



今後の高炉操業において焼結鉱に 求められる性状

山口一良

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所
製鉄研究部 主幹研究員

Kazuyoshi Yamaguchi

Sinter Properties Required for Blast Furnace Operation in Future

1 はじめに

高炉装入原料の性状が、高炉操業、とくに還元性、通気性に及ぼす影響は非常に大きい。装入原料性状改善の歴史は、塊鉱石の整粒、ブレンディングに始まり、粉鉱石焼成による酸性焼結鉱製造、焼結配合原料中への石灰石添加による自溶性焼結鉱製造、微粉鉱石焼成による酸性ペレット製造、およびペレットの自溶性化と多くの技術開発がなされてきた。とくに、自溶性焼結鉱の高炉における還元性、通気性に及ぼす影響は非常に大きく、高炉装入原料の70～80mass%と大部分を占めるに至っている¹⁾。

焼結鉱性状がきわめて重要であるとの認識の高揚とともに、その被還元性、還元粉化性、常温強度等をさらに改善するための研究開発はたゆみなく継続している。その一環として、良好な自溶性焼結鉱の性状を基に、高炉出鉄スラグの化学組成を調整するために塊状で装入していた副原料(石灰石、珪石、蛇紋岩等)を、装入原料の融着、滴下時の脈石の滓化性を向上させるべく焼結配合原料中に添加し、被還元性、還元粉化性、常温強度を調整する手段とした技術が開発された。その結果、 SiO_2 、 MgO 等をかなり含有する焼結鉱が高炉で使用されてきた²⁾。

また、高炉解体調査の結果融着帯の存在が確認され、1000～1400℃の温度領域に存在する融着帯が高炉操業の還元性、通気性に大きな影響を及ぼすことが明確になって以来、1000℃以上の高温領域における焼結鉱の性状(高温性状)、とくに還元性、通気性を表わす焼結鉱性状が注目されてきた。そしてこれらの性状を改善するために、実機で低 SiO_2 焼結鉱の製造が実施されてきている³⁻⁵⁾。最近、微粉炭多量吹込み操業が普遍化するにつれて、高温領域における還元性、通気性を表わす焼結鉱性状はますます重要と認識され、4.0mass%台の低 SiO_2 焼結鉱製造の試みも実機でなされている^{6,7)}。今後、微粉炭多量吹込み操業に対応した、

1000℃以上の高温領域における焼結鉱の還元性、通気性を表わす性状の改善はますます重要になると考えられ、これらに関する研究はさらに継続していく必要がある。

本展望では、微粉炭多量吹込み(>200kg/t-pig)を前提とした高炉操業において、焼結鉱に求められる性状に関して従来知見を整理し、それを基に若干の基礎実験を行い、焼結鉱として具備すべき性状を提示することを試みた。

2 微粉炭多量吹込みに伴い焼結鉱性状はどのように変化したか?

一般的に、微粉炭吹込み量増加に伴う熱流比低下により、高炉塊状帯において1000℃程度の高温熱保存帯が拡大し、500～700℃の低温熱保存帯が縮小するため、還元粉化性指数(RDI)の管理値上昇が可能と考えられている^{8,9)}。しかし吹込み量増加に伴う高炉半径方向のOre/Coke分布不均一性増大、装入物降下速度低下、低温熱保存帯での滞留時間増加等により、相対的に熱流比の高い領域が周辺部等に形成され、この領域での還元粉化が懸念されるため¹⁰⁾、RDI管理値上昇は慎重に対処する必要がある。また酸素富化も熱流比上昇、低温熱保存帯拡大をもたらす¹¹⁾、RDI管理値上昇に対する不安要因である。さらに、高温熱保存帯拡大は焼結鉱のCOガス還元により有利であるが、半径方向のOre/Coke分布不均一性増大、すなわち焼結鉱層厚の局部的増加に対処するために、被還元性指数(JIS-RI)向上は必須である。

君津3高炉における試験操業時に、焼結鉱中脈石低下による低スラグ焼結鉱($\text{SiO}_2=5.2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3=1.6\text{mass}\%$)使用にもかかわらず、微粉炭比>200kg/t-pigで発生した装入物降下速度変動、炉下部通気性変動は、焼結鉱層厚増加による還元不足と解析されており¹²⁾、脈石をさらに低下した低スラグ焼結鉱が必要と考えられる。また微粉炭多量吹込み操業の安定性は、炉下部通気性で検出できると判断された。

微粉炭吹込み量200kg/t-pigを達成している実炉において、公表されている操業データ、推移図を基に一部の欠落情報を私信により補うと¹²⁻¹⁶⁾、100kg/t-pigレベルの操業に対して200kg/t-pigレベルの多量吹込み時に、焼結鉱性状は次のように変化している。

〈JIS-RI $\geq$ 70%、RDI $\leq$ 38%、常温強度 $\geq$ +1.0%、高炉スラグ量 $\leq$ 280kg/t-pig(これに見合う焼結鉱中SiO₂低下)〉

3 なぜ焼結鉱中SiO₂低下により高炉炉下部通気性が改善されるのか？

前述したように、焼結鉱中SiO₂でほぼ決まる高炉スラグ量は、微粉炭多量吹込み操業の炉下部通気性を支配していると考えられる。炉下部の反応、伝熱を模擬できるホットモデル実験¹⁷⁾によると、PC=200g/Nm³において、焼結鉱中SiO₂低下に伴う高炉スラグ量低下により炉下部通気性は大幅に改善される(Fig. 1)。福山4高炉¹⁵⁾、君津3、4高炉¹²⁾、鹿島2高炉⁷⁾の実炉においても、焼結鉱中SiO₂低下の結果としての高炉スラグ量低下により、炉下部通気性改善を達成している。

