

り、流動化し、揮発分を放散して気孔の多いバルーン状のチャーを形成する。しかし、灰分に取り込まれたカーボンは未燃焼微粉炭として炉内に蓄積する。この蓄積場所は、逆V型融着帯では炉壁近くの根部に、W型融着帯ではWの下端部である。その結果、Fig. 2.24のように、逆V型融着帯では未燃焼微粉炭の蓄積により中心ガス流れが助長され、W型では周辺流が助長される。

したがって、微粉炭の多量吹き込み操業においては、逆V型融着帯を確実に維持することが重要である。

(3) 炉内における未燃焼微粉炭の消滅機構

基礎研究の結果によれば、高炉内の未燃焼微粉炭はコークス粉に比してCO₂と反応しやすい(Fig. 2.25)。このことは炉内で起こるソリューション・ロス反応の相当部分を未燃焼微粉炭が負うこととなり、塊コークスの反応による劣化を軽減することとなる。

炉内高温部では、未燃焼微粉炭中のカーボンは溶鉄に溶けにくく(Fig. 2.26)、未燃焼微粉炭中の灰分は滴下するスラグと容易に同化して(Fig. 2.27)、消滅する。

これらの事実は微粉炭がレースウェー内で完全に燃焼・消滅されなくとも、炉内で消滅する可能性のあることを示しているが、反応消滅される最大量は今後の課題として残されたままである。

(4) 微粉炭多量吹き込み時の装入物分布

微粉炭の多量吹き込み時には装入されるコークス量が減少してO/Cが増大する。したがって、炉内の圧力損失が増大し、わずかなガス流分布の乱れが炉況に著しい影響を及ぼす可能性がある。

(株)神戸製鋼所では、高炉操業を安定に維持するためには中心ガス流の確保が必要不可欠との考えに基づき、コークス中心装入技術を開発した。この技術は高炉中心の狭い領域に

コークスを装入し、高炉の中心に細いコークス柱を形成して中心ガス流を確保し、逆V型軟化融着帯を形成させるものであり、ムーバブル・アーマーのきめ細かい制御と合わせて、同社が微粉炭多量吹き込み操業を継続する上での最大の武器となっている。また、中心に装入されたコークスが炉芯を形成することが判明しており、微粉炭多量吹き込み操業においても、炉芯の通気、通液性が良好に維持されている。

2.7.3 今後の目標と課題

微粉炭吹き込み量の第一段階目標は200 kg/THM以上におかれており、各社でたゆまぬ努力が続けられている。これを達成するための手段として、

- ① 焼結鉱とコークスの性状の改善；特に焼結鉱の還元粉化性と強度の向上、コークスの強度向上
- ② 装入物分布制御の高精度化；きめ細かい周辺ガス流の制御
- ③ 羽口先における微粉炭燃焼率の向上
- ④ 炉芯の状況を把握、制御するための炉芯検知センサーなどのバックアップ設備の設置

が考えられている。

加古川 No. 1 高炉では月間平均で190 kg/THM以上の吹き込みを1994年7月現在で7ヵ月以上も安定して継続しており、1994年4月には200 kg/tTHMを、また6月には204.1 kg/THMを達成しており、予想より相当早く目標が達成されるものと考えられる。

第2段階の目標は250 kg/THMの吹き込みが考えられているが、これを達成するためには考え方の飛躍とともにいっそうの研究開発が必要であると考えられている。

2.8 高炉の機能拡大

1970年代までに出現した巨大高炉を支える技術的な基盤は、a) 通気確保のための整粒、b) 被還元性に優れた塊成鉱、c) 強度に優れたコークス、d) ガス量確保のための高圧化、e) コークスの高速燃焼のための熱風高温化と酸素富化送風、そして、f) 装入物分布制御、である。以上の技術要求を満たし、かつコストを低く維持するための安価原料を使用した高生産を実現するべく、効率的な操業技術の確立に努力が傾注されてきた。近年ではさらに、労働環境・環境保持へのさらなる対応、経済変動・生産性へのより柔軟な対応、など社会的要求に対処するためいっそうの技術革新が求められている。

一方、高炉の巨大化は、高炉および周辺設備の膨大な建設費を必要とし、その運転とともに経済的、技術的柔軟性を欠く原因となっている。すなわち、一方の流れとして小型化への要求がある。酸素高炉、超高压高炉、予備還元と最終還元

