

論 文

焼結過程における熱の移動について*

(鉄鉱石の焼結に関する基礎的研究—II)

三本木 貢 治**・西田信直***

Heat Transfer during the Sintering Process.

(The fundamental study on the sintering of iron ores—II)

Koji SANBONGI and Nobunao NISHIDA.

Synopsis:

By charging a small sintering pan with Goa hematite or Larap magnetite as raw materials, the speed of heat transfer in non-sintered or sintered layers were measured and the following results were obtained:

- i) Difference between the heat front speed in non-sintered layers, which were very slow, and the flame front speed were more increased with increase of the air flow through the bed.
- ii) There was a small difference between the heat front speed in sintered layers, which were more rapid than that in non-sintered layers, and the flame front speed.
- iii) When the difference between the heat front speed in non-sintered layers and the flame front speed were large, the temperatures of combustion zones rose slowly. On the contrary, in the case when that difference between the heat front speed in sintered layers and the flame front speed were large, the temperature of combustion zone dropped slowly.

I. 結 言

さきに Goa 赤鉄鉱および Larap 磁鉄鉱を原料とし、超小型焼結機によつて焼結層中の温度分布におよぼす空気流量、コークス量、水分量の影響について実験を行なつたり。その結果焼結初期において装入原料層の温度は 40~50°C まで上昇するが、燃焼帯が近づくまでは装入原料層の温度はこのまま一定に保たれ、ついで 1~2 mm で焼結は完了し、以後焼結層は通過空気によつて冷却される。このときの flame front speed は焼結条件とくに空気流量によつて大巾に変動することが明らかとなつた。焼結反応がこのように急速に行なわれるのは、固体とガスの熱交換が完全に行なわれるため、焼結帯に蓄積された熱が通過空気によつて上層から下層へ伝達されることに由来する。

焼結作業の熱伝導は、未焼結原料層、焼結帯生成層、焼結層の熱伝導に分類されるが、著者らはまず未焼結原料層および焼結層の空気による熱伝導について、超小型焼結機によつて実験を行ない、焼結帯の進行速度と熱伝導速度との関連性について考察を行なつた。

II. 実験装置および方法

実験装置はルーツブローで駆動する超小型焼結機を使用した。この焼結機の鍋の上に内径 105mm、高さ 250mm の鉄管に外径 10mm の鉄管を多数熔接した鉄板を熔接して底板としたフードを取付け、ここでプロパンガスを燃焼させた。

未焼結原料層の実験においては、それぞれの鉱石原料に一定量の水分 (Goa 赤鉄鉱では 7.0%, Larap 磁鉄鉱では 10.0%) を添加して充分混合したのち、焼結鍋に 200mm の高さまで装入する。このとき粉鉱の散逸を防ぐため、火格子面に網目 1mm の金網を数枚重ねて床敷の代りとした。装入を完了したのち、火格子面から 40, 80, 120mm の点に石英管を挿入した。

一方焼結層の実験においては、規定量のコークス、水分、空気流量 (Goa 赤鉄鉱ではコークス 7.0%, 水

* 昭和 35 年 10 月本会講演大会にて

** 東北大学選鉱製錬研究所 工博

*** 富士製鉄株式会社中央研究所

Table 1. Experimental result.

	Air-flow m ³ / mn	Heat front speed in un-sintered layer (mm/mn)				Heat front speed in sintered layer (mm/mn)				Flame front speed in sintering experiment (mm/mn)			
		120mm from grate	80mm from grate	40mm from grate	Mean value	120mm from grate	80mm from grate	40mm from grate	Mean value	120mm from grate	80mm from grate	40mm from grate	Mean value
Goa	0.6	13.3	16.0	16.4	15.2	29.1	32.0	29.1	30.1	32.0	30.0	31.0	31.0
	0.5	10.3	12.3	12.3	11.6	24.6	26.7	26.7	26.0	16.8	20.0	20.2	20.2
	0.4	9.7	11.2	12.1	11.0	21.3	25.3	23.7	23.4	16.8	20.0	19.4	19.4
	0.3	8.6	7.9	7.5	8.0	17.8	20.9	20.6	19.7	13.9	13.7	13.6	13.6
	0.2	7.0	6.6	6.4	6.7	15.2	19.2	17.8	17.4	8.0	9.4	9.6	9.6
Larap	0.6	16.8	17.1	16.0	16.7	24.6	26.7	29.1	26.8	35.6	36.9	36.0	36.0
	0.5	13.9	13.7	13.3	13.7	22.9	25.3	27.8	25.3	21.3	25.3	24.4	24.4
	0.4	10.0	10.9	10.3	10.4	20.0	21.8	20.6	20.8	17.8	20.9	19.8	19.8
	0.3	9.0	10.2	9.1	9.5	16.0	16.0	16.4	16.1	17.8	17.8	17.8	17.8
	0.2	7.3	6.9	6.7	6.9	12.8	13.7	13.0	13.2	8.9	7.8	8.3	8.3

