

製鉄技術の開発概要と今後の課題

Development of Ironmaking Technology

内 藤 誠 章^{*(1)}
Masaaki NAITO

抄 録

日本の鉄鋼業界は、特に製鉄分野において、常に新しい技術あるいは革新的な技術を導入して発展してきた長い歴史がある。ここ10年間の技術動向としては、より安価な原燃料の使用技術、高炉/コークス炉の寿命延長技術、エネルギー削減技術、廃棄物のリサイクル技術、地球環境対応技術等の開発に主眼が置かれた。製鉄技術の開発概要と今後の課題について紹介した。

Abstract

The Japanese steel industry has a long history of introducing new and innovative technologies in the field of ironmaking. The new technologies introduced during the past ten years include technologies to use cheaper and lower-grade raw materials, measures to prolong the service life of blast furnaces and coke ovens, promotion of energy saving, use of wastes and solutions to environmental problems. This report outlines the condition of production and technological trends and technical development themes in ironmaking technologies.

1. はじめに

新日鉄技報の製鉄特集号としては、約20年振りということで、この20年間の製鉄に拘わる世界および日本の動向を簡単に紹介する。

1985年のプラザ合意による円高誘導に伴い、設備集約、傾斜生産体制等の合理化(新日本製鐵では釜石製鐵所2基、堺製鐵所1基、八幡製鐵所1基、広畑製鐵所1基の高炉を停止)が進められ、また1990年代はバブル経済崩壊、円高進行により鉄鋼需要が低迷し、地球温暖化、国内廃棄物等の環境問題が顕在化した。

2000年代に入ると、世界レベルで鉄鋼業の再編、設備集約が進み、鉄鉱石シッパーの統合(2000年には12社以上あったシッパー

がりオティント、リオドセ、BHP-Billitonの3社に再編され、世界の約70%のシェアを有するまでに巨大化)、鉄鋼メーカーの統合と巨大鉄鋼メーカーの誕生(2002年Arcelor, 2003年JFEスチール, 2004年Mittal)、鉄鋼メーカー間の提携(国内自動車、家電業界の海外進出に伴う特殊鋼材の現地調達化など)による新日本製鐵 - Arcelor, POSCO, 中国宝山など)等、世界の鉄鋼業界は大きく変革した。最近是中国景気の影響で、鉄鋼生産が上昇し(図1)、資源不足による資源の高騰、資源の劣質化が目下の懸念事項となっている。ここでは、これまで迎ってきた製鉄技術の変遷について概観することとし、個々の技術開発の詳細については、製鉄特集号の各論文を参照されたい。

2. 製鉄技術の変遷

2.1 製鉄技術の動向

図2に過去約50年に亘る高炉操業技術の変遷を示す。戦後、日本の鉄鋼業は欧米から多くの最新技術を積極的に導入し、より良い技術へと発展させると共に、良好な品質の原燃料を大量輸送できる臨海製鉄所の利点享受して、世界に冠たる鉄鋼王国を築いた。1960年代から1970年代にかけては、高炉の高圧化、大型化、高温送風化、原料の整粒強化を進め、かつ焼結鉱品質の改善、装入物分布制御の開始、1961年より始まった重油等の燃料吹込み技術により低還元材比操業を各社競いながら、1980年11月の新日本製鐵君津製鐵所第4高炉の406 kg/t⁽¹⁾、1981年11月のNKK(現JFE)福山製鐵所第3高炉の396 kg/t⁽²⁾の限界に迫る低還元材比操業を達成した。

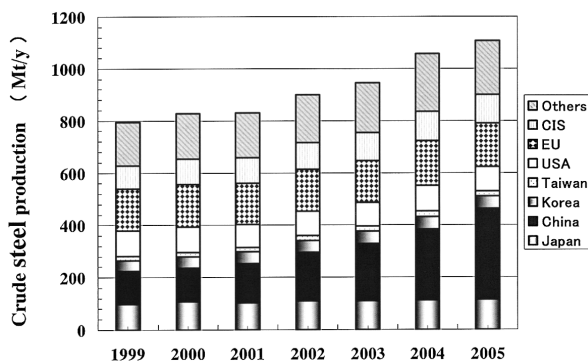


図1 世界各国での粗鋼生産推移
Crude steel production in the world

^{*(1)} 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 部長 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2130

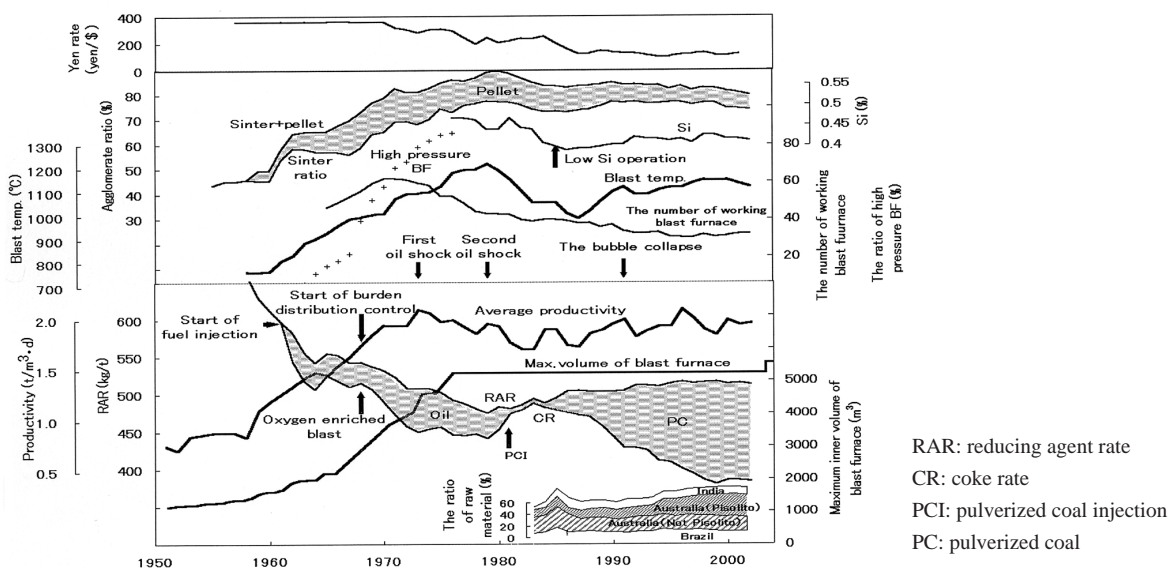


図2 高炉操作技術の変遷
Trend of BF operation

しかし、高炉羽口からの重油吹き込み技術も、1973年と79年の石油危機（オイルショック）以後、価格競争力を失い、1982年8月には稼働高炉42基すべてがオイルレス操業に移行した。この当時は製鉄所全体のエネルギーコスト削減のため、発生ガスの増加を伴う還元材比の高い高炉操業が指向された。また、コスト削減のための安価原料燃料使用技術の開発が主流となり、高炉操業では微粉炭吹き込み操業に移行した。1981年6月新日本製鉄大分製鉄所第1高炉³⁾での設備導入以来、急速に普及し、1998年には国内全高炉に設置され、平均吹き込み量は130 kg/tに達した。1998年、神戸製鋼所加古川製鉄所第1高炉で254 kg/t⁴⁾、JFE福山製鉄所第3高炉（以後簡略して表記する）で266 kg/t⁵⁾の多量吹き込みが実施された。

1990年代の鉄鋼業は図3に示す如く、厳しい環境下での生産活動を余儀なくされた。また円高レートの高騰やパブル崩壊に伴う不安定化があり、下記に示す合理化対策技術やコスト削減技術の開発が

精力的に進められた。

製鉄各工程の制御システム導入と自動化、微粉炭多量吹き込み技術（微粉炭の燃焼性改善、装入物分布制御、粉流体の挙動を含めた炉下部現象の解明、低SiO₂焼結法など焼結鉱およびコークスの造込みと高炉評価技術など）、プラスチック使用技術（高炉およびコークス炉での処理）、低廉原料使用技術（ピソライト多量使用技術、非微粘結炭多量使用技術など）、省力化（焼結機、CDQ（coke dry quenching）最適運転化、連続アンローダー、コークス炉自動化、高炉短期改修など）、長寿命化（高炉、コークス炉の延命対策技術）、環境対応技術（回転床式還元炉（RHF）によるダスト処理、焼結機排ガス循環等）、新プロセスの開発（代替鉄源製造技術、熔融還元製鉄法（DIOS）、次世代コークス炉（SCOPE21）等）、炉内可視化技術（Venusの開発、高炉トータルモデルの精度向上等）。

