

---

 論 文
 

---

## 稼働ロータリーキルンの諸測定について\*

(ロータリーキルンによる砂鉄予備還元の検討—I)

荒川 秀雄\*\*・伊与田 隆 蔵\*\*

## On the Measurements Concerning a Rotary Kiln in Operation.

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

Hideo ARAKAWA and Ryūzo IYODA

## Synopsis:

Nowadays interest is still being aroused in methods for direct reduction bypassing the blast furnace. In the previous literatures we can find some practical operating data on the direct reduction that makes use of a rotary kiln as reducing device, but scarcely any kinetic or analytical research on the process.

We have produced pig iron in a submerged type electric smelting furnace through half-reduced sponge iron which is obtained from iron sand in a rotary kiln since early 1956.

Recently we constructed a 46m long kiln for various tests, equipped with 6 sampling holes for different purposes. By this equipment we tried to make an overall measurement of the reducing kiln.

The measurement of the rotary kiln was made on the following items:

- (1) Temperature of raw material at 7 points along the axis of kiln.
- (2) Spot sampling of material at the same points and its chemical analysis.
- (3) Spot sampling of atmospheric gas at the same points and its chemical analysis.
- (4) Temperature of iron shell and others.

We obtained some results after several measurements and analysis on the operating kiln, especially suggested the importance of abnormal phenomenon i. e., segregation of raw material in the rotary kiln, which has influence on the reducing reaction and others.

In this paper we show the dimensions of the test kiln, equipments and methods for measuring, and then present the results of measurements.

(Received 2 May 1963)

## I. 緒 言

近来高炉は大型化，操業法の改良発達にともなつてますます完全なプラントの性格を強めている。しかし反面世界的な鉱石，炭材事情の逼迫および要求品位の上昇などの圧迫が徐々に増大しているので，長い間論議的となつてきた直接製鉄に対する興味は依然としておとろえていない。過去にロータリーキルンを還元炉として使用する直接製鉄法は比較的数が多く<sup>1)~5)</sup>，これに関する相当多数の紹介記事や報告が見られる。しかしそれらの内容はいずれも操業実績あるいは概論的なものであつて，内部にまで立入った機構的あるいは解析的な検討はほとんど見当らない現状である。ロータリーキルンは傾斜した円筒の上方から原料を入れながら回転し，下方から

熱を供給して円筒内を通過する中に熱処理を完了する一見単純な炉であるが，内部機構を観測して見るとさほど簡単なものでなく意外に複雑な現象に遭遇する。われわれは数年来ロータリーキルンと電気製鉄炉を組み合わせ，砂鉄を主原料としてキルンにおいて半還元処理した後，電炉で溶鉄迄処理するいわゆる半還元海綿鉄法を行なつて来た。今回炉長 46m 外径 2.3m の生産規模容量の試験キルンを設置する機会を得たので，若干の測定設備を施して総合的な解析測定を試みた。数次にわたる測定検討の後ある結論が得られたので，以下数報にわたり，主

\* 昭和37年4月本会講演大会にて発表  
昭和38年5月2日受付

\*\* 東北電化工業株式会社大間々工場

として砂鉄の半還元海綿鉄の処理を中心として各項目別に解析を進めて見たい。

## II. 半還元海綿鉄法

本法は砂鉄単味製錬を対象に発展した事前処理法の一つである。元来砂鉄は主としてイルメナイトの形でチタンを多量に含み、現在本邦においては電気製鉄炉のみによつて単味製錬されており、世界的にも特異な鉱石製錬である。しかしながら砂鉄が微粒であることから反応ガスの逸出に起因する吹上げなどの現象が起りやすく、炉況不安定となり、電力原単位も2500 kWh/t pigを要した。近時電炉が大型化し10,000 kVA以上となるにおよんでこの障害は決定的となり、砂鉄の予備処理の必要性が生じた。この理由から当社は1956年以来56mの長キルンと14,100 kVAの大型電炉による製鉄方式を開発し鉄生産を行なつて来た。キルンによる半還元海綿鉄法による砂鉄製錬法の利益は多くの面に現れるがその中重要なものを挙げると、

