

鉄鉱石の破碎における多段粉碎の整粒効果*

向 井 滋**・一伊達 稔***

Effect of Multi-Stage Crushing on the Size Distribution
Control of Crushed Product of Iron Ore

Shigeru MUKAI and Minoru ICHIDATE

Synopsis:

The prevention of undesired fine particles production during the crushing of iron ores is one of the important problems in the blast furnace burden preparation.

This paper presented a study on the size distribution of the crushed product of iron ores under various reduction ratios and on the benefit of the multi-stage crushing.

Crushing experiments with several reduction ratios confirmed that the amount of fine particles in the crushed product increased with increasing the reduction ratio and that the size distribution of the crushed product agreed well with the GAUDIN-MELOY equation. The relationship between the size ratio r in the GAUDIN-MELOY equation and the reduction ratio R was obtained as the following equation with two constants, a and b ;

$$r = a(R)^b$$

Using the above results, the size distribution of the final product in any multi-stage crushing can be calculated.

As a result, it is distinctly recognized that the multi-stage crushing benefits for the size distribution control of the crushed product.

(Received Apr. 23, 1968)

1. 緒 言

溶鉱炉装入鉱石は、鉱石の還元の見地からこれを破碎して炉内に装入することが有効であり、装入鉱石を破碎した場合コークス比は歴然と低下することが示されている。しかるに一方、プラストによる飛散あるいは炉内空隙率の観点から装入鉱石の最小粒径は10~8mm程度に制限されている。このため、特定の粒径範囲内の破片をできるだけ多量に獲得し不必要な微粉の生成を防止する整粒粉碎は、溶鉱炉操業の事前処理としてきわめて重要な問題である。

しかしながら整粒粉碎に関する研究は、鉱石の粉碎機構など粉碎に関する基本的な問題が未解決のうえに、粉碎に関連する要素が多岐にわたっており、個々の条件と整粒効果とを関連づけることが困難であり、ほとんど行なわれていないのが現状である。

著者らは整粒粉碎の第1着手として、各種の鉄鉱石について、破碎比を変化した場合の微粉の生成割合を検討し、この結果を基にして鉄鉱石の整粒粉碎に対する破碎段数の効果を検討することを試みた。

2. 破 碎 試 験 法

本研究は、溶鉱炉装入物の破碎について検討することを目的とするものであるから、ボールミルなどによる微粉碎にはふれず、クラッシャーによる破碎について検討した。

圧縮粉碎のモデル実験を行なうために、破碎機としてクラッシングロールを採用した。破碎試験に用いたクラッシングロールは20cm・φ×15cm・lのロール2個をもつ実験室用のもので、ロールの回転数は220rpmである。

種々の破碎比を得るために、クラッシャー給鉱の大きさを9.4mmから1.7mmまで変化し、かつクラッシングロールのセット(set)間隔を1mmおよび3mmに変えて破碎試験を行なった。

破碎試験に供した試料は、鉄鉱石の仕事指数(work index)¹⁾の値を考慮してインド鉱、韓国鉱、チリー混合

* 昭和42年10月本会講演大会にて発表

昭和43年4月23日受付

** 京都大学工学部 工博

*** 京都大学工学部

鉱の3種を選択した。

粒度分布はタイラー標準ふるいを用いて測定し、ロータップスクリーンシェーカーで15min間ふるい、さら

にふるい分けの完全を期するため手で十分ふるったのち秤量した。

3. 破碎試験の結果

クラッシングロールのセット間隔を1mmと一定にし、給鉱の代表粒径を8.1, 5.7, 4.0, 2.0mmと変えて破碎試験を行なった。韓国鉱についての破碎産物の粒度分布はFig. 1からFig. 4に示すようである。インド鉱およびチリー混合鉱についても破碎試験を行なった。

いま、破碎産物の28 mesh以下を微粉と考え、-28 meshの積算重量百分率と破碎比との関係を以上の破碎試験の結果から求めればFig. 5に示すようである。Fig. 5に見られるように、インド鉱、韓国鉱、チリー混

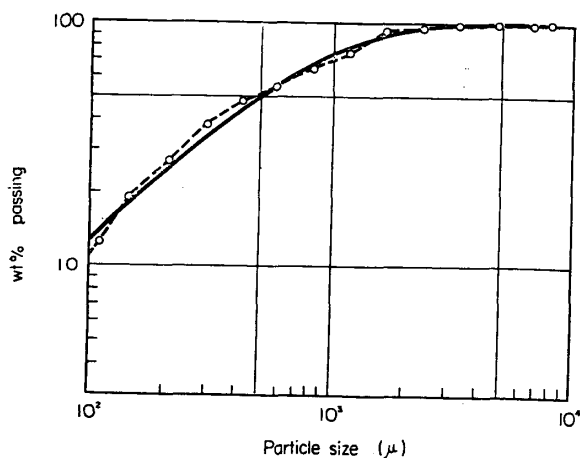


Fig. 1. Size distribution curve of crushed product for the Korean iron ore, reduction ratio 8.1.

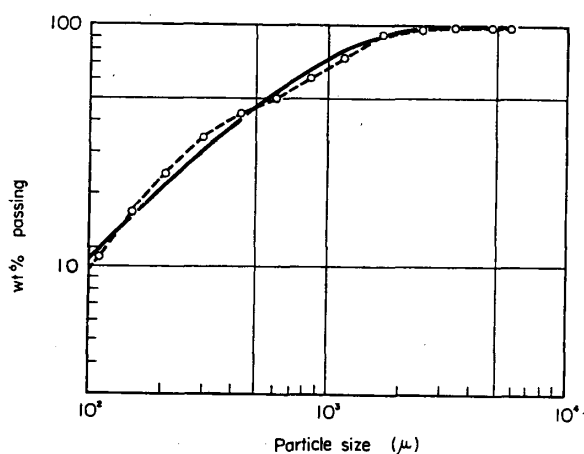


Fig. 2. Size distribution curve of crushed product for the Korean iron ore, reduction ratio 5.7.

