

2. 製 鉄

2.1 製鉄技術および理論

2.1.1 製鉄技術

(1) 概説

昭和 40 年代の鉄鋼業は日本経済の中軸として旺盛な鉄鋼需要に応えるべく、海外原料の安定確保、生産設備の大型化、新鋭化を積極的に推進した。鉄鋼一貫製鉄所における高炉の重要性は一段と高まり、製鉄部門の究極の目的が出鉄量の高位安定確保と高炉燃料比の引下げに集約されていた。原燃料処理技術の強化、原燃料品質の改良、高炉の大型化や高温高圧操業や複合送風による新鋭化が推進された。

しかしながら、昭和 48 年以降は二度の石油危機を契機に石油依存のエネルギー体質から脱皮し、エネルギー高価格時代に対応したプロセスの最適化を志向した。48 年の第 1 次石油危機においては、原料炭が重油よりもエネルギー価格面でいまだ高価であり、高炉の低燃料比操業が従来にも増して積極的に推進された。重油使用量の削減、高温送風、送風脱湿の実施、塊成鉄の被還元性の向上、装入物分布制御によるガス利用率の改善等の成果が実り、54 年には高炉燃料比は全国平均で 461 kg/t の水準まで低下した。

しかし昭和 54 年の第 2 次石油危機後は石油価格が異常に高騰し、原料炭価格を大幅に凌駕したことから、燃料比の低下が製鉄所の総エネルギーコストから見た場合、必ずしも得策にならないという局面を招来した。燃料比を意図的に上昇させることにより、高炉ガスの発生量が増加する。またコークス使用量の増加によつてコークス炉ガスの発生量も増加する。これらの副生ガスは加熱炉や発電所などで使用している重油類の代替となり、製鉄所全体の石油系燃料の購入量を減少せしめ、大部分の製鉄所でコスト低減に寄与することとなつた。高炉のエネルギー原単位からは低燃料比操業の方が望ましいが、総コストの観点から、製鉄所全体のガスバランス、電力バランス、省エネルギー対策の進行度合を考慮して、もつとも経済的な燃料比での操業が追求されるに至つた。

エネルギー価格の高騰は排エネルギー回収設備に関する開発意欲と投資マインドを大幅に向上させ、省エネルギー設備が急速に普及した。TRT (高炉炉頂圧回収タービン) や熱風炉の排熱回収設備の普及率は 80% 以上

に達しており、焼結機主排風頭熱や製品クーラーの排風頭熱の回収設備、CDQ (コークス炉乾式消火設備)、コークス炉上昇管や煙道排熱回収と石炭調湿との結合プロセスなどの大型投資へ移行しつつある。また低操業態勢の長期化により、生産設備の集約や休止、工程の合理化、高炉の低出鉄比操業やコークスの最低稼働率操業の見極め等が推進され、スリムで強靱な生産体質への転換をめざした努力が続けられた。また鋼材品質の高級化に対するニーズの増大及び製鋼工程での精錬コストの削減の観点から溶鉄品質の最適化と脱珪、脱りん等溶鉄予備処理プロセスの実機化が進展した。以下製鉄各工程における最近 10 年間の技術の進歩について概説する。表 2.1.1 に最近の生産及び主要な製鉄技術の推移をまとめた。

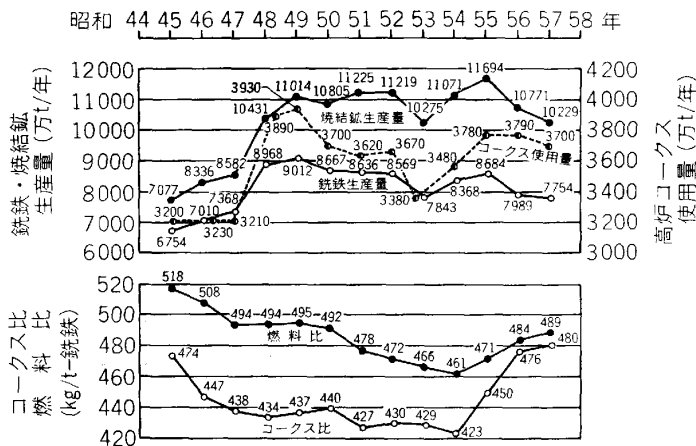
(2) 焼結鉄及びペレットの製造技術の進歩

昭和 40 年代は高炉大型化と歩調を合わせて焼結設備も飛躍的に大型化し昭和 51~52 年に新日鉄若松 1 号焼結機、大分 2 号焼結機、住金鹿島 3 号焼結機で有効面積 600 m² と世界最大級焼結機が相次いで稼働、生産能力の向上と品質の安定化をはかり高炉操業を支えた。生産性は自溶性高塩基度焼結鉄製造技術の発達、焼結性の良好な原料ソースへの転換等により大幅に上昇した。操業面では通気性の改善、点火炉保熱炉の増強がはかられた。生産量と RDI、冷間強度の確保が最優先であり、粉コークス原単位約 55 kg/t-焼結鉄、点火燃料原単位 41 Mcal/t-焼結鉄と高く、環境対策の強化に付随して電力原単位も上昇傾向をたどつた。石油危機以降は生産量の増加はほとんどなく、各事業所では低エネルギー型焼結鉄の製造を目標とし、焼結熱量原単位の低減と被還元性、熱間性状の向上をめざした。

高層厚化とベッド内構造の改善が一つの特徴である。昭和 45 年時点で 400 mm 程度であつた層厚が最近では 500~650 mm にまで増加している。通気性の改善対策として、ミキサの造粒強化、生石灰等のバインダー添加による焼結原料の擬似粒子化やその強度の向上がはかられた。焼結湿潤帯での過剰な凝縮水分の減少を狙つて点火前ベッドに排熱回収された温風を吸引させる予熱焼結技術、焼結上下層のヒートパターンの均一化をはかるために焼結層高方向の粒度やカーボン割合を調整することを狙つた偏析装入法や 2 段装入法等の装入技術、粉コークスの燃焼性の改善を目的とした粉コークスの整粒強化や分割添加技術等が実用化された。点火炉に関して

表 2.1.1 最近 15 年間の生産及び主要製鉄技術の推移

	昭和 44～48 年	昭和 49～53 年	昭和 54～58 年
製鉄部門の全体的特徴	<p><u>生産の拡大と設備大型化</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 大型高炉・焼結機の建設 原料炭需給の逼迫と諸対策の推進 環境対策の強化 解体研究による炉内現象解明 	<p><u>S.48 第 1 次石油危機</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 省エネルギー設備の開発導入 コークス炉の低稼働率対策 低エネルギー焼結鉄の製造 検出端・分布制御の開発 スラグ資源化の推進 	<p><u>S.54 第 2 次石油危機</u></p> <ul style="list-style-type: none"> オイルレス操業への移行 石炭系代替燃料吹き込み 省エネルギー設備の普及 石炭事前処理法の普及 高炉長寿命化の推進 高炉の休止
高 炉	<p>S.43 高炉解体調査 (東田 5BF 広畑 1BF)</p> <p>S.44 超高压高炉の建設 (名古屋 3BF 炉頂圧力 2.5 kg/cm² ・ステープ冷却方式導入)</p> <p>S.46 4000m³級高炉稼働 (福山 4BF)</p> <p>S.48 ベルレス装入装置導入 (室蘭 1BF)</p> <p>S.48 熱風炉排熱回収設備 (室蘭 1BF)</p>	<p>S.49 脱湿送風設備の稼働 (広畑 4BF)</p> <p>S.49 高炉頂圧力回収タービン 稼働(水島 2BF)</p> <p>S.51 5000m³級高炉稼働 (鹿島 3BF, 大分 2BF)</p>	<p><u>S.56 微粉炭吹込設備稼働</u> (大分 1BF)</p> <p>S.56 低燃料比操業試験 (福山 3BF 396 kg/t (タール吹き込み) 室蘭 1BF 448 kg/t (オールコークス))</p> <p>S.55 代替燃料吹込試験 (PCI 大分 2BF) (COM 鹿島 1BF) (TCM 扇島 2BF)</p> <p>S.57 炉代出鉄量 3212 万 t 達成(君津 3BF, 10 年 8 ヶ月)</p> <p>S.57 銑床脱球の本格化</p>
製鉄原料及び焼結 ペレット	<p>S.45 自溶性ペレット製造 (加古川ペレット工場)</p> <p>S.46 500m² 焼結機稼働 (君津 3DL)</p> <p>S.48 排煙脱硫設備稼働 (千葉 1DL)</p>	<p>S.51 600m² 焼結機稼働 (若松 DL, 大分 2DL, 鹿島 3DL)</p> <p>S.52 焼結脱硫設備稼働 (千葉 4DL)</p> <p>S.52 焼結 2 段装入設備稼働 (若松 DL)</p> <p>S.53 コールドボンドペレット 設備稼働(名古屋)</p>	<p>S.54 クーラ排熱回収設備稼働 (若松 DL)</p> <p>S.55 プラズマ内装ペレット採用 (加古川ペレット)</p> <p>S.56 焼結主排風頭熱回収設備稼働 (鹿島 3DL)</p>
コークス	<p>S.46 成型炭配合コークス製造法 (八幡 2CO)</p> <p>S.48 コークス炉自動燃焼管理 (福山 5CO)</p>	<p>S.51 コークス乾式消火設備導入 (八幡 2CO, 京浜 1CO)</p> <p>S.51 炉高 7.5m 大型コークス炉稼働 (京浜 1CO)</p> <p>S.51 粘結材添加法採用 (和歌山 鹿島)</p> <p>S.52～54 コークス炉の熱間休止 (八幡 3CO, 名古屋 1CO 和歌山 2CO)</p> <p>S.53 熱間補修技術(新日鉄)</p>	<p>S.54 予熱炭装入法の導入 (室蘭 6CO プレカーボン)</p> <p>S.54 石炭分級粉砕法の採用 (広畑)</p> <p>S.58 超低稼働率操業試験 (和歌山, 福山, 八幡, 室蘭)</p> <p>S.58 石炭調湿設備稼働 (大分 1.2CO)</p>



