

討 4 高炉操業におよぼす焼結鉱性状の影響とその評価

住友金属工業(株)中央技術研究所 宮崎富夫・下田輝久 岩永祐治
 和歌山製鉄所 山本一博
 本 社 清水郁夫 片岡隆昭

1. 緒 言

高炉内における鉱石類装入物の挙動については従来より幾多の報告がなされている。特に焼結鉱の高炉内における性状変化は通気性および反応の両面から操業に影響をおよぼすため、その品質評価と適切な管理が必要と考えられる。

このような観点から、図1の思考過程にもとずいて、還元粉化、軟化および熔融滴下性状を調査し、高炉操業におよぼす影響を考察するとともに、焼結鉱品質の評価を試みたのでその概要を報告する。

2. 焼結鉱還元粉化の影響

2-1. 粉化におよぼす諸因子の影響¹⁾(図1中①②③)

試料粒度、還元温度および還元ガス組成等を種々変化させて還元試験を実施し、還元後試料について高炉内に近似させた衝撃摩耗条件下でドラム試験を行って粒径低下を測定した。結果は次のようにまとめられる。

- 1) 低温の場合ほど還元率の増加にともなう粒径の低下は著しいが、525℃以下では温度に無関係に還元率に応じた粉化を示す。(図2-a))
- 2) 細粒に比較して粗粒の方が粉化しやすい。(図2-b))
- 3) 還元ガス組成(CO濃度)と還元ガス流量の影響は認められず、還元率のみによって粒径低下が決定される。(図2-c) d))

2-2. 還元粉化後粒径の推定¹⁾(図1中⑤)

以上の実験結果にもとずき、還元進行にともなう粒径低下を次式のように表わした。

$$DS = DS_0 - b \cdot f_s + a \cdot f_s^2 \dots \dots \dots (1)$$

(但し、 $dDS/df_s > 0$ のとき)

$$DS = DS_0 - b^2/4a$$

DS_0, DS : 還元前および還元後粒径(mm)
 f_s : 還元率(%)
 a, b : 焼結鉱の種類、粒度および還元温度により定まる定数(-)

粒径低下式を高炉の解体調査結果(川鉄千葉1号高炉²⁾)に適用して炉内粒径を推定したところ、図3に示すようにはば実績を説明できる結果を得た。以上のことより、(1)式は高炉内における還元

