



酸素富化と排ガス循環を組み合わせた焼結プロセスの 適正操業条件

野田 英俊*・坂本 登*・市川 孝一*・町田 智*・六川 庄一*²

Operation Conditions of Iron Ore Sintering Process Combined with
Oxygen Enrichment and Exhaust Gas Recirculation System

Hidetoshi NODA, Noboru SAKAMOTO, Koichi ICHIKAWA, Satoshi MACHIDA and Shoichi ROKUGAWA

Synopsis : An advanced sintering process was proposed on the basis of mathematical models and was verified by pot tests. This process is characterized by combining exhaust gas recirculation with oxygen enrichment in order to meet the future environmental regulations as well as to keep the productivity. The main results obtained are as follows :

- (1) The models clarify that the introduction of the oxygen enrichment in the first half and the exhaust gas recirculation in the latter half of the sintering process gives better coke combustion rate and sinter quality than other possible alignments.
- (2) The models also show that with the constant O₂ quantity provided, the concentrated O₂ supply in a short time helps reduce the sintering time because of the balance between combustion rate and cooling rate of the sinter bed.
- (3) The pot test results were in good agreement with the models. The suitable O₂ content of 28~30% and O₂ injection time of 2~3 min were consequently obtained.
- (4) The proposed process did not cause the deterioration of sinter qualities such as reducibility although the change in O₂ content would affect the occurrence of hematite/magnetite phase in sinter microstructures.

Key words: sintering process; oxygen enrichment; exhaust gas recirculation; iron ore sinter; productivity; sinter qualities; coke combustion; mathematical model.

1. 緒言

焼結プロセスは大気中への排出ガス量が莫大であることから、欧州各国では系外排出ガス削減を目的とした排ガス循環プロセス^{1,2)}が開発されている。国内においても戸畑3号焼結機³⁾を始め、排ガス循環焼結プロセスが既に導入実施されている。しかし排ガス循環プロセスでは酸素濃度の低下により擬似粒子内粉コークスの燃焼速度が遅れ、生産性の低下が起こることが認められている^{4,5)}。一方、高炉原料として適する焼結鉱の配合率維持のためには焼結機の生産率維持が必要であり、その対策の一つに酸素富化プロセスがあげられる⁶⁾。

そこで本研究では、排ガス循環と酸素富化の両者を組合わせた焼結プロセスの可能性および適正な操業条件を明らかとし、高生産率下で系外排出ガスを抑制可能な次世代焼結プロセスを提言する。

2. 酸素富化排ガス循環焼結プロセスの検討

2.1 酸素富化排ガス循環プロセスの考え方

焼結プロセスにおける排ガス循環方法については灰谷

ら⁷⁾、山田ら⁴⁾が鍋試験により詳細な検討を行っており、グレート後半部の排出想定ガスを焼結機前半部へ循環させた場合、焼結時間は延長するが、成品歩留が向上するため生産性は通常焼結法と変化がないこと、また、吸引ガス中酸素濃度の限界は16~17 vol%であることを指摘している。さらに循環方式については、安本ら⁸⁻¹⁰⁾が酸素濃度の低いグレート前半部の排出ガスを後半部に循環利用するいわゆる、前半大気/後半排ガス循環焼結においても、通常の焼結法と変わらない品質が得られ、排出ガス量も約40 vol%削減できる可能性があることを報告している。

ここで、焼結時間は鍋試験においては点火より排ガスが最高温度を示す点 (BTP: Burn Through Point) までの時間を指すのが一般的で、粉コークス (カーボン) の燃焼がほぼ完了している状態と考えられる。実機プロセスの場合、基本的にはBTPがほぼ、焼結機の機長方向で92%の位置となっており、この時点ではカーボン燃焼が完了していると推察され、この状態を焼結完了、すなわち、点火からこの間の時間を焼結時間と定義すれば生産性等への影響効果に対しては、両者は同等に評価できるものと考えられる。

これらの知見および生産性を考慮すると、酸素富化と排ガス循環の同時組合わせプロセスが生産面、環境面の諸課

平成12年8月31日受付 平成13年1月30日受理 (Received on Aug. 31, 2000; Accepted on Jan. 30, 2001)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 Kokan-cho Fukuyama 721-8510)

* 2 NKK総合材料技術研究所 (現: 鋼管ドラム (株)) (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., now Kokan Drum Co., Ltd.)