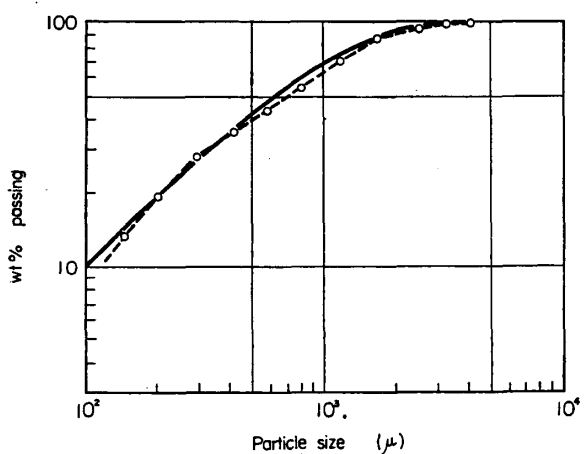


Fig. 3. Size distribution curve of crushed product for the Korean iron ore, reduction ratio 4.0.

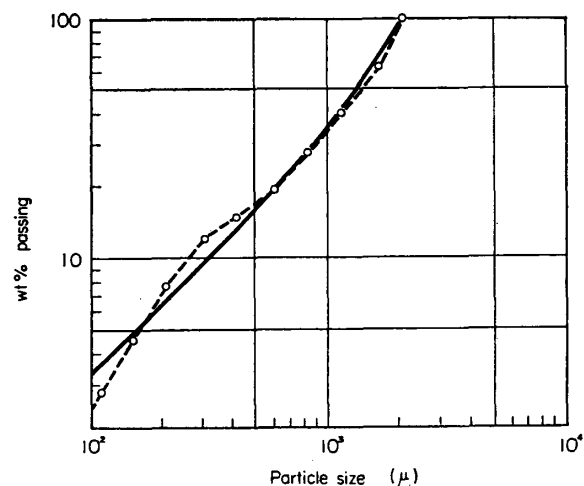


Fig. 4. Size distribution curve of crushed product for the Korean iron ore, reduction ratio 2.0.

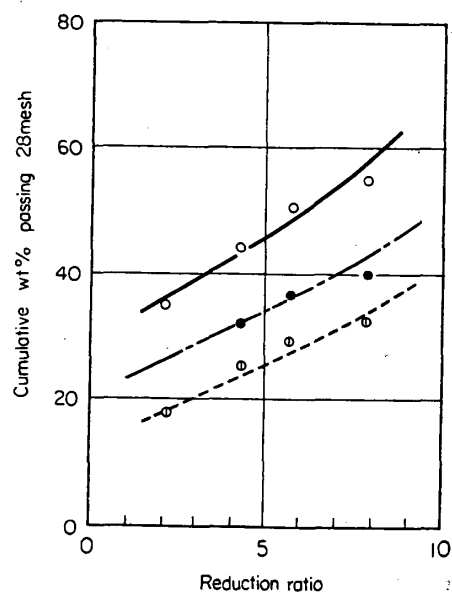


Fig. 5. Relation between the amount of fine particles and the reduction ratio.

合鉱のいずれについても、破碎比が大になれば微粉の生成割合は顕著に増加する。

破碎産物の粒度分布を数式で表示することは、破碎産物の粒度分布を定量的に把握して計算を行なう上に必要不可欠のできないことである。

粉碎産物の粒度分布を数式で表示することは古くから試みられ多くの表示式が提案されてきた。しかし衝撃あるいは単一破碎における産物の粒度分布に対する表示式は比較的少なかった。しかるに最近 GAUDIN と MELOY²⁾ はこれに対する表示式を提案した。

GAUDIN-MELOY 式は、給鉱の粒径 x_0 ならびに定数(粒子比) r により、ある粒径 x を通過する粒子の積算重量割合を(1)式のように与えている。

$$M(x)/M(x_0) = 1 - (1 - x/x_0)^r \quad (1)$$

ここに、 $M(x_0)$: 全給鉱の重量、 $M(x)$: 粒径 x を通過する積算重量、 r : 定数(粒子比とよばれる)。

クラッシングロールは単一破碎の機構を有していることから、GAUDIN-MELOY 式が破碎産物の粒度分布式として適合するか否かについて検討した。

すなわち、韓国鉱について、それぞれ適当な r の値を決定してもつとも近似する曲線を求めたのが Fig. 1 から Fig. 4 に示される実線である。同様に、インド鉱、チリー混合鉱についても破碎産物の粒度分布を GAUDIN-MELOY 式で表示した。

Fig. 1 から Fig. 4 に示されているように、鉄鉱石の不均一性に基づくばらつきを考慮に入れば、破碎産物の粒度分布の GAUDIN-MELOY 式表示は、実験値ときわめてよい一致が得られている。

破碎試験産物の粒度分布式を Table 1 に総括して示す。Table 1 の数式表示における r の値は破碎産物の粒

Table 1. Equation of the size distribution curve for the crushed product.

	Feed (mm)	Set (mm)	Reduction ratio	Equations of the size distribution for the crushed product
Korean iron ore	8.1	1	8.1	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{11.0}$
	5.7	1	5.7	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{6.62}$
	4.0	1	4.0	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{4.01}$
	2.0	1	2.0	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{0.67}$
	4.0	3	1.3	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{0.35}$
Chilian iron ore	8.1	1	8.1	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{5.75}$
	5.7	1	5.7	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{4.00}$
	4.0	1	4.0	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{2.00}$
	2.0	1	2.0	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{0.32}$
Indian iron ore	8.1	1	8.1	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{10.0}$
	5.7	1	5.7	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{5.0}$
	4.0	1	4.0	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{2.5}$
	2.0	1	2.0	$M(X) = 1 - (1 - X/X_0)^{0.23}$

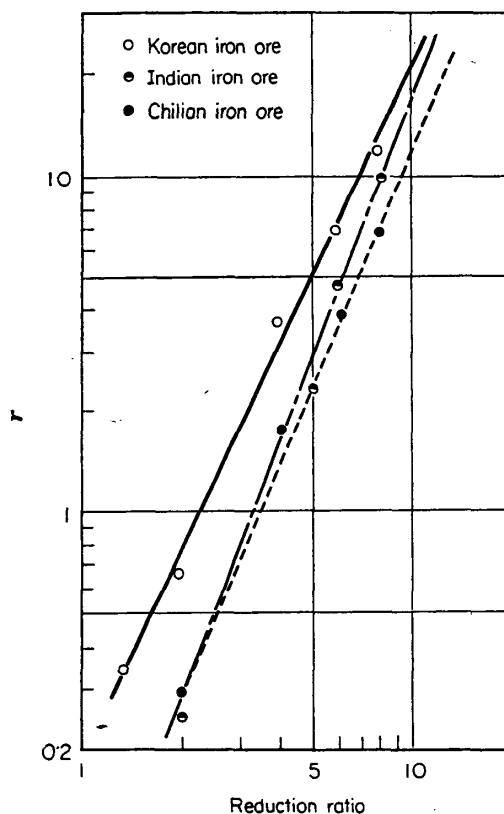


Fig. 6. Relation between r of the GAUDIN-MELOY equation and the reduction ratio.