高炉スラグ量低下(焼結鉱中SiO₂低下)による炉下部通気性改善は、焼結鉱で形成される融着層の通気抵抗低下による。1100℃近傍より焼結鉱中にFeO含有融液が生成し気孔を埋めていくため¹⁸⁾、焼結鉱層の圧損が上昇していく。この圧損上昇の程度が融着層の通気性を支配し、高炉炉下部通気性を決定する。断熱型高温性状測定¹⁹⁾における圧損-時間曲線を積分した値をS値と定義し²⁰⁾焼結鉱層の通気性評価指標として採用すると、実炉の炉下部通気性はほぼS値で説明できる²¹⁾。圧損-温度曲線を積分した高温通気抵抗指数(KS)²²⁾も同様の指数である。焼結鉱中SiO₂低下によるKS低下²³⁾、SiO₂低下によるJIS-RI向上⁶⁾、およびJIS-RI上昇によるKS低下²³⁾の現象を整理すると、FeO含

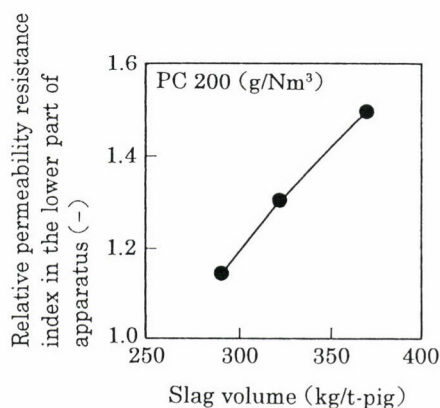


Fig.1 Relation between slag volume and permeability in blast furnace during change of SiO₂ in sinter.

有融液生成までの高炉還元効率が向上し、低SiO₂と合せて融液生成量が減少したことにより、焼結鉱層圧損が低下したと説明できる。

4 高炉炉下部通気性改善は焼結鉱中SiO₂低下だけでよいか？

微粉炭多量吹込み操業時の炉下部通気性改善策として、高炉スラグ量低下(焼結鉱中SiO₂低下)を述べたが、本展覧の主旨から離れるものの、炉下部通気性改善はコークス性状の寄与を抜きに語れない。ホットモデル実験結果を基に両者の寄与に触れる。Fig. 2に示すように、通常の焼結鉱とコークスを使用した操業において、PCを100g/Nm³から200g/Nm³に上昇させると炉下部通気性は悪化する(⊗印)。PC=200g/Nm³時に低SiO₂・低MgO焼結鉱を使用すると炉下部通気性は大幅に改善され(●印)、前述した結果を検証している。一方PCが250g/Nm³まで増加すると、低SiO₂・低MgO焼結鉱使用ではダスト量が増加するため炉下部通気性悪化を抑制できない(●印)。この場合高CSRコークス使用によりダスト量増加を抑制すると、フレーム温度低下と合せて炉下部通気性が改善される(○印)。

PC=200g/Nm³時には高炉スラグ量低下(焼結鉱中SiO₂低下)が効果的であり、さらにPCを増加するときにコークス性状改善を実施する必要がある。

N-Sinter : Normal sinter (SiO₂=5.65, MgO=1.62mass%)
 L-Sinter : Low SiO₂-low MgO sinter (SiO₂=4.82, MgO=0.69mass%)
 N-coke : Normal coke (CSR=57.6, CRI=30.3, DI₁₅¹⁵⁰=84.2%)
 H-coke : High CSR coke (CSR=71.9, CRI=20.9, DI₁₅¹⁵⁰=86.4%)

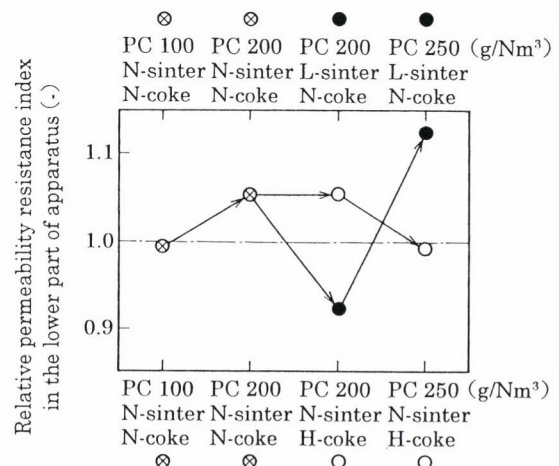


Fig.2 Change of permeability in lower part of apparatus during change of coke and sinter properties.

5 焼結鉱中SiO₂低下に伴う高炉出鉄スラグ中化学組成調整をどうするか？

焼結鉱中SiO₂低下には、焼結配合原料中から蛇紋岩等のSiO₂-MgO系副原料をカットするのが一般的である。SiO₂-MgO系副原料をカットして低SiO₂・低MgO焼結鉱を製造、使用する場合、焼結鉱の還元粉化性、常温強度等が変化する可能性があるとともに、焼結鉱中Al₂O₃一定の条件下では高炉出鉄スラグ中(Al₂O₃)上昇、(MgO)低下を招き、スラグ流動性、脱硫に支障を来す。焼結鉱の還元性、通気性向上のために焼結鉱中SiO₂、MgOを徹底的に低下させることは効果的だが、焼結配合原料中からカットした副原料を別途塊状で炉頂から装入するか、粉状で羽口部から吹込み、出鉄スラグ中化学組成を維持する技術が必要である。以下にその技術について述べる。

