

## 論 文

焼結反応に及ぼす予熱空気の利用と  
原料調整の影響田口 昇\*・大友崇穂\*<sup>2</sup>・田阪 興\*・大森康男\*<sup>3</sup>Effect of Use of Preheated Air and Pretreatment of Raw Mix on Iron Ores  
Sintering

Noboru TAGUCHI, Takaho OTOMO, Kou TASAKA and Yasuo OMORI

## Synopsis :

The effect of use of preheated air suction and pseudo-particle mix made from raw materials on the sintering behavior and properties of the self-fluxing sinter was studied.

The results obtained are as follows :

1) The exchange to cool air during the process of sintering in preheated air suction technique was very beneficial in decreasing the amount of coke, lowering sintering temperature and decreasing FeO content in sinter.

2) The coating of flux fines on coarse ores in the use of sinter mix decreased the sintering time, and further decreased FeO content in sinter.

3) The combined use of the preheated air suction which included the cool air exchange at the middle of sintering and the pseudo-particled sinter mix for sintering decreased sintering temperature, FeO, magnetite and skeletal hematite content, and increased acicular and fine acicular calcium ferrite content in sinter. As a results, the degradation of sinter was obviously improved, and good strength and reducibility were simultaneously maintained.

**Key words :** iron ore; sintering; preheated air; pretreatment of raw mix; pseudo-particle; sinter; chemical and physical properties.

## 1. 緒 言

最近、高炉操業のオールコークス化が進むにつれて、高炉操業の安定性が低下し、高炉の主要な装入物である焼結鉱に要求される品質レベルがいつそう厳しくなった。

一方、微粉原料の増大に伴い、その多量使用と高層厚焼結に適した原料調整処理法と、同時に省エネルギー焼結法の確立が望まれている。したがって、それらについての基礎研究は多い。前者については、擬似粒子の評価方法<sup>1)</sup>、分離造粒<sup>2)</sup>、分割造粒<sup>3)</sup>、ミニペレットの実機における使用<sup>4)</sup>などがある。後者については、たとえば焼結における予熱空気の利用<sup>5)6)</sup>がある。しかし、両者を併用した焼結試験の報告はない。

本研究は予熱空気の利用と原料粉調整処理法を併用し

た焼結試験を行った。そしてその併用がコークス添加量の低減、焼結過程、成品の FeO 含有量、鉱物組織、常温強度 (TI)、被還元性 (RI) および還元粉化性 (RDI) に対してどのような影響を及ぼすかを調べた。

## 2. 実験装置および方法

## 2.1 焼結装置

焼結装置は予熱炉 (内径 150 mm, 長さ 1 000 mm), 焼結鍋, 脈動防止タンク, 空気量調節バルブ, 排風機 (5.5 kW) から成っている。予熱炉の発熱体には内径 10 mm のコイルに巻いたカンタル線を用いた。このコイルは 3 本並列にした 2 組を直列に結線した。コイルは内径 13 mm, 長さ 1 000 mm の石英管に通し、予熱炉蓋に固定した。予熱炉からの放熱はセラミックファイバー系断熱材を被覆して防いだ。予熱空気温度は 500°C 1 水準

昭和 60 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 3 月 10 日受付 (Received Mar. 10, 1987)

\* 秋田大学鉱山学部 工博 (Mining College, Akita University, 1-1 Tegatagakuenmachi Akita 010)

\*<sup>2</sup> 秋田大学鉱山学部 (Mining College, Akita University)

\*<sup>3</sup> 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

とした。本研究の予備試験と佐々木ら<sup>6)</sup>の試験で、この温度がもつとも成品歩留りが良いことを認めている。空気温度の制御は予熱炉温度の調節で行った。予熱炉は焼結鍋と切り離しができ、焼結途中で冷風に切り替えることができるようにした。予熱空気の吸引は、焼結が終了するまで吸引する、後述の上層部が最高温度になったとき冷風に切り替えるの二通りで、また冷風吸引のみでも行った（それぞれ HES, HHS, AS と略す）。空気流量

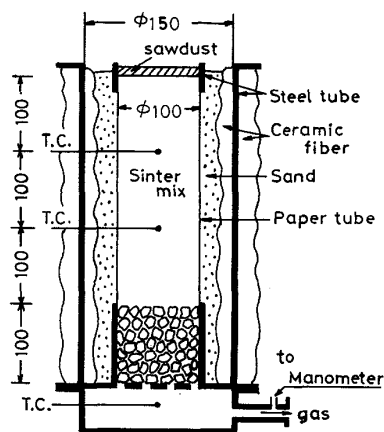


Fig. 1. Sintering pot.

は 260 Nl/min 一定とした。

Fig. 1 に焼結鍋の断面図を示す。焼結鍋本体は内径 150 mm、高さ 430 mm である。焼結鍋の管内壁と焼結原料を装入した 100 mm 径紙筒との間には海砂を詰め、そして海砂が焼結時に焼結層の収縮で生じるすき間を埋めるようにし、空気の流れが焼結層の外周部に偏らないようにした。また焼結鍋の内外壁をセラミックファイバー系断熱材で被覆して半径方向の断熱を強化した。焼結層厚は 300 mm とし、その下に目皿保護のため 100 mm 程度の成品粒を装入して床敷きとした。焼結における層内の測温は目皿上方 300 mm (上層部とする)、200 mm (下層部) の 2 か所で、PR 熱電対で行った。

## 2.2 焼結原料およびその調整法

供試鉄鉱石は A 鉱石 (豪州産リモナイト)、B 鉱石 (同産ヘマタイト) の二銘柄であり、それぞれ単味で用いた。造滓剤は CaO 源として石灰石を、SiO<sub>2</sub> 源には珪石 (沈降製、一級試薬) を用いた。鉄鉱石と石灰石の化学分析値を Table 1 に示す。原料調整の構成と平均化学組成を Table 2 に示す。

