
 論 文

焼結とペレタイジングの比較研究*

森永孝三**・池野輝夫***・岩崎 巖****

Comparative Studies on Sintering and Pelletizing.

Kōzō MORINAGA, Teruo IKENO and Iwao IWASAKI

Synopsis:

Pelletizing and sintering have historically been developed out of the necessity of treating different types of raw materials, of which screen analyses define the respective fields of application; thus they act as supplementary rather than competitive methods.

Diminishing supply of high-grade iron ores will call for the utilization of ores with wider variety, and the fines from beneficiation plants are expected to increase. In order to meet this situation more attention should be paid to the study of extending the fine limit of sintering, particularly on such processes as the semi-pellet sintering, the use of drum mixers and sintering with limestone addition. At the same time recognition of pellets as a superior blast furnace charge would call for consideration about the possibility of better utilizing even relatively coarse fines as ground to make pellets than as they are to make sinters.

This article purports to make further consideration on raw material problems in the future such as the fine limit of sintering, the method of estimating the power consumption to grind three types of fines represented by magnetite, hematite and limonite to their respective optimum sizes for pelletizing, technical problems involved in pelletizing, and comparison of some physical and chemical properties of pellets and sinters. On the basis of the present study it may be concluded that, if they are fired at optimum temperatures, pellets will acquire better quality than sinters with respect to bulk density, strength, reducibility, strength under reduction, etc., and particularly self-flux pellets will show much promise as blast furnace charge.

(Received 27 Sept. 1963)

I. 結 言

近年における高炉操業の目覚しい能率改善, 生産増加は主に装入原料の物理的・化学的諸性質の向上に起因しており, ことにペレットの高炉操業におよぼす効果が広く認められるようになって, 与えられた原料に対する焼結鉄とペレットの総合的なメリットの比較には深い関心が持たれている。しかしペレタイジング法と焼結法は歴史的にみて, それぞれ異なつた原料事情の必要性から発展したものであつていずれにも最適の粒度範囲があり, 一概にその優劣を競うというよりはむしろ相互の欠陥を補つて行くものと考えられる。今後高品位鉄の減少に伴つてますます広範囲な鉄鉱石が対象となり, 各種選鉄工程を経た粉鉄の増加することが予想されるが, このような状況に対処して行くためには先づ焼結法による微粉処理能力の限界ならびにペレタイジング法を諸種鉄石に適用した場合の特徴について調査しておく必要がある。また

さらに高炉におけるペレットの焼結鉄に対するメリット・焼結用粉コークスの不足に伴う液体あるいはガス燃料による代替の可能性などから考えて, 一部の粉鉄は焼結原料とするよりは磨鉄してでもペレタイジングする方が有利となるかどうかの点についても検討されねばならない。

そこでこの報告には, 上記の諸点に留意して焼結鉄による細粒の混入の限界を調査し, また磁鉄鉄, 赤鉄鉄, 褐鉄鉄の代表試料について粗粒粉をペレタイジング適正粒度まで磨鉄するのに必要な電力原単位の推定法について検討し, さらにペレットおよび焼結鉄の物理的・化学的諸性質を比較して粉鉄対策の資料とした。

 * 昭和38年4月本会講演大会にて発表
昭和38年9月27日受付

** 富士製鉄株式会社広畑製鉄所

*** 富士製鉄株式会社本社技術開発部, 理博

**** 富士製鉄株式会社中央研究所, 工博

II. 焼結法における原料の細粒混入の限界

両法を比較する上に重要な一つの条件として、原料の粒度分布がそれぞれの適用範囲の限界を示すことにはすでによく知られている。すなわち文献によれば焼結には原料中の -150 メッシュ部分が 20% 以下であることが望ましく、一方ペレタイジングでは -200 メッシュが 50~70% 以上を必要とするといわれている。しかし最近ではセミペレット焼結法やドラムミキサーの使用によりますます微粉混入割合が拡大されており、それらの限界を知っておくことは重要なことと思われる。

ここでペレタイジング法および焼結法の適用範囲を図示するのに粒度分布の表示法として **Schuhmann** の式を適用すれば、累積ふるい下重量パーセント (y) と粒度 (x) は次式により関係づけられる。

$$y = 100(x/k)^m \dots\dots\dots (1)$$

k , m はそれぞれ粒度係数および分布係数であつて、この二定数によつて分布状況を代表できることになる。**Fig. 1** にこの方式にしたがつて 2, 3 の普通焼結原料ならびにペレタイジング原料の例を示す。A, B はそれぞれ室蘭および広畑製鉄所における普通焼結用原料の实例 C, D は **HOWER and ANTHES** より引用したデータである。一方ペレタイジング用原料の粒度分布については現在米国で稼行中のタコナイト精鉱 (E), 同磁鉄精鉱 (F) および赤鉄精鉱 (G) ならびにわが国の砂鉄精鉱 (H) の一例の実測値が示されている。これら粒度分布線はペレタイジングの場合の重量パーセントが 70~80% 以下普通焼結では 30~50% 以下のところではほぼ同じ傾斜の一群の直線として表わされている。かくて普通焼結用原

料の細粒の限界としては 150 メッシュで 20% 附近を通る同一傾斜の線 S が、また一方ペレタイジングの粗粒の限界は 200 メッシュで 50~70% を通る線 P がおのおの適用範囲を限定する。これら P, S 両線に区切られた中間には空白部分があり、もしこの中間的粒度分布を示す原料についてペレタイジングを考慮する場合、P 線より左側まで磨鉱することが必要であり、その所要動力は鉱石の磨鉱度に関連してくるわけである。ここに P 線は一応ペレタイジングにおける粗粒限界とみなしうるものの、良好な結果のえられている E および F の精鉱は限界よりかなり細かく、その上かつベントナイトを併用してペレットの強度を増していることは注目し値する。

