

# 1 トン試験高炉用コークス粒度について

金 森 研 究 室

## 第 1 節 コークス旋回帯にかんする実験

### 1. まえがき

高炉の羽口視孔から炉内を見ると、灼熱されたコークスが羽口先端から中心の方向に向かって吸込まれるように動いており、鉄棒を突込んでみると、ある所まではほとんど抵抗なしに入り、羽口前にはコークスが極めて疎に充填されている部分のあることがわかる。このコークスの運動と疎充填部の大きさが、炉況や出鉄量と密接な関係をもっていることは早くから知られており、この部分がコークスの酸化すなわち燃焼の行われる場所であるところから、燃焼帯または酸化帯と呼ばれている。

最近羽口前のコークスの動きを高速度撮影によってしらべる研究<sup>(1)</sup>が行われ、コークスがいったんある距離まで動いた後、ガスと共に上下左右から再び羽口前に戻る、いわゆる旋回運動を行っていることが確められた。ついで実験<sup>(2)</sup>によって、このようなコークスの運動が、固体粒を充填したベッドにガスを吹込んだ場合に一般に見られる現象であることが知られ、さらにはこの旋回帯の大きさとこれを規制する種々の因子との間の関係についてもかなり詳しく研究されている。一方ソヴェトの研究者は実際操業中の大型炉の酸化帯の各部からガス試料を採取し、この分析値にもとづいて、コークス旋回帯においてコークス粒と送風との密接な混合接触が行われること、したがってこの帯はコークスの燃焼焦点として重要な意味をもっていることを明らかにした<sup>(3)</sup>。

ところで、昨年 8 月当所 1 トン試験高炉の第 2 次操業において、終始低熱気味を続けたことは既報<sup>(4)</sup>の通りであるが、このさい羽口前のコークスの動きは極めて鈍く、当時粒度 10~25 mm のコークスを使用していたのを、一時 5 mm 以下としてみたが、依然として旋回運動は不活潑であり、通気性悪化のためかえって炉況を悪化させるにすぎなかった。

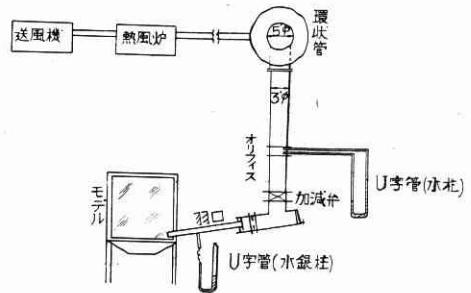
筆者らはこのように旋回運動が十分でないような状況では、燃焼が炉の下部に集中されず、したがって燃焼帯が上に延びて温度分布が上向きになる結果、いわゆる上熱気味で頭熱足寒の炉況をもたらす一つの要因になったのではないかと考えた。そこでこのような状態を改善すべく、モデル実験により、当所の操業条件において旋回運動を活潑化させる条件、とくに妥当なコークス粒度の

