in gas flow.

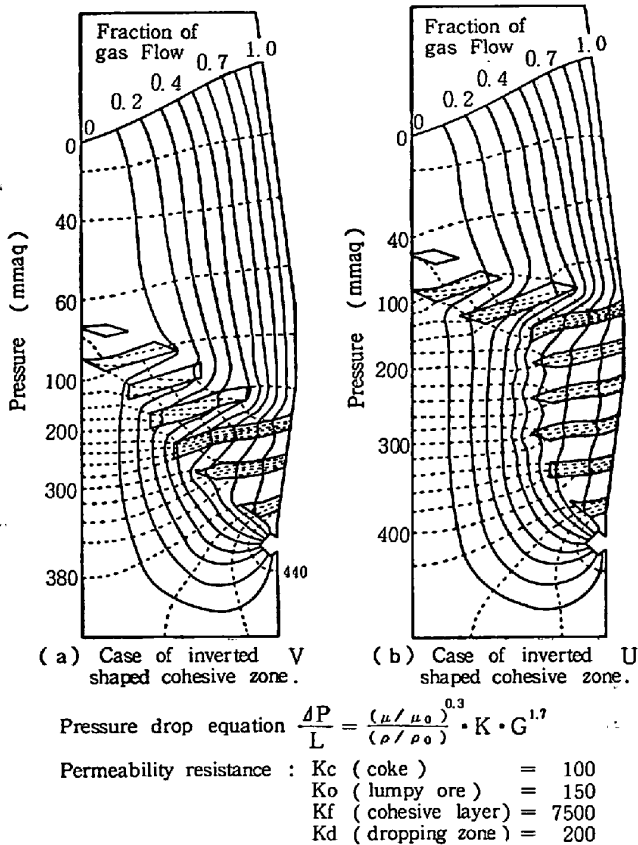


Fig. 14. Relation between the shape of the cohesive zone and the gas flow.

これには根部のガス流量が関係しているものと思われる。Fig. 14 は、逆V型、逆U型融着帯におけるガス流れを有限要素法により計算したものである。融着層の通気抵抗を塊状時の 50 倍として与えている。図で、根部は炉の水平断面積の 7 割以上を占めるが 3 割のガスしか流れていない。ここで仮に平均熱流比を 0.85 とすると、根部での熱流比は 2.0(滴下帯側は 0.32) と求められる。このように根部は極端に熱流比が高く、いわば向流交換プロセスから取り残されたまま降下し、羽口付近の高温・高流速のガスに触れて急速に溶かされる部分である (Fig. 5~6 は、融着帯の形状が著しく異なるものでも融着帯の下端レベルがあまり変わらないことを示すが、このように根部の下限は、羽口を含む高炉の構造にもとづいて大きく規定されるものと思われる)。

このように、根下端が上昇しにくいのは一種の高炉特性であると考えられ、一方、根上端の上昇は塊状鉱石層の温度上昇により生じ、平均熱流比 (操業条件) の変化に敏感に反応するため、根部は急速に厚くなる。

4.4 送風量と融着帯レベルの関係

熱流比を一定にして送風量を増すと、融着帯が上昇しその幅が広がった。炉内の伝熱係数の増加により、上部での装入物の昇温、および下部でのガス温度の低下が急

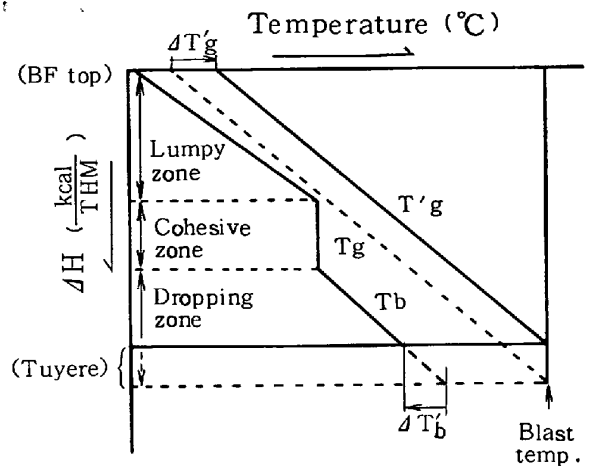


Fig. 15. Change in the difference between gas and burden temperature with an increase in the blast volume.