度分布を特徴づける定数であり、この値の大小は微粉の生成割合を定量的に示すものである。Table 1 に見られるように、インド鉱、韓国鉱、チリー混合鉱いずれについても、破碎比が大になれば r の値も大になり、微粉の生成割合が増加することが明りように認められる。

4. 破碎比と破碎産物の粒度分布

前節において、破碎比が変化すれば破碎産物の粒度分布も変化することが認められた。そこで、破碎比と破碎産物の粒度分布との関係を定量的に明らかにし、任意の破碎比における破碎産物の粒度分布を求めるを試みた。そのため粒度分布を特徴づける粒度分布式における r と破碎比 R との関係を以上の一連の実験結果から検討した。

Table 1 の r の値と破碎比との関係をプロットした結果は Fig. 6 に示すようである。Fig. 6 の結果から、両軸を対数にとつたグラフにおいて、きわめて明りような直線関係が得られている。したがって、 r と R との間には本実験の条件の範囲内で

$$r = a(R)^b \quad (2)$$

(2)式の関係が成立する。ここに a および b は鉱石ならびにクラッシャーの特性に依存する定数である。(2)式の定数 a , b は Fig. 6 から求めることができる。かくして任意の破碎比における r の値が決定され、任意の破碎比における破碎産物の粒度分布が求められる。

5. 多段粉碎の整粒効果

前節で求めた r と R との関係を利用して、多段粉碎における段数ならびにスクリーンの目の大きさを任意に設定したときの最終産物の粒度分布を、計算により求めるとともに、実験を行ない計算結果を吟味することを試みた。

5.1 推定計算

1 mm以下を粉鉱, 1~3 mm を希望する破碎産物, 3 mm以上を再度破碎を必要とするものと定め、韓国鉱について、1段破碎, 2段破碎, 3段破碎を行なったときのそれぞれの産物の重量割合を計算によつて求めた。ただし給鉱の粒径は 6.7~9.4 mm である。

5.1.1 1段破碎

破碎機のセット間隔についてあらかじめ検討した。本実験に使用したクラッシングロールについては、3 mm以上を破碎して3 mm以下の産物を多量に獲得するには、セット間隔を2 mmにとるべきであることが判明した。そこで6.7~9.4 mmの韓国鉱をセット間隔2 mmで破碎したときの破碎産物の粒度分布を求めた。

この場合、 $R=4$, $r=3.75$, 破碎産物の粒度分布は

$$M(x)/M_0 = 1 - (1 - x/x_0)^{3.75} \dots\dots\dots (3)$$

粒度分布を表わす曲線は Fig. 7 のようである。Fig. 7 から、1 mm 以下 38.5%, 1~3 mm 43.5%, 3 mm 以上 16.0% であることが認められる。

5.1.2 2段破碎

粒径6.7~9.4 mmの韓国鉱を、まずセット間隔5 mm

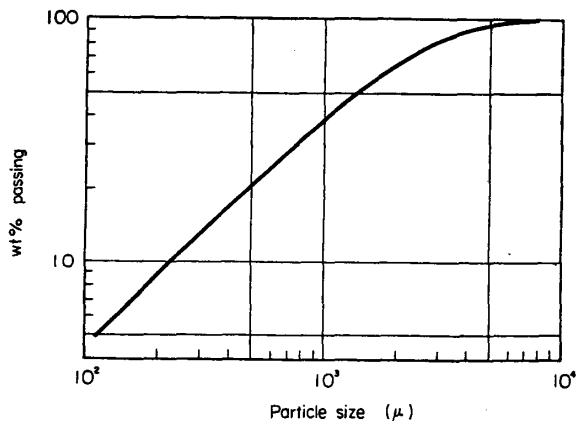


Fig. 7. Calculated size distribution curve for the one stage crushing.

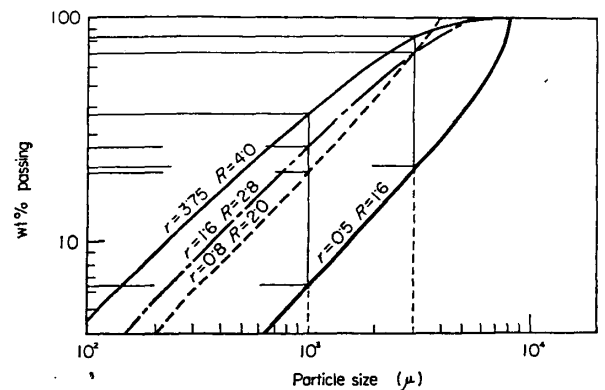


Fig. 8. Calculated size distribution curve for the two stage crushing.

