

論 文

キルン内の原料移動および温度分布*

(ロータリーキルンによる砂鉄予備還元の検討—II)

荒川 秀雄**・伊与田隆蔵**

The Travel of Raw Material and the Distribution of Temperature in the Rotary Kiln.

(Study on the pre-reduction of iron sand with rotary kiln—II)

Hideo ARAKAWA and Ryūzo IYODA

Synopsis:

In the previous paper we described the installation of a multi-purpose 46 m long kiln with 6 sampling holes and the method of taking samples from a reducing kiln while it is in operation, then showed some results of measuring works.

In this paper we discuss the travel of material and distribution of its temperature. Many literatures are found which investigate the transportation of raw materials, through a rotary kiln in the field of cement industry. From the viewpoint of roasting reaction, the material is composed of a single element for a cement kiln; however, it is always a mixture of 2 elements which consist of reducing agent and substrate for a reducing kiln. Then if segregation occurs between 2 elements, it means an interruption of reducing reaction in the kiln.

So the segregation of material is one of the most important facts in the reducing kiln.

After various experiments, researches and observations, we reach the following conclusions;

- (1) Segregation occurs because of different repose angles of material grain.
- (2) Travelling speed of grain through the rotary kiln is decided by the filling ratio of charge and its local position in the bed.
- (3) The grain of iron sand is so fine, and the reducing agent is not so fine, and as the result, the reducing agent has tendency to segregate outside of bed. We call it belt type segregation.
- (4) Belt type segregation grows into rippling distribution across the axis of kiln, we call it striped segregation.

It is necessary for reductive roasting with kiln to control the grain size of charge material.

In the future reports we shall analyse the segregation quantitatively again.

Generally, a reductive kiln has three zones by the name of drying, heating and reducing zone. Measured distribution of material temperature is almost linear throughout its length, and the rate of heat transfer in the last zone by means of improvement on heat transmission and prevention of segregation in charge material.

(Received 31 May 1963)

I. 結 言

前報¹⁾において測定対象とした試験キルンの諸設備と測定法について述べ、炉中の試料・ガスおよび温度分布など測定結果の例を示した。本報では測定結果検討項目の順にしたがって、キルン内の原料移動と温度分布につ

いて解析を進める。

ロータリーキルンは連続処理が特徴で、熱処理を行うと同時に自身高温の原料を水平方向に移動させるコンベアの働きも兼ねている。しかしながら回転傾斜円筒内の物質移動は比較的複雑で、多分に原料の性質に原因する撰択的作用をもっている。還元キルンにおいては、原料は常に被還元鉱石と還元材の二元系混合であつて両者の性質の差から原料移送中に分離を起し易い。もし還元帯の原料中に還元材偏析が起れば、還元ガスの原料層吹抜

* 昭和37年10月本会講演大会にて発表
昭和38年5月31日受付

** 東北電化工業株式会社大間々工場

けがないキルン還元に対し、当然大きな影響をおよぼすと考えられる。原料移動機構の解析は単なる処理時間の推定だけでなく、キルン処理の本質に関係があり重要な意義を持つている。原料の温度分布はキルンの伝熱機構によつて決定されるものであるが、特に還元帯における形は所定の還元を行なう時間と温度、また往々キルン操業の障害ともなるダムリングと相互関係を持つている。これに関する検討は後報で詳述することとし、本報では原料保有熱の面で計算により若干の考察を行なつた。

II. キルン内原料移動

(1) 一般則

キルン内の原料通過時間に関しては古くからセメント業界において多くの研究がある^{2)~4)}。一般的によく引用されるのは SULLIVAN⁵⁾ および WARNER⁶⁾の提唱した次式である。

$$t = \frac{0.19L}{ND \tan \theta_s} \dots \dots \dots (1) \quad \text{SULLIVAN}$$

$$t = \frac{f \times 1.77L\sqrt{\theta_r}}{ND \theta_s} \dots \dots \dots (2) \quad \text{WARNER}$$

- ただし t : 炉内通過時間 (mn)
- N : 回 転 数 (rpm)
- L : 炉 長 (m)
- θ_r : 原料安息角 (deg)
- D : 炉 内 径 (m)
- f : 原料圧縮係数
- θ_s : 炉の傾斜角 (deg)

今上式に試験キルンの諸元 $L=46$, $D=1.9$, $\theta_s=1.43$, $N=0.9$, $\theta_r=36$, $f=1$ を入れ計算すると、(1)式では 205mn, (2)式では 200mn の結果を得る。(1)式に θ_r が略されているのは普通キルン原料の θ_r が 36 度位であり、さらに平方根として利くので影響が小さく定数としてあつても実用上充分としたためである。WARNERは模型実験の観察を行なつて、原料粒子を揃えた時流動の速度は、粒度、原料深さ、原料深さより浅い炉内の堰の何れにも影響を受けず一定であるとしているのに反し Gygi⁴⁾は原料の充填率に影響されるとしている。

(2) キルン内原料状態の推定

今(2)式に試験キルンの諸数値を入れ、原料の毎分移動距離 S と θ_r の関係を求めると次式のようになる。

$$S = 138 \cdot 1 / \sqrt{\theta_r} \dots \dots \dots (3)$$

操業中炉内各地点から採取つた試料について室温で安息角の測定を行なつた。測定に使用した装置を Fig. 1 に示す。試料の多量にあるものは図中のAを用い、少量のものはBを用いた。Aは直径 30cm の短円筒で、両側