調整モード 1, 1\* は粒鉱 (0.8~3.3 mm) を 80 wt% に、粉鉱 (-0.8 mm) と造滓剤粉の混合物をペレット

Table 1. Chemical composition of raw materials (wt%).

| Raw materials | Size(mm)         | T.Fe         | Fe <sup>+2</sup> | CaO      | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO      | C.W          |
|---------------|------------------|--------------|------------------|----------|------------------|--------------------------------|----------|--------------|
| A ore         | 0.8~3.3,<br>-0.8 | 58.1<br>57.1 | 0.4<br>0.4       | tr<br>tr | 4.4<br>5.5       | 6.9<br>6.0                     | tr<br>tr | 7.30<br>8.67 |
| B ore         | 0.8~3.3, -0.8    | 62.2         | 0.1              | 0.05     | 4.6              | 2.4                            | 0.1      | —            |
| Limestone     | -150             | 0.2          | tr               | 54.5     | 0.1              | 0.3                            | tr       | —            |

Table 2. Constitution and composition of sinter mix (wt%).

|       | Mode of pretreatment | CaO/SiO <sub>2</sub> | Coarse ore<br>0.8~3.3 mm | Fine ore<br>-0.8 mm | Mini-pellet<br>CaO<br>(as CaCO <sub>3</sub> ) | SiO <sub>2</sub> | Separately addition<br>CaO<br>(as CaCO <sub>3</sub> ) | SiO <sub>2</sub> | Composition of sinter mix<br>(eliminate combined water) |                  |                  |      |                                |
|-------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|------------------|------------------|------|--------------------------------|
|       |                      |                      |                          |                     |                                               |                  |                                                       |                  | T.Fe                                                    | Fe <sup>2+</sup> | SiO <sub>2</sub> | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| A ore | 1                    | 1.30                 | 80                       | 14.0                | 4.3                                           | —                | 1.7                                                   | —                | 58.8                                                    | 0.3              | 4.6              | 6.0  | 6.8                            |
|       |                      | 1.60                 | 80                       | 12.7                | 3.9                                           | —                | 3.4                                                   | —                | 58.0                                                    | 0.3              | 4.5              | 7.2  | 6.7                            |
|       |                      | 1.80                 | 80                       | 11.9                | 3.7                                           | —                | 4.4                                                   | —                | 57.5                                                    | 0.3              | 4.5              | 8.1  | 6.7                            |
|       | 1*                   | 1.31                 | 80                       | 11.0                | 3.4                                           | —                | Composition of mini-pellet :                          |                  | 47.1                                                    | 0.3              | 4.5              | 23.5 | 5.0                            |
|       |                      | 1.61                 | 80                       | 11.0                | 3.4                                           | —                | 4.2                                                   | 1.4              | 57.0                                                    | 0.3              | 5.8              | 7.6  | 6.6                            |
|       |                      | 1.79                 | 80                       | 11.0                | 3.4                                           | —                | 4.9                                                   | 0.7              | 57.0                                                    | 0.3              | 5.1              | 8.2  | 6.6                            |
|       |                      |                      |                          |                     |                                               |                  | 5.2                                                   | 0.4              | 57.0                                                    | 0.3              | 4.8              | 8.6  | 6.6                            |
|       | 2                    | 1.31                 | 90.9                     | —                   | —                                             | —                | Composition of mini-pellet :                          |                  | 47.1                                                    | 0.3              | 4.5              | 23.5 | 5.0                            |
|       |                      | 1.60                 | 90.9                     | —                   | —                                             | —                | 7.6                                                   | 1.5              | 57.0                                                    | 0.4              | 5.8              | 7.6  | 6.7                            |
|       |                      | 1.79                 | 90.9                     | —                   | —                                             | —                | 8.2                                                   | 0.9              | 57.0                                                    | 0.4              | 5.1              | 8.2  | 6.7                            |
|       | 3                    | 1.30                 | —                        | 92.5                | 7.3                                           | 0.2              | 8.6                                                   | 0.5              | 57.0                                                    | 0.4              | 4.8              | 8.6  | 6.7                            |
|       |                      | 1.60                 | —                        | 91.4                | 8.6                                           | —                | —                                                     | —                | 57.0                                                    | 0.4              | 5.6              | 7.3  | 6.0                            |
|       |                      |                      |                          |                     |                                               |                  |                                                       | 56.3             | 0.4                                                     | 5.4              | 8.6              | 5.9  |                                |
| B ore | 1                    | 1.30                 | 80                       | 14.3                | 3.4                                           | —                | 2.3                                                   | —                | 58.7                                                    | 0.1              | 4.4              | 5.7  | 2.3                            |
|       |                      | 1.60                 | 80                       | 13.1                | 3.1                                           | —                | 3.8                                                   | —                | 57.9                                                    | 0.1              | 4.3              | 6.9  | 2.2                            |
|       |                      | 1.80                 | 80                       | 12.3                | 2.9                                           | —                | 4.8                                                   | —                | 57.4                                                    | 0.1              | 4.2              | 7.7  | 2.2                            |
|       | 1*                   | 1.29                 | 80                       | 11.6                | 2.8                                           | —                | Composition of mini-pellet :                          |                  | 50.3                                                    | 0.1              | 3.7              | 19.2 | 1.9                            |
|       |                      | 1.60                 | 80                       | 11.6                | 2.8                                           | —                | 4.3                                                   | 1.3              | 57.0                                                    | 0.1              | 5.5              | 7.1  | 2.2                            |
|       |                      | 1.80                 | 80                       | 11.6                | 2.8                                           | —                | 5.0                                                   | 0.6              | 57.0                                                    | 0.1              | 4.8              | 7.7  | 2.2                            |
|       |                      |                      |                          |                     |                                               |                  | 5.3                                                   | 0.3              | 57.0                                                    | 0.1              | 4.5              | 8.1  | 2.2                            |
|       | 2                    | 1.29                 | 91.6                     | —                   | —                                             | —                | Composition of mini-pellet :                          |                  | 50.3                                                    | 0.1              | 3.7              | 19.2 | 1.9                            |
|       |                      | 1.60                 | 91.6                     | —                   | —                                             | —                | 7.1                                                   | 1.3              | 57.0                                                    | 0.1              | 5.5              | 7.1  | 2.2                            |
|       |                      | 1.80                 | 91.6                     | —                   | —                                             | —                | 7.8                                                   | 0.6              | 57.0                                                    | 0.1              | 4.8              | 7.7  | 2.2                            |
|       | 3                    | 1.29                 | —                        | 91.6                | 7.1                                           | 1.3              | 8.1                                                   | 0.3              | 57.0                                                    | 0.1              | 4.5              | 8.1  | 2.2                            |
|       |                      | 1.60                 | —                        | 91.6                | 7.8                                           | 0.6              | —                                                     | —                | 57.0                                                    | 0.1              | 5.5              | 7.1  | 2.2                            |
|       |                      | 1.80                 | —                        | 91.6                | 8.1                                           | 0.3              | —                                                     | —                | 57.0                                                    | 0.1              | 4.8              | 7.7  | 2.2                            |
|       |                      |                      |                          |                     |                                               |                  |                                                       | 57.0             | 0.1                                                     | 4.5              | 8.1              | 2.2  |                                |