決定を志した。以下はその報告である。

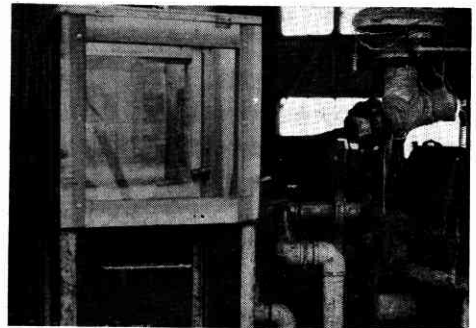
## 2. 実験装置

第 1 図に実験装置の系統を示した。

### (1) モデル

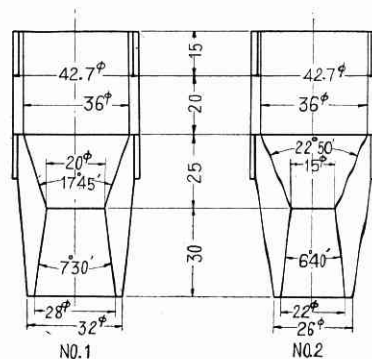


第 1 図 実験装置配置系統



第 2 図 コークス旋回帯実験装置

第 2 図 (写真) のごときモデルを使用した。このモデルの底は鉄板製で、コークスの取出しに便利のように、ホッパー状とし、蓋は蝶ネジ締付とした。また側面は二



第 3 図 ノズル寸法

方木板張り、他の二面は観測のためアクリル・ガラス張りとし、上面は 3 mm 目の金網を張った。なお木製側面には羽口挿入孔をあけ、羽口位置は上下可能な

ようにしてある。

(2) 羽口

羽口としては三種類を使用した。うち一つは実際操業に使用する1吋ガス管、他の二つは第3図のごときノズルである。羽口は水平に対して15°傾斜している。

(3) 流量および圧力測定法

上述の羽口は1トン試験高炉の羽口取付部に取付けて使用したので、流量計としては羽口流量計をそのまま使用した(オリフィス-水柱マノメータ)。

圧力は羽口先端になるべく近い所に $\frac{1}{8}$ 吋の取出口をつけ、ゴム管で水銀マノメータにつないで測定した。

なお送風機はルーツ式で、14.2 m<sup>3</sup>/min、0.2 kg/cm<sup>2</sup>、常用圧力 0.1 kg/cm<sup>2</sup> である。

(4) コークス

コークスとしては川鉄中塊を使用し、これを篩でそれぞれ、5~10mm、10mm 前後、10~15mm、15~25mm に篩分けた。なお実験中、かなり粉が発生するのでときどき篩分けをやり直した。

3. 実験方法

まず底が水平になるように木板を敷き、羽口を取付けた後、上面の網蓋をあげてコークスを少しずつ装入し、羽口上端から必要な高さまで装入したら、網蓋を始めて徐々に逆風を始める。逆風量をあるところまで増すと羽口前に球状の空洞を生じ、コークスが空洞外周を循環するようになる。この時の送風量、送風圧および空洞深さすなわち旋回帯の大きさ(羽口先端-空洞先端の距離)を測定する。このさい風は空洞頂部から上に抜けるが、コークスの高さ(ベッド高さ)が低い場合には長時間送風を続けると、コークスが吹き上げられてしまうので、測定後は直ちに送風を止める。また送風量を同じに保っても、時間がたつと空洞の深さ、形状が変わるので、測定値としては出来始めのものをとった。

送風をとめれば空洞は一応なくなるが、コークスの充填は疎になり、そのまま次の実験を行うと、前回よりも少ない流量で旋回が始まるので、1回の測定が終わった後はコークスを全部かき出して、前回と同様にコークスの装入をやり直した。

4. 実験結果

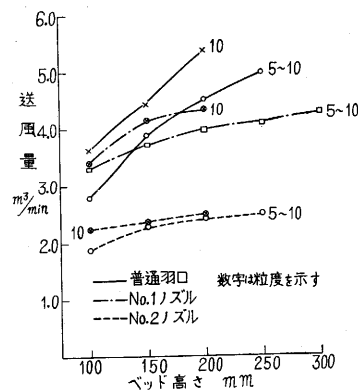
実験の再現性は比較的良好で、同一条件で2~3回繰り返すとほぼ傾向がつかめた。よって第1表には実験結果の平均値を出しておいた。これにもとづいて旋回運動と二、三の因子との関係を調べてみる。

(1) ベッド高さ

第4図にコークス粒度別、羽口形状別のベッド高さ-旋回開始流量との関係をプロットしてみた。これによればベッド高さが大きくなるにつれて開始流量も大きくなるが、ある高さ以上で飽和する傾向が認められる。この傾向は普通羽口-No.1ノズル-No.2ノズルの順に、は