Fig. 1 で S 線によつて示されている焼結原料の細粒混入の限界は近年原料の混合方式の改良 (セミペレット焼結法およびドラムミキサーの使用) により、また石灰添加焼結とした場合焼成時に混合石灰石の分解により気孔を生じて、ともに通気度を増加させるので一層粒度の細かい原料の使用が可能となることが知られており、S 線はさらに左に移行することが予想される。鶴野、宮川²⁾によれば、ズングン、ララップ、スリメダン鉱石を主体とする基本原料に住友硫酸滓、あるいは住友硫酸滓-ホンコン鉱石 (50:50) 混合微粉を配合した場合、強度、生産率などの低下から限界配合率は焼結では 10~20%、セミペレット焼結法では 40~50% 程度と結論されている。これを **Fig. 1** と比較してみると、限界配合率の -150 メッシュ部分はそれぞれ 16.5~23% および 36~42.5% となることが推定される。前者は S 線とよく一致しているので同一の基準にもとづいてセミペレット焼結法の限界は図中 **H_{SP}** で示されることになる。一方ドラムミキサーを使用した場合には

セミペレット焼結法と比較して、さほど効果的でなかつたと結論されているのでその限界は **H_{SP}** の右側にあることになる。

以上の考察を総括すればペレタイジング適正粒度分布は **Fig. 1** において少なくとも P 線より左、できれば E または F 線程度まで磨鉱することが望ましく、一方焼結法による微粉の使用限界はセミペレット焼結法を採用して **H_{SP}** 線まで可能と結論された。ここに **H_{SP}** および E または F 線の間にはいずれにも適さない粒度の原料が考えられ、今後そのような原料

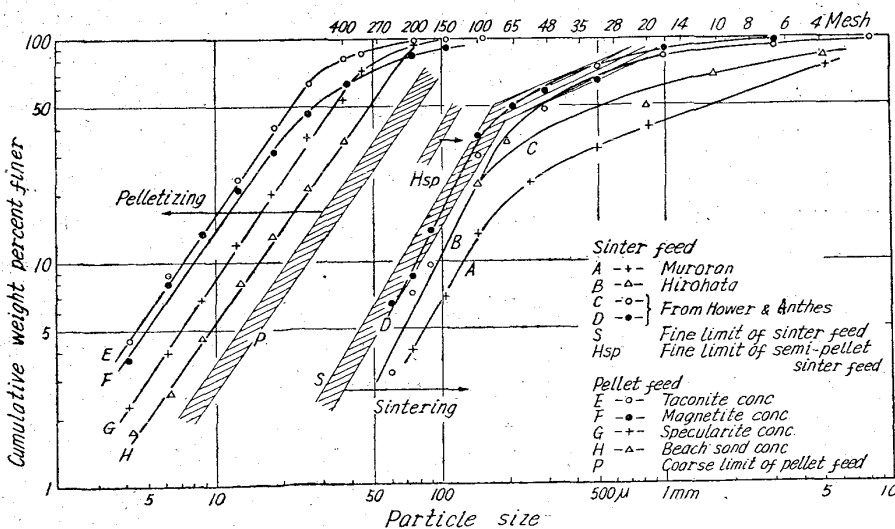


Fig. 1. Size distribution curves of sinter and pellet raw feed materials.

が増加した場合には、磨鉱してペレタイジングを行なわねばならないことが予想されるわけである。

III. ペレタイジング適正粒度への磨鉱電力消費量の推定法

ペレタイジングにおいてはまず湿潤ボールに取扱いに耐えうる強度をもたせねばならない。そこでタコナイトのように選鉱に偶然ペレタイジング適正粒度まで磨鉱を必要とする場合は別として、焼結原料としては細かくペレタイジング原料としては粗いもの、たとえば選鉱工程を経た粉状精鉱、砂鉄、硫酸滓などの処理にペレタイジングを採用して経済的であるか否かはその原料を適正粒度まで磨鉱する難易の程度が重要な条件となってくる。このいわゆる磨鉱度は原料鉱石の粒度および鉱物組成によつて影響されるが、何らかの方式に基づいて各種鉱石に対して一連の関係を確立しておけば所定の粒度に磨鉱するのに必要な動力は推定しうるわけである。かかる磨砕抵抗の測定は実際には特定の装置を用い、標準化した方式にしたがつて磨鉱試験を行ない、ある粒度以下の量または表面積の増加を測定することによつて行なわれている。しかしペレタイジング原料には当然粒度自体とともにその分布状態が大きな因子となることが予想されるので各種条件下において磨鉱した場合の粒度分布の全貌とともに消費エネルギーとの関係を示すことのできる方法が望ましい。

一般に磨鉱された鉱石の粒度分布には(1)式の適用が可能で、粒度係数(k)および分布係数(m)の二定数によつて表示されるが、この m は磨鉱方式がきまればそれぞれの鉱石に特有の値となり、またさらに一つの鉱石については磨鉱時間によらず一定となることが実証されている。かくてボールミルによる磨鉱所要エネルギー(E)は $E=A\{k_p^{1-n}-k_f^{1-n}\}=Ak_p^{1-n}\{1-R^{1-n}\} \dots (2)$ で表わされる³⁾。ここに k_f , k_p は給鉱および排鉱の粒度係数、 R は粉砕比、 A , n は定数である。この A は k_f , k_p で与えられる粉砕比をうるに必要なエネルギーの関係を表わす比例定数であつて、磨鉱度の一指数とみなすことができ、これとともに分布係数(m)および上記指数($1-n$)をあわせ考えてペレットの強度との関係を求めることとする。

1. 各種鉱石の磨鉱度の測定

磨鉱度測定の基礎試験としてまず鉄製200φ×200mm バッチ式ボールミルを用いて(2)式の適用性について検討した。この場合にはボールミルの電力消費について一回転当りの入力エネルギーは一定であり、またそのエネルギーの一定割合が粉砕に消費されると仮定して磨鉱

