

溶融還元炉内での石炭の細粒化とその抑制方法

論文

片山 裕之*・河村 隆文*²・平田 浩*²
 大野 剛正*²・小林 勝明*²・山内 雅夫*³

Fragmentation of Coal in Smelting Reduction Furnace and Its Suppression

Hiroyuki KATAYAMA, Takafumi KAWAMURA, Hiroshi HIRATA,
 Takamasa OHNO, Katsuaki KOBAYASHI and Masao YAMAUCHI

Synopsis :

One of the problems with the direct use of coals containing a high level of volatile matter (high VM coal) in a smelting reduction furnace is fragmentation. This leads to an increase of the amount of carbonaceous material which becomes dust when a high VM coal is used, to a level higher than 5% of the added fixed carbon, or a few times that when coke is used. In this paper, the simulation method of fragmentation and the influence of heating conditions on fragmentation were investigated and a pretreatment process for coal was considered.

(1) The fragmentation of coal in a smelting reduction furnace could be simulated by a series in which there was the heating of coal, rotating it in a drum tester and calculating the consumption by reaction.

(2) The influence of the heating condition on fragmentation was investigated by the simulation test. When high VM coal was heated at the temperature of 800-900°C, the volatile matter could be removed, as well as keeping fragmentation at a low level.

(3) Based on above results, the char, which was produced by preheating a high VM coal in a rotary kiln, in which the highest temperature was 850°C, was used in 5 ton smelting reduction furnace. The amount of carbonaceous dust was decreased to almost the same level as with coke.

Key words : smelting reduction ; coal ; fragmentation ; preheatment ; dust ; prereduction.

1. 緒 言

鉄溶融還元法開発の狙いの1つとして、高炉法では必須のコークス化工程を省略することがあげられている。しかし、揮発分含有量の高い石炭(以下、高VM炭と呼ぶ)を前処理なしで、溶融還元炉に直接使用すると、いくつかの問題を生じる。すでに

(1)揮発分含有量がふえるほど、二次燃焼率

$$\left(\frac{(\% \text{CO}) + (\% \text{H}_2)}{(\% \text{CO}) + (\% \text{CO}_2) + (\% \text{H}_2) + (\% \text{H}_2\text{O})} \times 100\% \right) \text{ が}$$

低下し、石炭原単位が増加する¹⁾。

(2)石炭の急速加熱に起因して細粒化がおり飛散し

やすくなる²⁾。

などが指摘されている。

本報では(2)の問題について、次の4つのステップで検討を行った結果を報告する。

(1)塊石炭を前処理なしに溶融還元炉に投入した際の挙動を調査する。

(2)溶融還元炉内での石炭の細粒化現象をシミュレートできる試験方法を確立する。

(3)その試験方法を用いて細粒化機構および細粒化抑制のための条件を検討する。

(4)炭材細粒化抑制対策の効果を実際に溶融還元炉試験で確認する。

平成3年10月21日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Oct. 21, 1991 ; Accepted on Apr. 10, 1992)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*² 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)堺製鉄所 (Sakai Works, Nippon Steel Corp.)

2. 溶融還元炉で直接、石炭を使用した場合

2.1 試験方法

製鋼転炉を改造した大型溶融還元試験設備で、Table 1 に示す高 VM 石炭、および比較材としてコークスを炉上方から連続的に添加し、炭材飛散率の測定、炉内炭材の粒度の調査などを行った。溶融還元炉の設備、操業条件は、さきに報告しているものとはほぼ同じである³⁾。

石炭は 6 mm でふるい分けているが、溶融還元炉に装入する時点では 2 mm 以下のものが約 7 wt% 含まれている。なお、比較に用いたコークスも粒度分布は高 VM 石炭とほぼ等しい。

炭材飛散率は、(1)式によって定義される。

炭材飛散率 =

$$\frac{\text{ダスト中の炭素分 (kg/h)} \times 100}{\text{炉内に投入された炭材中の固定炭素分 (kg/h)}} \dots\dots\dots(1)$$

2.2 試験結果

Fig. 1 に示すように、炭材の飛散率は炉内スラグ存在量が増えるほど減少する傾向があるが、高 VM 炭使用の場合には、スラグを十分に多くしても 5% 以上飛散している。これは、コークス使用の場合の飛散率; 1~3% に比べて明らかに高い値である。

なお、もともと石炭中に存在していた 2 mm 以下の粉

Table 1. Coal and coke used in a 100 ton furnace.