題を同時達成する新プロセスとして考えられる。

本研究では、この新プロセスに対し、適切な組み合わせ方法、酸素富化の適正領域および最適な酸素濃度を明らかにすることにより、全系プロセスの構築を図る。

2.2 数学モデルによる検討

酸素富化および排ガス循環を行った場合の酸素濃度変化に対する焼結層内の各種プロセス変数を予測するため、焼結プロセスシミュレーションモデルによる評価を行った。本数学モデルの構成は基本的には既存モデル（以下、初期プロトタイプモデルと称す）^{11,12)}と同様である。ただし、初期プロトタイプモデルでは原料の粒子径は規定されているものの、焼結プロセスの基本となる擬似粒子の概念は考慮されていない。このため本モデルでは、高温場で起こる各種反応現象の単位を擬似粒子と考えている。したがって、焼結ベッド内の粉コークスの燃焼は擬似粒子内部に酸素が拡散していき、ここに存在する粉コークスに着火し、CO₂となって擬似粒子外部へ出ていくといった現象を数学モデルに取り込んだ。石灰石の熱分解反応、マグネタイトの酸化反応についても同様な取り扱いを行った。その模式図をFig. 1に示す。さらに、微分層内のエンタルピー収支に強い影響を及ぼす空隙率については溶融開始温度と溶融完了温度およびそれぞれの温度に対応する最大、最小の空隙率を設定し、この間を固体温度の一次関数と定義した。初期プロトタイプモデルは原料粒子径と粉コークス粒子径を独立に扱い、後者の燃焼反応は化学反応と境膜物質移動を考慮している。これに対し本モデルは、Fig. 1に示すように擬似粒子内の酸素の粒内拡散および微分層内での固気対流伝熱量 ΔQ (W/m³)は、

$$\Delta Q = a_p h_p (T_g - T_s) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $a_p = 6(1 - \epsilon(T)) / (\phi d_p)$: 擬似粒子比表面積(m²/m³)、 h_p : 熱伝達係数(W/(m²・°C))、 T_g : ガス温度(°C)、 T_s : 固体温度(°C)、 $\epsilon(T)$: 溶融反応を考慮した固体温度 T の関数で表される空隙率(-)、 ϕ : 形状係数(-)、 d_p : 擬似粒子径(m)とし、溶融反応に伴う空隙率変化が比表面積に影響を及ぼし、最終的に対流伝熱量が変化することを考慮した。これにより擬似粒子径の大きさによる粉コークスの燃焼速度、ベッド微分層内でのエンタルピー収支が現実に則して評価できると考えられる。また、初期プロトタイプモデルではベッド内の質量速度を一定としてモデルを構築しているが、本モデルでは負圧一定操業条件をシミュレートするため、吸引負圧を一定としてErgunの式¹³⁾により風速を算出する方法を取り入れている。本検討では焼結主排風機吐出側からの排ガスの一部を取り出して焼結機上に循環させ、酸素富化および大気との混合吸引を前提に、ベッド表面上で負圧または正圧とならないようなバランスを想定している。換言すれば、ベッド吸引ガス中の酸素濃度が焼結過程にどのような影響を与えるかを明らかにすることに主眼をおいて負圧