第1表 コークス旋回と諸因子

羽口形状	コークス粒度 mm	ベッド高さ mm	旋回開始流量 m <sup>3</sup> /min	圧力 mmHg	旋回帯大きさ mm	
普通羽口 内径27mm 直管	5~10	100	2.8	11	80	
		150	3.9	25	89	
		200	4.5	36	90	
		250	5.0	47	90	
	10	100	3.65	17	88	
		150	4.45	29	88	
		200	5.4	54	75	
	10~15	100	5.0	36	95	
	No.1 ノズル	5~10	100	3.3	46	90
			150	3.7	69	77.5
			200	4.0	92	70
			250	4.1	122	75
10		100	3.4	45	80	
		150	4.15	133	71	
		200	4.35	193	40	
10~15		100	4.25	165	72.5	
No.2 ノズル		5~10	100	1.9	46	62.5
			150	2.3	100	57
			200	2.4	159	55
			250	2.5	202	30
	10	100	2.25	85	27	
		150	2.35	126	30	
		200	2.5	174	27.5	
	10~15	100	2.4	132	20	



第4図 旋回開始流量とベッド高さの関係

なはだしくなる。このことは羽口先端における linear velocity がある限界以上であれば、ベッド高さ如何にかかわらず、旋回運動がおりうることを示すものではないだろうか。この限界流速は普通羽口については150 m/sec 程度、ノズルについては

200 m/sec 以上(いずれも平均速度)と計算されるが、いずれにしてもコークス粒度のある範囲についてのみ妥当なものとするべきである。また圧力にかんしては飽和する傾向がみられないという事実は、ベッド高さ大なるにつれて圧力降下が大きくなること、したがってこの問題をさらに通気性の角度から再検討する必要があることを示している。

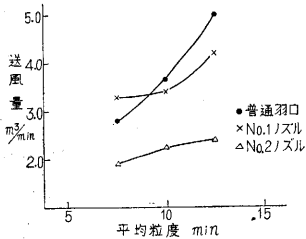
(2) コークス粒度

コークス粒度が大きくなるにつれて旋回開始流量が急激に大きくなることは、第4図によっても明らかであり、粒度 15 mm 以上の場合は、ベッド高さ 100 mm で

も、送風機容量の範囲内では旋回がおこらなかった事実もこれを裏書している。このことはベッド高さ 100 mm の場合を比較した第 5 図を見れば、一層明らかである。

(3) 羽口の形状

羽口先端を絞って線速度を大きくすれば、旋回開始流量が少なくてすむことは、第 4 図によって知られる。し



第 5 図 ベッド高さ 100 mm における旋回開始流量と粒度の関係

かも第 4, 5 図の No. 2 ノズルの曲線によれば、ノズルの形状いかんによっては、ベッド高さ、粒度いかんにかかわらず、

小流量で旋回可能となるのではないかと考えられる。ただしこの場合コークス粒度が羽口先端の直径に近くなれば、やはり旋回は起りにくくなるであろうから、絞りの程度は自ら制限されるはずである。また次に述べる旋回帯の大きさの問題も考慮する必要がある。

(4) 旋回帯の大きさ

前に述べたように、旋回帯の大きさとしては、旋回開始時のそれをとったが、実験中旋回帯は同一条件を持続しても、時間と共に大きさ、形状が変わることを認めた。すなわち、比較的粒度が大きく、ベッド高さが低い時には、旋回帯は次第に上に拡がり、充填密度が小さくなり遂にはベッドが持上げられて破れてしまうが、粒度が小さく、かつベッド高さが大きい時には、旋回帯は時と共に水平方向に深く拡がってゆく傾向がある。

