

技術報告

シャフト炉式還元炉とキューポラ式溶解炉の
組合せによる製鉄法の開発宮崎富夫*・山岡秀行*²・亀井康夫*²・中村文夫*³Development of New Ironmaking Process Comprising Shaft-type Reduction
Furnace and Cupola-type Melting Furnace

Tomio MIYAZAKI, Hideyuki YAMAOKA, Yasuo KAMEI and Fumio NAKAMURA

Synopsis :

The new ironmaking process, named SC process, has been developed, which is characterized by the division of two functions, reduction and smelting. This process consists of a shaft type reduction furnace and a coke bed type melting furnace using a large amount of pulverized coal and oxygen gas blowing.

Through operation tests with a pilot plant of 8 t per day in production capacity ; SC process has been technically verified to be consistent as an ironmaking process.

Based on the operational results of the pilot plant, a commercial plant of 2 400 t per day with following features was designed.

- 1) High productivity, 2.5 times as much as that of blast furnace.
- 2) High heat efficiency, competitive to blast furnace.
- 3) Wide use of non-coking coal, as much as 70% of total coal consumption.

Key words : ironmaking ; smelting reduction ; two stage process ; shaft type furnace ; pulverized coal ; oxygen blowing.

1. 緒 言

高炉法は高熱効率、高生産性、高還元能力、高脱硫能力および長寿命などの特性を具備し、現在における製鉄法の主流となつている。しかるに、このような特性を達成するためには良質のコークスと塊成鉄の使用が必須であり、原料の選択と大規模の事前処理設備の設置が不可欠となつている。

原料処理工程の簡素化と原料制約条件の緩和とを目的として 1960 年代以降、溶融還元法が提唱され、各種の試みがなされてきた。溶融還元法は酸化鉄を溶融状態で還元することにより原料に課せられる制約条件を緩和させようとするものである。しかし、溶融還元反応は大きな吸熱をともなう反応であり、Dored 法¹⁾に代表されるように、溶融還元反応で発生するガスを炉内で燃焼させて溶融還元の熱補償に利用しようとした初期段階における溶融還元法の場合、炉内を強還元雰囲気に維持することが難しく、熱効率の低下や耐火物の損傷問題を引き起こしたため、現在、実用化されるには至っていない。

1970 年代以降、Inred 法²⁾や Elred 法³⁾に代表されるような電力を利用する方法、さらには、COIN 法⁴⁾や KR 法⁵⁾に代表されるような予備還元を強化させる方法へと方向転換がなされつつある。

以上のような背景を踏まえ、低品質原料の使用拡大を図る場合においても、高熱効率と高還元性とを両立させるためにはコークスの使用が不可欠であるとの観点に立脚し、新しい製鉄法の開発に着手した。

本製鉄法は、高炉法における原料制約条件を緩和させ、原料需給の多様化に備えることを目的とし、移動床式の鉄鉱石ガス還元炉とコークス充填層式の還元鉄溶解炉で構成し、溶解炉で酸素送風することにより微粉炭を多量使用することを特徴としている。

移動床式ガス還元炉を Shaft 炉、コークス充填層式還元鉄溶解炉を Cupola と通称するため、本製鉄法を SC 法と称している。

微粉炭の酸素送風下における燃焼、高 CO 濃度ガスによる鉄鉱石還元に関する基礎試験を踏まえ、1982 年に溶解炉、引き続き 1984 年に還元炉の試験設備（公称

昭和 61 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 12 月 22 日受付 (Received Dec. 22, 1986)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 工博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*² 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

*³ 住友金属工業(株)鉄鋼技術部 (Iron and Steel Technical Development Department, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

能力 8 t/日) を建設して総合試験操業を実施し、技術的な可能性に対するめどを得た。さらに、試験結果を踏まえて商業用炉の概念設計を実施した。

ここでは、本製鉄法の基本構成、試験炉による実証結果、および商業用炉の概念設計について報告する。

2. 新製鉄法の構成

新製鉄法の構成を Fig. 1 に示す。構成の骨子は以下の 4 点である。

- 1) 還元炉と溶解炉から構成する。
- 2) 還元炉は移動床式のシャフト炉であり、塊鉱石を還元して還元鉄を製造する。
- 3) 溶解炉は塊コークスが充填されたシャフト炉であり、溶銑とともに還元ガスを製造する。キューボラまたは高炉下部と類似しているが、低シャフトであり、かつ、酸素と多量の微粉炭を使用する。
- 4) 還元炉と溶解炉を、予備還元鉄と還元ガスをそれぞれ溶解炉と還元炉に直送することにより直結する。

