

論 文

焼結層中の温度分布におよぼす空気流量, コークス量, 水分量の影響*

(鉄鉱石の焼結に関する基礎的研究—I)

三本木貢治**・西田 信直***・須沢 昭和****

Influence of Air Flow, Coke Content and Moisture Content on the Temperature Distribution of the Sintering Bed.

(Fundamental study of sintering of iron ores—I)

Koji Sanbongi, Nobunao Nishida and Akikazu Suzawa.

Synopsis:

With respect to Goa hematite ores and Larap magnetite ores as raw materials, the influence of air flow, coke content and moisture content on the temperature distribution of the sintering bed were studied with a small sintering pan.

The results obtained were as follows:

(1) The air flow had an influence on the combustion rate of coke, moving rates of sintering zone and of the cooling zone, and thereby the temperature distribution of the sintering bed was largely varied.

(2) The coke content had an influence on the moving rate of the sintering zone and maximum bed temperature. When the coke content was higher than the optimum, the sintering zone tended to be broadened, yet the maximum bed temperature was little affected. At lower coke content, however, the maximum bed temperature was considerably decreased.

(3) The shape of the temperature-time curve was influenced by the moisture content, but the maximum bed temperature was little affected. The lower the moisture content, the broader the sintering zone and the cooling rate.

I. 緒 言

最近の自熔性焼結鉱の使用による熔鉱炉操業成績のいちじるしい向上に刺戟されて、焼結設備の増設が進められ、焼結作業に大きな注意が払われるにいたつた。

従来、数多くの焼結法に関する実験が行なわれてきたが、これらは主として優良焼結鉱を製造するための最適コークス量および水分量などの決定に集中され、焼結機構の本質的なものに触れた研究はあまり行なわれていなかった。しかるに HESSLE の磁鉄鉱の焼結機構に関する考察¹⁾, JOSEPH らの焼結過程に起る物理化学的変化の解明²⁾³⁾; さらに VOICE, WILD による不活性材料を使用する焼結過程を支配する要因についての実験⁴⁾⁵⁾などによつて複雑な焼結機構は一步步解決されつつある。

著者らも数年来焼結実験を実施してきたが、本質的な

焼結機構の解明の必要性を痛感し、超小型焼結機を使用して焼結実験を実施し、焼結作業の重要因子である焼結層中の温度分布におよぼす各因子の影響について研究を実施した。

II. 実験装置および方法

実験は Fig. 1 に示すような 1 装入約 3 kg の超小型の装置によつて行なつた。焼結鍋は内径 105 mm, 高さ 290 mm (のちに 250 mm に改造) の鉄管で、底に径 3 mm の小穴を多数あけた鉄製の円板を熔接して火格子とし、管の側壁には火格子面より 40 mm, 80 mm, 120 mm,

* 昭和 34 年 11 月本会講演大会にて講演

** 東北大学選鉱製錬研究所, 工博

*** 富士製鉄株式会社室蘭製鉄所研究所

**** 富士製鉄株式会社広畑製鉄所

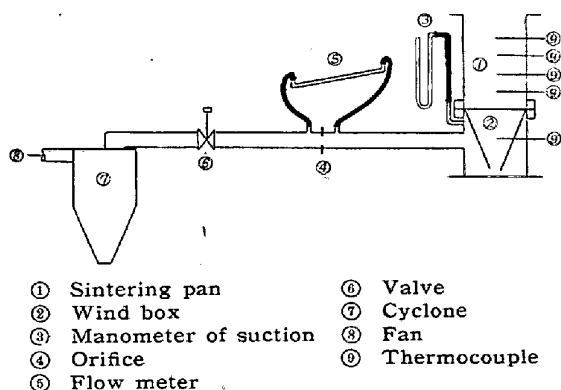


Fig. 1. Apparatus for sintering test.