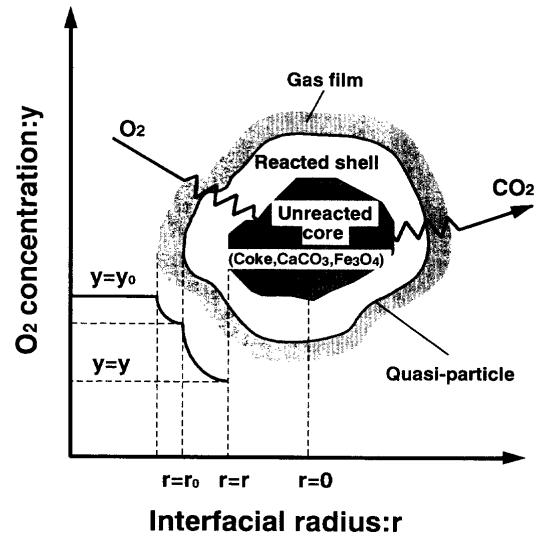


Fig. 1. Mass transfer model in a quasi-particle.

一定下での検討を行った。また、焼結ベッド内の熱履歴はベッド内を通過する風量に、通過風量はベッド内の層空間率に強く依存する。本モデルはこれらを考慮すべく、乾燥帯、湿潤帯、冷却帯の層空間率をそれぞれ独立に設定した。

粉コークスの燃焼に大きな影響を与えるガス等の物性値については、熱伝達係数(h_p)および物質移動係数(k_g)はRanz¹⁴⁾の式、 k_g の計算に必要なガスの粘度(μ)はThodosら¹⁵⁾の式から求めた単一ガスの値をWilke¹⁶⁾の式より多成分系に拡張した。 h_p の計算に必要なガスの熱伝導度は同様にWilke¹⁷⁾の式より求めた。気相中の拡散係数は藤田¹⁸⁾の式より求め、これをWilkeの式より多成分系に拡張した。粉コークスの燃焼反応はHottelら¹⁹⁾の式を用い、Hottelらのモデルでは評価できない粒子内酸素拡散はFig. 1に示した構成とし、擬似粒子径、高密度の影響も考慮した。その他、数学モデル、基礎反応式および数値計算方法などはすべて既報²⁰⁾に従った。なお、今回のシミュレーション計算にあたっては排ガス循環時の酸素濃度の影響推定を主目的とし、循環ガスとしての吹込みガスは酸素濃度のみを変化させることとし、ガス温度、H₂O、CO₂濃度等については考慮していない。また、計算上、点火より最下層部の粉コークス燃焼完了までの時間を便宜的に焼結完了時間と捉え、鍋試験、実機操業との比較検討を行うこととした。本数学モデルを基にしたシミュレーションにより、焼結時間に対する焼結ベッドの深さ方向の温度、粉コークス燃焼率や石灰石の分解率、これに伴うガス組成変化等が得られる。一例として焼結ベッド内の温度分布をFig. 2に示す。同様の表示方法を示す児子らの結果²¹⁾と比較すると冷却速度が遅れ、高温領域が広い点の特徴である。

2.3 シミュレーションによるプロセス評価

2.2の数学モデルを用い、ここでは、特に酸素富化と排ガス循環を組合わせた場合、焼結生産性への影響が大きい

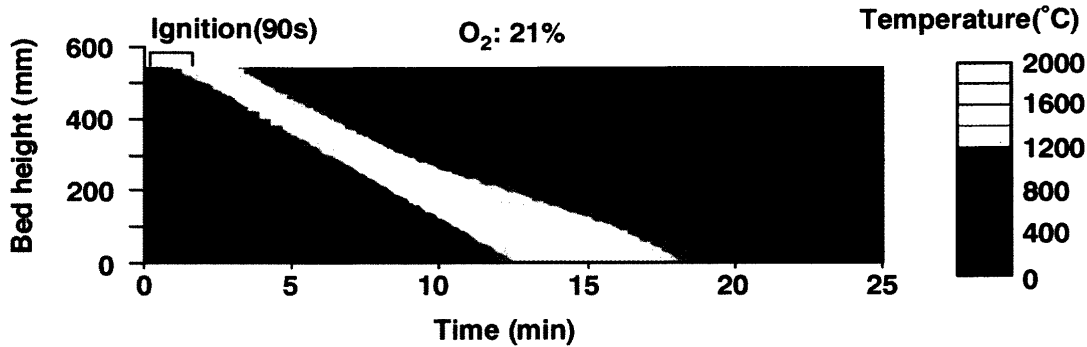
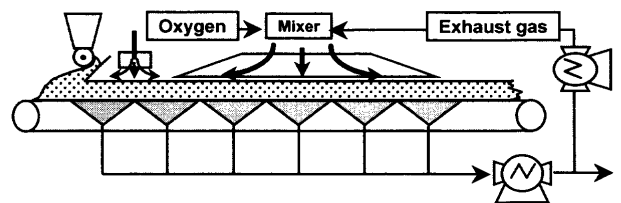