分 7.0%, 空気流量 0.4m³/mn, Larap 磁鉄鉱ではコークス 5.0%, 水分 10%, 空気流量 0.4m³/mn) で焼結した焼結鉱を鍋にそのまま保持し, 所定の温度測定点に石英管を挿入した.

以上の準備が完了したならば, 上述のフードを焼結鍋の上に載せ, バルブを開いて規定量の空気を吸引しながら, フードの中でプロパンガスを 2mn 燃焼させ, 以後はプロパンガスの供給を断つて各点における温度変化を測定した.

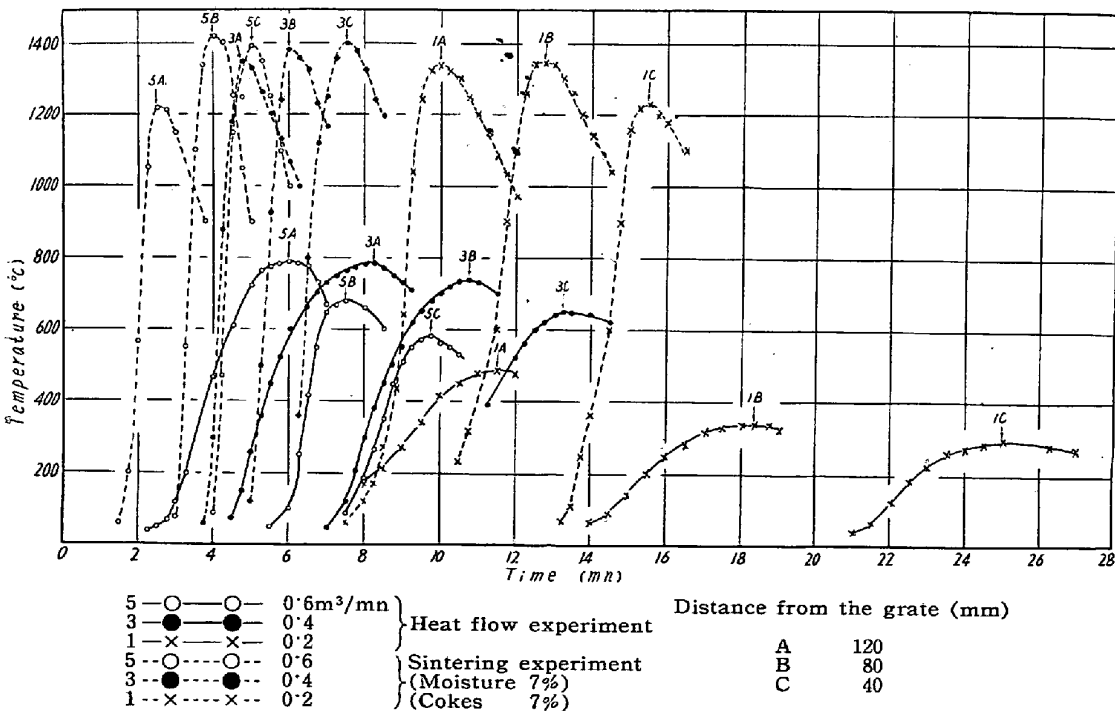
III. 実験結果および考察

Goa 赤鉄鉱についての結果の一部を Fig. 1, Fig. 5 に, Larap 磁鉄鉱のそれを Fig. 4, Fig. 6 に示した.

