

討 1 焼 結 鉱 の 高 炉 内 挙 動

新日本製鐵 広畑製鐵所 ○九島行正 内藤文雄 有野俊介
 生産技術研究所 佐藤勝彦
 大分製鐵所 金森 健

1. 緒 言

オールコークス操業では熱流比上昇に伴ない高炉塊状帯の低温度域拡大、荷降下異常、ガス流変動等の現象が生じやすい。焼結鉱性状と高炉操業との関連についての考え方はかなり整理¹⁾²⁾³⁾されてきたが焼結鉱の高炉内での挙動は焼結鉱自体の性状の他に高炉内状況によっても変る面があり、従来の性状試験(JIS-R1, RDI, TI, 高温性状試験等)では高炉操業の諸現象を論じきれないことがあり炉内サンプル調査⁴⁾⁵⁾⁶⁾からのアプローチも必要である。焼結鉱製造技術の進歩に対応して高炉側からの評価技術の確立を急がねばならないが、その第1ステップとして、操業中および休風時に高炉内から採取した試料の調査結果と関連基礎実験からの二、三の考察を報告する。

2. サンプルングの方法および高炉操業条件

(1) サンプルング位置

広畑4BFにおけるサンプルング位置 [Fig.1]

大分2BF 炉腹ゾンデ：羽口から5.6 m上、ストローク 4 m

(2) 高炉操業条件

Table 1. Average properties of sintered ore and blast furnace operating conditions

Sintered ore properties	TI	JISRI	RDI	Mean size	CaO/SiO ₂	FeO	SiO ₂	MgO
		62%	64%	34%	18mm	1.65	5.6%	5.9%
BF operating conditions	Productivity	Fuel rate	Blast temp	Moisture content of blast	Top pressure	Sintered ore ratio		
	15t/m ² ·d	475kg/t·pig	1100°C	33g/m ³	1.7kgf/cm ²	80%		

3. 炉内サンプル調査結果

3-1 炉内焼結鉱の粒度変化状況

高炉操業中に採取した炉内焼結鉱は操業状況によって粒度が変動しており、塊状帯の温度が低く還元が遅れる(炉下部還元量が多い)炉況のときは粉率が高い。[Fig.2] 炉内サンプル粒度はサンプルングの際の機械的、あるいは熱的衝撃による粉化も含んだ数字であり炉内粒度をそのまま表わしているものではないが、融着物サンプル数例の断面 [Photo-1] を見ると焼結鉱は数mm程度に細粒化しているものが多い。操業中と休風時のサンプル粒度には顕著な差が認められない。休風時の炉高方向サンプルング調査(炉壁近傍) [Fig-3] ではシャフト上部で粉率が急に高くなりそれ以降あまり粉率が変らない。炉内の還元粉化は主としてシャフト上部で進み、シャフト中段以下での新たな粉化は少ないものと考えられる。

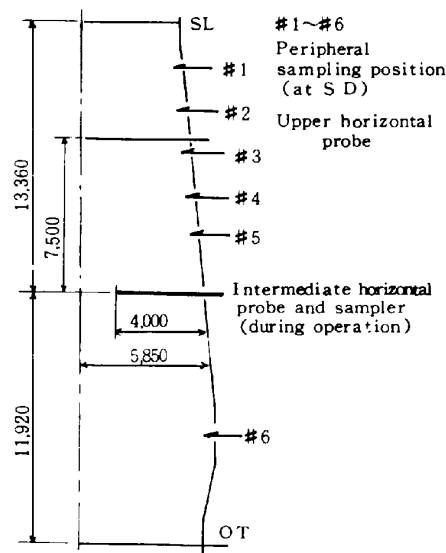


Fig. 1 Sampling position at Hirohata No. 4 BF

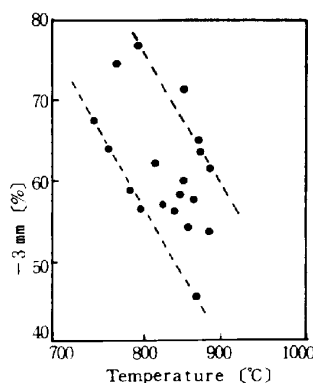


Fig. 2 Relation between fines ratio and temperature (Sampling data during operation)

