

# 焼結反応に及ぼす吸引ガス中の酸素, 水蒸気の影響

細谷 陽三\*・藤本 政美\*<sup>2</sup>・今野 乃光\*・岡田 務\*・柴田 充蔵\*<sup>3</sup>

Influence of Oxygen and Humidity of Inlet Gas on the Sintering Reaction  
Yohzoh HOSOTANI, Masami FUJIMOTO, Norimitsu KONNO, Tsutomu OKADA and Juzo SHIBATA

**Synopsis :** The influence of oxygen and humidity of inlet gas on the sintering reaction was studied through mathematical model analysis. Then, the change of oxygen and humidity of inlet gas was investigated for the effects on the sintering time, product yield of sinter, heat wave in sintering bed and other parameters in all of the sintering pot tests.

The flame front speed, the maximum temperature in the sintering bed and product yield of sinter decreased with decrease in oxygen content of the inlet gas.

When the moisture content of the inlet gas was increased, the maximum temperature in the sintering bed decreased because it took time for moisture to evaporate. Moreover, the flame front speed decreased because of an increase in the gas flow resistance of the moisture condensation zone in the sintering bed.

If the decrease of oxygen content and increase of moisture content of the inlet gas are combined, the adverse effect on the product yield of sinter becomes greater due to a drop in the heat level as a result of the decrease of maximum temperature in the sintering bed. In such case, the increase of the temperature of the inlet gas can be expected to improve this adverse effect.

**Key words :** agglomeration ; sintering process ; moisture condensation ; iron ore sinter ; exhaust gas recirculation ; coke breeze.

## 1. 諸言

焼結プロセスで発生する排ガスの環境排出基準は今後さらに厳しくなることが予想される。このため焼結プロセスの排ガスを削減できれば環境対策効果が増すと同時に、総排出量も抑制できると考えられる。その方法の一つとして排ガス循環焼結法<sup>1)</sup>があげられる。

排ガス循環焼結法については、高温の排ガスを循環する方法がすでに実用化<sup>1,2)</sup>されており、2段階火焼結法<sup>3)</sup>や主煙道排ガスを循環する焼結法(EOS(Emission Optimizing Sintering)プロセス)<sup>4)</sup>などが提案されてきた。しかし2段階火焼結法やEOS排ガス循環焼結法を実用化すると、低酸素濃度で水蒸気を含むガスを吸引して焼結することになり、焼結反応への悪影響が懸念される。

これまで酸素濃度と水蒸気濃度の単独の影響について数多く研究されてきたが、酸素と水蒸気の組み合わせ効果の定量的評価は少ない。本研究では、焼結反応に及ぼす酸素(O<sub>2</sub>), 水蒸気(H<sub>2</sub>O)濃度の影響を焼結数学モデルでまず解析し、それらの単独、組み合わせの影響を鍋試験で定量化して、排ガス成分の成品歩留などへの影響を考察した。

## 2. 従来の研究

### 2・1 排ガス循環焼結プロセスの態様

焼結機の後半部の排ガスを前半部へ循環する焼結法については灰谷ら<sup>5)</sup>が鍋試験で検討している。焼結時間は長くなるが、成品歩留が向上するので生産性は変わらず、通常焼結鉱との有意差も認められないと報告している。

また安本ら<sup>6)</sup>は、焼結機排ガス(O<sub>2</sub>≒15vol%, CO<sub>2</sub>≒6.5vol%, H<sub>2</sub>O≒11vol%, CO≒1.6vol%)を用いた鍋試験を行い、D法(前半大気吸引, 後半排ガス焼結)でも生産率, 落下強度の低下はほとんどないとしている。

新しい概念のEOSプロセスは主煙道排ガス(排ガス組成例: O<sub>2</sub>7.5vol%, CO<sub>2</sub>≒11.2vol%, H<sub>2</sub>O≒17.2vol%, CO≒1vol%)を焼結機ストランド上に循環して焼結する方法で、オランダ・ホーコベンス社のIjmuiden製鉄所で1994年5月に実用化された<sup>4)</sup>。その後、低塩基度操業では冷間強度が9%低下(50.5→41.1%)する結果も報告された<sup>7)</sup>。

### 2・2 吸引ガス中の酸素, 水蒸気濃度の影響

山田ら<sup>8)</sup>は鍋試験で検討し、酸素濃度低下で落下強度, 生産性が低下し、ヘマタイト減少によりRDIが向上し、排ガス

平成8年11月12日受付 平成9年3月7日受理 (Received on Nov. 12, 1996; Accepted on Mar. 7, 1997)

\* 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

\* 2 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (現: 黒崎窯業(株)) (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., now Krosaki Corp.)

