

溶融還元による高炭素フェロクロム製造 プロセスの開発

© 1990 ISIJ
 ///////////////
技術報告
 ///////////////

片山 裕之*・桑原 正年*²・平田 浩*²
 八木 次郎*²・斎藤 力*²・藤田 正樹*³

Production of High Carbon Ferrochrome by Smelting Reduction

*Hiroyuki KATAYAMA, Masatoshi KUWABARA, Hiroshi HIRATA,
 Jirou YAGI, Tikara SAITOU and Masaki FUJITA*

Synopsis:

As a process for the production of ferrochrome without electric energy as heat source, a new smelting reduction process with the top-and-bottom blowing converter was developed.

The special feature of this process is to separate the metal bath from top-blown oxygen jet by the thick molten slag layer.

The pilot plant test of 2 t/h production scale was conducted by the Research Association for New Smelting Technologies.

The results are summarized as follows;

(1) The operation of this process was stable. Scaling up of about 30 times in oxygen blowing rate was done without any problem.

(2) Suppressing the erosion of lining (MgO-C brick) and accelerating reduction of chrome ore can be satisfied, at the same time, by controlling the slag composition ((%MgO+%Al₂O₃): 46~47%).

(3) The method for using fine chrome ore without agglomeration was devised.

(4) The composition of product is lower in S and Si, higher in C and Cr (about 1%), than conventional EF product.

P content of the product depends mainly on the carbonaceous materials used. As the process for producing low P ferrochrome with cheap carbonaceous materials (e.g. green oil coke), a process composed of rotary kiln and smelting reduction furnace was proposed.

Compared with conventional EF process, the advantages of this process are low energy cost, direct use of fine ore and low impurity in product.

This process can be applied for the production of other metals and alloys.

Key words: ferrochrome; smelting reduction.

1. 緒 言

高炭素フェロクロムは通常、エネルギー源として電力を用いて製造されている。溶融還元法は、これを、石炭系燃料の燃焼熱を直接利用する方式に変換し、とくに電力価格が高い日本においてコストダウンを図ることを狙いとしている^{1)~10)}。

その具体的な方法の一つである上底吹き転炉を用いる方式については、すでに 100 kg 規模基礎試験および 500 kg 規模小型転炉による試験で原理的な可能性が確

認されている^{6)~10)}。

その方式が製錬新基盤技術研究組合のフェロクロム溶融還元パイロット試験方式に選ばれ、昭和 62 年 10 月から 63 年 12 月にかけて約 2 t/h 規模試験操業が行われた⁴⁾。本報では、このパイロット試験の結果について報告する。

2. 本法の原理とパイロット試験の方式

上底吹き転炉を用いたフェロクロム溶融還元法の原理は、「共存する多量スラグでメタル浴と酸化性雰囲気

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 3 月 13 日受付 (Received Mar. 13, 1990)

* 新日本製鉄(株)製鋼研究センター 工博 (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*² 新日本製鉄(株)製鋼研究センター (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

*³ 日本重化学工業(株)フェロアロイ事業部 (Ferroalloy Div., Japan Metals & Chemical Co.)

