
還元ペレット生産性の向上およびエネルギー原単位の低減

Improvement in Reduced Pellet Production by Grate-Rotary Kiln Process

深水 勝義(Katuyoshi Fukami) 荒谷 復夫(Fukuo Aratani) 田中 智夫(Tomoo Tanaka) 野住 一正(Kazumasa Nozumi) 高橋 宏(Hiroshi Tkahashi) 松本 旭(Akira Matumoto)

要旨：

水島製鉄所は 1973 年より Grate-rotary Kiln により、製鉄所内発生ダストから還元ペレットを製造している。本報告では、還元ペレットの生産性の向上と燃料原単位の低減を目的に、これらに対するキルンでの重油バーナー空気比の適正化、造粒水の低下、ダスト粉碎の影響について検討した。これらの結果を実操業に適用することで、キルンの生産性は 46% 向上し、エネルギー原単位は 42% 低下した。

Synopsis：

Reduced pellets have been produced from in-plant dusts by the grate-rotary kiln since March, 1973 at Mizushima Works. To obtain the optimum operational conditions, an investigation was made on productivity and fuel consumption in reduced pellet production in terms of the air to oil ratio, amount of moisture added during balling and grinding conditions of raw material. On the basis of the laboratory experiment the optimum production conditions in actual operation were established which improved the productivity of the kiln by 46% and lowered fuel consumption by 42%.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

還元ペレットの生産性の向上およびエネルギー原単位の低減

Improvement in Reduced Pellet Production by Grate-Rotary Kiln Process

深 水 勝 義*

Katuyoshi Fukami

荒 谷 復 夫**

Fukuo Aratani

田 中 智 夫***

Tomoo Tanaka

野 住 一 正****

Kazumasa Nozumi

高 橋 宏*****

Hiroshi Takahashi

松 本 旭*****

Akira Matumoto

Synopsis:

Reduced pellets have been produced from in-plant dusts by the grate-rotary kiln since March, 1973 at Mizushima Works.

To obtain the optimum operational conditions, an investigation was made on productivity and fuel consumption in reduced pellet production in terms of the air to oil ratio, amount of moisture added during balling and grinding conditions of raw material.

On the basis of the laboratory experiment the optimum production conditions in actual operation were established which improved the productivity of the kiln by 46% and lowered fuel consumption by 42%.

1. 緒 言

水島製鉄所では所内で発生する含鉄ダスト（高炉ダスト、焼結ダスト、転炉ダスト等）からグレートキルンにより還元ペレットを製造し、脱亜鉛を行ない鉄源として再利用している。ダストを原料としてペレットを製造する場合には、ダスト中の炭材をキルン操業に利用できる。しかしその反面造粒したペレットの強度が弱いこと、およびキルン内での内装炭材消費に伴うペレットの強度低下に起因する粉率の増加、あるいは、これに伴うキルン内リングの形成などの操業トラブルの増大などの問題がある。これに対して著者らは従来から還元ペレット製造における操業の安定、成品品質の改善のため種々の検討¹⁾を行ってきた。

本報では、

- (1) 空気比の増加
- (2) 造粒の低水分化
- (3) 原料粉砕装置の導入などによる還元ペレットの製造における操業の安定、効率化について検討し、実機に適用した結果を報告する。

2. 操業の安定と効率化へのアプローチ

2.1 バーナー空気比の検討

キルンの熱源は重油と外装コークスの燃焼熱であり、外装コークスの燃焼はバーナーでの重油燃焼における余剰酸素により行なわれる。したがって空気比は重油の燃焼だけでなく、外装コークスの燃焼にも大きく影響しこれを変更することで、キルン内の温度分布が変化する。キルン炉内に入

* 技術研究所水島研究部主任研究員

*** 技術研究所水島研究部部長・工博

***** 人事部付(課長)川鉄鉱業(株)出向

[昭和56年6月4日原稿受付]

** 技術研究所水島研究部主任研究員・工博

**** 川鉄鉱業(株)水島製造所粒鉄課課長

***** 人事部付(部長補)川鉄鉱業(株)出向

る空気量は、バーナーでの燃焼用空気量と炉前からの吸込み空気量の和で示される。しかし、この吸込み空気量は通常極力少なくなるように操業されるので、炉内温度分布変化はバーナーでの重油燃焼用空気比が重要な因子となる。従来、この空気比は 1.3 程度で操業されていた。

Table 1 は空気比 1.3 と 2.2 の時の理論火焰温度と燃焼ガス組成の計算結果である。ここで、理

Table 1 Flame temperature and compositions of combustion gas (Estimated)

