

型炭配合法等のコークス品質改善技術の大幅な採用によつて、コークス品質は良好に推移した。

原料炭の構成は米国炭中心から豪州・カナダ炭への傾斜を強める一方、銘柄の多様化によつて石炭の組織成分、流動性等の性状が大きく変わつてきた。

今後の原料炭の動向をみると、昭和 58 年より入荷してきたカナダ、オーストラリアの新規炭及び 60 年後半より入荷が予想されるソ連の新規炭の増加による配合炭性状への影響に十分留意していく必要がある。

(6) むすび

昭和 30 年代後半に建設されたコークス炉は次の昭和 60 年代後半にリプレースの時期を迎えることになり、次期の新しいコークス製造技術が期待されている。まず第一にコークス炉の大型化高性能化が挙げられよう。西独マンネスマン社ではすでに、炉容 70 m^3 のコークス炉（従来の 4 m^3 炉の 3.9 倍）が建設されており、炉幅は 550 mm である。また、西独ルーアコーレ社では炉幅 600 mm の大型炉が建設中であり、夜勤を割愛する 2 シフト生産が計画されている。

炉壁れんがの材質、薄壁化あるいは蓄熱室の高効率化等コークス炉は大型化とともに高性能化が図られていくものと思われる。第二には石炭資源の選択幅を拡大する、いわゆる資源対応技術としての石炭事前処理技術の進歩である。石炭の物性を十分に把握し、その特性を最大限に活用することが重要である。第 3 には石炭の加熱挙動の研究である。石炭の乾留メカニズムはいまだ十分に解明されていない。石炭の伝熱と物性変化及び石炭の溶融とコークス化等乾留機構の解明によつて、コークス性状の推定が可能となり、コークスの製造条件をも含む真の配合理論が確立されよう。これによつて、新しい製造技術のシーズも生じてくるものと期待される。第四には、コークス炉排エネルギーの高効率回収とその利用技術の発展である。CDQ による赤熱コークスの顕熱回収を除けばいまだ十分でなく、排熱の 60% が残されている。

一方、石炭乾留時に発生する COG やタール等の副産物は、総合素材産業を指向している鉄鋼業の化学事業分野における重要な原料としての役割を担いつつあり、今後この副産物評価を含めた総合的なコークス製造技術を指向していくものと考えられる。

未来のコークス炉として、室炉式コークス炉を超えて一般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パイロットプラントの操業を開始した。昭和 61 年度までに高炉使用評価も含めて研究されることになつており大きな期待が寄せられている。

2.3 高炉操業技術

2.3.1 概説

昭和 40 年代末期から 50 年代末期にかけての 10 年間にわたり、二度にわたる石油危機を契機とした経済変動に伴つて、高炉操業はそれ以前にはなかつたエネルギーの価値を主体とした大幅な操業形態の変遷を余儀なくされた。その時々ニーズに合った操業形態がとられるなかで、高炉操業技術もまた一段と進展した。これらの新しい技術としては以下に挙げるようなものがある。

2.3.2 低操業度操業

戦後一貫して進められてきた高炉の大型化は、昭和 50 年代初期にピークに達した（図 2.4.1）。 4000 m^3 以上の超大型高炉の建設は、昭和 46 年の福山 4 高炉（ 4197 m^3 ）に端を発し、51 年鹿島 3 高炉（ 5050 m^3 ）、大分 2 高炉（ 5070 m^3 ）の出現を見るに至つた。しかし、これ以上の大型化は、巻き替え時の運営、経済性、生産に対する弾力性に大きなメリットは期待し難いと判断されたため、これらに続く大型化はなく、高炉の大型化は終了した。

昭和 40 年代末に総稼働基数中 2000 m^3 以上の大型高炉は約半数の 46% であつたが、57、58 年には 70% 台となつた。また 4000 m^3 以上では 40 年代末に約 10% であつたが、53 年には 30% 台に達した。一方、総稼働基数は 40 年代末の約 60 基から漸次減少し、58 年には 39 基となつた。これらは大型化とそれに続く大型高炉での操業の定着を示しており、高炉の大型化は生産性の向上と、各種原単位低減に大きく寄与した。

このような大型化の推進と大型高炉での操業の定着の中で生じた 2 度にわたる石油危機に伴う経済情勢の変化は、一転して減産操業を強いることになり、昭和 48 年には戦後最高の 2.04 に達していた出銑比も 58 年には 1.72 まで低下した。この間の高炉操業指標推移を図 2.3.1 に示す。

昭和 58 年までの 10 年にわたるこの長期減産は、当然、大型高炉での操業下における初めての経験であり、操業の弾力性に乏しいとされていた大型高炉における低操業度の維持に鉄鋼各社は多大の努力をはらうこととなつた。各社とも①トータルコストミニマム、②炉況安定化による銑鉄品質の確保、③健全な炉体プロフィールの確保、を共通の前提として低操業度操業に取りくんだ。操業度の低下に伴い、①ボッシュガス量の減少、②羽口先エネルギーの減少、③炉床熱の低下、④装入物滞留時間の増加、などに起因すると想定される各種の炉内状況

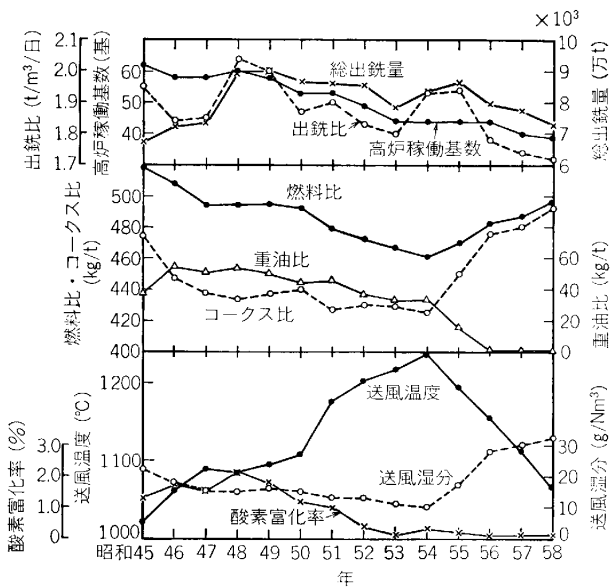


図 2.3.1 高炉主要操業指標推移 (全国平均)