原料特性を利用した配合設計の実施，融体制御技術の進歩が次に挙げられる。我が国は鉄石の大部分を海外に依存しており，銘柄ごとに鉄物組織や脈石組成，造粒性，融液との反応性，同化性が特徴づけられる。高生産率を要請された段階では粉コークスを高めとしてスラグ結合を基質とした過熔融性組織であったが，最近の焼結鉄品質の狙いは高被還元性と低スラグ組成を目標としており，低熱量の下でいかに目標品質を達成させるかという課題に取り組んでいる。鉄石銘柄特性を組み合わせた鉄石配合技術，熔融制御を目的とした

も炉容の適正化，炉内圧力制御，バーナの改善等により点火機能の改善がはかられた。これらの対策によつて粉コークス原単位，点火燃料原単位の低減と焼結鉄品質の改善が推進された。

副原料の活用，粒度別成分管理等に基づいた配合設計技術の進歩，焼結ベッドのヒートパターンを測定するための検出端や数式モデルの開発，制御手段としてのウィンドボックスごとの風量分布制御の開発が推進された。ま

た最近では計算機を内蔵した画像解析システムが開発され、鉱物組織の分別が可能となり、日常作業管理に広く活用されつつある。以上の技術進歩に伴い、粉コークスや点火燃料等消費エネルギーは昭和 51 年以降着実に低減傾向にある。

排熱回収設備も積極的に開発実用化され、焼結機主排風頭熱や製品クーラーの排風頭熱の熱回収設備が昭和 58 年現在各々 7 基及び 23 基設置されており、各事業所のエネルギー条件によつて蒸気、電力として回収されるほか、予熱焼結やミキサーへの温水添加など自工程での熱の回収利用がはかられている。省電力については主排風機などプロセスファンや環境集塵機ブローアの高効率化や回転数制御、電気集塵機の間歇荷電方式の採用、漏風対策の推進により大きな成果をあげている。

昭和 40 年末から 50 年初めにかけて環境対策面から焼結過程での SO_x , NO_x の抑制技術の開発に多大な努力が払われ、 NO_x 転換率と粉コークス中空素分や焼成雰囲気条件の関係が明らかになってきている。脱硫、脱硝設備も地域環境対策面からいくつかの事業所で実機化した。

ペレットについては製造面と高炉での使用面で焼結鉱との競争力の強化が最大の課題であつた。ペレットプロセスは焼結プロセスに比して熱効率がよく、成品歩留りも良く消費エネルギー原単位はペレットの方が焼結よりも低い値を示しているが、ペレットは摩鉱工程の電力使用量が多く、焼成燃料として石油系燃料を使用していることからエネルギーコストは焼結鉱より高い値を示していた。石油危機によりペレットと焼結鉱のコスト差は著しく拡大し、ペレットの競争力は低下し、海外におけるペレット工場は休止あるいは操業短縮を余儀なくされた。神鋼加古川ではエネルギー体質の改善と品質改善が精力的に推進された。従来ペレットは重油を消費熱量の約 40% 程度使用していたが、一部石炭系エネルギーへの転換を推進、コークスブリーズの内装の実施、更に昭和 56 年 3 月に微粉炭燃焼プロセスへと改造した。その他グレートでの熱効率の向上対策やプロセスファンの省電力化を推進し、56 年にはペレットのエネルギーコストを焼結鉱と同等レベルまで低下させることに成功したと報告されている。高炉原料として焼結鉱とペレットを比較した場合、ペレットは球形であるため多量使用時安定したガス流分布が得がたく、還元過程で表層に金属鉄核を生成しやすいためペレット内部で還元停滞現象が生じ、この結果、軟化熔融温度が低いことが指摘されてきた。ドロマイトペレットや高気孔率ペレットの開発によつて熱間性状の改善を実施し、更にペレットの形状特性

を改善した破碎ペレットを一部使用することによつて性状面でも焼結鉱と同等のものとするのができた。

非焼成ペレットの開発については、エネルギーの節約、環境対策や焼結に不向きな微粉原料と製鉄ダストの活用の面から関心が高まり、我が国においては新日鉄名古屋でヤード養生法を開発し、製鉄ダスト等を対象として昭和 53 年高炉向けコールドボンドペレットの生産を開始、その後 CDQ などで発生する微粉コークスを内装炭とし、今日に至っている。鋼管ではシャフト炉による常圧水蒸気養生法を開発し、Si-Mn 用原料として新潟電気製鉄所で実用化された。コールドボンドペレットはエネルギー消費量が少なく、将来的にも魅力のあるプロセスであるが、セメント配合量の低減、バインダーの改良、水分の乾燥コストの低減が今後の多量使用時の課題である。

(3) コークス製造技術の進歩

昭和 40 年代の原料炭の輸入量は急増し 49 年のピーク時には 6290 万 t に達した。鉄鋼需要増大による原料炭需給の逼迫が予想され、カナダ、オーストラリア等の新規鉱山の開発と共に非微粘結炭の利用や強粘結炭の節減技術として成型炭装入法等の新技術の実用化が進められた。高炉操業のオールコークス化により、コークス比は昭和 57 年には 480 kg/t へと増加し、石炭依存度が高まつたが、昭和 50 年以降石炭需給は量的に緩和し、冷間強度は高位安定化の傾向をたどつた。一方、高炉の解体調査の結果、コークスの高温での反応性や強度が注目され、熱間反応後強度を制御する技術開発ニーズが高まつた。

昭和 50 年以降の製造技術面での特徴はコークス炉稼働率の許容下限域での操業技術、熱間反応後強度等の品質向上対策、石炭事前処理技術の推進、CDQ 等省エネルギーの進展、コークス炉設備の大型化、移動機械の自動化、機械化、環境対策設備の普及、石炭配合理論や石炭の炭化室内での乾留機構の解明等の発達を挙げることができる。

高炉におけるコークス熱間性状の重要性は東大試験高炉や新日鉄君津、住金鹿島での大型高炉での操業試験や炉内サンプリング調査から明らかとなり、種々の熱間性状試験法が提唱されている。熱間性状を支配する要因としてコークスの気孔径分布、表面積などの物理特性、化学反応性、コークスの光学的組織構造、アルカリ金属や鉄分などの反応触媒の共存や灰分等の不純物に関する指標などコークス性状との関係は明らかとなつてきたが、石炭の流動性や組織成分などの原料炭物性やコークスの製造条件とを関連づけ、熱間反応後強度のメカニズムや制御法を確立するまでには至つておらず、今後の発展が

期待される。熱間性状を造りこむ手段として原料炭の配合技術、成形炭配合、結合剤の添加等の石炭事前処理技術やコークス乾留技術面で種々検討が実施され成果をあげつつある。石炭の事前処理技術は石炭の配合理論の進歩とともに昭和40年代後半の原料炭の需給の極度の逼迫を契機に原料炭の使用範囲の拡大やコストの低減を狙って実機化が推進された。成型炭配合法は装入炭の30%をバインダーを加えて成形炭とし、残りの装入炭と混合装入する技術で46年に新日鉄八幡で実用化され、50年代に入ると各社に広く普及し、高炉用コークスの約40%を占めるに至っている。また石炭水分の3%程度を乾燥脱水し装入する乾燥炭装入法は43年鋼管福山で実機規模で操業された。更に石炭を約200°Cまで予熱し、充填密度と乾留速度を上昇せしめる予熱炭装入法としてPrecarbon設備が54年新日鉄室蘭で稼働し生産性の向上と非粘結炭使用範囲の拡大に寄与している。その他装入炭粒度の均一化によつてコークス強度の向上をはかる石炭分級粉砕法、装入炭の粘結性を補填して、コークス強度の改善を図る粘結材添加法等の新技术の実用化や開発が積極的に推進された。石炭系粘結材についてはパイロットプラント段階であるが、石油系アスファルトからの粘結材については51年住金化工和歌山、鹿島で実用化された。

昭和50年代の鉄鋼環境の悪化はコークス炉の能力の大幅な余剰をもたらした。稼働率低下技術が重要な操業技術課題となつた。コークス炉の端フリュー温度の昇温対策、温度ばらつき低減、炉体補修技術の改善等操業技術の改善によつて稼働率許容下限域は従来値の20%以上も低下させることができ、炉温低下によるコークス品質や副産物性状、炉体への影響についても明らかにされた。同時に炉体維持補修技術として熱間溶射補修技術や熱間での炉壁レンガ積替補修技術が開発されコークス炉の炉命も大幅に延長可能となつた。