ここで、溶解炉を高炉下部に相当する塊コークスを充填したシャフト炉とする目的は、高炉法の特徴、すなわち高熱効率、高生産性、高還元能力、高脱硫能力および耐火物保護を継承するためである。

還元炉と溶解炉に分離する目的は、低品質の原料を使用することである。コークスを高炉下部に相当する溶解炉に直接装入し、高炉上部における荷下がり衝撃やガス化反応などの粒度劣化要因を排除することにより、低品質コークスの使用を図っている。

また、炉を二分割し、荷重を軽減させた状態で還元鉄

を溶解することにより融着層形成を回避すれば、荷重軟化特性の悪い原料の使用も可能となる。

溶解炉で酸素を使用する目的は生成ガス量を減少させて生産性を向上させること、および微粉炭を多量に使用してコークス消費を節減することである。

さらに、還元炉と溶解炉を完全連結することにより設備の簡素化と熱損失の抑制を図っている。

以上のように、本製鉄法は、高炉法における製鉄形態を踏襲することにより高炉法の特徴を継承しつつ、機能分離と酸素送風により原料制約条件を緩和させ、原料需給の多様化に備えようとする製鉄法である。

3. 試験炉による機能実証

3.1 新製鉄法における技術課題

所期の目的を達成するためには、以下に示す基本機能の実証が必要である。

3.1.1 溶解炉技術

- (1) 微粉炭多量使用
- (2) 低強度コークス使用
- (3) 各種還元鉄の溶解製錬

3.1.2 還元炉技術

- (1) 高 CO 濃度、ダスト含有ガスによる還元鉄製造
- (2) 各種鉄鉱石使用

3.1.3 熱間連結操業技術

- (1) 還元鉄、還元ガス直送下での安定操業

以上の機能を実証し、適性操業条件を把握するために溶解炉、ならびに還元炉を建設して操業試験を実施した。

3.2 試験炉設備概要

設備概要を Fig. 2 に示す。公称能力は 8 t/日、最高操業圧力は $1.99 \text{ kg/cm}^2\text{-G}$ である。溶解炉炉床径は 0.8~0.9 m、還元炉炉床径は 0.75 m であり、溶解炉には、中心に微粉炭吹込み孔、その周辺に三個の酸素吹込み孔を有するランスを 120° 間隔で設置している。還元炉と溶解炉は還元鉄熱間コンベヤーと還元ガス導管により結合した。還元ガス導管には空気ノズルを設置し、還元ガスの一部を燃焼して温度を調節できるようにしている。

3.3 溶解炉試験結果

原料条件を Table 1 に示す。コークスとしては高炉用の高強度コークスとともに非粘結炭 56% 配合の低強度コークスも使用した。微粉炭としては揮発分約 35% の非粘結炭を使用し、水分を 3% 以下に乾燥し、200 ムッシュ以下 90% 以上に粉碎して用いた。還元鉄としては、別途還元炉で製造した還元焼結鉱とともに製鉄所発生ダストをロータリーキルンで焼成した還元ペレットも使用

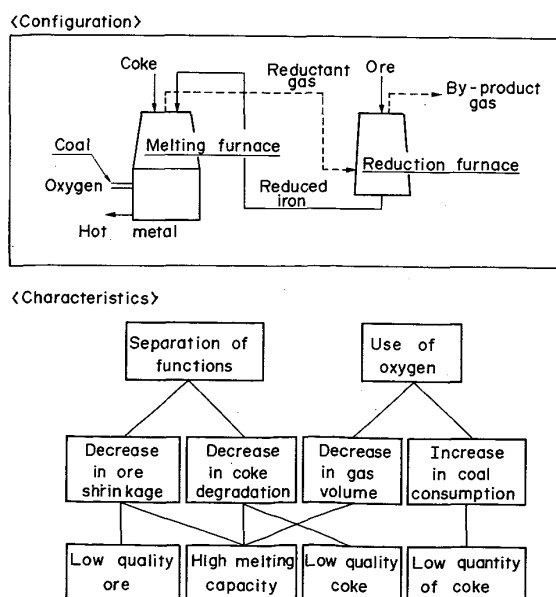


Fig. 1. Concept of SC process.