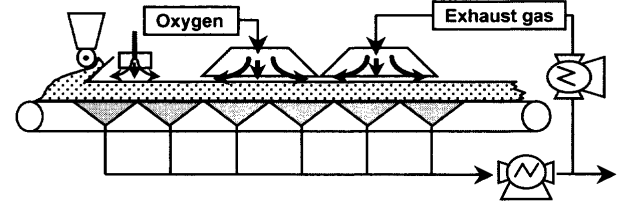
Fig. 2. Temperature distribution in sintering bed evaluated by the simulation model.

粉コークス燃焼速度の観点から最適な酸素吹込み位置、濃度のプロセスの評価を行った。焼結プロセスにおいて酸素富化と排ガス循環を同時に行う方法は種々考えられるが、上述した点を考慮すると基本的な組み合わせは以下に示す3ケースで整理できる。ケース1：循環排ガスに酸素を富化し、吸引ガス中の酸素濃度を大気中の濃度に合致させ、ベッド全領域に均一に吹き込む条件である。この考え方は循環排ガスの酸素濃度を調整してベッド全領域に吹き込むという点でEOSプロセス^{1,2)}の方式と合致するものである。ケース2：排ガスの循環供給と酸素富化をベッド上で独立に行い、ケース1と比較し焼結機前半での焼結速度の改善を意図した。ここでは点火炉後の相対的に前半の部分（以下、前半）に酸素富化を、相対的に後半の部分（以下、後半）に排ガス循環を行うプロセスを想定している。ケース3：ケース2と同様、焼結速度向上を意図した。ただし、ここでは前半に排ガス循環を、後半に酸素富化を行うプロセスを想定している。ケース2とケース3では焼結生産性を意識した場合、燃焼開始初期に酸素富化を行い、焼結初期段階で粉コークスの燃焼速度向上を図る、あるいは一般に燃焼帯が焼結ベッドの下層域に達し、その幅が拡大してくる焼結後期での粉コークスの燃焼速度向上を図るいずれのケースが適正かを予測することを目的とした。これらの焼結プロセスフローをFig. 3に示す。なお、これらの焼結プロセスのシミュレーションにあたっての主要条件は以下のとおりである。焼結ベッド層厚：500mm，吸引負圧：14.7kPa，点火温度/時間：1200°C/90s（点火炉内を想定），擬似粒子径：2.5mmφ，粉コークス添加量：3.0mass%，原料中の石灰石（CaO換算）：9.0mass%，原料初期，限界，平衡水分率：6.0, 1.0, 0mass%，また，ケース2, 3における酸素富化ガスおよび排ガス中の酸素濃度：26, 16vol%，それぞれのガスの吹込み時間：400sとし，通常焼結状態（大気吸引：O₂=21vol%）にてほぼ、中層温度が上昇開始する400s後より吹込み開始した。ここでは、最終排出ガスの一部を循環することを狙いとしているので、想定循環ガス側の酸素濃度は焼結排ガス平均酸素濃度の16vol%（大気組成より-5vol%）とし、また、想定酸

Case 1 : Oxygen and exhaust gas are mixed before injection



Case 2 : Oxygen injection before exhaust gas recycling



Case 3 : Exhaust gas recycling before oxygen injection

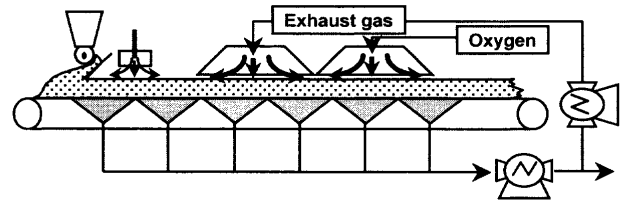


Fig. 3. Typical sintering processes supposing oxygen enrichment and exhaust gas recirculation.