コークス炉の省エネルギーに関しては、コークス炉燃焼管理システムの導入があげられ、昭和48年鋼管福山5コークス炉で実用されて以来、各社において急速に普及した。カロリーや空燃比の自動制御、燃焼室の温度検出、炭化終了検出によるコークス化完了判定等コークス炉の自動燃焼制御技術が開発され、炉温や火落時間の一定制御が可能となり、コークス乾留熱量の低減に寄与した。CDQはコークス炉消費熱量の約40%に相当する赤熱コークスの顕熱を回収するもので、コークス品質の向上や環境対策にもなり、58年末で24基が稼働し、高炉用コークスの約35%を占めるに至つた。CDQは51年にソ連ライセンストルクから導入され、新日鉄八幡2コークス炉、鋼管京浜1コークス炉で稼働したが、

その規模も逐次大型化され、コークストーンあたりの蒸気回収量も510kg/tコークスへと効率も向上した。更に上昇管よりの副産物顕熱や煙道排ガス顕熱等温度レベルの低い排熱を効率よく回収し、石炭水分を調湿する方法が新日鉄大分1,2コークス炉で実用化され、乾留熱量の低減、生産性の向上の戦力となつている。

原料炭の構成は昭和50年代は米炭中心からオーストラリア、カナダ炭へと変化し、石炭の組織成分、流動性等の性状が大きく変わつてきた。このような背景から石炭の炭化度と粘結性を分類のパラメータとした石炭の新分類法が鉄鋼協会共同研究会コークス部会で制定され、昭和58年より実施された。

(4) 高炉操業技術と設備技術の進歩

昭和40年代の高炉操業技術は原料の整粒強化と品質改善、高圧複合送風技術などの既成技術を強化し、高炉の大型化、高能率化、低燃料比化が積極的に進められた。高炉の大型化は40年代末にピークに達し、昭和51年に火入れした新日鉄大分2高炉の5070m³にまで至つた。生産量の増加が期待できない今日、改修時の経済性や生産量に対する弾力性を考えると高炉の大型化は一段落したと言えよう。高炉の大型化は原料の整粒強化と強度の向上、装入装置や分布モデル開発による径方向の分布制御技術の改善、炉内状況の解明と計測技術の開発、設備の信頼性と保全技術の進歩、大型重量設備の製造建設技術の進歩に支えられた。

出鉄量は昭和49年の9012万tを最高に低下傾向となり、低操業度下でコストダウンを重視した操業形態に移行した。高炉の稼働基数は昭和58年末現在65基中39基である。昭和50年代の高炉技術の特徴はオールコークス操業への移行、微粉炭等の石炭系燃料吹き込みの普及、高炉の長寿命化対策の進歩、検出端の開発やモデル化による制御機能の改善、鉄鋼一貫コスト低減を狙つた鑄床脱珪等の開発普及が挙げられる。

昭和54年の第2次石油危機における石油価格の大幅な高騰はオールコークス操業への急ピッチな転換が緊急の技術課題となり、56年高炉のオイルレス化は完了した。58年末稼働高炉の内、オールコークス高炉29基、タール吹込高炉7基、微粉炭吹込高炉3基である。重油吹き込みで燃料比がもつとも低下した昭和54年とオイルレス操業が定着化した昭和57年の全国平均高炉操業主要指標を比較して表2・1・2に示した。この間の操業思想の変化について簡単に触れると、オールコークス操業に伴う変化として送風温度の低下と送風湿度の上昇が顕著である。送風温度の低下による燃料比の上昇、発生ガスの増加、熱風炉熱量の減少が製鉄所ガスバランスの観点からもつとも有利であることから、大部分の製鉄所

表 2.1.2 昭和 54 年/昭和 57 年の高炉技術指標の比較

		単 位	昭 和 54 年	昭 和 57 年
燃料比	コークス比		423.4	480.3
	重油比		33.8	0.1
	タール比		4.4	6.8
	PC 比		0	2.0
	計	kg/t	461.6	489.2
送風温度	℃	1238	1113	
送風湿度	g/Nm ³	10	30	
塊成鉱比	%	90.3	86.8	
[Si]/[S]	%	0.49/0.031	0.51/0.034	
装入H ₂ 量	kg/t	6.8	5.9	
羽口先理論燃焼温度	℃	2382	2292	
熱流比	—	0.836	0.818	
炉頂温度	℃	131	150	
CO 利用率	%	50.9	49.9	
ソリューション ロスカーボン量	kg/t	99.9	93.2	
CO 間接還元率	%	60.3	62.9	
H ₂ 間接還元率	%	6.2	6.0	
C 直接還元率	%	33.5	31.1	
高炉所要熱量	Mcal/t	2942.9	3002.3	
エネルギーコスト	昭和 54 年 =100	100	89.8	

(全国平均)

で選択された。重油カットにともなう水素入量の減少や羽口前フレーム温度の過剰な上昇を調節するため送風湿度の増加と送風温度の低下をはかり操業の安定化を狙った。オールコークス操業では熱流比が高くなり、塊状帯上部での低温熱保存帯の生成や炉下部の不活性化が発生しやすいことが報告されている。重油吹き込み時と比較して羽口部での円周バランスや熱バランスを調整する機能がなくなることから、装入物分布制御によるガス流調整が従来以上に重要な操作因子となつた。一般的には周辺部の鉱石/コークス比を低下させ、周辺部の熱流比を緩和する方向が志向された。燃料比の上昇によつて高炉における銑鉄トン当たり所要エネルギーは約 2% 増加しているが、昭和 57 年におけるエネルギー単価をもち

いてエネルギーコストを比較すると逆に約 10% 低下しており、総合コストの低減をめざした高炉操業が選択されていることがわかる。

一方、高炉の長期的安定やコストの削減の観点から石炭系補助燃料の使用試験が実施された。微粉炭の吹き込みは米国、ソ連、中国などで実績があつたが、昭和 55 年に新日鉄大分 2 高炉で吹込試験を実施し、高圧高温大型高炉での適用上の課題であつた粉炭の大量安定輸送、多数羽口への均等分配、羽口前での燃焼状況やレースウェイの変化などの技術課題を解決し 56 年 6 月大分 1 高炉で実機稼働した。さらに合同製鉄大阪 2 高炉、神鋼神戸 2 高炉、加古川 3 高炉で実機稼働し、川鉄、住金においてもおのおの吹込試験が実施された。微粉炭吹き込みは一般炭と原料炭の価格、コークス炉の能力や事業所内のガスバランス、高炉の生産要求度等の総合的な判断に基づくが、逐次普及していくと考えられる。その他重油と微粉炭混合燃料 (COM)、タールと微粉炭混合燃料 (TCM) の高炉吹込試験はおのおの、住金鹿島 1 高炉、及び鋼管扇島 2 高炉で一貫プラントを完成し、製造と使用試験が実施された。

設備面では高炉の長寿命化が積極的に推進され、実績をあげつつある。新日鉄君津 3 高炉は炉命 10 年 8 カ月、累計出鉄量 3212 万 t、平均出鉄比 2.02 t/m³・日、平均燃料比 465 kg/t という優れた炉代記録を達成した。鋼管福山 5 高炉でも炉命 9 年 11 カ月累計出鉄量 3192 万 t を達成した。炉体冷却設備の改良、炉底及びシャフト下部の内張りれんが材質や築炉技術の改良などの設備技術の進歩、炉体の診断技術や炉壁損耗部に対する熱間補修技術の開発などの整備技術の改善、分布制御などの操業技術の進歩によつて炉末期の燃料比や稼働率の悪化が回避され、炉命は 7 年から 10 年以上へと延長が可能となつた。高炉ライニングについても各社において詳細な解体調査が実施され、各ゾーンの損耗原因の研究が進

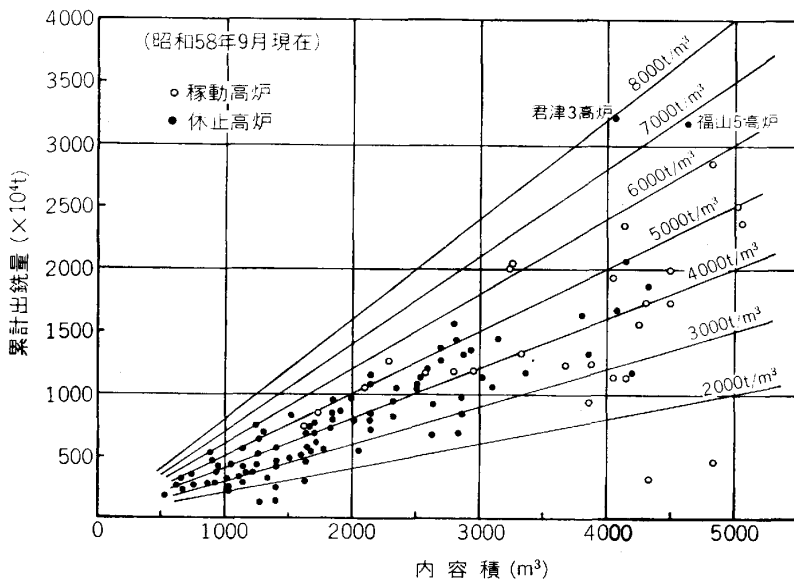


図 2.1.1 高炉内容積と炉代累計出鉄量の関係

み、適正なれんが材質が選択されてきた。シャフト上部における耐スポール性の強化、シャフト下部はステープ炉では黒鉛・SiC 質、冷却盤高炉では高アルミナ質あるいは SiC 質の採用、炉底部ではカーボンブロックとセラミック系れんがの配置の適正化やカーボンブロックの品質改善がはかられた。高炉種用の不定形耐火物についても作業性やコストの面からスタンプ方式から流込方式中心に移行した。