	F. C. (%)	V. M. (%)	Ash (%)	Size
Coal	55.2	36.5	8.3	> 10 mm : 75% 10 ~ 2 mm : 18% < 2 mm : 7%
Coke	87.3	0.6	11.4	> 10 mm : 75% 10 ~ 2 mm : 16% < 2 mm : 9%

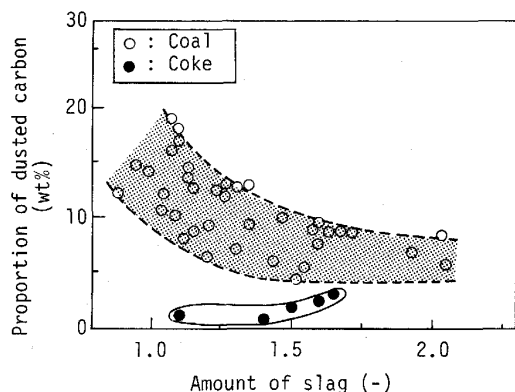


Fig. 1. Influence of the type of carbonaceous material and the amount of slag on the proportion of carbon dust (in a 100 ton smelting reduction furnace).

だけが選択的に飛散したのではないかという仮定は、ほぼ同じ程度の粉を含んだコークスを使用した場合の飛散率は低いことから、否定される。

Fig. 2 は定常状態の溶融還元操業を中断して炉を倒し、炉内に存在する炭材を採取して、粒度分布を測定した結果を示す。投入時点では石炭とコークスではほぼ同じ粒度分布であったが、炉内炭材の粒度分布には明らかに差が認められる。すなわち、石炭の場合には炉内で細粒化が進行していることがわかる。

炉内から採取した炭材の状況は、コークスの場合には全体として丸みを帯びており、炉内に長時間存在して表面から徐々に損耗が進んでいることを示している。一方、石炭使用の場合には角張ったものが多い。これも割れによって細粒化が進んでいることを示している。

以上のように、溶融還元炉に高 VM 石炭を直接投入した場合には、石炭の割れが起こって細粒化し、その結果、飛散率が増加していることが伺えた。

3. 石炭細粒化現象のシミュレーション方法

石炭を急速加熱して状況を観察すると、ふくれるとともに、割れが発生したり、また粒同士がくっついたりして、ざくろ状になっている。人がピンセットを用いて各々の粒を分離できる。溶融還元炉中では、このような状態の炭材がスラグ浴でもまれて脆弱な部分が剥離して細粒化すると推定される。そこで、石炭の細粒化傾向を

(1) 静かな状態で急速加熱

(2) 加熱後の石炭をほぐす

という操作で評価することを試みた。

まず、1350°C の溶銑 (C = 4.2%, Si = 0.1%, 600 kg) 上に石炭 (直径; 20~30 mm) を 600 g 投入して 5 分間保持した。次いで、取り出した炭材を、ドラム試験機

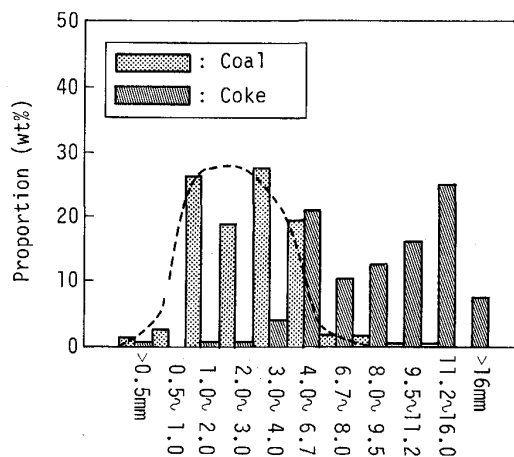


Fig. 2. Size distribution of carbonaceous material in a 100 ton smelting reduction furnace.

(内径 710 mm, 長さ 510 mm, 90 mm 高さの羽根 1 枚つき, 30 rpm) にかけた。ドラム回転回数は 50 回を超えると粒度分布に及ぼす影響は小さくなる。比較的早い時点で、こわれやすい部分は割れてしまい、以後は表面の摩耗のような形で少しずつ粉発生が進むためと推定される。そこで、ドラム試験は 150 回転を標準条件とした。

このようにして得られた粒度分布が、絶対値として溶融還元炉内の細粒化現象をどの程度シミュレートできているかを以下のようにチェックした。

(1) 溶融還元炉に投入された石炭は、即座に上記の方法でシミュレーションされた細粒化をおこすと仮定して、以後の炉内での化学反応による消耗も考慮して、定常操業状態での炉内炭材の粒度分布を計算した。手順の詳細は Appendix に示す。

(2) 得られた計算結果を、溶融還元炉の測定結果と比較した。その 1 例を Fig. 3 に示す。炭材粒度の絶対値がほぼ一致している。また、溶融還元炉内の現象は複雑であることを考えれば、粒度分布もかなりよくシミュレートできているといえる。

溶融還元炉の平均上昇ガス流速から逆算すると飛散する炭材の限界粒径は 2 mm 程度である。Fig. 3 において、炉内での化学反応による損耗を考慮すれば、飛散がおこるかどうかの限界粒径である 2 mm, 割れシミュレート試験後では約 4 mm に相当する。