また図には比較のために焼結実験の場合の温度分布をも示した. さらに Table 1 は実験結果より各点における heat front speed, flame front speed を算出した一例である.

A) 未焼結原料層の熱伝導

Fig. 1 は Goa 赤鉄鉱に水分 7.0% を配合し, 0.2 ~ 0.6m³/mn と空気流量を変化させた場合の未焼結原料層中の温度曲線および焼結実験で得られた温度曲線を示したものである. この図から明らかなように, 燃焼を伴わないで吸引空気による熱伝導だけによつて加熱された熱流実験の温度曲線は, 空気流量の増加にしたがつてその形状が尖鋭になつてい



みを帯びていて, heat front speed も flame front speed に較べて遅れている. これは熱層が通過する前後の原料層が水分を失つて必要な空隙を保つことができないこと, 熱層の通過前面に水分が凝縮するなどの理由によつて原料層の通気が著しく阻害されるためと考えられる.

いま水分 10.2% の未焼結原料層に, プロパンガスで 2mn 間加熱した空気を

Fig. 1. Relation between temperature-distribution of non-sintered layers of Goa iron ore.

0.4m³/mnの流量で合計 5mn 通風し、バルブを閉じて通風を断つたのち、ただちに原料層の水分を測定した結果 Fig. 2 が得られた。このときの火格子面から 120mm の距離にある測定点の温度は 287°C であつた。この 120mm の点から下方の点すなわち火格子面から 70mm の点では、水分は12.5%に達していたが、この点から上方では直線的に水分を減じ、85mm の点では 2.8%, 100mm の点では 0%であつた。

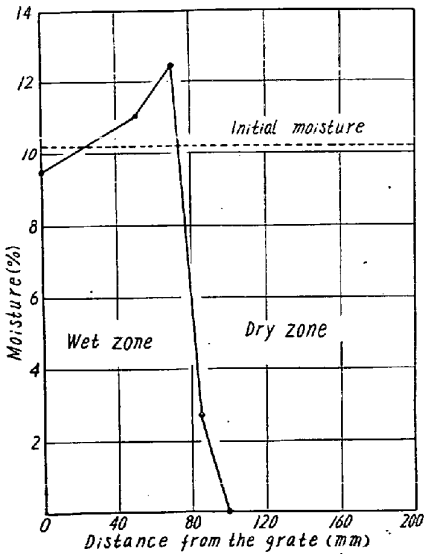


Fig. 2. Moisture distribution of the non-sintered feed layer at 5mn after heated by hot air in 800°C.

また Goa 赤鉄鉱にいろいろの水分を添加し、バルブを開閉して求めた通風量、負圧および水分の関係を Fig. 3 に示した。水分 10% を境として水分が増加しても減少しても負圧の増加に比して通風量の減少がいちじるしく、通気性が低下していることがわかる。この Fig. 2 Fig. 3 の結果より熱流実験における heat front speed が焼結実験のそれに比しいちじるしく遅いのは、熱層が通過する前後の原料層の通気度が低下し、熱伝導の媒たる空気の流量が低下するためであると説明できる。

Larap 磁鉄鉱体に水分 10% を配合し、0.2~0.6 m³/mn の空気流量で行なつた熱流実験の結果を Fig. 4 に示した。このときも Goa 赤鉄鉱の場合とまったく同様の理由によつて、熱流実験の heat front speed は焼結実験の flame front

