わが国の鉄鋼製錬の現状と今後の課題*

田 口 昇**

Present State in Iron and Steelmaking Technologies
and Subjects for Future in Japan

Noboru TAGUCHI

1. は じ め に

演題に関する領域は余りに広く、紙面での制限からその全体を網羅することは不可能である。したがって、ここではわが国の鉄鋼業を取り巻くこれまでの環境の変化とそれへの技術的耐用の発展および今後の資源、エネルギー、および環境問題の三つについて、とくに原料処理と製鉄技術に関する概略を述べる。

2. わが国を取り巻くこれまでの社会環境の変化

変化の特徴の一つは、1973年から1979年の二度にわたるオイルショックに続いて、アジアの中進途上国の鉄鋼業への台頭、1995年1月17日の阪神・淡路地震の発生、

為替変動制の施行以後の円高が1995年4月には一時1ドル80円を突破するなどにより、日本経済の国際競争力が一気に低下した。二つ目は環境と開発に関して国際的に高まりをみせている国境の無い地球規模の環境問題である。この解決はエコロジカルに調和の取れた生産・利用・再利用系を作ることが糸口となる。鉄鋼業は環境に与える負荷は大きいものの、鉄そのものは再生利用に最も適したエコマテリアルである。したがってこの長所を活かし、環境への負荷の低減、再生利用率の向上を狙いとした製造・製品技術の開発が課題である。三つ目はユーザーが要求する製品の多種多様化や差別化製品が出現し、その結果生産品種の数は多くなり、生産単価は小さく、大量生産方式の有利さが失われた。

第1図 わが国の粗鋼生産量の変遷（1960年以降）

* 平成8年6月13日本会第96回例会において発表
平成8年4月3日受理

** 秋田大学鉱山学部 資源・資材工学科

3. 経済の変動と鉄鋼生産

わが国の経済の変動は、第1図に示すように1963年から1993年までの粗鋼（加工前の素材鋼）総生産量と平炉鋼、電気炉鋼および転炉鋼生産の変動から読み取ることができる。図から、経済は、1955年からの著しい成長と第一次オイルショック（1973年）による低下変動、さらに第二次オイルショックの1979年を経過して1991年までの経済の停滞期、そして1991年以降の三つの波に分類で

きる。伊丹は、第一の波は資源の壁、第二の波は国際化の内なるリストラ等の壁、そしてそれぞれの波動期に蓄積したものを巧みに活用し、発展してきた次の波と説明している¹⁾。