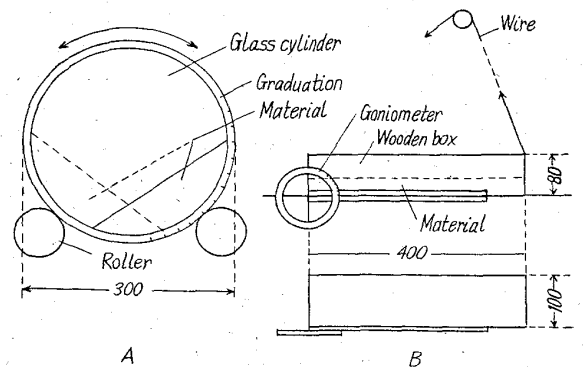


Fig. 1. Measuring instrument for repose angle.

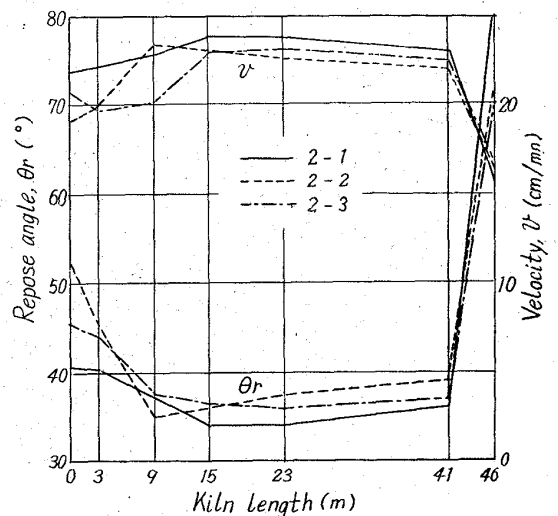


Fig. 2. Travelling velocity and repose angle of material along the kiln.

面をガラスとした。試料を入れボールミル架台に乗せ先ず一方向に回して試料を滑動させ、任意の点で停止し、逆回転してふたたび原料の滑り出すまでの回転角を讀取る。この角度は $2\theta_r$ である。B は測定箱の中に深さ約 4cm に試料を平に入れ箱を傾けて試料の滑り出す角度を分度器で讀取る。何れも 10 回の測定の平均値を採つた。Fig. 2 にキルン長に沿つた実測安息角の値と、この値を(3)式に代入して得た移動速度 v の変化 3 例を示した。各地点の v が求まれば、投入原料一定の条件からその地点のキルン単位長さ当りの原料滞留量が、また採取した試料の嵩比重の測定より各地点の滞留原料の容積が算出され、炉一原料間の円欠諸数値が決定する。以上の計算によつて求められた炉内原料の深さ H と原料充填率 ϕ の変化例を Fig. 3 に示す。一般に原料安息角は投入直後湿分のため非常に大きい。乾燥と共に安息角は急落し炉のほぼ中央で最低値をとり、さらに還元帯に入ると粒子相互の摩擦係数が大きくなつてふたたび増大し全体の形は逆梯形型となる。したがつて逆比例関係の原料

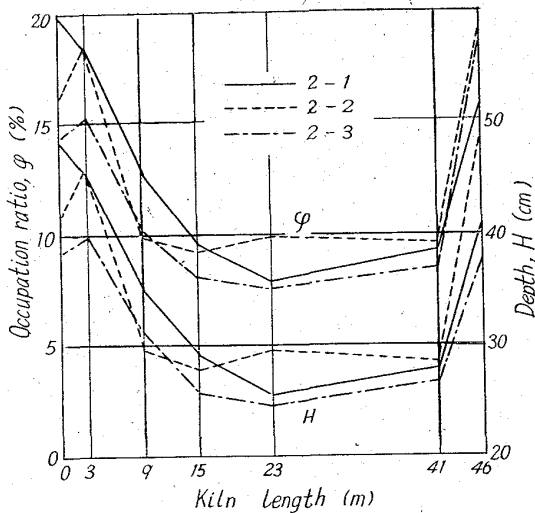


Fig. 3. Occupation ratio and depth of material along the kiln.

速度は梯形に、原料深さと充填率は同傾向の凹型となる。炉の後半で充填率が急増することは注目すべきことである。以上は室温迄冷却された試料の測定を基にした推定結果であるが、実際に稼動中の炉内原料の状態は他の要因が影響するので多少異つた形をしていることが調査の結果判明した。

(3) 原料粒子1個の挙動

キルン内の原料移動に関して原料の安息角が重要な要素となることが解る。安息角は物質の粒径、粒子密度、形状、表面附着力などによつて決定されるが、キルン中の乾燥原料に関しては粒径が最も大きな影響を持ち、キルンの回転にともなつて粒度による偏析が起り易い。Fig. 4は還元キルンに使用される原料の粒度分布と、粒径と安息角の関係を示したもので、一般に粗充填の場合

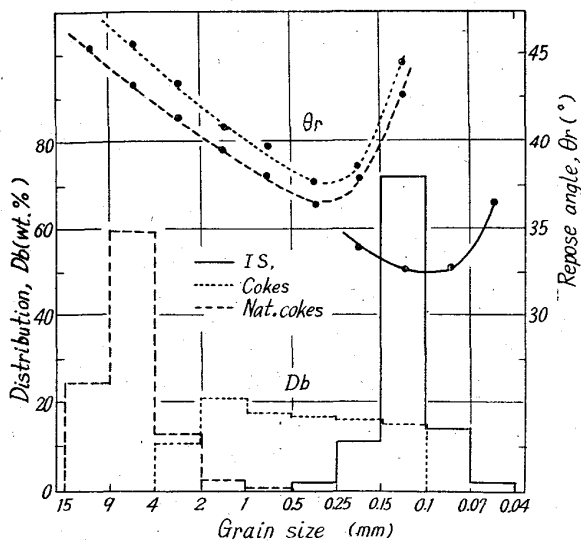


Fig. 4. Distribution of grain size and repose angle on the kiln material.