したがって、溶融還元炉内での炭材細粒化は上記の方法でシミュレートできるとし、特に飛散に関係する特性値として 4 mm 以下の発生割合に着目して、炭材銘柄、加熱条件の影響を調べることにした。

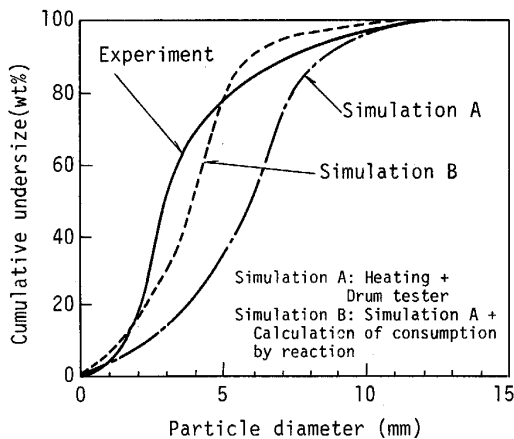


Fig. 3. Comparison of size distribution by simulation and by experiment (high VM coal in a 100 ton smelting reduction furnace).

4. 石炭加熱時の割れ発生に及ぼす諸要因の影響

4.1 試験条件

前項で述べたシミュレーション試験方法で、種々の試験条件を変更して、細粒化におよぼす諸条件の影響を調べた。変更した試験条件を Table 2 に示す。溶銑上での加熱は中～高 VM 炭 (一般炭 3 種類, 原料炭 3 種類) および無煙炭 (2 種類) についてを試験した。加熱処理前の炭材のサイズを 3 段階に変えた。

高 VM 炭の 1 種類については溶銑上の急速加熱のほかに、200°C から 1000°C までの各温度に保持された回転炉 (電気加熱, 内径; 290 mm, 長さ; 320 mm, 外部から窒素ガスを吹き込み) に石炭を 500 g 一括投入して 1.7 rpm で 1 時間加熱処理したのち、冷却し、ドラム試験を行った。なお、本試験では加熱温度と加熱速度は交絡している。

Table 2. Experimental conditions of a simulation test on fragmentation of coal.

	Heating condition	Types of coal (15.9 ~ 20 mmφ)			
		VM (%)	Ash (%)	Remarks	
I	Put on the molten pig iron (1350°C)	A	32.5	15.0	Non-coking coal
		B	34.3	9.3	Non-coking coal
		C	25.8	14.0	Non-coking coal
		D	33.5	7.1	Coking coal
		E	31.9	8.1	Coking coal
		F	22.9	9.6	Coking coal
		G	7.5	12.0	Anthracite
		H	3.5	11.5	Anthracite
II	Type of coal	Size of coal (mmφ)		Heating conditions	
	Coal A (HVM)	(i)	5.6 ~ 9.5	• 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000°C (In rotary furnace)	
		(ii)	15.9 ~ 20.0		
(iii)		20.0 ~ 30.0	• 1350°C (On molten pig iron)		

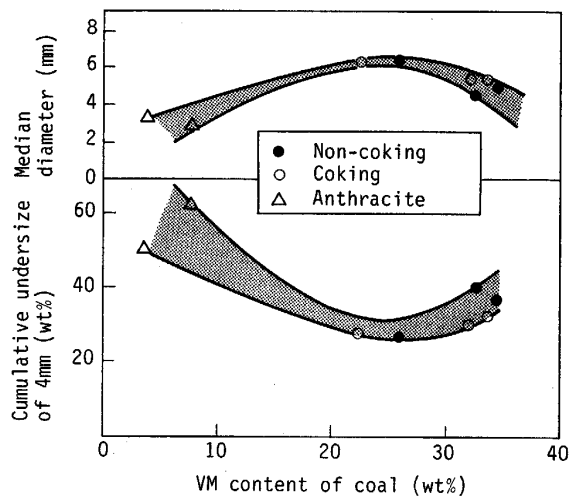


Fig. 4. Fragmentation in a simulation test of various types of coals heated on molten pig iron (1350°C) (Initial size: 15.9~20.0 mm).

なお、同一銘柄の石炭を処理して別々に粒度分布曲線を求めると、各粒径の累積篩下重量割合の値のばらつきは±3%（絶対値として）の範囲内であった。

4.2 試験結果

溶銑上に投入した試験時の粒度分布におよぼす石炭銘柄の影響を Fig. 4 に示す。中～高 VM 炭については石炭銘柄の影響が比較的小さい。一般炭に比べて原料炭の方がやや細粒化の程度が小さいようにも見えるが、その差は大きくない。なお、無煙炭については試験に用いた銘柄はいずれも、中～高 VM 炭より細粒化しやすかった。無煙炭の場合、炭材の断面を観察すると、緻密な組

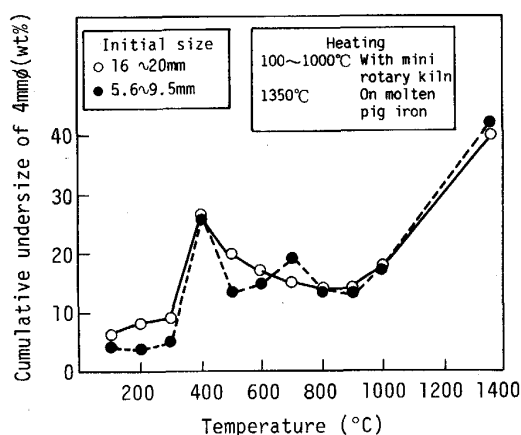


Fig. 5. Influence of heating temperature and the initial size of high VM coal on the formation of small size char in a simulation test.