に機能分化した諸種の新プロセス、そして、高炉羽口前高温部の活用＝超複合送風技術、などがそれである。

以上の諸条件を背景として、従来高炉の技術と機能の拡大をめざす動きが活発となっている。大別すると以下にまとめられる。

- 1) 原燃料使用品種の拡大：小塊・高反応性コークス、小粒焼結鉱、劣質鉱石(高Al₂O₃、褐鉄鉱)、スクラップ
- 2) 羽口前高温部の有効利用：微粉炭、鉱石、フラックスなどの吹き込み、廃棄物処理
- 3) 燃料比弾力化技術：高反応性装入物の使用、CO₂低減、鉄銑・エネルギー(エネ銑)同時生産技術
- 4) 出銑比弾力化技術：大幅(1.5~2.5 t/d・m³)かつ短時間内の可変
- 5) 銑鉄成分調整技術：Si, S, P, C

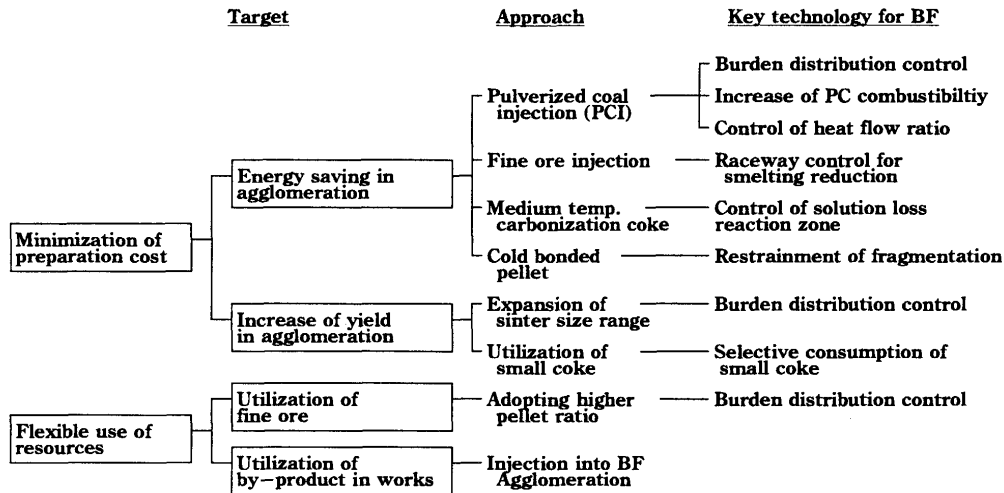


Fig. 2.28. Concept of variety of raw materials and fuels for blast furnace. (CAMP-ISIJ, 4 (1991), p. 1008)

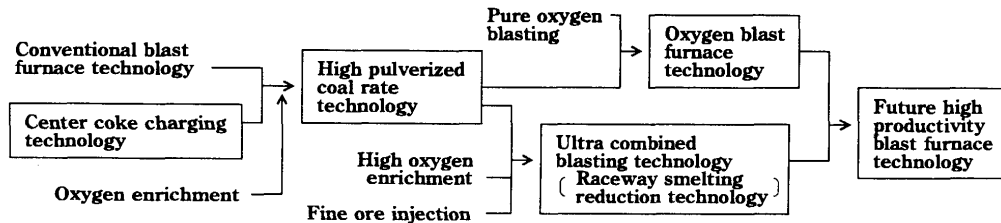


Fig. 2.29. Aspect of innovation for blast furnace technology. (Recent Progress of Ironmaking Technology, The 146th and 147th Nishiyama Memorial Seminar, ISIJ, Tokyo, (1993), p. 205)

ここでは、自動化、労働環境・3K対策、設備技術、装入物分布制御、および微粉炭吹き込みを除き、反応面から見た高炉の機能拡大について、最近10年の動向を略述する。

2.8.1 原燃料使用品種の拡大

焼結鉱およびコークス製造時の歩留り向上を図り、小粒原燃料の高炉での使用が実施されるようになってきた。焼結鉱は各社とも一応歩留り90%をめざし、篩目3mmまでの焼結鉱およびコークスを使用できるまでになってきた。炉内通気性確保のため、中心流維持を指向し、小粒の流れ込みを防ぐためテラスを長めに取り小粒焼結鉱を炉壁側にふるアクションをとる。これにより篩目下限1mmの小粒焼結鉱中、-3mmを25%含む焼結鉱を部分使用している高炉もある。一方、コークスは8~32mmの小塊を多量使用(~100kg/THM)するまでになってきた。また、細粒コークスを焼結鉱に混合して装入する試験を行った例もある。小粒原燃料の使用は圧損の上昇を招くものの、理論吹抜け限界には達しておらず、小粒増配の上限にはまだ余裕がある。小粒原燃料は一方から見れば高反応性であり、積極的な使用をめざした試験も行われており、今後の発展が期待される。