4. 原料処理と高炉製鉄技術の推移と課題

4.1 原料処理技術の推移

第1図に示した1960年から1973年までの粗鋼生産の急激な伸長は、第1表に示すように、原料面からは主とし

第1表 わが国の鉄鋼製錬技術の変遷（1960年以降）

年	原料処理と高炉製錬技術	転炉製錬技術	電気炉製錬技術	二次精錬技術と連続鋳造
1960	自溶性焼結法 普及			
1961	高炉炉熱・熱収支モデル開発			真空脱ガスDH法導入
1962	高炉での均成値比60% 高圧投炭		世界最大の二百t電気炉稼働	
1963	マルコナベレット導入	電気炉の生産量平炉鋼を上回る		真空脱ガスRH法導入
1964	高炉への重油吹込み			KR脱炭法開発
1965	高炉基礎焼結法の製造			初の湾曲型連続鋳造機
1966				電気炉初の連続鋳造機
1967	重油と粉炭の混合吹込み			VOD導入
1968	高炉の炉体調査			連続鋳造25基 鋳造能力5百万t
1969	世界初3000m ² 級高炉出現	高炉出口能力73百万t/年	初のUHP電気炉稼働	ASEA-SKF炉導入
1970	鉄鉱石の事前処理強化			RH-OB法によるステン製造
1971	酸溶官化送風の促進 4000m ² 級高炉出現	世界最大級200t電気炉稼働	取組開始LF炉を開発	国内初のAOD稼働 連続鋳56基
1972	均成値使用比率80%に迫る			
1973	原子力製鉄調査プロジェクト	電気炉が全生産量の八割を占める	電気炉鋼が全生産量の二割を占める	VAD炉を導入
1974	国内粗鋼生産一位千九百万t			AOD炉寿命116回世界記録
1975	コークス比431kg/t			
1976	5000m ² 級大型高炉出現			
1977		純酸素吹込み電気炉Q-BOPの稼働開始 平炉は皆無		
1978	4000m ² 級高炉40基中13基	上・底吹き混合吹鋼法の開発	電気炉鋼に炭素吹込み法	AOD炉寿命305回世界新記録
1979	重油吹込み量の低減			国内連続比率47.4%となる
1980	オールコークス投炭への移行 溶銑脱リン法の採用			国内連続比率63.2%まで拡大
1981	粉炭吹込みPCI投炭の開始	K-BOP法の開始		世界最大断面スラブ連続鋳造機
1982	高炉センサーの開発活用化			
1983	稼働全高炉40基のオイルレス			国内連続比率82.7%まで拡大
1984				水平連続鋳造機
1985	製銑分野へのAIシステム導入	溶銑予備処理法の確立	LE炉基盤36基となる	国内の真空脱ガス炉83基となる
1986			120t電気炉にEBT導入	
1987				二次精錬適用 電気炉70電気炉鋼50%
1988	溶銑還元研究委員会発足 新均成値HPSの開発と製造		初の30tDC電気炉稼働	
1989	新日鉄釜石の高炉全面休止			
1990	新日鉄堺の高炉全面休止		EBT電気炉13基に拡大	二次精錬適用 電気炉79電気炉鋼65%
1991	高炉PCI187kg/t 記録		電気炉鋼比率31%に迫る	
1992			DC電気炉11基 EBT電気炉22基に拡大	連続比率97% 普通鋼99%特殊鋼84%
1993	溶銑還元P.P完成 高炉PCI200kg/t 記録 粗鋼生産1位tを切る			二次精錬適用 電気炉85電気炉鋼96%
1995	粗鋼生産1位1千万tに迫る

第2図 ピソライト磁石（高結晶水含有）の同化挙動図（鉄と鋼：vol. 81, No. 4, 1995, p. 265）

て自溶焼結磁の普及と事前処理技術の向上による焼結磁の高品質化，装入比率の増大（80％）などによる。また，安価原料の多量使用および劣質磁石の利用を目的とした事前処理技術，装入方法の改善，高歩留生産性技術等で溶鉄コスト低減に大きく貢献した。

安価原料の多量使用では原料粒度が細かく焼結としての量的使用制限のあったペレットフィード（PF）の多量使用技術がある。その例として，全原料を造粒し，焼結機を改造して実機化された HPS（Hybrid Pelletized Sinter）がある。これは PF を60％まで使用でき，焼結磁の品質，生産性の向上とコークス原単位の低減を達成している。

劣質磁石では，輸入料が増加している豪洲産のピソライト系磁石等の高結晶水磁石の使用技術がある。これらの磁石はヘマタイトを核としてその周囲を多量のゲーサイト（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）が取り囲んだ魚卵状構造の磁石である。この磁石を核として従来の原料処理により擬似粒化を行って焼結すると，結晶水の蒸発による吸熱量が大きく，かつ第2図のように大亀裂の発生，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_2 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く，焼結磁強度と歩留を低下する。このような問題解決への対応や均一焼結と高歩留を狙いとした偏析給磁の強化などの装入方法の改善，またコークスの細粒化や石灰石の粗粒化が有効視されているものの依然として解決すべき課題を多く残している。

4.2 高炉製鉄技術の進歩

製鉄技術の進歩を述べるに当たっては，コークス製造技術の進歩による多大の寄与を度外視して語ることは出来ないがここでは割愛する。高炉操業技術からみると1960年以前の操業技術の進歩に加え，超高圧操業，重油吹込み，重油と粉炭の混合吹込み，酸素富化送風，高炉の大型化（5000 m^3 出現）などが挙げられる。

高炉操業において，まず取り上げられるのは装入物分布制御技術である。炉内半径方向の装入物の状態分布は，操業の安定性・効率に大きく影響し，この状態分布はほぼ装入方式による。ペルレス方式による装入は，原料の