高SiO₂・高MgO焼結鉱(SiO₂=5.5、MgO=1.6mass%)、別途塊副原料を炉頂から装入する場合を想定した低SiO₂・低MgO焼結鉱(SiO₂=4.9、MgO=0.8mass%)に蛇紋岩(SiO₂=38.4、MgO=39.7mass%)を2.0mass%混合した原料、および別途粉副原料を羽口部から吹込む場合を想定した低SiO₂・低MgO焼結鉱の3水準の試料を用いた断熱型高温性状測定によると、高SiO₂・高MgO焼結鉱単味に対して、蛇紋岩混合低SiO₂・低MgO焼結鉱、低SiO₂・低MgO焼結鉱単味ともにS値が低い²⁴⁾。圧損上昇の原因となるFeO含有融液の生成量が低SiO₂・低MgO焼結鉱中に少ないことによる。また、蛇紋岩混合低SiO₂・低MgO焼結鉱の圧損上昇傾向は低SiO₂・低MgO焼結鉱単味とほぼ同じであり、混合した蛇紋岩の滓化はFeO含有融液が還元により減少し圧損が低下してから起っていると推定される²⁴⁾。

次に、微粉炭200g/Nm³吹込み時に、高SiO₂・高MgO焼

結鉱使用(Case-1)、低SiO₂・低MgO焼結鉱に塊蛇紋岩2.0 mass%混合使用(Case-2)、低SiO₂・低MgO焼結鉱使用時に羽口部より粉蛇紋岩10g/Nm³吹込み(Case-3)の3水準の実験をホットモデルで実施した。出鉄スラグ量、化学組成は一定である。Fig. 3に炉下部通気性の変化を示すが、Case-1に比較してCase-2,3の順に炉下部通気性が改善されている²⁴⁾。塊または粉蛇紋岩の滓化が融着帯よりも高温部の滴下帯で起こり、その滓化現象が炉下部通気性に影響を及ぼしていない。Case-2よりもCase-3のほうが炉下部通気性が改善されており、粉を羽口部から吹込むほうがより効果的である。

ホットモデル実験中に、滴下スラグ、レースウェイスラグ、出鉄スラグを採取し、その化学組成の調査結果をFig. 4に示す²⁴⁾。この図のスラグ組成は、CaO+SiO₂+Al₂O₃+

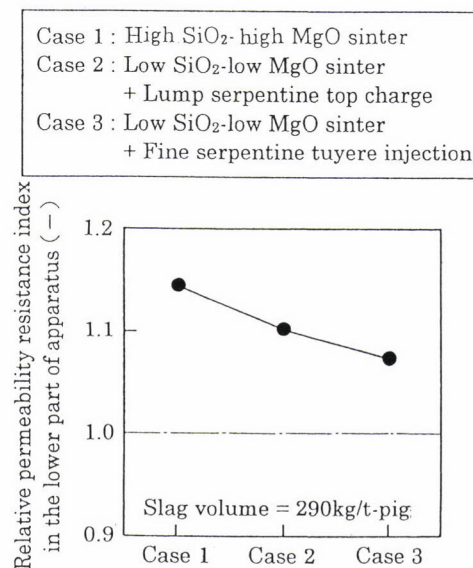


Fig. 3 Difference of permeability in the operation with different charging or injection measures of flux.²⁴⁾

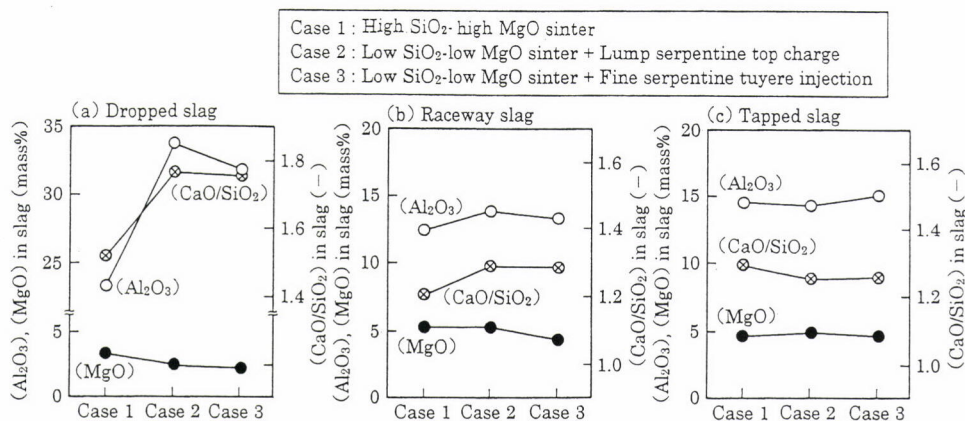


Fig. 4 Comparison of slag compositions in the apparatus in the operation with different charging or injection measures of flux.²⁴⁾

MgO=100mass%とした補正值で表示した。Fig. 4(b)、(c)によると、Case-1～3におけるレースウェイスラグ、出鉄スラグの化学組成はほぼ同じ値を示し、これらの位置で蛇紋岩の滓化はほぼ完了している。とくに、Case-3において羽口部より粉蛇紋岩を吹込んだ場合でも、レースウェイスラグの化学組成はCase-1,2とほぼ同じであり、ホットモデルのレースウェイ深度(～250mm)内で粉蛇紋岩の滓化はほぼ完了している。

上述と同様の現象は試験高炉における操業²⁵⁾にもみられた。また北海製鉄(株)室蘭6焼結機で、焼結配合原料中に0.7mass%配合していたジュナイト($\text{SiO}_2=42.1$ 、 $\text{MgO}=47.8\text{mass}\%$)をカットして低 SiO_2 ・低MgO焼結鉱($\text{SiO}_2=5.2\text{mass}\%$ 、 $\text{MgO}=0.9\text{mass}\%$)を製造し室蘭2高炉で全量使用した。出鉄スラグの化学組成を一定とするために、高炉炉頂から塊ジュナイトを4～8kg/t-pig装入した。微粉炭吹込み量を140kg/t-pigから170kg/t-pigに上昇させ、Ore/Coke増加にもかかわらず下部K値を維持でき、上述したモデル実験結果(Fig. 3、Case-2)を検証した²⁴⁾。