(1) 高価な電力と電炉用コークスが廉価なキルン還元材と重油に置き換えられる。キルン用還元炭は適炭炭種が広くコークスから石炭原炭系のもまで広範囲の使用が可能である。電炉の電力原単位低下は還元率60%の海綿鉄使用の時約800 kWhに達する。

(2) キルンで適当な造粒を行なうので電炉におけるガス逸出が順調となり一方電炉の還元負担が縮小して発生ガス量が減少する。この結果炉況は安定し、飛散ダスト損失が押えられる。原料歩留りは約4%上昇した。

(3) 電炉における鉄鉄もt当り所要エネルギーが低下するのは勿論であるが、海綿鉄を使用すると適正電極電力密度が大きくなるので電力負荷は約30%増加することが可能で、全体として生産性は60%上昇する。この面のみから考えればロータリーキルン処理時還元率を上昇するだけ有利となるはずであるが、実際の製錬では海綿鉄の還元度がある程度以上高めると、電炉における溶解速度と加炭速度の間に不均衡が起り、成品鉄鉄の炭素量が低下し溶鉄処理上あるいは事後の二次鉄、鋼などへの製錬上不都合となるので、海綿鉄の還元率はある限界を越えぬほうが有利となる。半還元海綿鉄法の施行される理由はここにある。

かように半還元海綿鉄の製造は還元率の上昇と造粒の二つの目的を持っているが、キルン処理において還元率をある限度に留めることはキルン自体からみても別の利益を生む。その第1は処理容量である。Fig. 1はロータリーキルン処理におけるキルン炉内容積と処理量の関係を還元方式別に概略を示したものである。キルンの

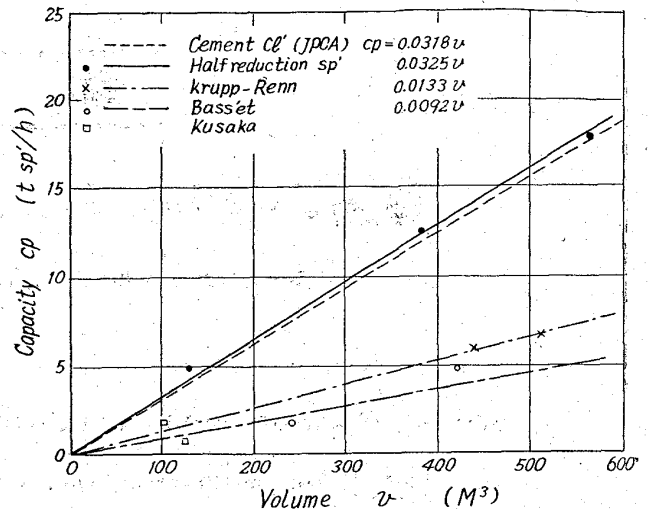


Fig. 1. Relations between productive capacity and inside volume of rotary kiln.

処理量は原料の品位、特性、処理方式によつて影響され、この関係のみで論ずるには無理があるが、鉄鉱石を還元する場合同一内容積の炉では成品の還元率と処理量は直線比例の関係ではなく、還元率がある限度以下となると急に処理量が増すことが解る。図中点線は参考までにセメントキルンの場合<sup>9)</sup>を例示したものであるが、半還元砂鉄処理の場合ときわめて近似している。還元率60%の砂鉄海綿鉄の還元所要熱530 kcal/kg sp'とセメントグリーンカーの平均焼成熟560 kcal/kg cl'とが近似していることを考えると興味深い。ロータリーキルンで全還元を望む場合、高還元領域では高濃度のCO雰囲気が必要とするので非常に過剰の炭を配合しかつ排出成品中に残留炭を残す結果となる。また高還元領域では還元速度が低下し処理時間を長引かせる。これらの原因が処理量の低下となつて現れ、また熱効率上不利を招くこととなる。

つぎに造粒に関しては本質的に熱は要求されないということが重要で、一応還元度とは無関係なはずである。したがつて還元キルンの場合、処理量が大きく必要熱の小さい半還元処理の附加価値はそれだけ大きくなる。Fig. 2は実際に生産された砂鉄海綿鉄を粒度選別し自由充填した時の粒径と通気度の関係を求めたものである。実際の成品海綿鉄の粒度はある分布で巾を持つので、現物の通気度から造粒の効果を推定すると現在生産されている末篩海綿鉄成品は単一粒径0.8mmに相当する。粒度に巾を持つ海綿鉄粒子の通気度は微粒分の含有によりいちじるしく害される。しかし上に挙げた程度のもでも生砂鉄に比較すれば40倍近く通気度が改善されている。われわれは海綿鉄粒度を現場管理するため簡略に+3mmの重量%を以つて管理指数としているが、通常