で破碎し、得られた産物を3 mmでふるい分け、3~4.7 mm, 4.7~6.7 mm, 6.7~9.4 mm のそれぞれをセット間隔2 mmで再び破碎するものとする。

破碎産物の粒度分布曲線はFig. 8に示すようである。Fig. 8の太い実線は1段目($R=1.6$, $r=0.5$)の破碎産物の粒度分布を示す。この曲線から、1 mm以下6.30%, 1~3 mm 14.70%, 3~4.7 mm 14.80%, 4.7~6.7 mm 22.85%, 6.7~9.4 mm 41.35%の値が得られる。

つぎに第1段破碎で得られた産物のうち、3 mm以上のものをセット間隔2 mmで破碎する。粒径6.7~9.4 mmを破碎する場合は $R=4.0$, $r=3.75$ である。この場合の破碎産物の粒度分布は Fig. 8の細い実線に示すようである。この曲線から

$$1 \text{ mm以下} \quad 100 \times 0.4135 \times 0.385 = 15.92\%$$

$$1 \sim 3 \text{ mm} \quad 100 \times 0.4135 \times (0.830 - 0.385) = 18.40\%$$

$$3 \text{ mm以上} \quad 100 \times 0.4135 \times (1.00 - 0.830) = 7.03\%$$

粒径4.7~6.7 mmを破碎する場合は $R=2.8$, $r=1.6$, 破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 8の細い鎖線に示すようである。この曲線から

$$1 \text{ mm以下} \quad 100 \times 0.2285 \times 0.265 = 6.06\%$$

$$1 \sim 3 \text{ mm} \quad 100 \times 0.2285 \times (0.700 - 0.265) = 9.94\%$$

$$3 \text{ mm以上} \quad 100 \times 0.2285 \times (1.00 - 0.700) = 6.86\%$$

粒径3~4.7 mmを破碎する場合は $R=2.0$, $r=0.8$, 破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 8の細い破線に示すようである。この曲線から

$$1 \text{ mm以下} \quad 100 \times 0.148 \times 0.200 = 2.96\%$$

$$1 \sim 3 \text{ mm} \quad 100 \times 0.148 \times (0.700 - 0.200) = 7.40\%$$

$$3 \text{ mm以上} \quad 100 \times 0.148 \times (1.00 - 0.70) = 4.44\%$$

以上を合計すれば

$$1 \text{ mm以下} \quad 31.24\%$$

$$1 \sim 3 \text{ mm} \quad 50.44\%$$

$$3 \text{ mm以上} \quad 18.33\%$$

になる。

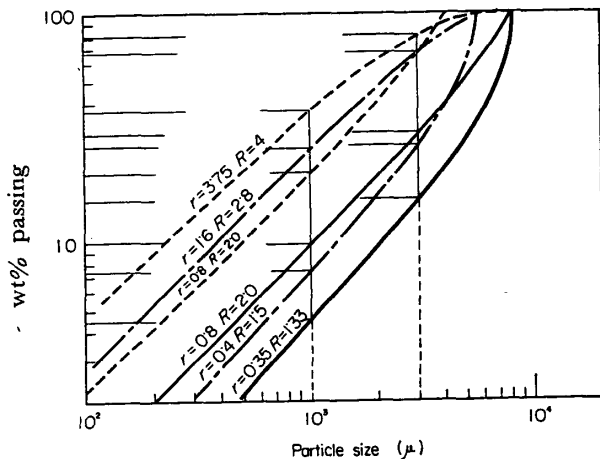


Fig. 9. Calculated size distribution curve for the three stage crushing.

5.1.3 3 段階破碎

粒径 6.7~9.4 mm の韓国鉱をセット間隔 6 mm で破碎し、得られた産物を 4.7 mm のふるいでふるい分け、ふるい上産物すなわち 4.7~6.7 mm, 6.7~9.4 mm をセット間隔 4 mm で第 2 段階破碎を行なう。この第 2 段階破碎の産物を 3 mm のふるいでふるい分け、ふるい上産物すなわち 3~4.7 mm, 4.7~6.7 mm, 6.7~9.4 mm および第 1 段階破碎で得られた 3~4.7 mm をセット間隔 2 mm でさらに破碎する 3 段階破碎の過程を考える。この場合のそれぞれの破碎産物の粒度分布は Fig. 9 に示すようである。

第 1 段階破碎は $R=1.33$, $r=0.35$ であり、破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 9 の太い実線 ($r=0.35$) に示すようである。この曲線から、第 1 段階破碎産物の粒度別重量割合は

1 mm 以下	4.5%
1 ~ 3 mm	10.5%
3 ~ 4.7 mm	11.43%
4.7 ~ 6.7 mm	19.76%
6.7 ~ 9.4 mm	53.90%

である。

第 2 段階破碎においては、粒径 6.7~9.4 mm については $R=2.00$, $r=0.80$, 破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 9 の $r=0.80$ の曲線で示される。粒径 4.7~6.7 mm については $R=1.50$, $r=0.40$, 破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 9 の $r=0.4$ の曲線で示される。

以上の粒度分布曲線を用いて、前項の 2 段階破碎の場合と同様な計算を行ない、第 2 段階破碎産物の粒度別重量割合を求めれば

1 mm 以下	6.87%
1 ~ 3 mm	15.44%

3 ~ 4.7 mm	13.74%
4.7 ~ 6.7 mm	42.22%
6.7 ~ 9.4 mm	21.56%

である。

第 3 段階破碎において、給鉱の粒径 6.7~9.4 mm に対しては $R=4$, $r=3.75$, この場合の破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 9 の $r=3.75$ の破線で示される。給鉱の粒径 4.7~6.7 mm に対しては $R=2.8$, $r=1.6$, この場合の破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 9 の $r=1.6$ の破線で示される。給鉱の粒径 3~4.7 mm に対しては $R=2.0$, $r=0.8$, この場合の破碎産物の粒度分布曲線は Fig. 9 の $r=1.6$ の破線で示される。

以上の曲線を用い、同様な計算を行なうことにより、第 3 段階破碎の産物の粒度別重量割合は

1 mm 以下	16.08%
1 ~ 3 mm	28.07%
3 mm 以上	17.35%

以上の結果から、3 段階破碎を行なったときの最終破碎産物の粒度別重量割合は

1 mm 以下	27.45%
1 ~ 3 mm	54.64%
3 mm 以上	17.35%

以上、1 段階破碎、2 段階破碎、3 段階破碎を比較すれば、1 mm 以下の粉鉱は、3 段階破碎の場合は 1 段階破碎より約 11.05%, 2 段階破碎の場合より約 3.8% 減少し、1 ~ 3 mm の目的とする産物は 3 段階破碎の場合は 54.64% で、1 段階破碎より約 11.14%, 2 段階破碎より 4.02% 増加することが認められる。

5.2 推定計算値と実験値との比較

つぎに、計算の場合と同じ条件で破碎試験を行ない、最終産物の粒度分布を求め、推定計算の結果と実験値とを比較検討した。

粒径 6.7~9.4 mm の韓国鉱をセット間隔 2 mm でクラッシングロールで破碎した。破碎産物の粒度別重量割合は

1 mm 以下	38.2%
1 ~ 3 mm	43.5%
3 mm 以上	16.0%

であつた。

つぎに、粒径 6.7~9.4 mm の韓国鉱をまずセット間隔 5 mm で破碎し、得られた産物を 3 mm のふるいでふるい分け、3 mm 以上すなわち 3~4.7 mm, 4.7~6.7 mm および 6.7~9.4 mm をセット間隔 2 mm で破碎する 2 段階破碎を行なった。2 段階破碎の最終産物の粒度別重量割合は

Table 2. Comparison of the experimental values with the calculated values on the crushed product.