ザーで造粒したミニペレット (1-3 mm 径,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 5.2$ ) を 20 wt% 配合したもの, 調整モード 2 は粒鉱を粉石灰石と粉珪石の混合物で被覆したもの, 調整モード 3 はミニペレットのみの場合である. なお, 調整モード 1 は原料鉄鉱石中の  $\text{SiO}_2$  量に対して所定の塩基度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , 以下 C/S と略す) になるように粉石灰石のみが添加され, また調整モード 1\*, 2, 3 は実機で製造されている焼結鉱と全鉄量 (約 57 wt%) が等しく, そして所定の C/S になるように造滓剤の石灰石と珪石を添加した.

なお, Table 2 の Mini-pellet の化学組成は  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{SiO}_2$  系状態図<sup>7)</sup> のカルシウムフェライト生成領域に相当させた.

### 2.3 焼結操作と成品焼結鉱の性状試験

焼結原料の水分量は, 焼結原料層の水分量と通気性をあらかじめ調べ, 通気性が最もよい 5 wt% とした. 原料の総重量は 4.7 kg とし, 原料の平均 C/S は 1.3~1.8 と変え, コークス量は 2.5, 3.0, 4.0 wt% で行つた.

焼結鍋に原料などを装入し, それを予熱炉と排気管に固定した. その後予熱空気が吸引され, おが屑の自然着火によつて焼結を開始した. また冷風吸引の場合はおが屑に点火後吸引した. 焼結中の負圧は 1 min ごとに読み取り, 予熱空気温度, 層内温度および排ガス温度はレコーダーに記録させた. 排ガス温度が最高値を示し, 低下し始めたとき焼結が終わつたものとみなし, 空気の吸引を止めた.

成品焼結鉱の性状解析試験として, 化学分析, X線回折, EPMA による定性・定量分析および化学組織観察を行い, 品質評価試験として, タンブラー試験 (TI), 還元試験 (RI) および耐還元粉化試験 (RDI) を行つた.

TI 試験: 内径 200 mm, 長さ 140 mm ドラム, ドラム内面の軸方向に 20×3 mm 羽根 2 枚付設. 22 rpm, 200 回転, +2.36 mm の wt% で示す.

RI 試験:  $\text{CO}:\text{N}_2 = 40:60$  ガス, 300 ml/min, 900°C, 180 min 還元.

RDI 試験:  $\text{CO}:\text{N}_2 = 40:60$  ガス, 300 ml/min, 550°C, 60 min 還元後 TI 試験 (-2.36 mm, wt%)

各試験とも試料は 15 mm 角, 16±1 g である.

## 3. 実験結果

### 3.1 焼結時の層内温度曲線に及ぼす予熱空気吸引方式の影響

層内温度曲線に及ぼす予熱空気吸引方式 (AS, HHS, HES) の影響の代表例として, B 鉱石の原料調整モード

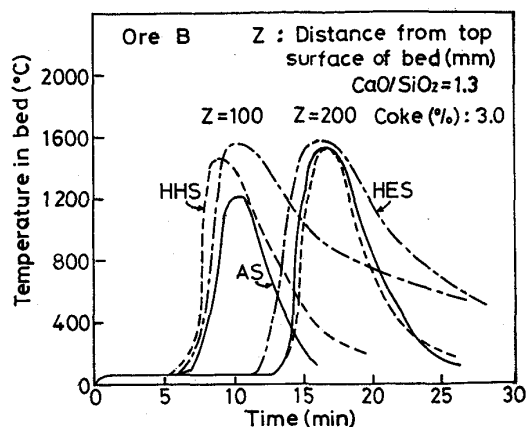
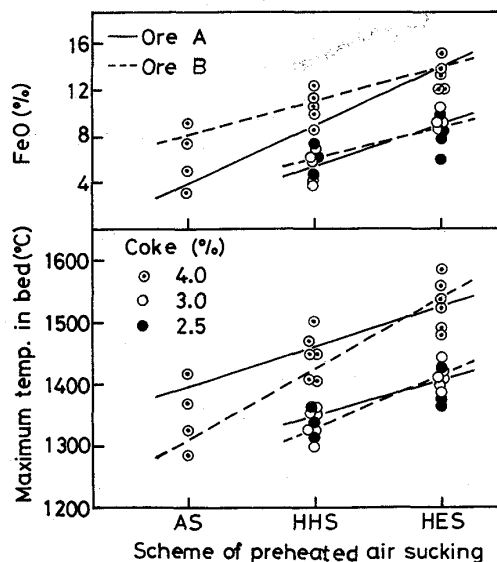


Fig. 2. Effect of preheated air sucking (AS, HHS, HES) on the curves of temperature vs. time in the sinter bed, mode 1.