素富化濃度を26vol%（大気組成より+5vol%）と設定した。なお、上、中、下層の温度、排ガス組成等の計算ポイントは各々上面より1/3, 2/3, 3/3（原料層と床敷の境界面）とした。

Fig. 4にこれら3ケースのプロセスシミュレーション結果を示す。Fig. 4のシミュレーション結果より、ベッド各層のヒートパターンから3ケースの間で顕著な差は見られないが、粉コークスの燃焼速度には差が認められる。すなわち、基準となるケース1に比べ、ケース2の粉コークス燃焼速度は速く、酸素富化400sの期間に下層部の粉コークスまで完全に燃焼が完了する。このため、後半に酸素濃度の低い排ガスを吹き込んでも粉コークスの燃焼の遅延には至らない。これに対し、ケース3では後半の酸素富化によって下層部の粉コークスの燃焼速度はケース1, 2に比較

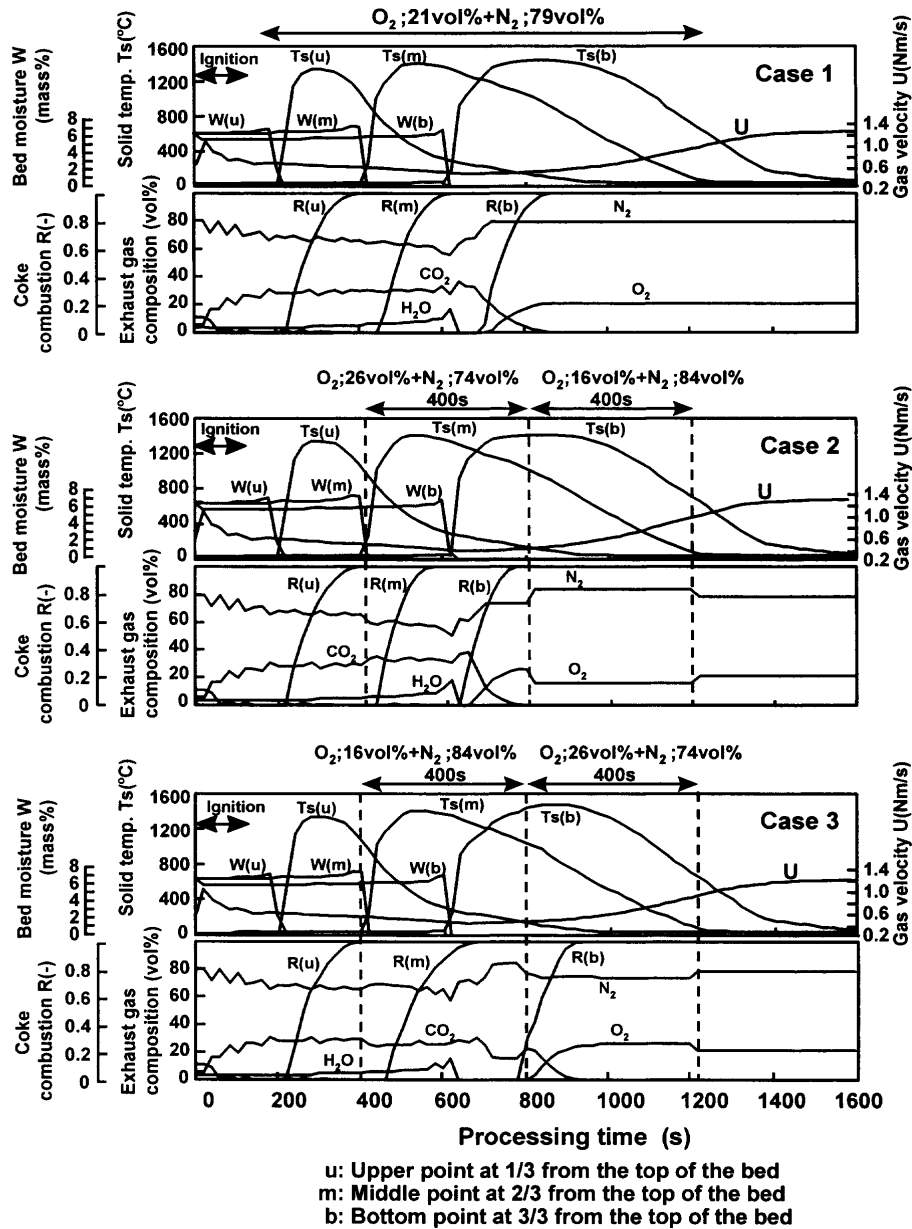


Fig. 4. Simulation results showing influence of injection gas conditions on the sintering process.

し早い。ただし、前半の酸素濃度の低い排ガス吹込みにより上、中層部粉コークスの燃焼が遅れ、結局ベッド全体の粉コークス燃焼速度は遅延する。以上のシミュレーション結果を総合すると、吸引負圧一定下では、ベッド内通過ガス量は前半が少なく、後半が多い。このため、ケース2とケース3を比較した場合、酸素吹込み総量ではケース3の方が多いたことが認められる。それにもかかわらず、前半に酸素富化するケース2の方がコークス燃焼面では効果があることが予想される。