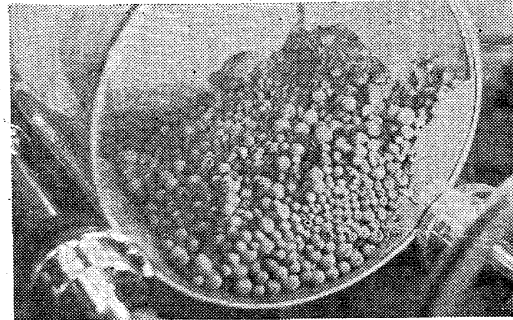


Photo. 1. Belt type segregation of pellet ball in the rotating glass cylinder.

特定粒径において安息角は最低値を示す。またその最低値は物質に個有な値が決まり、図のものでは炭材の粒径を調節しても砂鉄の安息角と全く一致する条件は得られないことが解る。筆者はガラス円筒にキルン原料を装入回転する模型実験を繰返し、回転円筒内の粒子は安息角の大きなもの程層の外周に押出され、小さなもの程回転中心に近く寄ることを認めた。この現象の例示として、粒径の滑かに分布する球状ペレットを円筒内で回転した時の粒子の配列状態を Photo. 1 に示す。一般に回転円筒内粒子層は初め層が崩れ出す前の最大安定角の安息角 θ_r 、流動する層表面が水平面と θ_m の角をなす運動角、滑動層と固定層の界面が水平面と θ_f の角をなす内部摩擦角の3種の個有角を持ち、それらの間には $\theta_r > \theta_m > \theta_f$ の関係がある。動的な解析で問題になるのは θ_m であるが一般に θ_m と θ_r の差は非常に小さいので $\theta_m = \theta_r$ として解析上支障はない。粒子安息角によつて粒度偏析が起るのは、筒の回転にともなつて固定層上部から粒子が滑動層に移る時、安息角の小さい細粒が先に滑り出し安息角の大きい荒い粒子が遅れて動くため荒い粒子が運動層の表面に浮き、固定層に入る時最も低い層の外側に集るためである。この結果固定層は粒径別に同心円状に偏析する。この偏析状態を帯状偏析と名付けた。過去に PERRY⁸⁾ が述べたようにサンドグッチ状にはならないことを確め得た。さらに識別の目的で着色した特定粒子の挙動をスローモーションカメラを使用して観察し、ある粒径を持つ粒子は確率的に同一半径の固定層軌跡上を回転することを認めた。この現象を基として、回転傾斜円筒内で偏析を起した原料層の粒子は固定層内の位置によつて円筒の軸方向に移動する距離が異つて来ることを幾何学的に解析した。Fig. 5において中心をCとする円弧EPRFをキルン炉壁断面、JPRKを炉内原料層表面、PRをキルン軸と直角をなす層表面上の弦とする。今P点に在る粒子Mが層表面を滑り落ちQ点に到り固定層に入るとする。弦PRに対する中心角を α とすると、

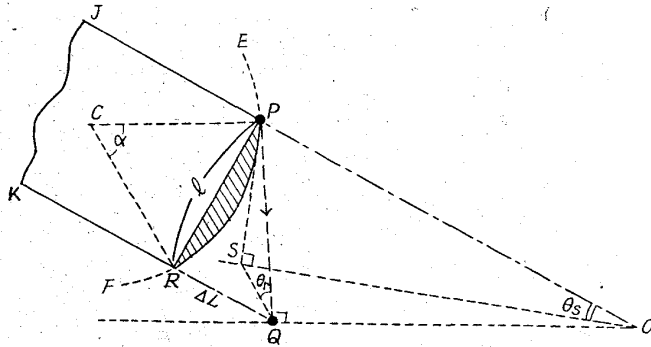


Fig. 5. Removal motion of material particles in a bed, which flows through an inclined rotary cylinder.