Table 2. Results of the melting furnace operation.

Items		Case 1	Case 2	Case 3
Reduced iron		Reduced sinter	Reduced pellet	Reduced pellet
Coke		High quality coke	High quality coke	Low quality coke
Blowing	O ₂ (Nm ³ /h)	255.4	254.0	240.1
	Coal (kg/h)	275.0	271.0	268.4
	Vosh gas (Nm ³ /h)	907.6	901.5	910.9
	Tf ^{*1} (°C)	2309	2316	2141
Top gas	Temperature (°C)	950	838	880
	CO (%)	58.4	57.5	57.1
	CO ₂ (%)	2.4	4.3	3.5
	H ₂ (%)	19.2	17.8	19.5
Production rate (t/H)		8.1	7.5	7.5
Gas flow resistance K ⁸ (MKS)		2024	1710	1410
Fuel rate	Coke (kg/t)	443	475	431
	Coal (kg/t)	819	868	864
	Total (kg/t)	1262	1343	1295

*1 : Gas flame temperature by Ramm's equation

Table 3. Raw materials used at the reduction furnace.
Raw materials

	Composition (%)							Size (mm)
	T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Moisture	
Sinter-1	58.8	4.8	4.9	1.8	0.9	8.9	0.4	10~25
Sinter-2	57.3	6.7	5.3	2.0	1.2	9.7	0.4	10~25
N. Pellet	66.1	0.8	2.8	0.6	0.1	2.5	2.5	10~25
A. Pellet	66.4	0.6	1.6	0.4	0.4	2.5	2.5	10~25

Table 4. Results of the reduction furnace operation.

		Clean gas		Dusty gas	
		Sinter	Pellet	Sinter	Pellet
Ore	Rate (kg/h)	557	567	1 293	1 303
	T. Fe (%)	58.8	66.1	57.3	66.4
	FeO (%)	4.8	0.8	6.7	0.6
Reductant gas	Rate (Nm ³ /h)	742	743	1 117	1 097
	Unit (Nm ³ /t·Fe)	2 266	1 987	1 507	1 267
	CO (%)	41.6	42.0	49.7	47.2
	CO ₂ (%)	6.4	4.6	11.1	9.6
	H ₂ (%)	21.2	23.8	8.3	8.1
	H ₂ O (%)	4.7	3.3	2.5	1.2
	N ₂ (%)	26.1	26.3	28.4	33.9
	Temperature (°C)	878	841	790	770
	Dust (g/Nm ³)	—	—	4.6	11.1
Reduced iron	Rate (kg/h)	446	410	1 107	1 075
	R (%)	95.8	96.7	60.4	62.5
	-5 mm (%)	4.0	0.5	3.9	—

て還元鉄を溶解製鉄し得ることが示された。

3.4 還元炉試験結果

原料条件を Table 3 に示す。高炉用の焼結鉱とペレットを使用した。還元ガスとしては CO/H₂ 比率をおおむね 2/1 に調整した。また、ダストを含むものと含まないものを使用し、いずれも溶解炉で製造した。

3.4.1 高 CO 濃度ガスによる還元鉄製造試験

操業結果を Table 4 に示す。ダストを含まない還元ガスを使用して還元率 95% 以上を達成することができ

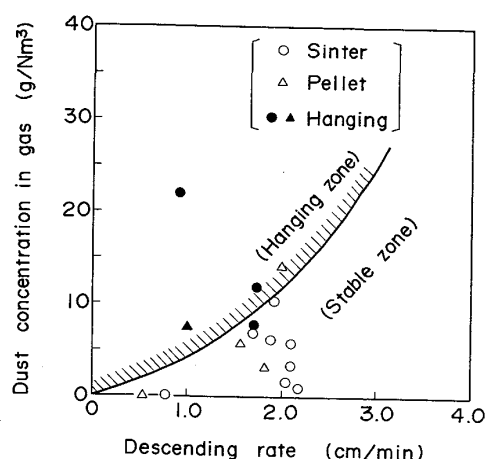


Fig. 4. Hanging observed at the reduction furnace operation.