AS: Air suction HHS: Hot air half suction  
HES: Hot air entire suction

Fig. 3. Effect of preheated air sucking (HHS, HES) on the maximum temperature in bed and FeO content in sinter, mode 1.

1 におけるコークス量 3.0 wt%, C/S=1.3 の場合を Fig. 2 に示す. 層内が最高温度に達するまでの時間は, 上層部の場合予熱空気を吸引した HHS と HES が AS より速く, 下層部の場合 HHS は上層部が最高温度に達したとき冷風吸引に切り替えるため AS と一致して HES より遅い. また層内が最高温度に達した後の温度降下は, 上下層とも AS と HHS が一致して HES より速い.

### 3.2 層内最高到達温度および成品焼結鉱中の FeO 量に及ぼす予熱空気吸引方式の影響

A, B 鉱石の調整モード 1 において, コークス量が

4.0, 3.0, 2.5% のときの上層と下層の平均層内最高到達温度と成品焼結鉱中の FeO(%) に及ぼす予熱空気吸引方式の影響を Fig. 3 に示す。A, B 鉱石とも同一コークス量で、層内最高到達温度は予熱空気吸引方式の AS, HHS, HES の順で高く、それに伴って FeO% も高い。したがって、低温度・低 FeO 焼結指向では、AS 方式が良いように思える。しかし、コークス量が 4.0% 以下では成品歩留りが極端に悪く、焼結が不可能でコークス量の低減は望めない。一方 HHS と HES 方式はコークス量を 2.5% まで下げてでも焼結が可能であり、とくにコークス量の低減および低温度・低 FeO 焼結を指向する場合、HHS 方式が最も良い。そのため以後の焼結試験では予熱空気吸引は HHS 方式に固定した。

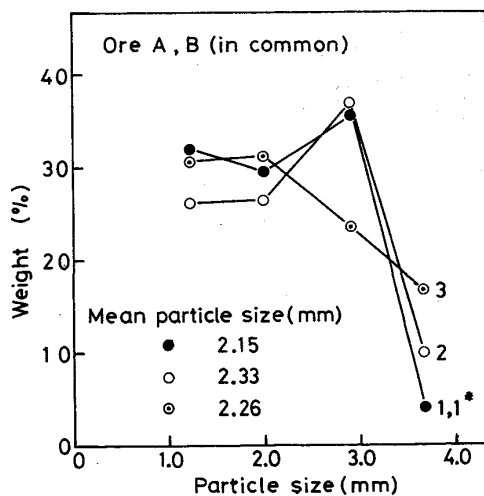
### 3.3 原料調整法の焼結に及ぼす影響

#### 3.3.1 焼結原料調整後の粒度分布

原料調整モードによる調整後 110°C、24 h 乾燥した擬粒子の粒度分布を Fig. 4 に示す。調整モード 1, 1\* と 2 の粒度分布は 3 mm 粒径でピークを示し、モード 2 は 1 に比べて 3 mm 以下の量が少なく、それ以上では多い。調整モード 3 は 3 mm 以上の粒径の量が多い。調整モード 1, 2, 3 の平均粒径はそれぞれ 2.15, 2.33, 2.26 であった。

#### 3.3.2 空気吸引負圧に及ぼす原料調整モードの影響

A, B 鉱石における原料調整モードの空気吸引負圧に及ぼす影響の代表例としてコークス量が 3.0 wt%, C/S が 1.55~1.60 の場合を Fig. 5 a), Fig. 5 b) に示す。焼結実験開始後吸引負圧は時間の経過とともに増加し、ピークを示したのち減少する。この場合、約 5 min までは調整モード 2 の吸引負圧がもつとも高く、ついで 1\* と 3 そして 1 の順で低い。しかしその後の吸引負圧の増



1,2,3: Mode of pretreatment

Fig. 4. Size distribution of pretreated sinter mix.

加が少ないため調整モード 2 が逆にもつとも低くなり、ついで 1\* と 3 そして 1 の順で高い。

#### 3.3.3 層内温度曲線に対する原料調整モードの影響

A, B 鉱石における層内温度曲線に対する原料調整モードの影響の代表例を Fig. 6 a), Fig. 6 b) に示す。両鉱石とも Heat front speed (最高温度の移動速度と定義することとする) は、原料調整モード 2 がもつとも速く、ついで 1\* と 3 そして 1 の順に遅い。したがって、

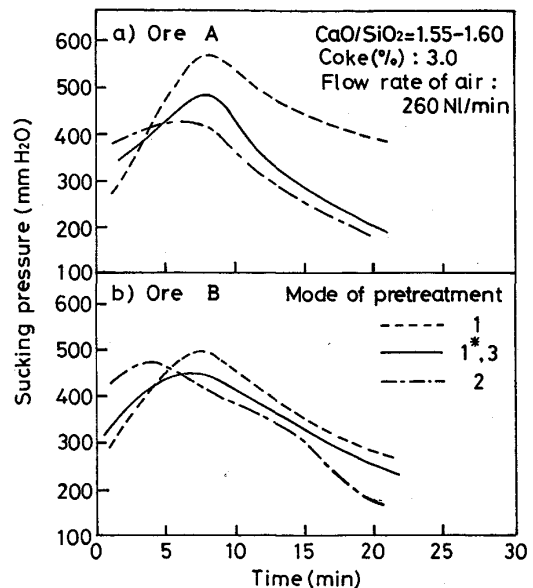


Fig. 5. Effect of mode of pretreatment for sinter mix on sucking pressure change during the sintering.