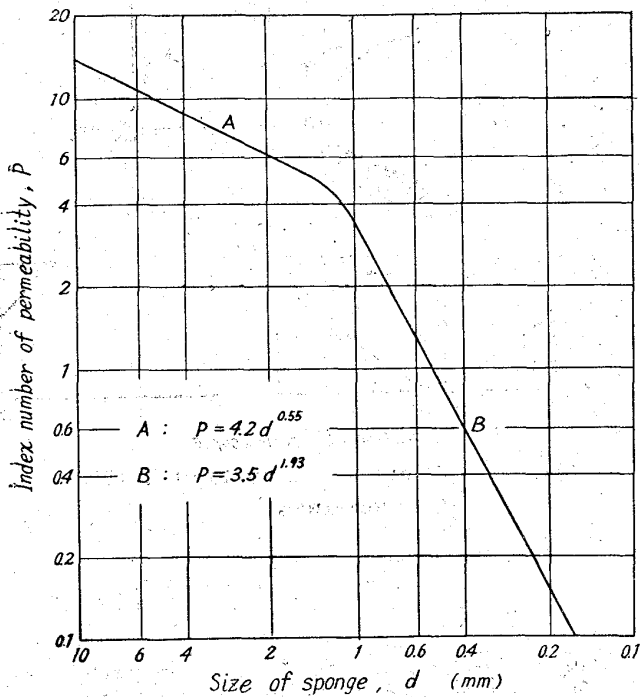


Fig. 2. Relation between size of sponge and permeability under condition of filling up free.

操業で 70% 以上を得ている。この程度の粒度であればそのまま電炉に装入して操炉上大きな支障は起らない。

### III. 測定対象キルンの諸元

測定対象キルンは単純直円筒型のもので、ロータリーキルンの基本形態であるので解析上好都合である。Fig. 3に試験キルン設備の概略図を示し、Table 1に本キルンの主要諸数値を掲げた。原料砂鉄と還元用炭材は各  $20\text{m}^3$  のホッパーに貯蔵され、おのおの規定量をメリック秤量で看視しつつベルトフィーダに切出し、ベルトコンベア上に配合される。配合原料は傾斜コンベアに乗りダストチャンバー上のシュートを経てキルン末端に投入される。投入原料は排出口から焚かれるバーナー燃焼ガス流と向流的にキルン回転によって移動し、加熱、還元、造粒処理を受け排出口から溢出し、フード内のロストル、シュートを経てクーラーに投入される。クーラは水平回転円筒で内壁にスパイラルの送り羽根を持ち、海綿鉄を移送しつつ内部に設けられたシャワーにより冷却を行なう。冷却された海綿鉄はピットに吐出されバケットクレーンによって倉庫に山積み貯蔵される。加熱は内部