2000年代に入り、上記技術開発の実機化拡大を進めつつ、ここ数

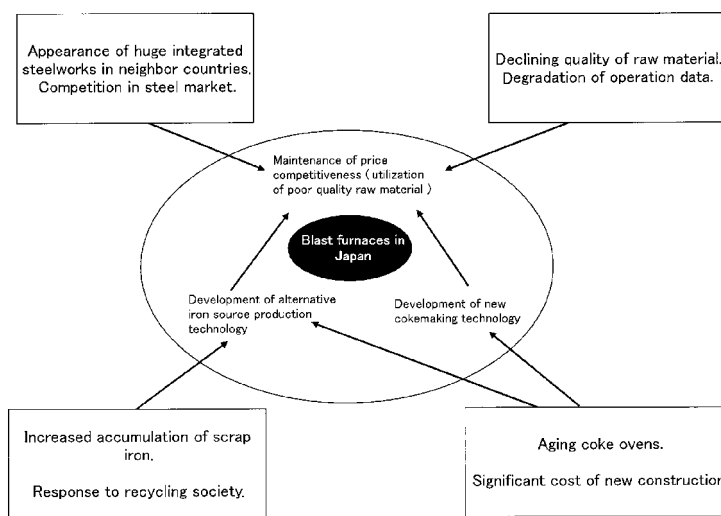


図3 1990年代の日本鉄鋼業を取り巻く環境
Environment surrounding the steel industry in Japan in the 1990s

年は中国の景気上昇に伴い、高炉の高生産技術の開発に目が向けられている。図4に国内高炉の稼働基数および平均炉内容積を示すが、ここ数年は高炉の大型化が進められている。例えば新日本製鐵の場合、2000年以降、名古屋3BF(3 424 4 300 m³)、君津3BF(4 063 4 822 m³)、室蘭2BF(2 296 2 902 m³)、君津4BF(5 151 5 555 m³)、大分2BF(5 245 5 775 m³:世界最大の大型高炉)のように高炉拡大改修を実施し、昨今の高炉増産要請に対処している。

国内鉄鋼各社の高炉の還元材比、出銹比の推移を図5に示す。新日本製鐵は高炉1基当たりの生産効率を高め、かつ低還元材比操業を指向してきた。

労働生産性については、ここ10年の間に約2倍となり、約1 600 t / 人 / 年と非常に改善された(図6)。これは高炉の集約や大型化、さらには省力化設備の導入、設備の自動化や合理化さらには操業改善効果の結果である。

現状の課題として、高炉を筆頭に各設備の高生産対応技術、資源の劣質化対応技術、また地球環境対応技術、エネルギー削減技術の開発に取り組み中である。以下、代表的な技術開発に関し概要を述べる。

2.2 低廉原燃料使用技術

原燃料の製鉄コストに占める割合は70%前後と高い。1990年初頭

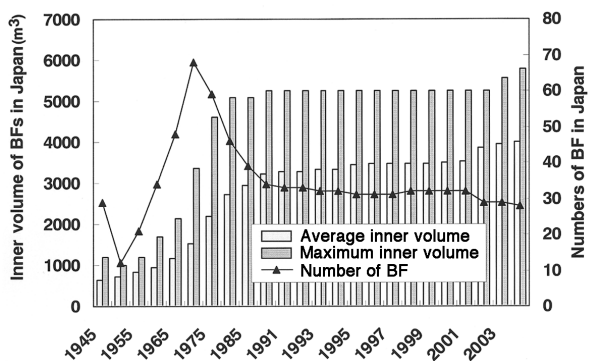


図4 高炉基数と高炉炉内容積の変遷
Numbers and average inner volume of blast furnaces in Japan

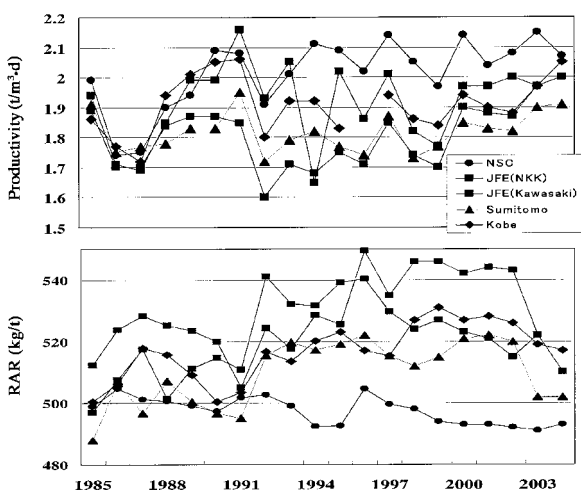


図5 日本の鉄鋼メーカーにおける高炉出銹比および還元材比の推移
Transition of average RAR and productivity in each company of Japan

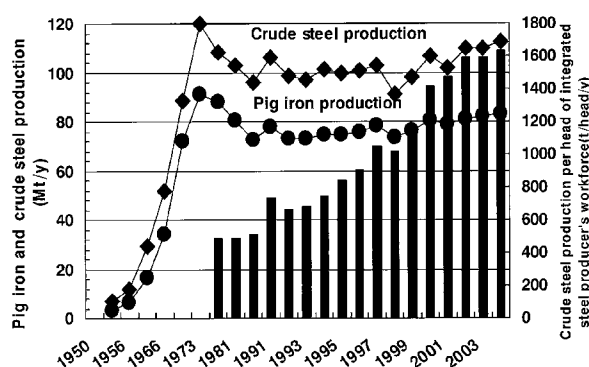


図6 銑鉄および粗鋼の生産量推移と労働生産性
Pig iron production and crude steel production per head of integrated steel producer's workforce

は値上がり率が高く、低品位・安価原料の利用推進が重要な開発課題として取り組まれた。

2.2.1 焼結鉱製造における低廉鉄鉱石使用技術の開発

鉄鉱石の購入については、輸送コストの削減からブラジルから豪州鉱へシフトし(表1, 2), かつ豪州鉱でも低廉鉄鉱石に属するゲーサイト鉱(ローブリバー鉱を主体に、1992年からヤンディー鉱入荷、2002年からマランバ鉱入荷)比率を増加させてきた(図7)。ゲーサイト鉱は結晶水を多く包含している。その中でもローブリバー鉱は脈石量及び脈石中のアルミナ分と結晶水が高いこと、マランバ鉱は微粉部分が多いことから、それぞれ焼結性が悪くなり、焼結強度が低下することが難点であった。ローブリバー鉱の多量使用技術として、アルミナの無害化技術を推進し、新日本製鐵では選択造粒によるアルミナ封じ込め(無害化技術⁹)を開発した。

一方、焼結機供給ドラム下フィーダの高機能化(ISF⁷)、風力分級⁸等)、スタンド焼結⁹などによる焼結機の生産能力向上技術、副原料

表1 輸入鉄鉱石の国別比率
Changes in the percentage of sources of Japan's iron-ore imports (%)

	1991	2001	2002	2003
Australia	47	56	60	64
South America	29	24	22	19
India	15	13	12	9
Others	9	7	6	8

表2 豪州鉄鉱石の品質
Amounts and grades of typical iron-ore reserves in Australia

	Low P-Brockman	Robe	Yandi	Marra Mamba	High P-Brockman
Reserve (Mt)	2070	3000	5200	6900	9000
T. Fe (%)	63.5	56.9	58.2	61.1	62.7
Al ₂ O ₃ (%)	2.1	2.8	1.4	2.3	2.0
-0.15 mm (%)	12.7	3.6	2.8	21.0	19.0
Combined (%) water	2.8	8.0	10.2	6.3	4.1

(2004 fy)

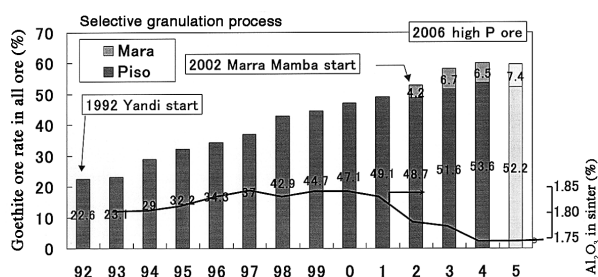


図7 安価鉱石使用比率の推移と開発技術
Transition of high goethite ores ratio

削減による低SiO₂焼結鉱の製造技術，造粒強化による疑似粒子構造の改質を進め，焼結鉱の冷間回転強度(TI)，落下強度(SI)を改善しつつ，ゲーサイト鉱の使用比率を増加させてきた。これらの技術開発を通して2004年時点における豪州鉱中のゲーサイト鉱の割合は約60%に達している。また来年以降，高Pブロックマン鉱石あるいはマラマンバ鉱石とのブレンド鉱の出荷が計画されており，造粒技術を核とした技術開発の取り組みを実施中である。

2.2.2 コークス製造における非微粘結炭使用技術の開発

還元材に関しても，羽口からの微粉炭吹き込みだけでなく，コークス製造工程でも粘結炭に比べ安価な非微粘結炭の使用比率を年々増大させてきた。コークス炉での配合比率アップにはコークス強度改善技術の導入が不可欠であり，CDQ導入¹⁰⁾に加え，新日本製鐵では湿炭の調湿技術(CMC)¹¹⁾，乾燥および微粉部分の塊成化技術(DAPS)¹²⁾を開発した。これら新技術の開発により，配合炭中の水分は1990年初めの8%台から1999年には5%以下となり，コークス強度維持条件下で，非微粘結炭使用比率は50%を超えた(図8)。