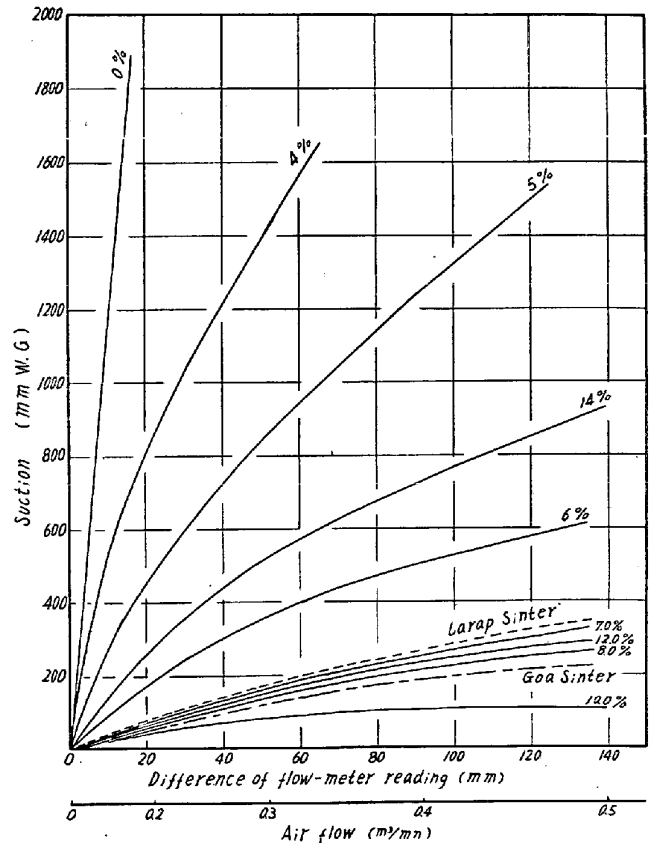


Fig. 3. Relation among moisture content, air flow and suction.

speed と比較していちじるしく遅れているが、空気流量に対しては両者とも同一の傾向を示し、空気流量の増加

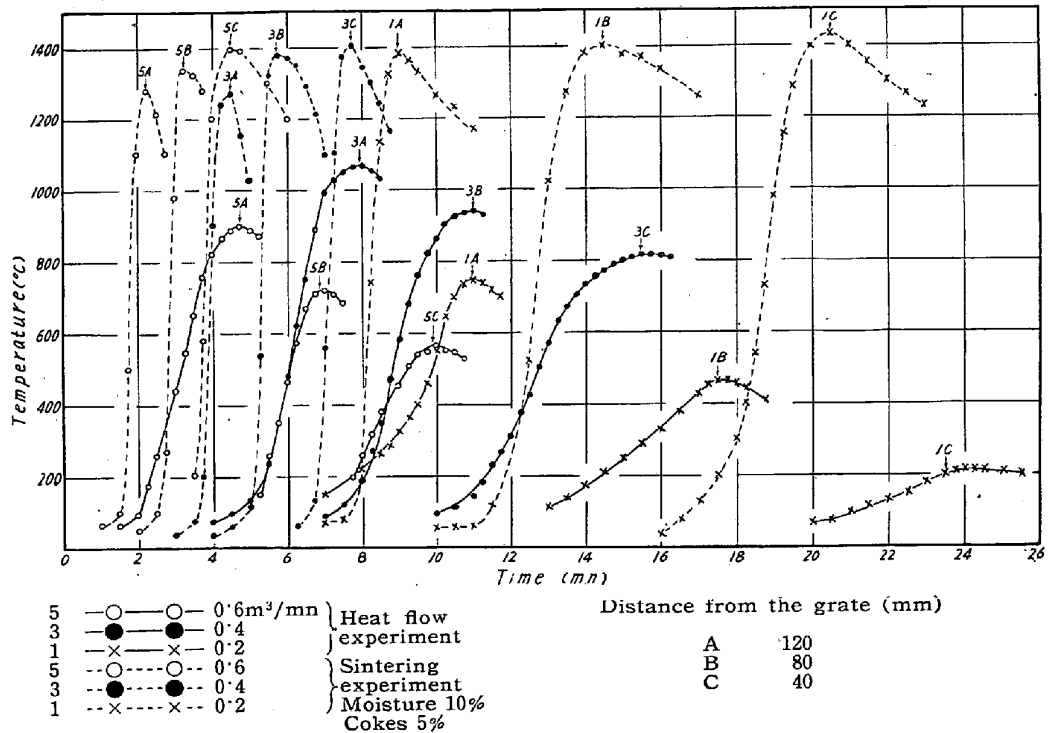


Fig. 4. Relation between temperature-distribution of non-sintered layers of Larap iron ore and air flow.