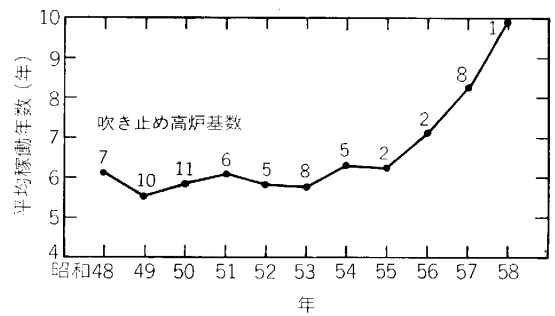


図 2.3.3 吹き止め高炉の平均稼働年数推移(1000 m³以下および寿命年数3年以下は除く)

一方、大型高炉での低操業度操業下では、従来の高炉の改修を好機とした新設備技術の採用を伴う炉容の拡大と増産によるコストの低減は望めなくなり、必然的に4～7年が常識とされていた高炉の寿命を延長することによるコストの低減が主要な課題となった。以降各社は高炉の長寿命化対策に取り組み、炉体延命のための保守、操業技術が開発された。図 2.3.3 に昭和 48～58 年に吹き止められた高炉の平均稼働年数の推移を示したが、56 年以降、急速に延命対策の効果が現れている。なかでも 57～58 年に吹き止められた新日鉄堺 2 高炉 (内容積 2797 m³, 稼働年数 9.36 年, 総出銃比 5620 t/m³), 君津 3 高炉 (同 4063 m³, 同 10.7 年, 同 7905 t/m³), 鋼管福山 5 高炉 (同 4617 m³, 同 9.96 年, 同 6894 t/m³) の記録は、50 年代における製鉄分野の設備技術と操業技術の大きな進歩のあらわれであった。昭和 58 年末における稼働高炉 39 基中、稼働年数 7 年以上の高炉は 13 基に達しており、近い将来における炉寿命 10～15 年, 総出銃比 8000～10000 t/m³ に向かつての足がかりとなった。

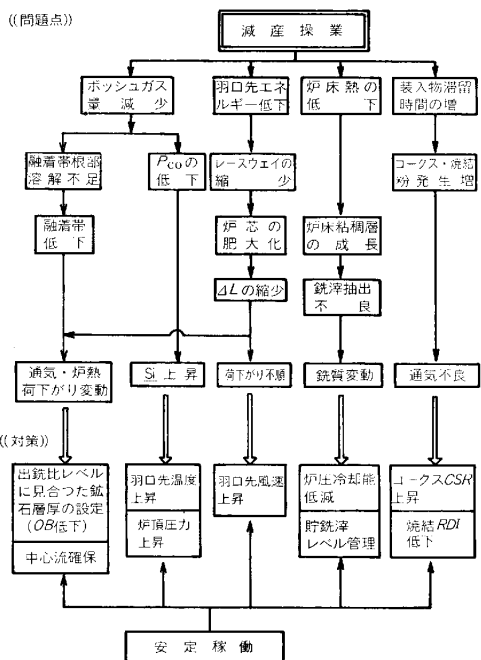


図 2.3.2 低操業度操業下で予想される問題点と対策 (日本鉄鋼協会共同研究会: 第 62 回製銃部会(1983年5月) 新日本製鉄(株)(私信))

の悪化が顕在化した。これらに対し、設備面および作業面からは故障・事故に伴う休・減風の防止、操業面では休風の回数および時間の適正設定、また一部では窒素富化によるボッシュガス量増加による熱流比および適正ガス流分布の確保などの対策が講じられ、原料面からは焼結鉱の耐還元粉化性の改善、コークスの反応後強度の改善など、総合的な対策が講じられた。図 2.3.2 に低操業度操業における問題点と対策例を示した。これら総合的な対策を講じた結果、困難とされていた大型高炉における低操業度操業技術を確認するに至った。

2.3.3 製鉄所のトータルエネルギーバランスを重視した高炉操業法

(1) オイルレス操業法

第 1 次石油危機では、石油価格の高騰に伴ってすべてのエネルギー価格が一様に上昇した。したがって高炉操業においては燃料比の低減が製鉄所のトータルコストミニマムに直接的につながることから、重油吹き込みと高温送風および装入物分布制御による炉内ガス利用率の向上など、さらには昭和 49 年以降送風中湿分の低位安定維持のため除湿装置の開発採用も各所ではかられ、燃料比の低減を目指す操業に重点がおかれた。その結果燃料比は昭和 54 年に 461 kg/t まで低下した。しかし第 2 次石油危機に伴う石油系燃料の石炭系燃料に対する大幅な価格上昇は、それまでの燃料比低減指向から一転してオイルレス操業を目指し、燃料比の増加による高炉ガス・コークス炉ガスの増発生分を製鉄所での他部門での

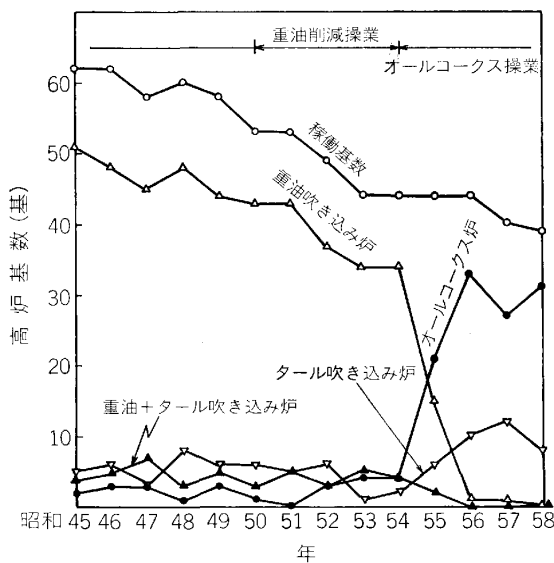


図 2.3.4 高炉操業形態推移

制御, 炉体プロフィールの適正維持などにきめ細かい対策がとられた。

(2) 石油代替

価格の高騰した重油の高炉での使用を低減ないしは無くするために, 昭和 54 年以降大多数の高炉がオールコークス操業, タール吹き込み操業を採用した. しかし高炉の長期安定操業を維持するための炉況制御手段として, また製鉄所の立地条件によつてはコスト的にも, 重油に代わる何らかの補助燃料の吹き込みが有利との観点から, 各種の石油代替燃料吹き込み技術の開発が通産省・資源エネルギー庁の補助金を受けるなどして, 昭和 53 年頃より着手された。