炉内落下位置を連続的に変化できる点でペルアラマ方式と異なり，制御に柔軟性があり，高炉のうち15基が同方式を採用，高炉の約半分を占めるに至っている。

装入物分布制御による炉内通気性の維持については炉況安定の面から炉内中心部のガス流量の確保は，炉内ガス流制御の基本的課題である。通常のペルアラマ方式やペルレス方式では炉中心部までの装入に制限があり，炉壁側にガス流が集まる。そこでコークス中心装入技術が開発された。この技術は専用のシュートを用いて炉中心部に少量のコークスを直接装入する方法である。この装入法は，第3図のように炉中心部へのコークス装入は磁石の装入に先だて行われ，磁石の中心部流入を抑えることで同部の Ore/Coke が低く制御でき，炉中心部のガス流性は飛躍的に向上した。同技術の効果は単にガス流制御にとどまらず，炉下部の状態制御にも及んでいる。

一方，高炉に微粉炭が吹込むアイディアはすでに150年前に提案されている。しかし重油が安価で輸送が容易だったためその吹込みが一般化した。ところが3で述べ

第3図 コークス中心装入による新しい高炉操業理論（鉄鋼界報：No. 1657, 1995）

たその後の経済の変動で、重油価格高騰で、いったんオールコークス操業に移行した。しかし羽口先のコークスの燃焼のみで大型高炉の炉熱制御が難しく、重油の代替補助燃料への要求、コークス炉の老朽化により高炉で用いるコークスの一部を石炭で高し、コークス炉の負荷を軽くし、炉寿命の延長を図っている。現在は第4図に示すように、高炉31基中28基が微粉炭を吹き込みを行っており、200 kg/t の PCI はすでに達成されている。

4.3 高炉法に基づく新プロセスへの動向

(1) 粉鉱石吹き込み 高炉操業の柔軟性、原料の選択幅拡大、PCI 多量吹き込み溶きの通気確保、高酸素操業溶きの羽口先温度および熱流比（凝縮相ガスの水当量比）制御のために粉鉱石を直接羽口先から吹き込む方法（複合吹き込み）が開発されつつある（第5図）。(2) 酸素高炉法 高炉炉頂ガスを燃焼させた余熱ガスをシャフト部に吹き込み、シャフト部における熱不足を純酸素送風で補う酸素高炉法について実証試験が行われてい

る。この方法は多量の微粉炭を吹き込むことが可能で、生産性の向上と溶銑コスト削減への効果が大きい（第5図）。

4.4 高炉によらないプロセスへの動向

高炉によらない将来の製鉄法とみられているものに溶解還元がある。これは主として鉄鋼石原料の選択幅拡大と低品位炭の直接使用が可能であることが利点である。

この方法の例として、第6図に示すわが国の鉄鋼8社と石炭利用総合センターが共同開発した DIOS (Direct Iron Ore Smelting Reduction Process) 法と第7図に示すモスクワ鋼合金大学 (MISA) の開発したロメルト還元プロセス法がある。前者の共同研究では 500 t 規模のパイロットプラント試験を行っている。後者についてはわが国の一企業が導入のための検討を行っている。

第4図 わが国における微粉炭吹き込み高炉の基数と微粉炭比の推移（鉄鋼界報：No. 1657, 1995）

第5図 吹き込み技術からみた高炉技術の発展動向（鉄鋼界報：No. 1657, 1995）

第6図 DIOS (Direct Iron Ore Smelting Reduction Process) の概念図

第7図 ロメルト還元プロセスの概要フロー（鉄鋼界報：No. 1654, 1995）

6. 環境問題

6.1 焼結における排ガスの脱 SO_x と脱 NO_x

排ガスの脱 SO_x としては、従来の石灰石膏法、アンモニア硫安法に加え、活性炭乾式脱硫法、水酸化マグネシウム脱硫法も稼働させ、第8図に示すようにわが国の

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 対策は発生の制御と排煙脱硝の両面から研究がなされ、アンモニア接触還元法による脱硝機2基が稼働している。発生の抑制では焼結層内でのコークス粒の燃焼制御、発熱原料として鉄分添加の効果を認めている。