	1 mm under		1 mm~3 mm		3 mm over	
	Calculated value	Experimental value	Calculated value	Experimental value	Calculated value	Experimental value
One stage crushing	38.5%	38.2%	43.5%	49.4%	16.0%	12.4%
Two stage crushing	31.2%	31.6%	50.4%	49.1%	18.3%	18.4%
Three stage crushing	27.0%	—	54.6%	—	17.4%	—

1 mm以下	31.6%
1 ~ 3 mm	47.7%
3 mm以上	18.4%

であつた。

Table 2 に計算値と実験値とを対比した。Table 2 に見られるように計算値と実験値とはきわめてよい一致を示している。このことから、破碎機のセット間隔、破碎段数、およびスクリーンの目の大きさを任意に設定した場合の最終破碎産物の粒度分布は、以上のべた計算法によつて求めることが可能であるといふことができる。

以上の結果から、破碎比を小にとり多段粉碎を行なうことは、鉄鉱石の整粒粉碎にきめわて良好な結果を与えることが明らかである。

6. 多段破碎過程のマトリックス解析

前節までにのべた多段破碎の整粒効果の解析においては、破碎機への給鉱は一定粒径のものを取り扱つてきた。しかし実際操作においては、破碎機の給鉱は一定粒径のものではなく、ある粒度分布を有している。この場合の破碎最終産物の粒度分布を前節までの方法で求めるとすればきわめて複雑な図式解析が必要である。そこで破碎機の給鉱がある粒度分布をもつ場合の多段破碎過程についてマトリックス解析を試みた。

6.1 破碎関数

マトリックス解析を行なうにあつて、まず破碎関数を決定することが必要である。BROADBENT と CALLCOTT³⁾は破碎関数として次式を与えている。

$$B(x, y) = [1 - \exp(-x/y)] / [1 - \exp(-1)] \dots (4)$$

ここに、 y : 給鉱の粒径 x : 破碎産物の粒径

$B(x, y)$: 破碎産物の粒径 x より小さなものの積算重量割合

しかるに著者らの行なつた破碎試験の結果からは、この破碎関数は鉄鉱石の粗破碎には適合しないようである。すでに述べたように、鉄鉱石の破碎産物の粒度分布は、GAUDIN-MELOY 式によつてきわめてよく表示される。

したがつて破碎関数として(5)式を採用した。

$$B(x, r) = 1 - (1 - x/x_0)^r \dots (5)$$

(5)式から、粒径 x_1 と x_2 との間にある産物の重量割合は

$$M(x_2) - M(x_1) = (1 - x_2/x_0)^{r_1} - (1 - x_1/x_0)^{r_1} = b(x_1, r_1) \dots (6)$$

(ただし $x_2 < x_1$)

すなわち、給鉱の粒径 x_0 および r の値が決定すれば x の値を任意に定めることにより破碎マトリックスの1成分を得ることができる。

破碎マトリックス B は

$$B = \begin{pmatrix} b(x_1, r_1) & & & & \\ b(x_2, r_1) & b(x_2, r_2) & & & 0 \\ b(x_3, r_1) & b(x_3, r_2) & \dots & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ b(x_n, r_1) & b(x_n, r_2) & \dots & \dots & b(x_n, r_n) \end{pmatrix}$$

ここで注意すべきことは、 B マトリックスの第1列、第2列、……の各列の r の値が異なることである。BROADBENT および CALLCOTT は破碎関数は給鉱の粒度によつて変化しないと仮定しているが、鉄鉱石の破碎においては r は破碎比と相関し、給鉱の粒径が変化すれば r の値は変化する。

6.2 1段破碎

いま、破碎機のセット間隔 s を、 $x_4 > s > x_5$ と定め、 x_5 以下の粒子は破碎されないで破碎機を通過するものと仮定する。この場合の破碎マトリックスは

$$B = \begin{pmatrix} b(x_1, r_1) & & & & & \\ b(x_2, r_1) & b(x_2, r_2) & & & & \\ b(x_3, r_1) & b(x_3, r_2) & b(x_3, r_3) & & & \\ b(x_4, r_1) & b(x_4, r_2) & b(x_4, r_3) & b(x_4, r_4) & & \\ b(x_5, r_1) & b(x_5, r_2) & b(x_5, r_3) & b(x_5, r_4) & 1 & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ b(x_n, r_1) & b(x_n, r_2) & b(x_n, r_3) & b(x_n, r_4) & 0 & \dots \dots 1 \end{pmatrix}$$

よつて、得られた破碎産物の粒度分布は

$$p = B \cdot f \dots (7)$$

$p =$

$$\begin{pmatrix} b(x_1, r_1) & & & & \\ b(x_2, r_1) & b(x_2, r_2) & & & \\ b(x_3, r_1) & b(x_3, r_2) & b(x_3, r_3) & & \\ b(x_4, r_1) & b(x_4, r_2) & b(x_4, r_3) & b(x_4, r_4) & \\ b(x_5, r_1) & b(x_5, r_2) & b(x_5, r_3) & b(x_5, r_4) & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b(x_n, r_1) & b(x_n, r_2) & b(x_n, r_3) & b(x_n, r_4) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$$

6.3 2段破碎

2段破碎における最終破碎産物の粒度分布を求める。いま、第1段破碎においてはセット間隔(s)を $x_3 > s_1 > x_4$ と定め、スクリーンの目の大きさ(k)を $x_6 > k > x_7$ とする。