160mm, 200mmの点に熱電対挿入用の穴をあけた。さらに鍋には保温の目的で 30mm 程度アスベストを巻いた。

鍋の底部には装入方向と逆方向に漏斗状の簡単な除塵器をつけた。排風機としては 1/2 HP で駆動する排風能力が $0.56 \text{ m}^3/\text{mn}$, -2000 mmAq のルーツ・ブロワーを使用した。排風管の途中にはオリフィス、バルブおよびサイクロンがとりつけてある。かつ管およびサイクロンの外側には高温ガスによる内壁の酸化防止を目的としてビニール管を巻き水冷した。

鉱石原料としては Goa 赤鉄鉱および Larap 磁鉄鉱の -5 mm を使用し、鉱石自身の影響をみるため返鉱は添加しなかつた。コークスは市販のものを破碎後 -1 mm に篩別して使用した。鉄鉱石の化学組成および粒度分布を Table 1 に示した。

Table 1. Chemical composition and size analysis of iron ores.

a) Chemical composition

Ores	Compo- sition	Tot. Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	S
Goa		56.61	3.04	3.66	0.84	6.04	0.06
Larap		56.34	27.56	9.34	1.96	2.06	2.12

b) Ore size analysis

Ores	Size(mesh)	-4+9	-9+16	-16+32	-32+100	-100
Goa		63.6	22.1	7.4	5.2	1.7
Larap		44.2	28.3	15.9	9.1	1.5

所定の配合原料を十分混合したのち焼結鍋に規定の高さ (200mm) まで装入し、その上に木炭粉および鋸屑を敷いて点火が均一に行なわれるようにした。この間に

前記測定点に外径 5mm 長さ 100mm の石英管を挿入し、熱電対の保護管とした。熱電対は最初 4 ケ挿入したが、装入厚 200mm では最初の熱電対 (火格子面より 160mm) が、焼結開始後の収縮によって露出するので大部分の実験は 3 ケの挿入で行なつた。

点火はバルブを開いてわずかな空気を通じながら town gas によって行ない約 30s 点火したのち、バルブを調節して規定の流量まで空気を流して焼結を開始し、以後バルブはその位置に固定した。実験中は 15s ごとに各点の温度を測定し、同時に負圧およびオリフィスの差圧を測定した。

III. 実験結果および考察

Table 2 に実験結果の一部を示した。

Fig. 2 に Larap 磁鉄鉱単味にコークス 5.0%, 水分 10.0% を配合し、空気流量 $0.4 \text{ m}^3/\text{mn}$ で焼結したときの焼結層中の温度分布を示した。Goa 赤鉄鉱単味を焼結した場合にも同傾向の温度曲線が得られた。コークスの着火温度は $500 \sim 600^\circ\text{C}$ であり、焼結層の温度がこの温度にまで上昇したことは、この点に燃焼面が到達しコークスの燃焼が開始されたことを意味する。このときから燃焼が終了し同時に焼結帯が生成されると考えられる温度曲線の peak までの時間は大体 1mn 以内であつた。図から明らかなごとく各測定点の温度曲線は、火格子に近づくにしたがつて最高温度が上昇し、曲線の麓が広がり、曲線の peak が鈍角をなす傾向を示している。普通焼結原料には、揮発分の除去および吸熱反応の完了などに必要な量以上のコークスが添加されているので、発生

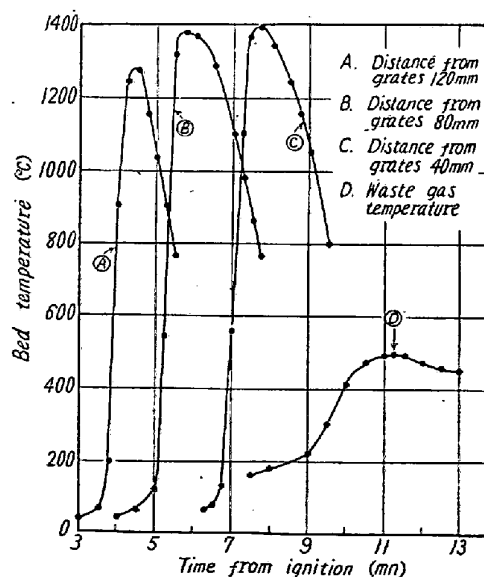


Fig. 2. Bed temperature distribution of Larap iron ores during sintering.

Table 2. Experimental results.