所要エネルギーは滞留時間(t_r)に比例すると考えた。このボールミルに径25~32mm程度の鋼製ボール8kgを装入し、供試々料は種々条件をかえて検討した場合を除き、一律に14メッシュ以下に砕いた原鉱250gを鉱液濃度60%となし、60rpmで磨鉱した。原鉱ならびに磨鉱後の試料の粒度分布は200メッシュ以上には標準フルイを使用し、それ以下にはアンドレアセンピペットを用いて沈降法により測定した。この場合磁鉄鉱、砂鉄、ミルスケールなど磁氣的に凝集する傾向にある試料は200メッシュ以下を酸素気流中で焙焼(800°C)し磁性のなくなるまで酸化してから供試した。このようにしてまず珪石について広く条件をかえて磨鉱試験を行ない、さらに諸種製鉄原料についても検討した結果、 m は磨鉱時間、給鉱粒度、ボールおよび試料装入量、鉱液濃度などにかかわらず一定の値となつており、その上鉱石によつてそれぞれ特有の値を示して磨鉱度を系統的に調査する上に一つの重要な特性とみなすことができ、またこれをもとにして上記の諸条件下の磨鉱電力エネルギーは(2)式により総括して考察できることが確認された。

供試した諸試料の磨鉱特性値をTable 1に掲げたが m は鉱石によつて0.6~1.5の間の値をとりそれぞれの粉砕傾向を特徴づけている。この値が大きいことは粗粒が多く粒度が比較的狭い範囲にまとまつていることを示し、逆にこの値が小さいことは微粉の混入割合が高く粒度が拡がっていることを示している。ブラジル赤鉄鉱、硫酸滓、砂鉄などは m が大きくその粒度分布で微粉混入割合の比較的少ないことが示されている。なおこれら赤鉄鉱、砂鉄ならびに磁鉄鉱の m の値1.39, 1.44, 1.21はFig. 1に示した諸ペレタイジング原料の m (ほぼ1.4)に近い値となつている。 A は珪石との比で表現されており、全般に k_p の減少する割合として表現される

Table 1. Specific gravity, m , $(1-n)$ and relative values of A of various ores.

	Specific gravity	m	$1-n$	A/A_{SiO_2}
Quartz	2.64	1.02	-1.0	1.0
Wakikata limonite	3.40	0.61	-1.5	2.7
Brazilian hematite	5.15	1.39	-1.85	14.4
Indian hematite	5.04	1.15	-1.5	2.7
Texada magnetite	4.75	1.21	-1.5	3.5
Beach sand	4.77	1.44	-1.5	5.1
Pyrite cinder	4.45	1.35	-2.45	8.7
Limestone	2.72	0.68	-1.5	2.7

磨鉱度は珪石より大となっている。しかしたとえば褐鉄鉱や石灰石の場合には m が小さいので同一の k_p では微細部分が多くなっており、閉回路で粉碎した場合は砕けやすいということになるものと思われる。砂鉄が磁鉄鉱にくらべて砕け難いこと、またブラジル赤鉄鉱や硫酸滓の微粉碎は電力消費量の高いことなどが想像される。これらの相対値は当然そのいずれか一つをある設備について具体化すれば他も実際値に換算できることになる。そこで A を定量化した上記の基礎試験を連続操業と比較する目的で610×200mm コニカルボールミルを使用、試料として10mm以下に破碎したインド赤鉄鉱を用いて連続操業試験を行なった。50および100kg/hrの割合で給鉱し鉱液濃度を60%として開回路で磨鉱して平衡に達したときの給鉱および排鉱の粒度分布を求めたところ、 m は1.05となつて基礎試験の1.15にほぼ一致する。また $(1-n)$ の計算には平均滞留時間が必要であつて、これをミル中の鉱石量(kg)給鉱量(kg/min)で除して求め、 k_p との関係より算出すれば1.46となつて、この場合にも基礎試験の1.50とよく一致していることが示され、一方電力消費量はそれぞれの給鉱量に対して14.0および28.7kWh/tとなつた。これらの値を(2)式に代入して A を求めれば 1.2×10^4 (kWh/t/ μ)がえられて、原鉱と排鉱の粒度が与えられれば磨鉱電力消費量を推定できることになる。ここでたとえば脇方褐鉄鉱、テキサダ磁鉄鉱の A についてはTable 1の結果よりそれぞれ 1.2×10^4 , 1.55×10^4 (kWh/t/ μ)となることがわかる。もし違った大きさのボールミルを使用した場合にはその効率が直径の0.2乗にしたがつて変化するとして補正することができる⁴⁾。

2. 磨鉱粒度とペレット強度の関係

これまでにFig. 1にペレタイジング適正粒度の実例を示し、またTable 1に各種鉱石はそれぞれ特有の粉碎傾向のあることを指摘したが、これらの見解をペレタイジング法に適用するにはまず粒度係数(k)とペレット強度との関係を求め、これを磨鉱電力費と対比して総合的に考察すべきものとする。そこで代表例としてインド赤鉄鉱、テキサダ磁鉄鉱、脇方褐鉄鉱の三種類をえらびそれぞれのペレタイジング適正粒度に磨鉱するのに必要な電力消費量を求めて比較の基礎資料とすることとした。

上記三鉱石はTable 2に示すような化学組成のもので、各々次のように粒度を調製した。すなわち試料番号でNo.1および1aは48メッシュおよび100メッシュ以下、No.2, 3, 4, 5はそれぞれの1.5mm以下の試料を乾式バッチボールミルで15min, 30min, 60min, 180min磨鉱した試料を指している。各試料の粒度分布

Table 2. Chemical analyses of ores.