微粉炭吹き込み操業下では熱流比が低下するため焼結鉱のRDIを高めに緩和できるとの報告もある。コークスは層構造維持の面から高いTI(Tumbler Index)が要求される傾向が強い。今後ますます多様化と思われる高炉装入物の考え方と技術目標をFig. 2.28に示した。

2.8.2 羽口前高温部の有効利用

(1) フラックス吹き込みと成分制御

銑鉄中へのSi移行のメカニズムはいまだ十分解明されていない炉内現象の一つである。羽口前温度の低下とスラグ中SiO₂の活量低下を狙い、フラックス(造滓材)や粉鉱石を吹き込みSiOの発生を抑制すると同時に形成した熔融スラグで直接SiOを捕捉してSiO分圧を低下させ、溶銑中Siを低減しようとする技術が開発中である。

羽口から微粉炭とともに生石灰、軽焼ドロマイト、マグネシアクリンカーなどを吹き込んだ場合、MgOを含むフラックスだけが銑中Siの低減に有効であった。さらに、羽口からマグネサイト(MgCO₃)を吹き込んだ場合、マグネサイト10kg/THM当たり銑中Siは0.045%低下した。一方、同量のマグネサイトを炉頂から、コークスと混合装入したときは0.027%、鉱石と混合装入したときは0.013%の銑中Siが低下した。炉床スラグ中MgOのアップによるSi低減効果は0.009%であり、羽口吹き込みはSi低下に有効であることが確認されている。

一方、粉鉱石とフラックス(マグネシアクリンカー、カルサイト(CaCO₃))の混合吹き込みを行った場合は、CaO、MgOいずれも遜色なくSi低減効果があったとしている。その場合、粉鉱石単味では、50kg/THMまでの吹き込みで全くSi低下は認められなかった。焼結鉱粉では16kg/THMの吹き込みで銑中Siが0.14%低下したとの測定もある。微

粉炭(PC)とドロマイトの混合吹き込みでは、ドロマイト 15 kg/THMでSi 0.07%のほか、S 0.002%の低下を確認したと報告されている。なお、微粉炭吹き込み下では、石炭中SiO₂が優先的にSi移行に寄与していると考えられ、このとき、石炭中SiO₂量により銑鉄中Siを制御できる可能性がある。

(2) 粉鉍石吹き込み

ここ10年の間に高炉技術はオールコークス操業から微粉炭吹き込み(PCI)操業へと変わり、その安定化技術を基礎に、さらなるPCI量の増加が指向されている。PCIの増加は高炉上部帯における熱流比の低下、Ore/Coke (L_o/L_c)と未燃コークス粉の増加による圧損の上昇を招く。これを解決する方策として、PCとともに酸素富化送風および粉鉍石吹き込みを併用する超複合送風がある。

粉鉍石吹き込み(OI)は L_o/L_c 低減による通気性確保のほか、事前処理鉍の焼成エネルギー低減、低品位鉍石や難処理原料を積極的に利用した原料コストの低減を狙いとしており、Fig. 2.29に見るように、次世代高出銑比高炉もこの延長線上にあるものと期待されている。

1980年代初期のこの技術の目的は、銑中Siの低減にあった。これがPCI操業の普及により、成分制御=高炉精錬機能の拡大にとどまらず高出銑比操業をめざした羽口高温部の積極的利用へと変わり、現在では粉鉍石を直接使用する次世代型高酸素富化高炉として、熔融還元炉に対抗して高炉が生き続けるための中核技術として位置づけられている。

コークス充填層炉による予備的試験では、微粉炭+粉鉍石+フラックスを羽口に吹き込む超複合送風では、PC燃焼によりレースウェイ内温度が確保されるため粉鉍石の熔融還元率が高い。さらに、試験高炉によるテストで、PCI 200 kg/THM+OI 200 kg/THMが燃料比を一定に維持したままで達成された。羽口から粉鉍石を吹き込む場合、①レースウェイや炉芯温度の低下、②送風圧力の増大、③通気・通液性の阻害、などが懸念される。しかし、試験高炉の解体調査では、羽口前に強固なシェルも観察されず、滓化は十分であったことが確認されている。また、OI併用により、炉頂ガス中の未燃チャーの量は減少することもわかっている。これらの知見は、羽口1本を対象とした実高炉におけるテストでほぼ同様に成立することが確認されている。なお、炉芯温度の低下がOI吹き込み量を規定する場合は60%程度の予備還元鉍石を吹き込むのが限界量向上に有効であると報告されている。