Air ratio		1.3	2.2
Combustion gas volume (Nm ³ /kg-oil)		15.0	24.9
Theoretical flame temp. (°C)		1842	1129
Composition of combustion gas (%)	CO ₂	10.6	6.4
	H ₂ O	11.5	8.1
	SO ₂	0.1	0.1
	N ₂	73.3	74.6
	O ₂	4.5	10.8

論火焰温度は(1)式を用いて計算した。

$$T_h = t_0 + \frac{H_f \times Q_p}{G_w \times C_p} \quad \dots\dots\dots(1)$$

T_h : 理論火焰温度 (°C)

t_0 : 大気温度 (°C)

H_f : 真発熱量 (kcal/kg)

G_w : 該燃焼条件における湿り燃焼ガス量 (Nm³/kg)

C_p : 湿ガスの定圧比熱 (kcal/Nm³°C)

Q_p : 単位燃料量あたりの空気の顕熱 (kcal/kg)

表から空気比を増加すると、同一重油量に対する燃焼ガス量と燃焼ガス中の O₂ 濃度は増加し、理論火焰温度は低下することがわかる。この燃焼ガス中の O₂ は外装コークスの燃焼に消費され、炉内の温度を上昇させるものと考えられる。

Fig. 1 は重油バーナーから炉内 7m 部の炉壁の温度と空気比との関係を示したもので、焦点温度は空気比の増加により顕著に降下しており Table 1 の結果と一致する。

Fig. 2 はキルンでの空気比と戻りコークス比との関係を示す。本実験の期間中、重油量に対する装入コークス量はほとんど同じであったので、戻りコークス量の減少は炉内での外装コークスの燃焼量の増加を意味する。これらの結果から、空気

比 1.3 と 2.2 の炉内の温度分布は模式的には Fig. 3 のようであると推定される。すなわち、空気比を

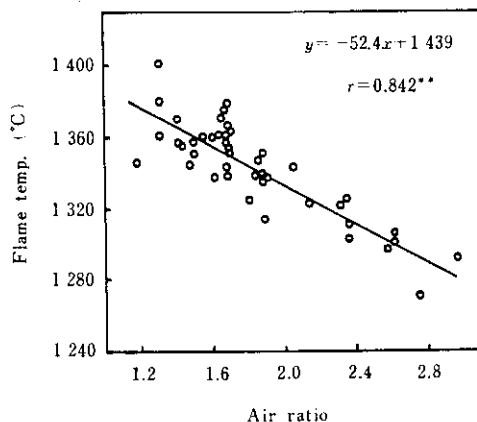


Fig. 1 Relation between air ratio and flame temperature

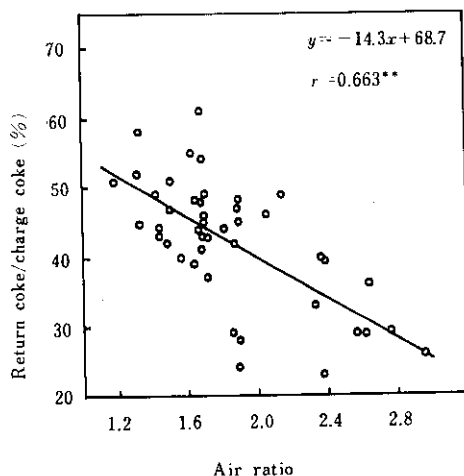


Fig. 2 Relation between air ratio and return coke ratio

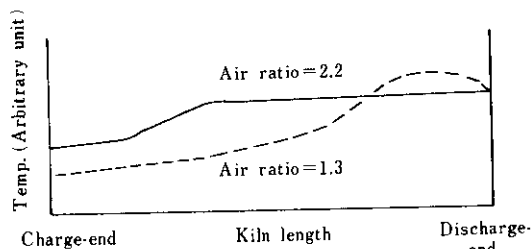


Fig. 3 Schematic diagram of temperature change in rotary kiln

増加することで火焰は短焰になり、火焰温度は低下するが余剰酸素によって外装コークスが燃焼するので、炉内深部の温度は上昇すると考えられる。

一方、Fig. 4 は空気比を変えたときのペレットの金属化率、脱亜鉛率の変化を調べたものである。図から空気比を増加すると、重油の消費量は減少

し外装コークスの消費量は増加しており、重油と外装コークスの消費量が置換していることがわかる。また、このとき全消費熱量原単位は減少するが金属化率、脱亜鉛率は変化せず一定値を保持する。この原因は Fig. 3 に示すように、空気比を増加するとキルンバーナー側での温度は低下するが、