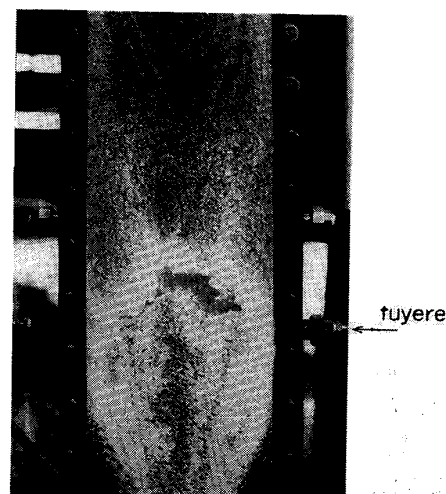


Photo. 1. Hanging caused by dust (slaked lime powder) observed at the cold model experiment.

た。また、ペレットはもとより焼結鉱でも還元鉄の -5 mm 粉率は 5% 以下であり、粉化の程度も少ない結果であつた。

3.4.2 ダスト含有ガス使用試験

ダストを含む還元ガスを使用した場合、Fig. 4 に示すように、ダスト濃度を増加させ、荷下がり速度を低下させると棚吊りが発生することが判明した。

この原因を調査するために還元炉の 1/3 縮小平板模型を製作し、ダストとして消石灰粉を使用して冷間実験を実施した結果、Photo. 1 に示すように、羽口近傍で棚吊りが発生した。原因は、ダストが羽口前で充填粒子に付着して空隙を閉塞し、通気、荷下がりを阻害したためと解釈できる。したがって、安定操業を達成させるためには荷下がり速度を増加させるか、または還元ガス中

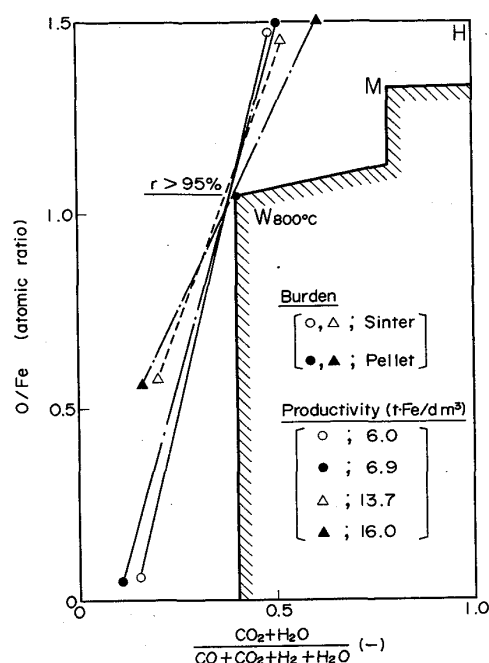


Fig. 5. Shaft efficiency (r) on the Rist diagram obtained through reduction furnace operation.

のダスト濃度を低下させる必要がある。

ダストを含む還元ガスを使用し、棚吊りを回避させるために荷下がり速度、すなわち生産速度を増加させて還元鉄製造試験を実施した結果も Table 4 に示した。この場合、還元率が低下している。しかし、Table 4 に掲載した試験結果を Rist 線図⁷⁾で整理すると、Fig. 5 に示すように、いずれの場合もシャフト効率>95%が達成されていることからダストを含む還元ガスの場合還元率が低下した主原因は、ダストそのものではなく、ダストに起因する棚吊りを回避するために生産速度を増加させた結果、還元ガス量が相対的に不足したためと解釈できる。