\* 3 金沢工業大学 (Kanazawa Institute of Technology)

NOx濃度は低下すると報告している。酸素濃度低下による低NOx焼結法については堀尾ら<sup>9)</sup>が焼結数学モデルで検討し、吸引ガス中の酸素濃度が低下するにつれて、燃焼帯が高温領域の前面から後面へ移動して高温の還元帯の幅が拡大するためにNOxが低減されると考察している。焼結層の還元帯でNOが分解される可能性については、佐々木ら<sup>10)</sup>や中澤ら<sup>11)</sup>も報告している。

焼結ベッドへの水蒸気添加の影響については、小島ら<sup>12)</sup>と福田ら<sup>13)</sup>の報告がある。小島らは焼結層上方から吸引される空気に水蒸気を添加する鍋試験を行い、①焼結時間の短縮②生産性向上③NOx低減④粉コークス燃焼効率向上の結果を報告している。

### 3. 層内温度分布に及ぼす吸引ガスの温度と酸素、水蒸気濃度の影響に関するモデル解析

#### 3.1 層内温度分布の数学モデル解析

排ガス循環焼結法の解析に用いた数学モデルの構成<sup>14-16)</sup>の概要を以下に示す。吸引風量は一定とした。

##### 3.1.1 水分凝縮および乾燥領域

ガスおよび固体側のエンタルピー収支：

$$G\{C_g + C_h \cdot W_g\} \cdot (\delta T_g / \delta X) + Se \cdot hc(T_g - T_s) - R_w^* \cdot C_h \cdot T_g = 0 \quad (1)$$

$$(1 - \epsilon) \rho_s (C_s + C_w \cdot W_s) \cdot (\delta T_s / \delta \tau) = Se \cdot hc(T_g - T_s) + R_w^* (\lambda_w - C_w \cdot T_s) \quad (2)$$

ガスおよび固体側の水分に関する物質収支：

$$-G \cdot (\delta W_g / \delta X) = R_w^* \quad (3)$$

$$(1 - \epsilon) \rho_s \cdot W_s \cdot (\delta W_s / \delta \tau) = R_w^* \quad (4)$$

水分の恒率および減率乾燥過程に関する速度式：

$$R_w^* = Se \cdot hc(T_g - T_s) / \lambda_w \quad (5)$$

$$R_w^* = Se \cdot hc(T_g - T_s) / \lambda_w \times (W_s - W_e) / (W_c - W_e) \quad (6)$$

水分の凝縮過程に関する速度式：

$$R_w^* = G \cdot (\delta W_g / \delta T_g) \cdot (\delta T_g / \delta X) \quad (7)$$

##### 3.1.2 昇温過程、反応および溶融・凝固過程

ガスおよび固体側のエンタルピー収支：

$$-\delta(G \cdot C_g \cdot T_g) / \delta X = Se \cdot hc(T_g - T_s) \quad (8)$$

$$(1 - \epsilon) \rho_s \cdot \delta(C_s T_s + H) / \delta \tau = Se \cdot hc(T_g - T_s) + \Delta H_c \cdot R_c^* - \Delta H_e \cdot R_e^* \quad (9)$$

ガス側連続の式：

$$-\delta G / \delta X + M_c \cdot R_c^* / \rho_c + M_e \cdot R_e^* / \rho_e = \epsilon \cdot (\delta \rho_g / \delta \tau) \quad (10)$$

ガス中の酸素、炭酸ガスに関する収支：

$$-\delta(G \cdot C_{O_2} / \rho_g) / \delta X - R_c^* / \rho_c = \epsilon \cdot (\delta C_{O_2} / \delta \tau) \quad (11)$$

$$-\delta(G \cdot C_{CO_2} / \rho_g) / \delta X + R_c^* + R_e^* = \epsilon \cdot (\delta C_{CO_2} / \delta \tau) \quad (12)$$

コークス・石灰石粒子に関する物質収支：

$$\rho_c \cdot 4\pi \cdot r_c^2 \cdot (\delta r_c / \delta \tau) = -M_c \cdot R_c^* \quad (13)$$

$$\rho_e \cdot 4\pi \cdot r_e^2 \cdot (\delta r_e / \delta \tau) = -M_e \cdot R_e^* \quad (14)$$

コークス・石灰石各粒子当りの反応速度：

$$r_c^* = 4\pi \cdot r_c^2 \cdot k_c \cdot C_{O_2} \quad (15)$$

$$r_e^* = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot k_e \cdot (C_{CO_2}^* - C_{CO_2}) \quad (16)$$

鉄鉱石の溶融・凝固過程：

$$-\delta H / \delta \tau = H_{m0} \cdot (\delta T_s / \delta \tau) / (T_{m1} - T_{m2}) \quad (17)$$

#### 3.2 層内温度分布への影響

##### 3.2.1 酸素濃度の層内温度分布に及ぼす影響

温度が120°C、酸素濃度が①21②16.1③13.4④10.8⑤8.1 vol% <dry>のガスを点火直後から3.3分間吸引(その後は常温空気を吸引)させるシミュレーションを行い、焼結層内温度分布への影響を調べた。結果の一例をFig. 1に示す。空気を吸引する場合は、表層から下層に焼結が進行するに従って層内の最高温度は上昇する。酸素濃度を13.4vol%に一時