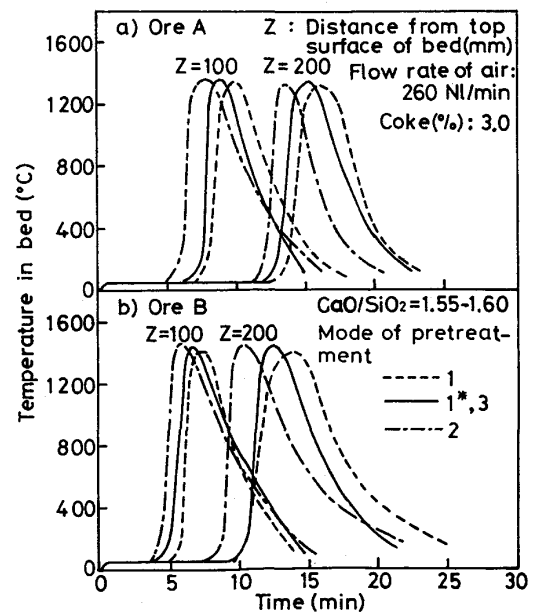


Fig. 6. Effect of mode of pretreatment for sinter mix on the curves of temperature vs. time in the sinter bed.

調整モード2による原料で焼結を行うと、焼結時間の短縮が可能であることを示している。

### 3.3.4 層内最高到達温度と成品焼結鉱中の FeO(%) に及ぼす原料調整モードの影響

コークス量が 2.5~3.0 wt% の場合の、A, B 鉱石における層内最高到達温度と成品焼結鉱中の FeO(%) に及ぼす調整モードの影響を Fig. 7 に示す。層内最高到達温度は調整モード2が他に比べて最も低い(約 1300°C)。FeO(%) は最高到達温度が低いと小さくな

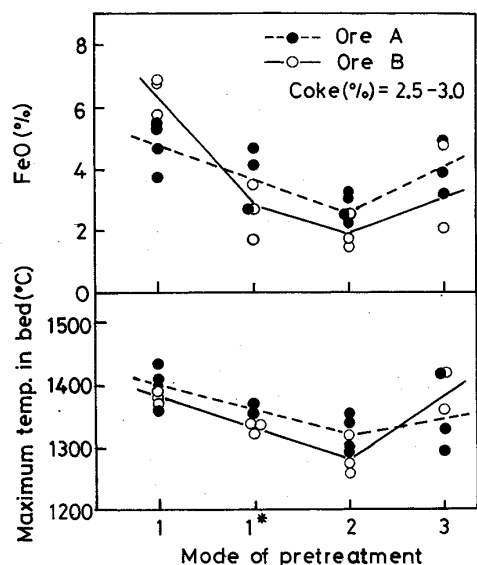
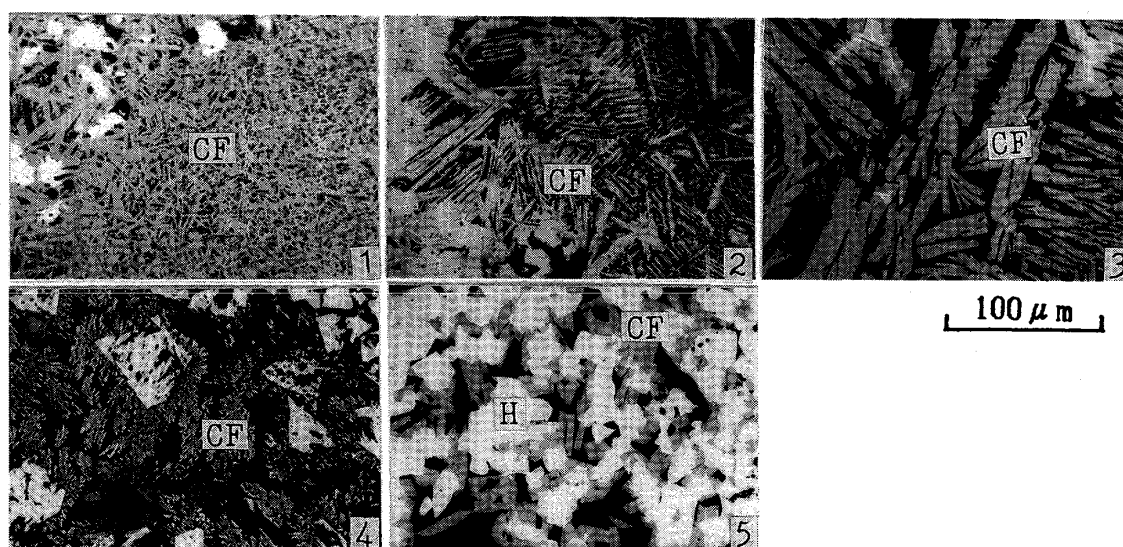


Fig. 7. Effect of mode of pretreatment for sinter mix on maximum temperature in sinter bed and FeO wt% in sinter.

る(約 1.5%). したがって、最高到達温度を低める調整モード2が FeO(%) を下げるのに最も適することを示している。

### 3.3.5 成品焼結鉱組織の光学顕微鏡観察と EPMA による定量

光学顕微鏡による観察で、鉱物相として酸化鉄、カルシウムフェライト、珪酸塩が認められた。酸化鉄の鉱物相の形態の分類を稲角ら<sup>8)</sup>の著作をもとに行うと、鉱物組織的には A, B 鉱石からの焼結鉱にはつきりした違いは認められなかった。酸化鉄を形態で見ると、残留元鉱と、粒状、包晶状、樹枝状、骸晶状ヘマタイトおよびマグネタイトが認められた。またカルシウムフェライトを形態別に分類した組織を Photo. 1 に示す。Photo. 1-1 は微針状、Photo. 1-2 は針状である。両者とも近傍の酸化鉄はヘマタイトで、とくに微針状カルシウムフェライト近傍は粒状ヘマタイトが多く認められた。Photo. 1-3 は長柱状、Photo. 1-4 はしだの葉状で、Photo. 1-5 は板状カルシウムフェライトとヘマタイトとの共存を示す。以上に述べたカルシウムフェライト形態の順序は組織観察から焼結温度が高くなるにつれて現れるように推定された。このような形態のすべての酸化鉄およびカルシウムフェライトは、焼結条件が同じ、あるいは異なる場合でも、焼結鉱中に局部的に存在しており、原料成分、粒度の偏析および通気の偏りなどで層内の熱履歴は不均一であつたと考えられる。しかし Table 3 に示すように、望ましいと考えられる粒状ヘマタイトと微針状および針状カルシウムフェライト量は調整モード2の場合が