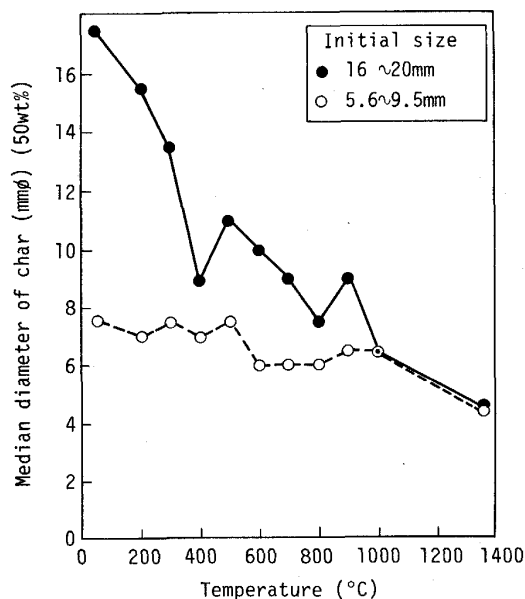


Fig. 6. Influence of heating temperature and the initial size of high VM coal on the median diameter of char in a simulation test.

織のなかにクラックが生成しており、後述する中～高 VM 炭の場合と異なっている。

高 VM 炭について加熱温度・加熱前粒度の影響を Fig. 5, 6 に示すが、次のようにまとめられる。

(1) 4 mm 以下の発生比率は 300°C 以下の加熱ではほとんど変化しないが、400°C 加熱で急激に増加する。

(2) 400~900°C に加熱した場合には、温度が高いほど 4 mm 以下の比率は減少する。

(3) 1000°C 以上では細粒化率が増え、溶銑上で加熱の場合は、900°C 加熱の場合に比べて 4 mm 以下の発生率は約 3 倍になっている。

(4) 加熱前粒径が、5.6~9.5 mm の場合と 15.9~20.0 mm の場合を比べると、4 mm 以下の発生比率はほとんど同じである。

(5) 処理後平均粒径（ふるい下分が 50 wt% の時の径と定義する）は、加熱温度の上昇とともに小さくなるが、その低下の割合は初期の径が大きいほど激しい。

以上の結果より、高 VM 炭を使用した場合の炭材飛散に関する細粒の発生原因およびその抑制策として次のことがあげられる。

① 1350°C のような高温で急速加熱すれば、石炭銘柄、初期粒度に関係なく、4 mm 以下の発生比率が高くなる。

② 400°C での保持は好ましくないが 600~900°C で加熱すると、4 mm 以下の発生比率を大幅に低下できる。

なお、Fig. 7 に示すように 800°C 以上で加熱すると残留揮発分は 2% 以下になっているので、次工程で、1350°C に加熱しても、新たな割れによる細粒化の進行はほとんどないと思われる。

したがって、溶融還元炉内での炭材割れ発生抑制のため

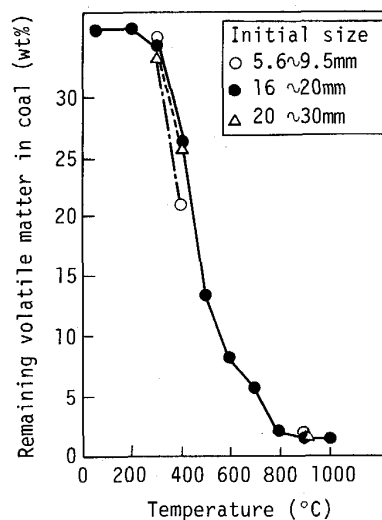


Fig. 7. Remaining volatile matter in coal heated at various temperatures in a simulation test.

めに効果的な方法は、800~900°Cの温度で加熱して揮発分を除去した後、溶融還元炉に添加することであると思われる。

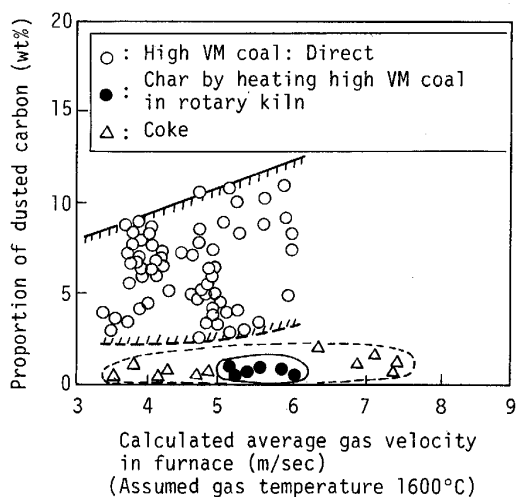


Fig. 8. Influence of the types of carbonaceous materials on the proportion of carbon dust in a 5 ton smelting reduction furnace.