3. 実験によるプロセスの検証

シミュレーションによるケース1~3のプロセス評価によってベッド内各層の粉コークスの燃焼速度は通過ガス中

の酸素濃度に強く依存することを明らかとした。ここでは実験によって酸素濃度の違いにより、焼結プロセスの生産率、シミュレーションでは得られない焼結時間、成品焼結鉄の品質、歩留等を求め、ケース1~3を評価する。

3.1 試験装置と焼成試験条件

Fig. 5に使用した試験装置（ポットグレート炉）を示す。配合原料は福山4号焼結実機使用原料を用い、Table 1にしたがって配合し、ドラムミキサー（内径：600mm、回転数：30rpm）にて混合、造粒各々3minで行い、造粒後水分は約7mass%とした。層厚は450mm、原料装入量は約50kgで床敷鉄の厚さは50mmとし、負圧9.8kPa（一定）で焼成を行った。酸素濃度の変更は点火後、吸引大気中に速やかに予備試験にて把握している焼成風量より計算した所定の酸素（50~200l/min）および窒素（340, 600l/min）を

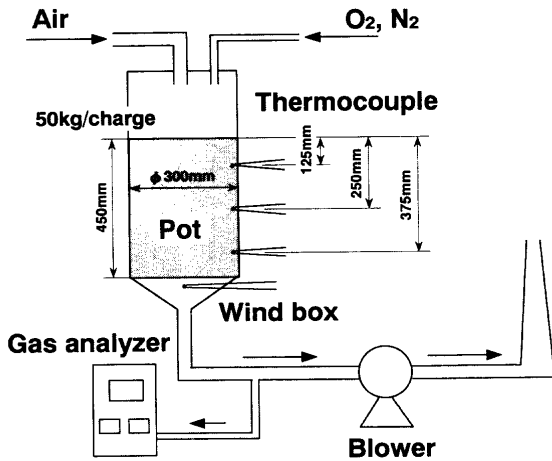


Fig. 5. Experimental apparatus for the sintering test.