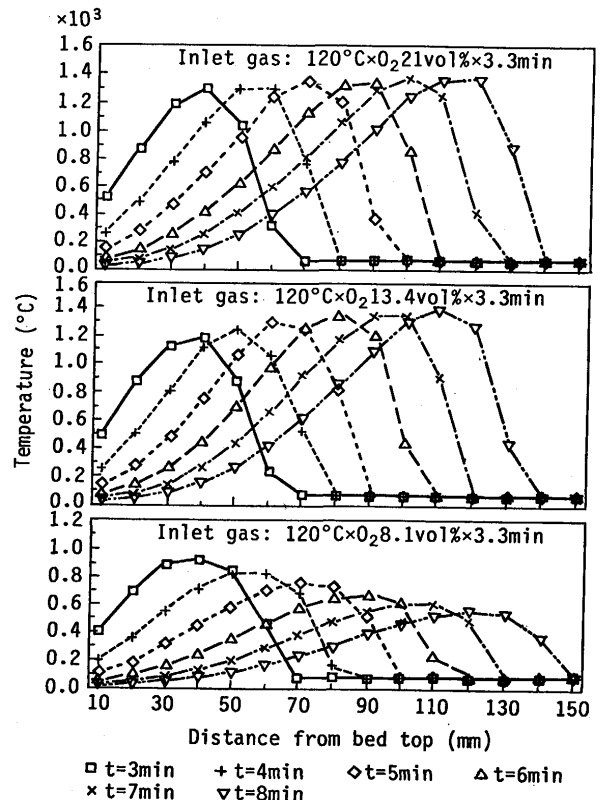


Fig. 1. Temperature distribution in sintering bed.

低下させた場合の層内最高温度は表層部分で若干低下するが、その後は空気を吸引する場合とほぼ同レベルに回復する。しかし酸素濃度を8vol%レベルまで一時低下させると最高温度は空気吸引に比べ低く、しかも焼結の進行とともに低下する傾向が見られた。

3・2・2 水蒸気濃度の層内温度分布に及ぼす影響

温度が120℃、水蒸気濃度が①0.9 ②5.9③11.1④15.8⑤20.0vol%<wet>のガスを点火直後から3.3分間吸引(その後は常温空気を吸引)させた。水蒸気濃度が20vol%になると酸素濃度が8vol%の場合と同じように層内の最高温度が焼結の進行とともに低下していく傾向が見られた。また吸引ガスの水蒸気濃度が増加するにつれて、水分凝縮量が増加していく傾向も見られた。これは通過するガスの露点温度以下にある原料が露点温度まで予熱される過程で水分の凝縮が生じるためと考えられる<sup>14)</sup>。

酸素濃度の低下に加えて、吸引ガス中に水蒸気が共存する場合の操業可能限界に関する数学モデルの解析結果をFig. 2に示す。図には、層内温度分布の一時的な低下はあっても正常な温度レベルまで回復が見られたものには○印、一方回復せず焼結反応が進まない場合には×印をつけた。操業可能限界には酸素と水蒸気濃度が強い相関を持っていることが分かる。また吸引ガス温度を上昇させる事により、操業可能領域が拡大しているのも分かる。

4. 実験結果と考察

4・1 焼結鍋試験装置と試験方法

Fig. 3に示す通常の焼結鍋試験装置(外径100mm、内径90mm、高さ450mm、負圧7.8kPa)を使用した。原料の装入量は約5kgで、床敷鉍の厚さは20mmとした。配合原料は鉄鉍石と副原料、返鉍、粉コークスからなり、平均粒度が1.5mmで焼結鉍塩基度が1.9になるように鉄鉍石等の配合割合を設定した。粉コークス配合比は4.2mass%一定とした。配合原料の造粒はドラムミキサー(内径385mm、26r.p.m.×7min)で行い、造粒後水分は約6.8mass%とした。

試験鍋直上での熱風温度は250℃とし、鍋上フードから一部が吹き出すようにして一定量の熱風を供給した。吸引ガスの酸素濃度は、分析計で測定しながらN<sub>2</sub>吹込み割合で調整した。吸引ガスの湿分は、ガス中の水分値が目標値になるように水蒸気(4kg/cm<sup>2</sup>、約130℃)吹込み量を設定した。実操業では約60~130℃の排ガスに水蒸気が含まれているが、本試験では水蒸気のドレン化を防止するために、250℃熱風に水蒸気を吹き込む方法を採用した。

焼結層内の温度は、鍋試験装置の目皿グレート面から80mm(下層)、200mm(中層)、350mm(上層)の位置に熱電対を挿入して測定した。水分凝縮ゾーンの温度は、下層と中層の位置に熱電対を挿入して測定した。排ガス中のCO<sub>2</sub>、COは非分散赤外線吸収法、O<sub>2</sub>は磁気風方式、NOは化学発光方式