5. 石炭割れ発生防止策の効果確認試験

高 VM 石炭をロータリーキルンで加熱して、生成したチャーを溶融還元炉に投入する試験を行った。ロータリーキルンでの最高加熱温度は 850°C である。また、溶融還元炉は 5 t 規模の試験炉⁴⁾である。

Fig. 8 に示すように、上記の方法で製造したチャーを使用した場合、炭材飛散率はコークス使用の場合とはほぼ同じであった。すなわち、高 VM 一般炭を用いる場合にも溶融還元炉に装入する前に、850°C 程度の温度で加熱することによって、溶融還元炉内での細粒化に起因する飛散をコークス使用の場合と同程度に抑制できることが確認できた。

6. 考 察

6.1 急速加熱による石炭の細粒化の機構

コークスの引張強度は基質強度と空隙率で整理できることが知られている⁵⁾。本報の高 VM 炭の細粒化に及ぼす加熱温度・速度の影響 (Fig. 5) は、同じ考え方で説明できる。

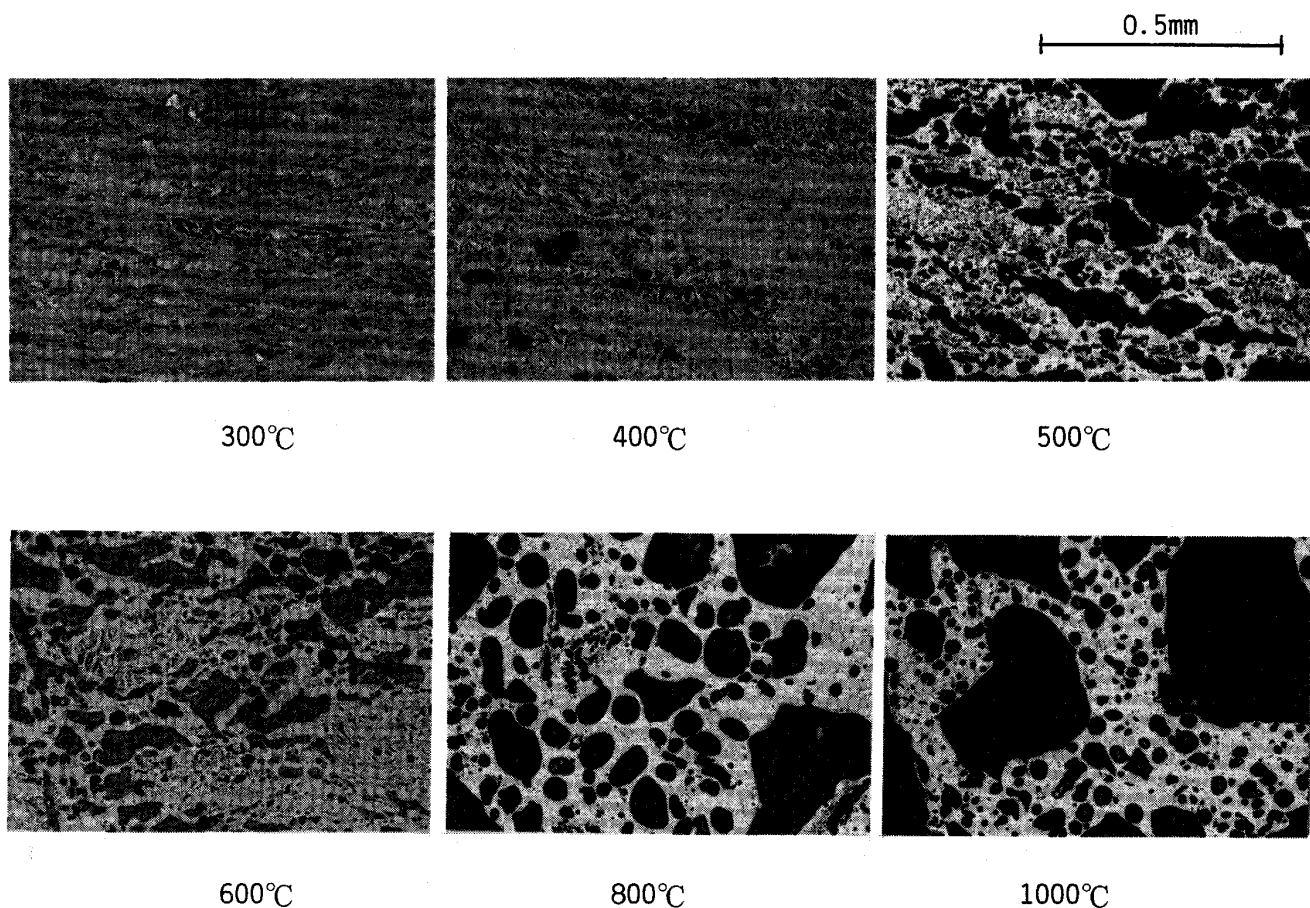


Photo. 1. Microstructure of high VM coal heated at various temperatures.