装入物とガス分布の制御に関する進歩は著しく設備的には炉頂装入装置の改善と炉内検出端の開発が実施された。高炉の大型化にともない半径方向の分布制御の必要性が増大し、ムーバブルアーマーやベルレス装入装置などが昭和 40 年代より積極的に導入されてきた。しかし装入物分布技術が実践的にも理論的にも発達したのは分布測定用検出端の開発やモデル実験が推進された昭和 50 年代に入ってからである。ベル式では昭和 43 年新日鉄君津 1 高炉でムーバブルアーマーが設置されたが本格的活用は高炉解体調査により炉内融着帯構造が明確となり、分布が融着帯の形状やガス分布に極めて重要な役割を果たすことが再認識されてからである。炉の半径方向の鉱石、コークスの層厚を調節し、ガス流れの適正化と炉壁熱負荷調整も可能となり、燃料比の低減、炉命の延長、操業の安定化に寄与した。ベルレス式は我が国では昭和 48 年新日鉄室蘭 1 高炉で採用され、その後川鉄千葉 6 高炉や新日鉄名古屋 1 高炉などの大型高炉にも採用された。当方式は炉内旋回シュートの角度と回転数の調整によりベル式以上に半径方向の自由度の高い分布制御機能を有しているが、更に原料装入準備系統で発生する原料銘柄や粒度の偏析を防止する対策を実施し、好調な操業成績が継続されており今後いつそう普及していくと考えられる。

装入物分布やガス分布の適否の判断には炉内温度、ガス成分計測センサーに加えて、機械式やマイクロ波、レーザー波を利用した装入物表面形状と降下速度の計測センサー、更には磁気センサーや電気抵抗法による装入物内の鉱石コークスの層厚測定法の実用化が推進されている。これらの実炉計測と同時に模型実験による分布の研究も盛んであり、装入物分布予測モデルの開発も各社で実施された。その他高炉の定常あるいは非定常状態における制御モデルや炉況安定化システムが各社で開発され操業の安定化と炉内現象の解明に寄与した。

溶鉄予備処理の動向については、鋼材品質の高度化、高級鋼化ニーズが飛躍的に増大し、各事業所のローカル条件によつて溶鉄品質の最適化や溶鉄の予備処理フローが検討され、急速に実機化が進んでいる。

(5) スラグの資源化

スラグの資源化活動は昭和 47 年に鉄鋼連盟内に高炉滓 JIS 化推進委員会が設置され、更にスラグ利用分野の拡大と利用技術の開発を目的として昭和 51 年にスラグ資源化委員会が設置され、高炉及び製鋼スラグの公的認知活動の推進と JIS 化がはかられた。50 年代におけるスラグ加工処理技術の発展は著しく、多くのスラグ製品の開発とその合理的製造技術と品質管理体制の確立をめざした。路盤用高炉スラグの製造については黄色水溶出を防止する製造管理と品質管理体制の確立、コンクリート用粗骨材については、絶乾比重 2.4 以上、含水率 4% 以下の高品質徐冷スラグ製造技術の確立、高炉水砕スラグについては、その特性である潜在水硬性を活用しうる分野での利用開発を目標として、ガラス化率の高い硬質水砕スラグの製造技術や品質管理体制と製造設備の開発がはかられた。

製鋼スラグの資源化についても製鋼スラグの基礎的な調査研究を行う製鋼スラグ専門委員会が設置され、各種試験法や製鋼法の変革にともなう製鋼スラグの動向をも含めて資源化活動が継続されている。

溶融スラグの顕熱回収に関しては、製鉄プロセスで残された、大きな排熱回収源であり、各種の溶滓処理と熱回収方式が開発検討されつつある。

(6) 将来の展望

昭和 50 年代の製鉄部門は石油危機を契機として、その技術基盤を低操業、省エネルギー技術に転換し、エネルギー高価格時代に対応したプロセスの最適化を追求した。この結果製鉄技術及び製鉄理論の両面で高い技術水準と国際競争力を引き続き維持することができた。

高炉法は本来熱効率と生産性の高い製鉄プロセスであるが、炉内のメカニズムが完全に解明され、制御しうる段階には至っていない。高炉内現象をきわめ、資源に対する制約を緩和し、いつその省エネルギーを達成することによつて、高炉は来たるべき 21 世紀においても製鉄プロセスの主役であろう。高炉の限界燃料比に関して理論と操業試験の両面から検討が推進され、液体燃料吹込操業では燃料比 396 kg/t (福山 3 高炉)、オールコークス操業では 448 kg/t (室蘭 4 高炉) が記録された。これらの試験は高炉内での反応や熱効率の限界や原料条件を評価検討する上で重要な役割を果たした。

高炉の今後の焦点は高炉の高精度制御の実現と設備の長寿命化である。炉腹部に光ファイバーを挿入して融着帯や滴下帯を直接観察することに成功した(大分 2 高炉)。先端技術を駆使してガスや固体挙動の解明が加速していくことが期待される。制御性の高い装入装置や装入技術の発展、情報収集と高度解析、異常予知、操業制御等高炉の高精度制御システムの開発が期待される。設

備面では炉底構造と炉体冷却システムの強化、メンテナンス技術の進歩があいまつて 10 年以上の長寿命化が確実となる。

資源問題に関して鉄鉱石、石炭共海外に依存しており鉄鋼業の長期にわたる経営の基盤を確固たるものとするため長期的視点での資源戦略が先行し、技術的にすべての問題を克服、解決していくという基本的態度が必要である。高品質のものを主体に調達し、併せて劣質原燃料の使用可能性を拡大していくことが原燃料分野の課題である。

焼結分野では原料の細粒化に対する造粒システム、銘柄特性と配合理論、省エネルギーと歩留向上が開発課題である。

コークス分野では石炭資源選択幅の拡大と次世代の高効率コークス炉の開発である。石炭特性や加熱挙動、乾留機構の研究に基づいた配合理論と加熱パターン制御技術、石炭事前処理技術の選択、副産物の品質制御等総合的なコークス炉操業のシステム化と設備の高効率化が課題である。

一方非微粘結炭を主原料とする連続式成型コークス炉が鉄鋼連盟の共同研究として、200 t/日のパイロットプラントが昭和 59 年に操業を開始しその成果が目される。

高炉以外の製鉄プロセスとして直接製鉄法、熔融還元法が広く研究され一部に実機化されている。直接製鉄法は 1970 年代後半に急速に実用化が進み天然ガス産出国を中心に商用プラントが増加した。熔融還元法については基礎研究や応用研究が精力的に推進されている。これらの高炉以外の製鉄プロセスは世界的視点で見ると、資源、スクラップ、ユーティリティの価格や生産規模の面で経済的に比較優位な場所や時期において高炉法と共存あるいは競合すると思われる。以上各プロセスの今後の展望についてのべた。

世界的な経済成長の鈍化や産業構造の変化、資源の高価格化等の経済環境変化の中で、先端技術や情報処理メディアを積極的に駆使して技術と設備の革新をはかりつつ、高い技術競争力を堅持し、今後共指導的役割を果たしていくことが、昭和 60 年代の我が国製鉄技術の使命である。

2.1.2 製鉄理論および研究

(1) 概説

1960 年代末から 80 年代初頭まで総数 12 基の生産高炉について行われた解体調査は、それ自体高炉の内部状況、とくに装入物の挙動に関する豊富な知見を与えただけでなく、この知見に基づいて構築された高炉の内部構造と新しい操業理念の検証という研究の出発点ともなった。これに加えて鉄鋼業の内外における情勢の推移が

製鉄技術の新しい課題を提起し、理論と研究の前進を促した。早く 60 年代末にその兆をみせていた優良原料炭の供給不足は、第 1 次石油危機の勃発後間もなく極端な形で現れて、コークス品質の一時的低下とそれによる高炉操業の不調化を招き、原料炭の範囲の拡大を可能とするコークス製造技術の開発という長期的課題とともに、コークスの高炉内での耐劣化性の本質の解明とその評価法の確立の重要性を痛感させた。第 1 次石油危機はまた省エネルギーの一環としての高炉燃料比の極限までの低下を緊急なニーズとした。これにこたえるため、考えるすべての手段が適用された結果、最低燃料比の新記録がつつぎに更新されたが、このさい装入原料の品質改善と装入物分布の適正な制御によるガス利用率の向上が大きな役割を演じた。この路線は、第 2 次石油危機を経て脱石油・石炭系エネルギーの活用が主要なニーズとなつた後にも、引き続き追究され、技術・理論両面にわたる成果を生んだ。また転炉スラグの処理の問題を契機として現れた製鋼スラグ量最少化の要求をみたし、しかも製鋼工程の合理的再構成を可能とするものとして溶銑炉外脱りんが実施されるに及んで、溶銑の Si の格段の低下が望まれるようになり、Si の移行挙動とその制御に関する理論の深化が要請されている。

こうした情勢のもとで 1977 年、鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会の一部会として、高炉内反応部会が発足した。同部会は当初解体調査結果の総括を含む五つの短期的課題と、粉粒体力学の基礎など六つの長期的課題を設定して、研究の組織的推進をはかり、1979 年、その成果を中間報告書「高炉内現象とその解析」に集約した。ついで高炉のトータル数学モデル、高炉内装入物の降下挙動、鉄鉱石類の高温性状、レースウェイ、スラグ-メタル反応、将来の製鉄法などの分科会を設けて活発な研究活動を続け、1982 年中間報告書と同名の部会報告書を刊行してその活動を終わらせた。これら二つの報告書は高炉内反応のほぼすべての側面にわたつて、わが国における最近の理論研究の成果を集約したものであり、これを含めて同部会が製鉄理論の発展に果たした役割は少なくない。