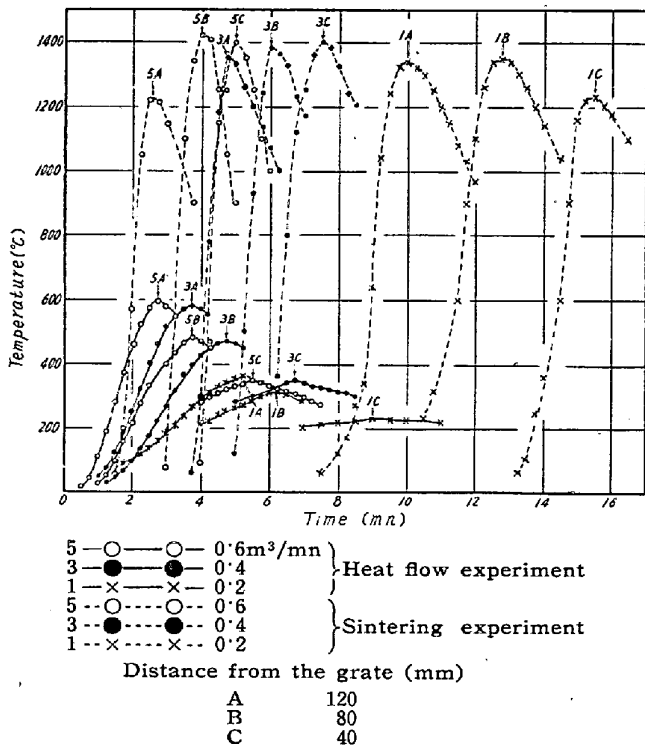


Fig. 5. Relation between temperature-distribution of sintered layers of Goa iron ores and air flow.

にしたがつて温度曲線の形状は尖鋭になっている。

Fig. 1 および Fig. 4 を比較すると、いずれの場合も Larap 磁鉄鉱の方が最高温度は高かったが、これは Larap 磁鉄鉱が約 2% S を含み燃焼したためである。

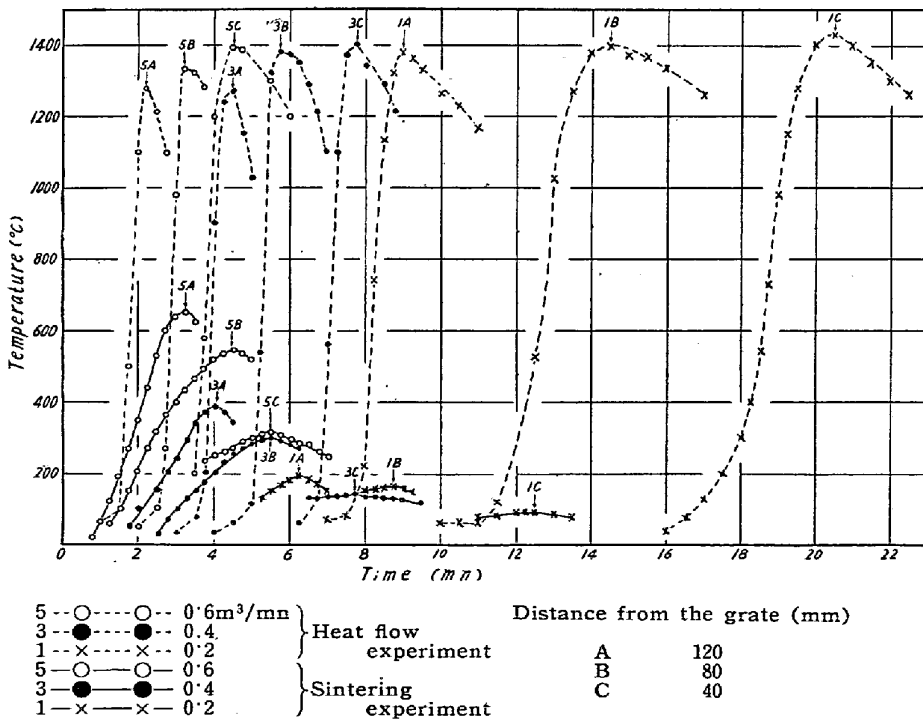


Fig. 6. Relation between temperature-distribution of sintered layers of Larap iron ores and air flow.