線分 RQ は α 回転について粒子 M がキルン軸方向に移動した距離である。これを ΔL とする。 Q 点における水平面を考え JP の延長との交点を O とする。また P より水平面に垂線 PS を下しその足を S とする。この時 $\angle POS$ は円筒の傾き θ_s , $\angle PQS$ は原料の安息角 θ_r を表す。弦 PR を l で表すと此処に

$$\triangle PQR \text{ より } PQ = PS / \sin \theta_r$$

$$\triangle PSO \text{ より } PO = PS / \sin \theta_s$$

$$\angle POQ = \angle RPQ \therefore \frac{\Delta L}{PQ} = \frac{PQ}{PO} = \frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_r}$$

$$\text{また } PQ^2 = l^2 + \Delta L^2 \quad \frac{\Delta L^2}{l^2 + \Delta L^2} = \frac{\sin^2 \theta_s}{\sin^2 \theta_r}$$

$$\therefore \Delta L = l \frac{\sin \theta_s}{\sqrt{\sin^2 \theta_r - \sin^2 \theta_s}} \dots \dots \dots (4)$$

θ_r は普通 30~40 度であるのに対し θ_s は 0.5~1.5 度ときわめて小さいので上式は次のように略すことができる。

$$\Delta L \approx l \frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_r} \dots \dots \dots (\text{in } \alpha / 2\pi \text{ rev.}) \dots (5)$$

キルンの直径を D とすると $l = D \sin \alpha / 2$

キルン 1 回転についての粒子の移動距離を d とすると

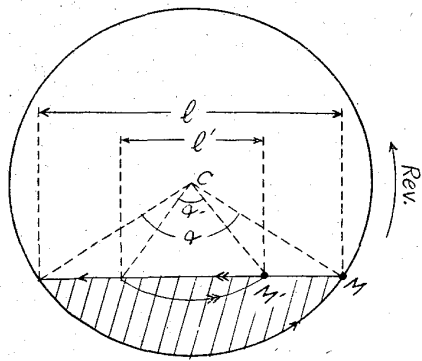


Fig. 6. Motion of particles inside bed.

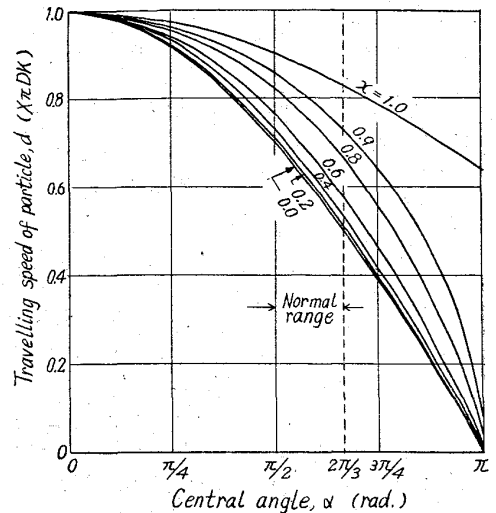


Fig. 7. Travelling speed of a single particle in various central angles & locations.

$$d = 2\pi D \cdot \frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_r} \cdot \frac{\sin \alpha / 2}{\alpha} \dots \dots \dots (6)$$

以上は Fig. 6 に示す原料層断面において、固定層の最外側粒子についてである。固定層内の任意の位置にある粒子 M' について考えると M' の運動弧に対する中心角を α' , 軌跡円の直径を D' とすると、(6) 式と同様な解析が成立しその移動距離 d' は

$$d' = 2\pi D' \cdot \frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_r} \cdot \frac{\sin \alpha' / 2}{\alpha'} \dots \dots \dots (7)$$

$\alpha' = x\alpha$ と置き、定数 $\sin \theta_s / \sin \theta_r$ を K と置き変形すると

$$d' = 2\pi DK \cdot \cos \alpha / 2 \cdot \frac{\tan x\alpha / 2}{x\alpha} \dots \dots \dots (8)$$

すなわち原料層内粒子の移動速度は原料充填率と、その粒子の固定層内回転位地の函数として表される。Fig. 7 はこの関係を図示したもので $x=1$ の最外側粒子速度に較べ、粒子位置が層内に入ると急に速度が遅くなる。また一般的に原料充填率の増す程内外粒子の速度差は大きくなる。 $\alpha=0$ すなわち窯の中の原料充填率が 0 の時粒子速度は最も早く

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} d' = \pi DK$$

となり 1 回転の速度はキルン円周の K 倍となる。また (8) 式の最終項を展開して $x=0$ すなわち炉壁円の中心から原料面に下した垂線の足に位置する粒子速度は

$$\lim_{x \rightarrow 0} d' = \pi \cdot DK \cos \alpha / 2$$

となり有限の値となる。Fig. 7 で α が π 付近では x が 1 より小さくなると急に零に収斂するように見えるが、この付近では内部粒子位置を $x\alpha$ で表現することが不適当であることが解る。ただし実際操作では α は図に示した $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$ の範囲にあるので実用上支障はな

い、さて以上の結果より原料層内任意位置に在る粒子のキルン通過時間は次式で表される。

$$t = \frac{L}{2\pi \cdot N \cdot D \cdot f'} \times \frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_s} \times \frac{x \cdot \alpha}{\cos \alpha / 2 \cdot \tan x \alpha / 2} \dots\dots\dots (9)$$

- ただし t : 粒子の通過時間 (mn)
 N : キルン回転数 (rpm)
 L : キルン長さ (m)
 f' : 滑り層補正係数

(9) 式によつて (1) における計算と同じ諸数値を入れ実測から $f=1.2$ とし $\alpha=100^\circ$ の時の粒子通過時間を出すと、最も早い外側粒子で 120mn、最も遅い中心粒子で 168mn となる。Fig. 4 に示すような粒度分布を持つた原料をキルンに流す場合、原料が湿つている中は粒子間摩擦が大きく、むしろ原料は良く混合されるが、乾燥されて粒子表面摩擦が小さくなり安息角が低下すると、粒度が大きく安息角の大きい炭剤粒子は速に原料層外周に偏析し始める。キルン回転が進むにつれ層周囲の炭の濃度は徐々に増大するが、これにともなつて原料層表面の安息角は炭-砂鉄混合系のものから炭単味に近いものへと移行し急に増大する。Fig. 8 は砂鉄-炭混合系の原料安息角と混合比の関係を示す。炭、砂鉄の粒度分布は Fig. 4 に示した使用現物と同じもので混合比は重量%で表した。普通操業条件の炭配合比 20% 前後から炭濃度が増すと安息角が急増することが解る。キルン内の炭带状偏析が発生して周囲炭濃度が上り、安息角が増すと同時に周囲炭の移動速度も押えられ、炭の停滞が