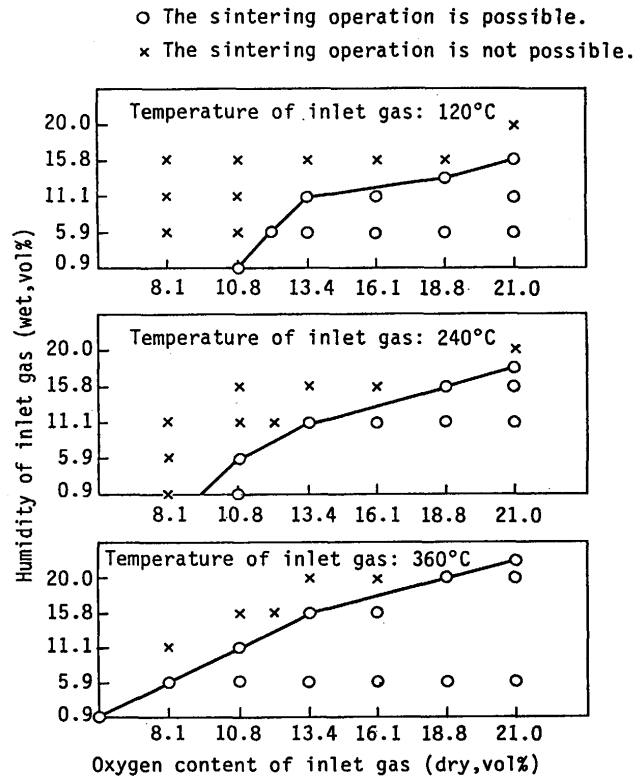


Fig. 2. Relation between sintering operation and oxygen and humidity of inlet gas.

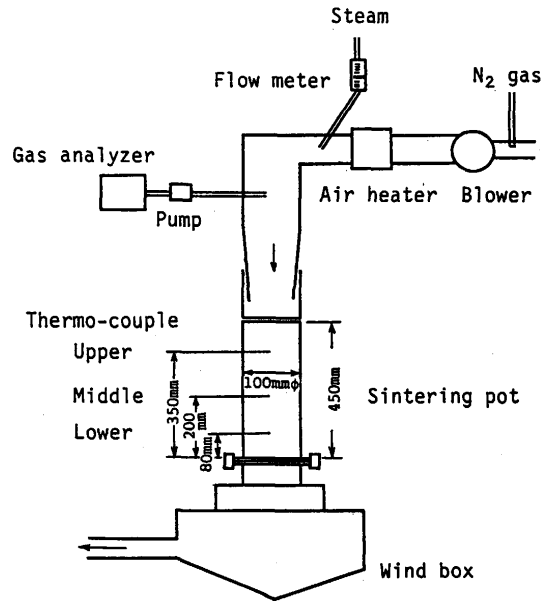


Fig. 3. Experimental apparatus of sintering pot test.

で測定した。成品歩留は、2mの高さから5回落下させたのち5mm以上から床敷量を引算した値を成品量とし、全焼成量(床敷量を引算)で割り算し求めた。

4・2 実験結果

以下、酸素濃度のvol%は乾(dry)、水蒸気濃度のvol%は湿(wet)で表示した。

4・2・1 焼結速度に及ぼす影響

鍋試験結果の一例をFig. 4に示す。常温のガスを吸引した

○— Air (about 20°C)    ●— Hot air (250°C)  
 -◆- Hot air [Humidity: 9vol%<wet> (80g/Nm<sup>3</sup>)]  
 -▲- Hot air [Humidity: 16vol%<wet> (150g/Nm<sup>3</sup>)]  
 -■- Hot air [Humidity: 28vol%<wet> (300g/Nm<sup>3</sup>)]

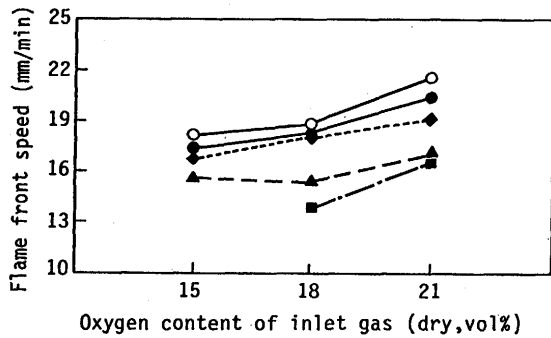


Fig. 4. Effect of oxygen and humidity of inlet gas on flame front speed.

Table 1. Comparison of temperature of the condensation zone in sintering bed.