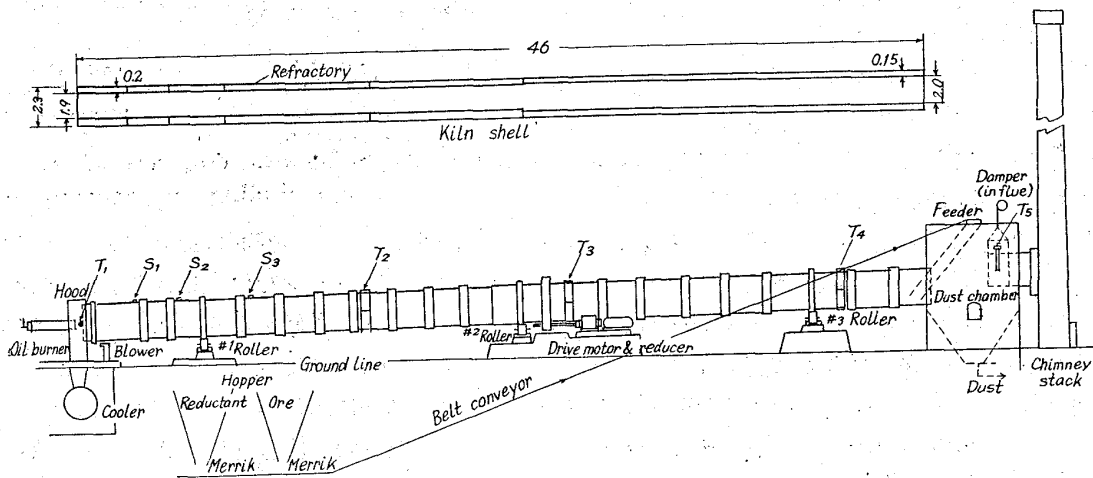


Fig. 3. Construction of test kiln at Omama.

Table 1. Specification of test kiln.

Type	Direct cylindrical	Burner	Oil combustion
Diam. of shell	2.3m	Capacity of burner	600 l/h max.
Thick. of shell	16mm	Roasting temp.	1250°C max.
Length of shell	46m	Temp. of waste gas	300°C
Inclination	2.5%	Chimney stack	1.5m φ × 30m
Revolution	0.22~1.2 rpm. 4 change	Dimension of cooler	1.7m φ × 5m
Drive motor	50HP	Revolution of cooler	3 rpm
Refractory	Sillimanite & Chamotte	Drive motor of cooler	7.5HP
Inside volume	130m <sup>3</sup>	Material hopper	20m <sup>3</sup> × 2
Wall area	281m <sup>2</sup>	Material weighing	Merrik × 2
Support	3 point	Productivity	120t sp'/d (DR 60%)

混合気式重油バーナーによつて行なわれ、廃ガスはダストチャンバーでダストを回収された後煙突から排出される。キルン内の負圧は煙道中に設けられたダンパーによつて調節される。Fig. 3 の上部には炉体内張煉瓦の施工を表示した。排出口より 8m までをハイアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  80%)、8~24m 間を SK 32 シャモット、24~46m 間を SK 30 シャモットの横ぜり煉瓦を使用した。施工厚は SK 30 のみ 150mm 他は総て 200mm である。炉体は 3 支点のタイヤをローラーで受け、駆動は 50 馬力の高圧モーターを可変減速して毎分 0.24, 0.57, 0.89, 1.23 回転の 4 段に変速可能である。炉体の長さ と直径の比  $l/d$  は 20 で還元用あるいは乾式セメントキルンに比較的多く採用される数値である。

#### IV. 測定設備および測定作業

測定上最も重点を置いた炉内原料採取用の穴を何処に設けるかを多方面から検討して、排出口より 3, 5, 9, 15, 23, 41m の距離に相当する 6 カ所に決定した。キルンの還元帯は比較的后部に圧縮され、前半は乾燥予熱作用のみで、化学的反応は起らないと見てこのような配置を選んだ。また測定上原料温度の測定記録は必要事項であるが、従前の経験で煉瓦積の間にこのような加工物を設けると操業中煉瓦との間に大きな内部応力が生じ、煉瓦のスポーリング、脱落を起しやすいため加工の数はできる限り少ない方が望ましい。この為上に決定した 6 カ所の穴を常時は測温に用い、測定時のみ臨時に原料、ガスの採取あるいは圧測定など多目的に共用することとした。ただし 9m までの高温部の穴は温度計を設置しても厚いコーティングが附着して測温の意味がなくなるので常設温度計は 15, 23, 41m と排出口から 1m の原料面温度を看視する輻射高温計および煙道に挿入した廃ガス温度検出熱電対の 5 点とした。9m までの高温帯の穴は測定時コーティングを破り、臨時に PR-13 熱電対を挿入しチェックを行なつたが、時間と共に穴の変形がはなはだしく、あまり良い結果は得られなかつた。他の常設熱電対は CA 素線を軟鋼保護管に入れ ER に連続記録した。熱電対先端はキルン内壁面から約 50mm 突出させたがこの検出端はキルン運転時どのような温度を示すであろうか。Fig. 4 は操業時  $T_2(23m)$  における起電力軌跡を応答の早い ER を使用して、キルン 1 回転について記録したものである。温度計が原料に浸っている時間は、通常のキルン内原料充填率の時(約 10%) 1 回転の中約 1/4 で、残り 3/4 はガスに洗はれているはずである。したがつて原料温度より相当高い値が出るはずであるが実際はきわめて小さい。これは温度計の突出が小さく原料で常