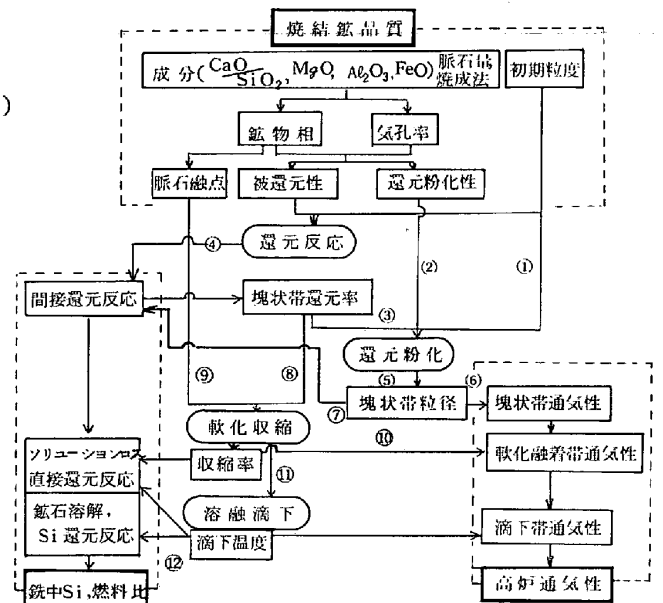


図1. 高炉操業におよぼす焼結鉱品質の影響

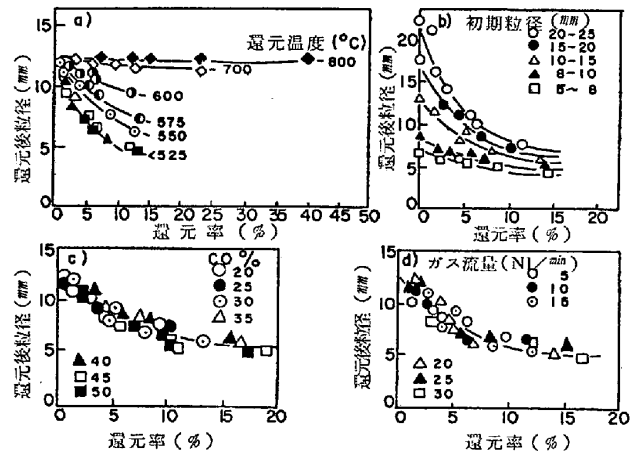


図2. 還元粉化性におよぼす諸因子の影響
 (a) 還元温度 (b) 初期粒度 (c) 還元ガス組成 (d) 還元ガス流量

粉化状況を再現していることが確認された。

2-3. 高炉操業におよぼす還元粉化の影響 (図1中④⑥⑦)

前記の粒径低下式を断面均一高炉モデル³⁾に入力し、間接還元帯出口における焼結鉱粒径を算出して、操業との比較検討を行った。

還元粉化にもとづく間接還元帯における粒径の低下は高炉塊状帯における通気性を阻害する。

一方、図4にみられるように燃料比の面からは適正な間接還元帯出口粒径の存在することが示唆され、この理由は次のように考えられる。すなわち、焼結鉱の間接還元帯における粒径低下はガス流分布変化に起因するCOガス利用率の低下をまねき、燃料比を上昇させる。他方、粒径が過大な場合には、原因としての被還元性の低下とともに、粒子比表面積の減少にもとづくガス利用率の低下により燃料比は悪化する。これらの効果が複合された結果、燃料比に極小値があらわれたものと考えられる。

2-4. 高炉塊状帯における焼結鉱品質の評価

図5に示されるように間接還元帯における焼結鉱粒径は還元粉化指数(RDI)が低いほど、また被還元性(JIS還元率)が低いほど大きい。通気性改善を目的とする場合には間接還元帯における焼結鉱粒径は大きい方が望ましいことから、品質としてはRDIが低く、JIS還元率も低いものが要求される。一方、図4の検討結果では、間接還元帯出口における粒径が5~6mm程度の場合に燃料比の面で最も有利である。したがって、この条件を満たすようにRDIおよびJIS還元率の値を管理できれば、燃料比の低下が期待されよう。

例えば、RDI = 40%の場合には、JIS還元率 = 67.5~70%とするのが適切である。JIS還元率に影響をおよぼす因子の中で焼結鉱FeOに着目した場合にはFeO = 4~5%とするのが望ましい。

ただし、図5における最適粒径は各高炉の置かれた経済的、設備的条件に左右され、高炉によって異なる値となるであろう。

3. 焼結鉱軟化性状の影響

高炉内融着帯におけるガス流れおよび還元反応に大きく影響をおよぼす焼結鉱軟化性状の評価を、荷重軟化試験にもとずいて実施した。

3-1. 軟化性状に関する基礎的検討⁴⁾ (図1中⑧)

所定の還元率に予備還元した焼結鉱を使用し、N₂気流中、温度および荷重一定条件下にてその収縮率の変化を測定した。図6に、次式により算出される軟化粘度⁵⁾(軟化領域における原料特有の収縮状況を示す指数)と還元率との関係を示す。

$$W = \eta \cdot (dr/dt) \dots (2) \quad W: \text{荷重} (\text{dyne/cm}^2), \quad r: \text{変形率} (-)$$

$$t: \text{時間} (\text{s}), \quad \eta: \text{軟化粘度} (\text{dyne} \cdot \text{s/cm}^2)$$