Table 3. Comparison of properties of coals heated at 300°C and 400°C.

Temp.	-4mm (wt%)	VM (wt%)	Density (g/cm ³)	Volume of pore (cm ³ /g)	Average diameter of pore (μ)
300°C	5~9%	35.2%	0.63~0.72	0.059	0.024
400°C	26%	25.5%	0.48~0.55	0.451	0.128

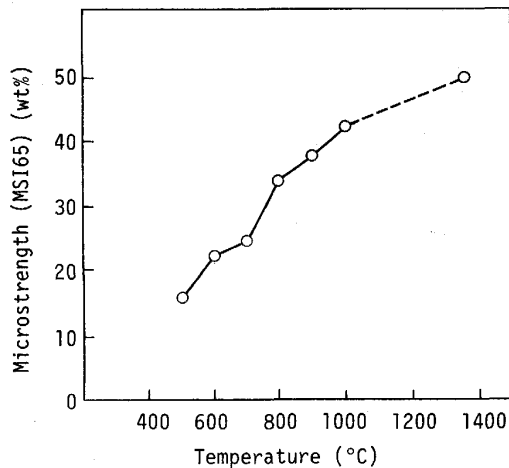


Fig. 9. Influence of temperature in the heating of high VM coal on the microstrength of the diameter of char.

300°C と 400°C の加熱物の性状の差を Table 3 に比較している。400°C で加熱すると、気孔率、気孔径の増加がおこっている。さらに加熱温度が高くなると（すなわち、加熱速度が大きくなると）、気孔率、気孔径は増加するが（Photo. 1）、マイクロストレング（MSI65⁶⁾）が増加する（Fig. 9）。

すなわち、高 VM 炭を加熱した時の細粒化に及ぼす温度の影響は、定性的には、加熱によって脆くなる要因と、加熱によって強くなる要因の組合せとして説明できる。

なお、無煙炭の場合は、緻密層内のクラック発生が細粒化の主原因であり、中～高 VM 炭の場合とは細粒化の機構が異なる。

6.2 溶融還元における石炭予備処理の位置付け

溶融還元法においては、コークス化工程を省略することが開発の狙いの1つにあげられている。しかし、全く予備処理なしで石炭を溶融還元炉に投入すれば種々の点で不利なことがわかってきたので、石炭についてどのような前処理を行うのが溶融還元プロセス全体として最も有利になるか検討する必要がある。

本報で着眼されたのは、水分低減だけでなく、2次燃焼率低下と細粒化・飛散率増加の問題を同時に解決する

ために、溶融還元炉に装入する前に高 VM 塊石炭を加熱して、細粒化を抑制しつつ揮発分含有量を低下することである。加熱パターンとしては加熱速度と加熱温度の組み合わせとして種々なものが考えられるが、今回得られた試験結果によると、細粒化抑制は、高 VM 炭を 800~900°C の雰囲気投入時に得られる加熱速度では可能である。この加熱条件は、『一般炭を使用した簡易チャー化プロセス』として実現することは可能であるが、さらに溶融還元システムとして特徴を発揮しようとするれば、その工程を鉍石予備還元工程と組み合わせることが考えられる。すなわち、石炭加熱時に発生する揮発分を鉍石予備還元へ有効に利用することである。この場合、タール発生の問題を回避しようとするれば発生した揮発分を直接、加熱された鉍石に反応させるプロセスが考えられる⁷⁾。すでに基礎試験によって、揮発分、とくに水素分を鉍石予備還元へ有効に利用するための石炭添加時の鉍石加熱温度条件として 800°C、あるいはそれ以上という結果が報告されている⁸⁾⁹⁾。この温度は、本報で求められた、石炭細粒化抑制のための予備処理条件とほぼ一致している。したがって、温度的には、石炭の割れ発生抑制と鉍石予備還元への揮発分の利用を両立させることが可能である。

7. ま と め

(1) 溶融還元炉に前処理なしで高 VM 塊石炭を投入すると細粒化が起こり、コークスの場合に比べて飛散率が数倍に増加する。

(2) 溶融還元炉に投入された石炭の細粒化現象を、石炭の急速加熱と回転ドラム試験の組み合わせによりほぼシミュレートできた。

(3) そのシミュレーション試験により、石炭の細粒化に及ぼす石炭銘柄、初期粒径、加熱条件の影響を、とくに 4 mm 以下の発生率を特性値として調べた。溶融還元炉への直接投入に対応する条件では、石炭銘柄、初期粒径に関係なく細粒化が進行した。