第 8 図 わが国における脱 NO_x 脱 SO_x 設備を有する焼結工場数の推移（鉄と鋼：vol. 81, No. 4, 1995, p. 276）

第 9 図 高炉スラグ需給の推移（鉄鋼界報：No. 1657, 1995）

6.2 CO₂ の発生抑制

製鉄工程には製鉄所への全炭素投入の約95%が石炭（577 kg/t-HM, 92%）および石灰石（20 kg/t-HM, 3.2%）とともに装入される。全体の41%が製鉄工程で CO₂ として放出され、残りは次工程に送られる。

この CO₂ の発生低減には 1) 省エネルギー、2) 代替の還元剤や燃料（低 C/H 比燃料）の使用の二方向がある。1) の省エネは大幅な低減は難しいが、コークス製造技術、原料処理、排ガスの循環等の積み上げによる効果が期待される。2) の代替燃料は石炭の直接使用の範囲に留まり、微粉炭の吹き込み量の増加に期待される。その他の低減としては溶解還元製鉄法の確立がある。

6.3 高炉・製鋼スラグの資源化技術

(1) 高炉スラグの生産量は約 320 kg/t-HM で、需要

の推移は第 9 図に示すとおりで、また第 2 表に示すように 1994 年実績で 2,315 万 t である。水砕比率 62.5% で、うち徐冷スラグ（土木用）869 万 t、急冷スラグ（水砕、セメント用）1454 万 t である。1995 年見通しは 2,330 万 t となっており、ほぼ 100% の資源化が可能となっている。

(2) 製鋼スラグの需給は第 3 表に示すように 1994 年では 1,252 万 t で、うち転炉スラグは 985 万 t、電気炉スラグは 267 万 t である。製鋼スラグの需給は道路用、土木用、加工原料用が主であり、セメント用は 53 万 t と少ない。とくに道路路盤材への利用拡大が促進エージング設備の逐次整備によって期待されている。

第 2 表 高炉スラグ需給（単位：万 t, %）

		1993年度	94	94/93	95	95/94
生産	生成量	2,252	2,309	2.5	2,350	1.8
	生産量	2,285	2,315	1.3	2,330	0.6
	水砕化率	66.3%	62.5%	-	67%	-
	水砕化率	66.3%	62.5%	-	67%	-
払出	セメント用	1,427	1,454	1.9	1,550	6.6
	土木用	869	869	0.0	869	0.0
	加工原料用	51	51	0.0	51	0.0
	その他	36	35	-2.8	30	-14.3
外販	外販計	2,049	2,044	-0.3	2,300	12.5
	自家消費	127	107	-15.7	100	-6.5
	払出計	2,176	2,151	-1.1	2,400	11.6

注：「道路用」には鉄道用を、「土木用」には地盤改良材を、「セメント用」には煉出用を含む。「外販用」にはその他の用途を含む。

（出典：鉄鋼界報，No. 1657，1995）

第3表 製鋼スラグ需給 (単位: 万 t, %)

		1993年度	93/92	94	94/93
使用量	生成量	1,231	1.5	1,252	1.7
	道内用	145	3.1	137	△5.5
	道外用	63	0.5	53	△15.9
	セメント用	293	△15.0	292	△0.3
	加工原料用	151	△2.1	155	△2.6
外販量	外販計	652	△7.1	690	△5.8
	自家使用	347	△1.4	307	△11.5
	合計	999	△5.31	997	△0.2

(出典: 鉄鋼界報, No.1657, 1995)

6.4 鉄スクラップの将来動向と回生プロセス

(1) 鉄スクラップの将来動向 1990年度を例にとると、わが国の鋼材生産量約9,900万 t に対し、直接・間接輸出されたものを除いて6,600万 t の鋼材が新たに鉄鋼蓄積量に追加された。

一方、同年に廃棄された鋼材は2,600万 t であり、6,600万 t と2,600万 t の差約4,000万 t が1990年における鉄鋼蓄積量の純増分となる。この傾向が継続すれば20年後の鉄鋼蓄積量は18億 t に達すると推定される。

(2) 鉄スクラップの品質低下の原因と今後の品質予測 老廃くずとして廃棄された鋼材は種々雑多な鉄鋼製品の集積物であり、その成分把握や実態調査が困難で、市場では成分補償値もないのが現状である。