以上、高 CO 濃度でダストを含む還元ガスを使用しても、還元鉄を製造し得ることが示された。

3.5 熱間連結操業試験

以上に説明した炉別機能実証試験結果を踏まえて熱間連結操業を実施した。燃料としては Table 1 に示した高強度コークスと微粉炭、鉾石としては Table 3 に示した A. ペレットまたは焼結鉾-2 を使用した。

3.5.1 安定操業条件

Fig. 6 に溶解炉炉頂ガス温度と発生ダスト濃度、および生産性、燃料比の関係を示す。炉頂ガス温度が低下すると生産性、燃料比は好転し、同時に発生ダスト濃度も低下する傾向にある。一方、溶解炉としてコークス充填層式の向流型反応器を採用しているため、羽口前の理

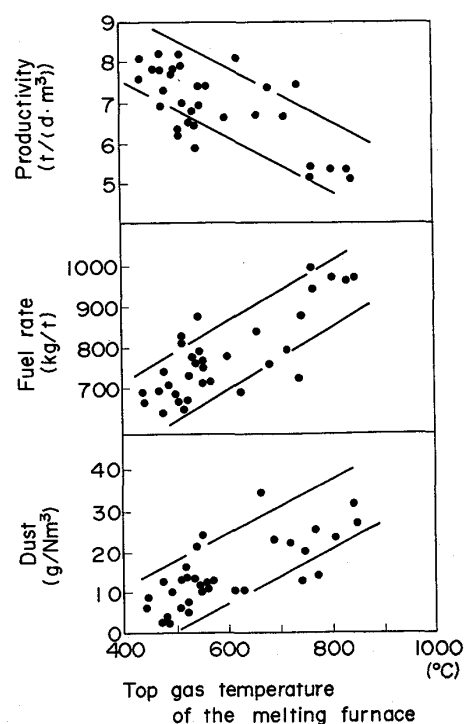


Fig. 6. Correlations between top gas temperature of the melting furnace and operational results at the connection operation.

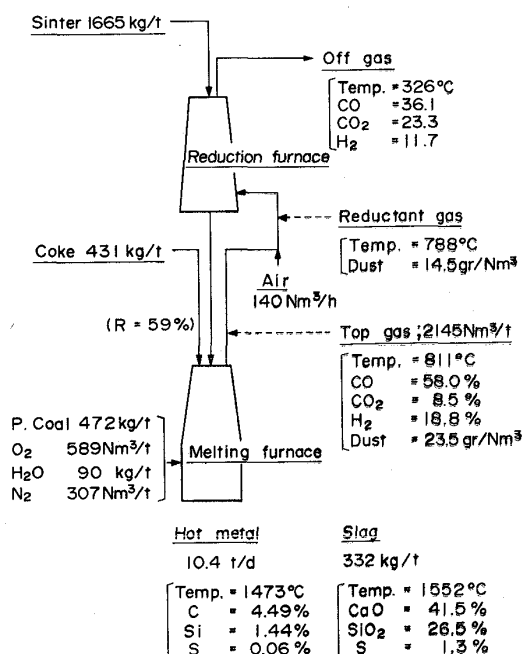


Fig. 7. Result of the connection operation test with using sinter.

論燃焼温度上昇等の手段により炉頂ガス温度を低下させることが可能である。したがって、ガス導管に空気を添加して再昇温することを前提とすれば、溶解炉の炉頂ガス温度を低下させるほうが安定操業達成の点で有利と考

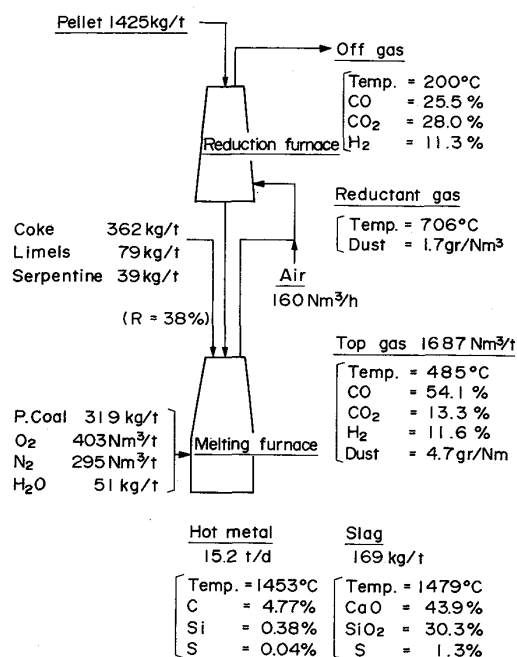


Fig. 8. Result of the connection operation test with using pellet.