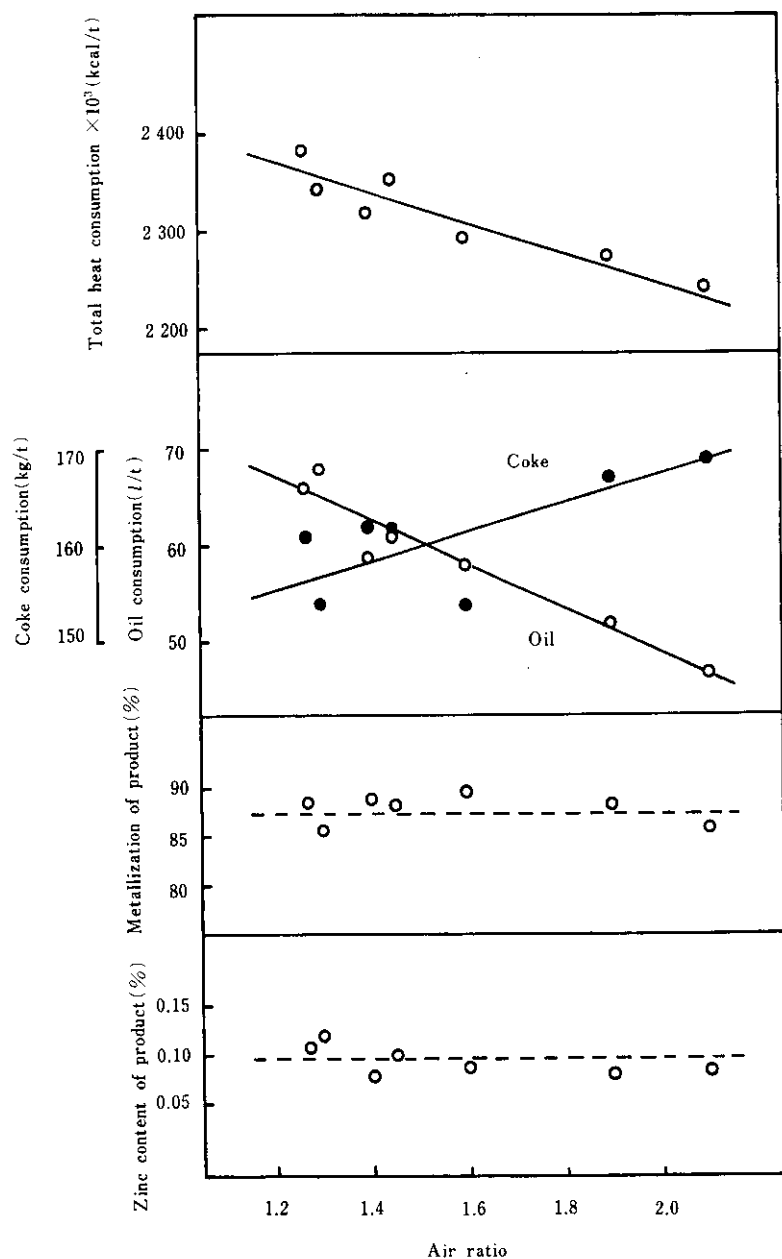


Fig. 4 Effect of air ratio on fuel consumption, metallization and zinc content under operation; data taken from monthly average

外装コークスの燃焼により炉内温度が上昇するので、炉内での還元反応、脱亜鉛反応が進むためと考えられ空気比を増加することで、キルン操業の効率化が図れることがわかる。

2.2 造粒の低水分化

湿ボールの強度は原料特性（粒度、成分、濡れ性）、および造粒条件（散水量、滞留時間、造粒機の諸元）に影響を受ける。しかるに、原料特性が一定の場合、設備的要因ならびに生産性に制約を受ける要因を除外すると、造粒時の散水量が実質上湿ボール強度に影響を与える重要な因子となる。造粒水分を変化させるとペレットの気孔率も変化するので、造粒水分の効果を(2)式の飽和度²⁾で示して造粒水分と湿ボールの強度の関係を示したのが Fig. 5 である。

$$\text{飽和度}(\%) = \left(\frac{\text{空隙部分の水の容積}(\text{cm}^3)}{\text{湿ボール内の空隙容積}(\text{cm}^3)} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 5 より圧潰強度、落下強度とも飽和度に依存しており、飽和度が増加すると落下強度は直線的に増大するが、圧潰強度は飽和度92%近傍に極大値がある。