伝統的な製鉄法の理論・研究とは異質であるが、高炉によらない製鉄法の開発研究や基礎研究も進展をみた。高圧のシャフト炉法や流動層法に関する研究が進められる一方、熔融還元法が固体炭素材を利用できるという意味で、「新しい」可能性を秘めた方法として注目され、その研究はすでに基礎研究の域をこえつつある。この方法は直ちに新しい製鉄法として展望があると考えられているのではないが、考える方法の多様性からみて、伝統的な製鉄・製鋼の枠をこえた総合的なアプローチが求められている。

(2) 解体調査

解体調査の主要知見は以下のように要約される。

① 鉱石層とコークス層は前者の溶け落ちにいたるまで層状配置を保つて降下する。壁際に混合層が形成されることがあり、いくつかの理由によつて降下に伴う層厚と傾斜角の減少はあるが、この領域での運動を巨視的にはピストン流とみることができる。

② 鉱石層は溶け落ちに先だつて軟化融着する。融着層は径方向に不均一を温度分布に対応して、複数の鉱石層内に幅と直径の異なる環状体として形成され、全体として融着帯を形成する。その断面形状は対称型と非対称型、逆V型、W型およびV型などに分類できる。

③ 融着帯より低温側の領域を塊状帯、高温側の領域を滴下帯と名づけることができる。

④ 一般に滴下帯内に、炉中心に頂点をもつ円錐状のコークス停滞層（炉芯）が形成される。停滞層の堆積角以上の部分にあるコークスはレースウェイに流れこむとみられる。発達した周辺流操業炉などでは、炉芯部に鉱石（融着）層がみられることがある。

⑤ 融着層には構造がある。その低温側はある程度まで還元された鉱石粒子が軽度に焼結したもの、高温側はかなり緻密化した金属鉄から成り、下部からつらら状に溶け落ち始めている半熔融部であり、両者の中間にスラグ結合または金属結合によつて強固に融着した融着部がある。融着部と半熔融部とをあわせた部分の幅は鉱石の高温性状によつて異なる。

⑥ コークスのマイクロ強度は乾溜温度以上の温度域で昇温につれて向上するが、マクロ強度と平均粒度はシャフト下段付近から低下する。平均粒度の低下は燃焼帯の近傍で著しい。レースウェイの周辺、とくに突き当たり部および下部には粉コークスが集積している。また炉内では反応性が高くなっている。

融着帯の発見は新しい操業理念の形成に導いた。融着層の通気抵抗がきわめて大きくて、上昇ガス流がこれを貫流しにくいので、上下の融着層間のコークス層をクロスフローの状態で流れると考えられることから、融着帯が全体として分配板として機能し、この帯内のコークス層はスリットの役割を演じるというモデルが構成された。また炉況安定の前提である適度に発達した中心ガス流は逆V型の融着帯の形成に導くものであり、この型を維持しながらガス流を炉下部から塊状帯に分配させてガスと鉱石との十分な接触を保障し、ガス利用率を向上させることによつて、燃料比を低下させることができると考えられた。このスリットモデルは融着層の通気抵抗に関する研究や2次元ガス流れに関する研究によつて、その基本的正当性が裏づけられたが、その後、擬似鉱石を用いた低温モデル実験などに基づいて、上述の融着層と

ガス流との相互作用については単純化しすぎとの指摘もなされた。逆V型を基本とする考え方も、全く正常な操業状態のまま吹止解体された新日鉄名古屋1高炉で、炉中心部にスラグラインまでも降下した融着層がみられたことを契機として、反省の機運にある。しかし融着帯の配置状態が炉全体の通気性の面でも、ガス流分布の面でも、さらには溶銃成分の制御の面でもきわめて重要な役割を演じるという認識は確立し、炉頂における装入物の分布の制御も、塊状帯の通気抵抗分布だけでなく、融着帯の配置状態の制御をもめざして行うべきものと考えられるにいたつた。このためゾンデによつてえられる炉上部半径方向の温度・ガス組成分布や高さ方向ガス圧分布の情報と、プロセス変数（とくに温度）の高さ方向の変化を計算するモデルとを結合して、融着帯の形状と位置を推定する試みや、 ^{60}Co や Fe-P 合金などのトレーサー、送りこみ式垂直ゾンデ、炉下部緩傾斜ゾンデ、TDR法 (Time Domain Reflectometry) と特殊ケーブルとを組み合わせたゾンデによつて、融着帯または溶け落ちレベルを半径方向の複数の点で直接探索または確認する試みが行われている。

(3) コークスの性状と高炉内での挙動

解体調査と相前後して成型コークスの使用試験、成型コークス（破砕片）および劣質室炉コークスと良質室炉コークスとの試験高炉での比較試験、成型コークスを含む各種コークスの高炉下部実験炉による燃焼試験、各種炭材の小型燃焼炉による燃焼実験などが行われた。これらの試験が一致して示したのは、コークス種の別なく劣質なコークスの熱間性状の問題点がレースウェイ付近での粉化・細粒化にあるということであつた。実際 1974年にコークス品質の一時的悪化によつてほとんどすべての高炉が陥つた不調は、細粒コークスの炉下部への多量集積によるものであつたし、解体調査の示した平均粒度の低下も粉や細粒の発生を伴つてのものだつたのである。こうしてコークス性状に関する研究課題は炉下部で粉・細粒の発生を招くような劣化の機構は何か、どんな性質のコークスがこれに耐えるか、この性質をいかに評価するかとたてられることとなつた。これに関連して反応性の高いコークスが高炉内で劣化しやすいという事実が比較的早くから知られており、新日鉄八幡洞岡4高炉の解体調査結果も炉下部試料についてある種の光学的異方性組織の反応による選択的減少の傾向を示してはいたが、高炉内ではすべてのコークスの反応性が高くなるという解体調査のいま一つの知見は、むしろ劣化機構としての CO_2 反応の役割に疑いを抱かせさせた。

ありうる劣化機構の一つとしてアルカリの吸収一層間化合物の生成一が検討されたが、これによるき裂の発生

を伴う劣化がむしろ良質のコークスで著しいことが知られて結論は否定的であつた。

CO₂ との反応とそれによる劣化についても、あらためて多面的な検討が行われた。多くの場合塊状コークスの充填層を一定温度に外熱しながら 100% CO₂ と一定時間反応させて、総括的な反応率を評価する一方、反応後試料の冷間のマイクロ強度またはマクロ強度を評価する方法がとられたが、温度水準とアルカリの触媒作用の影響、異なるガス種としての H₂O との異同、光学的異方性組織の選択的反応性の有無なども検討された。その結果は以下のように要約される：①反応による劣化度は反応性が高いほど大きく、両者間には強い相関がある。これはこの機構による劣化が炭素質の性質によつて左右されることを示すものとみられる；②微細組織成分のなかで等方性組織とイナート組織に顕著な選択的反応性がみられる；③アルカリの存在や温度の上昇は反応帯を粒子表層に移行させることによつて、劣化を相対的に緩和する；④反応率がかなり高くなると自然破壊がおこらない。なおこれらの研究とは別に、アルカリの触媒作用の寄与を含めて、ガス化反応の速度式を確立するための基礎研究が行われて成果をあげた。またこれに基づいて劣化の様相を規定する反応率の粒子内分布を求めることも行われたが、高温域での黒鉛化の進行などによる反応性そのものの変化の影響を含めた反応挙動の解析は、反応による劣化の真相の究明とともに今後の研究課題として残されている。

いわゆる熱的劣化についても二、三の研究が行われた。乾溜温度以上への加熱によつて進行する黒鉛化がしばしば収縮とき裂の発生を伴うことが知られた。SiO₂ を主とする灰分構成物質のコークス炭素自体との反応がマイクロ気孔の増加と、それによる劣化を招く可能性があることも報告された。また著しく急速な加熱条件のもとでは、黒鉛化に伴う収縮とも関連して、コークスの引張強度をこえる応力が発生し、割れがおこりうることも示された。しかしこれらの機構による劣化のコークス種による相違の有無、程度の検討はほとんど行われておらず、そこに今後の課題がある。

熱間性状の試験法としては粒度 20 mm のコークス粒子充填層を対象とする小型反応性試験、この試験後の試料を冷却した後 I 型ドラムで負荷を加える反応後強度試験法のほか、熱間ドラム強度試験法や燃焼粉化性試験法などが開発された。これらのなかで反応後強度試験法またはこれと類似の方法がかなり広く普及し、すでに冷間ドラム強度が同じで反応後強度の水準の異なる数種のコークスを製造し、それらの高炉内での挙動を比較する試験が行われるにいたつている。この種の試験では羽ロレ

ベルで採取された試料の調査が行われているが、その結果はさまざまであつて、反応後強度の低下がレースウェイ相当部ではなく、炉芯部で粉率の増大をもたらす傾向があるという点で一致しているにすぎない。このことは粉の発生挙動だけでなく、分配挙動をも解明せねばならないことを示すものではあるが、反応後強度が耐劣化性の確かな指標ではないことを忘れるべきでない。