Ores	Coke content (%)	Moisture content (%)	Air-flow (m^3/mn)	Flame front speed (mm/mn)				Sintering time (mn)
				120mm from grate	80mm from grate	40mm from grate	Mean value	
Goa	7.0	7.0	0.6	36.4	34.8	36.4	35.9	6.3
	"	"	0.5	20.5	23.0	25.8	23.1	8.8
	"	"	0.4	18.6	21.2	20.9	20.2	10.3
	"	"	0.3	15.1	15.8	13.9	14.9	15.3
	"	"	0.2	8.7	10.2	10.8	9.9	30.0
	8.0	"	0.4	32.0	32.4	31.4	31.9	8.8
	7.0	"	"	18.6	21.2	20.9	20.2	10.3
	6.0	"	"	16.0	18.5	18.4	17.6	16.5
	5.0	"	"	12.3	15.4	16.0	14.6	19.0
	7.0	9.0	"	21.1	22.6	23.5	22.4	10.0
	"	7.0	"	18.6	21.2	20.9	20.2	10.3
	"	5.0	"	11.9	18.5	16.0	15.5	14.5
Larap	5.0	10.0	0.6	38.1	40.0	40.0	39.7	8.0
	"	"	0.5	22.9	27.3	30.0	26.7	9.0
	"	"	0.4	19.0	22.2	21.8	21.0	11.2
	"	"	0.3	18.2	19.2	18.8	18.7	15.5
	"	"	0.2	9.5	9.0	8.7	9.1	30.0
	6.0	"	0.4	29.1	26.7	26.3	27.4	11.2
	5.0	"	"	19.0	22.2	21.8	21.0	11.2
	4.0	"	"	26.7	25.0	24.6	25.4	10.5
	3.0	"	"	16.0	12.6	13.0	13.9	16.0
	5.0	9.0	0.3	20.0	20.5	22.5	21.0	11.5
	"	7.0	"	16.7	16.7	18.8	17.4	14.5
	"	5.0	"	13.0	13.0	15.2	13.7	16.7

した過剰の熱は焼結層の進行とともに下部へ伝えられ、さらに上部から空気によつて伝えられる熱量が増加し、上記のごとき温度曲線の形状が得られるものと考えられる。

Fig. 2 に示したごとき温度曲線を各種の条件下で描き、ある点たとへば火格子面より 80mm の点が 1000°C に到達した時間を求め、その点における flame front speed を計算した。この計算結果は Table 2 に併記してある。

(a). 空気流量の影響

いろいろの制約のため一定負圧、一定風量で実験することが困難であつたので、点火直後の流量を 0.2~0.6 m^3/mn に調節し、以後バルブを固定して焼結を行なつた。

Fig. 3 a に Larap 磁鉄鉱単味にコークス 5.0%, 水分 10.0% を配合し空気流量を 0.2~0.6 m^3/mn と変化させて焼結した場合の温度曲線を示し、Fig. 3 b には Goa 赤鉄鉱にコークス 7.0%, 水分 7.0% を配合し空

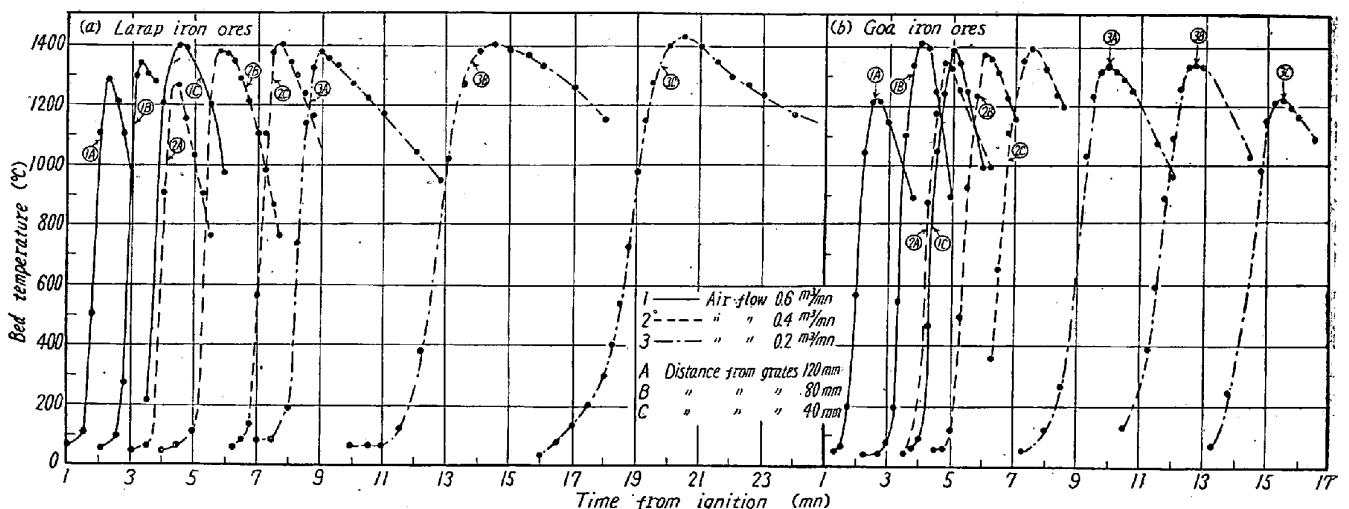


Fig. 3. Relation between bed temperature distribution of Larap and Goa iron ores and air-flow during sintering.