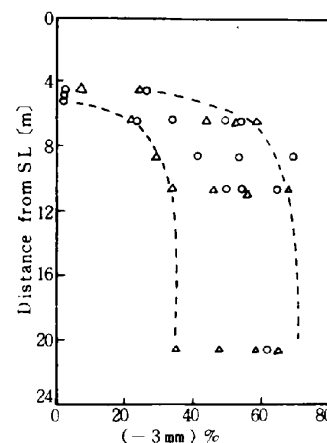


Fig. 3 Fines distribution in axial direction (Sampling data at SD)

3-2 還元状況

(1) 炉内試料の還元率：中部ゾンデ（SL下13.4m）で作業中に採取した焼結鉱の還元率は30%前後で炉径方向の差は少ない。粒度毎に比較すると（-1mm）粉がよく還元されており、（1~3mm）と（+5mm）は同程度である。一方、炉高方向での休風時採取試料〔Fig. 4〕では、シャフト中部までの還元は緩やかで下部での還元が多い。この傾向は炉内ガス組成からの反応解析結果⁹⁾とも対応する。

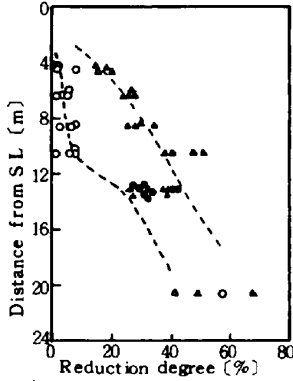


Fig. 4 Reduction degree distribution in axial direction

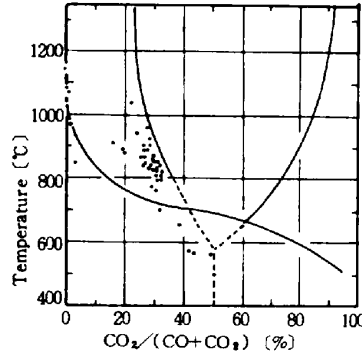


Fig. 5 Gas composition sampled during operation at intermediate horizontal probe

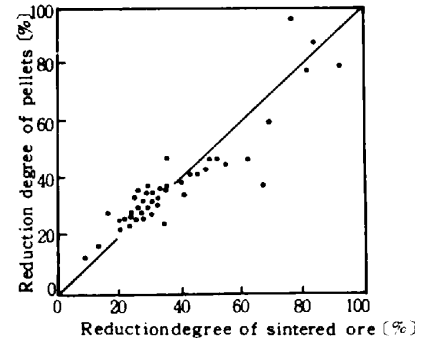


Fig. 6 Comparison of reduction degree between sintered ore and pellets

(2) 炉内温度分布と還元進行：中部ゾンデの温度は通常 800~900℃であり、ガス成分は FeO-Fe の平衡組成に近い。〔Fig-5〕中部ゾンデ温度が周辺部で 600℃以下になる状況（低温域拡大）ではガス流が乱れ、塊状帯の還元進行も径方向で差が大きい。このような状況のときは周辺部の降下が遅くなるためか、温度が低いにもかかわらず周辺部鉱石の還元率が70%以上に達することがある。

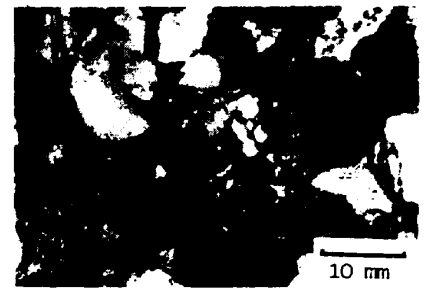
(3) 焼結鉱とペレットの還元率比較〔Fig 6〕：同一サンプリング位置で比較すると焼結鉱とペレットの還元率はほぼ同じであるが、詳細に見れば還元率40%以下ではペレットの方がはやく、40%以上では焼結鉱の方がはやい。この傾向は昇温荷重還元試験条件での両者の還元特性とほぼ一致する。