	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S
Indian hematite	63.72	1.54	3.95	1.53	0.31	0.16	—
Texada magnetite	65.98	24.90	2.95	0.82	1.75	0.73	0.812
Wakikata limonite	49.02	0.75	11.20	2.94	0.25	0.22	—

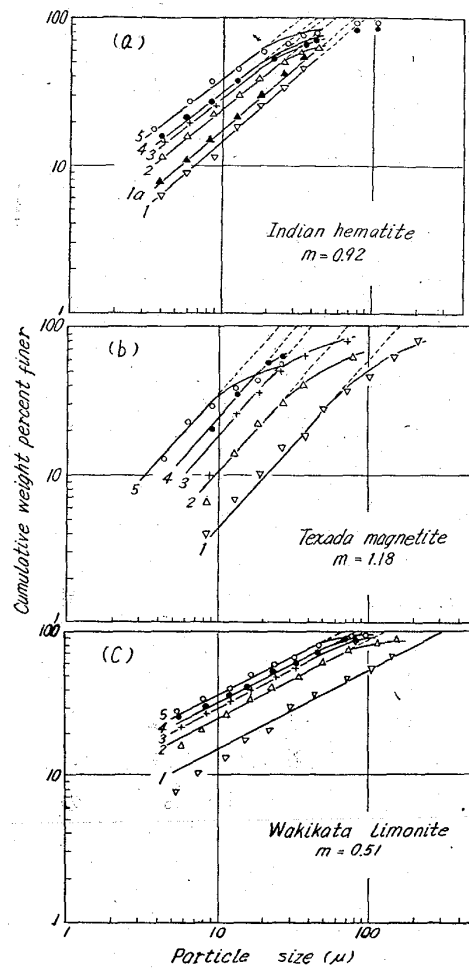


Fig. 2(a). Size distribution curves of Indian hematite.
 (b). Size distribution curves of Texada magnetite.
 (c). Size distribution curves of Wakikata limonite.

はFig. 2に示されているが、これよりそれぞれの分布係数(m)はインド赤鉄鉱0.92、テキサダ磁鉄鉱1.18、脇方褐鉄鉱0.51となつており、Table 1の湿式磨鉱の場合に比べていずれもやや低めとなつている。

ペレタイジングには400φ×250mmのバッチ式ボールリングドラム(35rpm)を用いて、3~4メッシュの種ペレットより“雪だるま”式に成長させ、径15~17mm

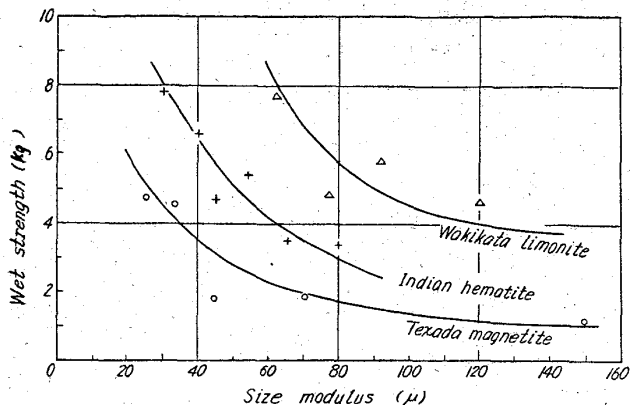


Fig. 3. Wet strength as a function of size modulus of raw feed.

程度のペレットを生成した。Fig. 3 に k と湿潤強度の関係を示す。これらの間には顕著な相関関係がみられ、湿潤強度は粒度が細くなるにつれて急速に高くなり、またこれら三鉱石の間には顕著な差異がみられて分布係数の影響が強く現われていることが示されている。

これら分布係数の異なる粉鉱石のペレタイジング適正粒度をきめるには強度が実地の経験より知られている限界値より高くなるようにえらばよいことになる。米国のタコナイトペレット操業の例として湿潤強度 3.6 kg を必要とすることが知られている⁵⁾ ので、この湿潤強度を一応基準として適正粒度を考察した。そこで Fig. 3 について限界値を 3.6 kg とすれば、適正粒度はテキサダ磁鉄鉱 45μ 、インド赤鉄鉱 70μ 、脇方褐鉄鉱およそ 150μ となつて特にテキサダ磁鉄鉱については Fig. 1 に示されているタコナイトおよび磁鉄鉱 E および F の粒度係数がほぼ 40μ であることによく一致しているのは興味深い。なお上記三鉱石について分布係数とペレタイジ

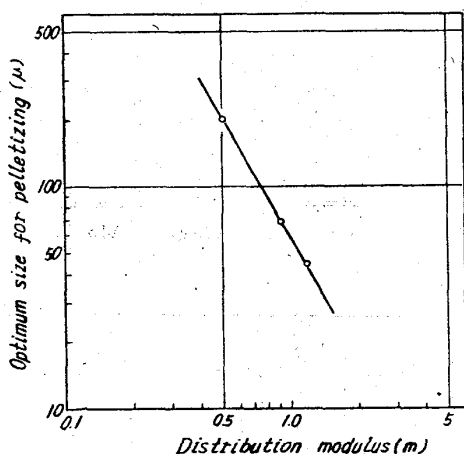


Fig. 4. Optimum size for pelletizing as a function of distribution modulus of raw feed.

Table 3. Grinding power consumption to optimum size for pelletizing.

	Optimum size for pelletizing	Ball mill diameter		
		2 ft	6 ft	12 ft
Texada magnetite	45 μ	kWh/t 50.9	kWh/t 40.8	kWh/t 35.6
Indian hematite	70	20.2	16.2	14.1
Wakikata limonite	150	6.3	5.1	4.4

ング適正粒度の関係を図示すれば Fig. 4 のようになる。ここで (2) 式を用いて前と同様 14 メッシュ以下の上記三鉱石を径 2 呎、6 呎、12 呎のボールミルで磨鉱してそれぞれの適正粒度とした場合の電力消費量を Table 3 に示した。

磨鉱費を計上するに当つては電力消費量の他に鋼製ボールの磨耗費も無視することはできない。このボールの磨耗はその材質、鉱石の種類、ボールミルの大きさ、操業条件などによつて左右されるが、ほぼ 0.09 kg/kWh とみなして推算することができる⁶⁾。