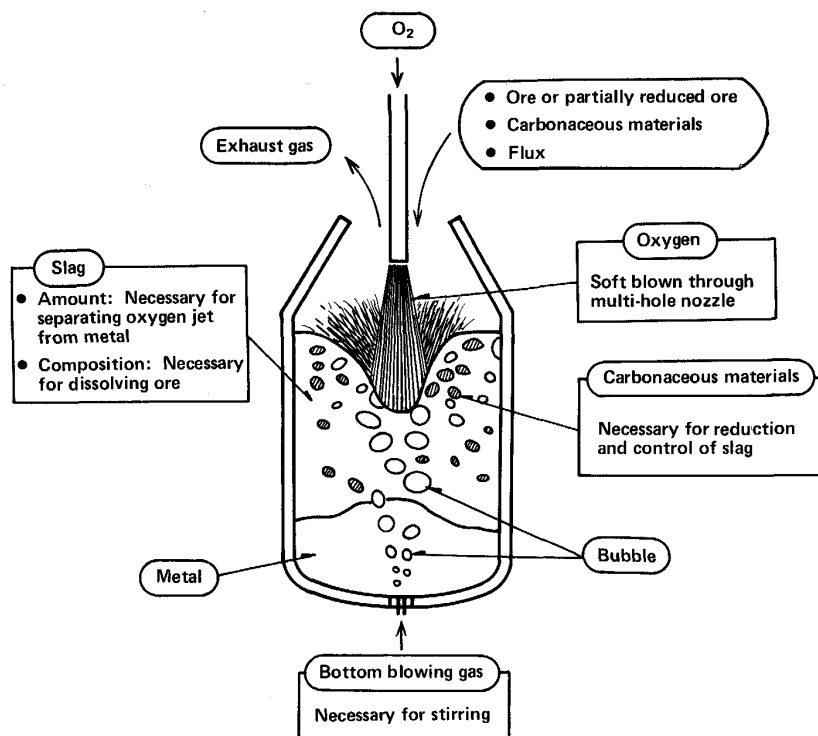


Fig. 1. Principle of the process.

Table 1. Capacity of pilot plant.

Pre-reduction	Rotary kiln	Inner diameter	1.7 (m)
		Length	35 (m)
		Gradient	40/1 000 (—)
		Rotation	0.1~1.0 (rpm)
		Temperature	Max. 1 400 (°C)
	Feeder	Chrome ore	Max. 2.0 (t/h)
		Carbonaceous material	Max. 1.6 (t/h)
Smelting reduction	Top-and-bottom blowing converter	Top blowing	Max. 2 700 (Nm ³ -O ₂ /h)
		Bottom blowing	Max. 400 (Nm ³ -(O ₂ +N ₂ +LPG)/h)
		Inner volume	6~7 (m ³)
		Metal	Max. 6 (t)
		Slag	Max. 5 (t)
	Exhaust gas treatment	Wet type dust catcher	

遮断することにより、高2次燃焼による発熱と酸化物還元反応の進行を、攪拌状態で両立させる」ことにある (Fig. 1).

これまでの小型転炉試験で得られた結果^{6)~10)}が溶融物を約10倍、吹酸速度を約30倍にスケールアップしても成り立つかどうか、パイロット試験の課題の一つである。

なお、トータルプロセスとしては、溶融還元炉から発生する多量の排ガスの顕熱および潜熱を、系内で有効に使用することが重要な課題である。本法では、それをロータリーキルンにより原料予備処理の熱源として利用する方式を考えた。

パイロット試験設備は上底吹き転炉型溶融還元炉とロータリーキルンの組合せからなり、新日鉄君津製鉄所構内に建設された。

設備仕様の概略を Table 1 に示す。

ロータリーキルンで処理された原料は高温のまま溶融還元炉に供給できるが、溶融還元炉の排ガスは除塵して燃焼放散する方式になっている。

3. 試験方法

試験に使用された原料の成分と粒度を Table 2 に示す。クロム原料は、ロータリーキルンで予備還元した半還元ペレットが基準であるが、粉鉱石直接使用も試験し

Table 2. Chemical compositions and size of chromium ore and carbonaceous materials (wt%).

	T. Cr	T. Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P	S	R. Cr*	R. Fe* ²	Fixed carbon	Volatile matter	Ash	Moisture	Size
Partially reduced pellet	26.2	13.8	0.9	9.3	11.9	9.9	0.015	0.139	55.0	90.3	9.8	—	—	0.6	5~15 mm
Fine chrome ore	30.7	19.6	0.4	1.9	14.6	9.8	0.003	0.011	—	—	—	—	—	0.1	<1.0 mm (<0.5 mm, 96%)
Coke	—	1.0	0.4	6.6	3.5	0.3	0.050	0.567	—	—	84.2	2.4	11.9	1.5	5~25 mm
Anthracite	—	1.6	0.5	3.5	1.7	3.5	0.012	0.821	—	—	75.9	7.5	12.0	4.5	<30 mm
Oil coke	—	0.0	0.0	0.2	0.1	—	0.001	1.167	—	—	83.4	9.2	0.4	7.0	6~25 mm

* Reduction degree of Cr-oxide *² Reduction degree of Fe-oxide

Table 3. Experimental conditions pilot plant test.