ここ数年は高炉の増産に伴う要請で，コークス強度(DI¹⁵⁰)向上を優先しており非微粘結炭の使用比率は50%弱で推移中である。また，高強度コークスの製造，非微粘結炭の増使用技術に関しては，高温in-situ NMRイメージング法¹³⁾を用いた石炭の新評価法の採用，膨張圧制御法など，石炭の配合技術に関する検討を継続している。

2.3 高炉での微粉炭吹き込みおよび高生産・低コークス比操業技術

2.3.1 高炉での微粉炭多量使用技術の開発

高炉での微粉炭吹き込み技術はコスト低減に加え，コークス炉の操

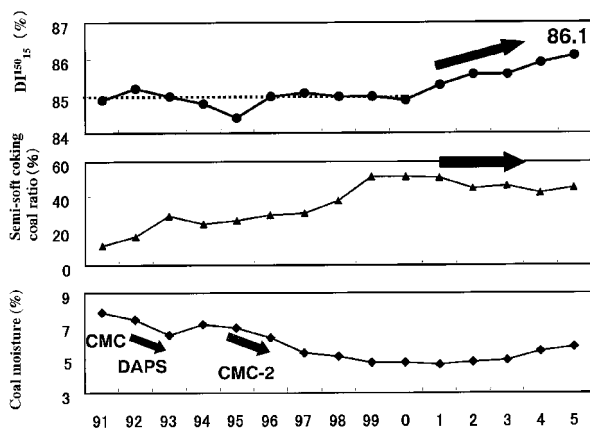


図8 DI¹⁵⁰ 非微粘結炭比率，石炭水分の推移
Transition of semi-soft coal ratio

業負荷を下げて炉寿命の延命(更には新設炉数のミニマム化)を図る事に繋がる。

微粉炭吹き込み技術は1981年新日本製鐵大分1BF³⁾で開始され，その後各社各高炉に普及した(図9)。当初は微粉炭の燃焼性に関する検討が主体であったが，その後，微粉炭吹き込み量の増大に伴い，高炉下部の通気性悪化，下部熱損失の増大，炉芯不活性化が顕在化した。

微粉炭比の増大過程では，Ore/Coke(α/C)の高い操業となることから，Ore/Coke増大に伴う中心流抑制，ガスの周辺流化，熱流比低下に伴う炉頂ガス温度上昇とそれに伴う通気悪化，コークス比減に伴う融着帯のコークススリット厚縮小と融着帯の通気抵抗上昇，微粉炭燃焼性悪化による未燃チャーの蓄積と炉芯表層へのコークス粉蓄積量の増大による炉芯不活性化，鉱石層の還元性と高温性状悪化に起因した高FeOスラグ滴下による炉熱低下，低SiO₂焼結鉱製造時には高Al₂O₃スラグの滴下によるスラグ流動性悪化などの対策が検討された。

これら課題を克服するため，高Ore/Coke時の最適装入物分布制御技術(神戸製鋼開発の中心コークス装入法¹⁴⁾や新日本製鐵開発の反発板設置¹⁵⁾など，中心流および周辺流の制御)，微粉炭の燃焼性制御技術(過剰酸素比と燃焼性，微粉炭吹き込み位置の最適化，最適ランス形状の検討)，高Ore/Coke時の高温還元性状改善技術(熱流比制御，コークス・鉱石ベースの低薄化，小塊コークス増使用技術，低スラグ化など鉱石層の高温還元性状の改善法の検討)¹⁶⁾，炉下部近傍の粉蓄積抑制技術(コークス粉化メカニズムの解明と粉化抑制技術，レースウェイ内および近傍の充填構造，粉流体の挙動，羽口風速の最適化を含めた送風条件等の検討)等が実施された。図10に還元材比とPCRとの関係，表3に微粉炭多量吹き込みを実施した高炉操業諸元を示す。

新日本製鐵では1994年，君津4BFにおいてPC 200 kg/t吹き込み試験を実施し，また1998年には室蘭2BFにおいて高Al₂O₃原料使用下で，出銑比2.14，PC 191.4 kg/tの操業を実施した。一方，PCR > 200 kg/tの操業は神戸製鋼所加古川1BF，JFE福山3BF，上海宝山1BF，POSCO 3BFで実施された。特に上海宝山1BF，POSCO 3BFでは，これまで限界と考えられた過剰酸素比0.6，Ore/Coke 6.0の操業を達成している(図10)。各高炉とも，出銑比，還元材比レベルは異なるが，高PCR操業実績では，炉下部でのコークス発生粉の抑制，鉱石

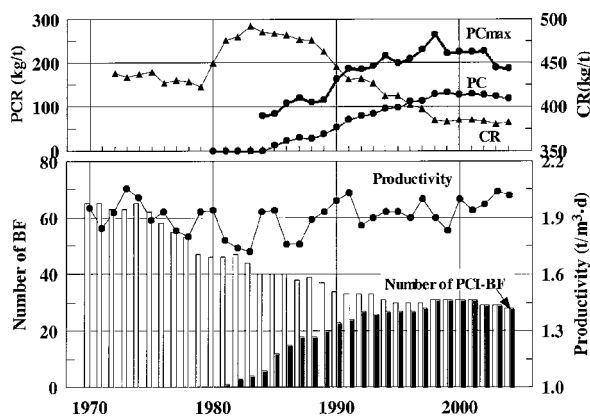


図9 DI¹⁵⁰ 非微粘結炭比率，石炭水分の推移
Transition of average pulverized coal rate (PCR), CR, productivity and number of BF in Japan

層の高温性状改善を目指し、原燃料品質に関しては、強度の高い(高DI)コークスおよび高温還元性状の良好な低SiO₂低Al₂O₃焼結鉱を使用している¹⁶⁾。

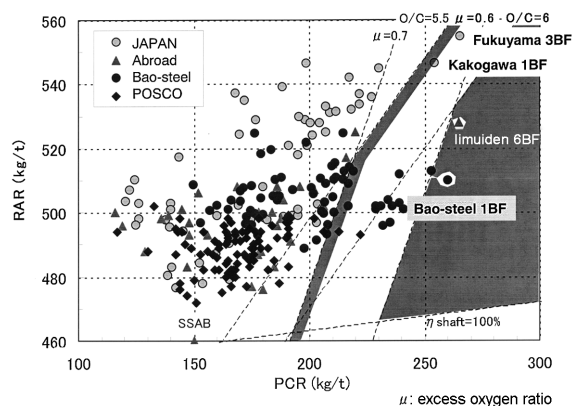


図10 還元材比 RAR と微粉炭比 PCR との関係
Relationship between RAR and PCR

新日本製鐵では大型化した高炉において、高出銑比あるいはコークス比低減を目指した微粉炭の多量吹込み技術が指向され、ここ数年は発熱量の高い低揮発性微粉炭の高炉への吹込み量増大や円周バランスの改善、燃焼性改善技術さらには高強度コークス使用を前提とした羽口先送風条件の見直し、高炉プロフィールの検討等が進められた。

2.3.2 高炉における低還元材比操業技術

高炉の還元材比低減に関する理論的検討は、Ristモデル等で検討され、シャフト効率の改善(焼結鉱の被還元性向上、装入物分布制御など)、ウスタイト還元平衡点(W点)の低温化(高反応性コークス使用技術¹⁷⁾)、羽口部入熱の上昇(送風温度上昇、送風湿度低減等)、銑鉄持ち出し熱量減(Si低減、出銑滓温度低下)、炉体熱損失の低減等が挙げられる。

図11、表4に過去に実施された低還元材比操業実績を示す。過去に実施された低還元材比操業は補助還元材の種類によって異なるが、上記いずれかの技術を具現化したもので、JFE福山3BF(内容積3223m³)での還元材比396kg/t(1981年Tar 42.1kg/t, CR 354kg/t)⁸⁾、