No	Inlet gas	Oxygen of inlet gas (dry, vol%)	Humidity of inlet gas (wet, vol%)	Temperature of the condensation zone (°C)
1	Air	21	—	48 (—)
2	Hot air	21	9	54 (+ 6°C)
3	Hot air	18	9	51 (+ 3°C)
4	Hot air	15	9	50 (+ 2°C)
5	Hot air	21	16	60 (+12°C)
6	Hot air	18	16	59 (+11°C)
7	Hot air	15	16	57 (+ 9°C)
8	Hot air	21	28	60 (+12°C)
9	Hot air	18	28	65 (+17°C)
10	Hot air	15	28	70 (+22°C)

場合、酸素濃度が21vol%から18vol%、15vol%へ低下するにつれて焼結速度(FFS)が低下し、焼結時間が伸びた。吸引ガス温度が常温から250°Cに上昇すると、さらにFFSが低下し、焼結時間が延長した。焼結時間の延長幅は、酸素濃度1vol%低下当たり約3%増と評価された。一方、水蒸気濃度の増加につれてFFSは低下する傾向が見られた。

Table 1にベッド中下層部の水分凝縮ゾーンの温度測定結果例をまとめた。空気吸引に比べ水分凝縮ゾーンの温度が上昇しているため、3・2・2で説明したように水分凝縮量が増加しているといえる。従って、Fig. 4で見られたFFSの低下は、水分凝縮量増加による空隙減少と配合原料の擬似粒子の崩壊<sup>14)</sup>により、通気抵抗が増加したことによると推定される。また、酸素濃度が低下するとコークス燃焼が不活発になるので、水分蒸発量が減少して水分凝縮ゾーンの温度がやや低下する傾向が見られた。なお水蒸気濃度が28vol%では、酸素濃度が18vol%以下になるとむら焼けが発生したため、この傾向は見られなくなった。

4・2・2 成品歩留に及ぼす影響

成品歩留、焼結鉄FeOの測定結果をFig. 5に示す。吸引ガスの酸素濃度が15~21vol%の範囲において、吸引ガス温度

○— Air (about 20°C)    ●— Hot air (250°C)  
 -◆- Hot air [Humidity: 9vol%<wet> (80g/Nm<sup>3</sup>)]  
 -▲- Hot air [Humidity: 16vol%<wet> (150g/Nm<sup>3</sup>)]  
 -■- Hot air [Humidity: 28vol%<wet> (300g/Nm<sup>3</sup>)]

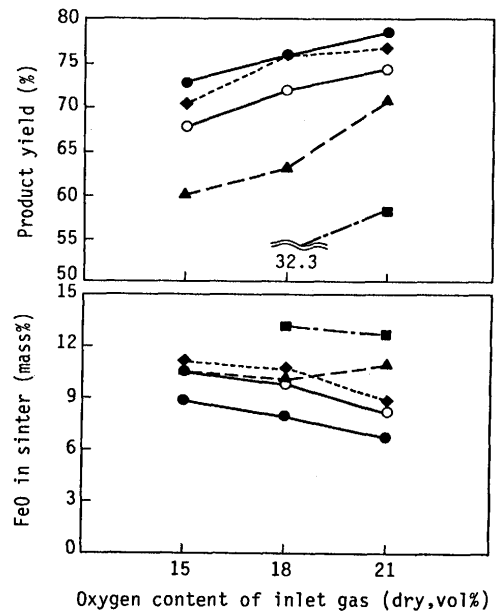


Fig. 5. Influence of oxygen and humidity of inlet gas on product yield and FeO content in sinter product.

を250°Cに高めると成品歩留は4%強向上し、酸素濃度低下により低下した。成品歩留の低下は、酸素濃度1vol%低下当たり約1%であった。吸引ガスの酸素濃度が低下すると、焼結鉄組織はマグネタイトとシリケートスラグが増加し、カルシウムフェライトが微細化する傾向が見られた<sup>17)</sup>。焼結鉄組織が変化したのは、酸素分圧(P<sub>O2</sub>)低下によるシリケートスラグ生成増の影響が大きいと推定される。

水蒸気濃度を増加すると、成品歩留は酸素濃度によらず低下したが、焼結鉄FeOは顕著に増加した。水性ガス生成による還元促進も考えられるが、本実験では明らかにできなかった。

4・3 吸引ガス温度、成分の焼結反応に及ぼす影響

4・3・1 温度、酸素濃度、水蒸気濃度の影響

焼結ベッド上、中層部の層内温度測定結果例をFig. 6に示す。吸引ガスの温度上昇により、上、中層部ともに高温保持時間が増加していることから、吸引ガス温度の上昇は冷却速度を遅らせて焼結層内の温度分布を拡げることが分かる。しかし上層部と違い、中層部では吸引ガスの温度上昇により最高温度はやや低下する結果になった。また前述したように生産率を低下させ、FeOを低下させた。したがって吸引ガスの温度上昇は上層部の成品歩留などを向上させるが、生産性を低下させ、RDIを悪化させることが考えられる。しかしFig. 2に示した数学モデルによる解析から、吸引ガス温度を上昇させる方法は酸素濃度低下や水蒸気濃度増加の成品歩留への悪影響を抑制する有効な手段になるといえる。