Blowing rate	Top	O ₂	1500~2700 (Nm ³ /h)
	Bottom	O ₂	0~130 (Nm ³ /h)
	N ₂	0~130 (Nm ³ /h)	
	LPG	0~30 (Nm ³ /h)	
Temperature of melt	1580~1700 (°C)		
Amount of metal	3~6 (t)		
Amount of slag	2~6 (t)		

た。

炭材はコークスを基準としたが、製品メタルの低りん化対策として、比較的安価な低りん炭材である無煙炭、オイルコークスなどの使用試験も行った。

フラックスは生石灰とドロマイトである。

操業は、種湯、種スラグが存在する炉内に、クロム原料の供給を行いながら酸素吹錬する「溶融還元期」と、クロム原料の供給を止めて吹錬を続けスラグ中の T. Cr 濃度（以下、T. Cr と記す）を低下させる「仕上還元期」の組合せからなる。

なお、操業は、出湯、出滓時にはメタル、スラグの約半分を炉に残して繰り返してゆく、いわゆる、残し湯方式である。1サイクルの吹錬時間は70~90 minで、その間に約3tの高炭素フェロクロムと同程度のスラグが生成する。

主な試験操業条件を Table 3 に示す。

4. 試験結果

4.1 成分挙動と主要な操業条件の影響

1サイクル内の典型的な (T. Cr) の挙動を Fig. 2 に示す。溶融還元期の (T. Cr) レベルは、クロム酸化物の供給速度（吹酸速度と鉬石予備還元率に依存）と還元速度（温度、スラグ組成などに依存）のバランスによって決まる。(T. Cr) が2~14%の範囲で試験をおこなったが、いずれの場合にも操業上、とくに問題となる現象は認められなかった。

所定量のクロム原料を装入後、(T. Cr) を、排出スラグとして要求されるレベル（例えば1%以下）まで低

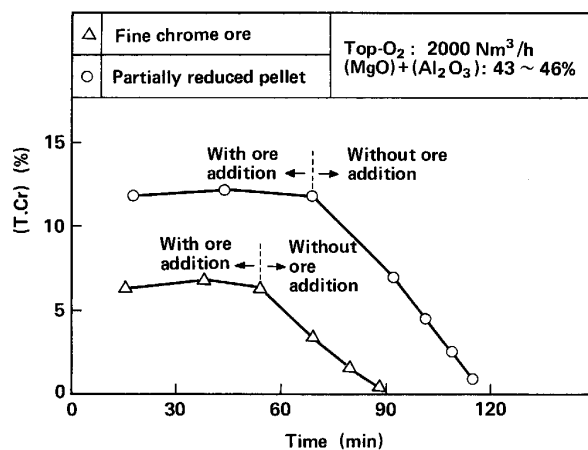


Fig. 2. Examples of the behaviour of chromium content in slag.

下させる。この仕上還元操作は、クロム酸化物の供給を止めて吹錬を続けることによって行われる。例えば (T. Cr) を10% から1%以下まで低下するに要する時間は約30 minである。

なお、仕上還元後の (T. Cr) の最低値は0.2%であった。

パイロット試験では、上記のサイクルをくりかえして52タップ(のべ5日間)までの連続操業試験をおこない、残し湯方式で安定操業ができることを確認した。

4.1.1 スラグ組成の影響

スラグ組成については、基礎実験¹¹⁾でメタル温度が1600°Cの場合、(%MgO+%Al₂O₃)の値が45%以上ではクロム鉬石の溶解が阻害されるために見かけの還元速度が小さくなるという結果が得られている。ほぼ同様のことはパイロット試験でも確認された (Fig. 3の中の右上がりの帯)。

実用プロセスとしてはクロム鉬石溶解促進と同時に耐火物（今回の試験ではマグカーボンレンガを使用）の溶損抑制も同時に満足させる必要がある。耐火物損耗速度に及ぼすスラグ組成の影響は Fig. 3の中の右下がりの帯で示される。この結果から、還元促進と耐火物損耗抑

制を両立させるための適正な (%MgO+%Al₂O₃) の値は、操業温度が約 1610±20°C の場合、46~47% となる (Fig. 3).

(%MgO+%Al₂O₃) の上限値が基礎試験結果¹¹⁾とパイロット試験で数%ずれているが、それはスラグ内温度分布の差に起因している。すなわち、温度はいずれもメタル浴温度で表示しているが、基礎実験では誘導加熱のためスラグ上部の温度の方が低い条件であったのに対し、パイロット試験ではスラグ温度はほとんどメタル温度と差がないことが確認されている。

上記の適正条件を満足する場合、スラグと接触する部分の耐火物の溶損量は平均 1 mm/h 程度であった。

4.1.2 底吹き条件の影響

底吹きなしの場合には偏熱が著しく操業不能であった。一方、底吹きガス吹込み量が多すぎる (200 Nm³/h 以上) と、酸素ジェットとメタルの接触の機会が増すために、本法の基本条件である「酸化性雰囲気とメタルの遮断」が不十分になり、2次燃焼率の低下およびダスト発生量の増加などの悪影響が顕著になった。