石油代替燃料としては, 石炭-重油スラリー (COM), 石炭-タールスラリー (TCM), 石炭-水スラリー (CWM), 微粉炭 (PC), が対象となり, その吹き込み技術の開発が実施された. いずれの吹き込み技術も昭和 57~58 年の時点でほぼ技術開発を終了し, 操業への適用が可能な技術となった. なかでも現状でコスト的に有利な微粉炭吹き込み (PCI) は, 一部の技術が外国からの導入にはよるが, 昭和 56 年 6 月大分 1 高炉において吹き込みが開始され, 以降 57 年 1 基, 58 年 2 基, 59 年 2 基の計 6 基が現在稼働しており, 吹き込み量 60 kg/t 程度となっている。

このように 50 年代は石油危機を契機に従来の重油吹き込み主体から, 状況に応じていかなる代替燃料も使えるように, 各種の燃料吹き込み技術を確立した時代でもあつた。

(3) 操業の多様化への対策

昭和 50 年代前半までは, 低燃料比が高炉操業の最大で共通の目標であつた. しかし, 2 度にわたる石油危機による資源エネルギー価格の高騰に対処すべく, 56 年にはほとんどすべての高炉がオールコークスまたはタール吹き込みに移行した. しかし, その操業形態は各製鉄所の立地条件を反映して各種の形態がとられた. すなわち表 2.3.1 に操業諸元の一列を示すように, ①高風熱低燃料比, ②低風熱高燃料比 (ガス多量発生指向), を両端として, 製鉄所全体のエネルギーバランスをもとにしたトータルコストミニマムの立場から, 各製鉄所固有の操業形態をとるようになった。

このような情勢の変化の中でも, 将来的な省資源・省エネルギーの観点から極低燃料比操業技術確立のための操業試験が, それまでの操業技術・設備技術を駆使して実施された. なかでも昭和 55 年 9 月の室蘭 4 高炉の月間平均燃料比 408 kg/t, 同 11 月の君津 3 高炉の 406 kg/t, 56 年 11 月の福山 3 高炉の 396 kg/t は高炉燃料比の限界にせまるものであつた. 表 2.3.2 に福山 3 高炉の 396 kg/t 達成時の操業諸元を示したが, このような

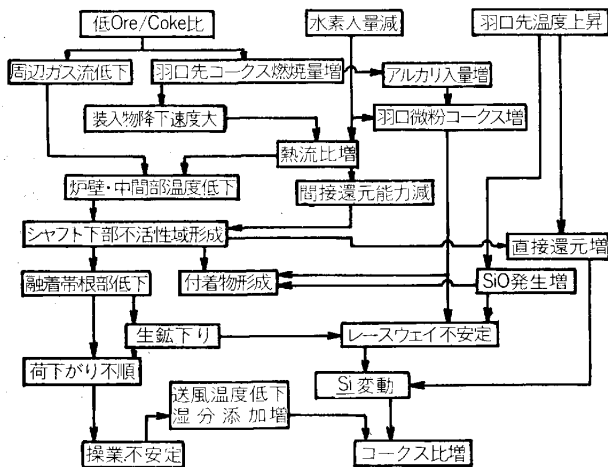


図 2.3.5 オールコークス操業の問題点に係る思考フロー (須沢ら: 鉄と鋼, 68 (1982), A 5)

石油代替燃料として供給すべく, 製鉄所のトータルエネルギーバランスに重点を置いた操業に転換した. このためオールコークス操業が主体となり, 図 2.3.4 にその推移を示すとおり, 昭和 57 年にはタール吹き込みの 10 数基を残し, ほかはほぼ完全にオールコークス操業となり, オイルレス操業となつた。

オールコークス操業は燃料吹き込み操業に比べ操業の柔軟性に欠けるため, 操業技術上多くの問題点を有している. 図 2.3.5 にその問題点に係る思考フローを示したが, 主要な問題点として①Ore/Coke 比減に伴う装入物分布制御の悪化, ②熱流比増に伴う炉壁側温度低下, ③羽口先へのコークス供給量増加や羽口先温度上昇による炉下部状況の悪化, があげられる. 低操業度操業下においてこれらの問題点解決のため従来に増して原料性状の改善, 粒度別装入を含む装入物分布制御, 溶融帯の適正

表 2-3-1 高炉操業諸元の変化
(日本鉄鋼協会共同研究会：第59回製銑部会 (1981年11月)
日本鋼管(株) (私信))

	Case I オイル吹き込み高風熱低燃料化	Case II オイルカット高風熱低燃料比	Case III オイルカット低風熱高燃料比
燃料比 (kg/t)	447.7	452.5	496.0
コークス比 (kg/t)	416.9	432.6	476.1
重油比 (kg/t)	19.7	—	—
タール比 (kg/t)	11.1	19.9	19.9
送風温度 (°C)	1305	1288	1030
送風湿分 (g/Nm ³)	9.2	13.3	16.7
羽口先温度 (°C)	2504	2499	2236
送風原単位 (Nm ³ /t)	1003	1019	1186
高炉ガス発生量 (Nm ³ /t)	1230	1220	1163
(800 kcal / Nm ³ 換算)			
熱風炉投入熱量 (×10 ⁸ kcal/t)	521.7	476.0	421.6
	54年11月実績	推 定 値	56年5月実績

表 2-3-2 低燃料比操業結果 (福山3高炉)
(日本鉄鋼協会共同研究会：第60回製銑部会 (1982年5月)
日本鋼管(株) (私信))