第1段破碎産物の粒度分布ベクトルを p_1 とすれば

$$p_1 = B_1 \cdot f \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$p_1 = \begin{pmatrix} b_1(x_1, r_1) & & & & \\ b_1(x_2, r_1) & b_1(x_2, r_2) & & & \\ b_1(x_3, r_1) & b_1(x_3, r_2) & b_1(x_3, r_3) & & \\ b_1(x_4, r_1) & b_1(x_4, r_2) & b_1(x_4, r_3) & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_1(x_n, r_1) & b_1(x_n, r_2) & b_1(x_n, r_3) & 0 & \dots\dots\dots 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$$

第2段破碎においては、セット間隔(s_2)を $x_6 > s_2 > x_7$ と定め、 x_6 以上の粒子が再び破碎され x_7 以下の粒子は破碎されないで破碎機をそのまま通過するものとする。

2段破碎によつて得られる最終産物の粒度分布 p_2 は

$$p_2 = B_2 \cdot p_1 = B_2 \cdot \{B_1 \cdot f\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに B_1 , B_2 はそれぞれ第1段および第2段の破碎マトリックスである。

すなわち、

$$p_2 = \begin{pmatrix} b_2(x_1, r_1') & & & & \\ b_2(x_2, r_1') & b_2(x_2, r_2') & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_2(x_6, r_1') & b_2(x_6, r_2') & \dots\dots\dots b_2(x_6, r_6') & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_2(x_n, r_1') & b_2(x_n, r_2') & \dots\dots\dots b_2(x_n, r_6') & 0 & \dots\dots\dots 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1(x_1, r_1) & & & & \\ b_1(x_2, r_1) & b_1(x_2, r_2) & & & \\ b_1(x_3, r_1) & b_1(x_3, r_2) & b_1(x_3, r_3) & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_1(x_n, r_1) & b_1(x_n, r_2) & b_1(x_n, r_3) & 0 & \dots\dots\dots 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$$

以上が2段破碎における一般式である。これと全く同様にして3段破碎、 n 段破碎の場合も最終破碎産物の粒度分布を求めることができる。

6.4 計算値と実験値の比較

つぎに、以上の数値計算によつて求めた最終産物の粒度分布が、実際の破碎試験によつて得られた産物の粒度分布と一致するか否かを検討した。

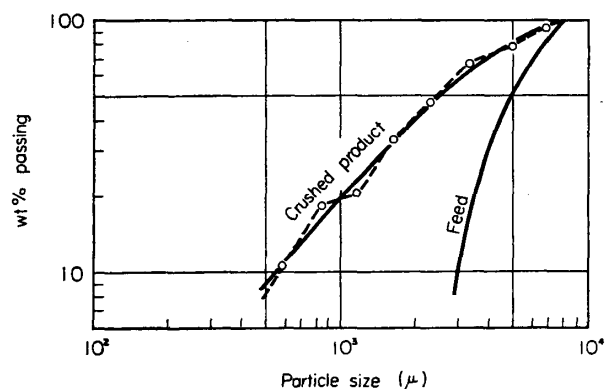


Fig. 10. Size distribution curve for the one stage crushing.

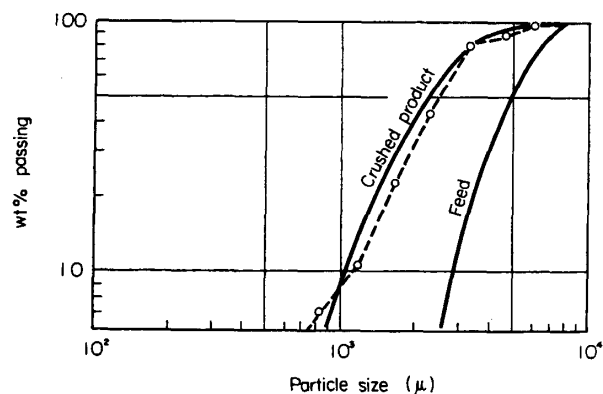


Fig. 11. Size distribution curve for the two stage crushing.

その結果は、1段破碎の場合は Fig. 10 に示すようである。実線は計算値であり破線は実験値である。2段破碎の場合は Fig. 11 に示すようである。実線は計算値、破線は実験値である。

以上の結果から、破碎産物の計算値と実験値はきわめて良好な一致を示していることが認められる。また Fig. 10 と Fig. 11 とを比較すればわかるように、給鉱が粒度分布をもつ場合も、多段粉碎は良好な整粒効果を示すことが明りように認められる。

7. 閉回路破碎過程のマトリックス解析

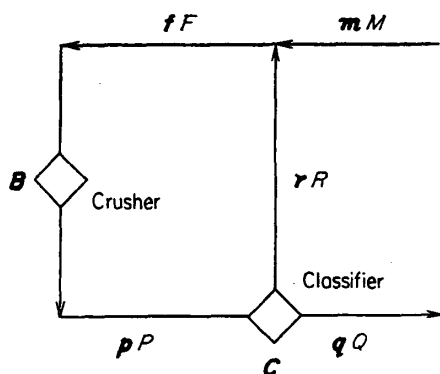
以上開回路破碎過程の解析について述べた。実際操作においては、閉回路操作が行なわれる場合が多いので、閉回路破碎過程の粒度分布の解析を行なつた。

閉回路破碎過程のモデルは Fig. 12 のようである。破碎産物の粒度分布ベクトルは

$$p = B \cdot f \quad \dots\dots\dots (10)$$

閉回路破碎過程が定常状態に維持されているものとする

$$P = F \quad \dots\dots\dots (11)$$



Symbols

- f : Frequency vector describing the feed to a breakage process
 m : Frequency vector describing the make-up in a closed-circuit crushing system
 p : Frequency vector describing the product from a breakage process
 q : Frequency vector describing the output from a closed-circuit crushing system
 r : Frequency vector describing the recirculated product in a closed-circuit crushing system
 M, F, P, Q, R : Weight flow rates the particle assemblies
 B : Breakage matrix
 I : Unit matrix
 C : Classification matrix

Fig. 12. Closed circuit of one stage crushing.

$$Ff = Mm + Rr \quad (12)$$

$$F = R + M \quad (13)$$

$$Rr = PCp \quad (14)$$

$$Rr_{n+1} = PC_{n+1}p_{n+1} \quad (15)$$

$$Pp = Rr + Qq \quad (16)$$

ここで, $M=Q=1$ とすれば

$$P = R + Q \quad (M=Q=1) = R + 1$$

$r_{n+1}=0$ とすれば $(R+1)f_{n+1} = m_{n+1}$

(12)式および(14)式から

$$Ff = PCBf + Mm \quad (17)$$

$$(R+1)(I - CB)f = Mm \quad (18)$$

I は単位マトリックスである.