Wagstaff の研究<sup>(2)</sup>によれば、モデル実験の旋回帯と実際操業炉の燃焼帯の両者について一様に、 $\rho v^2 D_j / g \sqrt{s P_j}$  と  $D / D_j$  との間に直線的関係が成立する。(ここで  $\rho$ : 空気密度,  $v$ : 羽口先端における線速度,  $D_j$ : 羽口径,  $g$ : 重力の加速度,  $s$ : 羽口前コークス粒の平均表面積,  $P_j$ : 羽口の絶対圧力,  $D$ : 旋回帯の大きさ)。しかし前述のような事情で安定した旋回帯の大きさを求めることができなかつたため、このような関係は認められず、普通羽口については、この大きさは常に 90 mm 前後であった。

しかしノズルを使用した場合には、この帯の大きさはベッド高さや粒度によって変る。すなわちコークス粒度が大きくなり、ベッド高さが高くなるにつれて小さくなるが、とくに No. 2 ノズルの場合にこの傾向がはなはだしい。これはコークスの旋回開始を規制する因子としては、限界線速度が大きな役割を演ずるが、旋回帯の大きさには質量速度の影響があることを示すものとみられる。したがってノズルの使用に当っては、著しい圧力降下なしに必要な流量を確保することに注意しなければなら

ない。

5. 考 察

(1) この実験で旋回帯の形成とその大きさにベッド高さが大きく影響することがわかった。実際の高炉ではこの高さは極めて大きく、1 トン試験高炉でも羽口からストックラインまで約 2 m あるから、旋回運動に対しては非常に厳しい条件を課することになる。しかし前述のようにベッド高さの影響はある程度で飽和するという事実と、装入物高さや湯溜部におよぼすその圧力との関係にかんする研究<sup>(5)</sup>にもとづいて、ベッド高さがある限度をこえた場合には、羽口付近のコークスの充填密度が一定になると推定することが許されよう。しかも 1 トン高炉の操業条件では、モデルとほぼ同じ大きさの湯溜(湯溜径は 500 mm である)に 4 本の羽口で送風し、しかも燃焼によって上昇ガス流量が増加するため、これによる装入物の支持作用が期待されること、朝顔部のアーチによる支持が考えられること、および、朝顔付近で溶融物が分離降下することなどによって、コークスの充填はかなり疎になる可能性がある。したがって操業上の理由から炉の高さを小さくすることができなくても、他の条件いかんによっては旋回を活性化することは不可能ではない。

(2) 羽口先端を絞って線速度を大きくすれば、流量が少なくても旋回運動が起ることが示された。1 トン高炉の操業条件では送風量が少ないので(羽口 1 本当たり 1 ~ 1.25 Nm<sup>3</sup>/min)、送風温度が高い(500°C)ことを考慮しても、普通羽口先端の線速度は 80 ~ 90 m/sec 程度にすぎないから、先端をノズルとすることが望ましいことになる。しかし前述のようにノズルには、旋回帯の大きさが小さくなり、したがって羽口から吹込まれた送風の中心への貫徹力が小さくなる傾向がある上、圧力降下が大きくて既設送風機の能力では、必要送風量を確保することが難しくなるなどの欠点があるので、これが採用は適当でない。

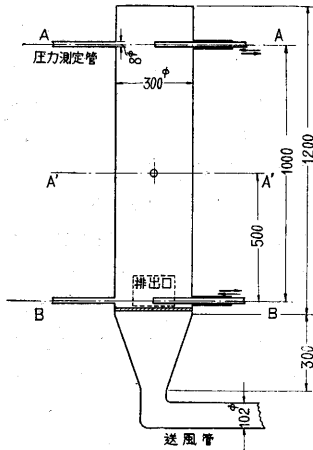
(3) したがってコークス粒度の調整が大切になってくる。これについては粒度が小さいほど有利であることは実験により明らかである。事実、大型高炉の羽口径(150 ~ 200 mm)と、羽口前のコークス粒度(Wagstaff の観測<sup>(2)</sup>によれば、1 吋以下が大部分の場合が多い)との比率からすれば、1 トン高炉の 27 mm の羽口径にたいしては、4 mm 以下であることが必要である。そこで大型炉で装入時のコークス粒度が 50 mm 前後であることを考慮すれば、1 トン炉の装入コークスの粒度としては 5 ~ 10 mm が望ましいということになる。