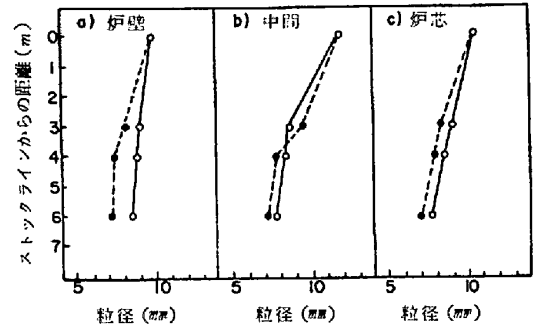


図3 高炉内焼結鉱粒径の推定値と実測値との比較 (○: 実測, ●: 計算)

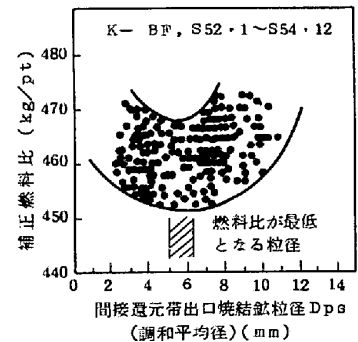


図4 間接還元帯焼結鉱粒径と燃料比の関係

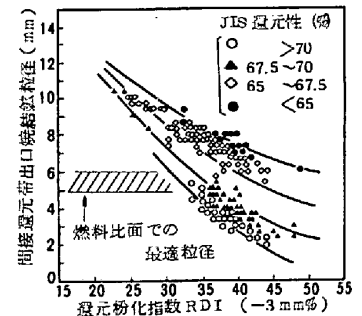


図5 間接還元帯焼結鉱粒径とRDI, JIS還元率の関係

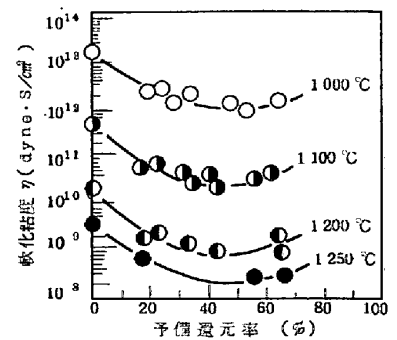


図6 軟化粘度におよぼす還元率の影響

軟化粘度は各温度とも、予備還元率50%程度において極小値を示すが、この理由はX線回折により定量化⁷⁾された鉱物相割合の変化(図7)から、次のように解釈される。

還元初期には軟化粘度の高いヘマタイトとマグネタイト⁸⁾の減少および軟化粘度の低いウスタイトの増加によって耐軟化性は低下するのに対し、還元率が50%程度に達した段階においては、金属鉄の生成が促進され、この軟化粘度がウスタイトおよびスラグの軟化粘度よりも高いために、次第に耐軟化性は回復する。

このように、軟化性状は還元過程における焼結鉱中の鉱物相種類と割合、換言すれば主として残留ウスタイト、スラグおよび金属鉄の割合と、その軟化特性に支配されていることが判明した。

3-2. 高炉通気性におよぼす軟化性状の影響⁹⁾(図1中⑩)

高炉内融着層の通気性を定量化するため、荷重軟化試験後の試料を用いて圧力損失の測定を行った。その結果、図8にみられるように融着層においても(3)式で示されるErgun型の圧損式が適用でき、通気抵抗係数 A_1, A_2 は収縮率により決定されることが明らかになった。

$$\frac{g_c(\Delta P/\Delta H)}{\rho \cdot U_0^2} = A_1 + A_2 \frac{\rho \cdot U_0}{\mu} \dots\dots\dots (3)$$

$\Delta P/\Delta H$: 圧力勾配 (kgf/m^2), ρ : ガス密度 (kg/m^3), μ : ガス粘度 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
 U_0 : ガス空塔速度 (m/s), g_c : 重力換算係数 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kgf}\cdot\text{s}^2$)

得られた係数を高炉内温度分布に対応させて高炉内ガス流れモデル⁹⁾に入力し、次のような検討結果を得た。(図9)

