

を開放すると石炭層の急激な膨張によりフレーク状コークスが生成したためである。さらに溶剤抽出炭を成形して、コークス化することも試みた。

中・低温乾留コークスの高炉内反応の研究（北海道大学）ではこの部会で実際製造したコークスの性状研究を行った。

これらの研究成果を基に Fig. 2.8 に示すような石炭の急速加熱を前提としたコークス製造法のシーズ技術を提案した。この技術は、①石炭を急速に加熱することにより溶融性を向上させる可能性があること、②石炭を塊成化して、均一かつ低温で乾留することにより総炭化時間を短縮できる可能性があること、である。

これは主に石炭・コークスの物性面からの提案であり、この技術を次世代のコークス製造法と位置付けるには、プロセス面から基礎を含めての十分な検討が必要である。

### 2.3.4 次世代コークス製造技術

次世代コークス技術を完成させるため、1994年から日本鉄鋼協会、特定基礎研究会で、プロセスの基礎からの検討を目的とする「新コークスプロセス工学」部会を発足させた。この部会では、石炭・コークスの加熱下での物質変化・反応挙動および熱特性を定量的に記述できるモデル化を図るとともに、反応メカニズムを解明することを目的とした。これらの知見を基に、新コークス製造技術の工学的展開の基礎が構築できる。

一方、次世代コークス製造プロセスの開発が1994年から鉄鋼各社を中心に国家プロジェクトとして発足した。

この技術は、石炭を400℃付近まで急速加熱して、石炭の軟化溶融特性向上の可能性を見いだすとともに、乾留時間の短縮を図る。その後、全部あるいは一部を熱間成形することで、微粉の発生を防ぎ、併せて石炭改質の効果をさらに高める。乾留炉では、700℃程度で押出し、乾留時間の低減を図る。得られたコークスを改質炉で1,000℃程度まで加熱し、室炉コークス並みの品質を得ようとするものである。

この技術は以下のような特徴が見込まれる。

- 1) エネルギー原単位の約10%低減
- 2) NO<sub>x</sub>の約30%低減、SO<sub>x</sub>の約10%低減

- 3) 石炭資源制約の緩和（非粘結炭の約50%使用可能）
- 4) 生産性300%向上による設備のコンパクト化
- 5) コークス炉3K作業の無人化

2年間は基礎的な調査研究プロジェクトである。ここでの主要開発課題は下記のとおりである。

- 1) 石炭の急速加熱変化：石炭を急速加熱することによる軟化・溶融性の変化と最適加熱速度、加熱温度の選定。
- 2) コークス品質への効果：急速加熱による乾留挙動の変化とコークス品質の定量的評価、使用石炭範囲の提示。
- 3) 急速加熱炭のハンドリング：軟化炭の挙動とハンドリング技術の確立。
- 4) プロセスエンジニアリング：プロセスフローの決定、急速加熱方法の選定、熱間成形方法の選定、ベンチスケールの仕様決定。

本プロジェクトは「21世紀における生産性、環境保全性を革新するスーパーコークス炉」を開発する意味で、「SCOPE 21」(Super Coke Oven for Productivity and Environment enhancement toward the 21st century)と名付けられた。

このように新しいコークス製造技術の開発が1994年から本格的に活動を開始した。

### 2.3.5 おわり

今後、コークス削減技術および代替技術としての高炉への微粉炭吹き込み、溶融還元製鉄法の進展を見込んだとしても、炉寿命を35年と想定すると、2000年初頭には大幅なコークス量の不足が懸念される。

高炉製造法の基盤プロセスとして、21世紀の社会環境ニーズに応えうる革新的コークス炉開発に大きな期待がかけられている。

産学共同研究の場である日本鉄鋼協会特定基礎研究会での地道な活動や日本鉄鋼連盟式成形コークス製造法の研究成果を基に新コークス製造技術の開発が1994年にいよいよ具体化してきた。

次世代コークス製造技術の開発を目的とした国家プロジェクトと産学共同研究の日本鉄鋼協会特定基礎研究会の発足である。

## 2.4 劣質鉱石対応技術

### 2.4.1 劣質鉱石対応技術の研究開発推移

周知のように、対象とするプロセスに不向きな原料は劣質と評価され、その価格は低下する。我が国では、劣質鉱石対応技術は焼結鉱の製造における「安価鉱石積極使用技術」と言い替えることができる。