適正条件は、底吹きガス量として 60~150 Nm³/h (底吹き酸素はすべて CO となり、プロパンは CO と H₂

に分解するとして計算)であった。これがメタルの攪拌に使われるとした場合、森、佐野の式¹²⁾で計算すると攪拌動力としては 1~3 kW/t になる。

4.1.3 製品成分

パイロット試験操業で得られたメタルおよびスラグの成分例を Table 4 に示す。

[%Cr] は鉍石組成と排出スラグの (%Cr) によってきまる。十分に仕上還元を行った場合、本法の製品メタルは従来電炉法に比べて、[%Cr] が 1~2% 高かった。

また、[%Si] が低く、[%C] が高く ([%Si] が低いと飽和炭素濃度が高い)、[%S] が低いという特徴がある。

電炉法に比べて系内に持ち込まれる S 量が多いにもかかわらず [%S] が低い。これは、Fig. 4 に示すように、気化脱硫率 (ダストとその他の項の和) が約 60% と高いこと、およびスラグ、メタル間の硫黄分配比が高いためである。

一方、P は系内に持ち込まれたものが 90% 程度、メタルに移行する。P は主として炭材によって持ち込まれるので、電炉法と同じりん含有量の炭材を用いると、炭材原単位が高い分だけ製品 P が高くなる。

その対策については 4.3 項で述べる。

4.2 粉鉍石の直接使用方法

現在、入手可能なクロム鉍石の大半は粉状である。電炉で使用する場合、通気性の点から、粉鉍石はペレット

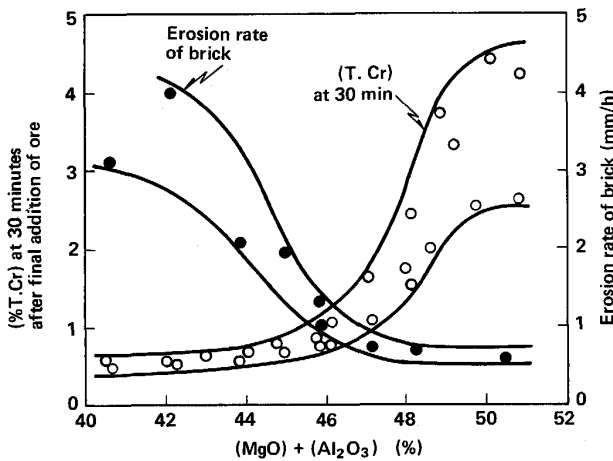


Fig. 3. Influence of (%MgO) + (%Al₂O₃) on (T.Cr) in slag and the erosion rate of brick.

Input (29.5kg)		Output (29.5kg)	
Ferrochrome	2.4%	Ferrochrome	2.1%
Partially reduced pellet	28.8%	Slag	33.0%
Coke	68.8%	5.5% Coke	
		Dust	16.2%
		Others	43.2%

Fig. 4. Example of sulfur balance in a heat.

Table 4. Chemical compositions of products of pilot plant test (%).

Ferrochrome		Slag	
	This process	This process	Conventional EF process
Cr	57~58	T. Cr	0.8
C	9.0~9.5	T. Fe	0.4
Si	0.2~0.3	CaO	28.0
P	0.026*~0.075* ²	SiO ₂	25.0
S	0.004~0.010	Al ₂ O ₃	23.5
N	0.01~0.02	MgO	21.5
			1.5~3.5
			~1
			~4
			~32
			~25
			~32

Carbonaceous materials * Oil coke *² Metallurgical coke

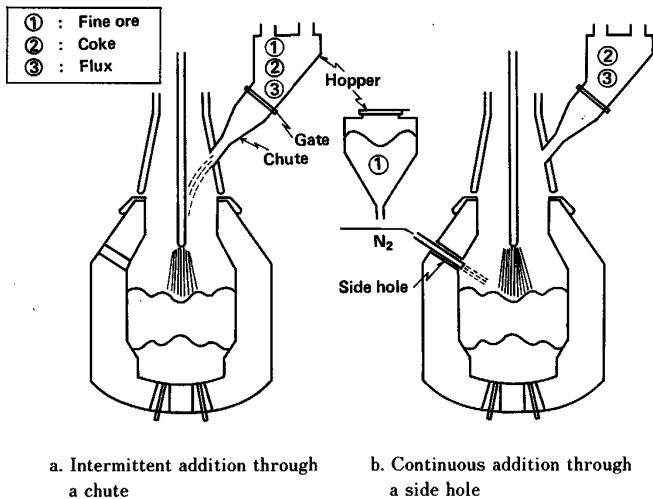


Fig. 5. Two methods tested for adding fine ore into smelting reduction furnace.