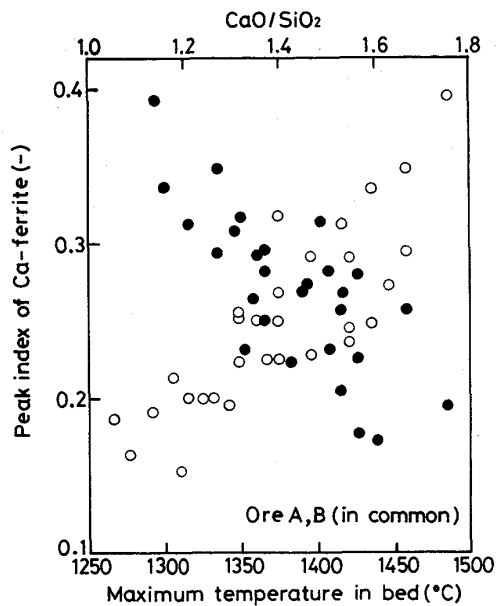
1: Fine acicular 2: Acicular 3: Columnar 4: Fern-like 5: Plate-like  
H: Hematite CF: Calcium ferrite

Photo. 1. Morphologic structure of Calcium ferrites in sinter.

Table 3. Qualitative amount of main minerals in sinter.

| Ore | Pretreatment mode | Granular hematite | Skeletal hematite | Acicular Calcium ferrite | Other Calcium ferrite |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| A   | 1                 | ▲                 | ○                 | ▲                        | ○                     |
|     | 1*                | △                 | ○                 | ○                        | ○                     |
|     | 2                 | ○                 | ▲                 | ○                        | ▲                     |
|     | 3                 | ○                 | ○                 | △                        | △                     |
| B   | 1                 | ▲                 | ○                 | △                        | ▲                     |
|     | 1*                | ○                 | ○                 | ○                        | △                     |
|     | 2                 | ○                 | ○                 | ○                        | ○                     |
|     | 3                 | ○                 | ○                 | ▲                        | ○                     |

(Much) ○→○→△→▲ (Little)



○: Peak index-CaO-SiO<sub>2</sub> ●: Peak index-Temperature  
 Fig. 8. Relation among the quantities of Calcium ferrite, maximum temperature in bed, and CaO/SiO<sub>2</sub> in sinter.

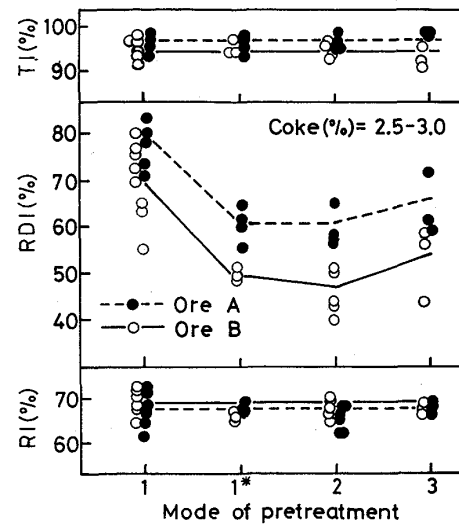
最も多い。また骸晶状ヘマタイトは非常に少ない。

またこのようなカルシウムフェライトはX線回折によると4成分系カルシウムフェライトと同定された。その生成量をピーク指数で表し、それと焼結時の最高到達温度およびC/Sとの関係をFig. 8に示す。カルシウムフェライトピーク指数は焼結鉱中のマグネタイト( $d=2.97$ ), ヘマタイト( $d=2.69$ ), カルシウムフェライト( $d=1.455$ )<sup>9)</sup>のX線回折ピーク高さの総和に対するカルシウムフェライトのピーク高さの比で求めた。このピーク指数は定量値を示すものではないが、生成量の尺度となり得る。図に示されるように、A, B 鉱石ともカルシウムフェライト生成量は最高到達温度が低く、またC/Sを高めると増すことを示す。

酸化鉄を除いた各種カルシウムフェライトおよび珪酸塩のEPMAによる定量分析結果をTable 4に示す。表で示されるように、カルシウムフェライトの組成は形態

Table 4. The results of quantitative analysis of Calcium ferrite and Silicate-slag by EPMA (wt%).

| Mineral phase   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | CaO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|-----------------|--------------------------------|------|------|------------------|--------------------------------|
| Calcium ferrite |                                |      |      |                  |                                |
| Fine acicular   | 68.0                           | —    | 19.2 | 10.5             | 2.3                            |
| Acicular        | 83.5                           | —    | 10.4 | 2.9              | 3.2                            |
| Columnar        | 76.2                           | —    | 13.5 | 6.7              | 3.6                            |
| Plate-like      | 70.7                           | —    | 15.4 | 8.2              | 5.7                            |
| Fern-like       | 49.1                           | —    | 33.5 | 17.0             | 0.4                            |
| Silicate slag   |                                |      |      |                  |                                |
| Crystalline     | —                              | 26.8 | 34.2 | 28.8             | 8.2                            |
| Non-crystalline | —                              | 15.9 | 42.2 | 36.8             | 5.1                            |



TI: Tumbler index RDI: Reduction degradation index  
 RI: Reduction index

Fig. 9. Effect of mode of pretreatment for sinter mix on TI, RDI and RI of sinter.