(4) 塊成鉱の性状とその改善

解体調査は主原料としての塊成鉱の高温性状の重要性を再確認させたが、これに関する研究は一つには自溶性焼結鉱の高温性状を規定する要因は何かの観点から、いま一つには自溶性ペレットの高温性状の問題点は何か、それを自溶性焼結鉱のそれに近づける方法は何かの観点から行われた。荷重(昇温還元)軟化熔融試験装置と X 線透過法による直接観察などを手段として行われた多数の研究の結果は以下のように要約される：①焼結鉱の収縮率、圧損上昇開始温度と最大圧損、滴下開始温度などの高温性状は脈石の融点と量だけでなく、予備還元率したがつて被還元性にも依存する。平衡脈石融点の上昇、したがつて CaO/SiO₂ の上昇とともに高温性状も改善されるが、CaO/SiO₂ > 1.8 では、スラグの凝集が遅れてメタルの滴下が先行するため、滴下温度が低下する。また被還元性の向上とともに高温性状も改善される；②自溶性ペレットの高温性状の問題点はその表層に還元鉄の殻が形成され、核心部の残留 FeO が脈石とともに熔融してしみ出し、還元停滞とペレット粒子同士の相互融着をひきおこすことにある。この欠点はドロマイトの添加によつて改善できるが、その理由はマグネシオフェライトの MgO の一部が還元過程にウスタイトに固溶し、その液相線温度を上昇させることにある。

鉱石の溶け落ち挙動を支配する一つの要因である還元鉄への浸炭に関する基礎研究も行われ、固体炭素から金属鉄への浸炭が脈石の軟化熔融挙動の影響をうけることが知られた。焼結鉱の性状とは次元が異なるが、オールコークス操業における調湿送風の効果とも関連して、還元ガスへの H₂ の添加によつて、みかけ上高温性状が改善されるという実験例が報告された。炉腹部周辺からの融着物試料の採取も行われるようになったが、これによる高温性状の研究は緒についたばかりである。

自溶性焼結鉱の被還元性が高温性状の改善にとつても重要であることがあきらかになつたが、これを FeO の低下によつて改善しようとする路線の最大の障害は、そのさい還元粉化指数 (RDI) の上昇がさけられないのではないかということであつた。しかし高炉燃料比の極限までの低下というニーズは、焼結工程それ自体での省エネルギーの要求とあいまつて、この障害をのりこえ

る道の発見に導いた。それは SiO_2 源の細粒化などの処置によつて SiO_2 量を減じ、高層厚などのもとで低温(低熱量)焼成法を採用することによつて、還元粉化の引き金になるとみられる2次(骸晶状菱形)ヘマタイトの生成量が FeO の低下とともに減少するような条件をつくりだすということであつた。事実この路線に沿つてつくられた低 FeO ・低 SiO_2 の焼結鉱は高 RI, 低 RDI かつ良高温性状であつて、燃料比の低下に著しく貢献した。さらにこの型の焼結鉱の組織の研究と製造の経験は、ヘマタイトと微細針状カルシウムフェライトを主要鉱物とする高被還元性の焼結鉱の製造という新しい課題の展望をも与えた。ただしこの焼結鉱にも問題が全くないわけではない。多くの高炉のシャフト部、とくにその周辺部から採取された焼結鉱試料は、粉化の著しい進行を示している。粉化が実際に炉内でもおこっていることはファイバースコープを搭載した垂直ゾンデによつて観察されている。こうした事実を背景として還元粉化が新たな角度から研究されており、2次ヘマタイトを含むすべてのヘマタイトが粉化の引き金になりうるとする見解、カルシウムフェライトの関与もあるとする見解も発表されている。還元粉化試験法の見直しも行われている。なおこれまででもつばらペレットを対象として行われてきた還元速度の研究が、モデルの精密化、速度パラメータの正確な把握などの段階を経て、焼結鉱を対象として行われるようになったことが注目される。

ドロマイトの添加がペレットの高温性状の改善とともに、被還元性の若干の低下を招いたことから、高被還元性かつ高滴下温度の大気孔率ペレットが開発された。しかしペレットの高炉内での挙動を全体として自溶性焼結鉱のそれに近づけるためには、結局それが球状体であるという特徴を放棄し、大径ペレットを破碎して使用する道を選ばねばならなかつた。

早くから知られているコールドボンド法についても、非焼成であるため省エネルギー的でありうるものとして、また環境汚染のおそれの少ない塊成法として見直しの研究が行われた。その眼目の一つは養生法の開発にあつたが、性状の検討も行われた。その結果コールドペレットも焼成ペレットと同様な熱間性状にかかわる弱点を免れないことが知られた。これに対して炭材内装型のペレットや粗粒原料を用いるブリケットに活路を見出す試みがなされたが、これを含めてコールドボンド鉱の性状はまだ焼成塊成鉱に匹敵する信頼性をもつにいたつておらず、高炉装入物としてはごく補助的な役割を演じているにすぎない。

塊成鉱の性状とその改善に関する研究の進展とその成果は、確立した試験法の存在や新しい試験法の開発に負

うところが少なくなかつた。その意味で早く学振 54 委で検討された還元性試験法が JIS 法として統一され、還元粉化性試験法が製鉄部会によつて統一法として確立され、荷重軟化溶融試験法についても学振 54 委によつて試験条件の整理が行われるなど、試験法に関する共同研究が適機にすすめられたことの意義はきわめて大きい。もちろん制定された試験法もその時点における知見の水準の制約を免れないものであり、適機の改善が必要であらう。

(5) 装入物の分布

高炉の大型化と融着帯の発見は装入物分布の最適な制御の重要性を再認識させた。当初最適な分布とは円周方向では一様であつて、径方向では幅の狭い中心ガス流を与え、炉況の安定性と高い総括ガス利用率および低い炉壁熱負荷とを保障するものと考えられた。オールコークス操業への移行後、しばしば炉下部周辺の不活性化による炉況の不安定化に遭遇したことから、幅の狭い中心流とともに適度の周辺ガス流を与えるものと修正された。このようなガス流分布は径方向の O/C 比(鉱石層厚/コークス層厚)と粒径の分布によつて支配される通気抵抗の径方向分布の制御によつて実現すべきものと考えられた。装入物分布に関する研究は縮尺または実物大の大規模冷間模型または実装入装置を用いる実験や、実炉の填充のさいの調査によつて行われ、これに基づいて今日ほとんどすべての工場で分布予測モデルないしシミュレーションモデルがつけられているが、これとともに機械式(重錘吊下式)、レーザー方式、マイクロ波方式などのプロフィール計が分布測定手段として用いられている。

装入物の径方向分布に関する古典的理解は、コークスの安息角が鉱石のそれより小さいので、V型装入面を形成する場合には O/C が周辺から中心に向かつて減少し、これに周辺から中心に向かつて大きくなる粒径分布の効果が加わるので、中心流型のガス分布が自然に形成されるというものであつた。したがつてコークスの無風状態での堆積角の実測値が鉱石のそれより大きいという事実が知られ、O/C はむしろ周辺から中心に向かつて増大する可能性があると考えられるようになった後の研究課題の一つは、そうした条件のもとで中心流型のガス分布が形成される理由を解明することであつた。これに対する解答の一つは、コークス層上への鉱石の装入のさいにおこる流れこみによつて、炉中心部に混合層が形成されるので、そこでの O/C は堆積プロフィールから推測されるそれより小さくなるということであつた。この現象は最近では鉱石落下時の衝撃エネルギーの大きさに依存しておこるコークス層崩れとしてとらえられ、これに中心部でのガス流の作用も加わつて、中心方向への鉱

石の移動が抑制され、O/C の低下にいたるといふモデルがつけられている。一方マグネットメーター (MDメーター) によつて混合層中の鉱石量を推定し、その結果をモデルにとりこむことによつて、中心部での O/C の明瞭な低下を示した報告もある。

このほか半径方向に不均一に分布する上昇ガス流速や装入物降下速度の影響も検討された。前者の堆積角減少効果については原料種、粒径に関係なく、無風状態基準の相対堆積角の最小流動化速度基準の相対ガス速度への依存性として、ほぼ統一的に整理できるという実験結果が報告されたが、この効果は炉中心部と中間部では顕著であるが、周辺部の堆積角については装入条件の影響が大きいという報告もある。またとくに中心部については、鉱石の装入過程に中心ガス流が強まつてコークス層が流動化するため、鉱石の流入が妨げられる可能性があることも示された。降下速度の影響については、それが周辺で大きく、中心で小さいため、層の傾斜角がその降下につれて小さくなる点ではほとんどすべての報告が一致しており、これを定量的に評価する試みもなされた。しかし不均一降下の原因をシャフトの下がりだけに求めるものと、鉱石層の収縮と熔融、コークスの燃焼帯への流入など炉下部のプロセスにも見出そうとするものがある。

これらを総合してV型ないしそれに近いM型装入面に対応する O/C の径方向分布は、周辺と中心で低く中間で高い型のものであろうという見解が支配的になりつつある。このような分布型がガス流分布と融着帯配置のどんな型を与えるかを知るためには、さらに粒径と空隙率の分布に関する情報を加える必要があるが、これに関する現在の知見は主として冷間模型または填充時の実測値に基づくものであり、ベルレス炉頂装置使用時の粒度偏析の解析に三輪の篩理論を導入する試みがなされたにすぎない。最近マイクロ波を用いるセンサーによつて層厚だけでなく、粒度の測定も可能という報告があり、その発展が望まれる。なお粒度別装入や混合装入が分布制御の「新しい」手段として出現したことを指摘すべきであろう。