えられる。

3・5・2 総合試験結果

熱間連結操業の代表例を Fig. 7, 8 に示す。

Fig. 7 は焼結鉱, Fig. 8 はペレットを使用した場合を示しているが, いずれの場合も安定操業が達成され, かつ十分に脱硫された溶鉄が得られた。

ここで, 還元炉から排出された予備還元鉱石の還元率は 60% 以下と低い値になっている。しかし, 溶解炉炉頂ガス中に CO₂ が認められることから明らかなように, 溶解炉で酸化鉄が全量溶融還元されるのではなく, 一部, ガス還元が生起している。

炉頂ガス温度を低下させた Fig. 8 の条件の方が予備還元率が低くなっているが, これを補償するように溶解炉炉頂ガス中の CO₂ も増加している。操業成績としては, Fig. 6 と対応し, 炉頂ガス温度を低くさせた方が生産性, 燃料比の両面において勝る結果となつている。

以上, 熱間連結操業試験の結果, 本製鉄法はトータルシステムとして成立し得ることが示された。また, 操業形態としては, 安定操業の観点から, ガス導管に空気を添加して再昇温させることを前提とし, 溶解炉炉頂ガス温度を極力低下させるほうが望ましいことも判明した。

4. 考 察

4・1 商業用炉の概念設計

生産規模を 2400 t/日と想定し, 試験実績を踏まえて商業用炉の操業因子を予測した。

Table 5. Assumptions at the design of SC commercial plant.

Items	Plant	2400 t/日 plant	Pilot plant
Productivity (t/dm ³)		5	3~5
Volume (diameter)			
Melting furnace (m ³)		292 (6.2 m)	2 (0.9 m)
Reduction furnace (m ³)		189 (5.7 m)	1.3 (0.75 m)
Total (m ³)		481	3.3
Heat loss			
Melting furnace (Mcal/h)		3700	160
Reducing furnace (Mcal/h)		1800	85
Hot conveyor (Mcal/h)		2500	80
Gas duct (Mcal/h)		1500	140
Total (Mcal/h)		9500	465
Melting furnace			
Coal/O ₂ (kg/Nm ³)		1.2	0.8~1.4
Flame temperature (°C)		2350	2000~2500
Top gas temperature (°C)		600	450~900
Reduction furnace			
Shaft efficiency (%)		95	>95

前提条件を Table 5 に示す。

出鉄比は炉内における熱伝達や化学反応などの総括反応速度に対応する生産性指標であるが, 総括反応速度は, ガスの温度, 成分, 圧力, 流速が変わらない条件では, 原料の品種と粒度により規定される。一方, 試験炉では商業用炉で使用する原料と品種, 粒子径ともに大差が生じないように配慮した。したがって, 試験炉で達成した出鉄比は商業用炉においても達成し得ると考えられるので商業用炉の出鉄比を 5 t/日 m³ と設定した。

炉容積は, 溶解炉と還元炉の炉容積比率を試験炉と同一とし, 溶解炉 292 m³, 還元炉 189 m³, 合計 481 m³ とした。炉床径はそれぞれ 6.3 m, 5.7 m としている。

溶解炉と還元炉の炉体熱損失は, 試験炉における熱放散流束の実績値と炉体表面積増大比率から算定した。連結部の熱損失は, コンベヤー上での還元鉄温度降下を 100°C, ガス導管内の還元ガス温度降下を 50°C とし算定した。結果として熱損失の合計は 95 Mcal/t になつた。