Fig. 6 に乾ボールの圧潰強度と湿ボール時の飽和度との関係を示す。図から乾ボールの圧潰強度は湿ボール時の飽和度が低いほど、つまり造粒時

の水分が少ないほど高いことがわかる。この傾向は原料の種類に関係なく一定しているが、原料の種類、ここでは44 μ 以下の粒子の含有量（-44 μ 含有量）が異なると同一飽和度でも強度レベルに著しい差がみられる。つまり、原料粒度を細かくすることによっても強度は改善されるが、原料の粉碎装置などがない場合は、低飽和度で造粒することにより強度が改善されることを示すものである。

また、湿ボールの飽和度が増加すると乾ボール

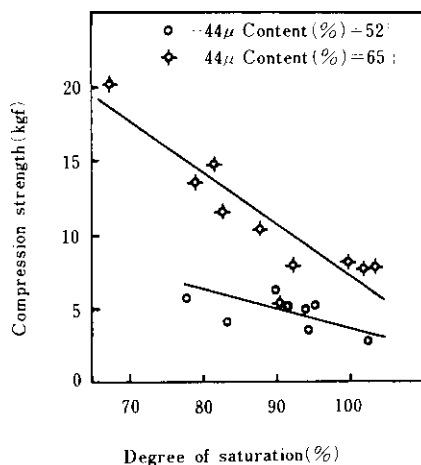


Fig. 6 Relation between compression strength of dry ball and degree of saturation

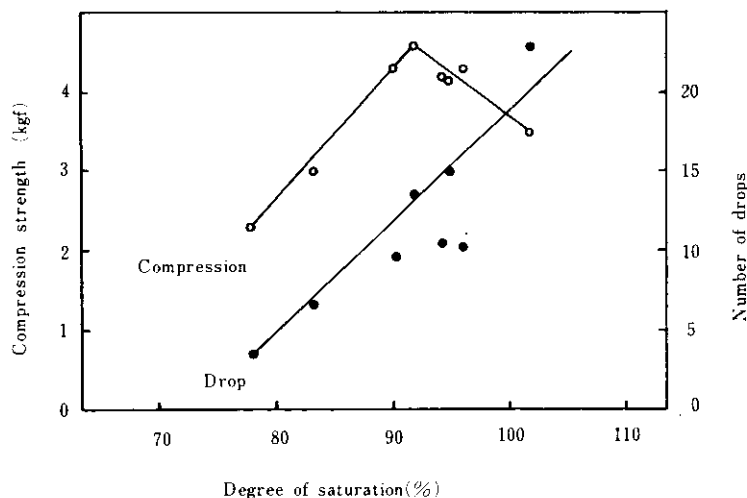


Fig. 5 Relation between strength and degree of saturation of green ball (-44 μ content (%))

の圧潰強度が低下する原因は、つぎのように考えることができる。Fig. 7, 8 に飽和度と乾ボール気孔率の関係を示す。飽和度が高くなるほど気孔率は増加する。気孔率と圧潰強度との関係について Knudsen³⁾は、粉末焼結体を用いて次式を与えている。

$$S = S_0 \exp(-\beta \cdot P) \quad \dots\dots\dots (3)$$

S : 乾ボールの圧潰強度 (kgf)

S_0 : 気孔率での圧潰強度 (kgf)

P : 乾ボールの気孔率 (%)

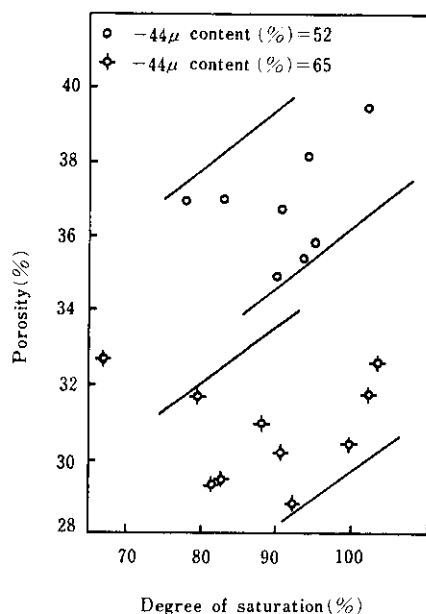


Fig. 7 Relation between porosity of dry ball and degree of saturation

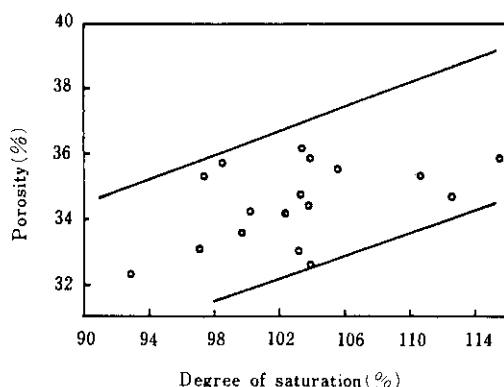


Fig. 8 Relation between porosity of dry ball and degree of saturation (practical ball)