#### (1) 鉄鉱石資源の劣質化

原料ソースにおいては、この10年間に四つの大きな変化

があった。いずれも劣質化の範疇に入る。

年代順には、まずペレット用の高品位微粉鉱石（PF、平均粒度は約0.15 mm）が低価格で安定的に購入可能となった。第2次オイルショックにより、焼成ペレットの価格競争力が無くなったためである。1979年から入荷している。次に、1986年より出荷されたカラジャス鉱床（ブラジル）の開発がある。極めて品位が高く（SiO<sub>2</sub><1%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><1%）、埋蔵量は世界最大である。続いて豪州における新規鉱床の開発が始

Fundamental Research	①①①	①x5 ②② ③	①x4 ② ③		①① ② ③	①x4 ② ③ ④	①		②② ③ ④		①①① ②	①
Pot Test & Laboratory Test	②	②② ③③③ ④④	②③ ④		②②② ②③ ④	②②② ③ ④			②	②② ④④		④
Sinter Plant Test		③ ③x2 ☆②	③ ③		③③ ③				③	④④⑤ ③④④	④④④ ④x5	④
Commercial Operation					②x6, ③ ☆②x2 ☆③	② ☆② ☆③	②② ③ ④		②② ②	② ④④ ☆④		④ 1994
Calendar Year	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994 (Spring)	

① Iron ore properties, ② Large volume use of cheap and high-grade fine ores (pellet feed), ③ High-quality sinter production based on ore properties, ④ Large-volume use of pisolitic ore

Fig. 2.9. Number of presentations on the use of low-quality iron ores at ISIJ symposium in a past decade.

まった。これまでの高品位ヘマタイト鉱床（低リンブロックマン鉱床）は 21 世紀早々にも枯渇することになり、その延命が必要とされた。まず、ゲーサイト (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O) を多量に含むマランバ鉱床の開発がある。1990 年より一部の焼結用粉鉱石に混入され始め、その混合比率は 1995 年には 20～30% になると予測されている。もう一つは、新しいピソライト鉱床の開発である。1992 年より入荷している。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有率は低く (1.2%)、1972 年より入荷中のものの約 1/2 弱という特徴がある。

(2) 資源変化対応技術に関する研究開発の推移

日本鉄鋼協会・講演大会における発表の内容は以下の四つに大別できる。その推移を Fig. 2.9 に示す。

- ① 鉱石特性、原料配合設計に関する基礎研究
- ② 安価微粉鉱石多量使用技術の開発
- ③ 鉱石特性を考慮した擬似粒子構造設計による高品質焼結鉱製造技術の開発
- ④ ピソライト鉱石多量使用技術の開発

1989 年以降、ピソライト鉱石使用に関する報告件数が急増加しているのは、我が国鉄鋼業の業績が著しく悪化し、素材費低減が喫緊の課題となったためである。

2.4.2 基礎研究の内容

1984 年までの 5～6 年間に鉱石特性、配合設計に関する基礎研究は飛躍的に進展したが、その後も旺盛な研究は変わりになく、鉄鉱石の (1) 造粒性、(2) 加熱時の変化、(3) CaO との同化速度、(4) 同化後組織およびこれらの鉱石特性と (5) 擬似粒子の合体性、(6) 焼結鉱品質、(7) 焼結体気孔構造の関係などが解明された。焼結反応の基本である鉱石の CaO との同化性が銘柄という物差でなく、特性値の関数で速度論的に評価できるようになってきた。配合設計の基礎として、単銘柄焼結鍋試験による鉱石の指数評価も盛んに行われた。また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の悪影響に力点を置いた、融体の性質、シンターケーキ構造、高 FeO 原料による反応制御などの研究も新しい取り組みであった。

ここで注目すべきはまず、葛西・大森らの“2 層ペレット法”の提示である。後述する新塊成法 (HPS) のアイデアの源と言える。次に、多孔質高品位鉱石 (カラジャス) とピソラ

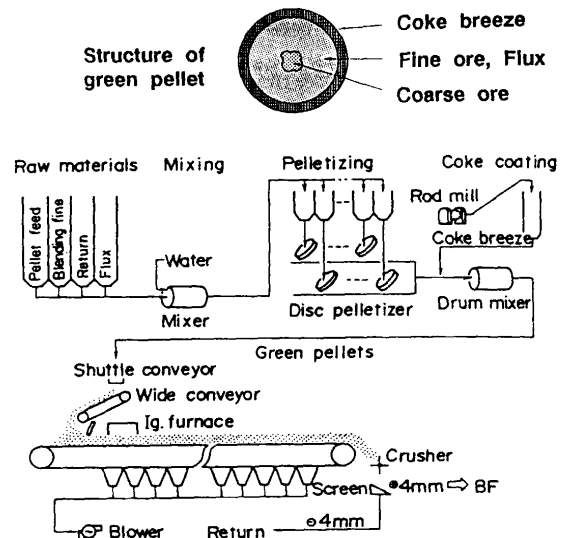


Fig. 2.10. Outline of "Hybrid Pelletized Sinter Process (HPS)". (Y. Niwa et al.: Proc. 6th Int. Symp. on Agglomeration, (1993), p. 393)