3-3 融着状況

炉腹ゾンデ（大分2BF）による休風時サンプリングでは炉壁から4mの範囲では融着塊が1~3層分採取される⁷⁾。融着塊には、細粒、粉焼結が結合したもの、メタル化が進みスラグが凝集し滴下直前のもの等がある。この場所の温度は休風前日の測定値で炉内側は最高



(A) Poorly reduced material



(B) Well reduced material

Photo 1. Inside state of cohesivematerial

1200℃、炉壁側は900℃位である。融着物には還元が遅れて軟化したものと還元の進んだ硬いものがある。一方、中部ゾンデ（広畑4BF、通常1000℃以下）では鉱石は融着していないことが多い。炉下部の周辺ガス温度が低く中心ガス流の強いときに炉壁から4mの位置（温度1000~1100℃、CO₂≈0%）で軟化融着物が採取された。鉱石の昇温速度がはやくて還元が遅れ勝ちの場合、1000℃位の低温度で融着するようで、鉱石内部のスラグ相にアルカリ濃化が認められた。還元が進んだ融着物では極端なアルカリ濃化はないようで、メタル化がよく進んでいて硬い。

3-4 炉内循環成分の挙動

Zn, アルカリは微粉焼結に濃化しており〔Fig. 7〕炉内循環域は高炉解体調査結果⁴⁾と一致するようだ。Kの循環量はNaよりも多く、中部ゾンデ作業中（1000℃）サンプルではKはSi分布域に濃化しており

(局部的にmax 40%)、その場所にFeO, Al₂O₃, CaO等が共存することがあるがMgOは認められない⁹⁾。これからK₂Oは一旦、K₂O-SiO₂、または、K₂O-SiO₂-CaOの形で低融点スラグを形成した後スラグ融液中にAl₂O₃が拡散するにつれて高融点化(K₂O-SiO₂-Al₂O₃系)するプロセスが推測され、この低融点スラグ形成が炉中心付近での低温融着現象と関連していることが推定される。

焼結鉱のCaO/SiO₂は炉下部で低くなりその傾向が微粉程著しいことから、CaOの変化が少ないと仮定すれば炉下部でSiO₂の循環が起っていることが考えられる。その循環域はアルカリ循環域に近いようでもありSiO₂挙動は今後更に解明を進めるべき問題のように思われる。

4. テーブル実験による焼結鉱挙動の考察と今後の課題

4-1. 還元条件と還元粉化

低温熱保存帯生成時の炉内状況を推定するために垂直ゾンデで測定した温度、ガス組成に近似させた還元を行ない、粉化試験を行なった。[Fig. 8]低温熱保存帯生成時の条件では還元率が10%以下に停帯している時間が長く、粉化量は低温熱保存帯のない条件の場合の約2倍になる。

RDIの高いもの(RDI=53)と低いもの(RDI=33)についてガス組成(CO₂=0~20%)、時間(~120min)を変えた定温還元粉化試験を行なった。高RDI焼結鉱はCO₂濃度と無関係に還元率と粉率が対応する。標準ガス組成(CO=30, N₂=70)では還元時間30minで還元率5%となり粉率がピークに達する。これに対し、低RDI焼結鉱は標準ガス条件で還元率が5%に達するのに40min以上を要し、還元率が10%に到達するまで粉率が上昇して行く。CO₂=20%の条件では、還元率と粉率の関係は高RDI焼結鉱と一致するが、低RDI焼結鉱は低温域での還元が遅いため、一定時間で比べると粉率は低い。