第4表は、特別な溶解実験を行い、鉄スクラップ中の「トランプエレメント」の分析調査結果である。鉄鋼石を原料とした銑鉄に比べ、Cu や Sn は10倍程度高くなっている。このように老廃くずの品質劣化の要因は、①電気部品材料の使用増加と小型化による鉄とトランプエレメントとの分離性の困難化、②合金元素添加鋼、表面処理鋼およびクラッド鋼などの増加、③これら製品のスクラップ化とリサイクル使用による成分の循環蓄積にある。

現在、電炉向上では、老廃くずのトランプエレメントを希釈するために純度の高い自家発生くず、加工くず、銑鉄等を配合して溶解している。しかし、純度の高い自

第4表 市中くず中に含まれるトランプ・エレメント含有量の例

内 訳		溶解後の成分値 (mass %)				
		Cu	Sn	Ni	Cr	Zn ^a
市中	老廃	0.230	0.052	0.068	0.123	0.500
	自動車くず	0.234	0.017	0.070	0.130	0.210
	カール缶くず	0.050	0.128	0.032	0.061	0.00
加工	(鋼鉄くず)	0.027	0.002	0.050	0.030	0.70
	スライム	0.021	0.01	0.050	0.030	0.70
(参考) 銑鉄		0.01	0.002	0.02	0.02	0.002

(註) Zn^a: 溶解前の参考値

(出典: 鉄鋼界報, No.1659, 1995)

第5表 使用原料による製品中の Cu, 含有量の相違 Sn (mass%)

		(mass %)	
使用原料	製品	Cu	Sn
市中くず	形特殊鋼	0.20~0.35	0.010~0.020
	一般鋼	0.08~0.13	0.004~0.011
溶銑, 自家発生	一般鋼	0.02~0.03	0.001~0.003

(出典: 鉄鋼界報, No.1659, 1995)

家発生くず、加工くず、銑鉄等を原料したものと比べて Cu と Sn の濃度は10倍程度高い (第5表)。

(3) 使用不能な鉄スクラップ蓄積量と回生

上記のような希釈法が今後継続するとした場合、製品許容成分値を超えない範囲で、最大限老廃くずの消化に努めると仮定したシミュレーションが行われた。その結果、2015年には1億5,000万~3億 t になるとの予測が得られている。

回生法として、通常の精錬処理では高い除去効果が期待できない Cu や Sn を除去する方策として、シュレダープラントによる固体分離処理、除去能力の高い液相 (溶液、スラグ、メタル) や気相 (ガス) による方法が種々検討されている。

7. 鉄鋼業のエネルギー消費

鉄鋼業のエネルギー消費の推移を第10図に示す。1980年から1993年の鉄鋼業のエネルギー消費量 (コークス部門やその他の部門を除く鉄鋼部門) の低下は粗鋼生産量の低下に即応したもので、1993年は6,492万 t (粗鋼生産量9,962万 t) であり、1994年は6,659万 t (粗鋼生産量10,014万 t) と増加している。

これを粗鋼トン当たりのエネルギー原単位でみると、1994年は453万 kcal/t で前年度の461万 kcal/t より8万 kcal/t も低下している。またエネルギー種別構成をみる

第10図 わが国の鉄鋼業のエネルギー消費の推移 (鉄鋼界報: No. 1657, 1995)

と、石炭系77.9%(前年度78.4%) 購入電力系15.0%(同14.7%) 石油系が7.1%(同6.9%) と石炭系の構成比がやや低下している。

一方、一貫製鉄所における代表的な排エネルギー回収設備である高炉炉頂圧発電 (TRT)、 コークス乾式消火設備等の1994年度の排エネルギー回収率は重油換算で275万 kl と12万 kl 増加している。

一方、一貫製鉄所の消費エネルギーの約70%を占める製鉄部門は、環境に与える影響がとくに大きいので、公害問題や省エネルギーに対応した技術開発に取り組んで

きており、鉄鋼業のこれまでの省エネルギー対策による成果は極めて大きなものがある。しかし既存の省エネ技術による省エネルギーの余地は少なくなっている。そうした中での一層の省エネ対策は、投資効果の面からも大きな無理を強いるものであり、製作的な支援が強く望まれている。

参 考 文 献

- 1) 伊丹敬之：「新しい産業ダイナミズム」, 季刊アステーション, No. 29, 1993, p. 88