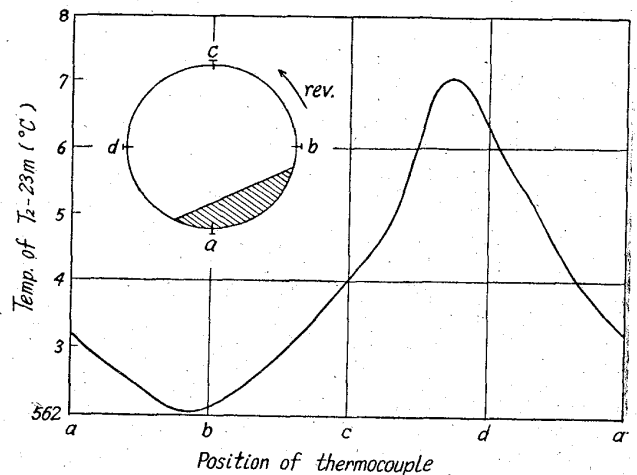


Fig. 4. Temperature cycle of  $T_2(23m)$  thermocouple.

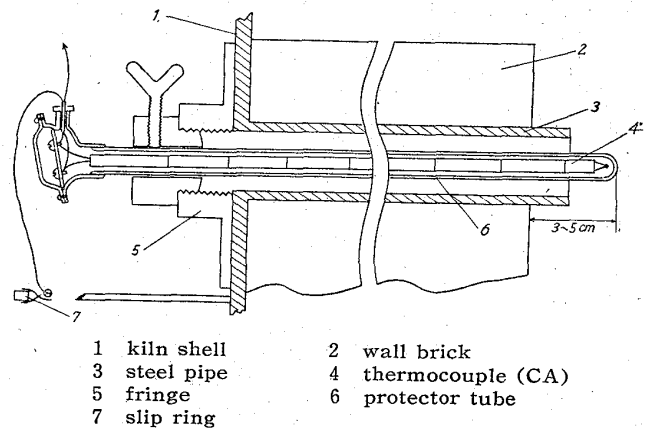


Fig. 5. Schematic diagram of measuring hole for sampling and thermo-couple.

に冷やされている壁面の影響が大きいと考えられる。図の a 位置にキルンを停止し飽和温度を測定した処、図の温度サイクル最低値より  $4^\circ\text{C}$  低い値を示した。なおこの時の温度計時定数は 40 s であつた。操業時起電力を打点記録計に入れると当然記録はバラつくが、その最低値より幾分低い値を採れば良いこととなる。しかし誤差が発生しても大きな値ではなくむしろ原料内の温度分布の問題の方が影響は大きいと考えられる。他の地点の温度計の傾向も同様である。

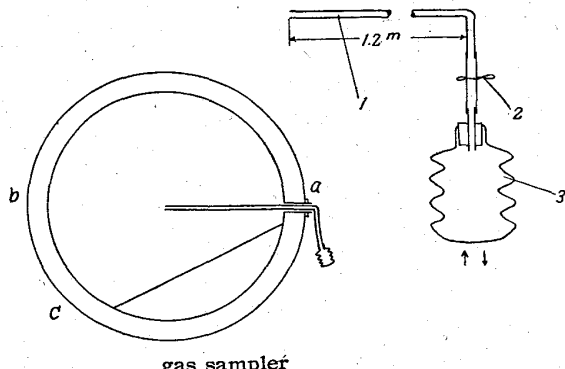
これらの温度検出端は他の測定作業の時簡単に撤去できなければならない。その為熱電対はキルン管体のフランジにネジ取めとし、引出し導線は管体に設けたスリップリングにクリップで接続するようにした。測定穴部分の構造は Fig. 5 に示した。排出口原料温度を輻射高温計で測定する際海綿鉄の黒度を決定する必要がある。標準の海綿鉄をグラファイト片と共に  $\text{N}_2$  雰囲気中で満した試験炉に置き、光高温計を使用して比較測定し黒度を決定した。この結果多孔質海綿鉄の黒度は  $1100\sim 1200^\circ\text{C}$

