

結ケーキ荷重を緩和する方法や底部グレートに支持スタンドを設置する方法が開発された。後者は、実用化されることにより、焼結ケーキ中下層部に上層部荷重がかかるのを抑制して通気性を向上し生産性改善に効果を発揮している。

今後、褐鉄鉱をはじめとする低品位鉱の増加に際し、原料処理に関する造粒操作および装入操作の複合化検討が重要と考えられる。

## 1.3 塊成鉱の品質改善技術

### 1.3.1 焼結鉱製造の背景と最近の焼結鉱品質の推移

鉄鉱石資源が大きく変わりつつある。安価な豪州産ピソライト鉱石を多量に使用する努力がなされる一方、良質なヘマタイト鉱石に代わって開発されたマラマンバ鉱石の使用が始まった。いずれも従来鉱石に比較して多孔質でかつ結晶水を多く含む鉱石であって、焼結時に生産性・歩留が低下する難点がある〔前節参照〕。

一方、高炉操業では高出鉄比を前提として高微粉炭比操業が指向された。それを達成するために、焼結鉱の品質では、炉内通気性・通液性の改善の観点から高温性状が一層重要視されつつある。

このような背景の下に、焼結鉱の低スラグ化 ( $\text{SiO}_2$  含有量の低減) が志向された。主に蛇紋岩使用量の削減を中心に実施されたので、 $\text{MgO}$  含有量も低下した。この結果、従来品質では、被還元性 (RI) の改善がもたらされた。また、 $\text{MgO}$  が同時に低下したこと、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  レベルを維持し、 $\text{FeO}$  を上昇させたことで冷間強度 (TI) もむしろ向上してきている。しかし、還元粉化性 (RDI) の悪化は防ぎ得ず、操業基準値自体の緩和を余儀なくされた。

### 1.3.2 焼結鉱製造に関する基礎理論面での進展

焼結過程で生成する融液の量と粘度は焼結現象を支配する基本的パラメータである。また、主な結合組織となるカルシウムフェライト (CF) 相の構造は焼結鉱品質を決定づける。高温プロセス部会は、焼結研究会を中心に研究活動を展開し、焼結製造プロセスの基盤となるこれら学術的基礎知見の整備に努めた。

融液生成や鉱物相は、従来  $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  系あるいは  $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$ - $\text{FeO}$  系の状態図から類推するしかなかったが、融液生成で問題となる  $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$ - $\text{FeO}_x$  系における酸素分圧の影響や  $\text{Al}_2\text{O}_3$  や  $\text{MgO}$  添加の影響が新たに検討された。また、これらの系における融液の粘度測定データも蓄積された。その結果、焼結組成では、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}$  は融液粘度を低下させ、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  は逆にそれを上昇させることが明確になった。やがてその定量的な記述も可能となろう。

焼結鉱の全断面 EPMA 分析 (Electron Probe X-ray Microanalysis) により CF 内での  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$  固溶状態が分析される一方、多元系 CF の結晶構造解析が行われ、その構造が特定された。 $\text{MgO}$  の導入が CF 中への  $\text{SiO}_2$  の固溶を促進するとする結晶学的結論は興味深い。従来、スラグ相の生成を抑制して CF 相を多く含有する焼結鉱が強度・被還元性の両面から好ましいものとされている。この知見は、それを実現する組織制御法の出発点となる可能性がある。

強度を維持しつつ低スラグ化を図っていくには、従来の CF 系融液結合を補完する新たな結合組織が必要となる。 $\text{FeO}_x$ - $\text{SiO}_2$  系融液の活用である。そこで、 $\text{FeO}_x$ - $\text{SiO}_2$  系組織の還元性が詳細に調査されたが、やはり単独では還元性に問題が残るようである。今後は、 $\text{FeO}_x$  純粋な結合を志向するか、残留元鉱の形態制御による還元性改善を検討することになろう。

### 1.3.3 焼結鉱品質改善技術

#### (1) 被還元性

従来の JIS-RI 測定法の問題点が指摘された。すなわち、 $\text{CO}_2$  を含有しない還元ガスでは還元ポテンシャルが実際と大きく異なり RI 指数値に差がでにくい。また、実際の高炉では熱保存帯で塊成鉱の還元率はその平衡に達して一旦差がなくなるがそれ以降の高温での被還元性が重要な差を生む。従って、最近の還元性に関する研究では、高温加重軟化試験装置が用いられる場合が多くなった。

熱保存帯以降の還元後半部では、生成還元鉄内の拡散が律速しており、その組織構造が重要である。特に、0.1 mm 以上の気孔を確保して酸化鉄鉱物が生成融液で包囲されることを防止することが重要であるとされた。

実際には低スラグ化が志向された。低スラグ化の還元性改善の機構や効果については、説明を省略する。

#### (2) 還元粉化性

低スラグ化の問題点は還元粉化性の悪化である。

還元粉化に関してはすでに鉱物学や機械強度面から精力的な研究が実施されており、実用面でも原料の微粉部分の  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  を低下させる ( $\text{SiO}_2$  源の細粒化) 手段が確立されている。最近の低スラグ化に際して、焼結鉱製造面での新たな技術的進展はない。高炉操業状況を見ながら基準値が緩和されつつ、低スラグ化が推進されたのが実際である。