IV. ペレットと焼結鉱の物理的・化学的諸性質の比較

文献には一般焼結鉱とタコナイトペレットの物理的・化学的諸性質の比較はしばしばみられるが、同一鉱石を用いて製造した焼結鉱およびペレットについて比較した例はあまり見当たらない。一方ペレタイジング法も最近ではタコナイトのみならず他の磁鉄精鉱や赤鉄鉱にも適用され、一部褐鉄鉱にまで考慮されるようになってきた。かくてわが国のように鉄鉱資源を広く海外に依存し、また砂鉄、硫酸滓などの国内資源の活用も併せ考えねばならない原料事情におかれている場合、当然ペレタイジング法も焼結法と同様、各種鉱石や混合原料にも適用することに関心がもたれるわけで、この点各種組成原料による成品の性状とともにそれぞれの製造上の特徴についても十分把握しておく必要がある。そこでこの報告においてはまず前述のインド赤鉄鉱、テキサダ磁鉄鉱、脇方褐鉄鉱の三鉱種を選んでペレットならびに焼結鉱を製造する上の問題点ならびに成品の比重、気孔率、強度、還元性などの一般的性質について考察した。

1. ペレットおよび焼結鉱試料の製造

i) ペレットの製造

成品の性状調査に供するペレットを調製するに先立ちまずペレット製造上の問題点について考察を加え、その適正条件を求める指針とした。ペレットの製造にあたり

まず原料の粒度を調節して十分な湿潤強度をもたせねばならないことは前述の通りであるが、ここではこの湿潤ペレットを乾燥し、焼成していく際の技術的な問題点について検討した。乾燥過程においては湿潤ペレットに含まれる水分が急激に蒸発すれば当然内部の圧力が増加して崩壊する。このためペレット焼成炉には始めに乾燥帯を設けているのであるが、この点について調査する目的で上記三鉱種の粒度の異なる諸試料を用いて湿潤ペレットをつくり、温度を 300°C および 500°C に保つたマツフル炉内へ装入して乾燥させた場合の挙動を観察した。全般に 300°C ではあまり崩壊しないが、500°C では原料粉の粒度の細かいほど、またペレット径が大きくなるほど崩壊する割合が多くなり、ことに褐鉄鉱は結晶水の離脱により熱的衝撃に弱いことが示されて、原料の粒度、鉱物組成などによつて乾燥帯の温度を選ばねばならないことが示された。

焼成強度についてはⅢ-2節と同様に製造した湿潤ペレットを 110°C で乾燥した後マツフル炉に入れ、400°C/hr で昇温して所定温度に 1 hr 保持したのち炉内で除冷した試料を用いて測定した。その結果強度は磁鉄鉱、赤鉄鉱、褐鉄鉱の順に低下し、ことに褐鉄鉱では 300°C より結晶水の離脱とともに気孔率が著しく増し、強度が低下すること、いずれも 900°C より強度が上昇し始め、褐鉄鉱はこの附近から収縮すると同時に気孔率も減少し強度が増加すること、磨鉱粒度の影響は焼成強度にも平行的に表われて、同一の焼成温度では原料粒度が細くなつて湿潤強度が高いほど高くなつてい

と、しかし褐鉄鉱の場合には全般的に亀裂が認められてその傾向は原料粒度が細くなるにつれて顕著となつており、この点ことさら微粉碎して湿潤強度を増してもかえつて逆効果となりうることなどが明らかとなつた。これは要するにペレタイジングでは原料の磨鉱粒度、乾燥ならびに焼成条件を適当に選定すれば本質的には特に難点はないようであるが、それぞれの鉱石種に適正条件のあることは当然実操業に原料組成の変動が問題となるであろうと想像された。

以上の検討結果に基づいて成品の性状調査用ペレットには No. 3 原料 (Fig. 2) を用いて前と同様マツフル炉で焼成して 3kg 調製した。これらペレットの分析値を Table 4 に示す。石灰添加ペレットには石灰石として 10% 添加した。

ii) 焼結鉱の製造

これら磁鉄鉱、赤鉄鉱、褐鉄鉱を含めて各種原料を用いての焼結特性については既往の文献にしばしば報告されており、その詳細については省略するが、ここでは水分ならびにコークス添加量を選んで落下強度が 70~80% となるようにした。焼成には 30kg 焼結試験鍋を使用し、まず原鉱石単味でそれぞれの条件で焼結を行ない、これを砕いて 6mm~100 メッシュの返鉱を製造し、これらの返鉱をそれぞれ 30% 配合して焼結鉱試料を調製した。これらの焼結鉱の分析値を Table 5 に示す。

2. ペレットと焼結鉱の物理的諸性質の比較

i) 比重および気孔率

高炉の出銑量は炉内単位容積当りの鉄分、換言すれば

Table 4. Chemical analyses of pellets.

		Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	
Indian	900°C	64.84	0.532	—	—	—	—	—	
	1000	64.84	0.532	—	—	—	—	—	
	1100	64.84	0.532	—	—	—	—	—	
	1200	64.56	0.532	4.26	1.85	0.332	0.159	tr	
Self-fluxing Indian	1200	61.12	1.24	4.04	1.77	5.92	0.080	0.036	
	Texada	1200	64.56	0.532	2.86	0.876	1.83	0.637	0.060
	Wakikata	1200	56.28	1.24	13.08	3.58	0.277	0.358	tr

Table 5. Chemical analyses of sinters.

		Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	C
Indian	Coke								
	5%	66.49	19.34	5.38	2.07	—	—	—	0.075
	5.5%	66.77	21.83	5.28	1.94	—	—	—	0.075
Self-fluxing Indian	6%	66.63	24.67	5.16	1.97	—	—	—	0.075
	5.5%	63.37	18.72	5.06	1.80	4.98	0.119	0.008	—
	6%	62.77	18.01	—	—	—	—	—	—
Texada	6.5%	63.65	18.54	4.80	2.17	4.76	0.159	0.012	—
	4%	63.65	26.27	4.76	1.63	3.60	0.916	0.093	—
	9%	63.32	39.22	9.34	—	0.443	0.080	0.026	0.126

Table 6. Physical properties of pellets and sinters.