速化するものと予想されるが、それだけでは融着帯が上昇することにはならない。向流熱交換において流速が大きくなると滞留時間が減少し、高温側流体であるガスの出口温度 (炉頂温度) が上昇、低温側流体である装入物の出口温度 (装入物到達温度) が低下する。この時の装入物の温度 T_b とガス温度 T_g (増風前), T_g' (増風後) の関係は、模式的に Fig. 15 に示される (Reichardt 線図⁶⁾)。縦軸は、装入物またはガスのエンタルピー変化である。両者は高炉の任意の 2 点間で一致するので同一の縦軸にのる。図中 $\Delta T_g'$, $\Delta T_b'$ が前記各出口温度の変化である。図は増風により、炉の全域でガス-装入物間の温度差が増大することを示す。このとき、例えば、塊状帯での温度差が 2 倍になれば、装入物が装入されてから融着温度に至るまでの時間はほぼ半分になると考えられる。これに対して融着帯や滴下帯の温度差は増加率としては小さいため、所定の伝熱量を達成するのに要する時間が相対的に増加する。各帯での温度差増加率の相対的な関係から、塊状帯で余った距離が、融着帯よりも滴下帯の方に多く分配されるはずである。この結果融着帯が上昇し、その幅がいく分広くなる。

4.5 融着層の通気性と融着帯の挙動

従来から、融着層はガス分配板として重要であると考えられている。例えば、モデル実験において、レースウェイ直上に大きく張り出した融着層が溶け落ちる時の円周バランスは極めて不安定だが、多くの場合その上の層の溶解のバランスにはあまり影響しなかつた。これは、炉内のすべての鉱石層、融着層が一枚ごとにコークスの整流層に挟まれているため、それが部分的に破れても、径方向、円周方向へとガス分配が安定して行われるためである。しかし、このことは必ずしも融着層にガスが流

れないということを意味しない。

以上の考察でも述べてきたとおり、実験における融着帯の挙動は、根部などにおける通気量が微妙に変化したと考えることにより説明しうるものであつた。また、ガス流れの計算結果も、根部を貫通するガス量が決して無視できないものであることを示し、更に、滴下帯から塊状帯へ抜けるガスが、根上端の融着層に多く流れ、根部が逆U型に形成されやすいことを示唆している (Fig. 14)。

しかし、融着層は通気抵抗が大きいがゆえに溶け残りあるいは肥大化する。このことから、融着層の通気抵抗によらない炉内制御を指向する余地が残されていると思われる。近年、鉬石の高温性状が改善され、融着層の通気抵抗は着実に減少しつつある。これにより融着層によくガスが流れ、融着帯が薄くなり、高炉の効率が高まるはずである。しかし同時に、層状充填構造にもとづくガスの整流作用は相対的に弱まり、融着帯の形状や周方向の均一性が特にその下部において不安定化する。こうして、鉬石の高温性状が改善されるほど、炉頂装入物分布の調整にますます高い制御精度が求められることになるものと思われる。

5. 結 論

鉄鉬石の融着挙動をシミュレートしうる擬似鉬石を用い、高炉と相似な縮尺実験装置で融着帯を形成させ、装入・送風条件との対応を実験的に把握し、その挙動について考察した。

(1) 融着帯は、根部の形態により、逆U型、逆V型、W型に分類される。そのうちで、制御性に優れ、炉の伝熱効率もよく、炉体熱負荷の低い逆V型が最も望ましい。

(2) 中心流を指向する操業において、融着帯は操業条件の変化により逆U型化する傾向が強い。これを逆V型にするには、炉壁部と、特にその炉壁際で、適度な通気を確保することが重要である。

(3) 炉壁際の通気性は、炉壁部 O/C のほか、炉壁際の混合層の有無によつても変化する。

(4) 送風量の増加や熱流比の低下により融着帯が上昇する。ただし、炉壁部に適度な通気が確保されない場合は根下端のみ上昇せず、シャフト下部への熱負荷を増しながら融着帯上面のみが大きく上昇し、逆U型融着帯となる。

(5) 逆U型融着帯の制御性は悪く、特にその根が厚いものは熱流比の増加により根が厚いまま容易に低下し、操業不調に結びつく。

(6) 炉内ガスの一部は融着層を貫通し、その量が融着層の加熱・溶解に顕著な影響を与える。融着時圧損の高い鉬石を用いた場合には、融着層幅や根の張り出し幅が著しく増加する。

文 献

- 1) 近藤真一：製鉄技術の最近の諸問題 (第33・34回西山記念技術講座) (1975), p. 125 [日本鉄鋼協会]
- 2) Y. TOGINO: Coal, Coke and the blast furnace Jun. (1977) [Metal Society]
- 3) 研野雄二, 楯岡正毅, 須賀田正泰, 山口一成, 久米正一, 山口一良, 安倍 勲: 鉄と鋼, 65 (1979) 10, p. 1553
- 4) S. WAKAYAMA, Y. KANAYAMA, and Y. OKUNO: Ironmaking and Steelmaking (1979) 6, p. 261
- 5) N. STANDISH, and L. COLQUHOUN: Blast Furnace Aerodynamics, ed. by N. STANDISH (1975), p. 20 [Australian Inst. Min. Met.]
- 6) P. REICHARDT: Arch. Eisenhüttenw., 1 (1927), p. 77