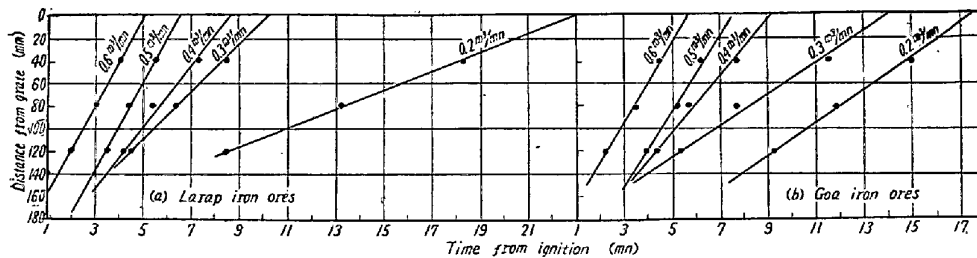


Fig. 4. Relation between flame front speed and air flow in Larap and Goa iron ores during sintering experiments.

気流量を同じく $0.2 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{mn}$ と変化させて焼結した場合の温度曲線を示した。この Fig. 3 a, b の温度曲線から求めた flame front speed と空気流量との関係を Fig. 4 a, b に示した。

これらの図から明らかなごとく、2種の鉱石はいずれも空気流量の増加にしたがつて燃焼帯、焼結生成帯の移動が促進され、コークスの着火点を 600°C と考えるとこの点より温度曲線の peak への到達時間は $0.2 \text{ m}^3/\text{mn}$ のときの約 1mn から、 $0.6 \text{ m}^3/\text{mn}$ のときの約 30s と $1/2$ になり、同時に焼結鉱の冷却速度も増進されるので、Fig. 3 の温度曲線は鋭角となり、Fig. 4 の直線は立つてくる。しかし Larap 磁鉄鉱焼結の場合には $0.2 \text{ m}^3/\text{mn}$ の空気流量のとき、Goa 赤鉄鉱焼結の場合は $0.3 \text{ m}^3/\text{mn}$ 、 $0.2 \text{ m}^3/\text{mn}$ の空気流量のときに、Fig. 3 の温度曲線の peak はいちじるしい鈍角をなし、Fig. 4 の直線はねて flame front speed がいちじるしく低下している。これは、これらの空気流量が焼結反応を円滑に行なわせるに必要な量よりも少なく、コークスの燃焼、燃焼生成物の除去、水分の蒸発および熱の移動などの速度が低下するためである。さらにこれらの空気流量では、生成焼結鉱の冷却がいちじるしく遅れ、焼結時間が長くなっている。Goa 赤鉄鉱焼結の場合は $0.3 \text{ m}^3/\text{mn}$ でも flame-front speed が低いのは、赤鉄鉱の方が磁鉄鉱より多くの熱量および空気量を必要とするためであろう。

Fig. 4 a, b においてほとんどの直線が零に収斂しなかつたが、これは実験の初期において点火の不良または空気流の不均一などの原因によつて初期の flame front speed が遅れたためである。そして焼結が進行した各点の flame front speed がほぼ一直線にある事実より、焼結がある程度進行すると空気流は均一となり燃焼帯および焼結帯の移動は正常に進行するものと考えられる。

普通焼結作業においては、排ガス温度が最高に到達した時間をもつて焼結完了のときと推定しているが、測定した焼結層の最高温度の推移から火格子面に最高温度が到達した時間を推定すると、Table 3 に示したように排ガス温度が最高になった時間との間にはかなりのずれ

があり、排ガス温度から焼結の完了を推定する従来の方法は再考を要すると思われる。

(b) コークスの影響

Fig. 5 a に Larap 磁鉄鉱単味に水分 10.0% 、コークスを 3.0 、 4.0 、 5.0 、 6.0% と変化させて配合し、空気流量 0.4

Table 3. Comparison of sintering time.