加熱条件については、加熱温度と加熱速度が交絡した試験条件であるが、400°C と 1350°C 加熱の場合に細粒化が著しく、一方、700~1000°C、とくに 800~900°C で加熱した場合は、4 mm 以下の細粒発生率を低く抑えられる。

(4) ロータリーキルンで 850°C まで加熱してチャーにしたものを溶融還元炉に投入する試験を行い、飛散率は塊コークス使用の場合と同じレベルまで下げられることを確認した。

(5) 溶融還元炉内での石炭の細粒化に及ぼす加熱条件

の影響は、加熱によって脆化が促進される要因（揮散、急速加熱による熱割れおよび脆弱組織の形成）と加熱によって強度が増加する要因（新たなボンデング形成に炭素地の強度向上）の組み合わせによって説明できる。

(6) 試験結果より、石炭を 800~900°C の温度範囲で加熱すると、高 VM 一般炭を溶融還元炉で使用する場合の細粒化の問題を解決できる。さらに、この加熱条件は、石炭を予熱された鉱石に接触させて発生する揮発分を鉱石予備還元の有効利用するための条件とほぼ一致しており、温度的には、細粒化抑制と発生した揮発分による鉱石の予備還元の工程を組み合わせることが可能といえる。

本論文中『2. 溶融還元炉で直接、石炭を使用した場合』は、日本鉄鋼連盟溶融還元研究開発委員会の共同研究において得られた成果である。

Appendix

溶融還元炉内の炭材粒度分布の計算方法

化学反応による炭材の損耗を考慮し、Population Balance の手法¹⁰⁾を用いて、理論計算した。溶融還元炉は定常状態で操業されており、炭材の粒度分布が炉内の各場所で等しいと仮定する。

単位時間における粒径 $r_P \sim r_P + \Delta r_P$ 間の炭材粒子の物質収支を求めると、

$$F_{in}P_{in}(r_P)\Delta r_P - F_E P_E(r_P)\Delta r_P + [W_B P_B(r_P) dr_P/dt]_{r_P=r_P} - [W_B P_B(r_P) dr_P/dt]_{r_P=r_P+\Delta r_P} + 3 W_B P_B(r_P) (dr_P/dt) \Delta r_P / r_P = 0 \dots\dots\dots (A1)$$

ここに、第一項は供給炭材量、第二項は飛散炭材量、第三項および第四項は反応による粒径 $r_P \sim r_P + \Delta r_P$ 間流入流出収支、第五項は炭材消失重量である。第五項の単位時間における炭材消失重量は、以下のように求まる。

スラグ中における粒径 $r_P \sim r_P + \Delta r_P$ 間の炭材個数を N とすると、

$$N = 3 W_B P_B(r_P) \Delta r_P / (4 \pi r_P^3 \rho_P) \dots\dots\dots (A2)$$

単位時間における粒径 $r_P \sim r_P + \Delta r_P$ 間の炭材粒子の消失重量を M とすると、

$$M = \rho_P N (dV/dt) \dots\dots\dots (A3)$$

ここに、 $dV = 4 \pi r_P^2 dr_P$ とすると第五項が求まる。

(A1)式において、 $\Delta r_P \rightarrow dr_P$, $R_a = dr_P/dt$ (粒径減少速度), $K_E(r_P) = F_E P_E(r_P) / W_B P_B(r_P)$ (炭材飛散速度係数) とおくと、 $F_{in}P_{in}(r_P) - K_E W_B P_B(r_P) - W_B [R_a P_B(r_P)] / dr_P + 3 W_B P_B(r_P) R_a / r_P = 0 \dots\dots\dots (A4)$

まず、単分散（粒子径単一）分布の炭材供給を考え、それを供給炭材に粒度分布がある場合に拡張することで、計算式を導出する。

供給炭材の粒子径を r_{Pi} とすると、溶融還元炉内では

$r_P \leq r_{Pi}$ となる。 r_{Pi} を含まない $r_P \sim r_P + \Delta r_P$ 間において、(A4)式を適用すると、

$$- K_E(r_P) W_B P_B(r_P) - W_B P_B(r_P) dR_a/dr_P - W_B R_a dP_B(r_P)/dr_P + 3 W_B P_B(r_P) R_a/r_P = 0 \dots\dots\dots (A5)$$

整理すると、

$$dP_B/dr_P = [3/r_P - (dR_a/dr_P)/R_a - K_E(r_P)/R_a] P_B \dots\dots\dots (A6)$$

次に $P_B(r_{Pi})$ については、(A1)式から得られる $F_{in} + W_B P_B(r_{Pi}) R_a(r_{Pi}) = 0$ を用いる。