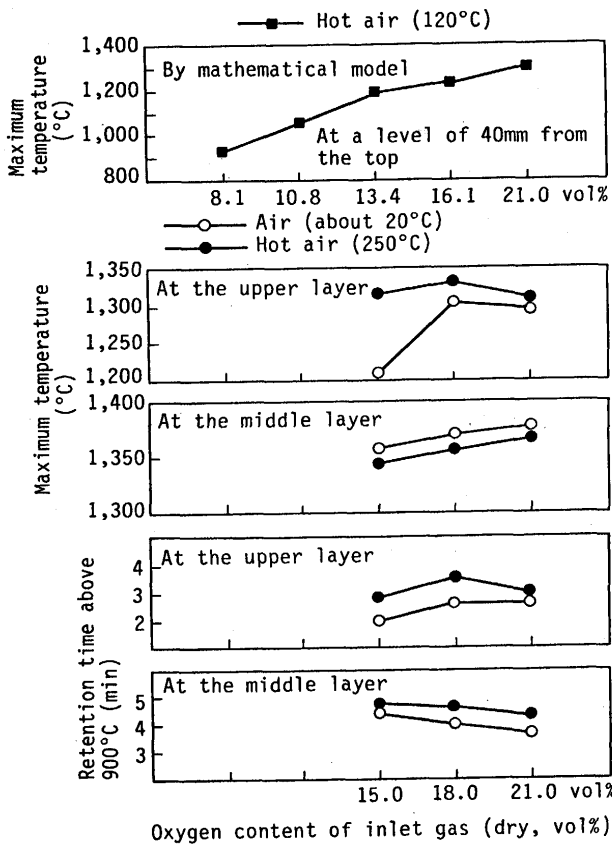


Fig. 6. Effect of oxygen of inlet gas on maximum temperature and retention time above 900°C in the upper and middle layer of sintering bed.

Fig. 4 に示したように吸引ガス中の酸素濃度低下は、コークス燃焼速度の遅れによりFFSを低下させ、Fig. 6 に示すように層内の最高温度を低下させる傾向にある。ただし、層内の高温保持時間への影響は明確でなかった。一方、酸素濃度低下により、マグネタイトの再酸化抑制やシリケートスラグ生成増などで焼結鉱FeOが増加するので、RDIの改善が期待できる。

Table 2 に排ガスの燃焼効率( $Y_{CO_2}$ )をまとめた。吸引ガス温度および酸素濃度の影響は小さいが、水蒸気濃度増加で顕著に $Y_{CO_2}$ が向上した。水蒸気濃度の増加による $Y_{CO_2}$ の増加がFig. 5 に示した成品歩留向上に結びつかないのは、ベッド中・下層部のむら焼けの助長および水分蒸発に時間がかかるために、Fig. 7 に示すように層内最高温度が低下するという悪影響が大きいと考えられる。

$NO_x$ 転換率の変化をTable 3 にまとめた。コークス燃焼量は、排ガス中の $CO_2$ から石灰石より発生する $CO_2$ (か焼量はコークス燃焼量に比例すると仮定)を引き算して求めた。吸引ガスの酸素濃度6%低下で $NO_x$ 転換率は約2%改善する結果を得た。これは①2.2で説明したように酸素濃度低下で還元帯が拡大すること、② $CO$ 濃度一定で酸素濃度が低下するために焼結層内の $CO/O_2$ が増加<sup>18)</sup>(燃焼中のコークス表面の酸素ポテンシャルが低下<sup>19)</sup>)して、コークス燃焼近傍で $NO$ の一部が分解されたことが考えられる。なお、吸引ガ

Table 2. Comparison of combustion efficiency( $CO_2/(CO+CO_2)$ ) of exhaust gas in the sintering pot test.

Humidity of inlet gas (wet, vol%)	Oxygen of inlet gas (dry, vol%)	Oxygen of inlet gas (dry, vol%)		
		15	18	21
Air	—	89.0 %	89.0	88.8
Hot air	—	89.6	89.8	89.1
Hot air	9	90.3	90.1	90.2
Hot air	16	92.3	91.8	92.4
Hot air	28	—	91.7	92.4