において  $0.92$  と高い値を示した。黒度による補正は  $E_R$  内で行なつた。キルン排出口付近はクーラーから発生した水蒸気あるいは燃焼により生じた  $CO_2$  ガス、さらに発生ダストがはなはだ不規則に雰囲気を変化する。この為熱線の吸収が不規則に起り温度計指示は大きく変動する。変動の中は  $100^\circ C$  以上におよぶこともある。記録の読取りは最大値の包絡線を以つてした。

原料の炉中採取時には熱電対を引抜き、キルンの回転にしたがつて吐出される原料を急冷箱に受けた。この時注意を要するのはキルン内原料に偏析が起つた地帯では、後に述べるように偏析の1波長毎に異つた原料が排出されるので、吐出物を観察しなければならない。このような時は吐出物変化の3週期以上を採取した。排出口附近3m位までの原料採取はフードから8mのスプンを挿入して試料を汲取つた。試料は密閉容器で急冷し、縮分してガラスビンに保存し後の諸試験に供した。1回の採取量は数kg程度とした。試料の分析はJISおよび学振法原鉄の分析に準じた。このうちキルン原料中には生炭を多く混合しているのでT.Cの決定にはあらかじめ海綿鉄とグラファイトの人工試料で検討し、誤のないことを確かめ燃焼容量法を採用した。

ガスの採取地点はキルン長手軸上の点とし Fig. 6 に示すように行なつた。図中a地点でガスサンプラー管をキルン中心軸迄挿入し、ポリエチレン製蛇腹ピンを数回圧縮してピンを洗い、測定穴がc位置に回転する間に採取する。馴ればb~c間で充分採取出来た。ガスは直にオルザットで3成分を、また必要に応じて爆発ピュレットを使用して5成分を分析した。炉内圧(静圧)の検出はガスサンプラー管を傾斜管マンメーターに接続して圧を読取つた。

以上の測定は総て操業中なるべく炉況の安定した時期を見て、キルンの回転を停めることなく行なつた。しかしながらこれらの測定穴は永久的なものではなく、この



1 steel pipe, 2 pinchcock, 3 polyethylene bottle  
Fig. 6. Method of gas sampling and sampler.

穴の地点からしばしば煉瓦の脱落事故が起り、また煉瓦の回転ずれが生じ、穴を変形させ測定を困難とした。高温帯の穴はコーティングに閉塞され開通に酸素を使用したこともある。

管体鉄皮表面温度は主としてコンスタンプループを使用して熱起電力測定法によつたが詳細は熱精算の項で述べる。特殊な測定としてキルンの駆動系の事故で原料を稼働状態のまま保持して停止冷却した炉の立入調査を行ない、原料、ダムリング、コーティングなどの精密調査を行なつた。多量の原料を炉内に残したまま炉を冷却することは炉に有害であるので、これらの調査は数少く貴重なものとなつた。キルン附帯設備によつて、定常作業として記録される原料配合、切出し、水分測定、バーナー重油燃焼量、一次、二次空気圧および流量、成品粒度、品位などの諸数値はそのまま使用した、本キルンには特別な自動制御系は施されていない。

## V. 測定結果

諸種の操業条件の下で数次にわたる測定を行ない、大体所期のデータを得た。これらの測定結果を基にし、得られた試料の室内試験を裏付けとして次のような項目について解析検討を進めた。

- (1) 原料の移動および温度分布
- (2) 還元反応および炭材の挙動
- (3) 造粒過程および原料再酸化
- (4) 異状現象(原料偏析および粘着)
- (5) 硫黄,その他成分挙動および廃ガス,ダストなど
- (6) 物質収支および熱収支
- (7) 還元キルン操業の改善および新方式の開発

本測定調査の目的は従来経験的な判断で操業されがちであつた還元キルン操業を合理的な操業に改善し、計測制御系の採用に対するプラント特性の把握、あるいはさらに新しい形式のプラント開発のための基礎資料を得ることに在る。本報告では解析の基礎となる測定結果を示すにとどめるが次後上の項目にしたがつて検討を進める。

炉中摘出した現物試料は測定解析の基礎データを提供する重要な材料である。Photo. 1 は炉中採取試料の例で 2-2 測定(砂鉄-ホンゲイ炭操業)における一部を示す。炉の最終部で粒子成長を起した原料はサンプリング穴の径以上となれば採取出来ない。しかし造粒が急激に進行するのは5~0mの間であつて、この帯域は排出側からサンプラーが届く範囲となるので問題はないと考えられる。Table 2 は測定結果の諸数値の1例(2-2)で表中還元率 D.R.% は慣例によつて下記の式より算

Table 2. Result of measurement.