溶解炉の送風条件としては, 微粉炭/酸素比率を 1.2 kg/Nm³, 理論燃焼温度を 2350°C とした。出鉄条件としては溶鉄温度を 1500°C, C=4.5%, Si=0.5% とした。炉頂ガス温度は 600°C とし, 空気を添加して一部を燃焼させ, 還元ガス温度を 800°C とするようにした。還元炉に対しては, シャフト効率を, 800°C におけるウスタイト-鉄の平衡を前提として, 95% とした。また, 予備還元鉱石中酸化鉄の 50% は溶解炉でガス還元されるとした。

Fig. 9 に計算結果を示す。最終的なガス利用率 56%, 還元鉄の還元率 57% の条件で微粉炭比 302 kg/t, 燃料比 520 kg/t の結果が得られた。

4.2 高炉法との比較

高炉法の一例として微粉炭比 60 kg/t の操業条件を採用し、本製鉄法と比較して Table 6 に示す。

出銑比で比較すると、高炉法の標準的な出銑比は 2 t/日 m³ 程度と考えられるのに対し、本製鉄法では 2.5 倍に相当する 5 t/日 m³ である。一方、羽口レベルにおけるガス流速で比較すると、本製鉄法のほうが、酸素を使用して発生ガス量を抑制するため、低い値となっている。したがって、通気性の観点からも出銑比 5 t/日 m³ は達成可能と推定される。

燃料比に着目すると、高炉法の方が低くなっている。しかし、炉内で消費される熱量で比較すると、Table 7 に示すように本製鉄法の方が低い。この主原因は炉頂ガス顕熱と炉体熱損失であり、本製鉄法の方が発生ガス量

が少なく炉容積も小型化されるため、炉頂ガス顕熱、熱損失ともに少なくなると計算された。

次に、コークスを 1 t 製造するために必要とする石炭を 1.37 t として石炭消費量を計算すると、高炉法の場合 640 kg/t になるのに対して本製鉄法では 600 kg/t となる。また、石炭配合として高炉用コークスでは非粘結炭比率を 10%，本製鉄法は低品質コークスの使用が可

Table 7. Heat balance of SC commercial plant in comparison with a blast furnace. (Mcal/t)

	Blast furnace		SC process	
Heat input	—	3 899	—	3 749
Coke (kg)	427	3 040	218	1 552
Coal (kg)	60	436	302	2 197
Hot blast (°C)	1 130	423	—	—
Heat output	—	3 899	—	3 749
Reduction	FeO _{1.461}	1 619	FeO _{1.461}	1 619
Pig (t)	1	731	1	731
Sensitive (°C)	1 500	308	1 500	308
C (%)	4.5	384	4.5	384
Si (%)	0.5	39	0.5	39
Slag (kg)	292	122	296	124
Top gas (Nm ³)	1 720	1 222	1 034	1 146
Sensitive (°C)	170	100	160	56
Latent (kcal)	652	1 122	1 054	1 090
Heat loss	—	162	—	95
Dust etc.	—	43	—	34

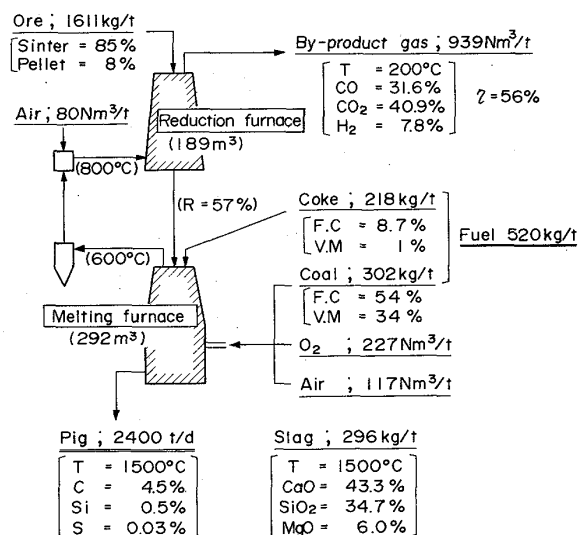


Fig. 9. Material flow sheet of SC commercial plant.

Table 6. Operational indices of SC commercial plant in comparison with a blast furnace.