Ores	Air-flow (m^3/mn)	Sintering time from maximum waste gas temp. (mn)	Sintering time from tempera- ture curve (mn)
Larap	0.6	8.0	5.6
	0.5	9.0	7.1
	0.4	11.3	9.0
	0.3	15.5	11.2
	0.2	30.0	25.9
Goa	0.6	6.3	6.3
	0.5	8.8	7.9
	0.4	10.3	8.8
	0.3	15.3	15.2
	0.2	30.0	18.1

m^3/mn で焼結した場合の温度曲線を示した。Fig. 6 a にはこの温度曲線から求めた flame front speed とコークス量との関係を示した。Larap 磁鉄鉱では 5.0% コークスの時理想的な温度曲線が得られ、コークス 6.0% になると flame front speed は幾分向上するが冷却が遅れ温度曲線の peak が鈍角となつている。一方コークス 4.0% ではコークス 5.0% と flame front speed はほとんど同じであるが、最高温度が低く、充分な物理的強度を得るに必要な温度を 1300°C と考えると、その温度に到達するのは第3の測定点すなわち火格子面より 40 mm の所で全体の $1/5$ に過ぎない。コークス 3.0% の場合はこの傾向がさらにいちじるしく、第3の測定点でもやつと 1000°C を越える程度でももちろん成品は非常に脆かつた。すなわち Larap 磁鉄鉱においてはコークス量の増加にしたがつて焼結層の最高温度が上昇するが、Fig. 6 a に示したように $4 \sim 6\%$ では flame front speed はほとんど等しかつた。

Fig. 5 b に Goa 赤鉄鉱単味に水分 7.0% 、コークス 5.0 、 6.0 、 7.0 、 8.0% と変化させて配合し、空気流量 $0.4 \text{ m}^3/\text{mn}$ で焼結した場合の温度曲線を示し、Fig. 6 b にこの温度曲線から求めた flame front speed とコークス量との関係を示した。Goa 赤鉄鉱においてはコークス 7.0 、 8.0% の温度曲線はよく似ており、Larap 磁鉄鉱のコークス 5.0% と 6.0% のときにみられるよ

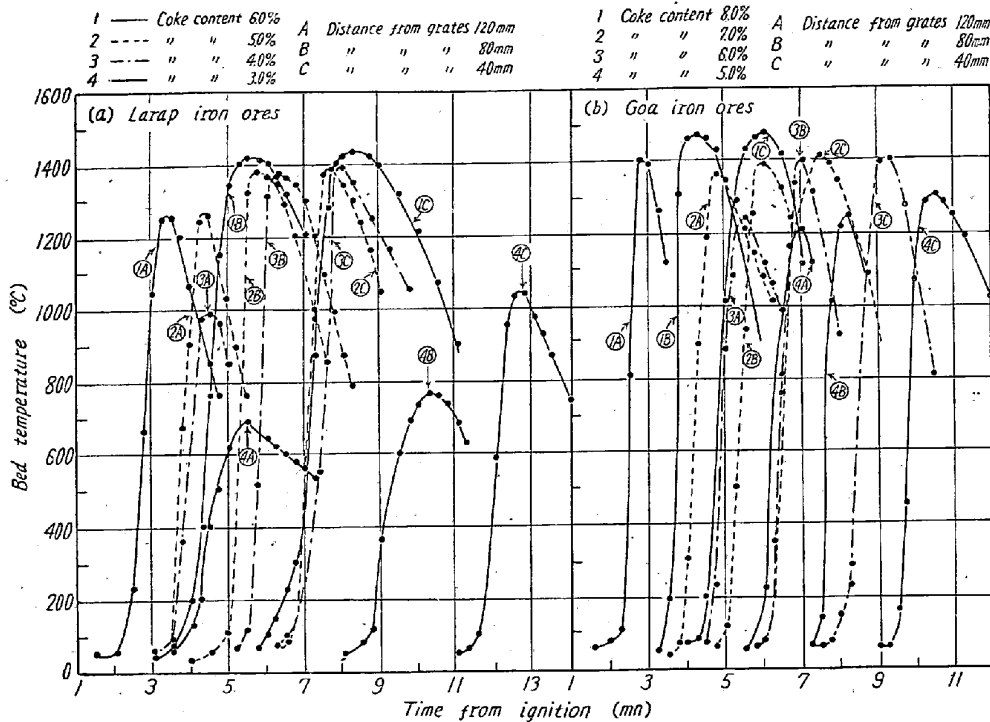


Fig. 5. Relation between bed temperature distribution of Larap and Goa iron ores and coke content during sintering.