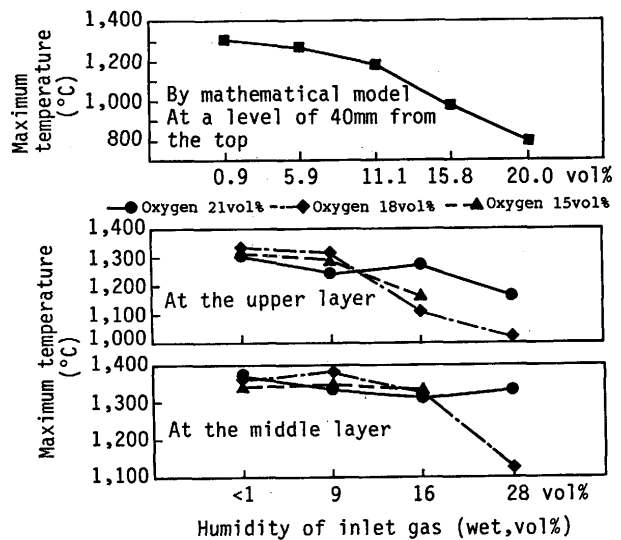


Fig. 7. Effect of humidity of inlet gas on maximum temperature of sintering bed.

Table 3. Comparison of  $NO$  conversion ratio of exhaust gas in the sintering pot test.

Humidity of inlet gas (wet, vol%)	Oxygen of inlet gas (dry, vol%)	Oxygen of inlet gas (dry, vol%)		
		15	18	21
Air	—	28.2 %	28.8	30.1
Hot air	—	28.9	30.3	31.1
Hot air	9	33.4	36.1	39.3
Hot air	16	36.2	35.4	34.7

スの温度上昇ならびに水蒸気濃度増加で $NO_x$ 転換率は悪化する傾向にある。焼結層内の最高温度ならびに $CO/O_2$ の低下の影響が大きいと推定されるが、詳細な機構は今後の課題である。

#### 4.3.2 酸素濃度低下、水蒸気濃度増加の組み合わせの影響

Fig. 8 に酸素濃度低下と水蒸気濃度増加を組み合わせた場合のFFSと成品歩留への影響を示す。等FFS線と等歩留り線を引くことができ、酸素濃度低下と水蒸気濃度増加を組み合わせることでFFSも成品歩留も低下することが分かる。酸素濃度低下と水蒸気濃度増加がともに焼結層内の最高温度を低下させる方向に働くために成品歩留への悪影響がよ

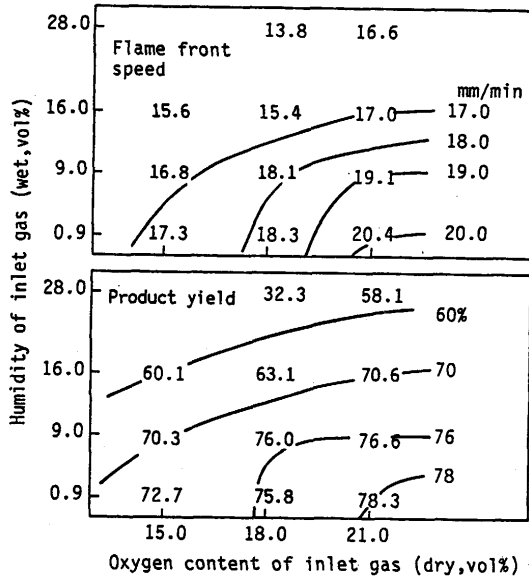


Fig. 8. Effect of oxygen and humidity of inlet gas on flame front speed and product yield.

り大きくなると考えられる。この成品歩留への悪影響を小さくするには、層内の最高温度が高く高温保持時間の長い、ベッド中・下層部に低酸素・高水蒸気ガスを吹き込むことが重要と推定される。さらにガス温度を上昇させることは、成品歩留向上に有効な手段と考えられる。

### 5. 結言

焼結反応に及ぼす酸素濃度、水蒸気濃度の影響を数学モデルによるシミュレーション解析と鍋試験で検討した。

(1) 焼結数学モデルによるシミュレーション解析では、  
 ①酸素濃度を低下させると、焼結層内の最高温度が低下し、  
 ②水蒸気濃度を増加させるとベッド中・下層部への水分凝縮量が増加して焼結層内の最高温度が低下する結果になった。その限界値は吸引ガス温度で変化することも分かった。

(2) 鍋試験結果からは下記の結論を得た。

①吸引ガスの酸素濃度低下は、コークス燃焼速度の遅れにより焼結速度(FFS)を低下し、層内最高温度を低下させて成品歩留を悪化させた。一方、酸素濃度低下で焼結鉱FeOが増加し、NO<sub>x</sub>転換率が改善される傾向が見られた。

②吸引ガスの水蒸気濃度増加はコークス燃焼効率を改善するが、水分凝縮ゾーンの水分凝縮量を増加させた。そのため水分の蒸発に時間がかかるので層内最高温度が低下し、また水分凝縮ゾーンの通気抵抗が増えるので焼結速度が低下した。水蒸気濃度増加は焼結鉱FeOを増加させた。