表3 高微粉炭比操業を実施した高炉の操業緒元
BF operation data with the high PCR in the world

		Kakogawa 1BF	Fukuyama 3BF	Muroran 2BF	Ijmuiden 7BF	Bao steel 1BF	POSCO 3BF
Charging device		Bell	Bell	PW ^{*1}	Bell	Bell	PW ^{*1}
		1998. 3	1998. 6	1998. 12	1999. 1	1999. 9	2002. 1
Inner volume	m ³	4550	3223	2296	-	4063	3795
Working volume	m ³	3750	2774	1963	3790	-	-
Productivity	t/m ³ ·d	1.88	1.84	2.18	-	2.20	2.28
RAR	kg/t	545.4	554.5	505.4	523	510.0	493.0
CR	kg/t	291	289	314	307	250.0	271.0
PCR	kg/t	254.4	265.5	191.4	216	260.6	222.3
Lance type		Double	Double / Oxygen	Single	Single		
Ore/Coke		-	5.43	5.46	5.17	(6.48)	(5.98)
Blast temp.		1233	1220	1262	1258	1251	1138
Blast moisture		g/Nm ³	17	32	16.8	8	14
O ₂ enrichment		%	4.1	4.8	2.8	8.3	3.2
Top gas temp.		210	251	-	146	239	2.8
Gas utilization CO (CO) ^{*2}		%	49.6	46.5	49.5	47.7	51.0
Sinter ratio (SR)		%	43.0	76.7	87.6	44.1	72.8
Pellet ratio (PR)		%	35.0	15.5	0	52.5	11.5
TI (SI)			73 (89.6)	66.3	74.7	TI>5mm: 81.1	75.6
Reduced degradation index (RDI)		%	23.9	47.5	38.8	-	35.1
Reduced index (RI)		%	66.9	71.5	66.4	-	69.5
Sinter SiO ₂		%	5.60	4.21	5.10	3.75	4.56
Sinter CaO/SiO ₂		-	2.11	2.07	1.77	2.65	1.83
Sinter Al ₂ O ₃		%	1.73	1.61	1.89	Al ₂ O ₃ +TiO ₂ : 1.63	1.49
Sinter FeO		%	7.40	5.22	5.83	14.64	7.47
Coke strength after reaction		%	-	-	62	62.2	-
Coke ash		%	11.3	11.9	11.5	9.8	11.3
Coke size		mm	49.7	49.75 (65)	44.2	50.8	52.1
DI ¹⁵⁰ ₁₅		%	84.8	(DI ³⁰ : 92.4)	85.7	87.7	88.1
Pig temp.			1496	1501	1514	-	1501
Pig Si		%	0.48	0.34	0.66	0.43	0.3
Pig S		%	0.021	0.027	0.015	0.029	0.021
Slag rate		kg/t	265	266	309	199	255
Slag Al ₂ O ₃		%	15.2	13.8	15.9	18.1	14.3
Slag CaO/SiO ₂		-	1.25	1.28	1.26	1.15	1.21

*1 PW: Paulw Wurts, *2 CO = CO₂ / (CO + CO₂)

新日本製鐵室蘭2BF (内容積2 296 m³)での還元材比440 kg/t(オールコークス操業CR 440 kg/t), PC操業に移行後は1994年新日本製鐵大分2BF (内容積5 245 m³)での還元材比455 kg/t(PCR 98 kg/t, CR 357 kg/t)⁹⁾, 2002年POSCO浦項3BF (内容積3 795 m³)での還元材比493 kg/t(PCR 222.3 kg/t, CR 271 kg/t)の操業が代表的なものである¹⁷⁾。

新日本製鐵大分2BFで実施した低還元材比操業では、小塊コークスの増使用、鉍石層厚の低薄化(高温還元性状改善), 送風湿分低減, 焼結鉍被還元性の改善が実施された¹⁹⁾。

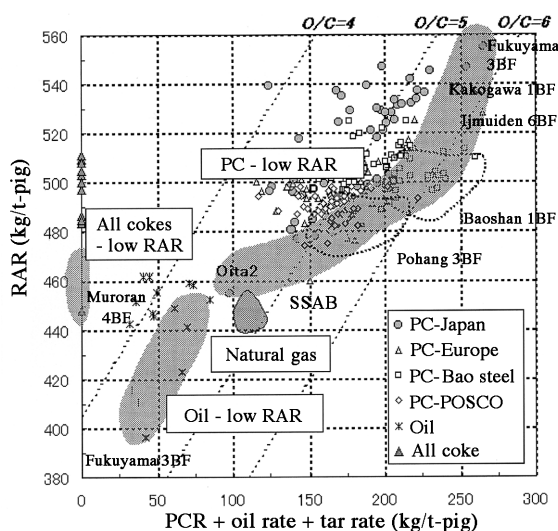


図11 過去に実施された低還元材比操業
Blast furnace operation results with low RAR

また製鉄研究では、焼結鉍高温性状の改善技術に加え、高炉の熱保存帯温度制御技術(還元平衡点制御)の開発、さらには部分還元鉍の製造使用技術の開発を継続中である。

熱保存帯温度制御技術については、他社に先駆け、高反応性コークスの製造使用技術の開発を進め、北海製鉄2BFにおいて神華炭を使用した高反応性コークスの製造使用試験を実施し、その効果を確認した²⁰⁾。また最近では非焼成含炭塊成鉍使用による熱保存帯温度低減技術の開発を実施している²¹⁾。

部分還元鉍の製造使用技術については、二段還元システムを提唱し、例えば焼結し難い原料を対象に、天然ガスの安価な海外で、高炉用の部分還元鉍を製造し、国内で使用することで、高炉の高生産・低還元材比操業を指向するもので、地球環境規模のCO₂低減にも貢献する技術である。

2.3.3 高炉シミュレーションモデルの開発²²⁻²⁴⁾

高炉炉内の解明およびプロセス解析技術として、高炉トータルモデルの開発が実施された。高炉はガス、固体、液体、粉体が共存し、多くの反応が進行する極めて複雑な向流移動層型反応容器であり、炉上部から装入された常温の鉍石は昇温加熱、還元反応を受け、軟化融着、最終的に溶融、滴下する複雑なプロセスを経る。数学モデルは、計算機上に高炉を構築し、一つのオフラインシミュレータとしての役割が求められている。1980年代、日本の製鉄各社は実用的な高炉2次元トータルモデルの開発を進め、計算機の能力向上と共に、3次元定常・非定常モデルを開発し、また、微粉炭多量吹込み技術の進展に伴い、高炉下部でのコークス粉、微粉炭未燃焼粉の挙動を解析するため、気固液の3相に粉も加えた4流体、さらには液相としてスラグ・メタルを考慮した5流体高炉モデルの開

表4 低還元材比操業実施高炉の操業諸元
Low RAR operation data in the BF

		Fukuyama 3BF 1981. 11	Murooran 4BF 1981. 7	Oita 2BF 1994. 3	Pohang 3BF 2002. 1
Inner volume	m ³	3223	2290	5245	3795
Productivity	t/m ³ ·d	2.37	1.84	2.19	2.28
RAR	kg/t	396	448	454.7	493
CR	kg/t	354	448	356.3	271
Tar, PCR	kg/t	Tar 42.1	0	PC 98.4	PC 222.3
Ore/Coke	-	* 4.5	3.59	4.52	* 5.98
Blast temp.		1353	1202	1268	1138
Blast moisture	g/Nm ³	5.6	23	20	6
O ₂ enrichment	%	0	0	0.5	
Top gas temp.		73	113	109	208
co	%	54.8	51.5	53.3	
SR + PR	%	96.6 + 0	93.9 + 4.6	78.5 + 7	83.1 + 4.9
RI (RDI)	%	68.9 (36.9)	(31.3)	68.1 (35.8)	(39)
TI		60.3	70.8	75.7	
Sinter SiO ₂ (FeO)	%	5.01 (4.64)	5.51 (5.55)	5.03 (5.53)	(6.47)
Sinter Al ₂ O ₃	%	1.8	2.13	1.61	1.5
Coke ash	%	9	10.6	10.7	11.4
Coke size	mm	52.3		47	52.1
DI ¹⁵⁰ ₁₅	%	DI ³⁰ : 92.9	DI ³⁰ : 95.4	85.7	88.1
Pig temp.		1481	1518	1522	1516
Slag rate	kg/t	274	315	287	277
Slag CaO/SiO ₂ (Al ₂ O ₃)	-	1.28 (14)	1.22 (14.9)	1.23 (13.5)	1.25 (14.3)
		Tar injection	All coke	PC injection	

* Estimated

発が行われ、数式モデルの基本的な枠組みの開発はほぼ終了した(図12)。

新日本製鐵の場合、1980年前半に杉山ら²⁵⁾によって開発された2次元定常の高炉トータルモデル(BRIGHTモデル)をベースにして、サブモデルの解析精度向上に取り組んだ。具体的には、松崎ら²⁶⁾による装入物分布制御モデルの開発、内藤ら²⁷⁾による焼結鉱還元モデル、還元粉化モデル、高温性状評価と融着帯形状決定モデルの開発によりサブモデルの更新を行い、操業予測モデル(N-BRIGHTモデル)としての機能を追加し高精度化を達成した。また1990年代後半からのパーソナルコンピュータの急激な進歩により、現在ではパーソナルコンピュータを使用して解析できる環境を整え、解析結果についてはグラフィック表示機能を設けた(図13)。その他の高炉内現象を取り扱ったモデルとしては、微粉炭燃焼モデルや炉下部非定常モデル、炉底湯流れモデル、最近では離散要素モデルを用いて2次元あるいは3次元装入物分布モデルの開発を進めている(図14)。

また、計算機の改善、高速化に伴い、高炉計装設備については汎用LANが採用され、大量のデータ処理が可能となった。現在、新日本製鐵君津3, 4BFにおいてN-BRIGHTモデルのオンライン解析を実施中であり、さらに炉内可視化ツールとしてセンサー情報に基づいた操業判定システム(Venus)を構築しており、高炉システムとして操業管理に活用する段階にある。