イト鉱石の特性解明が挙げられる。これにより、前者鉱石配合焼結鉱の低温還元粉化 (RDI) 増大原因、後者鉱石の焼結操業、品質悪化原因が解明され、後述の新技術が生まれた。

2.4.3 安価微粉鉱石多量使用技術の開発

安価微粉鉱石のソースは PF、脆弱なりモナイト鉱石 (マランバ鉱床) および鉱床中に局部的に賦存する高品位微粉であるが、大部分は PF とみてよい。これらは成分面で低 SiO<sub>2</sub>、低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の特長を有するが、細粒で、かつ難造粒性のため、多量に配合すると焼結ベッドの通気性を低下させ、歩留、生産率の悪化を引き起こす。

まず、既存設備で造粒強化、塩基度調整 (「CaO+SiO<sub>2</sub>=一定」維持)、ヒートパターン調整などの各種組み合わせによる低 SiO<sub>2</sub> 操業技術がほぼ確立され、1987～1989 年には低 SiO<sub>2</sub> の新記録 (4.4～4.9%、従来: 5.5% 前後) が各社から報告されている。JIS-被還元性 (RI) は 70% 台へ上昇し、高炉操業面でもメリットが享受された。

一方、微粉鉱石多量使用の鍵は「造粒技術」にあり、との考えから以下に列記する新技術が開発された。

- ① 無核ミニペレット法 (微粉鉱石の予備造粒法)

- ② 核添加ミニペレット法 (同上)
- ③ 核粉分離造粒法 (+1 mm 核を造粒後, 微粉を添加)
- ④ 粒化促進微粉添加造粒法 (転炉ダスト, 超微粉)
- ⑤ ペレット-焼結鉄ハイブリッド焼結法 (HPS)

ここで特記すべき技術はNKK福山第5焼結機(530 m<sup>2</sup>)にて1988年11月より稼動したHPSである。本法は原料の微粉化傾向を念頭に、ペレットおよび焼結鉄の製造プロセスを抜本的に改善することを狙っている。その基本コンセプトはFig. 2.10に示す構造の生ペレットをその表層に賦存する1 mm以下の微細なコークス粉を燃焼させて粒子同士を葡萄状に結合させ、かつカルシウムフェライト(CF)を形成させて被還元性を飛躍的に向上させることである。同図の設備フローに見られるように生ペレットの製造と崩壊防止が最重要課題であり、例えば直径7.5 mの世界最大級のディスクペレタイザーが10基設置されている。稼動後は、PF配合率50~55%で、高生産率(1.45~1.65 t/(h·m<sup>2</sup>)), 低SiO<sub>2</sub>・低Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1992年: 4.5%・1.5%)の安定操業を維持している。本焼結鉄の特徴はとりわけJIS-RI 70%台の高被還元性にあり、高炉の安定操業に大きく寄与し、設備投資以上の利益を上げている。

①無核ミニペレット法では、ベントナイトを1~2%添加する方法が1987年に新日本製鉄(株)広畑焼結工場で実用化された。②核添加造粒法は、返鉄またはピソライト鉄石を核とする方法が1982年に新日本製鉄(株)室蘭焼結工場で実用化されて以来、複数箇所検討された。NKK福山第4焼結機では1987年に返鉄と生石灰を添加する方法により、PF 10%配合技術を確立している。③粒化促進微粉添加造粒法では、PFと転炉ダストを事前に混練する方法が1985年に新日本製鉄(株)戸畑第3焼結機で採用された。

#### 2.4.4 高品質焼結鉄製造技術の開発

鉄石特性、配合設計に関する基礎研究から以下の高度な選択処理技術が開発された。

- ① 多孔質鉄石の選択造粒法 (被還元性向上)  
粘土系脈石の鉄石の全体または微粉部を予備造粒し、コークスの燃焼を改善してCFの生成を促進(新日本製鉄(株)釜石工場; 1984年試験, 同堺工場 1985年試験)

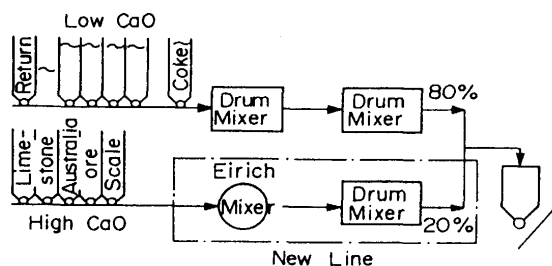


Fig. 2.11. Outline of "CaO Separated Granulation Method". (T. Kawaguchi *et al.*: *CAMP-ISIJ*, 1 (1988), p. 969)