β : 結合の強さに関する定数

(3)式にしたがって、Fig. 7 に示した乾ボールについて横軸に気孔率、縦軸に圧潰強度の対数をプロットしたのが Fig. 9 である。Fig. 9 から圧潰

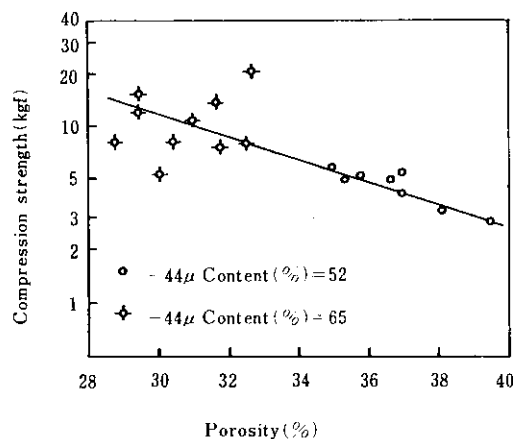


Fig. 9 Relation between compression strength and porosity of dry ball

強度は気孔率に依存することがわかる。すなわち飽和度が增大すると気孔率が増加することにより、圧潰強度が低下すると考えられる。

また、Table 2 は Fig. 8 に示した実機ボールを用いて、飽和度が異なった場合について、リンダー回転還元装置で還元した結果を示す。表から、原料中の -44μ 含有量、および内装炭材量が同じでも飽和度が小さいほど、気孔率は小さく、乾ボール、還元ペレットの強度が高いことがわかる。

以上の検討より造粒水分量は乾ボールの気孔率および還元後の強度に及ぼす影響が大きく、従来、一般的なペレタイジングにおいて施行されていた湿ボール強度が最大となるような造粒水分の調整法は、乾ボール、還元ペレットの強度に対して必ずしも適切な方法でない。還元キルンでの粉の発生を低減させるためには、造粒時の低水分化が望ましいことがわかる。

2.3 原料粉碎の検討

ダスト原料は、その発生源である高炉、および転炉の操業状態により粒度、成分などに変動がある。本プロセスには従来ダストの粉碎装置がなかったため、原料の粒度変動が工程の安定化、およ

Table 2 Physical properties of balls produced in production line

Properties		Samples		A		B	
				A 1	A 2	B 1	B 2
G. B.	Moisture (%)			9.9	12.4	11.6	13.9
	Compression strength (kgf)			4.7	3.6	3.9	2.7
	Number of drops (2 m)			3.0	4.4	4.5	5.7
	Degree of saturation (%)			92.9	103.9	102.3	115.6
	-44 μ content in raw material (%)			63.0	65.0	66.0	66.7
	Carbon content (%)			8.9	8.0	10.0	10.6
D. B.	Compression strength (kgf)			6.6	5.3	6.0	5.1
	Number of drops (450mm)			2.4	1.8	2.1	1.6
	Porosity (%)			32.6	35.9	34.2	35.8
R. P.	Degradation (% - 5 mm)			15.4	19.2	13.5	17.1
	Compression strength (kgf)			80	75	102	83

G. B. Green ball

D. B. = Dry ball

R. P. = Reduced pellet

び成品ペレットの品質の安定化をさまたげていた。

Fig. 10 はリンダー回転還元装置で還元したときの原料中の -44 μ 含有量と乾ボール気孔率、および還元後粉率、金属化率の関係を示す。ここで、原料中の -44 μ 含有量の変更は乾式粉碎粒度を変

えることで行なった。図から原料中の -44 μ 含有量が多いと気孔率、および還元過程での粉化は低下するが、還元ペレットの被還元性は著るしく悪化する。この結果から原料の粉碎によるボールの充填性の改善は、還元ペレットの強度向上と被還元性向上という目的に対して相反する効果を有することがわかる。したがって、原料の粉碎に際しては還元ペレットの強度、および被還元性の両方を満足するような方法を考える必要がある。

Fig. 11 にベンチスケールの潤式ミルを使用して粉碎したときの、ミルでの粉碎時間とペレット性質の関係を示す。

図から湿ボール、および乾ボールの強度は粉碎時間の増加につれて向上している。これは気孔率の低下、ボールの充填性の改善によるものと考えられる。一方、この乾ボールをリンダー回転還元装置で還元した結果は、Fig. 11 に示すように湿ボール、および乾ボール段階で強度が高いものほど、還元ペレットの圧潰強度も高く発生粉率が低い還元ペレットの被還元性には、前述の Fig. 10 に示す乾式粉碎時のような低下は認められない。