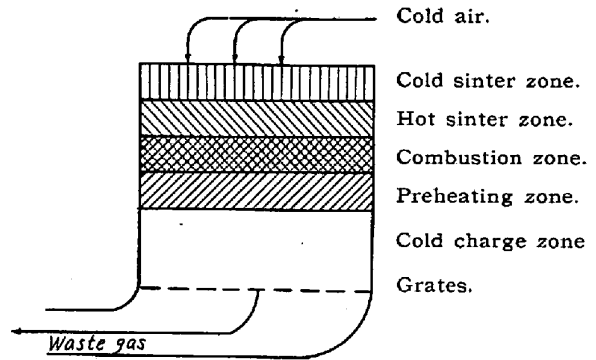


Fig. 7. Schematic diagram of the sinter bed.

B) 焼結鉱の熱伝導

Fig. 5 は Goa 赤鉄鉱にコークス 7%, 水分 7% を配合し、 $0.4\text{m}^3/\text{mn}$ の空気流量で焼結した焼結鉱について、いろいろの空気流量で熱を伝導させた場合の実験結果を示した。

この焼結鉱の通気度は Fig. 3 に併記したように非常によく、したがって未焼結原料層の heat front speed に比しずつと早くなっている。また焼結実験の flame front speed と比較しても $0.6\text{m}^3/\text{mn}$ の空気流量の場合以外はかなり早い。 $0.6\text{m}^3/\text{mn}$ の空気流量の場合には両実験における最高温度の移動速度がほとんど等しかった。これはコークスの燃焼による温度上昇の速度が $0.6\text{m}^3/\text{mn}$ の空気流量の場合と他の空気流量のときとでいちじるしく差があるためと考えられる。

Fig. 6 は Larap 磁鉄鉱にコークス 5%, 水分 10.0% を配合し、 $0.4\text{m}^3/\text{mn}$ の空気流量で焼結した焼結鉱中をいろいろの空気流量で伝熱させた場合の温度分布を示した。

Goa 赤鉄鉱の場合と同様に $0.6\text{m}^3/\text{mn}$ 以外の空気流量では焼結実験の最高温度の移動速度より熱流実験のそれの方が早かった。ここで注目されることは $0.2\text{m}^3/\text{mn}$ の空気流量での heat front speed が他の場合と比較していちじるしく遅れており、また各空気流量での各測定点の最高温度が空気流量の減少とともにいちじるしく低下していることである。これは Larap 焼結鉱が Goa 焼結鉱に比較して比熱が大きく、上層に多量の熱が蓄積され、空気によつて下層へあまり熱が伝えられないためと考えられる。