- 1) 焼結鉱の軟化性状が悪化すると、融着帯付近において半径方向のガス流が助長され、周辺流化すると同時に高炉通気性も悪化する。
- 2) 昇温荷重軟化試験により得られた高温通気抵抗(\bar{K}) (1000~1300℃における通気抵抗の平均値)が 1.0×10^4 (MKS単位)上昇すると、高炉通気抵抗は20%程度増加する。

3-3. 高炉融着帯における焼結鉱品質の評価(図1中⑧⑨)

高炉内において、焼結鉱はその到達還元率と温度によって軟化粘度を変化させながら降下して行くと考えられ、(3-1)節にて得られた検討結果にもとづけば、高温還元性の向上により軟化性状は改善できると期待される。一方、焼結鉱鉱物相と軟化粘度との関係からは、原料配合の調整により軟化粘度の高いスラグ相およびウスタイト相を形成させることが有効と考えられる。

これらの点を検討するため、高炉内の還元条件に近似させた条件下において行った昇温荷重軟化試験結果を図10に示す。図より、平衡脈石融点(脈石成分から、 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ 系状態⁹⁾)を用いて算出⁹⁾が高く、高温還元性(1100~1300℃の間における還元率の増加)の良好なものほど収縮率は小さく、軟化性状として優れていることが確認された。

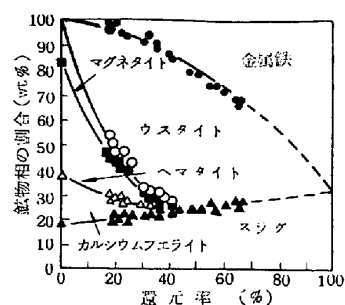


図7 還元による鉱物相の変化

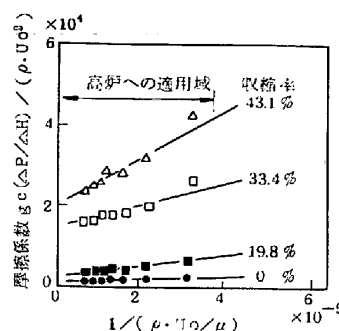


図8 軟化試料の通気特性

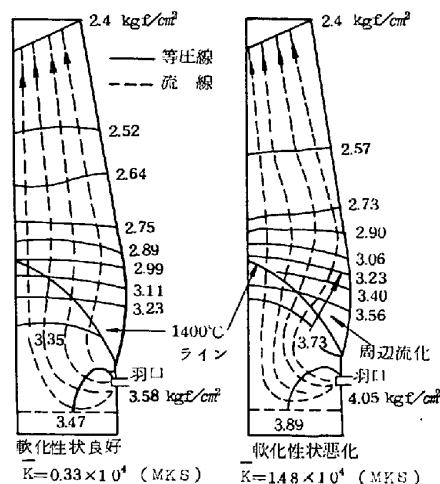


図9 高炉内ガス流れにおよぼす影響

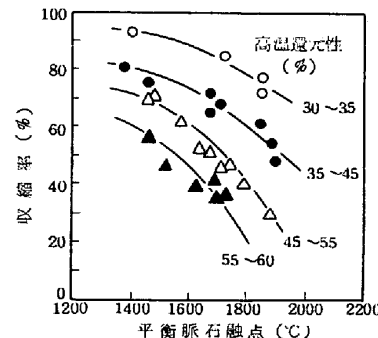


図10 昇温荷重軟化試験結果

4. 溶融滴下性状の影響

軟化性状とならんで炉下部での通気性および反応を支配する溶融滴下性状について、昇温荷重還元条件下における滴下試験により調査を行うとともに、高炉操業におよぼす影響についても検討を行った。

4-1. 滴下性状におよぼす焼結鉱性状の影響(図1中⑨⑩)

1) 平衡脈石融点の上昇にともなって滴下開始温度は上昇する。一方、滴下終了温度はほぼ一定であるために、平衡脈石融点の上昇とともに滴下温度巾は次第に減少し、高温通気抵抗も低下する。(図11)¹⁰⁾