第 2 節 コークスの通気試験

前節で羽口でのコークスの旋回運動を活性化するためには、コークス粒度は小さい方がよいことが確められ

た。しかし粒度を無制限に小さくすることは装入物柱の通気性を悪化させ<sup>(3)</sup>、吹抜け、さらには棚吊りなどの悪現象を惹起し、また前報<sup>(4)</sup>に述べたように細粒を炉の中心に近い部分に分布させることになるなど、炉の安定操業を阻害することになるので、これにはおのずからある限度がある。

そこでこの試験では、コークス粒度と通気性との関係を調べ、この角度から1トン試験高炉の装入コークスの最適粒度を決定することを試みた。



第6図 通気試験装置

第6図にみられるように、直径300mm、高さ1,200mmの鉄板製円筒の底に金網を敷き、コークスを上方から装入した。通気性としては、円筒内の圧力降下を尺度として表わすこととした。測定は壁際と中心部の二ヶ所で行い、測定水準A・Bの距離は1,000mm、A'・B'は500mmであり、A・B、A'・B'の間の圧力差を測定した。装入高さはA・B間の圧力降下をみる時には1,135mm、A'・B'間のその時には635mmとした。

風量は4~6m<sup>3</sup>/minで、垂直下方の送風管から導入した。この送風量では装入物が全くないとした場合、流速が0.96~1.43m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>・secとなり、1トン試験高炉のシャフト中段における平均流速1~2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>・secに近い値である。

試験したコークスの粒度は次のようなものである。

粒度mm	5~10	10前後	10~15	15~20	20~25	10~25
平均粒径mm	7.5	10	12.5	17.5	22.5	17.5

10~25mmコークスは、昭和30年度第1次および第2次操業で使用したもので、この程度ならば送風上なんらの支障がないことが経験されていたので、比較のため試験した。

最後に、実際操業の条件にできるだけ近い条件を実現するため、5~10mmのラップ鉱石をコークス重量の50%配合して、通気性がどう変るかを調べてみた。

## 2. 実験結果

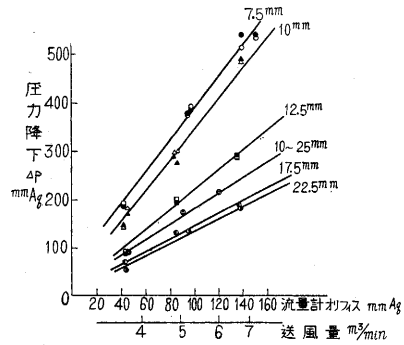
### (1) 送風量と圧力降下の関係

高さ1,000mmの場合の送風量と圧力降下との関係を第7図に示す。直線上の数字は平均粒径を表わしている。

### 1. 試験要領

第6図にみられるように、直径300mm、高さ1,200mmの鉄板製円筒の底に金網を敷き、コークスを上方から装入した。

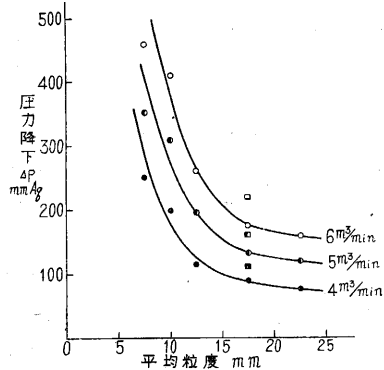
通気性としては、円筒内の圧力降下を尺度として表わすこととした。測定は壁際と中心部の二ヶ所で行い、測定水準A・Bの距離は1,000mm、A'・B'は500mmであり、A・B、