(A6)式を積分し、炉内粒径分布を求めると、

$$P_B(r_P) = - (F_{in}/W_B R_a) (r_P^3/r_{Pi}^3) I(r_P, r_{Pi}) \dots\dots\dots (A7)$$

ここで、

$$I(r_P, r_{Pi}) = \exp\left[-\int_{r_{Pi}}^{r_P} (K_E(r_P)/R_a(r_P)) dr_P\right] \dots\dots\dots (A8)$$

$\int_0^{r_{Pi}} P_B(r_P) dr_P = 1$ を用いて、(A7)式を積分すると、

$$W_B/F_{in} = - \int_0^{r_{Pi}} r_P^3 I(r_P, r_{Pi}) / (R_a r_{Pi}^3) dr_P \dots\dots\dots (A9)$$

供給炭材に粒度分布がある場合は、前述の単分散の結果を用いればよい。

$$P_B(r_P) = \int_{r_P}^{r_{PM}} P_B(r_P, r_{Pi}) P_{in}(r_{Pi}) dr_{Pi} \dots\dots\dots (A10)$$

ここで、 $P_B(r_P, r_{Pi}) P_{in}(r_{Pi}) dr_{Pi}$ は、供給炭材の粒径 r_{Pi} のもののうち、スラグ中の粒径が r_P であるものの割合を示す。 $P_B(r_P, r_{Pi})$ は、(A7)式から得られるから、

$$P_B(r_P) = - (F_{in} r_P^3 / W_B R_a) I(r_P, r_{PM}) \int_{r_P}^{r_{PM}} P_{in}(r_{Pi}) dr_{Pi} / r_{Pi}^3 I(r_{Pi}, r_{PM}) \dots\dots\dots (A11)$$

$$W_B/F_{in} = - \int_0^{r_{PM}} r_P^3 I(r_P, r_{PM}) / R_a dr_P$$

$$\int_{r_P}^{r_{PM}} P_{in}(r_{Pi}) dr_{Pi} / r_{Pi}^3 I(r_{Pi}, r_{PM}) \dots\dots\dots (A12)$$

F_{in} , P_{in} , K_E および R_a を与えれば、(A12)式から W_B , (A11)式から $P_B(r_P)$ が求まる。数値計算により積分は実行する。

計算に必要な供給炭材の初期粒度分布 P_{in} は、加熱に伴う物理的な割れを想定して、本報のシミュレーション試験結果、すなわち、加熱後、ドラム試験した後の結果を用いた。一方、炉内炭材の損耗は、①酸素ジェットによる燃焼・ガス化、②スラグ中の酸化鉄の還元反応、③メタルへの浸炭によって起こるが、炭材粒径減少速度 R_a は、炭材表面への物質移動律速と仮定し、粒径の逆数に比例する ($R_a = -K_R/r_P$) とした。速度定数 K_R は、実験から得られる炉内炭材量 W_B に合致するよう決定

した。炭材飛散の影響は無視した。

記号

F_E : 炭材飛散速度 (g/s)
 F_{in} : 炭材供給速度 (g/s)
 K_E : 炭材飛散速度定数 (1/s)
 K_R : 炭材粒径減少速度係数 (cm²/s)
 P_E : 飛散炭材粒径分布関数 (1/cm)
 P_{in} : 供給炭材粒径分布関数 (1/cm)
 P_B : スラグ中炭材粒径分布関数 (1/cm)
 R_a : 炭材粒径減少速度 (cm/s)
 r_P : 炭材半径 (cm)
 r_{Pi} : 供給炭材粒子径 (cm)
 r_{PM} : 供給炭材最大粒径 (cm)
 t : 時間 (s)
 V : 炭材粒子体積 (cm³)
 W_B : スラグ中炭材重量 (g)
 ρ_P : 炭材密度 (g/cm³)

文 献

- 1) 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
- 2) 鈴木喜夫, 板垣省三, 三谷成康: 金属製錬プロセスにおける高温界面移動現象 (鉄鋼基礎共同研究会界面移動現象部会編) (1991), p. 341
- 3) 山内雅夫, 茨城哲治, 金本通隆, 斎藤 力, 松尾充高, 平田 浩, 稲谷稔宏: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1074
- 4) 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
- 5) 石炭の炭化反応機構 (日本鉄鋼協会特定基礎研究会石炭の炭化反応機構部会編) (1989), p. 165
- 6) H. E. Blayer, W. Nobel and H. L. Riley: J. Iron Steel Inst., **86** (1937), p. 4
- 7) 桑原正年, 斎藤 力: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 120
- 8) 碓井建夫, 森田善一郎, 渡辺 剛, 横山隆宏: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 33
- 9) 片山裕之, 桑原正年: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 35
- 10) D. Kunii and O. Levenspiel: Fluidization Engineering (1969), p. 326 [John Wiley & Sons]
- 11) 片山裕之, 桑原正年, 小林勝明, 大野剛正, 茨城哲治, 金本通隆: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 36