2-2 anal.

IS.-Hongei anth.

June, 1961

Burner			Raw material			
Oil flow	Pri. press.	Temp.	Total burden	Moist.	Coal ratio	Coal name
540 l/h	3.9 kg/cm <sup>2</sup>	97°C	7.5 t/h	6.5%	0.26	Hongei

Analysis of spot sample and gas.

Hole(m)		46	41	23	15	9	5	3	0
Material	T.C	14.7	13.6	10.3	7.7	10.2	10.4	8.2	3.1
	T.Fe	43.9	47.5	48.9	52.4	50.3	52.4	61.4	68.2
	M.Fe	tr	tr	tr	tr	tr	tr	32.1	34.9
	FeO	23.4	26.0	27.8	32.3	33.2	51.2	34.1	34.1
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.9	38.9	38.9	38.9	34.9	7.0	4.0	4.0
	TiO <sub>2</sub>	9.5	10.2	10.4	10.9	9.9	10.7	12.2	12.9
	SiO <sub>2</sub>	4.6	4.3	3.5	3.6	4.7	4.5	5.2	5.1
	T.S	0.095	0.070	0.068	0.056	0.075	0.113	0.151	0.146
	Moist.	4.82	0.69	tr	—	—	—	—	—
	D.R.	0.0	0.6	1.3	2.7	4.0	30.5	61.4	63.1
Temp.(°C)	290*	140	620	805	1020	—	—	1140	
Gas	CO <sub>2</sub>	—	17.0	14.4	14.1	11.4	—	—	—
	O <sub>2</sub>	—	5.2	5.8	4.8	12.0	—	—	—
	CO	—	6.3	9.3	8.2	25.9	—	—	—

Note: Dumring normal \* Waste gas temp.

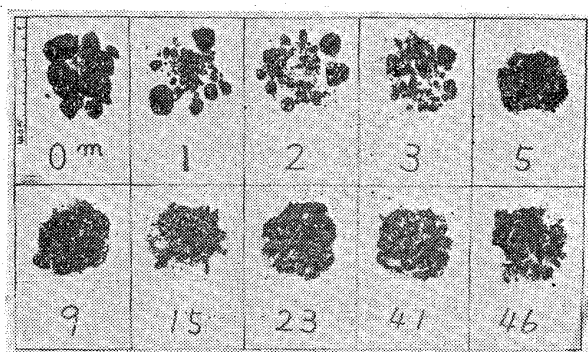


Photo. 1. Specimen of spot sample from operating kiln. (2-3, I.S.-Anth.) The numbers indicate the distance between discharge end and each sampling point of kiln.

出した。

$$DR_{SP'} = \left( 1 - \frac{SP' \text{ 中の } O}{IS. \text{ 中の } O} \right) \times 100$$

温度の中 46m 地点の数値は煙道における廃ガス温度を示し、41~15mは前述した記録温度、9m はスポット測温記録、0m は輻射高温計の指示値である。ガス分析はオルザットを使用したので水分を除外した成分を示す。

Fig. 7 は他の測定例 (2-3, IS-Anth, Hongei) をグラフ化して表したもので横軸をキルンの長さに取り測定地点における値を線で結んだ。この場合原料の成分%量はむしろ成分絶対量として表した方が便利と考えられるの