あるいは焼結のように塊成化する必要がある。

これに対して本法では、もし、クロム鉱石を途中で飛散することなくスラグの中に移行させることができれば、必ずしも塊成化する必要はなく、前処理工程を省略できる可能性がある。

溶融還元炉内の平均上昇ガス流速から飛散する鉱石の限界粒径を概算すると約 500 μm となる。通常の粉鉱石は 500 μm 以下のものが 96 wt% も含有されている (Table 1) ので、これを上方から投入しただけでは、かなりの部分が飛散することが懸念された。

そこで、最初に、粉鉱石をメタル浴に吹き込む方式を試験した。しかし、クロム鉱石は硬度が高いので高速輸送すると配管の摩耗が激しいという問題が確認された。

そこで次の二つの方式で上方からの添加試験を行った。

(1) 落とし込み法 (Fig. 5 a)

(2) 流し込み法 (Fig. 5 b)

いずれも、粉鉱石が上昇ガス流に接する機会を少なくすることによって飛散率を軽減することを狙ったものである。

結果的にはいずれの場合にも粉鉱石の飛散率をほとんど無視できる程度 (投入鉱石量の 2% 以下) に抑制できることがわかった。そのように判断した根拠は次のとおりである。

ダスト中のクロム分は、鉱石飛散起因とメタル起因 (ヒューム、バブルバースト) などの和である。その値を集塵水の SS (懸濁物) 測定によって求めた結果を Fig. 6 に示す。粉鉱石を用いた両法とも、ペレット使用の場合に比べてクロム全飛散量にほとんど有意差が認められないことから、粉鉱石飛散量は多くないことが推

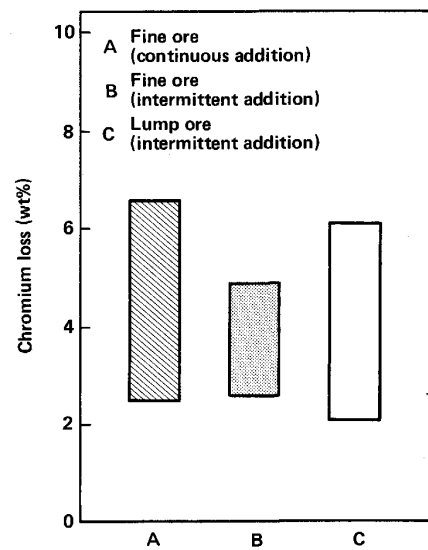


Fig. 6. Comparison of chromium loss as dust among three cases different in combination of chrom ore size and feeding method.

Table 5. Typical composition of dust (wt%).

T. Cr	T. Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	C
27.78	23.83	4.76	2.03	3.96	1.89	0.09	3.91	4.51

定される。

これを確認するために、上記の (2) の添加方法の場合について次のようにしてダスト中クロムの起因別分離を行った。

①このときのダストの平均成分は Table 5 に示すとおりである。スラグ成分の和; (CaO+SiO₂+MgO+Al₂O₃) が約 12% であることから、まず、スラグ飛散に伴うクロムロスの量は無視できる程度に少ないといえる。

②バブルバースト量は、メタルにトレーサーとして Mo を添加し、Mo は蒸発しないと仮定すると、計算によって求めることができる。

③メタル浴から蒸発する成分については基礎実験 (20 kg 真空溶解炉使用, 1600°C, 10⁻¹ Torr (13.3 Pa)) を行って、Fig. 7 の関係を得た。[%C] が高いほど蒸発物の Cr/Fe の比が小さくなり、高炭素フェロクロムの場合にはメタルからの蒸発物は Cr/Fe 比は 1.13 となる。