6 なぜ別途使用した副原料の滓化性が向上するのか？

融着、滴下時の脈石の滓化性を向上させるべく焼結配合原料中に添加していた副原料を、別途塊または粉として使用しても滓化性が悪化しない理由は、次のように考えられる。高 SiO_2 ・高MgO焼結鉱($\text{SiO}_2=5.5$ 、 $\text{MgO}=1.6\text{mass}\%$)を使用した、オールコークスと微粉炭200g/Nm³吹込みの実験をホットモデルで実施し、実験中に滴下スラグ、レースウェイスラグ、出鉄スラグを採取し、その化学組成の調査結果をFig. 5に示す。Fig. 5(a)に示すように滴下スラグの(CaO/SiO_2)、($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$)は、オールコークス時よりも

微粉炭200g/Nm³吹込み時のほうが低下しており、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の低いコークス灰分(0.515)、微粉炭灰分(0.573)との滓化を示している。レースウェイ内で発生したコークス粉は炉下部滴下帯方向にあまり上昇しない²⁶⁾ことから、密度、粒径の小さい未燃チャー灰分との滓化の可能性が大きい。すなわち、微粉炭多量吹込み時に発生する未燃チャーが炉下部滴下帯を上昇し、焼結鉱から滴下したスラグと同化することにより、滓化が促進されたものと推定される。

7 今後の高炉操業において焼結鉱に求められる性状

微粉炭多量吹込み(>200kg/t-pig)を前提とした今後の高炉操業において、焼結鉱に求められる性状に関して、焼結鉱で形成される融着層の還元性、通気性を改善することが大きな課題の1つであることを導出した。そのために焼結鉱中 SiO_2 低下が効果的であり、高炉の出鉄スラグ中化学組成を調整するために、焼結配合原料から副原料等をカットして低 SiO_2 を達成し、別途副原料を塊または粉状で高炉で使用する技術が、焼結鉱製造に対して幅を広げさせることになる。この節では、焼結鉱で形成される融着層の還元性、通気性改善(S値低下)のために、焼結鉱中の微細気孔量、気孔径分布および脈石の役割に関する検討(若干の基礎実験)を行い、焼結鉱として具備すべき性状に関する考察を試みた。

7.1 焼結鉱中の微細気孔量、気孔径分布の役割

7.1.1 微細気孔の平均粒径の影響

焼結鉱のJIS-RIまたは断熱型高温性状測定時の1000℃における到達還元率(R_{1000})は、水銀圧入式ポロシメーターで測定される15 μm 以下の微細気孔量に支配される²¹⁾。しか

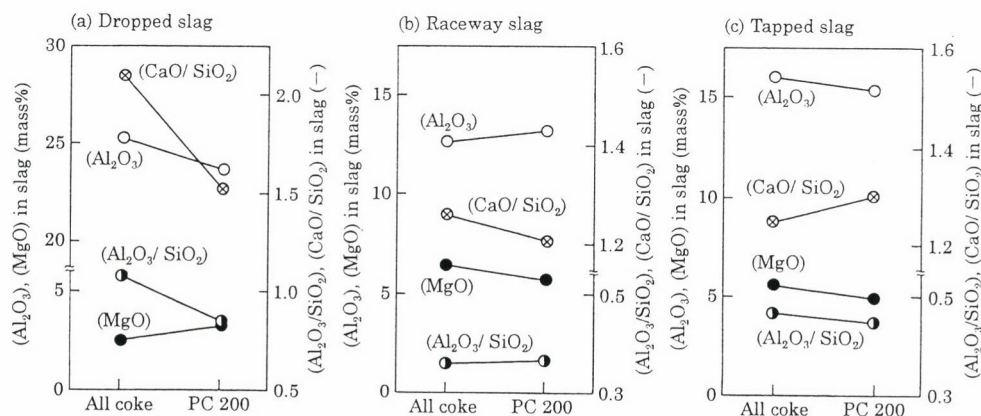


Fig. 5 Comparison of slag compositions in the apparatus in the operations of all coke and PC 200g/Nm³ injection.

し、実炉の還元性の指標である炉頂COガス利用率(η_{CO})はJIS-RI、 R_{1000} との相関性は低く、 $400\mu\text{m}$ 以下の微細気孔の平均粒径(Mean diameter of micro pore; MDMP)との間に高い負の相関性が得られ、MDMPの小さいほうが η_{CO} は高く、S値が低い²¹⁾。MDMPの小さい焼結鉍中には $15\mu\text{m}$ 以下の微細気孔の中でもさらに径の小さい気孔($1.0\mu\text{m}$ 以下)が相対的に多く、比表面積は増大している。