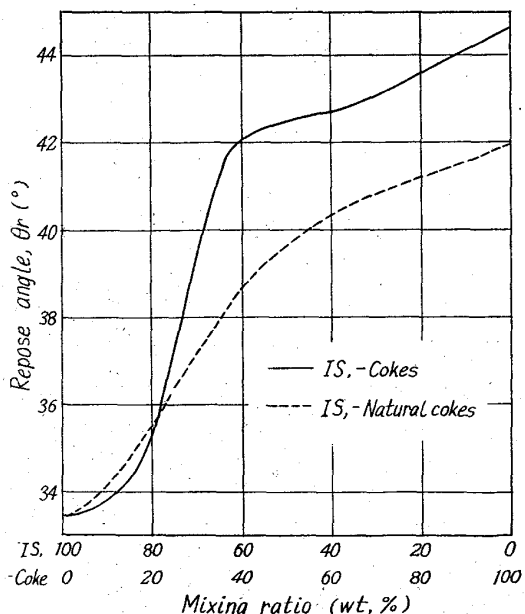


Fig. 8. Relation between repose angle and mixing ratio of material, IS.-Cokes.

起り、その地点に局部的にさらに強い带状偏析が発生する。この場合炭粒子の相互摩擦と安息角のため、原料面上に盛り上りを見せ、キルンの軸方向に新しい安息角を形成する。このため砂鉄の移動が妨げられ炭層の後方に押し出され、炭の強烈な带状偏析の塊が弧立する。この現象は規則的に繰返され表面から見ると炭の縞が明瞭に一定の波長で現れる。Photo. 2 は操業キルン内に生じた

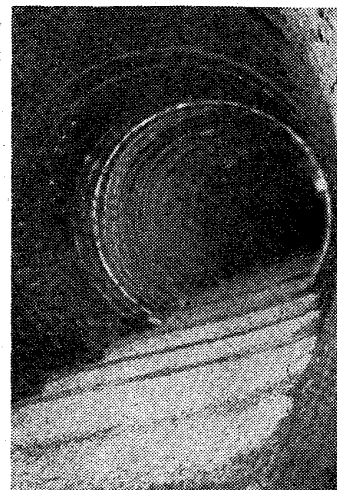


Photo. 2. Striped segregation in the test kiln. A view from T₂ (23m) toward charge end.

砂鉄、コークス系操業時の縞を示す。筆者はこの状態を縞状偏析と呼んだ。写真の場合縞の波長は約 1.2 m. でほぼ一定していることを認めた。この状態では炭粒子の移動は (6)(7) 式に適合せず炭の縞の移動速度は砂鉄のそれにきわめて近くなる。しかし炭の縞層の中心部を通過して砂鉄がわずかに宛遅れ、後方に押し出されるので、縞は一見固定して進行するように見えるが、炭の縞はわずかに早く移動する。この現象は本来還元キルンに有害である。原料層のガス吹抜けがなく、還元を固体炭素のみに頼るキルンでは大きな還元むらを起す可能性があるからである。しかしながら数次の炉内調査でこの偏析は大部分キルン還元帯のある地点から消失することを見出した。筆者は机上実験で高温状態の原料の安息角を測定し次のような推定を下した。キルン原料の安息角は砂鉄、炭何れも 1000°C 付近まで大きな変化は起らない。縞偏析の消失は原料中に還元ガスが発生してガスリフリングの状態が起り、原料全体の安息角が急落するため良好な攪拌が促されることが原因となる。縞状偏析が発生した時砂鉄層の中に炭はほとんど見出されないが、炭の中には常にある量の砂鉄を含んでいる。炭粒子と砂鉄粒子の径に大きな開きがあるので、砂鉄粒子が炭粒子の間隙に落ち込むためである。したがつて還元高温帯に入ると先ずこの砂鉄が還元を受け、ガスを発生し、炭層の安息角を低下させる。この説明から、原料体積に比し表面積の小くなるある限度までの充填率の増加、またキルンの径が大となる程縞状偏析は消失し易くなると考えられる。縞状偏析の発生と消失は模型実験で再現し難く、現場の調査が主体となるので長らく疑問を解くことがで