操業条件		炉 況	
送風量	4952Nm ³ /min	送風圧力変動	1.11kg/cm ²
送風圧力	3.59kg/cm ²	スリップ	0.7回/日
送風温度	1353°C	ダスト	7.7kg/t
送風湿分	5.6g/Nm ³	σ _{Si}	0.12
O ₂ 富化率	0%		
炉頂圧力	2.48kg/cm ²	溶銑・スラグ	
羽口先温度	2533°C	溶銑温度	1,481°C
		Si	0.27%
		S	0.045%
		Mn	0.43%
		P	0.098%
		スラグ CaO/SiO ₂	1.28
		Al ₂ O ₃	14.0%
		MgO	7.3%
		FeO	0.64%
		S	1.09%
		脱 硫 率	84.9%
		炉頂ガス	
		温 度	73°C
		CO	20.2%
		CO ₂	24.5%
		H ₂	1.7%
		そ の 他	
		シャフトガス効率	97.5%
		η _{CO}	54.8
		η _{H₂}	58.6
		熱 流 比	0.915
		出銑回数	17.4タップ/H
原料条件			
焼結配合率	96.6%		
雑原料配合率	3.4%		
副原料	1.9kg/t		
コークス D ₁₀ ⁹⁰	92.9		
平均粒径	52.3mm		
灰分	9.01%		
S	0.78%		
焼結銑 T(H/S)	65.2(90.5)		
-5m/m	4.0%		
SiO ₂	5.01%		
FeO	4.61%		
MgO	1.43%		
RDI	36.9		
RI	68.9		
スラグ比	274kg/t		
出銑量・燃料比			
出銑量	7636t/H		
出銑比	2.37t/m ³ ・日		
休風時間	0		
燃料比	396.1kg/t		
コークス比	354.0kg/t		
タール比	42.1kg/t		

極低燃料比操業の達成には操業技術とともに設備技術の進展も大きく寄与しており、上記の記録はこれらの総合的な成果であった。

2-3-4 各種原料の使用

ここ 10 年間の処理銑配合率の推移を図 2-3-6 に示す。割安な粉銑を使用した自溶性焼結銑の多量配合の傾向は昭和 50 年代に入ってから続き、高炉での焼結銑配合率は漸増傾向を続けた。この結果、高炉の高操業度、低燃料比操業に対する焼結銑の有利性が広く認めら

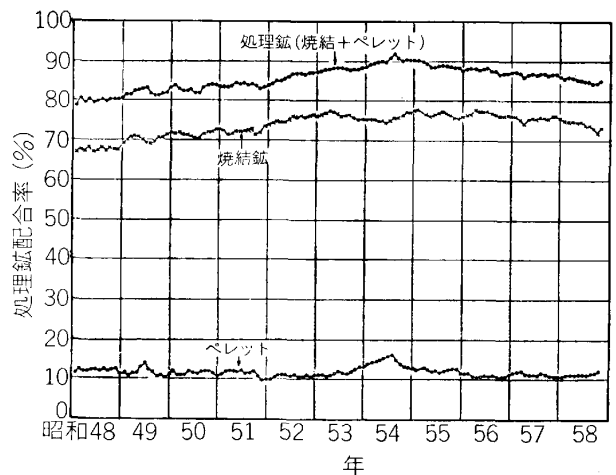


図 2-3-6 処理銑配合率の推移

れるに至った。一方、高炉解体調査の結果、軟化融着帯の高炉操業における重要性が指摘され、原料の高温性状への関心が高まる中で、50 年代初めより、原料の高温荷重還元試験装置が各社に導入された。この結果、自溶性焼結銑は、塊銑石に比べ軟化開始温度が高く、融着時の圧損も小さいなど高温性状が優れていることが明らかになり、これまでの操業実績を裏付けた。このように自溶性焼結銑への評価が高まる中で、50 年代中頃には需給上の粉銑と塊銑のバランスを越えてまで焼結銑の配合率を上昇させる動きも見られ、一部塊銑の破碎設備が導入された。しかし、54 年の第 2 次石油危機以降、合理化が強く要請されるに至り、電力消費を伴う塊銑破碎は徐々に減少の方向となり、これに伴い最近では焼結銑配合率も少しずつ低下の傾向となつてきている。ペレット配合率はこの 10 年間ほぼ 11~12% で推移した。昭和 50 年代に入つて、輸入ペレットに対して高温性状の改善が要望され、山元での高付加価値化のニーズもあつて、自溶性ペレットの製造が開始された。その後、石油危機による採算性の悪化によつて、ローブリバー、ハマスレー、マンドビなどのプラントが相次いで休止に追い込まれ、輸入量は減少したが、一方、日本の粗鋼生産量の低迷によつて高炉でのペレット使用比率は大きく変化することなく推移してきた。

ここ 10 年間の各種高炉使用原料について、特筆すべき点をあげる。昭和 50 年代初期までは、高炉操業側の焼結銑品質への要求は、主に冷間強度であつた。しかし、高炉解体調査によつて焼結銑の還元粉化現象や、軟化融着帯などの高炉操業への影響が認識されるに至つて焼結銑品質への要求は、次第に被還元性、還元粉化強度へ移り、これら品質指数の測定法の統一も行われた。このような高炉操業側のニーズの変化は、焼結銑製造技術の飛躍的な進歩を促した。50 年代前半では、低 Si 操業のニーズから、高温性状改善のため、MgO 添加焼結銑

が製造され、50年代中頃には、RDIを一定とした低SiO₂、低FeO焼結や低RDI高RI焼結といった還元性状の優れた焼結鉱の製造が可能となった。これらの焼結鉱は実際に高炉で使用され、炉況の改善、燃料比の低減に効果のあることが確認された。このような焼結鉱の還元性状重視の考え方は、今後も続いてゆくと考えられるが、今後の課題として、還元性状指数と高炉炉況との関連を定量的に把握して、これら指数の管理値を適正化することが必要となろう。最近、高炉シャフトに原料サンプラーを設置し、高炉操業中の炉内原料の挙動を把握しようという試みが、数多く報告されている。このような調査によつて、さらに焼結鉱品質が適正化されることが期待されている。ペレットについては、使用比率が高く、自社生産を行つている神鋼を中心として、自溶性ペレットの開発が、昭和40年代より行われてきた。特に、50年代に入つてからは、高温性状を改善するためMgOを添加したドロマイトペレットが開発され、これが焼結鉱の高温性状改善にも大きな影響を与えた。また、被還元性を改善した粗粒鉱石配合ペレット、分布の不安定性を改善した破碎ペレットなど次々と意欲的な開発研究が行われた。海外の自溶性ペレット製造プラントの中には、最近、省エネルギー対策として、木炭粉をグリーンボールに内装させる試みも見られ、このような炭材内装ペレットはわが国の高炉で一部使用が開始されようとしている。40年代から50年代初めにかけて、製鉄ダストの再利用対策として、製鉄ダストによる還元ペレットの製造が行われ、高炉および転炉で使用されてきた。しかし、50年代中頃からのエネルギーコストの上昇によつて、このプロセスは採算性を失い、これに代わつて、非焼成のコールドボンドペレットプロセスが注目を集めた。このプロセスでは、製鉄ダストや廉価なペレットフィードの有効利用が可能となるほか、省エネルギーや公害対策上も有利であり、新日鉄のヤード養生法、鋼管の水蒸気養生法、住金のブロック破碎法など各社で開発が行われた。これらのコールドボンドペレットは冷間強度、被還元性が自溶性焼結鉱に劣らない実験結果が得られ、新日鉄名古屋の実高炉使用テストでも満足すべき結果が報告されている。また最近、合理化対策の一貫として、コークス、焼結鉱の歩留向上を狙つた小粒原料の高炉使用の試みが報告されている。小粒原料には、中塊コークス(15~30mm)、小塊コークス(7~20mm)、小塊焼結鉱(2~5mm)などがあり、従来高炉での通気性の悪化を理由に使用されていなかった。使用方法としては、普通原料へ小量ずつ混入させる方法や、装入方法の変更により積極的に装入物分布制御に利用する方法などが報告されている。このような小粒原料の使用は、最