④①~③にもとづいて、Cr, Fe バランスによってヒューム、鉱石飛散の量を計算すると、ダスト中に占める各起因の比率は Table 6 のようになる。

鉱石飛散に起因するクロムロスは投入鉱石クロム分の

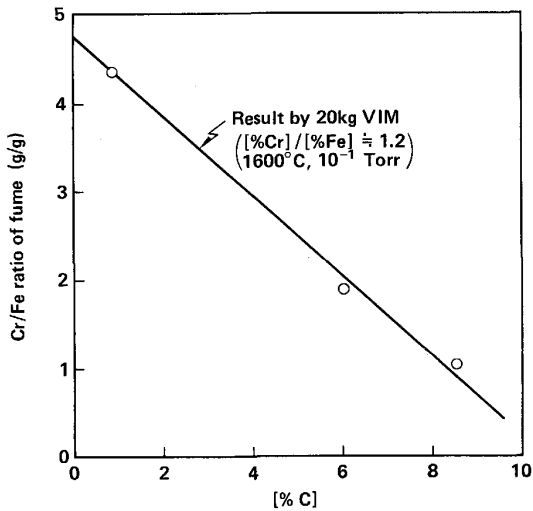


Fig. 7. Influence of [%C] on Cr/Fe ratio of fume from Cr-Fe-C melt.

Table 6. Result of analysis on dust formation.

	Contribution to the total dust (wt%)	Range of Cr-loss ratio as dust to added chromium (wt%)
(a) Fume	37~46	1.5~1.8
(b) Bubble bursting	25~42	1.0~1.8
(c) Carry over of ore	5~12	0.2~0.5
(d) Splash of slag	~12	~0.05
(e) Carry over of carbonaceous material	~ 5	—

0.5% 以下, 投入鉍石に対する飛散率としては 2% 以下という低い値になる。

このように, 予想外に飛散率を低くできた理由については, 桑原らがコールドモデル試験を行って次のことを示している¹³⁾。

飛散量は

$$\text{飛散量} = \left[\frac{\text{粒子流の表面積}}{A} \right] \times \left[\frac{\text{粒子流の表面に生ずる乱れの厚み}}{B} \right] \times \left[\frac{\text{飛散限界粒子径以下の粒子の割合}}{C} \right]$$

で近似される。ガス上昇速度, 粒径, 粒密度などの条件は, B, C 項に関係するが, それらの条件のいかんにかかわらず, 粒子群が広がる前にスラグ層に移行させることによって A 項を小さくできれば飛散率を小さい値に抑えることができることになる。

Fig. 5 に示した二つの方法はいずれもこの条件を満足していたことになる。

4.3 2次燃焼と着熱, 炭材銘柄の影響

製品メタルの P を低下するために系内への P のインプットを下げる方策としては,

- 1) 2次燃焼率を上げて炭材原料単位を下げること
- 2) りん含有量の低い炭材を使用すること

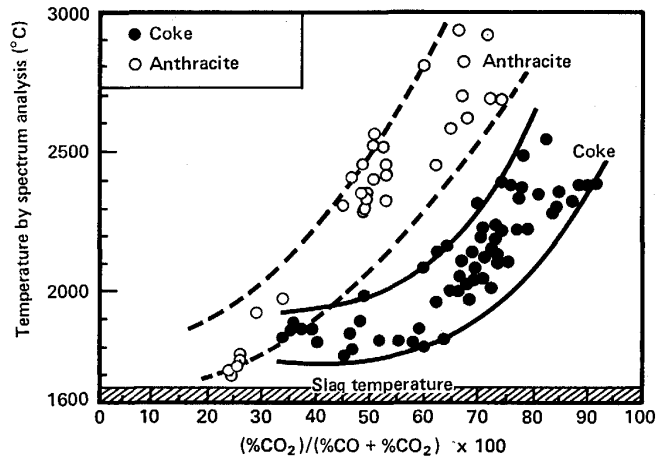


Fig. 8. Relation between post combustion ratio and temperature of atmosphere.

の二つがある。

2次燃焼率と炉内雰囲気温度の関係を Fig. 8 に示す。炉内雰囲気温度としては, 300~650 nm の範囲で連続スペクトルを測定し, 種々の波長の組合せにおいて 2色高温計の原理を計算し, 平均値として求めたものを用いた¹⁴⁾。この方法で, 特性スペクトルの影響を避けることができ, また, ダスト温度がほとんど雰囲気温度に等しいと考えられると, ガス温度にかなり近い値が得られていると思われる。

コークスのように揮発分含有量の低い炭材を用いた場合には 2次燃焼率が約 60% までは雰囲気温度の上昇を伴うことなく 2次燃焼率を上げることができる。しかし, それ以上, 2次燃焼率を上げようとする, 急激に排ガス温度が上がって着熱効率が低下することがわかる。

一方, 低りん炭材として試験した無煙炭の場合には, コークスの場合より低い 2次燃焼率から雰囲気温度の上昇がみられる。この現象は, 炭材に含まれている揮発分や水分の影響によるものである。