によつて異なる。すなわち、針状→長柱状→板状→微針状→しだの葉状の順で、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量は低く、CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が高い。微針状カルシウムフェライトはCaOが約19 wt%, SiO<sub>2</sub>が約10 wt%と他に比べて濃度が高い。これは佐々木ら<sup>10)</sup>が述べているように、焼結の昇温時に低融点のカルシウムフェライト融液(CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系, CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系など)がまず生成し、この融液中にCaOとAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>がある程度溶解、酸化鉄と反応してシリケートを固溶した針状カルシウムフェライトが生成したものと考えられる。

### 3.3.6 成品焼結鉱の品質に対する原料調整モードの影響

タンブラー強度(TI%), 還元粉化性(RDI%)および被還元性(RI%)に対する原料調整モードの影響をFig. 9に示す。A, B 鉱石による焼結鉱ともRDI%は、粒鉱石表面に造滓剤を被覆する調整モード2の場合が他に比べて小さく、耐還元粉化性が最も良い。またTI%とRI%も良好に保持できることを示している。

## 4. 考 察

### 4.1 焼結における予熱空気吸引の効果

Fig. 4 に示されるように、予熱空気を吸引する HES, HHS 方式では予熱空気を用いない AS 方式に比べて、層内温度の立ち上がりと最高温度に達する時間が短い。熱風が吸引されると湿態原料の早期乾燥、予熱が行われ、供給熱がコークスの燃焼を早めるためと考えられる。しかし焼結終了まで予熱空気を吸引する HES では、最高温度に達したのちの温度降下が遅くなり、1100°C 以上の温度での滞留時間が長い。また下層部で熱が過剰となり最高温度を上げる傾向を示すので低温および低 FeO 焼結には好ましくないと考えられる。焼結途中で冷風に切り替える HHS では下層での熱過剰の低減に有利であり、上下層部の最高温度がほぼ同じとなり、1100°C 以上での滞留時間が短い。したがって HHS 方式の採用は、予熱による供給熱が添加コークスの代替をもたらし、コークス添加量の低減、低温度・低 FeO 焼結を可能とする (Fig. 3)。

### 4.2 焼結に及ぼす原料調整法の影響

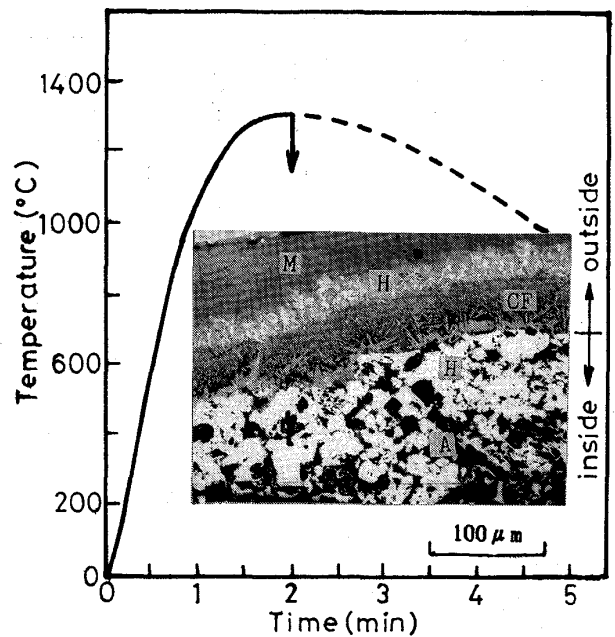
#### 4.2.1 焼結前の温度曲線

Fig. 6 に示すように、A, B 鉱石ともに調整モード 2 の Heat front speed が速く、焼結終了時間が短くなっている。このことは焼結前の生産性向上の点から好ましいと考えられる。また調整モード 2 は Fig. 7 に示すように、層内最高到達温度が低く、低温焼結が可能である。Heat front speed について、深川ら<sup>11)</sup>は粒子-流体の熱伝達から数値解析を行い、数学的意味ははつきりしないものの普遍性があるものと仮定して、次に示す Heat front speed ( $Z/t$ ) の式を求めている。

$$(Z/t) = C_{pg} \cdot G / [C_{ps} \cdot \rho_s (1 - \epsilon)]$$

ここで、 $Z$  はガスの流れ方向の層距離 [m]、 $t$  は時間 [h]、 $C_{pg}$  はガスの比熱 [kcal/kg °C]、 $C_{ps}$  は粒子の比熱 [kcal/kg °C]、 $\rho_s$  は粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\epsilon$  は空隙率、 $G$  はガスの質量速度 [kg/h m<sup>2</sup>] である。

本研究における空気吸引量とコークス添加量が一定の条件ではガスの比熱および質量速度は定数とみなすことができる。したがって、この式から Heat front speed は粒子の密度と比熱および充填率に反比例することになる。原料調整モード 2 は鉱石粒子表面に石灰石粉と珪石粉の造滓剤を被覆するため粒子の比熱や密度が他のモードに比べて見かけ上小さくなると考えられる。また Fig. 4 と Fig. 5 からモード 2 は他のモードにくらべて平均粒径が大きく、空気吸引負圧が小さいことから、通気性が良いため、Heat front speed が最も速くなるもの



A: Original ore M: Melt CF: Calcium ferrite H: Hematite  
Fig. 10. Quenching test of pretreated sinter mix, mode 2.