2.4 高炉、コークスの寿命延長技術の開発

2.4.1 高炉の炉寿命延長

高炉改修に伴う多大な設備投資の抑制、改修中の生産量の変動を防止するため、炉寿命延長に対する多くの技術開発が実施され、内容積当りの累積出鉄量は11 000 tを超えている。

高炉の長寿命化には(1)高炉建設時の設計、(2)稼動中の操業管理技術、(3)寿命後半の延命、補修技術のいずれもを欠くことはできない。図15に大型高炉の長寿命化の実績および吹卸し要因を示す。

計画吹卸しを除けば、高炉の寿命を律速する部位はシャフト部と

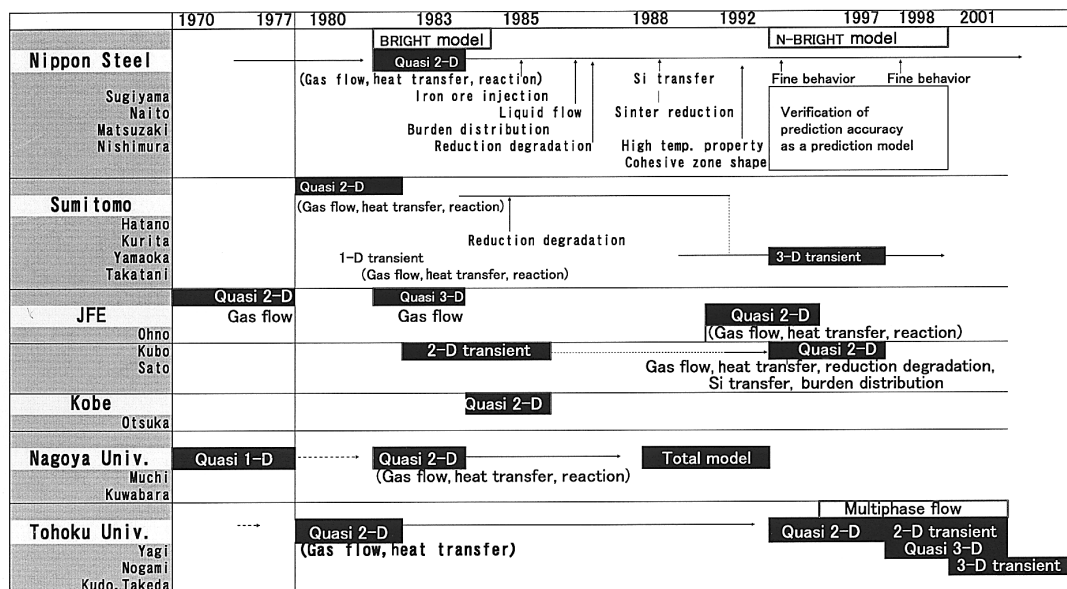


図12 高炉トータルモデルの開発経緯
Development of mathematical model of blast furnace

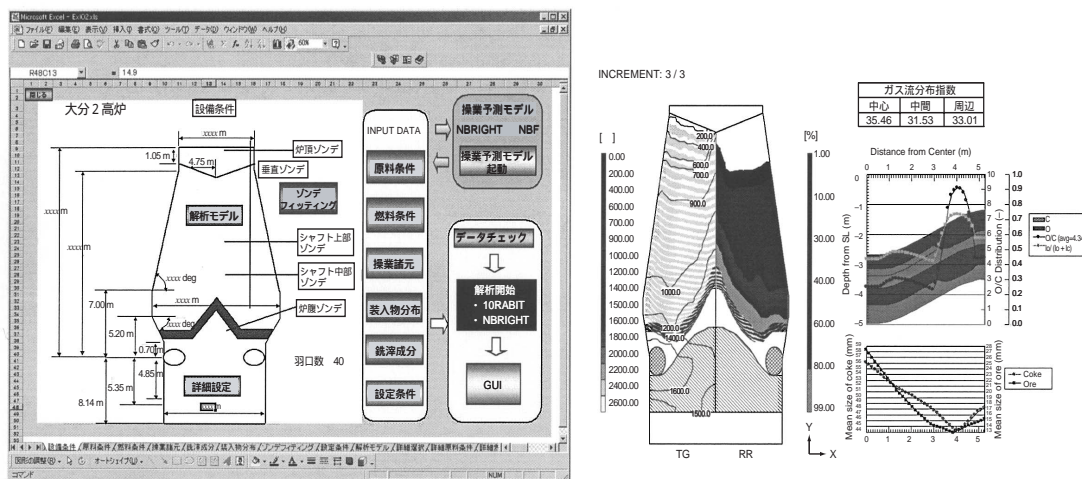


図13 パーソナルコンピュータ版のグラフィック表示例
Example of graphic display in personal computer

State of the art of existing models

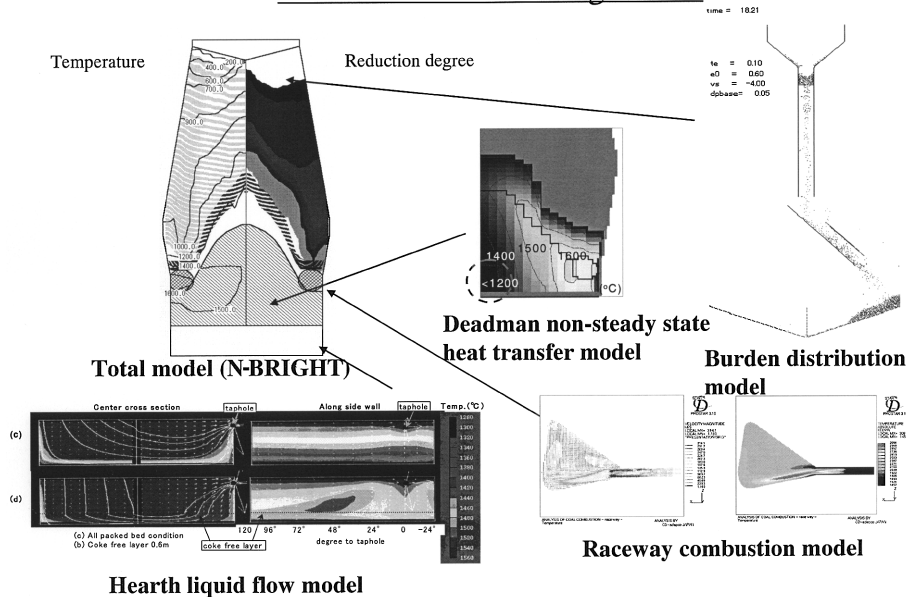


図14 高炉解析のための種々の数学モデル
Simulation model for analysis of blast furnace

	1975 - 1985	1986 - 2000	2001-
Throat, shaft, belly, bosh	43	22	-
Bottom	11	3	-
Hearth side wall	29	47	4 (+5)
Other equipment	0	6	-
Scheduled stop	36	22	3

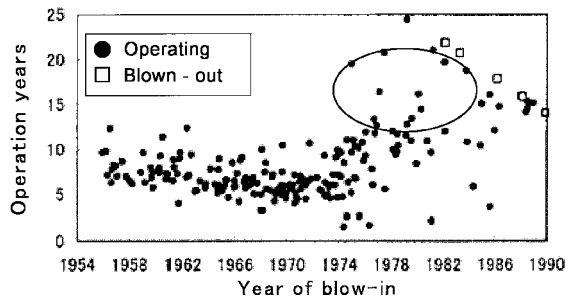


図15 高炉の吹出し要因と改修高炉の基数および大型高炉の長寿命化実績
Causes of blown-out blast furnace and furnace longevity transition of domestic blast furnaces

炉底部が大部分である。1986年以降の10年間はそれ以前の場合に比べて朝顔、炉腹部の損傷による吹き止めが減り、炉床壁の浸食によるものが増えている²⁸⁾。

高炉の寿命を律速する炉口、シャフト、炉底の各部位に対する長寿命化設備技術については、シャフト上部では鉍石受け金物の前面を取り替え方式としたステープタイプの水冷板が採用され、シャフト下部から炉腹部にかけては冷却盤およびステープ共に冷却能向上と耐火物改善により耐用性の向上が図られた。特に高熱負荷部においては第4世代ステープや銅製ステープが採用された。

一方、1990年以降は炉床壁の耐蝕性向上が最重要課題であると認識され、カーボンレンガが材質の改善と冷却強化が図られた。カーボンレンガについては熱伝導率の向上、気孔径の微細化による溶銹浸

透防止を、冷却については冷凍機による水温低下や銅製ステープの炉底側壁への採用が図られ、高炉の長寿命化に貢献している。

2.4.2 コークスの炉寿命延長

コークス炉の多くは1970年代の高度経済成長期に建設されたため、平均炉齢は33年であり、40年を超すコークス炉も存在する(図16)。図17は炉の寿命を40年とした場合のコークス製造能力であり、将来のコークス不足は緊急の課題とされた。このように老齢化が進む中で、コークス炉建設には莫大な建設費用を要することから、コークス炉の寿命延長のための技術開発が検討され、寿命50年超に向けた努力が続けられている。