この現象は松尾らが鉄溶融還元法に関して提示している「固定炭素バランス」の考え方¹⁵⁾¹⁶⁾で説明可能である。

Fig. 8 の関係から揮発分を含有する炭材を使用して, 耐火物保護の観点から排ガス温度を上げることなく高 2次燃焼するためには, 溶融還元炉に入る前に炭材を加熱して揮発分含有量を低減しておくことが望ましい。

以上の観点から, ロータリーキルンでクロム鉍石とともに炭材を加熱する試験を行った。このような前処理を行った鉍石, 炭材を溶融還元炉で使用することにより, 操業的にも問題なく, P; 0.026% の低りんフェロクロムを製造することができた (Table 4)。

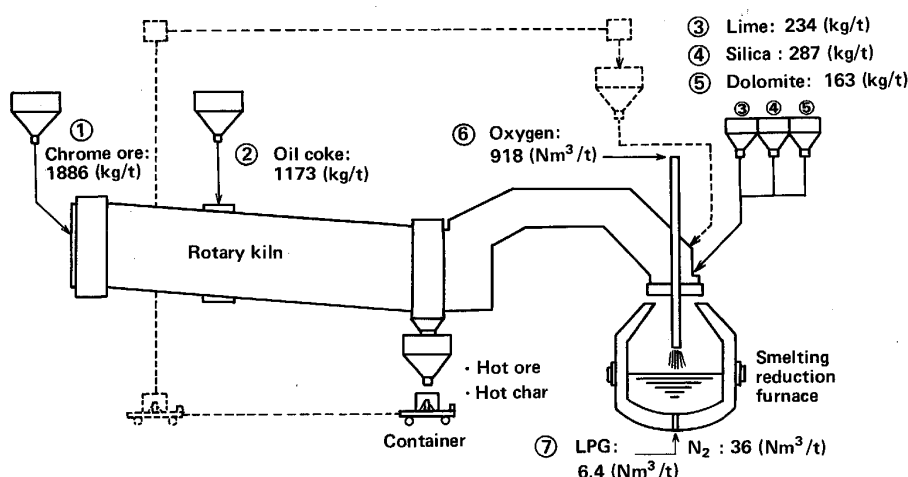


Fig. 9. Schematic diagram of the process.

Table 7. Comparison of characteristics of this process with conventional EF process.

Items		This process	Conventional EF process
Materials	Chrome ore	Fine ore can be used directly.	Lump ore or agglomerated ore are necessary.
	Carbonaceous	Many sort of carbonaceous materials can be used.	Carbonaceous materials with high strength are necessary.
Energy		Almost all of energy can be supplied by combustion of carbonaceous materials.	All the heat is supplied by electric power. (2 000~4 000 kW/t)
Product		[Si] and [S] level are lower than those in conventional. [P] level depends on the carbonaceous materials used.	[Si] level is high.
By-product		Amount of the slag is a little larger than that in conventional, but (T. Cr) level is lower.	—

5. 本法の評価と応用

本試験結果にもとづいて組み立てられる実機プロセス例と、その場合の原単位計算値を Fig. 9 に示す。

この製造プロセスを現行電炉法と比較した場合の特徴を Table 7 に示す。

本法の現行電炉法に対する製造コスト低減の程度は電力価格に依存する。本法はエネルギー費の差のほかにも鉍石前処理の簡略化が可能なこと、製品品質の自由度が大きいことなどの効果もあることから、コスト、製品品質の両面から有利な方法になりうると思われる。

なお、本法の「多量スラグによる遮断効果を利用した溶融還元」という原理は、残しスラグ操業方式を採用すれば、フェロクロム以外のメタルや合金の製造^{17)~25)}にも応用可能である。

6. ま と め

上底吹き転炉型溶融還元炉を用いる高炭素フェロクロム製造のパイロット試験 (2 t/h 規模) を行い、次のような結果を得た。

(1) 残し湯による繰返し操業の方式で安定した操業が

行えた。

(2) スラグ組成、底吹きガス攪拌などの適正条件を見出すことにより、クロム還元促進と耐火物溶損抑制の両立を可能にした。

(3) 粉鉍石を塊成化することなく上方から直接添加して飛散を抑制できる方式を開発した。

(4) 2次燃焼率と着熱効率の関係におよぼす炭材銘柄、とくに揮発分の影響を明らかにした。

これらの結果にもとづいてロータリーキルンで鉍石と低りん炭材を加熱する前処理工程と上底吹き転炉による溶融還元工程を組み合わせる高炭素フェロクロム製造方式を提案した。