したがって,

$$f = (1/R+1)(I - CB)^{-1}m \quad (19)$$

$$\Sigma(I - CB)^{-1}m + m_{n+1} = R+1 \quad (19')$$

一方, $Qq + Rr = Pp \quad (20)$

$$Qq = Pp - Rr$$

$$= (R+1)Bf - PCBf$$

$$= (I - C)B(I - CB)^{-1}m \quad (21)$$

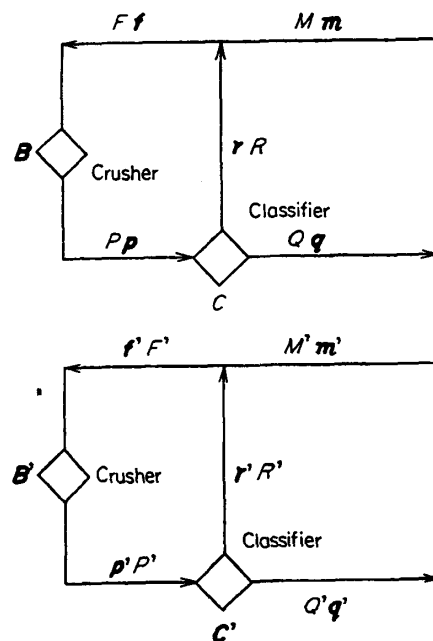
$Q=1$ より,

$$q = (I - C)B(I - CB)^{-1}m \quad (22)$$

以上の結果から, 破碎機的全給鉱の粒度分布は(19)式で示され, 繰り返し鉱量 R は(19')式で, 最終産物の粒度分布は(22)式で示される.

2段破碎の場合は, 第1段破碎産物(q の粒度分布をもつ)が第2段破碎の新給鉱になる. この過程のモデルは Fig. 13 に示すようである. したがって全く同様に解析することができる. このようなモデル過程の最終産物の粒度分布ベクトルを q' とすれば, q' は

$$q' = (I - C')B'(I - C'B')^{-1}$$



Symbols $F=P, F'=P', M=M'=Q=Q'=1$

Fig. 13. Closed circuit of the two stage crushing.

$$[(I - C)B(I - CB)^{-1}m] \quad (23)$$

で示される.

数値計算例:

以上の一般式を用いて, 新給鉱の粒度分布が 18.9~13.3 mm 33.33%, 13.3~9.4 mm 33.33%, 9.4~6.7 mm 33.33% の場合について, 1段破碎および2段破碎を行なったときの最終破碎産物の粒度分布を求める.

破碎機的全給鉱の粒度分布ベクトル f を求めるためには $(I - CB)^{-1}$ なる逆行列を計算することが必要である. この逆行列の計算は KDC-I 電子計算機により行なつた.

(1) 1段破碎

セット間隔を 4 mm とし, 4.7 mm 以上を繰り返す場合について計算する. スクリーンは完全なふるい分けを行なうものと仮定すれば, 選択関数 C は成分 1 の対角行列である. 破碎マトリックスは開回路操作の場合と同様階段行列で, 3.3 mm 以下は通過するものとする.

計算の結果

$$(R+1)f = (I - CB)^{-1}m = \begin{pmatrix} 0.3341 \\ 0.3713 \\ 0.5808 \\ 0.3851 \end{pmatrix}$$

$(R+1)$ は(19')式から求めることができるが, この数値計算例においては $m_{n+1}=0$ であるので $\Sigma(I - CB)^{-1}m$ は上式のベクトルの和で示される. したがって, $R+1=1.6713$ となり, 繰り返し鉱量は新給鉱量の 67.13% になる.

Fig. 14 の実線に計算によつて求められた 1 段破碎の

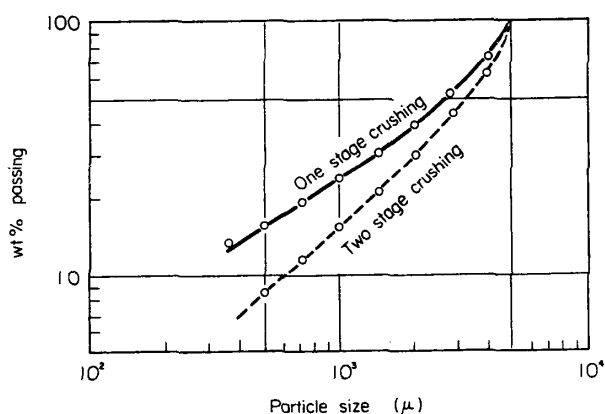


Fig. 14. Size distribution curves of the final crushed product for the closed circuits.

粒度分布を示す。この結果から、2~4.7 mmの粒径のものを目的とする産物であるとすれば、最終破碎産物の59.6%が目的とする産物、40.4%が粉鉱になることが認められる。

(2) 2 段破碎

第1段破碎においては、セット間隔8 mmで破碎し、第1段破碎産物の9.4 mm以上のものを繰り返し、第2段破碎においては、セット間隔を4 mmとし、4.7 mm以上のものを繰り返すという過程について数値計算を行なった。

第1段破碎における破碎機的全給鉱の粒度分布は

$$f = \begin{pmatrix} 0.4409 \\ 0.8767 \\ 0.3333 \end{pmatrix}$$

になり、新給鉱の65.09%が繰り返される。第1段破碎における最終産物すなわち第2段破碎の新給鉱の粒度分布は

$$q = (I - C)B(I - CB)^{-1}m = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.5857 \\ 0.1381 \\ 0.0885 \\ 0.0583 \\ 0.0390 \\ 0.0271 \\ 0.0130 \\ 0.0093 \\ 0.0068 \\ 0.0046 \end{pmatrix}$$