昇温還元では550℃の定温還元に比べて粉化が少ない。これらの実験結果から、550℃付近の温度域で還元率が5%の状態になると粉化が最も起りやすいといえそうである。低温熱保存帯はこの条件を満たしやすい場所と考えられ、これがあまり拡大しない間はRDI管理により炉内の粉化を抑えることは可能であろうし、逆に高炉が必要とする耐還元粉化性は塊状帯の状況によって必要レベルが異なるともいえよう。焼結鉱性状としては600℃までの還元が遅く、600~1000℃の還元が進みやすいものが好ましいようで、針状カルシウムフェライト組織を増すことはその一つの解であろう。一方、低温熱保存帯の拡大した炉況条件では低RDI焼結鉱でも粉化が進むのでRDI管理のみでは対処し切れなくなる場面も考えられる。高炉操業で炉径方向熱流比分布改善の努力(例、焼結鉱粒度別装入等)¹⁰⁾も必要と考えられる。

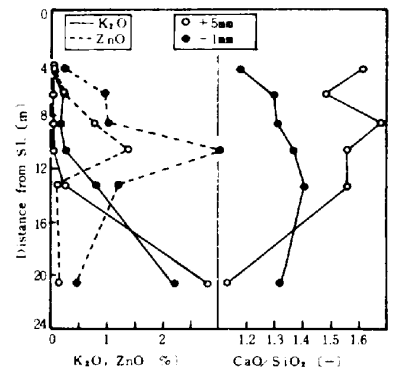
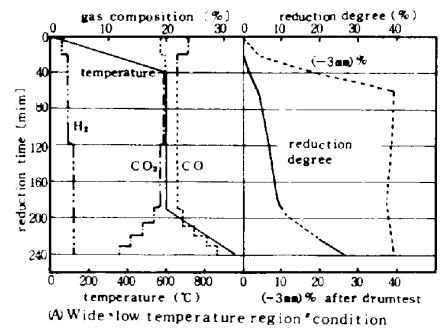
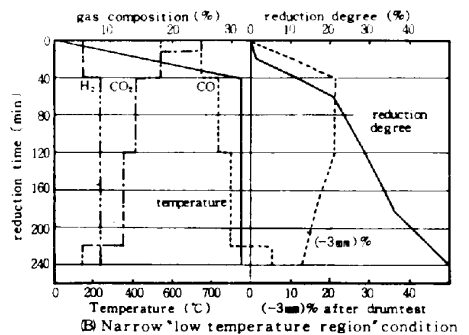


Fig. 7 Axial distribution of K₂O, ZnO and CaO/SiO₂



(A) Wide low temperature region condition



(B) Narrow low temperature region condition

Fig. 8 Size degradation after temperature elevating reduction test

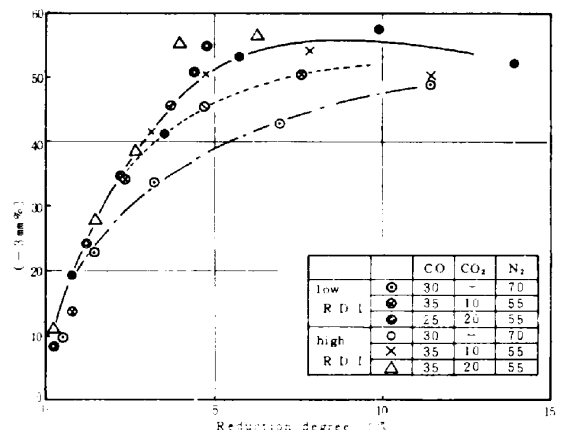


Fig. 9 Relation between size degradation and reduction degree

還元初期の焼結鉱内部のクラック発生、伝播と鉱物組織や還元進行との関係については種々報告があり、高炉内の還元粉化の解析も行なわれているが、高炉内での粉化現象を解明するための試験ではガス組成と温度を塊状帯の状況に近似させることが必要と考えられる。