- ② CaO成分分割造粒法(耐低温還元粉化性の向上)  
高CaO原料と低CaO原料に分割処理(Fig. 2.11)(住友金属工業(株)鹿島第2焼結機; 1986年12月実用化)
- ③ 高品位鉄石のCaOとの選択反応法(低SiO<sub>2</sub>・低FeO)  
CaO/SiO<sub>2</sub>を6以上となるように調整してCFで結合(新日本製鉄(株)若松2段装入焼結機; 1987年2月実用化)

上記①および②は粘土系鉄物を脈石とする高Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>鉄石が多量に使用できる技術であり、今後の安価原料対応技術へと発展する可能性がある。すでに②はピソライト鉄石増加技術としても活用されている。③はカラジャス鉄床の開発に着目し、鉄石の多孔質化に起因するRDI悪化を抑制して低SiO<sub>2</sub>のメリットを享受しようとするものである。

#### 2.4.5 ピソライト鉄石多量使用技術の開発

ピソライト(P)鉄石はヘマタイト塊を核としてその周囲を多量のゲーサイトが取り囲んだ魚卵状構造のため、結合水の蒸発による吸熱量が大きく、かつFig. 2.12のように大亀裂の生成、融液との急激な同化を起こして粗大気孔を有する脆弱なものに変化する。また高SiO<sub>2</sub>ゆえ、低強度のガラス質シリケートの結合相を形成しやすい。この鉄石特性が焼結操業、品質悪化の主原因である。

P鉄石の悪影響は入荷当初から指摘され、新原料中配合率20%程度までは、歩留、生産率の低下およびエネルギー原単位の悪化をある程度許容しながら改善が行われてきた。偏析給鉄強化、コークス細粒化、石灰石粗粒化が有効と報告されている。

豪州のBHP社は、鉄鉄石中の50%を低Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のP鉄石とした操業を実施中である。ただし、歩留の低下は大きい。我が国では歩留を問題にしており、(株)神戸製鋼所神戸焼結工場での新原料中54%配合試験、川崎製鉄(株)水島焼結工場での40%配合試験に代表されるように、歩留低下原因の解明、歩留改善技術が優先している。P鉄石多量使用を目標として提案された技術を大別すると以下ようになる。

- ① 緻密質(または低結晶水)微粉(PF)との配合法
- ② ミルスケール添加法(工場実験)
- ③ 保護層形成法(蛇紋岩, 転炉滓, PF)(鍋, 工場)

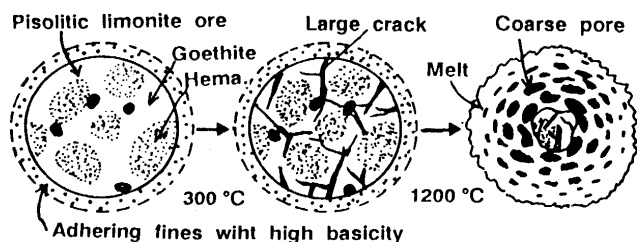


Fig. 2.12. Schematic illustration of the assimilation behavior of pisolitic limonite ore. (Y. Hida *et al.*: *Proc. 6th Int. Symp. on Agglomeration*, (1993), p. 250)

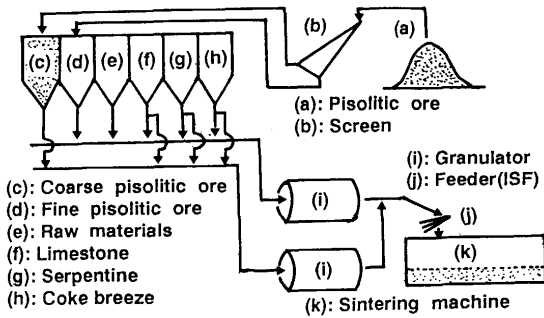


Fig. 2.13. Outline of "Self-densification and High Melting-Point Liquid-Phase Sintering Process (SHS)" adopted at Nippon Steel's Oita-No. 1 DL.