S値の低い試料(S値=833kPa・min、MDMP=0.084 μm)と高い試料(S値=1284kPa・min、MDMP=0.22 μm)に関して、断熱型高温性状測定により得られた 1100°C 以上の試料温度に対する焼結鉍層の還元速度と圧損の推移の比較結果²¹⁾をFig. 6に示す。 1100°C 付近より焼結鉍中にFeO含有融液が生成し、温度上昇とともに融液量が増加して焼結鉍中の空隙を埋めていくため、 1200°C 付近より焼結鉍層の圧損が急上昇しその後還元速度が低下する。速度は低下するものの還元は進行し焼結鉍中FeO残留量が減少していくためFeO含有融液量も減少し、圧損は極大値を経て徐々に低下する。MDMPが大きい試料(破線)はMDMPの小さい試料(実線)に比較して、圧損上昇開始温度はほぼ同じであるが、圧損上昇に至るまでの還元速度は大きく $15\mu\text{m}$ 以下の気孔量が多いことに対応する(Fig. 7(a))。しかし極大値に達した後の $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ における還元速度は小さく圧損が低下しにくい。S値を決定する圧損低下傾向は、 $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ における還元速度によって支配され、この領域において還元ガスが侵入する気孔量と気孔を閉塞する融液量の問題となる。 1000°C 以上の領域における還元性の指標とさ

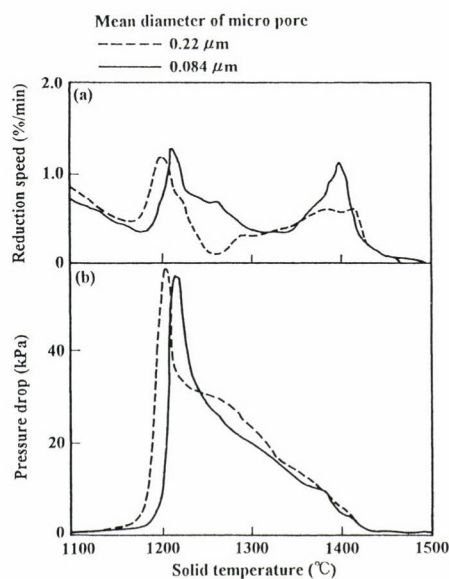


Fig. 6 Reducibility and permeability of sinter with large mean diameter of micro pore and small one at temperatures above 1100°C .²¹⁾

れてきたJIS-RI、 R_{1000} と η_{CO} の間に低い相関性しか検出されなかったことは、 $15\mu\text{m}$ 以下の気孔量で支配される固層還元の結果が $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ における融液を伴う還元に及ぼす影響が小さいことを意味する。

7.1.2 還元途中の微細気孔径分布の変化

Fig. 7(a)、(b)に還元前および 1000°C でFeO段階まで予備還元した後の、焼結鉍中の $400\mu\text{m}$ 以下の微細気孔径分布を示す²¹⁾。 $1.0\mu\text{m}$ 以下の気孔に還元ガスが侵入して脱酸素が起ることにより、 $1.0\mu\text{m}$ 以下の気孔とともに $15\sim 1.0\mu\text{m}$ の気孔が大幅に増加している。還元前のMDMPが小さい試料(実線)では、 $1.0\mu\text{m}$ 以下の気孔量に対して、より大きい $15\sim 1.0\mu\text{m}$ の気孔量が少なく、MDMPが大きい試料(破線)での $15\sim 1.0\mu\text{m}$ の気孔量が多いことと対称的である(Fig. 7(a))。MDMPが小さい試料では、FeO段階まで還元した後 $1.0\mu\text{m}$ 以下の気孔量が大幅に増加している(Fig. 7(b))。この理由については、Swannら²⁷⁾による 700°C 以下でヘマタイトから微細マグネタイトが生成しそれがFeO段階まで持ち越される現象とは異なり、MDMPが小さい還元前の試料には $15\sim 1.0\mu\text{m}$ の気孔量が少ないため、相対的に多い $1.0\mu\text{m}$ 以下の気孔に還元ガスが侵入したことによると推定される。 $1.0\mu\text{m}$ 以下の気孔量が相対的に多いMDMPが小さい試料では、還元途中で $1.0\mu\text{m}$ 以下の気孔を多量に生成し、比表面積が大きいことから還元促進が期待される。

FeO段階まで予備還元した試料を用いて 1000°C 以上での

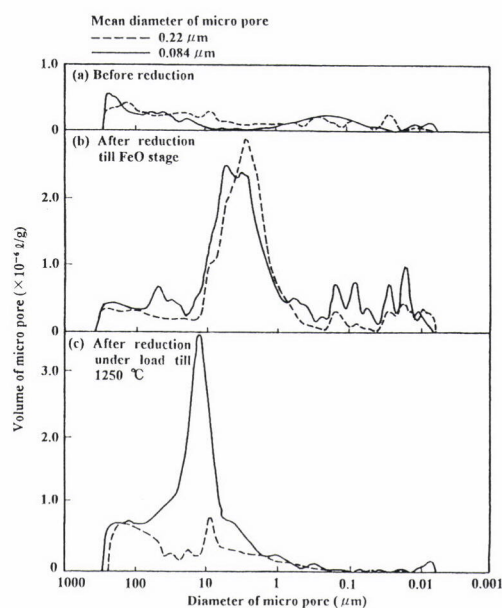


Fig. 7 Micro pore size distributions before and after reduction of sinter with large mean diameter of micro pore and small one.²¹⁾

荷重還元を行い、1250℃で中断した焼結鉱中の400μm以下の微細気孔径分布をFig. 7(c)に示す²¹⁾。焼結鉱中に生成したFeO含有融液が1.0μm以下の気孔にも侵入して気孔量を減少させるが、MDMPが小さい試料では、1.0μm以下の気孔の残存量が多い。MDMPが小さい試料では1000℃以上、とくに1200℃以上での還元が促進されFeO含有融液量が少なく、かつ1.0μm以下の気孔量が多いため、1.0μm以下の気孔が残存したものと考えられる。