(6) Si の移行反応とその制御

N₂ 冷却を行つた試験高炉 (日本鋼管) と新日鉄広畑 1 高炉の解体調査は羽口付近のメタル試料中の Si が最終値に比べて著しく高く、5~6% に達する場合があることを示したが、このことは高炉内での Si のメタルへの移行において、SiO 経由反応の役割が大きいことを裏づける有力な証拠となるものと解釈された。一方新日鉄名古屋 3 高炉の 1970~72 年の「低 Si 操業」は高塩基度焼結鉱の使用による溶落温度の上昇、したがつて溶け

落ちレベルの低下によるものと説明された。この見解は SiO 経由反応論と結合されて Si の制御に関する新しい考え方の形成に導いた。それは羽口先温度の上昇という、それ自体としては Si の上昇を招く可能性のある操作を施しても、O/C の増大すなわち熱流比の増大によつて溶け落ちレベルを下げることであれば、主として SiO の Si への還元段階の進行度の低下によつて、Si を低下させることができるというものであつた。この考え方の正当性は第 1 次石油危機以後に追求された低燃料比操業のなかで立証された。すなわち重油吹き込み量を減少させながら送風温度を可能な限り上昇させ、さらには脱湿送風を適用して羽口先温度を上昇させたにもかかわらず、燃料比の低下とともに Si は低下したのである。

この考え方は第 2 次石油危機以後の局面のもとで、新たな展開を遂げた。すなわちオールコークス操業への移行とコークス比の上昇という不利な条件のもとでも、装入原料の被還元性の向上と装入物分布の制御によつてガス利用率を向上させ、これによつて生じる熱的な余裕を羽口先温度の低下によつて相殺すれば、主として SiO 発生量の減少によつて、Si の上昇を抑制し、さらには低下させることもできると考えられるようになったのである。この考え方は 1 次元非定常の高炉モデルにとり入れられ、Si 制御の理論として展開されたが、最近このモデルは 2 次元に拡張され、解体調査や試験高炉 (東大生研) の操業中調査でみられた Si の著しい径方向不均一分布を、SiO 分圧の不均一分布によるものとして説明し、さらに送風温度の低下が SiO 分圧の最も高くなるレースウェイ近傍でのそれをとくに大きく低下させる効果をもつことを示すまでの成功をおさめている。

こうして SiO 経由反応説は一つの理論体系といえるほどに確立されつつあるといえるが、SiO がその最も有力な発生点と考えられているレースウェイ近傍のどの位置で、どのように発生するかの問題や、SiO の Si への還元反応の進行度を左右するメタルの溶け落ちレベル以下での滞留時間の評価、径方向・周方向に不均一に分布する Si が最終値に落ちつくまでの過程など、なお解明を求められる難問が残っている。一方出鉄の Si をスラグ-メタル反応の平衡条件から計算する式を誘導し、これに多数の高炉の操業実績値を適用して推定した Si の値が、同じ高炉群の月平均の Si の実績値とよく一致することを示し、出鉄の Si の値は CO 分圧が送風圧に等しいとみなしたときの平衡値に近いと述べた報告も提出された。同報告はまた SiO 経由反応説についても検討し、これによる Si の推定精度は平衡論によるそれと差がないと述べた。さらに最近 N₂ 冷却を行つた名古屋 1 高

炉の解体調査のさいに種々の位置で採取されたメタル試料についても、平衡論的に推定した Si の値が実測値とよく一致したと報告された。1% 程度の FeO や MnO を含むスラグとメタルとを 1500~1600°C に誘導加熱して反応させる実験を行い、2液を静置した時の10倍以上の速度で Si の移行がおこることを認めたとの報告も提出された。同報告はこの場合スラグ-メタル界面の酸素分圧がスラグの FeO や MnO によつてではなく、メタルの C によつて支配されたとみられるとし、少量のメタルがよく攪拌され、かつスラグと十分長く接触する場合には、スラグ-メタル反応も Si の移行に重要な寄与をなしうると述べている。これらの事実は SiO₂ 経由反応説の反証となるものではないが、同説が今日なおきわめて有用な作業仮説の域を完全には脱していないことを示すものといえよう。

Si をより直接的に低下させることを目的として、羽口から粉状の酸化鉄または石灰石を吹きこむ試みが行われ、いずれも予期した結果がえられたと報告された。羽口先に供給された酸化鉄や石灰石がどのような機構で Si の低下をもたらすかは今後の研究にまたねばならないが、その研究は Si の移行反応機構の解明の一助となるであろう。

(7) 高炉内での気・液・固相の運動

(a) 気固 2 相域における 2 次元ガス流れの解析

与えられた融着帯配置状態のもとで各コークススリットから流出するガス量を、高さ方向ガス圧分布の実測値と整合するように定めるモデルが提出された。一方 2 次元に拡張された ERGUN の圧損式を用いる軸対称 2 次元ガス流れの解析法を適用した研究も多く行われた。これらの研究は層厚分布や融着帯の形状を与え、伝熱や反応を捨象したものではあつたが、層頂面が V 型の場合の層頂近傍における流線の炉中心方向への偏り、ガス流れへの円錐状 (コークス) 炉芯の影響の局所性、著しく通気抵抗の大きい軟化・融着層の存在によるクロス流の形成、この層のガス流れへの影響の上流側だけへの限定性など有益な知見を与えた。

(b) レースウェイ-燃焼帯の研究

コークスの劣化挙動の研究とも関連して、ホットモデル (燃焼炉) 実験、実炉の羽口試料採取、およびファイバースコープによる観察などが行われた。これらの研究ではレースウェイの深さとコークス粒度を含む諸要因との関係が検討されたが、これとともに、高さや形状にも注目されるようになった点に新しい展開がみられた。とくに微粉を多く含むコークスはレースウェイを球形から歪んだ形状のものとし、周辺ガス流の強化を招くと報告された。レースウェイの本格的なシミュレーションも試

みられ、その一つではコークスを一種の擬流体とみなしてその運動を NAVIER-STOKES の式で記述し、これとガスとの相互作用力のある限界値によつてレースウェイの境界を定める方法がとられた。計算結果は形状の点では冷間模型実験と、羽口中心線上のガス組成分布の点ではホットモデル実験とよく一致したと報告された。

他方洞岡 4 高炉の羽口先の解体調査結果は、エンドスコープによるレースウェイ内部の観察結果に基づいて、コークスの循環運動状態での燃焼を否定した GREUEL らの見解に近いものであつたと報告された。レースウェイ突き当たり部上方でのコークス粒子の流動が観察され、羽口中心線上のガス組成変化へのまきこみガスの燃焼の寄与が推定されるなど、この見解を支持する事実も見解もあるが、新日鉄君津 3 高炉でのエンドスコープによる観察結果では、羽口先端への回帰を伴うか否かは別として、なんらかの仕方での循環燃焼が推定され、真相の解明が新たな課題となつている。

(c) 液相の挙動

一連の固定層冷間模型実験で、レースウェイを形成させて気・液相を向流させると、レースウェイの上方にドライゾーンが形成され、液流がレースウェイ外に排除されることがみとめられた。この現象は融着層の存在を想定した模型実験でもみとめられたが、一方実炉のレースウェイには液相が滴下することを示すいくつかの事実があり、模型と実系との異同の解明が望まれる。

気液向流域での液ホールドアップを高炉の当該領域に相似な条件で評価するための冷間模型実験も行われた。この結果に基づいて接触角の影響を含めて静的・動的ホールドアップを推算する式が導かれ、これによつて計算された静的ホールドアップとコークス粒径との関係は、川鉄千葉 1 高炉の解体調査結果をかなりよく説明すると報告された。多くの実験データが Flooding に関する SHERWOOD の線図上で約 2 倍大きい Flooding Factor を与えることから、高炉が Flooding のおこりにくい系とみられること、さらに充填材としてのコークスの見掛密度がスラグの密度に比べて小さいため、Flooding がおこる前にコークス層が流動化する可能性があることが指摘された。

先に模型実験によつて認められていた炉床スラグ浴面のガス圧分布に対応する湾曲の問題に軸対称 2 次元ガス流れモデルが適用され、湾曲度が平均液面レベルとポッシュガス量の増大、コークス層空隙率の減少につれて大きくなることが示された。出銑口に向かうスラグ流へのコークス層の抵抗によつて生じる液面の傾斜とこれによる残滓の現象についても、模型実験によつて残滓率と流出条件との関係が見出され、さらに液面形状の変化への

メタル流の影響の境界要素法による検討も行われた。

炉床に滴下するメタルの出銑口への流れの解析も行われ、コークス層が炉底に達していない場合には、滴下位置からコークス層を通つて直接出銑口に向かう流れと、炉底に接する無コークス溶銑浴を経る流れとがあると推定された。また降下メタルと炉底部との間に大きな温度差がある場合には、無コークス浴に停滞層が形成されると推定された。なお⁶⁰Coを用いる測定によつて、同一高炉でも無コークス浴が存在する場合もしない場合もあることが知られた。

(d) 固体の運動と応力分布

冷間移動層模型実験で、応力分布が炉腹付近までの主動応力状態から、遷位領域を経て、受動応力状態へと推移することがみとめられ、炉芯コークス層の傾斜面は受動状態のもとでの排出口を起点とするすべり線によつて与えられることが示された。また炉下部でのコークスの運動については、羽口先端直上からのファンネルフロー、および融着帯と炉芯コークス層との間の領域でのレースウェイ方向への移動があると推定された。なおファンネルフロー域の空隙率は固定層のそれより20%も大きく、通気性は良好と報告されたが、粉体を含むガス(固気2相流)の充填層内での流動特性に関する理論的・実験的研究が行われ、粉の堆積挙動を解析する手がかりがえられたことを指摘する必要がある。