			True density	Apparent density	Porosity	Bulk density	Shatter strength (%) (No. of drops)					Abrasion resistance (%)	Crushing strength or shatter* strength*	
							1	2	3	4	5			
Indian hematite	Lump ore**		4.71	4.68	0.6	2.57	99.8	99.6	99.0	98.3	97.9	0.3	—	
	Pellet	Ordinary pellets	900°C	4.86	3.59	26.2	1.98	59.6	29.2	13.4	8.5	5.0	19.9	32 kg
			1000°C	4.89	3.63	25.8	2.01	89.8	76.8	67.6	61.1	54.8	8.5	66
			1100°C	4.89	3.65	25.4	2.07	98.5	95.5	92.7	89.9	87.8	4.5	123
			1200°C	4.87	3.80	22.0	2.11	100	99.5	99.1	99.2	98.7	2.2	395
		Self-fluxing pellets	1200°C	4.75	3.36	29.3	1.96	100	100	100	100	100	3.3	354 kg
	Sinter***	Ordinary sinter	Coke											
			5%	4.77	2.21	52.6	1.25	91.9	83.7	77.1	71.6	67.2	5.8	68.8%
			5.5%	4.75	2.48	47.9	1.33	94.6	89.8	84.0	80.5	76.6	3.5	77.0
		6%	4.73	2.71	42.7	1.49	96.7	93.3	90.0	86.9	84.1	1.9	84.2	
Self-fluxing sinter		Coke												
		5.5%	4.72	3.13	33.7	1.67	92.7	84.7	81.9	76.5	71.5	3.1	73.3%	
	6%	4.69	3.29	29.9	1.70	91.7	83.3	72.4	69.2	63.9	2.7	70.5		
6.5%	4.67	3.50	25.1	1.80	90.5	80.7	73.0	69.0	64.0	2.5	68.4			
Texada magnetite	Pellets	1200°C	5.0	3.75	25.0	2.27	99.7	99.2	99.1	99.0	98.9	3.8	341 kg	
	Sinter***	Coke 4%	4.77	2.78	41.8	1.52	97.2	94.6	92.4	90.3	87.6	4.8	81.2%	
Wakikata limonite	Pellets	1200°C	4.35	3.25	25.3	1.94	99.6	99.4	99.2	98.7	98.2	2.7	133 kg	
	Sinter***	Coke 9%	4.70	3.45	26.7	1.60	96.4	92.9	88.9	87.2	84.2	2.1	77.6%	

* Shatter strength index for the original 30 kg sample
 ** 19.1~13mm-sized sample
 *** 19.1~15mm-sized sample

嵩比重が高いほど高くなり、一方還元性は気孔率に関係しているため、これらの諸性質について比較しておく必要がある。測定に用いた試料は比較のため1個当りの重量がペレットに相当するよう19.1~13mmに整粒した。なお参考までにインド塊鉄の19.1~13mmに整粒したものも供試した。Table 6にそれぞれの比重および気孔率を落下強度、摩耗強度とともに掲げた。

表中嵩比重をみればインド塊鉄 2.6、ペレット 2.0、焼結鉄 1.8以下と相当な差異が認められ、これは焼結鉄と比べてペレットの一つの特徴とみなすことができる。またさらにインド焼結鉄についてのみみれば普通と石灰石添加の場合にはそれぞれ1.3前後および1.7前後と大きく異なっており、石灰石添加焼結の普通焼結に対する一つの特色と考えられよう。これは外観および気孔率の差より判断して石灰添加の場合は溶融して気孔が減少しているためと想像された。

ii) 落下強度

通常焼結鉄には落下強度が、ペレットには圧縮強度がよく用いられているので、両者の比較にはいずれか共通

の方法で試験を行わなくてはならない。焼結鉄の圧縮強度は当然気孔の存在から測定が困難であるので、落下強度をペレットについて行ない比較することとした。試験方法は焼結鉄についての通常の落下強度と同様な方法で、Table 6に示されたそれぞれの試料1kgを高さ2mより鉄板上に落下させ10mmでふるいにかけて、そのふるい上をもつて強度の指数とした。落下は5回行ない毎回ふるい分け試験を行なった。

ペレットの落下強度は1200°C焼成の場合には非常に高く、5回繰返しても98%以上であるが、焼成温度の低下に伴って減少し、1000°C附近以下ではことに顕著である。これは圧縮強度の温度による変化とよく似ている。一方焼結鉄についてはこの場合19.1~15mmと小さなものであつたにもかかわらず、落下によつて崩壊する割合が比較的高く、4~5回目で原焼結鉄(30kg試料)の落下強度値とよく一致していることは興味深い。

iii) 摩耗強度

焼結鉄やペレットなどの輸送、貯鉄槽内の下降および切出しなどに際しては相当な摩耗をうけ、粉化すること

が予想されるので摩耗に対する抵抗について比較することも望ましい。測定には 200φ×200mm バッチ式ボールミル（ボールを除去）を用いて、その中に前記の整粒された試料を 1kg 装入し 45 rpm で 500 回転させて取出し、6メッシュでふるい分け、そのふるい下をもつて摩耗の傾向を示す指数とした。この回転速度では試料が滝状落下による衝撃をうけることなく転落するのが観察された。結果は Table 6 に示した通りであるが、一般にペレットは 1200°C 程度で焼成してあれば焼結鉱とほぼ同程度の摩耗による粉化率を示す。しかし焼結鉱の場合形状が大きくなればさらにその粉化傾向が増加することが推測される。

3. ペレットと焼結鉱の還元性の比較

一般にペレットは焼結鉱に比べて還元性がよいといわれているが、同一原料を用いた両者の差異について検討することは興味深い。測定には熟天秤式還元試験装置⁹⁾を用い、装入試料 500g について還元温度 900°C で水素還元により行なつた。ペレット試料には 1200°C 焼成のもの、焼結鉱試料には 20mm 前後のものを用い、水素流量は 10 l/min、昇温冷却は窒素気流中で行なつた。なお比較試料として 15~20mm のインド塊鉱についても試験した。還元曲線の代表的な結果が Fig. 5 に示されている。