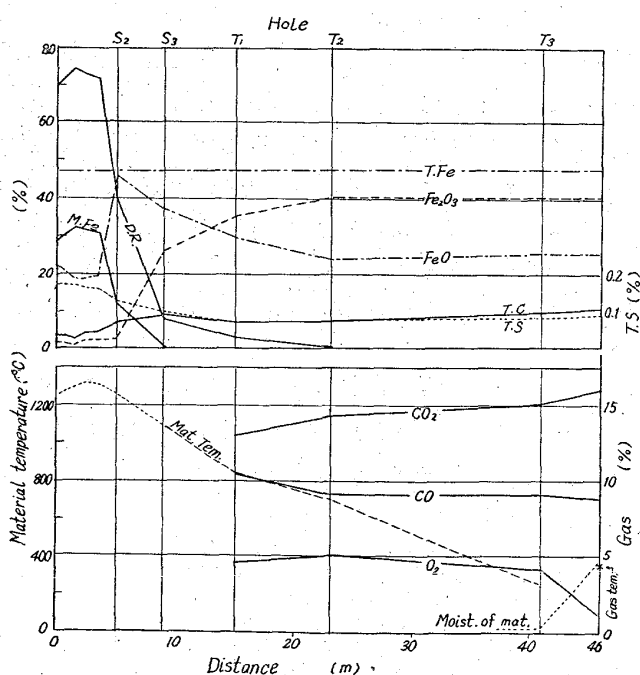


Fig. 7. The relations between various factors and the distance from discharge end of kiln. (2-3, anal. IS.-Anth. & Cokes)

で、キルン処理中全長にわたって原料中の鉄損失がなく T.Fe 絶対量は一定であると仮定し、投入時の原料の T.Fe を基準として各地点の T.Fe 値との比を係数とし、炉中試料成分%を補正した値を採っている。筆者は

これを第1次補正と称した。数次の測定を行なつて見ると、砂鉄を処理する場合 T.C が多くの場合キルン全長に対し凹形であり炉の中心部で低値をとることに気付いた。初期の測定作業で測定穴を開き原料を吐出させる時、しばしばキルン回転の、ある周期にしたがつて吐出原料の質と量に変化が起こっていることを観察した。その後炉内に入る機会を得、顕著な原料偏析を発見した。筆者はこのキルン特有の原料偏析をその状態で区別して帯状偏析および縞状偏析と呼んだ。この現象がある限り、偏析した物質に関しては、摘出試料の質、量ともキルン単位長の原料を必ずしも代表するものではないと思われる。それにもかかわらず試料はこれらの現象で起こる原料状態の傾向をある程度表していることを後に確め得た。砂鉄と反対に粒度の荒い鉱石を処理した場合 T.C が逆に凸状に中心部で高くなる測定結果も得た。筆者は実験室的な基礎実験を裏付けとして回転傾斜円筒内の粒子移動は安息角に起因する偏析が起こりやすいこと、安息角の決定要因として粒子径が最も支配的であることを指摘した。この現象は殊に還元反応に影響が大きいので少し詳細に検討解析を行なつた。後に報告する原料移動と異状現象の項で詳述する。

## VI. 結 言

従来ロータリーキルンを使用する直接製鉄の報文は多数発表されているが、それらは大部分操業上のデータであつて還元キルン内部に立入つた検討解析をなされた例がない。今回当工場に 46m の長さを持つ大型試験炉

が建設されたのを機会にキルン管体の6カ所に多目的の測定穴を設け、ロータリーキルンの総合的な機構解明のため、次の項目について基礎的な測定を試みた。

- (1) キルンの長さに沿つた7地点における原料温度の測定。
- (2) 同地点における原料サンプルの抜取りと分析。
- (3) 同地点におけるガスの採取と分析。
- (4) キルン鉄皮表面温度の測定。

採取した試料については多角的に室内実験測定を行ない、解析の基礎とした。以上の検討から回転傾斜円筒内粒子の移動には偏析が発生しやすく還元キルンではこの現象の影響が大きいことを指摘した。本報では測定の設備方法と結果の概略を述べ次報以後順次解析結果を報告する。

## 文 献

- 1) 遠藤, 松下: 鉄と鋼, 48 (1962) 6, p. 796~802
- 2) WILLIAMS: A Process for the Production of Sponge Iron, (1924)
- 3) MAX. J. KENNARD: Min. Cong. J., (1961) 1, p. 34~37
- 4) M. J. UDY: Iron & Steel Eng., (1959) 11, p. 109~116
- 5) A. SCORTECCI, A. PALAZZI: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), (1960) 6, p. 267~277
- 6) Iron & Steel Production in Countries Poor in Raw Materials: Iron & Coal Trade Rev., 21 (1956) 12, p. 1489~1492
- 7) 高野: 鋼管技報, 11 (1958) 1, p. 52~60
- 8) 吉井: 窯業, 62 (1954) 694, p. 299