新日本製鐵では、コークス炉の延命策として、コークス炉炭化室内のカーボン付着挙動の解明とその対策、さらにはコークス炉炭化室炉壁診断・補修装置の開発、リフレッシュ技術の開発等が進められてきた。

2.5 資源リサイクルおよび省エネルギー技術

資源を有効に利用する循環型社会の構築に向け、地球温暖化防止のための省エネルギーの推進、循環型社会の構築(鉄のリサイクル、ダスト、スラグ、鉄屑など副産物のほぼ100%資源化、さら

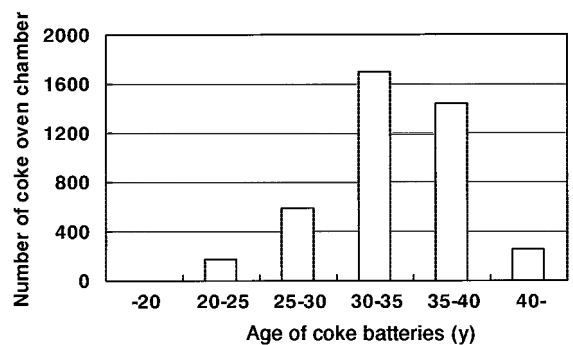


図16 現在稼動中コークス炉の炉齢
Age of coke batteries in Japan

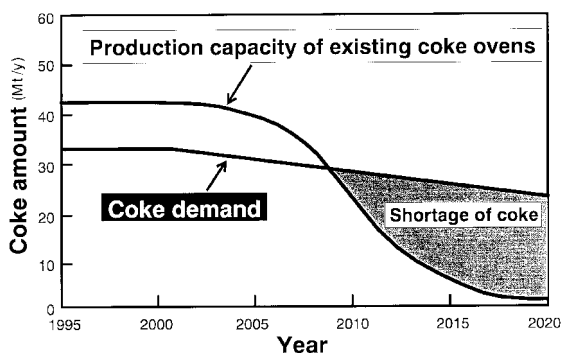


図17 コークス製造能力
Production capacity of existing coke ovens

には廃プラスチック、廃タイヤ、スクラップ、廃家電処理等の社外廃棄物リサイクルの推進)、エコプロダクツの積極的な開発(長寿命、高機能、有害物質フリー鋼材の開発やガス化溶融炉等のエコプラントの開発)等を実施し、ゼロエミッション型製鉄所の実現に向けた取り組みを推進している。

2.5.1 製鉄プロセスを活用した資源リサイクル技術

新日本製鐵では、2004年度で鉄の製造工程からスクラップを除く1760万トンの副産物が発生した。このうちスラグが約70%を占め、その他にダスト、スラッジなどがある。高炉スラグはセメント原料用、路盤材および砂に代わる骨材を主体に100%再利用されている。

所内発生ダスト、スラッジについては、事業所内での原料や亜鉛精錬用原料としての使用を促進するため、2000年に高炉メーカーとして世界に先駆けて回転床式還元炉(RHF設備)を君津²⁹⁾・広畑製鐵所に導入した。鉄分や炭素分を持つダストおよびスラッジを、ペレットやブリケットに成形し、RHF内で加熱還元することにより、脱亜鉛を促進しつつ還元し、製造された金属鉄は高炉や電気炉で再利用している。

社外廃棄物の資源化については、既存の製鉄プロセスを利用した廃プラスチックのリサイクルを推進している。JFE、神戸製鐵所では廃プラスチックの高炉利用を進めているが、新日本製鐵ではコークス炉化学原料化技術³⁰⁾による廃プラスチック再商品化を進め、

2000年に名古屋・君津製鐵所、2002年に八幡・室蘭製鐵所、2004年に大分製鐵所で各設備を稼働開始させ、現在年間約20数万トンの処理能力を有している(図18)。

その他には、不燃物も含めた多様なごみ(可燃ごみ、不燃ごみ、粗大ごみ、資源ごみ、汚泥、消却残渣、埋立ごみ)の処理が可能で、国内で20数基に及ぶ稼働実績を有する直接溶融資源化システムや、この溶融炉を使用時のシュレッダーダスト処理³¹⁾、さらには市中屑鉄やダストの併用処理技術として多機能溶融還元炉の開発³²⁾などが進められている。研究開発段階のプロセスも含めると、製鉄全体系では図19に示すプロセス開発が実施されている。

2.5.2 エネルギー削減技術への挑戦

日本の鉄鋼業におけるエネルギー消費の1990年からの傾向を図20に示す。日本鉄鋼業界では粗鋼1億トンの前提で、2010年に1990年比11.5%削減(うち1.5%は廃プラスチック等のリサイクル)をターゲットとして、エネルギー削減技術に取り組み中である。2004年1月22日に新日本製鐵三村社長は経済産業大臣の諮問機関である総合資源エネルギー調査会で“2030年のエネルギービジョン”と題する講演を行い、省エネルギーへの取り組み技術を概説した(図21)。このロードマップに従い、製鉄部門としては既存省エネルギー技術の実機化トランスファーや廃プラスチック等のリサイクルの処理量拡大(鉄鋼業で年間100万トン処理、新日本製鐵では30万トン処理が目標)、さらには高炉の還元材比低減技術の推進等を実施中である。

1999年から2004年にかけて、当時北海道大学・石井邦宜教授を主査とする国家プロジェクト“エネルギー半減・環境負荷ミニマム”を目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究が産学官の共同プロジェクトとして実施された。新日本製鐵は、還元性と溶融性に優れた高強度鉱石接合体の組成と構造設計のグループに属し、脈石成分と気孔構造の最適化に関する研究を実施する中で、高速還元が可能で、かつ低温滴下が可能な塊成鉱の提示と適正使用割合の提示、種々の含C非焼成塊成鉱を製造試作し、高炉の熱保存帯温度を従来に比べ200程度低下可能(1000→820)であり(図22)³¹⁾、本技術の推進がCO₂低減技術として有望であることを提示した。国内鉄鋼業の課題として、今後も継続検討が必要である。

一方、一昨年まで国家プロジェクトとして推進してきた次世代コークス炉SCOPE21(図23)³³⁾は、約10年に亘る研究開発の結果、2002年度、新日本製鐵名古屋製鐵所における50 t/d規模のパイロット

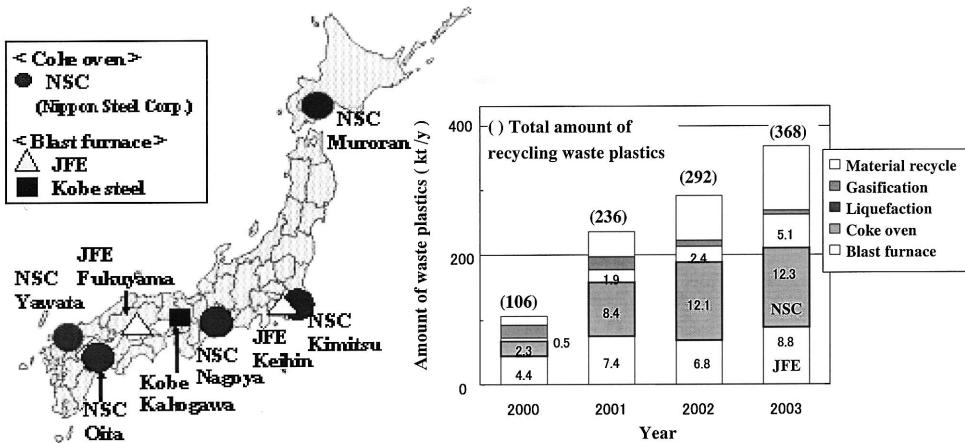


図18 廃プラスチックを処理している製鉄所と容器包装プラスチックの受託量
Ironworks where waste plastics are processed and amount of recycling waste plastics in Japan

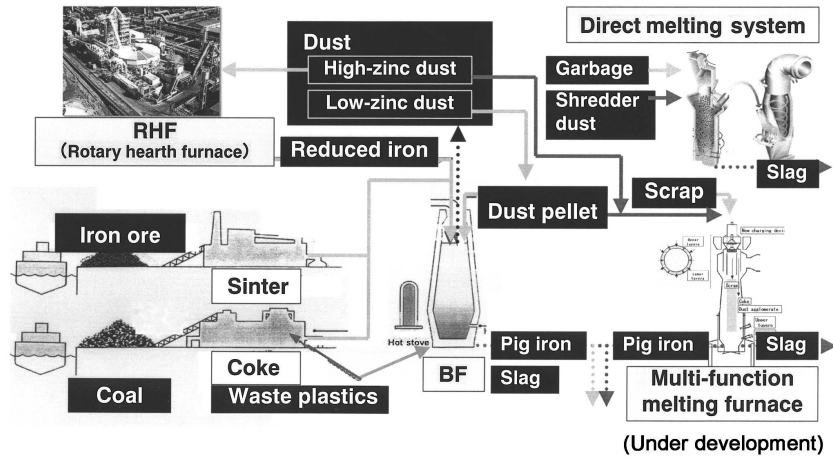


図19 製鉄プロセスの処理分野
Ironmaking process including environmental recycle system

(%)