(8) プロセス解析と炉熱制御

径方向の層厚比分布またはO/C分布を考慮した静的な高炉モデルの試みはすでに70年代前半に一、二の例をみるにいたつていたが、これらには設定された分布の妥当性と普遍性の点で問題があり、融着帯の存在を考えていないという不備があつた。70年代後半にトータルモデルの最初の試みとして提出された「高炉半径方向モデル」は、2次元ガス流れと反応および伝熱の基礎方程式だけでなく、固体装入物の運動(上部では炉体形状線に沿うピストン流れ、下部では炉芯堆積面と炉壁との間のレースウェイ方向への流れこみ)と液相の流れ(炉体形状線に沿うピストン流れ)に関する式をも含むもので、これによつて求められた1400°Cの等温線の配置状態は解体調査でみとめられた溶け落ち面の形状と一致したと報告された。トータルモデルの開発の研究はその後も続けられ、その成果が最近あいついで発表されたが、これらの研究の共通の関心は融着帯の配置状態の推定にあつた。とくにガス流れ、固体流れ、反応、伝熱の四つに装入物分布を加えて五つのモデルから成る「高炉2次元トータルモデル」では、軟化開始温度と溶落温度の間にある鉍石層部分としてこれを求め、上部・下部形状がともに逆V型になるのは高出銑比、高燃料比であつて、

鉍石の被還元性が不良の場合であり、最近の操業諸条件のもとでは上部形状は逆V型でも下部形状はM型で、名古屋1高炉の解体調査結果に近いという注目すべき結論をえている。ERGUNの圧損式を3次元に拡張して融着帯形状が非対称な場合のガス流れを解析するモデルも提出された。冷間模型の圧力分布を測定して検証を行つた後、融着帯形状とこれに対応する温度分布を設定し、炉体プロフィールの変化、層の収縮率、粒径低下率および空隙率の変化を固体温度の関数として与えて有限要素法を用いる計算を行い、融着帯が高位置にある側から低位置にある側へガスが流れ、これに対応して壁際圧力分布が変化するという結果をえている。

擬似鉍石を用いる融着帯のホットモデル実験も二、三行われた。いずれも融着帯形状が熱流比、すなわちO/Cの半径方向分布に応じて逆V型からV型まで変化しうることを、中心部のO/Cが高くて未溶融のまま炉芯に近づく場合には、炉芯傾斜面に沿う羽口方向への移動がおこることを示した。また一例ではこのさい中間ないし周辺部で降下速度が大きくなつて融着帯が全体として低下し、鉍石の一部が炉芯内に降下する現象がみられた。電導紙によるシミュレーションも行われた。その性格は融着帯の配置を与件とするという意味で、2次元ガス流れの初期の研究に近いが、幾何学的条件を多様に変化させうるという長所に基づいて、融着帯のレースウェイ深さに及ぼす影響の解明など、一連の成果をあげた。

ゾンデによつてえられる情報を入力として融着帯の位置を推定するモデルの研究も多く行われた。この種のモデルの問題の一つは向流する気・固両相の流量の径方向分布をいかに適正に定めるかにある。あるいは炉頂の境界条件の決定法に創意を示し、あるいは入力情報を上部ゾンデのそれから中部ゾンデのそれに変え、またあるいは上・下部両ゾンデの情報を併用したうえ圧力分布との整合性を確かめるなど、多様な試みが行われているのも、なんらかのセンサーによる融着帯の直接測定法が探求されるのも、そこに難しさがあることによるものであろう。

高炉の羽口以上の部分を炉壁を含めて1次元の分布定数系、炉床部を集中定数系として取り扱い、前者に特性曲線法を適用して基礎方程式をすべて常微分方程式とした動的モデルが開発された。このモデルによつて火入操業の検討が行われ、炉体れんがのスポーリングを防止する適正な計画が作成され、またこれを2次元ガス流れモデルによる吹抜送風限界の検討と組み合わせることによつて減尺吹卸操業のシミュレーションが行われた。これと同様に1次元の非常モデルを開発した後、高炉を複数の独立同心反応器の集合とみなすことによつて、半径方向の不均一分布を考慮しうるよう拡張した非常モデル

ルの試みもなされた。

高炉計算機操業ガイドシステムの一環として、さきに開発された5帯分割集中定数化モデル(榎谷モデル)を改良した炉熱制御モデルが発表された。融体滴下域である第5帯の固(液)相温度によつて炉熱レベルを推定し、送風(重油吹き込み量など)アクションをガイドするものであつた。このほか炉熱の予測または制御法に関する報告が二、三行われたが、いずれも応用 GMDH (Group Method of Data Handling) 法または ARMA (Auto-Regressive Moving Average) 法などの統計的方法によつて、Si または 溶鉄温度の変化の予測を行うものであつた。羽口埋込温度計や羽口輝度計の情報を ARMA モデルにとりこむ方法も報告された。通気異常にガス流の円周方向バランスの悪化が先行するという知見に基づいて定量化された二つのバランス指標と、異常の前段階として現れる局部スリップ・ドロップによるガス発生量の変動を代表する炉頂圧力変動指標とによつて、異常を予測・予防するシステムも開発された。

なお変動する生産・エネルギー情勢に即応した操業の検討という今日的な課題にこたえて、コークスと焼結鉄の品質の予測とその高炉への影響の評価、各工場の主要原単位の予測、全物質収支などを行つて、操業の安定度を提示する「製鉄工程シミュレーションモデル」も開発された。

(9) 総括

わが国における製鉄理論とその研究は、この10年間、技術の進歩とともに前進し、多くの成果をあげたが、それはまた解明されるべき問題がより本質的な段階へと前進したことをも意味している。一方鉄鋼業を取り巻く環境は製鉄の技術、理論研究のいずれについても、過去の延長線上の単調な発展の展望を許さない。こうした情勢のもとで理論・研究がさらに前進を続けるためには、正確な路線の採用と効果的な研究体制の確立が不可欠と思われる。

2.2 原 燃 料

2.2.1 原燃料事情の推移と展望

(1) 鉄鉱石資源について

(a) 鉄鉱石供給源の推移および鉄鉱石価格の推移

最近の10年間は昭和48年のオイルショックを機に鉄鉱石においても数量価格ともに大きく変動した時である。

鉄鉱石の供給源については図2.2.1に地域別輸入推移が示してある。地域別輸入シェアについては昭和40年頃から急激にシェアを伸ばしたアフリカが48年以降急

昭和	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
47年	44.3	20.7	16.0	11.3	3.8	2.4	1.5
48年	49.2	20.4	14.2	9.5	2.7	2.9	1.1
49年	49.6	24.0	12.2	9.2	1.9	3.4	0.7
50年	49.9	26.0	12.8	6.6	1.8	3.0	0.9
51年	49.7	26.5	13.2	4.7	0.9	4.2	0.8
52年	49.5	25.4	13.5	6.4	1.8	2.7	0.7
53年	48.8	25.8	12.5	6.6	3.2	2.2	0.9
54年	45.1	27.5	13.1	7.1	3.1	3.6	0.5
55年	47.2	28.5	12.3	6.2	3.1	2.6	0.1
56年	46.7	28.6	12.7	5.9	3.0	3.5	0
57年	46.6	28.8	12.9	6.1	3.2	2.4	0

①オセアニア, ②南米, ③インド, ④アフリカ, ⑤東南アジア, ⑥北米, ⑦ヨーロッパ

図 2.2.1 鉄鉱石の地域別輸入推移

激に低下している。鉄鉱石資源が枯渇してきた東南アジアは減少の一途をたどつてきたが、52年からフィリピン焼結鉄が輸入され始め、若干の回復をみている。しかしこれは主としてオーストラリア、南米産の鉄鉱石で製造されたもので、東南アジア origin ではない。ヨーロッパ地域はクリボイログ (Krivoy Rog) 鉄鉱石の生産減と東欧圏の需要増で、自由圏への輸出は55年に停止され、ここからの輸入はなくなつた。その反面国際市場での競争力が増してきた南米のシェアは大きく伸びている。オセアニア地域は54年のハマスレー (Hamersley) やマウントニューマン (Mt. Newman) の長期間ストライキで若干輸入が減少した年はあつたがフィリピン焼結への供給を考慮すると48%程度のシェアを維持している最大の供給源である。

需給面ではオイルショック以前の成長期に産業公害がクローズアップされ、42年8月公害対策基本法が制定されるに至り焼結設備の増設が規制される一方、山元の低品位鉄鉱石の品質改善と微粉鉄鉱石の有効活用についての要求が高まつたため海外にペレット工場を新設することになり、48年から49年にかけてアルガロボ (Algarrobo)、ニブラスコ (NIBRASCO)、マンドビ (Mandovi) といずれも共同購入ベースの長期契約を締結した。これらのペレットは53年4月アルガロボ、8月ニブラスコ、54年7月マンドビと次々に出荷開始された。また51年には将来の粗鋼生産の伸び(60年度全国1億3700万t見込み)を見込んで既存鉱山であるハマスレー、ローブリバー (Robe River)、リオドセ (CVRD) と増量の長期契約を締結した。ローブリバー 240万t/年、ハマ