PCI+OI(+フラックス)を実操業で実現するためには、①羽口前粉体反応制御技術の確立、②粉体ハンドリング技術の確立、そして、③ベースとなる高O/C操業技術の確立が不可欠である。②に関しては、配管磨耗量低減を目的として、間欠的なプラグ流を用いた低流速輸送技術が開発中である。現在まで、浮遊輸送に比べ配管磨耗量1/10が達成されている。

長期間の高出銑比操業でコークスフリー層が形成された

り、環状流が発達したりして、炉底側壁レンガへの熱負荷が増大し損耗が危惧される事態が生ずる。このような場合の対策として、羽口からチタン源として砂鉄を吹き込み、選択的にTiベアを形成させる試みがなされている。200kgの砂鉄を間欠的に吹き込んだ結果、全Tiの55%が溶銑に移行し、炉底側壁温度の上昇が抑制できた。

2.8.3 生産および燃料比弾力性

鉄鋼需要に応じて増減されるべき生産性(出銑比)と、製鉄所の熱経済によって決まる燃料比は、高炉操業の縦軸と横軸である。情勢に応じて意のままの座標点で操業し、できるだけ広い範囲で自由にすばやく座標点を移動できることが望ましい。

1994年の現状では、大型高炉の生産性は高出銑比側では2.5~2.6 t/d・m³にとどまっている。これを実現するには、おわん型ガスパターン(シャープな中心流と強い周辺流)を指向し、吹抜け限界内で可能な限りの送風量増を実現するため、場合によっては酸素富化を行う。また、羽口前温度の抑制と水素還元促進のため、送風湿分の増加を採用することもある。燃料比の低減は行わず、高めに維持する。一方、低出銑比側では1.3 t/d・m³程度のトピックス値は除き、ほぼ1.5 t/d・m³が安定操業時の値である。このとき、炉壁流の衰弱や偏流が生じやすいのと炉芯の不活性化が問題となる。装入物分布制御によって安定操業は維持できるが、燃料比は通常時に比べ高めに推移する。以上のように、出銑比は長時間をかければ、ほぼ1.5~2.5 t/d・m³の範囲内で調整可能であるが、付随して燃料比を自由に可変できるまでには至っていない。

燃料比の弾力性を確保するには、還元効率を高めることが必要である。そのためには、①シャフト効率を高く保つ、②塊成鉍の被還元性向上、③還元の駆動力を高く維持するため操業線図のW点を右へ移動させる(熱保存帯・化学保存帯温度の低下)、などが必要である。③については、H₂還元の有効利用とともに、熱保存帯がコークスガス化(ソリューションロス反応)の活発化とともに終了することから、低温から反応が生じかつ激しく反応する高反応性コークスを用いることも有効な手段である。高反応性コークスの使用は鉄鉍石の還元にも還元隆起現象としてプラスの因子として働くことが指摘されている。なお、熱保存帯域の短縮は将来、高炉の低炉化を通じて、装入物強度の緩和=予備処理コストの低減にもつながる可能性がある。

焼結鉍の被還元性向上には組織面からはマグネタイトの減少とカルシウムフェライト形状の制御、構造面からは気孔率を40%以上に保つことが重要である。コークスの高反応性化については、アルカリや鉄の添加、中低温乾留などで実現できるが、特にその使用法が問題である。高反応性化はコークスの強度劣化を招くので通常コークスと併用する。そのとき、高反応性コークスは小粒とした上で焼結鉍に混合装入す

ることが効果的である。高炉シミュレーターによる実験では、JIS-CRI45~55の高反応性コークスと高被還元性焼結鉱(JIS-RI 82%)を用いたところ、900~1,150℃で還元が促進され、高温熱保存帯は900℃へ低下し、燃料比約30 kg/THMの低減が可能であるとの結果が得られた。実炉への適用では、焼結鉱に混合し炉周辺部へ堆積するように切り出して操業したところ、36 kg/THMまでの使用で問題は生じず、熱保存帯および融着帯の炉上部への移行が確認できた。今後、長期使用による燃料比低減効果の確認が待たれる。