基準緩和は、高微粉炭吹き込み操業条件下では熱流比が低下して還元粉化が問題となる低温帯領域が縮小するとの考えに基づいている。また、高炉内に類似させたガス組成と昇温速度条件では、低スラグ焼結鉱の方がむしろ粉化が低減した

とする報告もなされた。

ここ数年、低SiO<sub>2</sub>の推進は足踏み状態である。RDI実績値も低下の方向であり、一つの限界に達したとも察せられる。原料面では、マランバ鉱石の導入によって一層の低SiO<sub>2</sub>化の推進が可能な状況にあるので、高炉内に則した還元粉化現象の理解を深めるとともに、抜本的なRDI対応策が今後の低SiO<sub>2</sub>化の推進には必要であろう。

### 1.3.4 今後の塊成鉱品質改善技術

これまで、整粒、塊鉱石から焼結鉱への転換、焼結鉱自溶活性化などによって原料品質が向上したことで、高炉操業は格段に進歩してきた。逆に、今後の一層の改善には、新たな塊成鉱の登場が待たれる。「エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究」プロジェクトでは含炭塊成鉱が精力的に検討された。一つの有力な可能性だと思う。

## 1.4 塊成鉱、コークスの高炉内挙動

### 1.4.1 技術の動向

90年代はバブル崩壊や円高レートの高騰など不安定化要因があり、鉄源コスト削減技術の開発が精力的に進められた。高炉では微粉炭多量吹き込み技術、焼結鉱製造では輸送コストの安い豪州鉱石の多量使用および安価なピソライト鉱石へのシフト、またコークス製造では安価な非微粘結炭の多量使用が指向され、原燃料コスト削減が実施された。上記背景下において各社で実施された微粉炭吹き込み操業では、炉下部通気通液性改善を目的としてコークス冷間強度DI (Drum Index) が重視され、また高Ore/Coke下でのシャフト部還元性および融着層での通気性改善を目的として、塊成鉱の高温還元性や鉱石層の高温性状(1000℃以上の高温での軟化・収縮・溶融・滴下の挙動)が重視された。

高炉炉内におけるコークスの挙動については、衝撃などの物理的要因とガス化・溶融還元などの化学的要因の双方から検討が進められ、コークスの粉化機構の検討およびコークス粉発生挙動の定量化が試みられた。粉化機構については塊状帯部でのガス化反応に伴い生成するコークス脆化層が摩耗・破壊して生成すると考えられ、コークス強度と反応性の関係、反応条件(温度・ガス組成など)の粉化に及ぼす影響が調査された。

また塊成鉱の挙動については、ピソライト鉱石の多量使用に伴うAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の影響評価とその無害化技術について多くの研究が進められた。焼結鉱の低SiO<sub>2</sub>化はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の無害化に寄与し高温性状を改善すること、鉱石層厚の低薄化や小塊コークスの混合装入は鉱石層上部の還元性を改善することで、鉱

石層全体の高温性状の改善に寄与することが確認された。

一方で、高炉操業の抜本的な改善技術として、高炉熱保存帯温度の制御を狙った高反応性コークス製造使用技術や鉄源に直接還元材を混在させた塊成鉱の製造使用技術が検討された。また地球環境に配慮しC比低減と通気性改善による生産性向上を狙った部分還元鉄製造や通常焼結ラインでの還元焼結鉱の製造技術が提案されている。

### 1.4.2 焼結鉱の高温還元性状改善

結晶水を含むピソライト鉱石、特にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の高い鉱石を使用する場合、生産性低下のみならず、強度・歩留の低下および耐還元粉化性RDI (Reduction Degradation Index) の悪化が生じることから、焼結鉱製造段階でコークス原単位が高くなり、高温還元性や高温性状の悪化に繋がっていた。そのためAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>無害化の検討が実施され、初期融液の同定や焼結鉱の主構成鉱物であるカルシウムフェライトの還元平衡の検討、焼結鉱JIS-RIや気孔率の影響、高温融着現象の検討などが実施された。対策として1995年前後から焼結鉱の低SiO<sub>2</sub>化による脈石量の低減が推進され、高温還元性状(S値の低下)の飛躍的な改善により、高炉の通気性・還元性が改善され低SiO<sub>2</sub>化(1985年5.5%→1995年5.3%→2000年4.9%)が加速された。低スラグ化に伴いRDIは上昇したが、微粉炭多量吹き込みに伴う熱流比低下の影響でRDI緩和が可能と考えられた。ただし、脈石量低減に伴う強度低下抑制策あるいはスラグ中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の増大により滴下過程および炉床部でのスラグ粘性への悪影響が懸念され、焼結鉱脈石成分CaO/SiO<sub>2</sub>、MgO等の影響が検討されている。

### 1.4.3 高反応性コークス使用による高炉内反応効率向上技術

高反応性コークス使用技術は、コークスの反応開始点を低温化することで、高炉の熱保存帯温度・還元平衡点を制御し、また高温での還元ポテンシャル向上により塊成鉱の間接還元を促進することを狙った技術として提案された。ただし、これまではコークスの反応性を高めると強度が低下することから、その製造法が課題とされていたが、最近Ca含有量の高い石炭を3~8%使用した高強度・高反応性コークスの製造法が確立され、実高炉での全量使用試験により還元材比の低減が可能であることが確認された。コークスの機能として通気通液性の媒体としての機能は必要であるが、高炉の反応効率改善を目指し、上記高反応性コークス以外にも触媒添加型の炭材の開発や鉄含有成型コークス製造などの検討がなされつつある。