きなかつた。後報異状現象の項で再び採り上げいかなる条件の時偏析が強調され易くなるか定量的な検討を行いたい。

(4) 実動炉内の状態

以上述べたようにキルン内の原料粒子の挙動は理論面から見ても特異なものであるが、実動炉内の調査は最も直接的な探究である。しかし前に述べたようにキルン内に原料を保持したまま停止冷却することは特に内張煉瓦に悪影響をおよぼすので調査の機会是非常に少なくなる。稼動時の原料の状態をそのまま保持するためには、原料層表面の炭が燃焼するのは止むを得ないとして、停止後冷却するまで完全にキルンを静止しておくことが必要である。わずかでも動かすと原料は新しい安息角を作り、混合状態も変化して稼動時の姿を崩してしまうからである。このことから稼動時の原料状態の完全保存は駆動系の事故などで止むを得ず放置された時以外調査の機会はないといつて差支えない。Fig. 9 に数回の炉内調査の結果をまとめ、一般的な炉内原料の傾向を図示した。図中 θ_r は原料の安息角変化を示している。キルン原料は炉を停止した以後回転しなければ、冷却後迄作業時の安息角を保つが、一般に駆動電源を切断した直後炉内原料の重心位置が安定するまでわずか逆転する。逆転の量は原料の状態、コーティングの附着状態で必ずしも一定しない。このため原料安息角は原料面と垂線の関係のみから決定できない。筆者は炉内各位置の安息角を水準器を基準として先ず測定し、炉長 70% 付近の充分乾燥を受けた縞状偏析の砂鉄層の一部を採取し、炉外でこの試料の安息角を測定し、これを基準に他の地点の測定値を補正した。図中 φ は原料の充填率変化を示す。これは炉長 1 m 置きに原料層表面の弦の長さを実測し円欠数表より原料断面積を求め計算した値である。また T.C は数回の測定で炉内数地点の原料を炉長 1~2 m の長さで区切

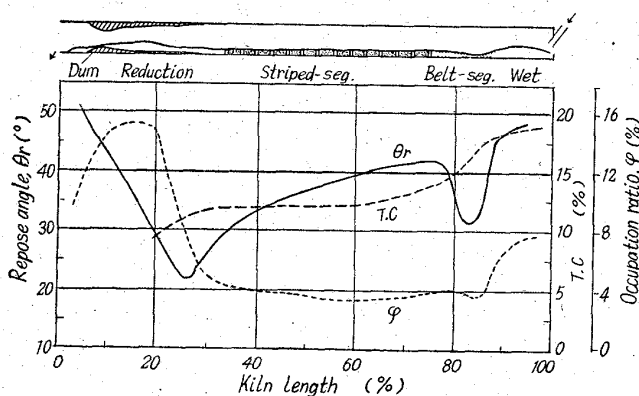


Fig. 9. Repose angle, occupied ratio and total carbon of material in operating kiln.

り、この孤立した原料をできる限り正確に縮分し、篩分および燃焼法を併用して、原料中全炭素量を決定した。この中炉の中心部は縞状偏析を起している場合が多いので、縞の一波長を正確に区切つて縮分を行なつた。図に示したものは普通操業で現れる代表的な曲線である。正確に表現すれば、 θ_r は縞状偏析部で砂鉄層と炭材層の値がわずかに異なるので波をうつつているはずであり、T.C 曲線はさらに激しく変動して表すべきである。縞状偏析に関する実測結果は後報で詳しく報告するので、本例ではその傾向のみを示した。炉に投入された原料は湿つている間は高い θ_r を示し炉内充填率も大きい。炉長 7~8% を進行する中乾燥して θ_r は一旦急落するが再び上昇している。原料の乾燥と併行して炭の带状偏析が起り、混合原料から炭濃度の高いものへと移行したためである。 θ_r の再上昇が完了した直後に縞状偏析が発生するのが普通である。この地点以後還元帯で偏析が消失するまで縞はそのまま炉内を進行する。この時砂鉄層と炭層の θ_r には 3 度程度の差が認められる。この現象は Fig. 8 の測定値と考え合せ興味深い。しかし大きな傾向として θ_r は還元帯に向い徐々に下降している。この理由は未だに解つていない。同条件での机上実験ではこのような現象は現れない。この帯域は 300~700°C の予熱帯であつて、あるいは還元材の一部の分解ガスの放出が関与しているとも考えられる。炉長 50% 以後からは還元帯に入るので発生ガスのため θ_r は急落する。縞状偏析の消失するも主としてこの付近である。そして 20 数度という異状に低い最低値を示した後再び急に上昇する。原料粒子の質的な変化と温度で表面附着力が大きくなり、また一部造粒作用が発生してガス抜けが容易となるためであろう。この部分の挙動は還元処理上からも重要である。 θ_r の急に大きくなつた原料は反覆動作で崩れるようになる。此処では安息角と運動角の差が非常に大きくなる。このため安息角の低い原料部分が反覆動作をする高温原料層の低い部分に流入する。すなわち原料がキルンの軸方向について混合が行なわれる。原料の充填率に関しては特にダムリングの影響が大きく、安息角の増大と重複するので炉の 30% から急増する。もちろんこの状態はダムリングの状態によつて大きく左右される。原料中の T.C については先に述べたように带状偏析の現象が起ると相対的に炭の移動速度が早くなり、キルン単位長について炭の含有量は急な低下を示す。図中原料投入乾燥後の T.C の下降はこの状態を現している。炉長 70% 近辺から低下が鈍り遂に平坦に近くなるのは、上に述べたように縞状偏析が発生して炭の移動加速度が阻止されたためである。しかし平坦であることは相対的に炭