近の混合装入などの新しい発想の出現や、装入物分布制御技術の進歩によつて、今後さらに広がるものと期待される。

2.3.5 装入物分布技術の確立

この10年間、高炉へのニーズは大きく変動すると共に多用化した。高操業度から低操業度へ、液体燃料吹き込みからオールコークス操業または微粉炭吹き込み操業へ、さらに低Si操業、高炉寿命延長等、これらニーズに対応しながら高炉の安定操業を維持する上で、装入物分布制御技術の発展は大きな役割を果たしてきた。低燃料比、高操業度操業における中心流維持による通気性の確保、低操業度操業における中間および周辺流維持による炉下部不活性化の防止、低Si操業における中間および周辺流抑制による融着帯レベルの低下、さらに老朽化高炉の周辺流抑制による炉壁保護など非常に広範囲な操業形態に対応する装入物分布技術が習得された。このように操業変化に速やかに適切な装入物分布で対応できた背景には、装入物分布制御に関する基礎研究が昭和50年代に入つて飛躍的に進んだことが挙げられる。

高炉の大型化に伴う適正なガス流分布維持のために、昭和40年代中頃から導入され始めたムーバブルアーマー、ペルレスなどの装入物分布制御装置は、その後、積極的な使用方法の開発が行われたが、装入物分布制御技術が実践的ないし理論的に確立されたのは、50年代に入つてからであつた。これは、機械的サウンディング、マイクロ波、レーザー等による装入物表面形状の直接測定法の開発により、装入物分布状態が把握できるようになつたことと、荷下がり、ガス流等の高炉炉頂部の条件をシミュレートできる、実物大あるいは縮尺モデルによる基礎実験が盛んに行われたことによるものである。特にモデル実験では、鉱石、コークスの装入後の安息角、粒度分布が詳細に調査されたほか、鉱石装入によるコークス層の崩れ、鉱石装入時の炉中心部流動化による中心部混合層の形成、ガス流速による安息角の変化、装入物降下による形状変化、シャフトれんが損耗による炉壁部混合層の形成など数々の注目すべき現象が明らかにされた。これら直接測定やモデル実験で得られた知見は、その後の装入物分布制御法に多くの示唆を与えた。また、モデル実験で観察された諸現象についての理論解析も進み、ガス流速の安息角への影響についての力学モデル、装入物降下の形状への影響についての均一降下モデル、コークス層の崩れ現象についての土砂崩れ理論などが導入された。そして、これらの理論モデルを用いた装入物分布予測シミュレーションモデルが開発された。このようなモデルの開発により、コークスと鉱石の層厚比と粒

度分布の両方を考慮した通気性分布で装入物分布を考えることが可能となり、分布の把握が容易になったほか、分布を予測できるという点で、分布制御法の適確性が一段と向上した。特に運転経験の少ないベルレスについては、装入物分布の可変性が大きいこともあつて、導入期の運転方法の早期確立に分布予測モデルは大きな役割を果たした。今後も分布予測モデルは分布制御技術の発展に大きな役割を果たすことが期待されるが、そのためには予測精度の向上が望まれている。これまでの予測モデルは主にガイドライン的な利用が行われているが、これは高炉操業で経験するような装入物分布の微妙な変化に対する高炉のレスポンスを必ずしも適確に予測することができなかつたためであつた。最近、磁気センサーを用いたコークス層崩れ現象の直接測定と、理論的な解析について多くの報告がなされ、さらに装被物分布が炉下部融着帯形状に与える影響についても研究が進められている。このような研究によつて、今後分布予測の精度が向上し、さらに適確な分布制御アクションが可能となることが期待される。装入物分布の制御手段についても、装入物分布についての知見が増すに従つて多様な方法が開発された。ベル方式では、一定量の分割装入回数、装入待ちのタイミング、アーマーのストロークや使用数などを変更し分布の微調整を行つてきた。さらに最近では大ベル角度、径、開度、作動スピードなどハード面での変更も報告されている。ベルレスでは、ベルに比べ大きな粒度偏析の緩和と分布制御性の向上を狙つて、多重リング装入が一般的となつた。また、炉頂バンカーの位置の関係で垂直シュートで原料が偏流し、円周方向のガス流の不均一性が発生することが指摘され、その対策として、単一炉頂バンカータイプのベルレス装置の開発も報告されている。最近注目される装入物分布制御方法としては、新日鉄室蘭、名古屋で実施されている焼結鉱の粒度別装入と、川鉄などによつて研究された混合装入が挙げられる。粒度別装入とは、焼結鉱を粗粒と細粒に篩分けし、分離して装入することによつて、炉壁部の通気性を保ちながら L_o/L_c (鉱石およびコークスの層厚比) を下げ、炉下部不活性化を防止するというような、粒度分布を積極的に利用した分布制御方法である。また、混合装入とは、コークスと鉱石を完全に混合して装入することによつて、炉下部通気抵抗を減少させるもので、新日鉄君津では小塊コークスと塊鉱石を混合装入し、炉下部の通気性が改善されている。この理由として、融着帯でのメタルシュールへの侵炭促進によるポイドの増加や、初期スラグ中 FeO の熔融還元によるホールドアップ量の減少などが考えられる。これらの新しい発想の装入方法は、実操業への適用にはまだ問題も残つているものの、