になる。

第2段破碎における破碎機的全給鉱の粒度分布は

$$f' = (I' - C'B')^{-1}m' = \begin{pmatrix} 0.7748 \\ 0.6799 \\ 0.0885 \\ 0.0583 \\ 0.0390 \\ 0.0271 \\ 0.0130 \\ 0.0093 \\ 0.0068 \\ 0.0046 \end{pmatrix}$$

であり、第2段破碎における繰り返し鉱量は第2段破碎における新給鉱量の70.13%になる。

計算の結果から、2段破碎を行なった場合の最終産物の粒度分布を図示すれば Fig. 14 の破線のようなものである。Fig. 14 の破線から目的とする2~4.7 mmのものは69.55%であり、2 mm以下の粉鉱は30.45%であることがわかる。

以上の2段破碎の結果とさきの1段破碎の結果とを比較すれば、2段破碎の場合は、粉鉱は約10%減少し、目的とする産物は約10%増加していることが認められる。かくして閉回路破碎過程においても、多段破碎の整粒効果は顕著であるといえることができる。

8. 吟 味

本研究における実験は、粒径10 mm以下1.7 mmまでの鉄鉱石について、クラッシングロールを用いて行なわれた。しかし、実際における鉄鉱石の破碎は100 mmあるいは200 mmのものに対して行なわれ、破碎機もクラッシングロールとは違っている。したがって、この実験結果および解析の結果が実際の鉄鉱石の破碎にそのまま適用できるか否かが問題になる。

給鉱の粒度、実際操業と実験との相違については、本研究における実験と解析がすべて破碎比を基にして行なわれているので、破碎比を基準にすれば、給鉱の粒度の大なる場合にも適用して大なる誤りはないものと考えられる。

破碎機については、クラッシングロールはロールの回転にしたがい鉱粒に対する圧縮力の作用方向が異なるが、ニップアングル (nip angle) を考慮し、圧縮力の作用方向の変化はきわめて僅少であるように実験の条件を定めているので、クラッシングロールを使用したことによる大きな違いはないものと考えられる。

しかし、厳密には破碎機の相違による多少の誤差、給鉱の粒径の相違による鉱粒の被破碎性の変化も考えられ、さらに実際操業におけるスクリーンのふるい分け効率も考慮に入れることが必要であるので、実際操業で使用されている大型破碎機およびスクリーンを使用して吟味を行なうことが望ましい。

9. 結 言

溶鉱炉装入鉱石に対しては、微粉の生成を極力少なくする整粒破碎法の確立はきわめて重要な課題の1つである。本研究においては、破碎比が微粉の生成割合に大きな影響を与えるものと考え、クラッシングロールを用いてモデル実験を行ない、その実験結果を基にして破碎段数が整粒粉碎にいかなる効果を与えるかについて検討し

た。

鉄鉱石の仕事指数 (work index) を基準にして、被粉碎性の異なる3種の鉄鉱石を選び、破碎比を変化させて破碎試験を行なった結果、破碎比が大になるほど粉鉱の生成割合が増加する傾向が明りように認められた。

微粉の生成割合を定量的に求めるために、破碎産物の粒度分布を数式で表示することを検討し、GAUDIN-MELOY 式がきわめてよく適合することを確認した。

つぎに任意の破碎比をとる場合にも拡大計算を行なうために、GAUDIN-MELOY 式の粒子比 r と破碎比との関係を検討し、両者の対数の間に明りような直線関係が保たれることを確認した。この r と破碎比との関係を利用して、任意の破碎比における破碎産物の粒度分布を計算によって求めることが可能になる。

破碎産物の粒度分布を数式により表示することから、1段破碎、2段破碎および3段破碎のそれぞれの場合について破碎機のセット間隔およびスクリーンの目の大きさを任意に設定した場合の最終破碎産物の粒度分布を求める計算法を確立した。

この計算法を用いて、破碎段数と整粒効果との関係を

検討した結果、破碎段数が多い場合は微粉の生成が少なく、かつ目的とする粒度の産物が多いことを確かめ、多段粉碎は整粒粉碎にきわめて有効であることを確認した。

さらに、粒度分布をもつ給鉱を破碎する場合の開回路ならびに閉回路過程に対するマトリックス解析を試み、最終産物の粒度分布を計算によって求めた。この結果に基づき、多段粉碎は整粒粉碎法としてきわめて有効であることを確認した。

本研究を遂行するにあたり八幡製鉄株式会社の援助を受けた。ここに感謝の意を表する次第である。また本研究の実験を担当した小林昌夫君に謝意を表する次第である。

文 献

- 1) 向井 滋, 一伊達稔, 小林昌夫: 浮選, 第33号 (1967), p. 22~28
- 2) A. M. GAUDIN and T. P. MELOY: Trans. Soc. Min. Eng. AIME, 223 (1962), p. 40~43
- 3) S. R. BROADBENT and J. G. CALLCOTT: J. Inst. Fuel, 12 (1956), p. 524~539

自溶性ペレットの製造ならびに高炉使用について*

藤井成美**・田村節夫**・田口和正**・国井和扶***・西田礼次郎***

Study on the Manufacture of Self Fluxed Pellets and the Use to Blast Furnace

Shigeyoshi FUJII, Setsuo TAMURA, Kazumasa TAGUCHI

Kazuo KUNII and Reiji NISHIDA

Synopsis:

The paper presented the development of self-fluxing pellets and the availability in them to blast furnace of Kobe Work Ltd.

Several phases of the pelletizing process are discussed individually, and also their relation to performance in blast furnace operation. Special emphasis is placed on proper preparation of the limestone added to the raw materials, and indurating at optimum conditions.

Better quality of pellet will be gained by the proper size distribution of raw material the control of indurating temperature.

The performance of blast furnace with self-fluxed pellets are also discussed.

(Received Apr. 17, 1968)

1. 緒 言

自溶性ペレットの製造に関する研究¹⁾²⁾³⁾はかなり古くから行なわれているが、これを工業的に製造し、かつ高炉で安定使用している事例は現在のところ見られない。

自溶性ペレットの工業化されない技術上の問題としては焼結鉱のごとく自溶性化による被還元性の向上が期待

* 昭和43年4月17日受付

** (株)神戸製鋼所 神戸工場

*** (株)神戸製鋼所中央研究所