速度が砂鉄のそれより依然として早いことを意味する。縞状偏析とは強度の強い帯状偏析が分割され波状的に存在するもので、中心部の砂鉄は常に相対的に炭より遅れて動くこととなる。還元帯以後縞状偏析が消失して攪拌が行なわれれば、炭濃度は投入時の比率迄上昇するはずであるが還元、酸化消費があるので低下の傾向を示す。排出口から炉長 20% の間は炉の冷却時多量のコーティング剝離物が落下し原料に混入するのでサンプリングが困難となり明瞭な結果が得難い。最後にダムリングを超えた原料は炉に吸入される冷いガスによつて冷却され、海綿鉄の粘度が上るためその安息角は 80° 近くにもなることがある。この時は原料—炉壁間の摩擦より原料粒子の内部摩擦の方が大きくなり、海綿鉄原料層は炉壁面との間に滑りを生じ、層自体の滑動が起らない。一旦この現象が起ると炉壁が磨かれるので増々滑りを助長し、炉壁のいちじるしい磨耗を起す。

以上実動炉内原料の状態調査の結果を概略述べたが、原料の炉内挙動は意外に複雑であり、キルンの処理機構に直接影響する因子が多い。これらの現象を適切に把握して合理的な操業法を見出す目的でさらに定量的な解析を行なつた。その結果は後に異状現象の項でまとめて報告する。

III. 炉内原料温度分布

キルン内原料の温度分布はキルンの処理目的である還元反応に直接連るので重要である。並通炉内の温度領域によつて乾燥、予熱、還元の 3 帯域に区分されるが、本キルンの場合その境界地点は大体 40 m および 16 m の地点と考えられる。還元反応は 23 m 以後始発するが、実用上充分な速度となるのは 16 m 以後とみなされる。乾燥帯についていえることは、前項に述べた原料偏析が発生すると、原料断面内において部分加熱が起る可能性があり、管体温度計の指示温度が高いにもかかわらず相当内部迄水分が残ることである。キルン内の伝熱が層周囲から行なわれることで理解される。このような部分加熱は他の帯域でも考えられるが還元帯では攪拌があるので普通の操業では起らないと思われる。さて炉内原料の温度分布は前報で述べたようにキルン管体に設置した温度計によつて推定することができる。前報に数例を示したが、操業実績から見て良好な炉況の原料温度分布は大体同様な傾向を示している。しかしそれは数地点の温度指示であつて、地点間の温度分布は不明である。特に最も重要である最終還元帯 0~15 m 間は特に測定困難である。キルン原料への給熱は主としてバーナー燃焼輝焰およびガスの輻射と伝導によつて行なわれる。その他還元

キルンの場合は配合還元材の一部が直接燃焼して給熱に与かる。キルンのバーナー燃焼系よりの伝熱径路に関しては、セメントキルンに関して幾つかの研究がなされている。^{9)~10)}しかしキルン最終部分の伝熱はバーナー輝焰熱輻射が支配的となるが、輝焰輻射はバーナーの燃焼状態、フレームおよびガス中のダストの存在、気圏ガスの成分によつていちじるしく左右され、正確な計算は困難である。測定対象キルン炉壁に設置した 15, 23, 41 m 地点の温度計指示、および排出端の輻射高温計指示は原料温度とともにほとんど直線上に在ることが多い。排出端の高温計は 0.6 m 奥の原料面温度を検出するが、この地点はダムリングを超えた後の原料温度で、多くの場合冷い雰囲気冷却されダムリング奥の原料温度とは隔りがあるのが普通である。また輻射を吸収するガスあるいはダストの影響を受け易い。排出端付近原料の最高温度は正確な測定が困難である。

キルン内の伝熱は輝焰(ガス)—原料、輝焰—炉壁、炉壁—原料間の輻射およびガス—原料、ガス—炉壁、炉壁—原料間の対流・伝導による直接、間接伝熱により行なわれるが、キルン単位長さの伝熱量は炉壁を経由するものも、キルンの回転によつて結局は原料に与えられる。したがつてキルン各地点の原料の含有エネルギーを算出することで測定地点間の平均給熱量を知ることができる。キルンが定常状態にある時は、原料移動の状態のいかんにかかわらず単位時間にキルン単位長さを通過する原料は一定である。したがつて測定点間の原料温度、原料還元度が決定されると、各地点における原料の含有エネルギーが算出され、両地点の差で地点間距離に与えられた熱量が算出される。計算を簡単にするため予熱帯の砂鉄およびコークスの平均比熱を 0.219 および 0.300 、還元帯の海綿鉄の平均比熱を 0.280 とし、顕、潜熱の基準は装入原料温度に採り、各地点の還元熱量は原料の還元率に比例するものとして扱う。Fig. 10 に前報で測定結果を示した。2-1 測定について計算した結果の例を示す。図中 $4U$ で示される階段図形はキルン m 当りの原料吸収熱量増加である。滑かな曲線で推定すれば曲線 $4U$ のようになる。また斜線部分は還元熱の占める面積で残りの部分点線で表した階段図形 $4H$ は原料の各地点毎の吸収顕熱量である。同じく滑かな曲線で推定すると曲線 $4H$ となる。排出端より 3 m の間は原料の酸化が起り発熱となる。 $4U$ をキルン全長に亘り積分すると約 360×10^4 kcal/h となり、重油燃焼熱の 60% 強である。図より見るとフレーム焦点下では還元熱が非常に大きな割合を占めることが解る。3~15 m の $4H$ のみから推定すると、この間の原料温度曲線は比較的ゆるやかな高原