2) 滴下温度におよぼす原料化学成分の影響としては、焼結鉱塩基度の上昇は滴下温度を上昇させ、 Al_2O_3 含有量の増加は滴下温度をわずかに低下させる。また、 MgO 含有量が3%以内の場合、 MgO の増加は滴下温度を低下させる結果となっており、これらの傾向は平衡脈石融点の値によってもほぼ説明が可能である。^{11) 12)}

4-2. 高炉操業への影響¹⁰⁾(図1中⑪)

高炉モデル³⁾により試算し、次の結果を得た。(図12)

- 1) 滴下開始温度の上昇は炉内滴下帯における滴下距離を減少させる。
- 2) 滴下距離の減少は滴下帯における溶鉄とSiOガスとの接触時間を減少させるため、鉄中Si含有量の低下にもとづく燃料比の低下が期待される。

溶融滴下性状の詳細な評価については今後の検討を待たねばならないが、品質評価基準としては、良好な被還元性と高い脈石融点が要求されるほかに、滴下時および滴下後の良好な流動性ならびに形成スラグの高い脱硫能等が考慮されねばならないであろう。

5. 結 言

高炉操業におよぼす焼結鉱の還元粉化、軟化および溶融滴下性状の影響について考察し、高炉の適正操業面からみた焼結鉱の品質評価を試みた。本報告では塊状帯、軟化帯および溶融滴下帯の各領域内をそれぞれ独立に考察したが、今後は総合的な装入物評価を可能とすべく検討を進め、製造法への反映をはかることが課題となろう。

参考文献

1) 羽田野, 宮崎, 下田, 岩永, 桐野: 鉄と鋼, 66(1980)S696, 2) 日本鉄鋼協会, 鉄鋼基礎共同研究会, 高炉内反応部会: 高炉内現象とその解析(1979), 3) 羽田野, 山岡, 山縣: 鉄と鋼, 62(1976)S391, 4) 羽田野, 宮崎, 下田, 岩永, 桐野: 鉄と鋼, 66(1980)S699, 5) 中村, 関, 近藤: 鉄と鋼, 56(1970)P1456, 6) 三本木, 宮崎: 学振 54 委1254 (1972), 7) 白岩, 藤野: 住友金属, 18(1966)P76, 8) 羽田野, 宮崎, 下田, 栗田: 鉄と鋼, 64(1978)S107, 9) E. F. Osborn, R. C. DeVries, K. H. Gee, and H. M. Kraner: J. Metals (1954)P33, 10) 羽田野, 宮崎, 下田, 岩永, 山縣: 鉄と鋼, 66(1980)S61, 11) 安元, 山下, 山本: 鉄と鋼, 66(1980)S43, 12) 清水, 片岡, 河合, 安元, 山本: 鉄と鋼, 66(1980)S701.

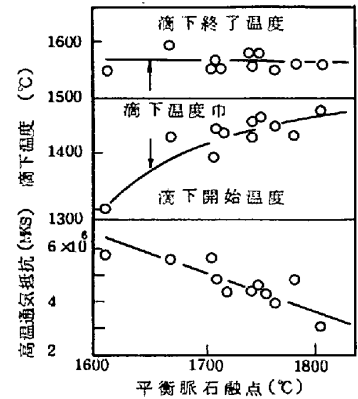


図11 平衡脈石融点と溶融滴下性状の関係

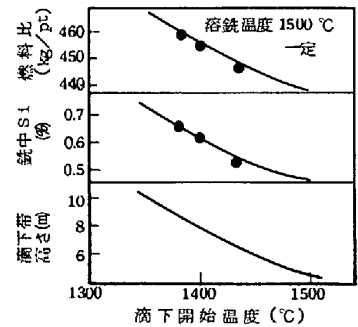


図12 溶融滴下性状の高炉操業におよぼす影響

(● K-BF, 焼結鉱塩基度上昇時の実績)