インド塊鉱および同ペレットならびに焼結鉱はすべてほとんど同一の還元性を示しておりその優劣を論ずることはできない。これらペレットおよび焼結鉱の分析値には特に FeO 含有量に大きな差が見られ、また焼結鉱はこれらのペレットの焼成温度よりは高温に達しているため、組織が一層緻密となつていることが想像され、当然還元性への影響が懸念されたが、このように高品位鉱を原料とした場合には拡散型結合が主となつており、かつ

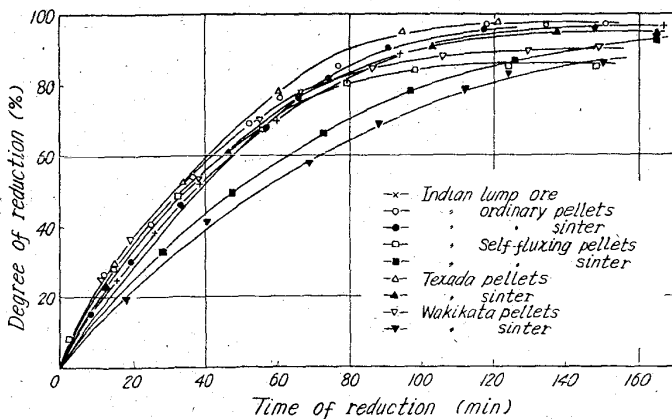


Fig. 5. Reducibility curves of lump ore, pellets and sinters.

珪酸分が少ないのでフェライトの生成も少なく、還元性には差異が現われなかつたものと考えられる。

テキサダ鉱ペレットおよび焼結鉱の結果をインド鉱ペレットおよび焼結鉱と比較するとほぼ一致していることが示されている。これらはそれぞれの化学分析値をみればインド鉱と同様な考察があてはまるものと考えられる。しかし脇方鉱の場合には珪酸分が高く、ことに焼結鉱では溶融型結合の傾向が強くなり、フェライトの生成とともに還元性が著しく損なわれているものと思われる。このような原料にはペレタイジングの方が還元性のよい成品のえられることが示されている。

インド鉱を原料とした石灰添加ペレットおよび焼結鉱の還元曲線を見ると、ことにその焼結鉱は普通焼結鉱に比べて還元性が低めとなつており、この傾向はコークス添加量の増加とともに顕著になることが観察された。これは石灰添加によつて溶融型結合が現われ、また一部難還元性のカルシウムフェライトが生成されたためと考えられ、このような高品位鉱に石灰添加すると、かえつて悪影響を与える可能性もあることが示されている。石灰添加ペレットでは初期還元速度はかなり増加して望ましい効果がえられているが、還元達成率が低下していることは 1200°C 焙焼では温度が高すぎて一部溶融型結合が現われたためと推察された。

4. 還元強度

高炉装入物として望ましい性質に前述のように成品の強度が高いこと、還元性のよいことなどがあげられるがさらに高炉内にあつて還元が進行した場合にも積層された装入物の荷重に耐え、またその下降に際して摩擦による粉化の少ないことが必要である。この点について検討するため、まずインド赤鉄鉱を原料とし、1100°C および 1200°C で焼成したペレットならびに 2% ベントナイト添加の生ペレット (10mm φ のもの) を用いて、ボッシュガス (CO 35, N₂ 65) により 700°C で 15, 30, 60, 120min 還元した場合と 300°C/hr で室温より昇温しつつ 60, 90, 120, 150, 180min 還元した場合について、それぞれ所定時間還元後窒素ガス中で冷却し、圧縮強度を測定して比較した。結果は各試料の酸化度と対比して Fig. 6 に示されているが、この方法の実験値は互によく合致していること、両者とも還元の進行とともに強度が急激に減少し酸化度 90 付近 (磁鉄鉱で 88~89) で最低に達していること、1100°C 焼成ペレットおよびベントナイト添加ペレットは初期強度はそれぞれ 35kg および 2.2kg と大きく相違しているが、還元の進行とともに強度が低下し、両

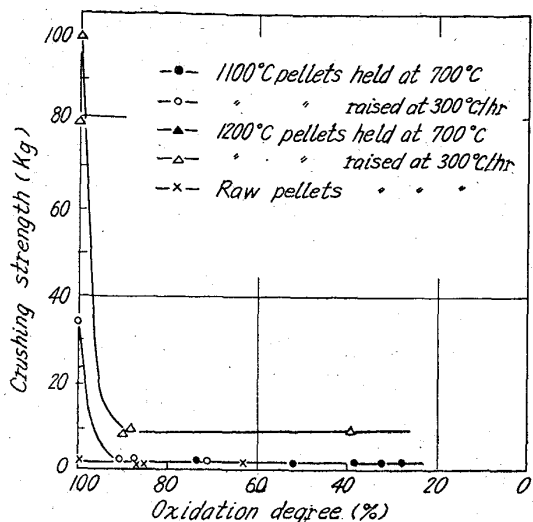


Fig. 6. Crushing strength as a function of oxidation degree of pellets reduced with bosh gas.

方とも 1~2kg 程度となること、一方 1200°C 焼成ペレットでは還元強度はさほど低下せず、8 kg を維持できるもようであることなどが示されている。ちなみに高炉内では 4kg 程度の強度を維持できれば還元後も溶融するまで崩壊しないと推定されているので、ペレットの

焼成には 1200°C 以上の温度が必要となろう。

次にペレットと焼結鉱について還元過程の強度を比較する場合、圧縮強度を適用することは困難なので、回転による摩耗強度をその指数とすることとした。供試々料はインド塊鉱およびインド鉱を原料としたペレットおよび焼結鉱で、それぞれの試料約 20 個を堅型管状炉に装入して 300°C/hr で昇温しつつボッシュガスで還元し、600°C あるいは 750°C に到達させた後窒素ガスで冷却した。原鉱ならびに還元試料は 100φ × 100mm 鉄板製の円筒型容器に装入し、100 rpm で 10min 間回転し、6メッシュふるい下をもつて粉化率とした。結果は Table 7 に示されている。

一般的に還元が進むに従って粉化の増加する傾向がみられるが、特に普通ペレットでは 1100°C 焼成のものが 1200°C 焼成のものにくらべて粉化率の高いこと、同じ焼成温度では石灰添加ペレットの方が普通ペレットより強いこと、焼結鉱は 1200°C 焼成ペレットに比べて粉化率が比較的高く、また特に石灰焼結鉱はさらに弱いこと石灰添加ペレット (1100°C 焼成) は還元性のよいことなどが示されている。また別に石灰焼結鉱の場合には還元後特に多量の炭素が沈積していることが観察された。

Table 7. Comparison of abrasion resistance of Indian lump ore, pellets and sinters reduced with bosh gas.