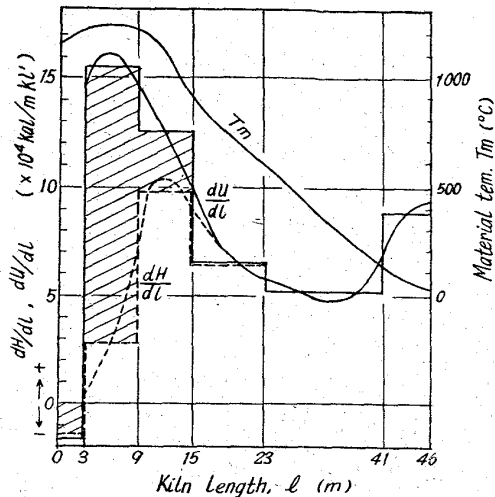


Fig. 10. The amount of heat transferred to the material along the kiln and the distribution of material temperature.

状となると思われる。ただし一部の炭の直接燃焼があれば多少凸状となるであろう。この状態を考慮して原料測定温度を補正すると図中 T_m の形となる。還元反応は原料温度に対して常に緩衝作用となるが、なんらかの原因で還元が阻止されれば ΔH は急激に上昇するであろう。この結果原料は高温となり炉壁に粘着するかあるいは熔融すると考えられる。9~15 m 間の給熱は相当大きい。還元で使用された熱量は比較的少ない。15 m 地点の温度は還元反応を進めるに十分な温度である。この間の機構的な解析は還元反応の項で述べる。還元反応を排出側に圧縮することは好ましくない。本図は実際に原料に移行した熱量の側から論じた例であるが、炉中雰囲気成分から約 15 m 地点迄フレームが伸びていると推定される。機構的に輝焰放射を広い分布として還元帯を長くする試み、あるいは強制的にガス燃焼をキルン全長に分布させて温度分布を平坦に改良する試みが幾つかなされている^{11)~12)}。注目すべきことは炉尻部分含水原料に対する伝熱効率の良好なことである。この事実から推すと廃ガスの熱回収を行なわぬ場合、原料中ある程度の湿分の変動は燃料原単位に大きな影響をおよぼさないと考えられる。炉内伝熱機構の検討は還元処理に対し重要である。後報で熱的な検討を行なうので諸精算との関係を再び論じたい。

IV. 結 言

半還元砂鉄海綿鉄製造ロータリーキルンの解析項目の中で、原料の移動と温度分布について実測値を基に検討した。原料の移動については粒子の滑り層の挙動が安息角に支配されることを幾何学的に証明し、つぎのことを明らかにした。

1) 原料が異つた安息角を持つ粒子で構成される時、滑り層部分で撰択作用が起き、安息角の大きな粒子から順に固定層の外側から中心に向い、キルン軸を中心とする同心円上に配列する。もし還元剤、鉱石間に安息角の明瞭な差があれば、固定層は二層に分離偏析する。この状態を帯状偏析と呼んだ。

2) 原料層内1個の粒子速度は固定層の外側に位置するもの程早く、軸方向の絶対速度は炉内原料充填率と粒子の層内位置との函数となる。

3) 帯偏析の発生後さらに炉内を進行すると、粒子速度の差から層周囲の炭剤濃度が増し、新たな安息角をつくり停滞するので、強い帯状偏析の孤立した塊が発生する。この現象は波状的に起り、両成分が交互に一定波長で並ぶ一見縞模様の偏析に発達する。この状態を縞状偏析と呼んだ。

4) 実動炉内調査の例を示し、上の偏析が還元帯で消失する機構を推定した。

原料温度分布に関しては炉中採取試料を基に原料に与えられた熱量変化曲線を想定し、つぎのことを指摘した。

5) 原料投入端から炉長 70% 迄はほぼ直線的な分布を示す。

6) キルン単位長当りの伝熱量は、排出側に向つて上昇するが、炉の後部 30% で急増する。

7) 還元で使用された熱量は最後部13%で急増する。還元帯は炉の後部に圧縮される。この部分の原料温度分布は比較的平坦となる。

8) 炉尻乾燥帯の伝熱効率は高い。普通の原料含水率では燃料原単位に大きな影響をおよぼさない。

文 献

- 1) 荒川, 伊与田: 鉄と鋼, 49 (1963) 12, p. 1753
- 2) BAYARD: Chem. & Met. Eng., 52 (1945) 3, p. 100
- 3) FRIEDMAN, MARDHALL: Chem. Eng. Progress, 45 (1949), p. 482
- 4) H. GYGI: 3rd International Sym. on the Chem. of Cement, (1952)
- 5) SULLIVAN, MAIER, RALSTON: U.S. Bur. Mines Tech. Paper, 384 (1927)
- 6) I. WARNER: Rock Prod., 56 (1953) 5, p. 72, 56 (1953) 8, p. 1128
- 7) 化学工学便覧: 化学工学協会, 丸善 (1958), p. 671
- 8) H. PERRY: Chem. Eng. s' Handbook (1950), McGraw-Hill, p. 1612
- 9) H. GYGI: ibid
- 10) E. ZIEGLER: Zement Kalk Gips, 9 (1956) 5
- 11) D. FASTJE: Stahl u. Eisen, 78 (1958), p. 784
- 12) H.W. MOOSER: U.S. Pat., 2,477,262, July 26 (1949)