- ④ 自己緻密化焼結法（実機化）
- ⑤ 微粉コークスとの予備造粒法（鍋）
- ⑥ 事前加熱法（鍋）
- ⑦ 塊P鉱石床敷法（工場実験）

上記①および②は既存設備で可能である。①はP鉱石と緻密質微粉をほぼ等量配合するのが特徴である。1989～1990年に新日本製鐵(株)釜石焼結機および同名古屋第3焼結機で実用化され、配合率は最大35%となっている。②は1994年に川崎製鐵(株)水島焼結工場の試験で、スケール8%の添加によって融液性状が改善され、P鉱石比率40%でも歩留悪化は回避できると報告されている。

③～⑤は選択造粒設備を必要とするため、普及は進んでいない。③は高融点物質粉と選択的に造粒して粗粒のP鉱石の表層に保護層を形成し、急激な同化を抑制するものである。蛇紋岩との選択造粒は日新製鋼(株)呉焼結工場で試験され、生産率の向上が確認されている(1992年)。④は、粗粒P鉱石と融液の接触を遅延させ、P鉱石中ゲーサイト部は1,200℃以上で再結晶して緻密化する特性を活用して、P鉱石の緻密化、同化の抑制および強固な残留元鉱形成を促進させることを狙いとしている。P鉱石と蛇紋岩、炭材との選択造粒法（ディスクペレタイザー）の有効性が1990年に新日

本製鐵(株)堺第2焼結機で確認され、さらに1992年に同社大分第1焼結機で自己緻密化高融点液相焼結法(SHS)が実機化されている。SHSではFig. 2.13に示すように、P鉱石は3mmで分級され、粗粒部が細粒蛇紋岩、石灰石粉、炭材と選択造粒される。粗粒のP鉱石がほぼ緻密化後の1,350℃以上で融液が生成するように付着粉層は低塩基度で、高炭素濃度としているのが特徴である。配合率20%のP鉱石を処理し、歩留上昇とコークス消費量低減の面から利益を上げている。

⑦は住友金属工業(株)小倉焼結工場で試験され、P鉱石の約50%が成品となることが確認された。実用化上の課題は、焼結機排鉱部などでのダスト量の増加対応策である。

#### 2.4.6 劣質鉱石対応技術開発の今後の課題

安価ソースは何か、ずばり予測することはむずかしい。昨今のように鉱石の積地価格が低下すると、経済性は輸送コストで大きく変わる。豪州、アジア圏がより優位となる。

豪州では、鉱床の賦存形態などからP鉱石と他の鉱石の価格差はさらに広がってもおかしくない。ブラジルでは高品位鉱床の枯渇から、低品位鉱石を選鉱処理した微粉は増えるが、市場に出回るかは疑問である。欧州での環境規制強化による焼結工場休止および世界的な鉄スクラップ増加に伴う還元鉄の必要性からペレットの需給がタイトになると予測されるからである。したがって、今後も「高ピソライト鉱石比率・低設備投資・低変動費」焼結技術の開発が重要である。

一方、高炉では高微粉炭比・低燃料比操業が必至と言える。従来の「Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2% 近傍」の焼結鉱で微粉炭比200 kg/tの安定操業が可能か、否かによって「劣質鉱石」の評価基準が大きく変わる。高炉関係者とより一体となって取り組む必要がある。

未利用安価劣質鉱石ソースとして、豪州の高リンブロックマン鉱床がある。溶融還元プロセスの進展も見ながら、その活用法を検討する時期になったと考えられる。

## 2.5 焼結鉱製造効率化の技術

### 2.5.1 最近の焼結鉱生産と製造技術の動向

近年、焼結鉱の生産は、大型焼結機、機長延長焼結機への集約で生産効率が向上し、小型焼結機休止の合理化が一段と進められた(Fig. 2.14)。この間、焼結プロセスの機能向上も著しく、資源対応力、焼結均一化の技術力が高められた。結果として生産を高位に維持しつつ歩留向上、品質改善が促進された(Fig. 2.14)。一般に生産率と品質、歩留とは二律相反の関係にあるが、ここ数年の実績はこの関係を逆転させる画期的な成果である(Fig. 2.15)。この改善は焼成不良箇所の解消を目標とした均一焼結技術の開発によるが、他にシンター

ケーキの過粉砕防止、細粒焼結鉱の高炉使用などが総合的に結実したものである(Table 2.2)。

### 2.5.2 資源対応技術の進展

高炉微粉炭吹き込み安定操業を支える焼結鉱品質として、強度、還元粉化性(RDI)を安定維持しつつ、低シリカ(低スラグ)化、被還元性の改善が指向されている(Fig. 2.14)。一方、近年高品位ヘマタイト鉱山が枯渇の時期を迎え、資源は粒度の低下および褐鉄鉱石使用比率の増加へと徐々に劣化の方向にある。このような状況で最近の研究は難焼結性鉱石の使用工夫に重点がおかれ、特に高品位微粉鉱石、褐鉄鉱の使