館ら⁴⁾は原料中に鉄鉱石と炭材が混在するとき、被還元性の向上に対して、炭材を細かくするよりも鉄鉱石を細かくした方が効果の大きいことを報告している。このことは、ダスト原料のような炭材を含む原料でペレットの被還元性を低下させずに原料を粉碎するには、選択粉碎できる粉碎機が必要であることを示唆している。本結果からは、潤式ミルは乾式ミルよりも選択粉碎に適している

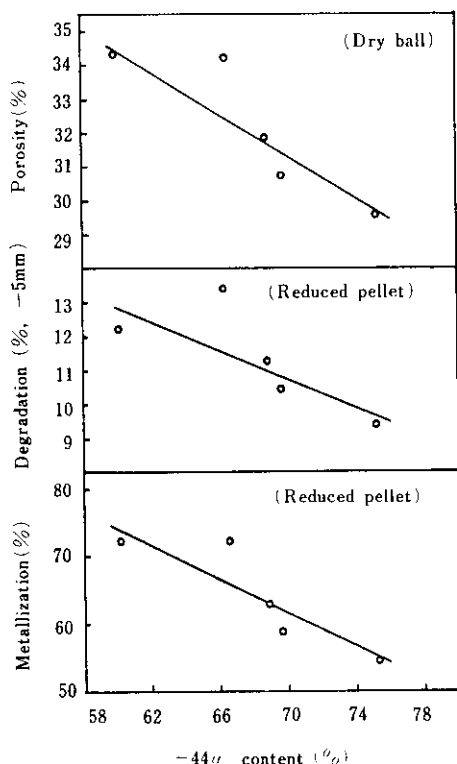


Fig. 10 Relation between pellet properties and -44 μ content in ground product

と考えられる。

3. 実機への適用の問題点と対策

以上の検討から、操業の安定、粉率の低減と燃料原単位の低減を図るため空気比の増加、造粒の低水分化、原料粉碎装置としての潤式ミルの導入を行なった。

3.1 バーナー空気比の増加

バーナー空気比の変更については、前項で述べたように、熱量原単位と重油消費量低減のため空気比の増加を実施した。当初、空気比を増加するにつれて、キルン内は正圧気味となりキルン炉前よりフレームの吹返し現象がみられ、一時期キルン炉前側のレンガ止め金物のボルトが溶損し、金物が脱落するトラブルが多発した。この対策として、ボルトの材質変更と排風バランスの調整を行った結果、この問題は解決した。