装入物分布制御による高炉操業改善の可能性を広げるものとして、今後の発展が期待される。

2.3.6 低 Si 鉄の製造および新製鋼法への対応

昭和 40 年代から 50 年代初めにかけて行われた高炉解体調査によつて、高炉炉内反応メカニズムの研究が進み、従来炉熱指標であつた溶銑成分を制御する技術への展望が開かれた。一方、高炉の大型化による溶銑温度上昇、溶銑配合率の増加等により転炉での熱源としての銑中 Si の役割が減少するという背景のもとに、銑中 Si 低下のニーズが製鋼に生まれた。銑中 Si の低下によつて転炉でのフラックス使用量減、出鋼歩留りの増加が見込まれ、大きなコストメリットとなる。目標の銑中 Si 値としては、銑中 Si が低過ぎても、スラグ量の不足により脱硫、脱りん反応に支障が出るとの判断から 0.20% 前後とされた。このような製鋼側のニーズに対して、製銑側としては低 Si 操業のために予想されるコストの増加を見込んで、製銑-製鋼のトータルシステムとしてコストメリットが期待できることから、積極的に低 Si 操業に取り組むことになつた。

Si の銑中への移行メカニズムとしては、従来炉床でのスラグ-メタル反応が主反応であると考えられてきたが、高炉解体調査の結果、羽口レベルまでに Si が銑中に移行していることが明らかになり、さらに、スラグ-メタル反応の反応速度が遅く、溶銑の炉床滞留時間を考慮すると実績の銑中 Si 濃度を説明できないことが判明した。そして、これに替わつて考えられたのが、 SiO ガスを介するガス-メタル反応メカニズムである。羽口先高温域で SiO_2 から発生する SiO ガスは溶融滴下する溶銑滴と反応し Si が銑中に入る。このメカニズムは高炉解体調査の結果をよく説明し、反応速度的にも実績銑中 Si 濃度を説明できることから広く認められるようになった。このような溶銑への Si 移行メカニズムを前提として、高炉が実施した低 Si 操業対策の主なものは、軟化融着帯レベルの低下による反応時間の短縮、 SiO_2 活量の低下による SiO 発生抑制、炉下部熱レベル低下による Si 移行反応の抑制などである。軟化融着帯のレベル低下対策としては、焼結鉱、ペレットへの MgO 添加による高温性状の改善や装入物分布制御による融着帯形状の調整が、 SiO_2 の活量の低下対策としてスラグ塩基度の上昇が、さらに炉下部熱レベル低下対策として溶銑温度の低下や羽口先フレーム温度の低下がそれぞれ実施された。特に溶銑温度については、適切な高炉熱レベルの維持と転炉での熱バランスを十分配慮した管理値の設定がなされた。

図 2.3.7 に昭和 51 年から最近までの全国高炉月間平

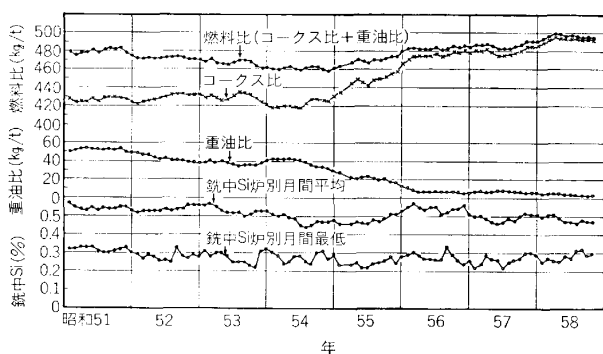


図 2.3.7 鉄中 Si の推移

均鉄中 Si および高炉別月間最低 Si の推移を示す。低 Si 操業への各社の取り組みが実を結び、全国平均の鉄中 Si は 53 年初めより低下し始め、54 年までの 1 年間で 0.55% から 0.45% まで約 0.1% 低下した。この期間高炉は低燃料比を指向しており、低 Si 操業対策としては主に原料の高温性状の改善、焼結鉱配合率の増加等によつて軟化融着帯レベルを下げ、滴下帯滞留時間の短縮によつて Si 移行反応を抑制する方法が主流となった。その後、55 年に入り高炉操業のオールコークスへの転換が始まるにつれて、コークス比増加による SiO ガスの発生増加などによつて全国平均の鉄中 Si は再び増加し、いつたんもとの水準に戻つた後、57 年頃より再び低下傾向を示し今日に至つている。オールコークス操業下における低 Si 操業では、低送風温度、調湿によつて羽口先フレーム温度を低下させ、SiO ガスの発生を抑制することが対策の主流となった。このような全体推移の中で、炉別の月間最低 Si の推移を見ると、ほぼ 0.20% 台で推移しており、高炉の操業努力で製鋼側の要求を達成できる可能性を示している。このうち特に長期間低 Si 操業を達成した高炉としては、名古屋 3 高炉、千葉 6 高炉、福山 4 高炉などが注目される。また 1984 年 5～6 月にかけて福山 3 高炉は月間平均 Si 0.19%、水島 2 高炉は月間平均 Si 0.18% と初めて 0.20% を下回つた。

さて、ここ 10 年間の日本製鉄業を取り巻く環境の推移を見ると、品質の高級化、高度化へのニーズは年々高まり、特に製鋼プロセスでの脱りん、脱硫の機能強化が課題となつてきた。このような情勢の中で、脱りん、脱硫、脱炭の機能が集中した従来の LD 転炉法では、工程能力、製造コストの面で必ずしも効率的とは言えず、各機能を分離した方がトータルシステムとして効率的であるという発想が生まれ、50 年代中頃より溶銑予備処理技術の開発が盛んになつた。また最近、酸化剤を羽口から高炉へ吹き込み、炉内で脱珪処理を行う試みが報告された。この方法では、脱珪効率は約 20% と铸床脱珪

に比べ低いものの、装置の簡素化や発生スラグ対策が必要になることが期待される。

2.3.7 操業管理およびその他の技術

操業管理の目的は、炉況異常を早期に発見し、適切なアクションをとることにより、高炉の安定操業を長期間維持することと言えよう。ところで、高炉操業は 50 年代前半まで本格的な大型高炉時代にあつて、原燃料など厳選された条件のもとで低燃料比、高出鉄比を要求された。しかし、石油危機以後 50 年代後半に入ると、経済の低成長時代を迎えて、高炉操業は大幅な操業度変更に対する弾力的対応を始めとし、省エネルギー、省コストおよび低 Si 操業さらに長寿命化と多様な対応を要求されるようになった。