以上の検討結果から、塊中に存在する400μm以下の微細気孔の平均粒径が小さい焼結鉱では、還元途中で比表面積の大きい1.0μm以下の気孔を数多く生成するため、1000℃以上、とくに1200℃以上の高温領域における還元を促進し焼結鉱中に生成するFeO含有融液を減少させるとともに、融液の侵入しにくい多量の1.0μm以下の気孔の存在が生成メタルの軟化、凝集を抑制するため、焼結鉱層の還元性向上、通気性改善がはかれると推定される。

7.2 焼結鉱中脈石の役割

焼結鉱を構成する代表的な鉱物組織として、ヘマタイト、カルシウムフェライト等が存在する。これらの代表的な鉱物組織を単体で合成し、JIS-RIの測定条件下で還元した詳細な検討結果²⁸⁾によると、被還元性の差は、鉱物組織の差よりも組織の大きさ(気孔径の大きさ)の差で決まる。したがって、鉱物組織の被還元性を評価するためには、組織そのものと組織中の微細気孔径分布の両者の考慮が必要であるが、両者は密接不可分の関係にあり分離は困難である。またJIS-RIの測定条件下ではなく、1000℃以上、とくに1200℃以上の高温領域における還元性、通気性を評価する必要がある。この節では、まず気孔径分布を変化させた純ヘマタイトの還元性、通気性の測定を、次に純ヘマタイトに対する脈石の役割を評価するために、SiO₂、CaOの添加量を変化させたときの還元性、通気性の測定を行った。

7.2.1 純ヘマタイトの還元性、通気性

ヘマタイト試薬に粉コークス(粒径0.5~0.25、0.25~0.125、-0.125mmの3水準)を5.0mass%添加し、糖蜜30mass%水溶液を散布しながら10~15mmのペレットを作成した。これを1000℃の大気中で48h焼成して糖蜜および粉コークスを完全に除去し、異なる気孔径分布をもった純ヘマタイトとした。水銀圧入式ポロシメーターで測定した気孔径分布をFig. 8に示す。粉コークス粒径0.5~0.25mmのペレットが、1.0~0.1μmの微細気孔量が多い。

断熱型高温性状測定結果をFig. 9に示す。粉コークス粒径0.5~0.25、0.25~0.125、-0.125mmの順にS値は上昇している(数字で示すと115、408、961kPa・min)。1.0~

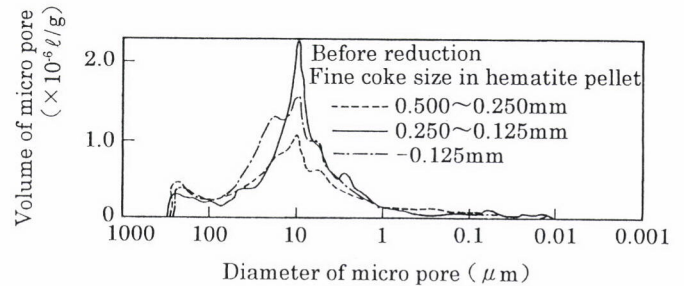


Fig. 8 Micro pore size distributions in hematite pellet during change of fine coke size.

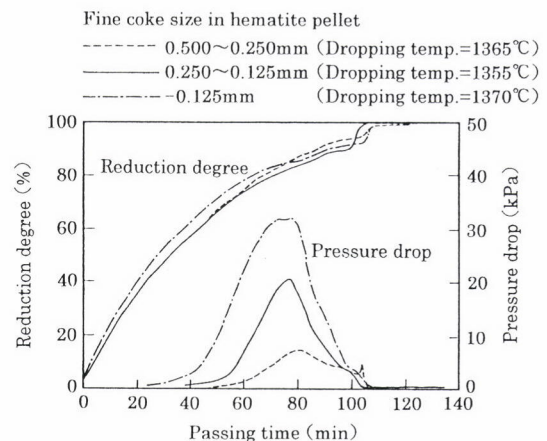


Fig. 9 Comparison of high temperature properties under load of hematite pellet during change of fine coke size.

0.1μmの微細気孔量が多い粉コークス粒径0.5~0.25mmのペレットのS値がもっとも低く、前述した微細気孔量の影響を検証している。圧損は1000℃付近から上昇し、1200℃を越える付近で極大に達しその後低下する。FeOの融点(1370℃)付近で圧損はほぼ上昇前のレベルまで低下し、FeOが急速に溶融、還元、浸炭してメタルが滴下する。

1000℃付近より圧損が上昇するのは、固体FeO、固体金属鉄の軟化粘度²⁹⁾が高融点脈石を含む組織の粘度よりも小さいことによる。これは、Fig. 7(c)において荷重還元を1250℃で中断した焼結鉱中に1.0~0.1μmの微細気孔が存在するのに対して、純ヘマタイトの荷重還元を1200℃で中断した試料中にはほとんど存在しないことから裏付けられる。圧損低下のための高融点脈石の存在は大きい。また、純ヘマタイトの場合は滴下温度が1355~1370℃と低く、滴下温度上昇のための高融点脈石の存在も大きい。

以上の検討結果より、純ヘマタイトの還元性、通気性改善には1.0~0.1μmの微細気孔量が必要であること、および1000℃程度における圧損上昇抑制、滴下温度上昇のために高融点脈石の存在が不可欠であることが分る。

7.2.2 純ヘマタイトの還元性、通気性に及ぼす脈石添加の影響

純度の異なる鉄鉱石を用いて、ヘマタイト中の SiO_2 、 CaO の添加量を変えた10～15mmの焼成ペレット(1300～1350℃で焼成)を作成した。 Al_2O_3 、 MgO は0.5mass%あるいはそれ以下に抑えた。水銀圧入式ポロシメーターで測定した気孔径分布によると、還元性、通気性改善に必要な $1.0\sim 0.1\mu\text{m}$ の微細気孔がほとんど存在せず、この節での検討は脈石添加の影響に絞ることができる。