C) 焼結過程における熱伝導と焼結速度の関係

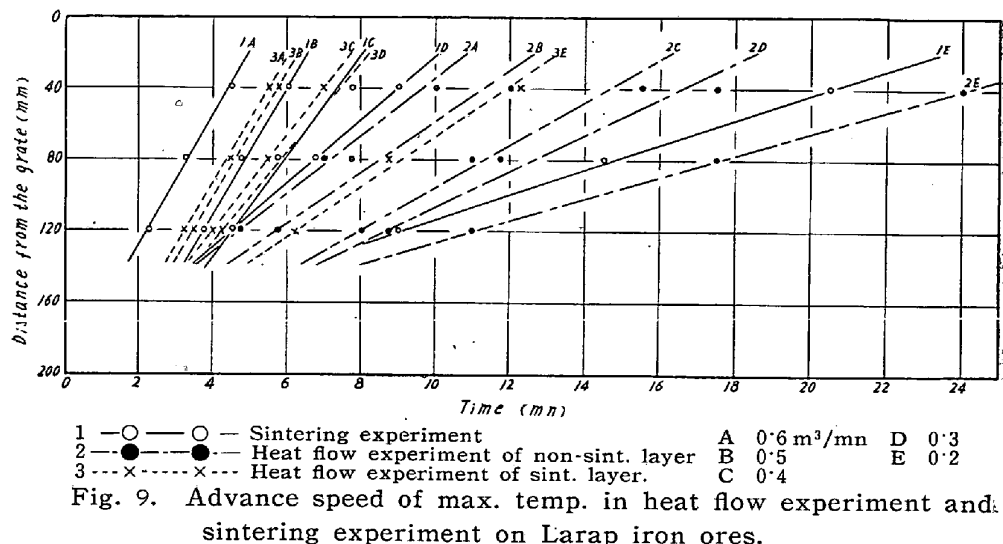
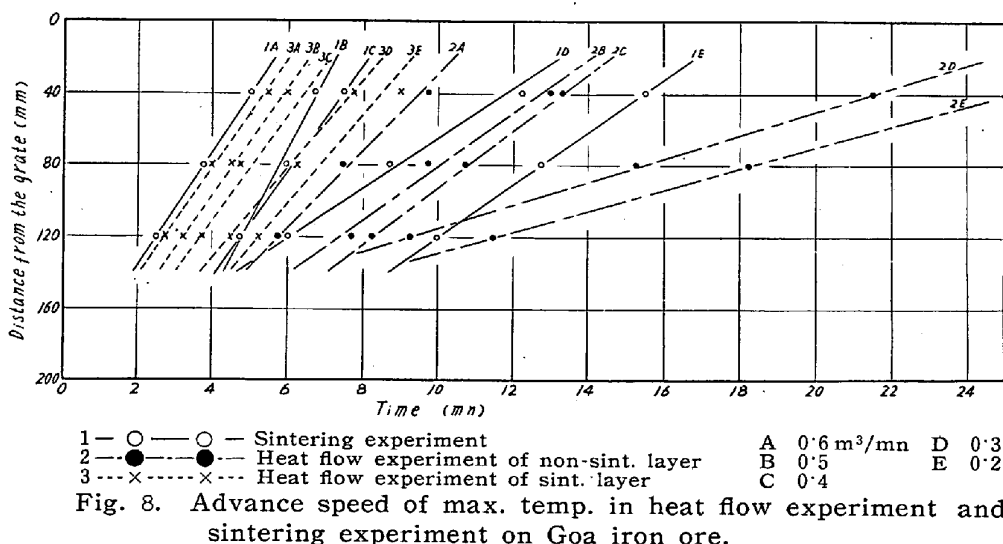
点火後数分を経過したときの装入層を考えると Fig. 7 のごとき状態となる²⁾。すなわち燃焼帯の上には赤熱焼結帯があり、これは吸引される空気によつて冷却され、冷焼結帯を増加させるが、一方では吸引空気を予熱して燃焼帯に送り込む。燃焼帯の下には予熱帯および冷装入物帯があり、燃焼帯で発生した熱量はほとんど完全に予熱帯および冷装入物帯に吸収され、燃焼帯および赤熱焼結帯が火格子に接近した焼結末期においてのみ廃ガスとともに外へ逃げ去る。ところで装入物層の粒度は細かくしたがつて装入物の表面積が大きいので、鉱石とガス間の熱交換がよく行なわれるので、装入物層の熱伝導は通過空気によつて大きく影響されるものと考えられる。

焼結過程を Fig. 7 のように分類すると、著者らの実施した未焼結原料層についての実験は予熱層および冷装入物量の熱伝導に相当し、焼結鉱における熱流実験は冷焼結帯および赤熱焼結帯における熱伝導に相当する。さらに Goa 赤鉄鉱については Fig. 1, Fig. 5 から、Larap 磁鉄鉱につ

いては Fig. 4, Fig. 6 から火格子面上の各点の距離と最高温度の到達時間の関係をとると、Fig. 8, Fig. 9のごとく大略直線関係となり、その傾斜は Table 1 の平均値に該当し大略一致している。この両図から明らかかなようにいずれの銘柄の鉱石においても未焼結原料層および焼結層での heat front speed にはかなりの相異がみられたが、これ冷装入層では比表面積が焼結層のそれに比しかなり小さく³⁾ 同一空気流量で同一の熱量を伝導する場合には未焼結原料層がかなり長い時間を必要とし、さらに未焼結原料層の水分の蒸発のため多くの熱量が消費されるので、heat front speed が遅れるものと考えられる。