4-2 高温性状

高温性状は鉱石の融着・溶落・滴下の性状であるとともに、炉下部通気性や炉熱とも関係のある性状であり、炉下部状況改善の観点からこれの改善は重要である。1000℃での還元が遅れた場合を想定し予備還元率30%の焼結鉱の昇温荷重還元試験を行なった。[Fig. 10]1000℃以上の昇温速度を変えると融着挙動が変わり、急速昇温条件では高温性状が劣化したような挙動を示す。1000℃までに十分還元が進んでいればそれ以後の昇温速度がはやくても高温性状は安定している。1100℃あるいは1200℃での鉱石内部の未還元物量が融着・溶落性状と密接な関係があることは従来指摘されている通りで、この時点で還元が十分に進んでいればアルカリの影響（低温融着）を軽減することにもなりそうである。高温性状改善の面からも焼結鉱の被還元性向上は重要である。高温性状の中で溶落性状については現在のところ炉内の実態を十分把握し切れない。今後の解明課題であろう。

4-3 焼結鉱粒度と被還元性

粒径が小さい程焼結鉱は還元されやすい。この傾向は定温還元（JIS還元試験）と昇温還元で共通している。[Fig.11]炉内サンプルで焼結鉱（JISRI=65%）とペレット（JISRI=90%）の還元率がほぼ等しいことは炉内の焼結鉱に多数のクラックが生成しているか、あるいは、粒度が10mm以下になっていることを意味しているものと思われる。しかし、炉内焼結鉱の粒度はまだ十分には揃えておらず、今後の解明課題である。高炉に装入する焼結鉱粒度は塊状帯での還元および融着挙動を重点に考えると小さい方が望ましいが、一方、塊状帯の通気性確保のための制約もあり、適正粒度の問題は粒度と還元粉化性の関係の検討も含めて今後の重要課題の一つといえよう。

5. 結 言

オールコークス操業に入ってから低温熱保存帯生成等炉内状況の変化に伴ない焼結鉱の高炉内挙動は以前よりも複雑になってきているように思われる。操業中および休風時の高炉内から採取した試料の調査と関連基礎実験から焼結鉱の還元、粉化および融着挙動について考察し、今後の課題の検討を行なった。高炉操業に望ましい焼結鉱性状の究明をさらに進めるためには焼結鉱性状変更試験と高炉内焼結鉱挙動調査を積極的に進めていくべきであろう。高炉検出端情報をもとにしたシミュレート実験により、いろいろの状況における焼結鉱挙動を調査することも炉内現象の理解を深めるために重要である。

参考文献

1) 山田：鉄と鋼，66(1980)A125 6) 金森ら：鉄と鋼，67(1981)S717 12) 宮下ら：鉄と鋼，68(1982)S86
 2) 谷中ら：同上，67(1981)A5 7) 同：同上，68(1982)S784 13) 井上ら：同上，68(1982)S737
 3) 宮崎ら：同上，67(1981)A13 8) 九島ら：同上，68(1982)S781 14) 岩永：同上，68(1982)p740
 4) 鉄鋼協会高炉反応部会：高炉内現象とその解析，1982 9) 同：同上，68(1982)S122 15) 加瀬ら：同上，67(1981)S716
 10) 下村ら：同上，63(1977)A79 16) 早瀬ら：同上，67(1981)A17
 5) 菅原ら：鉄と鋼，67(1981)S52 11) 奥野ら：同上，68(1982)A5

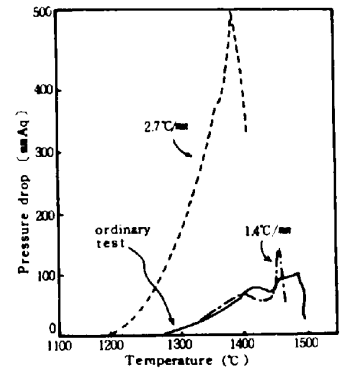


Fig. 10 Hightemperature Property of Poorly Prerduced sintered ore

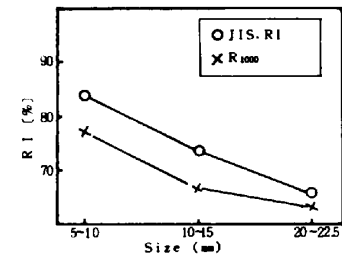


Fig. 11 Relation between reduction degree and sintered ore size