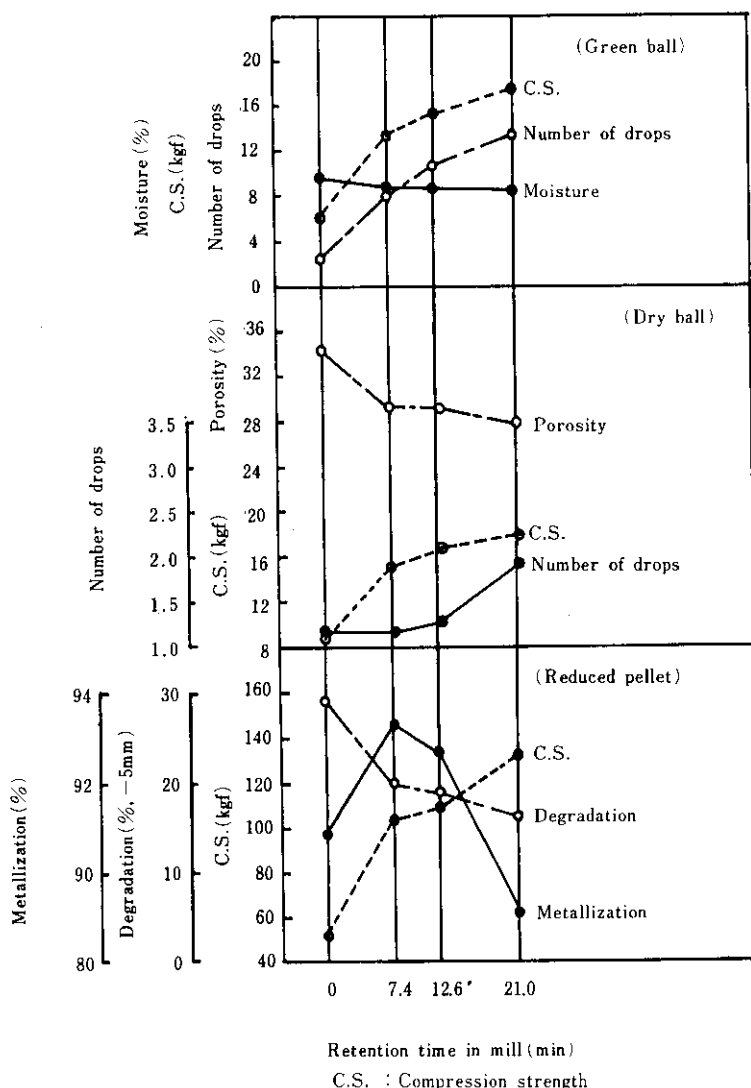


Fig. 11 Relation between pellet properties and retention time in mill

3-2 造粒の低水分化

実操業において造粒の低水分化を実施するにはこれに伴う生産性の低下を防止する必要がある。このため、

- (1) 原料水分の管理を強化して水分変動を低減させ、造粒機での散水量を極力減少した
- (2) 造粒機の角度を低角度とした
- (3) 湿ボールの粒径を平均 17.2mm から 12.8mm まで小さくした、などの対策を実施した。これらの対策により、湿ボールの水分が 1～2% 低下でき、キルンでの粉率が 3～5% 減少した。

3-3 原料粉碎装置の導入

原料粉碎装置の導入にあたって、前述した選択粉碎性の必要を考慮し潤式ミルを選定した。しかし、稼動当初プレヒーターでのパースティングの増加、成品ペレットの還元率、脱重鉛率の低下が起こった。これは潤式ミルを導入したことで、原料が過粉碎され湿ボールの充填密度が上昇しすぎたためである。

Fig. 12, 13 に実験室のモデルミルでの粉碎実験結果を示す。図中の鋼球粒径指数 α は(4)式で示され、粒径が大きくなると小さくなる指数で、任意の粒径での鋼球単位重量あたりの粉碎エネルギーを示している。

$$\alpha = S \times \sigma \quad \dots\dots\dots (4)$$

S : 鋼球の比表面積 (cm^2/g)

σ : 鋼球の密度 (g/cm^3)

Fig. 12(a) からミル内への湿潤原料の付着量は、 α が小さくなるほど、すなわち鋼球の平均粒径が

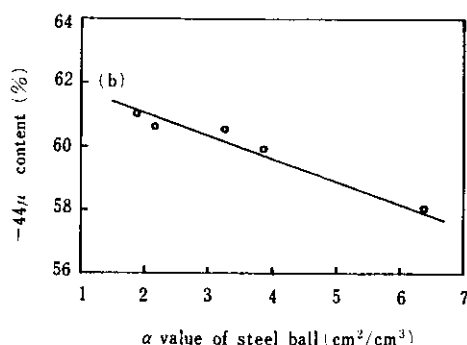


Fig. 12 Effect of steel ball size on (a) choking and (b) -44 μ content in ground product

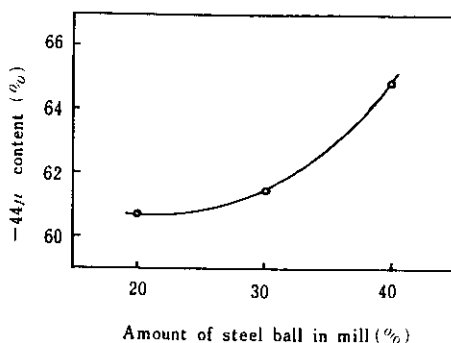


Fig. 13 Relation between -44 μ content in ground product and amount of steel ball in mill

大きくなるほど少なくなる。また、Fig. 12(b) から -44 μ 含有量で示すミルの粉碎性は、 α が小さくなるほど大きくなること分かる。

一方、ミルの粉碎性に対する鋼球の装入量の影響についての実験結果を Fig. 13 に示す。図から鋼球の装入量を増加すると -44 μ 含有量が増加し、ミルの粉碎性が増加していることがわかる。

また、Fig. 14 に粉碎性に対する粉碎時間の影響を示す。粉碎時間を増すと粉碎性が増加する。

潤式ミルでは粉碎時間と鋼球装入量の関係は、

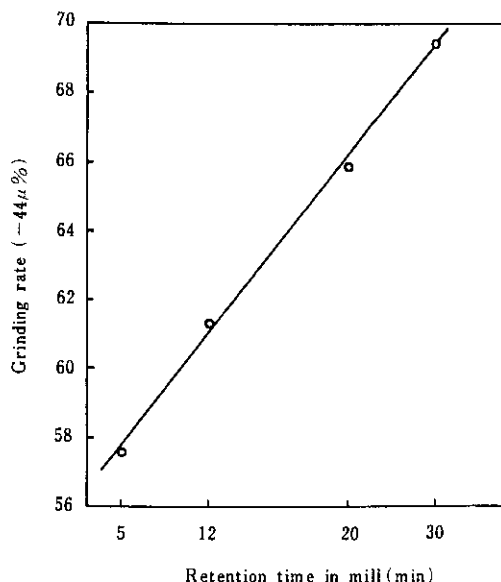


Fig. 14 Relation between -44 μ content in ground product and retention time in mill