Fig. 8, Fig. 9 の実験

結果でも、未焼結原料層の heat front speed は焼結層の約 1/2 以下であつた。しかし Larap 磁鉄鉱では鉱石中に約 2% S を含有し、その燃焼によつて未焼結原料層における heat front speed が幾分加速されていた。いま Goa 赤鉄鉱が 0.6 m³/mn. の空気流量で焼結しつつある過程を考えてみると赤熱焼結層に含有される熱量は 30.1 mm/mn の速度で下方へ伝えられる。ところが未焼結原料層の heat front speed は 15.2 mm/mn であり、上部焼結層から伝えられる熱量の一部しか下部へ伝えられず大部分は焼結帯層と未焼結原料層の境界面に蓄積され、コークスの燃焼熱と相俟つて燃焼帯の温度となる。そして焼結帯層の heat front speed と flame front speed が比較的よく一致しているので燃焼帯の温度は急激に上昇し燃焼帯の中は狭くなる。一方 Larap 磁鉄鉱を 0.6 m³/mn の空気流量で焼結した場合には flame front speed が 36.0 mm/mn, 焼結帯層の heat front speed が 26.8 mm/mn であつて両速度にはかなりの差があるため燃焼帯の中は Goa 赤鉄鉱に比し広く



なつた. flame front speed と焼結鉍層の heat front speed の差が大きいほど Fig. 1, Fig. 4 に示した温度曲線はゆるやかに上昇し燃焼帯が拡る傾向を示し, 空気流量が低くなるほどこの傾向は一層明瞭になる.

ところで未焼結層における heat front speed は flame front speed や焼結鉍層における heat front speed に比しきわめて遅く, 空気流量が高いほどその差は大きい. この差が大きいほど熱焼結鉍層から送られた熱がより多く燃焼帯に蓄積されるので, 焼結鉍の冷却が同一空気流量では遅れて燃焼帯が拡ると考えられる.

著者らの実験は熱を伝導する媒体として空気を使用した, 実際の焼結過程では熱焼結鉍層から燃焼帯への熱伝導は主として空気によつて行なわれるが, 燃焼帯から未焼結原料層への熱の移動は燃焼排ガスによつておこなわれる. 燃焼排ガスの組成は, 原料鉍石の銘柄, コークス量および空気流量によつて変化するが空気より熱容量が大きく heat front speed は著者らの実験よりも大となるものと思われる⁹⁾. さらに未焼結原料層においては Fig. 2, Fig. 3 の結果より知られるように通風量が低下するのでガスによる熱の移動ばかりでなく直接鉍石粒から鉍石粒への伝導なども考慮しなければならない.

IV. 結 言

Goa 赤鉄鉍および Larap 磁鉄鉍を使用し, 未焼結原料層および焼結鉍層中の空気による熱の移動を測定し, 燃焼帯の移動との関連性について考察しつぎの諸点

を明らかにした.

1) 未焼結原料層においては, 添加水分の凝縮蒸発などによつて heat front speed は小さく flame front speed との差は空気量が大なるほど大となる. 実際の焼結過程においては主として燃焼排ガスによつて熱伝導が行なわれるので, 著者らの実験より加速されるものと思われる.

2) 焼結鉍層における heat front speed は焼結鉍層の通気度が良好なため未焼結原料層のそれより大きく空気流量 $0.6\text{m}^3/\text{mn}$ 以下においては flame front speed より大きい.

3) 焼結鉍層の heat front speed と flame front speed の差が大きいほど, 燃焼帯の温度上昇はゆるやかでかつ巾が広がる傾向がある.

4) 未焼結原料層の heat front speed と flame front speed との差が大きいほど燃焼帯の温度はゆるやかに下降する傾向がある. (昭和35年12月寄稿)

文 献

- 1) 三本木貢治, 西田信直, 須沢昭和: 鉄と鋼, 46 (1960), 1527
- 2) H. B. WENDEBORN: J. Iron & Steel Inst (U.K.), 175 (1953), 28
- 3) DAVIES, W. and D. W. MITCHELL: International Mineral Dressing Congress (1957)
- 4) J. MICHARD: Iron and Coal Trades Review 175 (1957), 1477
- 5) VOICE, E. W. and R. WILD: Proc. Blast Furn., 16 (1957), 121