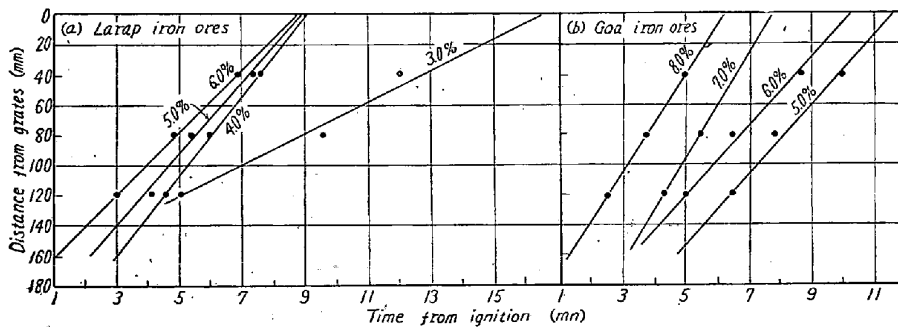


Fig. 6. Relation between flame front speed of Larap and Goa iron ores and coke content during sintering.

うな差異は認められなかつた。すなわち Goa 赤鉄鉱においてはコークス配合量 7.0, 8.0% において理想的な温度曲線が得られた。一方コークス 6.0% と 5.0% では最高温度は低下の傾向を示し flame front speed は遅れて熱量の不足の状態を示した。しかしこの最高温度の低下は Larap 磁鉄鉱の場合ほどいちじるしくなかつた。すなわち Goa 赤鉄鉱においてはコークス量の増加にしたがつて flame front speed が増加し最高温度が上昇している。

上述のごとく, コークス量の焼結層中の温度分布におよぼす影響は磁鉄鉱と赤鉄鉱とで明瞭な差異が認められた。これは S 含量の相異, 必要熱量の相異ばかりでなく, Fe_3O_4 の酸化および Fe_2O_3 の還元が起る時期の相異などに起因するものであると考えられるが, さらに焼結各層の鉱物学的変化を追求しなければ明らかにできな

いことである。

(c) 水分量の影響

Fig. 7 a に Larap 磁鉄鉱単味にコークス 5.0%, 水分 5.0, 7.0, 9.0% と変化させて配合し, $0.3 \text{ m}^3/\text{mn}$ の空気流量で焼結した場合の温度曲線を示し, Fig. 8 a にはこの曲線から求めた flame front speed と水分量との関係を示した。この図から明らかなごとく水分量の増加にしたがつて温度曲線の peak は鋭角をなし, 加熱冷却の速度が増加することがわかつた。Fig. 7 b には Goa 赤鉄鉱単味にコークス 7.0%, 水分を 5.0, 7.0, 9.0% と変化させて配合し, $0.4 \text{ m}^3/\text{mn}$ の空気流量で焼結した場合の温度曲線を示し, Fig. 8 b にはこの温度曲線から求めた flame front speed と水分量との関係を示した。これらの図からも明らかなごとく, Larap 磁鉄鉱の場合と同様水分量が増加すると加熱冷却の速度が増加しているが, 水分 9.0% と水分 7.0% の温度曲線すなわち Fig. 7 b の 1A, 1B, 1C と 2A, 2B, 2C とを比

較すると, 第1の測定点および第2の測定点では水分の多い方が加熱冷却速度がはやいが, 第3の測定点ではほとんど一致していた。これは原料中の水分が, flame front の進行に伴つて下層に凝縮し, 未焼結層の物理的性質が変化したためである。

Larap 磁鉄鉱においてかかる現象がみられなかつたが, これは配合水分量を Goa 赤鉄鉱と揃えるために 5.0~9.0% としたが, これらの水分量がなお適正値より低いためである。すなわち 11.0% または 12.0% を配合した場合には, かかる水分凝縮による flame front speed の遅れが現われるものと考えられる。