この方式によると従来電炉法に比べてエネルギー費が安く、塊成化が不要で製造コストが下げられること、S, P などの不純物の低減がしやすいことなどの特徴がある。

また、本法の原理は他のメタル、合金の製造にも応用可能である。

本研究は共通基盤型石油代替エネルギー技術加速開発制度の補助金を受けて実施されました。

この研究を行う上でお世話になり、かつ発表を許可さ

れた製錬新技術研究組合の関係者の方々、およびご指導をいただいた東京大学工学部 相馬胤和名誉教授、佐野信雄教授、東北大学選鉱製錬研究所 徳田昌則教授に感謝いたします。

文 献

- 1) M. KAWAKAMI and K. ITO: Proc. the 4th Japan-Nordic Countries Joint Symposium on Science and Technology of Process Metallurgy, Tokyo (1986), p. 136
- 2) T. HAMADA, Y. TAKADA, K. IGAWA, H. KATAYAMA, S. TAKEUCHI, T. FUKUTAKE and K. NAKANISHI: Proc. International Symposium on Smelting Reduction, Shenyang (1986), p. 272
- 3) 福島 勤, 川崎 清, 佐々木貞行: 鉄と鋼, **69** (1983), S 834
- 4) 鉄鋼界(製錬新基盤技術研究組合, 溶融還元製錬技術委員会編) (1988) 9, p. 40
- 5) 宮崎富夫, 山岡秀行, 佐藤 駿, 亀井康夫, 深川 信: 鉄と鋼, **73** (1987), S 128
- 6) 桑原正年, 片山裕之, 藤田正樹, 石川英毅, 佐々木俊明: 鉄と鋼, **70** (1985), S 116
- 7) 榎戸恒夫, 桑原正年, 片山裕之, 藤田正樹, 佐々木俊明: 鉄と鋼, **70** (1985), S 117
- 8) 桑原正年, 片山裕之, 斎藤 力, 石川英毅, 藤田正樹: 鉄と鋼, **70** (1985), S 118
- 9) H. KATAYAMA, M. FUJITA, M. KUWABARA, H. ISHIKAWA and H. KAJIOKA: Proc. The 10th Japan-USSR Joint Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Process, Tokyo (1985), p. 75
- 10) 藤田正樹, 片山裕之, 桑原正年, 斎藤 力, 石川英毅, 梶岡博幸: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 680
- 11) 平田 浩, 片山裕之, 瀧 保成: 鉄と鋼, **72** (1986), S 114
- 12) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 672
- 13) 桑原正年, 平田 浩, 大野剛正, 山内雅夫: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 111
- 14) 平田 浩, 片山裕之, 小林三郎: 界面移動現象部会中間報告書(日本鉄鋼協会編) (1989), p. 82
- 15) 松尾充高, 佐藤 満, 斎藤 力, 平田 浩, 片山裕之, 石川英毅: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 163
- 16) 松尾充高, 斎藤 力, 片山裕之, 平田 浩, 小川雄司: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1879
- 17) 松尾充高, 斎藤 力, 片山裕之, 平田 浩, 金本通隆, 茨城哲治: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 1871
- 18) 北村信也, 新井貴士, 松尾充高, 佐藤宣雄, 大河平和男, 石川英毅: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 672
- 19) 平田 浩, 松尾充高, 片山裕之, 石川英毅, 梶岡博幸, 北村信也, 大河平和男: 鉄と鋼, **73** (1987), S 874
- 20) 新井貴士, 武田欣明, 新飼昭男, 岸上公久, 佐藤宣雄: 鉄と鋼, **73** (1987), S 875
- 21) 北村信也, 大河平和男, 松尾充高, 佐藤宣雄, 石川英毅: 鉄と鋼, **73** (1987), S 876
- 22) 馬田 一, 田岡啓造, 山田純夫, 石塚晴彦, 民田彰輝: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 135
- 23) K. MARUKAWA, S. ANEZAKI, T. HIRATA and M. ISHIKAWA: Proc. International Symposium on Smelting Reduction, Shenyang (1986), p. 304
- 24) 藤田正樹, 片山裕之, 石川英毅, 梶岡博幸: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 801
- 25) H. KATAYAMA, M. FUJITA, H. ISHIKAWA and H. KAJIOKA: Proc. International Symposium on Smelting Reduction, Shenyang (1986), p. 290