Items	Process	Blast furnace	SC process
Productivity (t/d m ³)		2	5
Volume (m ³)		1 200	481
Melting furnace (m ³)		—	292
Reduction furnace (m ³)		—	189
Diameter at tuyere level (m)		7.5	6.2
Gas volume at tuyere level (Velocity) (Nm ³ /t)		1 350 (0.85 Nm/s)	834 (0.74 Nm/s)
Fuel rate (kg/t)		487	520
Coke rate (kg/t)		427	218
Coal rate (kg/t)		60	302
Oxygen (Nm ³ /t)		—	227
Air (Nm ³ /t)		1 100	187
Blast temperature (°C)		1 130	—
By product gas (Mcal/t)		1 122	1 090

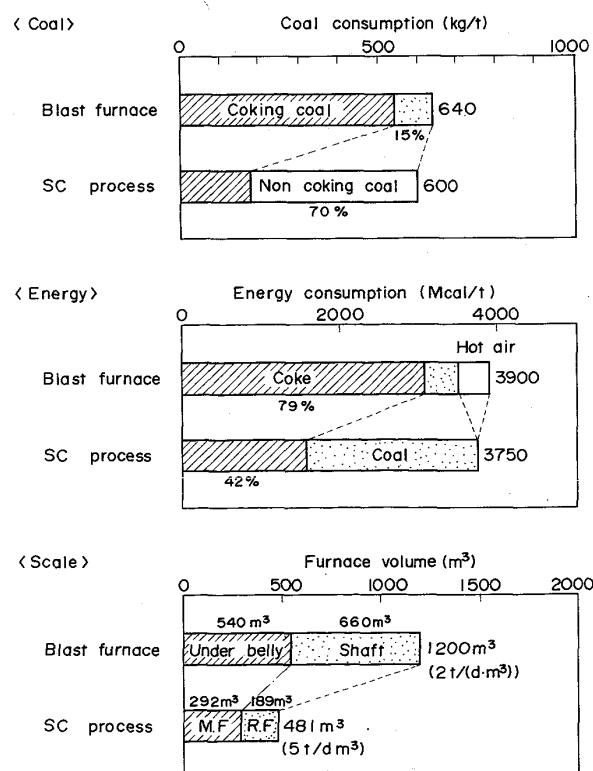


Fig. 10. Features of SC process in comparison with a blast furnace.

能であるとして非粘結炭比率を 40% と仮定した場合、高炉法では非粘結炭比率が 15% であるのに対し、本製鉄法では 70% となる。すなわち、本製鉄法は高炉法に対し、石炭消費量を 6%、原料炭を 67% 節約できることになる。

高炉法と比較した本製鉄法の特徴を Fig. 10 に整理して示す。高炉法に匹敵する熱効率、高炉法に倍する生産性を達成し、原料炭を大幅に節約することが可能であり、経済的視点からも高炉法を凌駕し得ると考えられる。

5. 結 言

高炉法に課せられた原料制約条件を緩和して原料需給の多様化に備えようとする新製鉄法 (SC 法) の開発に着手し、熱間試験炉操業を通して技術的見通しを得た。

試験炉実績を踏まえて商業用炉を概念設計し、高炉法と比較した結果、熱効率、生産性、および石炭品種制約

の面において高炉法を凌駕し得ることが示された。

今後、スケールアップ上の諸問題を検討し、実用化に備えたい。

文 献

- 1) J. ASTIER, U. KALLING and J. STALHED: Iron Steel Institute (1967) 102, p. 126
- 2) H. ELVANDER and G. OMBERG: Stahl Eisen, **104** (1984), p. 864
- 3) J. HARTWIG, D. NEUSCHUETZ and J. RADKE: Ironmaking Steelmaking, **10** (1983) 3, p. 124
- 4) P. COLLIN and H. STICKLER: Stahl Eisen, **104** (1984), p. 864
- 5) G. PAPST and J. FLICKENSCHILD: Iron Steel Eng. (1986) Feb., p. 30
- 6) T. MIYAZAKI, Y. SHOJI, Y. KAMEI and T. IBA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **22** (1982), p. 207
- 7) A. RIST and N. MEYSSON: Rev. Métall., **61** (1964), p. 121
- 8) 的場祥行, 下田輝久: 鉄と鋼, **60** (1974), S 354