		Temperature reached in reduction	Chemical composition (%)				Degradation by abrasion (%)	Crushing strength or shatter strength	
			MFe	FeO	Fe ₂ O ₃	C			
Lump ore*		Original	—	1.54	89.45	—	0.0	—	
		600°C	1.40	16.74	76.81	0.21	1.5	—	
		750°C	3.59	37.09	56.17	0.31	1.7	—	
Pellets**	Ordinary pellets	1100°C	Original	—	0.53	92.13	—	2.1	35 kg
		600°C	0.84	25.74	67.02	0.065	55.5	2.4	
		750°C	7.45	49.69	34.20	0.086	57.0	1.9	
	Self-fluxing pellets	1200°C	Original	—	0.53	91.73	—	0.0	99 kg
		600°C	0.98	22.32	70.47	0.11	1.8	8.6	
		750°C	0.70	26.27	66.85	0.019	15.7	5.6	
Self-fluxing pellets	1100°C	Original	—	1.24	86.01	—	2.5	31 kg	
		600°C	5.66	33.36	45.97	1.08	9.6	10.9	
Self-fluxing pellets	1100°C	750°C	11.59	65.31	7.04	1.17	17.6	8.1	
		Original	—	21.83	77.18	—	1.0	77.0%	
Sinter***	Ordinary sinter	Coke 5.5%	600°C	1.96	21.60	70.60	0.35	12.2	—
			750°C	7.17	40.64	41.41	0.54	23.0	—
			Original	—	18.72	69.80	—	0.6	73.3%
	Self-fluxing sinter	Coke 5.5%	600°C	2.21	26.44	60.49	0.80	39.2	—
			750°C	9.24	45.96	31.06	1.13	39.3	—
			Original	—	18.72	69.80	—	0.6	73.3%

* ~10mm, ** ~10mm φ, *** 9~12 mm

これらの事実は成品自体の諸性質とは大部異なっている点もあるので、高炉内での挙動を調査し、またよりよい粉鉱処理法を確立する上にももつと広範囲に検討していくことは必要なことと思われる。この点 LINDER⁸⁾ の報告しているような熱間還元過程における粉化傾向の調査は興味深い方法であろう。

V. 結 言

この報告はペレタイジングと焼結について各々の適用範囲の限界、各種鉱石のペレタイジング適正粒度への磨鉱費、各成品の特性などを実験室的規模の試験により調査し、今後それぞれの長短について検討して行く上の基礎資料としたものである。

これらの二方法はそれぞれ最適の粒度分布があつて互いにその優劣を競うべきものでなく、むしろ相互の欠陥を補つて行くものと考えられる。すなわち一般焼結法では細粒の混入限界は 150 メッシュ以下 20% 程度、セミペレット焼結法とすれば 40% 程度までとされ、一方ペレタイジング法では一般に粒度係数を 40~70 μ 程度 (150 メッシュ以下少なくとも 95~85%) とする必要がある。しかし両者の間にはいずれにも適さない粒度の粉鉱が存在し、ことに今後高品位鉱の減少に伴い選鉱工程をへた粉鉱の増加することが予想されるので、このような場合ドラムミキサーの使用やセミペレット焼結法によつて微粉混入限界をある程度拡げて消化することも可能であるが、また一方これを磨鉱してペレットとして使用することも考えられ、その処理にいずれが得策であるかは原料種によるペレタイジングの難易とともに高炉操業でのメリットと考えあわせて考慮されねばならない。

そこでまず諸種鉱石に対して磨鉱特性ならびに磨鉱電力消費量を推定する方法について検討し、さらにインド

赤鉄鉱、テキサダ磁鉄鉱、脇方褐鉄鉱の三例についてペレタイジング適正粒度を求めて磨鉱特性との関係を検討して磨鉱費推定の資料とした。

次にペレットと焼結鉱の物理的・化学的性質を比較した場合、ペレットが嵩比重、強度、還元性、還元過程の強度などにおいて焼結鉱に優るとも劣らぬ性質をもっており高炉での効果が期待されるが、しかしむらやけによつて 1100°C 以下の温度で焼成されたペレットが混入している場合には還元過程における粉化がいちじるしく高炉内の通気が阻害されかえつて悪影響をおよぼす可能性もあると考えられる。またインド赤鉄鉱を原料とした場合の石灰添加ペレットにはさらに良好な性質がみられること、石灰添加焼結鉱は普通焼結鉱に比べて嵩比重の高いことは高炉の生産性には好影響を与えるであろうが、逆に還元過程において粉化率が高いという結果もみられていること、また原料が高品位の場合にはペレットも焼結鉱も余り還元性の差は認められないことや、石灰添加によりかえつて還元性が悪くなることもあることなどは注目に値する。

文 献

- 1) HOWER and ANTHES: *Iron and Steel Engineer*, (1956) Feb., p. 60
- 2) 鶴野, 宮川: *鉄と鋼*, 48 (1962) 4, p. 373
- 3) CHARLES: *Min. Eng.*, 9 (1957) p. 80
- 4) TAGGART: *Handbook of Mineral Dressing*. (1945)
- 5) DE VANEY: *U.S. Pat.* 2,960,396 (Nov. 15, 1960)
- 6) 池野, 萩原: *鉄と鋼*, 41 (1955), p. 847
- 7) ホプロフ: *製鉄技術総覧別冊*, 3 (1960) No. 6
- 8) LINDER: *J. Iron & Steel Inst. (U.K.)*, 189 (1958), p. 233