	PCI	TRT*	Hot stove waste heat recovery	Waste heat recovery in sinter	CDQ	CMC or DAPS
1991 cy	78	91	98	56	57	28
2001 cy	100	100	98	72	76	61

*TRT: Top pressure recovery turbine

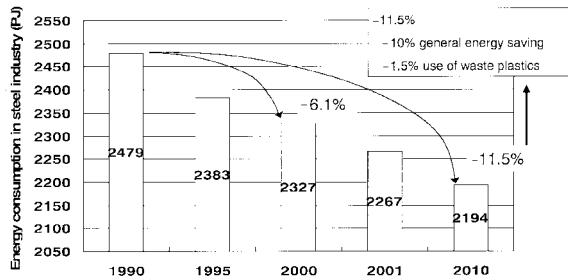


図20 日本鉄鋼業の省エネルギーへの取り組み状況とターゲット
Trends of energy consumption in the Japanese steel industry since 1990 and the target for 2010

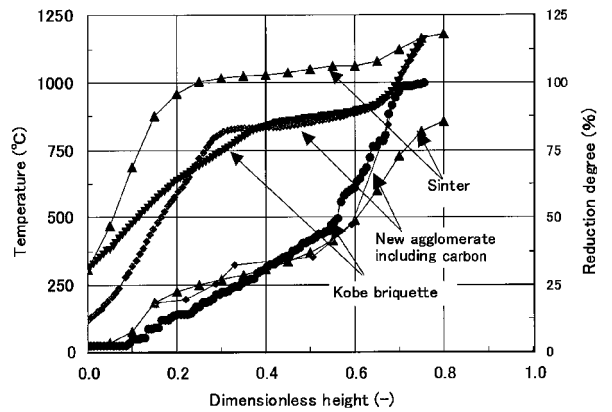


図22 含炭素非焼成塊成鉱使用時の炉内還元挙動
Reduction behavior of carbon-containing agglomerates in a simulation of an actual furnace operation using BIS

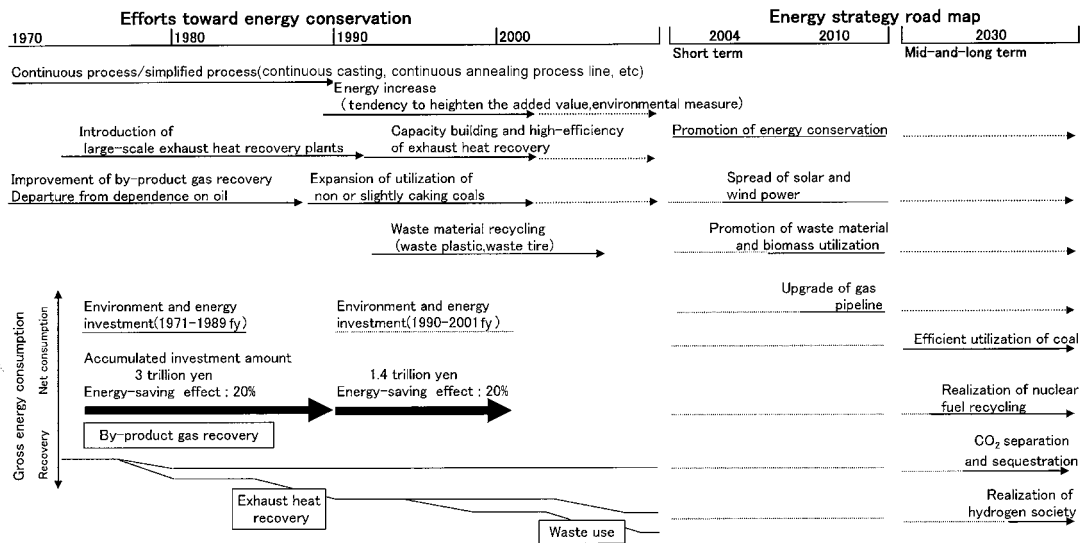


図21 省エネルギーへの取り組み(エネルギー戦略ロードマップ)
Efforts toward energy conservation (energy strategy road map)

トプラント試験により、2.4倍の生産性向上、非微粘結炭の増使用(20% 50%)、環境負荷軽減(NO_x30%低減<100ppm)、エネルギー21%削減の可能性を確認した。この結果を受けて、大分製鐵所での実機化が決定され、エネルギー削減プロセスとして期待されている。

2.6 次世代の製鉄技術への展開

まだ実機化されていない研究開発中のプロセスも含めて、考えられる技術を総合して次世代高炉イメージを描くと図24に示すプロセス概念が提示できる³⁴⁾。

コークスについては、熱源と還元ガス製造を主体とするが、通気通液媒体としての役割(高強度化)と熱保存帯温度を制御して炉内反応効率を改善する役割(高反応性化)を分担させる。鉱石原料については高生産性かつ低還元材比を指向するため、高強度・高气孔型の高被還元性焼結鉱や非焼成含炭塊成鉱、さらには部分還元鉄³⁵⁾、スクラップ類の高炉使用が考えられる。また、CO₂削減技術となる廃プラスチックの製鉄利用や欧州で研究が進められている脱CO₂炉頂ガスのシャフト部および羽口吹込み、さらには過去精力的に技術開発を実施した羽口からの粉鉱石吹込み技術³⁶⁾が含まれる。

参考として、最近の平均的なコークス(Ash 11.5%)および鉱石類を使用し、現状の設備条件下(送風温度上限1250)で上記プロセスの限界となる操業諸元を試算した(表5)³⁴⁾。

ベース条件は過去最も低還元材比操業を実施したJFE福山3BFの操業条件とし、現状の原燃料条件で試算した操業諸元(還元材比428

kg/t)から、廃プラスチック併用吹込み、羽口からの粉鉱石吹込み(ここでは予備還元率70%の粉鉱石吹込み)、還元鉄(100 kg/t)の炉頂装入、高反応性コークス使用による還元平衡点制御(熱保存帯温度100 低下)、脱CO₂炉頂ガスのシャフト部および羽口吹込み時の操業諸元を試算した。表中のC比は製鉄工程のもので、焼結鉱製造工程、コークス製造工程での歩留り等を考慮して、Total carbon rate = (CR/0.65 + PC + 73.6・SR/1000)(C)_{PC} + PC₂・(C)_{4C2}で評価した。ただし、酸素製造や還元鉄製造(海外での天然ガス還元を前提)に必要なC比は除外した。微粉炭吹込み下での現状操業におけるC比が580~630 kg/t程度と考えると、現行の1割以上のC比削減を目指すにはCase 3以降の操業技術を確立する必要がある。

3. 今後10年の歩みに向けて

製鉄を取り巻く資源や環境の問題は今後も一層厳しくなる。また、近隣諸国との競争も強まると予想される。加えて、今後は次のような課題も顕在化すると予想される。即ち、

- ・既存の改善技術では溶鉄コスト削減に限界が来る。
- ・既存設備の老朽化が進む。
- ・世界的なコークス供給不足が顕在化しており、海外依存も困難になる。
- ・地球温暖化対策やリサイクル社会構築に向けて一層の環境規制が強まる。
- ・さらなる合理化が進む。

これらの課題に対処するには新たな視点による技術開発の展開が求められる。例えば、

- 山元での事前処理を含む原燃料の改質による高炉での還元溶融負荷の大幅軽減。
- 設備集約と高効率化。
- 製鉄部門から発生する副産物の高付加価値化。
- 石炭改質プロセスや静脈系プロセスとジョイントした鉄製造法によるリサイクル社会への貢献。
- 人材の育成と確保、自動化の推進。
- 製鉄部門がこれらの課題に対処して行くには、山元や多分野との協力、大学との連携を緊密にし、時代にマッチした新技術を構築して行くことが求められる。