従つて、操業条件も小粒原燃料の使用を始めとし、かつての厳選された状態から後退する方向にあり、安定操業を維持することが従来以上に難しくなつてきている。そのため、操業管理において管理の強化のみならず以下に述べる質的な改革が行われるようになった。

(1) 重点管理項目の変化

操業管理の具体的内容は、統一されたものが無く、各製鉄所の事情に応じて独自に決められているが、大略表 2.3.3 に示す 8 項目に分類できる。この中で、ガス流分布管理、溶融帯管理、装入物分布管理は、この 10 年で研究の対象から操業管理の対象へと定着し始めてきたも

表 2.3.3 高炉の操業管理項目と使用ゾンデおよび数式モデル

管理項目	管理内容	使用するゾンデ・センサー・数式モデル
操業条件管理	送風量、送風温度、送風湿度、羽口先温度、送風エネルギー、原燃料性状	一般工業計器 簡易計算式、粒度分析など
装入物分布管理	L_0/L_c 分布、混合層範囲	プロフィールメータ (機械式、マイクロ波式、レーザー式) 層厚計 (電極式、マグネット式、差圧式) モデル式 (装入物分布モデル)
ガス流分布管理	ガス流分布 (半径方向)	水平ゾンデ (層内) ベル下温度計 モデル式 (ガス流れモデル)
溶融帯管理	位置、形状	TDR、送り込み垂直ゾンデ モデル式 (溶融帯推定モデル)
炉況管理	荷下がり、圧力変動、温度分布	サウジング、送風圧力計、シャフト圧力計 炉口温度計、管理システム
熱レベル管理	鉄中 Si %、溶銑温度、スラグ性状	蛍光 X 線分析計、温度計 モデル式 (Si 推定モデル)
出鉄滓管理	貯銑量	レベル計、ロードセル重量計、配合計算
炉体管理	れんが残厚分布、壁付き	FMT センサー モデル式 (炉壁、炉底侵食モデル)

のであり、研究の成果が操業へ適用された代表的なものである。とりわけ、溶融帯は高炉の解体調査で存在が確認されて以来、高炉操業のキーポイントとして研究が進められてきたが、その計測手段として鋼管で開発された TDR 法 (Time Domain Reflectometry) および送り込み垂直ゾンデ法が開発され、また数式モデルによる推定方法が新日鉄で開発されるにともない重点管理項目として操業管理にとりこまれるようになった。そのほか、装入物分布は、ガス流分布および溶融帯分布の制御手段として、二次元あるいは実物大モデルによる研究が進められてきたが、各種のプロファイル計に加えて、新日鉄で開発されたマグネット式層厚計が実用化されるにともない、装入物分布管理が重点管理項目の一つに加えられつつある。また、ガス流分布および炉体管理においても、各社で二次元あるいは三次元ガス流れモデルおよび神鋼で開発された有限要素法による炉底侵食モデル等を炉体管理に使用している。これらに共通する点として、新しい検出端の開発のみならず、検出端情報と数式モデルを組み合わせて管理に使用していることが挙げられる。これは、新しい傾向として今後ますます広がるものと考えられる。

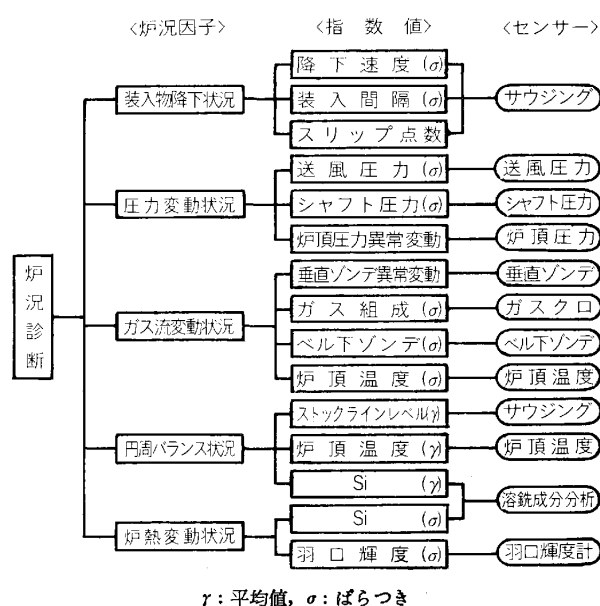
(2) 炉況管理における定量化

新しいゾンデあるいはセンサーが開発され、検出端情報の多種多様化が計られる一方、計算機の導入も積極的に行われた結果、検出端情報の組み合わせによる指数化処理を始めとする各種の定量化やパターン化が進んだ。もちろん、操業を定量的に表現する試みは従来からも行われてきたが、昭和 40 年代前半は操業諸条件の定量化が主体的であつた。たとえば、羽口先温度、送風エネルギーあるいは REICHARDT の段階別熱精算から得られる熱余裕 (HCR) 等が代表的であり、いずれも複数の操業因子を組み合わせ指数化したものである。

一方、この 10 年間では、むしろ操業の結果である炉況を定量化する努力が各社で行われた。たとえば、図 2.3.8 に示すように、炉況を構成する各種の現象を炉況因子として整理し、関連する検出端を分類して対応づけるとともに、炉況の安定度を評価する尺度として、各測定データの絶対値レベルのほか、変動、不均一性、円周バランス、分布パターン等を選び、各炉況因子をこれらの尺度を用いて多角的に定量化する方法がある。

また、対話型データ処理システムの開発により、解析機能の迅速化が計られる一方、各種の数式モデルにより炉内の動的な状態を推定することも可能となり、操業管理を科学的にサポートする機能の充実が計られたことも、計算機導入の大きな効果の一つであろう。

(3) 操業管理のシステム化と今後の課題



γ : 平均値, σ : ばらつき

図 2.3.8 炉況診断の構成

(日本鉄鋼協会共同研究会: 第 61 回製鉄部会 (1981 年 10 月) 日本鋼管(株)(私信))