IV. 結 言

Larap 磁鉄鉱および Goa 赤鉄鉱単味を焼結し, 焼結層中の温度分布と空気流量, コークス量, 水分量の関係

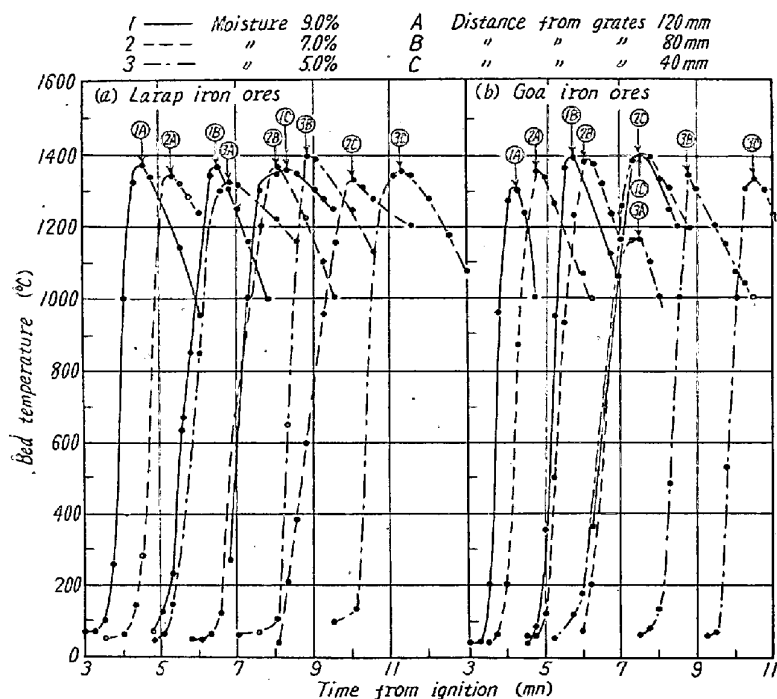


Fig. 7. Relation between bed temperature distribution of Larap and Goa iron ores and moisture content during sintering.

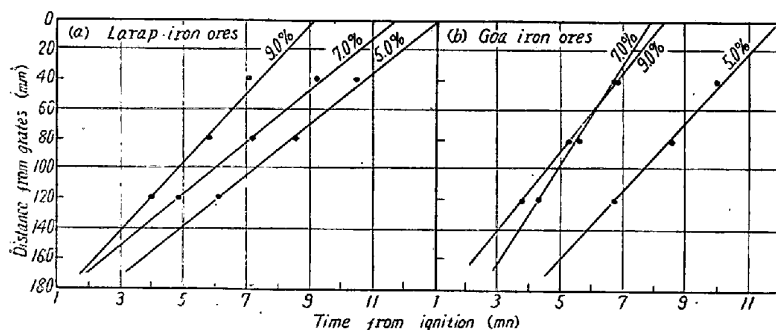


Fig. 8. Relation between flame front speed of Larap and Goa iron ores and moisture content during sintering.

について検討した。

1) 空気流量はコークスの燃焼速度、焼結帯の進行速度および冷却帯の進行速度にいちじるしい影響をおよぼし焼結層中の温度曲線の形状が変化した。Larap 磁鉄

鉱では $0.2 \text{ m}^3/\text{mn}$, Goa 赤鉄鉱では $0.3, 0.2 \text{ m}^3/\text{mn}$ の場合にいちじるしく flame front speed が低下し、温度曲線の形状および最高温度に大きな変化がみられた。

2) コークス配合量は燃焼帯の進行速度および最高温度に影響をおよぼした。コークスが適量より多い場合には、燃焼帯の中を拡げ冷却速度を遅らせて温度曲線の形状を変えるが最高温度はあまり変化しなかつた。適量より少ない場合には最高温度がいちじるしく低下した。

3) 水分量は温度曲線の形状に変化を与えるが最高温度にはあまり影響をおよぼさなかつた。すなわち水分不足の場合には燃焼帯の中を拡げ冷却速度が低下した。

(昭和 35 年 7 月寄稿)

文 献

- 1) B. HESSLE: Jernkont. Ann. 129 (1945) 383
- 2) R. D. BURINGAME, G. BITSIANES and T. L. JOSEPH: J. Metals 8 (1956) 853
- 3) E. M. Mc BRIAR, W. JOHNSON, K. W. ANDREWS and W. DAVIES: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 183 (1956), 404
- 4) E. W. VOICE and R. WILD: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 183 (1956), 404
- 5) E. W. VOICE and R. WILD: J. Metals 10 (1958), 104
- 6) E. W. VOICE and R. WILD: Proc. Blast Furn., 16 (1957), 123
- 7) E. W. VOICE and R. WILD: Iron & Coal Trades Rev. 175 (1957), 847
- 8) W. DAVIES and D. W. MITCHELL: International Mineral Dressing Congress Preprint (1957)