③吸引ガスの酸素濃度低下と水蒸気濃度増加を組み合わせると、ともに焼結層内の最高温度を低下させる方向に働

くので、成品歩留への悪影響がより大きくなった。

### 記号

- Cco<sub>2</sub>, Cco<sub>2</sub><sup>\*</sup>, Co<sub>2</sub> : 炭酸ガス濃度, 平衡炭酸ガス濃度, 酸素濃度 (mol/m<sup>3</sup>)
- Cg, Ch : ガス比熱, 水蒸気比熱 (J/(kg·K))
- Cs, Cw : 固体比熱, 水分比熱 (J/(kg·K))
- G, hc : ガス質量速度 (kg/(m<sup>2</sup>·min)), 伝熱係数 (J/(m<sup>2</sup>·min·K))
- H, Hm<sub>0</sub> : 溶融変数, 固体融解熱 (J/kg)
- ΔHc, ΔHe : コークスの反応熱, 石灰石の反応熱 (J/mol)
- kc, ke : コークスの総括反応速度定数, 石灰石の総括反応速度定数 (m/min)
- Mc, Me : 炭素の分子量, 石灰石の分子量 (kg/mol)
- Rc<sup>\*</sup>, Re<sup>\*</sup> : コークスの反応速度, 石灰石の反応速度 (kg/(min·m<sup>3</sup>))
- rc, re : コークスの粒子径, 石灰石の粒子径 (m)
- Se, Tg, Ts : 伝熱面積 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), ガスの温度, 層温度 (K)
- Tm<sub>1</sub>, Tm<sub>2</sub> : 溶融開始温度, 溶融終了温度 (K)
- Wc, We, Wg, Ws : 限界水分量, 平衡水分量, ガス湿度, 原料の含水率 (kg/kg)
- X, ε : 層頂よりの距離 (m), 層空間率 (-)
- λw, τ : 蒸発潜熱 (J/kg), 経過時間 (min)
- ρc, ρe : コークスの密度, 石灰石の密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- ρg, ρs : ガス密度, 固体密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- Rw<sup>\*</sup> : 水分蒸発(凝縮)速度 (kg/(m<sup>3</sup>·h))
- rc<sup>\*</sup> : コークス粒子当たりの反応速度 (mol/min)
- re<sup>\*</sup> : 石灰石粒子当たりの反応速度 (mol/min)

### 文 献

- 1) 池永淳一郎, 桜木準一, 大山浩一, 池原真也: 鉄と鋼, 81 (1995), T49.
- 2) T.Shoho, K.Yanagisawa, T.Miyake, K.Kitamura and M. Kasawaki: Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya, 2 (1990), 171.
- 3) S.Sato, T.Kawaguchi and M. Kato: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28 (1988), 705.
- 4) H. Werz, J.Otto and J.Rengersem: Stahl und Eisen, 115 (1995), 37.
- 5) 灰谷政彦, 小竹誠一, 清水重雄: 鉄と鋼, 62 (1976), S424.
- 6) 安本俊治, 福富正治, 山田孝雄, 児玉琢磨, 為井章, 今井由次, 灰谷政彦, 北沢孝次: 鉄と鋼, 64 (1978), S483, S484, S485.
- 7) J.Rengersen, E.Oosterhuis, W.F.de Boer, T.J.M. Veel and J.Otto: La Revue de Metallurgie-CIT, (1995) Mars. 329.
- 8) 山田孝雄, 福富正治, 奥山雅義, 児玉琢磨, 今井由次, 平井敏夫, 北沢孝次, 灰谷政彦: 鉄と鋼, 63 (1977), S26.
- 9) 堀尾正毅, 石本清人, 鞭 巖: 鉄と鋼, 64 (1978), S90.
- 10) 佐々木晃, 町島良一, 岡部俠児: 鉄と鋼, 63 (1977), S52.
- 11) 中澤俊彦, 葛西栄輝, 呉 胜利, 大森康男, 杉山 健, 稲葉晋一: 材料とプロセス, 4 (1991), 1078.
- 12) 小島 清, 村本 真, 岩月鋼治, 小口哲夫: 鉄と鋼, 71 (1985), S810.
- 13) 福田隆博, 姫田昌孝, 佐々木望, 川上茂樹, 田村道夫: 鉄と鋼, 71 (1985), S809.
- 14) 和島正巳, 細谷陽三, 柴田充蔵, 相馬英明, 田代 清: 鉄と鋼, 68 (1982), 1719.
- 15) 鞭 巖, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 56 (1970), 371.
- 16) Y.Hosotani, N.Konno, J.Shibata, T.Sato and H.Suzuki: ISIJ International, 35 (1995), 1340.
- 17) 大友崇徳, 葛西栄輝, 大森康男: 鉄と鋼, 72 (1986), S86.
- 18) 肥田行博, 佐々木稔, 伊藤 薫: 鉄と鋼, 66 (1980), 1801.
- 19) 呉 胜利, 杉山 健, 森岡耕一, 葛西栄輝, 大森康男: 鉄と鋼, 80 (1994), 276.