第7図 送風量と圧力降下の関係

この図で黒プロットは壁際、白プロットは中心部の測定値を表わしているが、両者の間には相異は認められない。この場合、送風量と圧力降下ΔPとは直線関係にあり、風量が増すほどΔPが大きくなるのは当然であるが、ここでは注目されることは、直線の勾配が粒度によって異なっていることである。すなわち、10mm以下の粒子では直線はほぼ平行であるが、粒度が粗くなるにしたがい、勾配は緩かになり、17.5mm以上になれば再び直線は平行になる。10~25mmの粒度のものは、平均粒径17.5mmが同一であるにもかかわらず、15~20mmのものよりも通気性が悪く、勾配も12.5mmと17.5mmの間にある。

### (2) 粒度と圧力降下との関係



第8図 粒度と圧力降下の関係

第7図から風量が4, 5, 6m<sup>3</sup>/minの場合の圧力降下ΔPを求めて、粒度とΔPとの関係を第8図に示した。図中角点は粒度範囲10~25mmのものである。

これによればΔPは粒度15mm付近を境として、それ以下では急増するが、それ以上では粒度による変化は大きくない。すなわち粒度が15mm以下になれば、粒度分布のわずかな変化によって、通気性が大巾に変化することが示されている。

5~10mmの粒度のコークスは、風量が6m<sup>3</sup>/minをこえれば吹抜けを起し、8m<sup>3</sup>/minをこえればコークスは全面的に吹き上げられてしまった。直線状管内の気体流の圧力降下は次のように示される<sup>(7)</sup>。

$$\Delta p = \mu \frac{v_0^2}{2g} \tau_0 (1 + at) - \frac{L}{d} \text{ mmAq}$$

ここで、 $v_0$ : 0°Cにおける気体の平均速度 m/sec,  $\tau_0$ : 0°Cにおける気体の密度 kg/m<sup>3</sup>,  $\mu$ : 気体・粒子表面間の摩擦係数,  $t$ : 温度 °C,  $L$ : 管の長さ m,  $d$ : 管

の直径。

もちろん、充填塔内の気体流は粒子間の空隙部（ポイド）を通過するから、流路の曲折，拡大縮小，粒の表面状態など，むしろ通気性にきわめて大きな働きをする複雑な要因が存在するため，上式のように簡単に圧力降下を示すことはできない。いま，便宜上ポイドが直列して直線状細管を構成し，これらが集まって全流路を形成しているものとすれば，他の条件が同一の時，圧力降下は流路長，すなわちポイドの大小によって変化することになる。ポイドの圧力降下におよぼす影響は実験的に確かめられている<sup>(6)</sup>。

また，圧力降下は，粒子と気体流の表面摩擦によって生起するから，この場合の摩擦係数は同一としても，粒子と気体の接触量，したがって粒子の表面積が問題になる。粒子を球体と仮定すれば，一樣な粒度で配列されているかぎり，ポイドの全容積は粒度とは無関係に一定であるが，大粒の場合には個々のポイドが大きいために，粒子と接触する気体量は相対的に少なくなり，粒度の影響はあまり現われないが，粒子が細かくなると個々のポイドが小さくなって粒子と接触する気体量が増す結果，粒子表面積の影響が大きくなる。ところで，表面積は粒径の 2 乗に比例して増大するから，小粒の場合には粒度によって通気抵抗は著しい変化を受けるのではないだろうか。

また，10~25 mm のコークスの通気性が比較的悪いことが認められる。これはこの場合の粒度分布が下のようになり，比較的細粒部分が高率を示していること，および粒度分布が広いため充填密度が大きくなり，したがってポイドが小さくなることのためであろう。

粒度 mm	10~15	15~20	20~25
%	33.7	18.1	48.2

そしてこの 10~25 mm のコークスの通気性は，第 7，8 図から，平均粒径 15 mm，粒度範囲 5 mm の場合のそれに相当することがわかる。すなわち 12.5~17.5 mm の粒度のコークスを用いれば，第 2 次操業と同程度に安定した送風が行えるものとみてよい。