Fig. 10の CaO - SiO_2 平面のプロットに、断熱型高温性状測定によるS値を添字で示した。ヘマタイト中の SiO_2 が増加するとS値が急速に増大する。同一 SiO_2 に対して CaO を増加するとS値が改善されるが、 $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.0$ (一点鎖線)上では、 SiO_2 が少ない(CaO が少ない)ほどS値が改善されている。 $1.0\sim 0.1\mu\text{m}$ の微細気孔量が少ない粉コークス粒径 $0.25\sim 0.125\text{mm}$ の純ヘマタイトのS値($408\text{kPa}\cdot\text{min}$)に対して、 $\text{SiO}_2=1.37$ 、 $\text{CaO}=1.62\text{mass\%}$ のペレットのS値($276\text{kPa}\cdot\text{min}$)は低く、高融点脈石の少量添加によるS値改善効果は大きい。 $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.0$ 程度では脈石添加量の限界は $\text{SiO}_2=2.5\text{mass\%}$ 程度であり、さらに SiO_2 量を増加させるためには、焼結鉱のように高い CaO/SiO_2 が必要となる(◎印、 $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.7$)。

Fig. 11の CaO - SiO_2 平面のプロットに、断熱型高温性状測定による滴下温度を添字で示した。この図に示す測定範囲では、滴下温度は1275～1325℃と純ヘマタイト(1355～1370℃)に比べてさらに低い。これはファヤライト($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$)の融点(1205°C)およびさらに低い共晶温度($1177\sim 1178^\circ\text{C}$)による。通常の焼結鉱なみに 1400°C 以上の滴下温度を確保するためには、高い CaO/SiO_2 が必要となる(◎印、 $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.7$)。

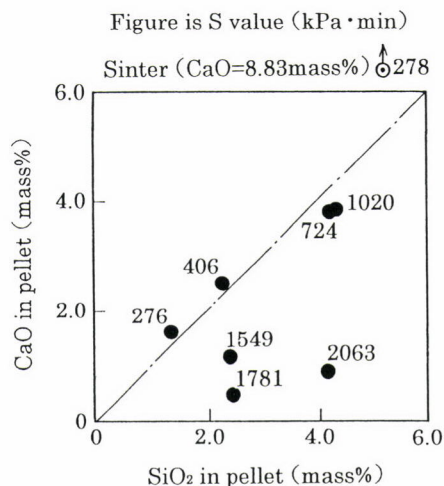


Fig. 10 Relation between SiO_2 and CaO in pellet classified by S value.

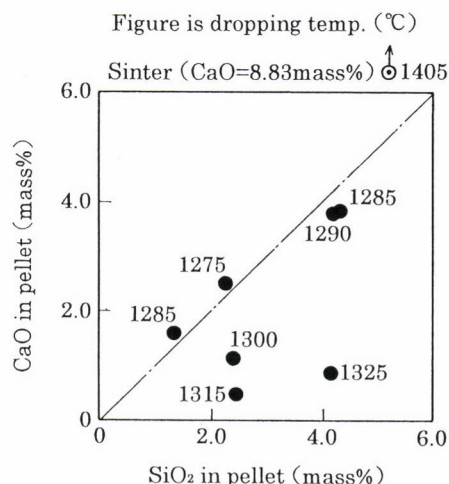


Fig. 11 Relation between SiO_2 and CaO in pellet classified by dropping temperature.

Fig. 10～11において、 $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.0$ よりも高い CaO の範囲のデータが必要であり、今後実施する予定であるが、通常の焼結配合原料を使用し、 SiO_2 と CaO/SiO_2 を変更して試験鍋で焼成した焼結鉱による検討結果¹⁹⁾によると、S値、滴下温度、滴下メタル収率、実験終了時の圧損の4指標がすべて良好である焼結鉱化学組成の範囲が規定され、 SiO_2 の下限は $4.0\text{mass\%}$ ($\text{CaO}/\text{SiO}_2=2.2$)程度であるが、どこまで SiO_2 を低下できるかが今後の検討課題である。

8 おわりに

微粉炭多量吹込み($>200\text{kg/t-pig}$)を前提とした今後の高炉操業において、焼結鉱に求められる性状に関して、従来知見の整理および若干の基礎実験による検討の結果、次の結論を得た。

(1) 焼結鉱で形成される融着層の還元性、通気性を改善することが大きな課題の1つであり、この改善により、微粉炭多量吹込み操業における炉下部通気性が改善され操業安定が得られる。

(2) 現在達成されている微粉炭比 200kg/t-pig 操業の実績における焼結鉱性状変化から、焼結鉱が具備すべき性状をまとめると次のようになる。

〈JIS-RI $\geq 70\%$ 、RDI $\leq 38\%$ 、常温強度 $\geq +1.0\%$ (微粉炭比 100kg/t-pig に対して)、高炉スラグ量 $\leq 280\text{kg/t-pig}$ (これに見合う焼結鉱中 SiO_2 低下)〉

(3) 微粉炭比 250kg/t-pig レベルの操業実績³⁰⁾によれば、高炉スラグ量 260kg/t-pig 台が必要であり、焼結鉱中 SiO_2 をさらに低下させる必要がある。モデル実験によれば、 250kg/t-pig レベルの操業のためには、焼結鉱性状のほかにコークス性状改善(CSR向上等)が必要である。

(4) 高炉スラグ量低下のための焼結鉱中 SiO_2 低下に対応して、高炉出鉄スラグ中化学組成を調整する必要があるときは、焼結配合原料からカットした副原料等を別途塊または粉状で高炉で使用する技術を適用できる。この場合、焼結鉱中 SiO_2 低下により改善された融着層の還元性、通気性が、副原料等の別途使用により悪化することはほとんどない。