と考えられる。

#### 4.2.2 調整モードにおける焼結時の融液生成

Table 3 に示したように、調整モード 2 の方法をとると、焼結鉱品質にとって有用な、主として針状あるいは微針状カルシウムフェライトが多く、またヘマタイトでは粒状ヘマタイトが多く存在していた。これよりなぜ調整モード 2 が他のモードに比べて有用な鉱物相を造り込めるかを、とくに最高温度における鉱物相の状態で調べる必要があると考えられる。この鉱物相の生成過程を調べるには雰囲気、熱履歴等の条件を一定にする必要があるが、鍋試験においては達成は難しい。

そこで急速昇温、冷却が可能な赤外線イメージ炉を用い、中断試験を行つた。

調整モード 2 の試料 (3~4 mm) を乾燥後白金セル内に 3~4 個入れ炉内にセットした。その後、Fig. 10 に示すように、鍋試験で得られた温度曲線にシミュレートさせ、酸素流通下で約 1000°C/min の速度で 1300°C に昇温した。そして液体窒素で冷却した He ガスを試料上部から吹きつけ冷却した。そしてそのときの鉱物相を室温まで持ち込み、組織を観察した。冷却速度は 9000°C/min が得られる。そのときの鉱物相は Fig. 10 に組み込んだ組織写真で示すように、擬粒子内部から外部へと元鉱 (A)、微針状カルシウムフェライト (CF)、ヘマタイト (H) および融液 (M) の生成が認められる。

これは元鉄と CaO の固相反応で低融点のカルシウムフェライト融液がまず生成し、それに  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が溶け込み、融点を上げて、微針状カルシウムフェライトを形成し<sup>10)12)</sup>、残りは融液とヘマタイトの共存とみられる。そして降温時にその融液とヘマタイトの包晶反応でカルシウムフェライトが生成する。調整モード2の方法は、焼結鉄の品質にとって有用な粒状ヘマタイトおよびカルシウムフェライトをより多く生成させ (Table 3)、同時に、焼結反応を速め、もつとも有益な調整法といえる。

以上のように、予熱空気 (約 500°C) を用いると、コークス添加量が低減でき、途中から冷風に切り替える焼結では、さらに低温焼結・低 FeO となり、したがって低温還元時の粉化にとって有害とされている骸晶状ヘマタイトなどの生成が抑制される。それに粒鉄鉱石に造滓剤を被覆した調整原料使用を併用すると焼結速度が速められ、焼結鉄の生産性の向上が望める。同時に擬粒子同志の接触部における低温での融液生成が容易となる。また、昇温時における造滓剤の被覆と、融液生成後のたとえば Fig. 10 にみられるように融液が粒鉄鉱石の表面を覆っているため粒鉄鉱石と焼結時に発生するガスとの接触が阻止され、FeO 量がさらに低められる。また、有用な針状や微針状カルシウムフェライトの造り込みが容易になるなどの結果から、粒鉄鉱石を造滓剤で被覆した焼結原料を、低コークス量で、予熱空気をを用い、さらに途中から冷風に切り替える焼結法が常温強度と被還元性を良好に確保し、耐還元粉化性の良い焼結鉄を造り得るのに好ましいと考えられる。

## 5. 結 言

低温焼結、低 FeO によつて、常温強度、被還元性および耐還元粉化性の良好な自溶性焼結鉄の製造を目的に、予熱空気をを用いた低コークス焼結を行つた。同時に予熱空気の吸引は、焼結終了まで、焼結途中で冷風に切り替える、の二通りと、冷風吸引で行つた。焼結原料の調整は、造滓剤を粒鉄鉱石に被覆する方法と、粉鉄鉱石とミニペレットにする方法とした。焼結は小型試験鍋で行つた。そして焼結過程と成品品質に対する予熱空気吸

引と原料調整の影響を調べ、つぎに述べる結果を得た。

1) 予熱空気吸引は、焼結の途中で冷風に切り替える方式がよく、コークスの低減、低温焼結および低 FeO 焼結を可能とする。

2) 焼結原料調整では、粒鉄鉱石に造滓剤を被覆する擬粒化が焼結時間を短縮し、FeO をさらに低くする。

3) 予熱空気吸引と粒鉄鉱石に造滓剤を被覆した擬粒子の併用は、焼結温度と FeO を下げ、マグネタイト、骸晶状ヘマタイト量を低くする。また針状および微針状カルシウムフェライト量を増す。そして常温強度と被還元性を良好に保持しながら、とくに耐還元粉化性を著しく向上させる。

4) 粒鉄鉱石に造滓剤を被覆した焼結原料を、予熱空気をを用い、焼結途中から冷風に切り替えて低コークス量で焼結することにより、総合的に最も良質な焼結鉄が得られることがわかつた。

終わりに当たり、実験遂行に協力された当時学生の新日本製鉄・平川俊一、松岡裕直、沓沢 繁および細川浩一各修士の諸氏に謝意を表します。

## 文 献

- 1) 山岡洋次郎, 長野誠規, 大関彰一郎, 古川和博: 鉄と鋼, **66** (1980), S674
- 2) 松岡 宏, 相馬英明, 和島正巳, 三国 修, 中川美男: 鉄と鋼, **68** (1982), S717
- 3) 山口幹郎, 木村吉雄, 末光利久, 土屋 脩, 小泉秀雄, 西田礼次郎: 鉄と鋼, **70** (1984), S23
- 4) たとえば, 坂本 登, 岩田嘉人, 福与 寛, 斉藤 汎: 鉄と鋼, **71** (1985), S40
- 5) 石光章利, 若山昌三, 戸村聡吉, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, **48** (1962), p. 1266
- 6) 佐々木健二, 野中 浩, 宮崎伸吉, 満岡正彦, 児玉琢磨: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 1325
- 7) B. PHILLIPS and A. MUAN: J. Am. Ceram. Soc., **42** (1957), p. 413
- 8) 稲角忠弘: 鉄物工学 (1976), p. 204
- 9) 三本木貢治, 大森康男, 戸板公志, 浅田 実: 鉄と鋼, **50** (1964), p. 1574
- 10) たとえば, 佐々木稔, 肥田行博: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 563
- 11) 深川弥次郎, 石川 泰, 野口信雄, 楯岡正毅: 鉄と鋼, **50** (1964), p. 338
- 12) A. MUAN and E. F. OSBORN: Phase Equilibria among Oxides in Steelmaking (1965) [Addison-Wesley Pub. Co.]