2.8.4 酸素高炉

高炉の生産性を高め、将来的に小型化し、生産弾力性および燃料比弾力性に対処することを目的に純酸素高炉が開発されている。

酸素高炉の利点として次のことが挙げられる。①同一設備でも高出銑比が得られる、②設備コストが安い、③熱風炉が不要なため、ガス加熱時の窒素酸化物の発生が少ない、④炉

内ガス量が減少するため、炉内圧損を低減でき、細粒装入物が使用できる、などである。

炉頂ガスを部分燃焼しそのガスをシャフト部に吹き込むプロセスを紹介する。内容積3.9 m³の試験高炉による操業結果によれば、シャフト部へ吹き込まれた予熱ガスは炉壁近傍を流れ、炉下部から上昇してくるガスは中心側に偏流する。このため、予熱ガスが中心部まで浸透しなくても、炉断面積当たりの熱流比は低下し、装入物温度が上昇して還元が促進される。予熱ガスの適正温度は約1,000℃と推定されている。

試験高炉と実炉では、鉄鉱石の粒径、全圧が異なるので還元速度が異なり、同一燃料比であっても間接還元量に変化する。試験酸素高炉の操業結果を基に、一界面未反応核モデルによって還元状況を評価し、実酸素高炉の燃料比を推定した結果では、熱損失669 MJ/THM、微粉炭比300 kg/THMの条件で、燃料比の下限は530 kg/THMと報告されている。

2.9 環境対策と排出物の資源化

対策も地道に進められている。

(1) 焼結機の排ガス対策

一貫製鉄所では焼結工場からのSO_xおよびNO_xの発生割合が大きい。焼結機排ガスの脱SO_x法としては、従来の石灰石膏法(転炉スラグ石膏法)、アンモニア硫酸法に加え、活性炭乾式脱硫法、水酸化マグネシウム脱硫法も実機されて、Fig. 2.30に示すように我が国の稼働中の焼結機の約半数が排煙脱硫装置を設置している。NO_x対策は、発生の抑制と排煙脱硝の両面からの研究開発がなされている。排煙脱硝法としてはアンモニア接触還元法が開発され、すでに2基が稼働している。焼結過程での抑制法は基礎的な研究がなされ、焼結ベッド内でのコークス粒の燃焼制御、鉄分添加コークスの使用が効果的であることが報告されている。

2.9.1 排ガス対策

我が国の全一次エネルギー消費の約13%を鉄鋼業が占め、なかでも製鉄部門が一貫製鉄所の全エネルギーの70%弱を消費している。排ガス量はエネルギー消費量に比例する要素が強く、製鉄部門は排ガスに関わる環境問題、特にSO_x、NO_x、さらにCO₂についてはその対策に積極的に取り組まなければならない。すでに地域の公害問題として対策は推進されており、特にSO_xは昭和49年の硫黄酸化物総量規制(51年施行)の導入により、コークス炉ガスの脱硫および焼結機の排煙脱硫を中心とする二大対策が昭和50年台初頭に急速に実施された。その後地球環境、作業環境さらに粉塵などの

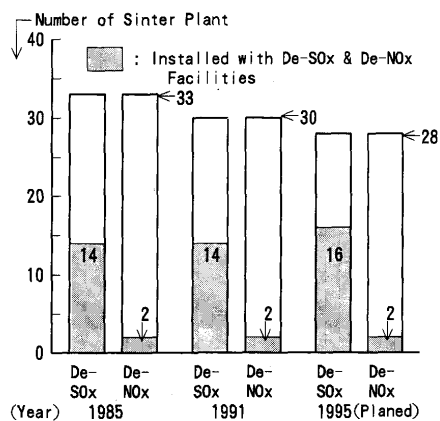


Fig. 2.30. Trend in number of sinter plant installed of De-SO_x and De-NO_x facilities in Japan. (The 146th and 147th Nishiyama Memorial Seminar, ISIJ, Tokyo, (1993))

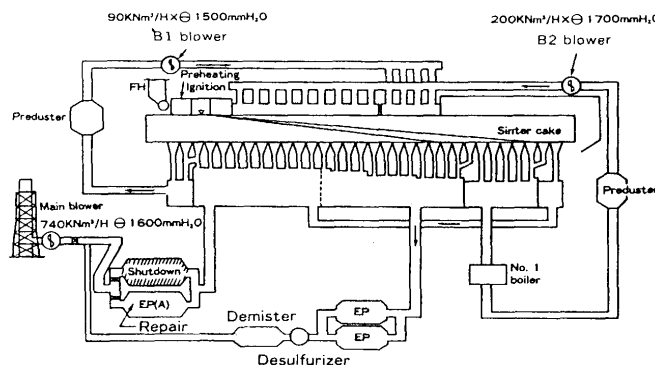


Fig. 2.31. Layout of exhaust gas recirculation system in Tobata-3DL. (Proc. the First Int. Cong. on Science and Technology of Ironmaking, ISIJ, (1994), p. 661)