炉況の定量的把握が進められるとともに、過去の操業実績などから管理基準を定め、炉況因子が管理基準を外れた場合に、警報およびアクション指示を出すシステムも各社で開発され、操業管理に適用されつつある。昭和 53 年に川鉄で開発された GO-STOP モデルを始め、新日鉄広畑の操業管理システムや鋼管の PILOT システム、新日鉄名古屋の AGOS システム等が代表的なものである。これらのシステムを操業管理に適用することにより、炉況の評価および異常の検出において標準化が行われたと言える。しかし、アクション指示の面では、まだ減風あるいは増コークス程度の指示に限られており、幅広いアクションの種類と強さを指示するまでに至っていない。今後、操業管理が完全にシステム化されるためには、アクション面での標準化が推進される必要があるだろう。

(4) 出銑滓管理

出銑滓作業は、高炉操業におけるもう一つのアクションと言われるように、炉況におよぼす影響が大きいものである。この 10 年間に、受銑量の把握手段として、溶銑鋼あるいはトーピードのレベル計または重量計等の設置が一般化し、炉内貯銑量がリアルタイムでしかも定量的に把握できるようになった。一方、開孔方法においても、早期開孔あるいはこれに準じた開孔方法が実施されるようになり、意図するタイミングに出銑することが、ほぼ 100% 可能となった。その結果、開孔トラブルによる出銑遅れは極めて少なくなり、炉況の悪化を招く例も少なくなっている。ただ、出滓量の測定に関しては、鋼管におけるスラグ流量計の開発例はあるもののいまだ実

用的な計測手段が無く、定量的な貯滓量管理は今後の課題として残されている。

(5) その他の技術

その他、操業度の大幅な変更に対する弾力的な対応策の一つとして、長時間休風を技術的に確立する試みも実施されている。生産調整を目的として、70~80h 程度の長期休風が実施され、その休風準備および測定も計画的に行われて、立上操業も順調であつたことから、今後一つの操業技術として確立されるものと考えられる。

また、炉体延命への対応として、シャフト部炉壁の吹付補修技術が開発されるにともない、減尺休風が必要となつているが、減尺時間の短縮あるいは休風前後の炉熱低下幅の減少を目的として、無装入減尺操業法が、昭和58年に新日鉄釜石および鋼管福山で実施され成功した。これも、高炉操業の自由度を広げる技術として将来、他高炉でも実施されるものと考えられる。

2.4 高炉設備

2.4.1 概 説

高炉設備は、1970年代の高度経済成長期には、急速に拡大した鉄鋼需要を反映し、スケールメリットの追求により、図2.4.1に示すごとく大型化の一途をたどつた。加えて、高圧化、並びに、複合送風技術の進歩が、操業面からも大型高炉の高生産性を可能とした。しかし、第2次オイルショック以降の安定経済成長期を迎え、高炉設備の動向は大きく変わつてきた。すなわち低成長に合わせた設備の集約化・合理化、設備費軽減のための炉寿命の延長、エネルギーコストの高騰に対応した省エネルギー設備と燃料変換関連設備の設置等が主流に

なつてきた。また、各種検出端やゾンデ類の開発、導入がさかんとなりこれらの情報をもとに、各種のモデルの開発や総合管理技術が発達し、高炉の製錬能力の拡大が、安定かつ弾力的に可能になつた。図2.4.2にこの10年間の高炉設備技術の変革を示し、以下に各論として記述する。

2.4.2 装入物分布制御装置

高炉へ鉄鉱石、コークス等を装入する際、炉内半径方向における鉱石とコークスの割合と粒度分布を変化させ、炉内を上昇する還元ガスの流れの分布を調整するために、装入物分布制御装置がある。この装置として、図2.4.3に示すベル・アーマータイプとベルレスタタイプの二つが代表的である。ベル式高炉では、装入物分布は大ベルから装入物が落下する際に、炉口金物に衝突・反撥して決まる。しかし、高炉の大型化にともない炉口径が拡大し、炉中心部への装入物の堆積が不十分となる傾向にある。ムーバブル・アーマーは、人為的に反撥板の位置を変えることにより装入物の落下軌跡を変え、意図す

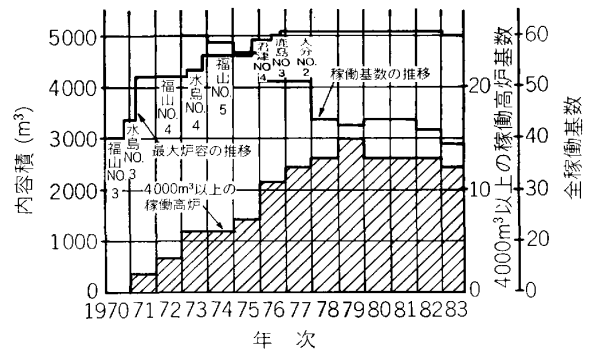


図 2.4.1 国内最大高炉 4 000 m³ 以上の稼働高炉及び高炉稼働基数の推移

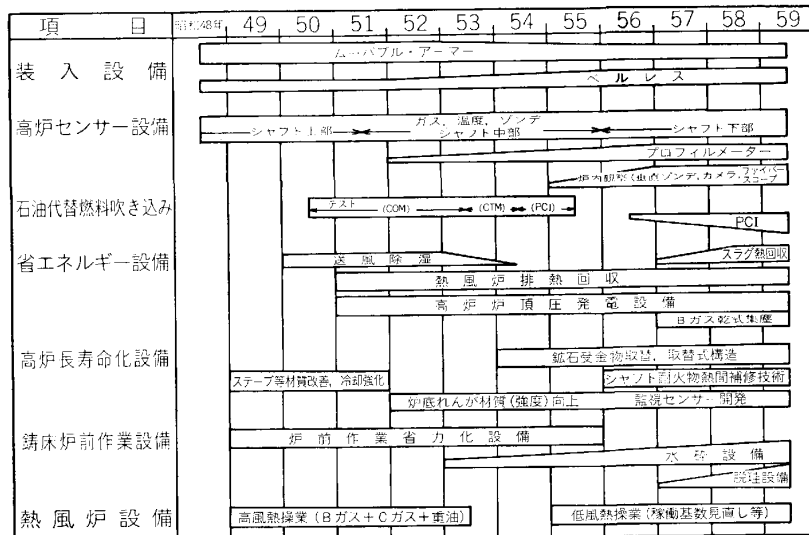


図 2.4.2 高炉における代表的設備の導入経過