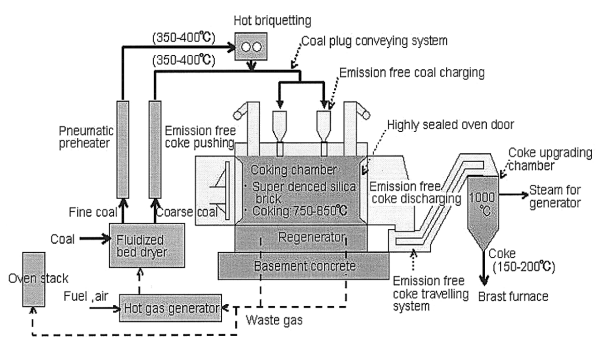


図23 次世代コークス炉SCOPE21プロセスの概要
Schematic diagram of the SCOPE21 process flow

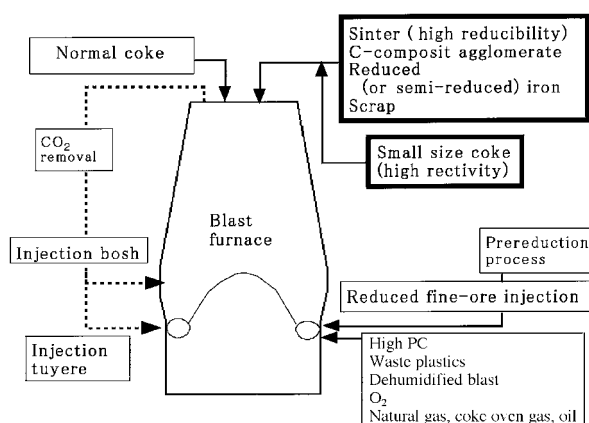


図24 次世代高炉のプロセスイメージ
Process image of next generation BF operation with low RAR

参考文献

- 1) 加瀬正司, 須賀田正泰, 奥田康介, 梅津善徳, 天野繁, 小野創, 水内千明: 鉄と鋼, 67, S82(1981)
- 2) 梶川脩二, 山本亮二, 中島龍一, 岸本純幸, 福島勤: 鉄と鋼, 68, 2361(1982)
- 3) 和栗真次郎: ふえらむ, 8(6), 371(2003)
- 4) 野沢健太郎, 牧剛司, 柴田耕一朗, 後藤哲也, 堀隆一, 松井良行: CAMP-ISIJ, 11, 833(1998)
- 5) 丸山太一, 牧章, 下村昭夫, 大河内巖, 森侯寿, 佐藤通貴, 村井亮太: CAMP-ISIJ, 11, 834(1998)
- 6) 芳我徹三, 大塩昭義, 中村圭一, 小園琢磨, 上川清太: 鉄と鋼, 83, 103(1997)
- 7) 稲角忠弘, 藤本政美, 笠間俊次, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, 77, 63-70(1991)
- 8) 柴田大介, 芳我徹三, 大塩昭義, 笠間俊次, 渡辺一臣: CAMP-ISIJ, 14, 193(2001)
- 9) Higuchi, K., Kawaguchi, T., Kobayashi, M., Hosotani, Y., Nakamura, K., Iwamoto, K., Fujimoto, M.: ISIJ International, 40, 1188(2000)
- 10) Uematsu, H., Ishida, Y., Kushioka, K.: Ironmaking Conference Proceedings, 1989, p.109
- 11) 和栗真次郎, 大西輝明, 中川浩一郎, 大野護允, 小川秀治, 串岡清, 金野好光: 製鉄研究, (322) 81(1986)

表5 炭素比低減技術とその効果の試算
Technologies for reducing the carbon ratio and their effects

		Base	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
RAR	kg/t	428.15	453	443.05	461.35	455.05	449.05	430.05	409.05	377.05
CR	kg/t	386.05	453	345.05	239.1	255.1	249.1	230.1	209.1	227.1
PCR	kg/t	0	0	98	222.3	150	150	150	150	150
Tar	kg/t	42.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Plastic	kg/t	0	0	0	0	50	50	50	50	0
Reduced-ore injection (R: Pre-reduction degree = 0.7)	kg/t	0	0	0	0	0	100	100	100	0
Miscellaneous	Nm ³ /t	0	0	0	0	0	0	100	100	0
Shaft gas (CO: 72, CO ₂ : 1.5, H ₂ : 11)	Nm ³ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	348
Tuyere gas (CO: 72, CO ₂ : 1.5, H ₂ : 11)	%	-	-	-	-	-	-	-	-	216
SR	-	80	80	80	80	80	80	68	68	80
Ore/Coke		4.13	3.53	4.63	6.71	6.28	5.82	5.74	6.32	7.08
Blast temp.	g/Nm ³	1250	1100	1250	1250	1250	1250	1250	1250	-
Blast moisture	Nm ³ /t	5.6	15	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	-
Cold O ₂	%	-	-	-	-	-	-	-	-	225
O ₂ enrichment		0.00	0.00	0.00	3.67	3.98	7.43	25.34	21.15	79.1
Top gas temp.	%	87	72	130	197	196	198	198	197	166
H ₂	%	50	50	50	50	50	50	50	50	50
co	%	54.3	53.4	53.9	52.0	51.6	49.5	48.2	53.0	43.1
Coke ash		11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Drop of pig temp.	kg/t	0.0	-3.2	-6.1	-17.0	-17.7	-25.4	-28.2	-40.4	-32.6
Slag	-	282	295	285	278	275	252	189	185	268
Heat flux	kg/t	0.836	0.839	0.801	0.758	0.763	0.755	0.932	0.912	0.779
C sol.	%	101.4	102.0	98.6	83.7	79.8	63.9	32.0	25.7	19.1
Shaft efficiency (shaft)		97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	100
Temp. of thermal reserve zone		950	950	950	950	950	950	950	850	950
Flame temp.	kg/t	2285.7	2242.4	2216	2106.3	2093.5	2049.9	2265.8	2141.9	2252.4
Total coal rate	kg/t	725.1	792.7	724.3	685.3	637.5	617.4 +	565.2 +	532.8 +	594.3 +
Total carbon		572.8	626.2	572.2	541.4	503.7	487.8 +	446.5 +	420.9 +	469.5 +
		Tar injection	(Muranan) All coke	(Oita) PC injection	(Pohang) PC injection	Plastic injection	Plastic injection + Ore injection	Plastic, ore injection + MFe	Plastic, ore injection, MFe + High-RI coke	Top gas recycling

+ : carbon rate of producing pre-reduction ore

+ : carbon rate of manufacturing O₂

- 12) Nakashima, Y., Mochizuki, S., Ito, S., Nakagawa, K., Nishimoto, K., Kobayashi, K.: 2nd International Cokemaking Congress. London, UK, 1992, p.518
- 13) Saito, K., Komaki, I., Hasegawa, K., Tsuno, H.: Proceedings of 13th-International Symposium on Magnetic Resonance. Berlin. 2, 1998, Berlin Institute Technology, p.581
- 14) Uenaka, T., Miyatani, H., Hori, R., Noma, F., Shimizu, M., Kimura, Y., Inaba, S.: Iron & Steel Maker. (November), 34(1988)
- 15) Matsui, A., Kakiuchi, K., Akagi, K., Matsuzaki, S., Ootsuka, H.: ICSTI/Ironmaking Conference Proceedings. 1998, p.334
- 16) 内藤誠章:第179回 西山記念技術講座 2003 p.87-121
- 17) 内藤誠章 岡本晃 山口一良 山口剛史 井上義弘:鉄と鋼 87 357(2001)
- 18) 梶川脩二 山本亮二 中島龍一 岸田純幸 福島勤:鉄と鋼 68 2361(1982)
- 19) 樋口宗之 松岡芳幸 井上義弘 中山岳志 森本忍 高尾正義 松崎眞六 内藤誠章, 出野正:CAMP-ISIJ. 7 ,1012(1994)
- 20) Nomura, S., Ayukawa, H., Kitaguchi, H., Tahara, T., Matsuzaki, S., Naito, M., Koizumi, S., Ogata, Y., Nakayama, T., Abe, T.: ISIJ International. 45, 316-324(2005)
- 21) 内藤誠章 中野正則:エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究 完了報告書 2004
- 22) 八木順一郎:鉄と鋼 69 ,1242(1983) ,81 258(1995)
- 23) 内藤誠章 村山武昭 碓井建夫:鉄と鋼 80 581(1994)
- 24) 埜上洋:鉄と鋼 89 211(2003)
- 25) 杉山喬 須賀田正泰:製鉄研究 (325) 34(1987)
- 26) 奥野嘉雄 入田俊幸 松崎眞六:鉄と鋼 72 783(1986)
- 27) Naito, M., Yamaguchi, K., Sugiyama, T., Inoue, Y.: AIME. 10th PTD Conference Proceedings. 1992, p.55
- 28) 篠竹昭彦 中村倫 大塚一 佐々木望 栗田泰司:CAMP-ISIJ. 14 ,750(2001)
- 29) 織田博史ら:新日鉄技報 (376) 28(2002)
- 30) Kato, K. et al.: ISIJ International. 42, (Supplement), S10(2002)
- 31) Shibaie, H., Osada, M., Takamiya, K., Naito, M.: ISIJ International. 40, 252(2000)
- 32) 内藤誠章 荒木恭一 深澤康裕 小原直 小原康司:学振54委 - 2224 2001
- 33) Nakai, H., Sasaki, M., Matsuura, M., Nishioka, K., Sugiyama, I., Suyama, S.: 3rd Int. Conference on Science and Technology of Ironmaking. 2003, p.550
- 34) 内藤誠章ほか:高炉の低還元材比操業 学振54委員会資料 2004
- 35) 国友和也 高本泰 内藤誠章:学振54委員会資料 2251 2002
- 36) 山口一良 上野浩光 内藤誠章 田村健二:鉄と鋼 77 ,1609(1991)