### (3) 鉍石混入の影響

5~10 mm のラップ鉍石をコークスの 50% 混入した場合の通気性の変化を第 2 表に示した。ただしこの場合は高さ 500 mm 当りの圧力降下を求めた。（なおコーク

第 2 表 鉍石混入による通気性の変化

平均コークス 粒度 mm	送風量 m <sup>3</sup> /min	圧力降下 mmHg		$\Delta P_2 - \Delta P_1$	$\Delta P_2 / \Delta P_1$
		コークス単 味 $\Delta P_1$	鉍石混入 $\Delta P_2$		
7.5	4	120	145	25	1.21
	5	184	224	40	1.23
	6	251	330	79	1.33
12.5	4	72	118	46	1.64
	5	108	151	43	1.40
	6	159	184	25	1.15
17.5	4	44	78	34	1.78
	5	67	119	52	1.77
	6	112	155	43	1.39

クス単味の場合 500 mm 圧力降下は 1,000 mm のそのほぼ  $\frac{1}{2}$  になっていることはいうまでもない。

この結果からみると，鉍石とコークスの粒度の差が開くほど，鉍石の影響が大きくなるようである。

### 3. 結 論

以上の実験により次のことが明らかになった。

(1) 10~15 mm 以下のコークス粒度では通気性が著しく悪くなる。

(2) それ以上のコークス粒度では通気性は余り変化がない。

(3) 鉍石を混入した場合には，両者の粒度差の大きい場合に，その影響が大きくなる。

したがって第 2 次操業のさいの圧力降下を上まわらないことを目標とし，粒度の多少の変動の影響をさけるためには 12.5~17.5 mm の粒度を採用すべきであるが，鉍石の粒度 5~10 mm は還元性の点から動かすことのできない条件である以上，12.5 mm という下限を 10 mm 程度まで下げることは許されてよい。他方また原料コークスの粉碎—篩分のさいの歩留から，粒度範囲はもっと広いことが望まれるので，上限を 17.5 mm から 20 mm にあげ，結局 10~20 mm の粒度範囲を採用することとした。

### あ と が き

始めの実験では旋回運動を活発化させるために必要なコークス粒度として 5~10 mm という結論になり，次いで通気試験から 12.5~17.5 mm と変り，最後には鉍石粒度とのかねあいと，粉碎篩分の歩留から 10~20 mm というのはなはだ不本意な結論になった。

したがって去る 8 月に行われた 1 トン高炉の第 3 次操業では，羽口前のコークスの大きさは 7~10 mm と観測され，旋回運動も第 2 次操業よりははるかに活発ではあったが，大型炉にみられるような典型的なものは認められなかった。

しかし第 3 次操業は装入物分布の改善，保熱の強化など，他の一連の対策とあいまって終始好況を保ち，第 2 次操業のような上熱の炉況は認められなかった。それ故この程度のコークス粒度は満足すべきものではないが，種々の事情から考えて妥当なものであったと考えている。  
(1956. 11. 20)

### 文 献

- 1) J. F. Elliot, R. A. Buchanan & J. B. Wagstaff: J. of Metals 1952 p. 709.
- 2) 同上および J. B. Wagstaff: A. I. M. M. E. Blast Fc., Coke Oven & Raw Mat. 1953 Proc. p. 104.
- 3) I. P. Bardin, M. Ia. Ostroukhof, L. Z. Khodak & L. M. Tswilef: Izvestia AN SSSR OTN No. 1 p. 80 1955.
- 4) 金森研究室: 生産研究 Vol. 8, No. 12 p. 422 (1956)
- 5) M. F. Kochin: Stal No. 7 p. 579 (1956)
- 6) H. I. Krasaftsef: Metallurgiiia Chuguna p. 295 (1956)
- 7) 佐伯: 学振 54, 小委 38 回 392.
- 8) 川村, 吉永: 鉄と鋼 Vol. 42, No. 3, p. 224 (1956)