(5) 焼結鉱で形成される融着層の還元性、通気性改善の策として、次の2つが提示される。1つは焼結鉱中における $1.0\sim 0.1\mu\text{m}$ の微細気孔量増加であり、これにより還元ガスの侵入による還元促進および FeO 含有融液量減少、 FeO 含有融液侵入抑制による気孔確保、生成メタルの軟化・凝集抑制が達成される。もう1つは徹底した SiO_2 低下であり、高融点(高CaO/SiO_2)脈石の存在が必須である。現状では $\text{SiO}_2=4.0\text{mass}\%$ ($\text{CaO/SiO}_2=2.2$)程度が下限であるが、今後どこまで低下できるかの検討が必要である。

(6) 焼結鉱中 SiO_2 低下によりRDI悪化が懸念されるが、JIS-RI向上をもたらす鉱物組織(微細気孔を含む)はRDIにとっても好ましい組織であり³¹⁾、RDI悪化抑制は今後の焼結鉱製造技術の開発に対するもっとも大きな課題である。

参考文献

- 1) わが国における製鉄技術の進歩, 日本鉄鋼協会特別報告書, 日本鉄鋼協会共同研究会製鉄部会, 24 (1977), 55.
- 2) 第116, 117回 西山記念技術講座, 最近の製鉄技術の進歩, 日本鉄鋼協会, (1987), 87.
- 3) 梶川脩二, 塩原勝明, 堤 一夫, 山岡洋次郎: 鉄と銅, 69 (1983), A9.
- 4) 坂本 登, 野田英俊, 岩田嘉人, 斎藤 汎, 宮下恒雄: 鉄と銅, 73 (1987), 1504.
- 5) 明田 莞, 高見満矩, 志垣一郎, 星野剛一: 鉄と銅, 73 (1987), 2076.
- 6) 渡辺隆志, 牧 章, 浜屋正司, 佐藤秀明, 坂本 登, 野田英俊, 市川孝一: 材料とプロセス, 10 (1997), 193.
- 7) 片山賢治, 伊東弘嗣, 松村 勝, 小池厚則, 星 雅彦: 材料とプロセス, 10 (1997), 873.
- 8) 吉田康夫, 北山修二, 石脇史郎, 磯辺光利, 宮川 裕: 材料とプロセス, 6 (1993), 30.
- 9) 内藤誠章, 細谷陽三, 山口一良, 樋口宗之, 井上義弘, 芳我徹三: 材料とプロセス, 9 (1996), 627.
- 10) 佐藤 健, 武田幹治, 板谷 宏: 材料とプロセス, 9 (1996), 620.
- 11) 今野乃光, 汐田晴是, 高松信彦, 藤原保彦, 内藤誠章: 材料とプロセス, 6 (1993), 18.
- 12) 天野 繁, 松永伸一, 柿内一元, 上野浩光, 今野乃光, 山口一良: 日本学術振興会製鉄第54委員会提出資料 (54委-2025), (1994)
- 13) 柚久保安正((株)神戸製鋼所): 私信.
- 14) 門口維人, 後藤哲也, 伊藤良二, 矢場田武, 清水正賢: 神戸製鋼技報, 46, 1 (1996), 2.
- 15) A. Maki, A. Sakai, N. Takagaki, K. Mori, T. Ariyama, M. Sato and R. Murai: ISIJ Int., 36 (1996), 650.
- 16) 梅崎孝之, 村井達典, 佐藤和明, 大西守孝, 波多野康彦, 小川明伸: 材料とプロセス, 9 (1996), 735.
- 17) 山口一良, 上野浩光, 内藤誠章, 田村健二: 鉄と銅, 78 (1992), 1214.
- 18) 内藤誠章: 材料とプロセス, 10 (1997), 743.
- 19) 細谷陽三, 山口一良, 折本 隆, 樋口謙一, 川口卓也, 後藤秀明: 鉄と銅, 83 (1997), 97.
- 20) A. Tayama, Y. Shimomura, K. Kushima, T. Nakata and K. Fujita: Proc. 39th Ironmaking Conf., Washington, AIME, (1980), 390.
- 21) 山口一良, 樋口謙一, 細谷陽三, 大塩昭義, 笠間俊次: 鉄と銅, 84 (1998), 702.
- 22) 望月 顕, 村井達典, 川口善澄, 岩永祐治: 鉄と銅, 72 (1986), 1855.
- 23) 星 雅彦, 川口尊三: 材料とプロセス, 9 (1996), 813.
- 24) 山口一良, 樋口謙一, 細谷陽三, 田中 毅, 佐藤武彦, 小泉文夫: 鉄と銅, 85 (1999), 501.
- 25) 山岡秀行, 松倉良徳, 山本高郁, 宇治澤優, 砂原公平, 中野 薫, 山縣千里, 吉川政秀: 日本学術振興会製鉄第54委員会提出資料 (54委-2122), (1998)
- 26) 原口 博, 西 徹, 美浦義明, 牛窪美義, 野田多美夫: 鉄と銅, 70 (1984), 2216.
- 27) P. R. Swann and N. J. Tighe: Metall. Trans. B, 8B (1977), 479.
- 28) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と銅, 70 (1984), 504.
- 29) 岩永祐治: 鉄と銅, 68 (1982), 2223.
- 30) 丸山太一, 牧 章, 下村昭夫, 大河内 巖, 森 侯寿, 佐藤道貴, 村井亮太: 材料とプロセス, 11 (1998), 834.
- 31) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と銅, 70 (1984), 512.

(1999年5月25日受付)