その設備構造から一定の原料装入速度下では(5)式で与えられる。

$$\text{粉碎時間} = \frac{\text{鋼球の空隙部分に存在する原料量}}{\text{一定の原料装入速度}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式より、粉碎時間は鋼球装入量が増加すると長くなる。すなわち、実際の操業では鋼球装入量を増すと、Fig. 13, Fig. 14 の効果が惹起される結果となり、粉碎性を制御するには鋼球装入量を適正化することが重要であることが分かる。

以上のモデルミルでの結果にもとづいて、実機で鋼球装入量の低減を行なった結果が Table 3 である。

Table 3 Physical properties of raw material and pellet

Charge ratio of steel ball (%)	30	12
Compression strength of preheater ball(kgf)	21.4	20.1
Drop out at preheater (t/h)	4.1	3.1
Metallization of product (%)	88.1	90.4
Zinc content of product (%)	0.124	0.048
-5mm content in product (%)	5.7	4.7

表より鋼球の装入量を減少することで粉碎性が低下し、予熱ボールの強度は低下したが粉率を増加させずにバースティングは減少し、かつ金属化率、脱亜鉛率は向上した。

4. 操業実績

Fig. 15 に本プロセスでの生産性、エネルギー原単位の推移を 1977 年を 100 とした相対値で示す。この間、金属化率、脱亜鉛率は一定であり図から生産性は 46% 向上し、エネルギー原単位は 42 % 低減していることがわかる。

また、Table 4 には 1980 年 9 月度の操業実績を示した。生産性、諸原単位、および品質とも良好な結果が得られている。

5. 結 言

製鉄所発生ダストからの還元ペレットの製造において、操業の安定、効率化を図るため種々の検

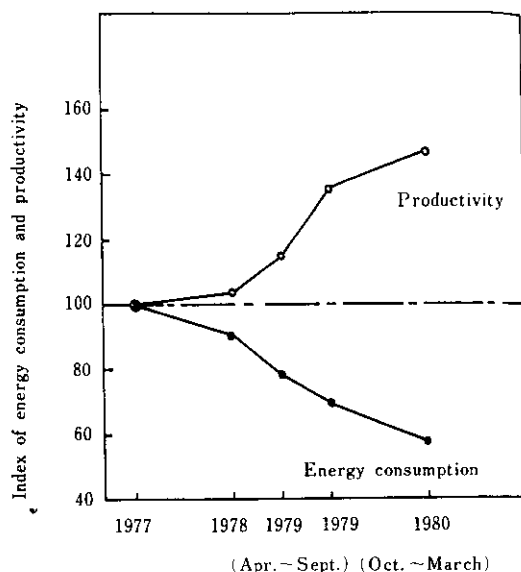


Fig. 15 Yearly change in energy consumption and productivity

Table 4 Operational data

(Sept.1980)

Raw material (t/d)			1 003
Product	+ 5 mm	Rate (t/d)	715
		yield (%)	71.3
	- 5 mm	Rate (t/d)	41
		yield (%)	4.1
Coke consumption (kg/t)			142
Oil consumption (l/t)			59.8
Power consumption (kw/t)			99
Dezincing of product (%)			96.0
Metallization ratio of product (%)			91.7

討を行ない実操業に適用して以下の結果を得た。

- (1) キルンでの重油燃焼空気比の増加はキルン炉内温度分布を改善し、これにより熱量原単位が大幅に低下できる。
- (2) 造粒の低水分化はペレットの気孔率を低下させ、ペレット強度を向上、発生粉率を低減させる。
- (3) 潤式ミルで原料を粉碎する場合、適当な条件を選択することにより被還元性の低下を伴わずにペレット強度を向上でき、操業の安定が得られる。

本検討にあたり、潤式ミルでの試験に際して(株

栗本鉄工所から多大のご協力をいただいたことを
記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高橋, 深水ら: 鉄と鋼, 64 (1978) 8, A99~102
- 2) 近藤, 松本ら: 鉄と鋼, 53 (1967) 3, 186~188
- 3) F. P. Knudsen: J. Amer. Ceram. Soc. 42 (1960) 376
- 4) 李, 館ら: 鉄と鋼, 57 (1971) 3, 465~484