Table 1. Raw material conditions of pot tests and target CaO/SiO₂ and SiO₂ of sinter products.

| | | (mass%) |
|---|----------------------|---------|
| Bedding fine | | 89.79 |
| Silica stone | | 0.18 |
| Lime stone | | 7.90 |
| Burnt lime | | 2.12 |
| Return fine | | 12.04 |
| Coke breeze (-1mm) | | 3.39 |
| Target CaO/SiO ₂ and SiO ₂ of sinter products | CaO/SiO ₂ | 2.05 |
| | SiO ₂ | 4.80 |

ポット上部より吹き込んだ。湿分の焼結性への影響については細谷ら²²⁾が指摘しているが、本実験では酸素濃度の影響に主眼をおき湿分の調整は行っていない。吸引ガス中酸素濃度は最終的に各試験における焼成風量と吹込み時間より求めた。焼結層内の温度測定はFig. 5に示すように上下方向に3点およびグレート直下の排ガスについて実施し、排ガス分析は連続式の赤外線式ガス分析計(CO, CO₂)、磁気式酸素計を用いた。実験精度の観点から、Fig. 3に示す3ケースの実験の代わりに吸引ガス中の酸素濃度が焼結プロセスに及ぼす影響を明らかにすることで、ケース1~3のプロセス評価を行った。

3.2 焼成試験結果

吸引ガス中の酸素濃度と焼結諸性状（焼結時間、生産率、歩留、シャッター強度）の関係を図6に示す。Fig. 6より、酸素濃度増加に伴い焼結時間は直線的に減少している。生産率は焼結時間とは負相関となるので酸素濃度増加に伴い、成品焼結鉱+5mm値、+10mm値でのいずれの生産率でもほぼ同様に増加傾向となっている。また、酸素濃度が21 vol% (=大気中酸素濃度) 未満では歩留、シャッター強度共に悪化傾向が見られ、これらの結果は従来の知見^{6,9)}とほぼ一致するものである。一方、酸素濃度が21 vol%以

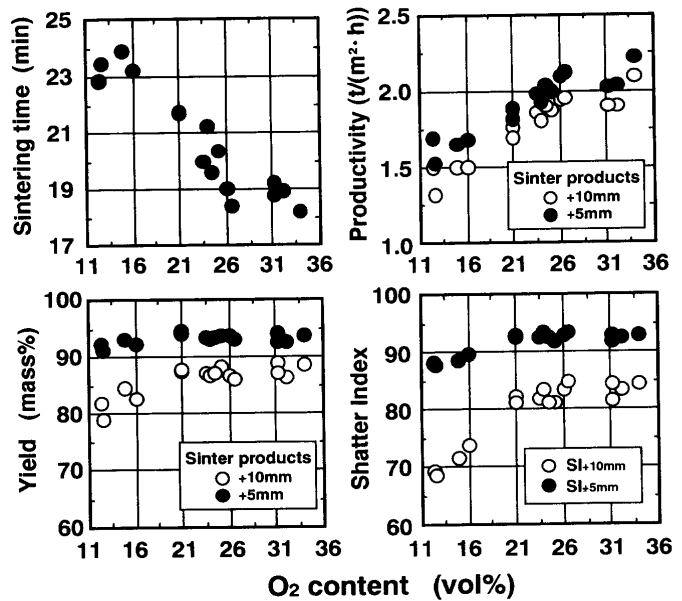


Fig. 6. Effect of O₂ content on characteristics of the sintering process.

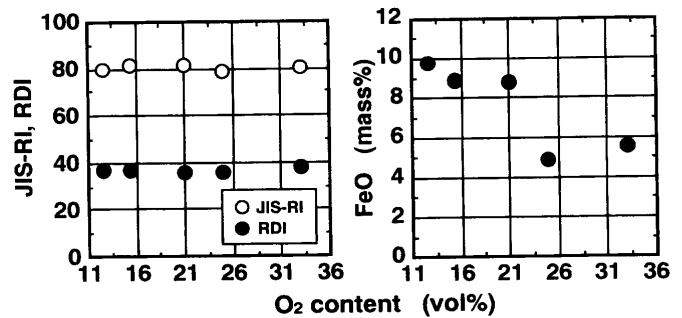


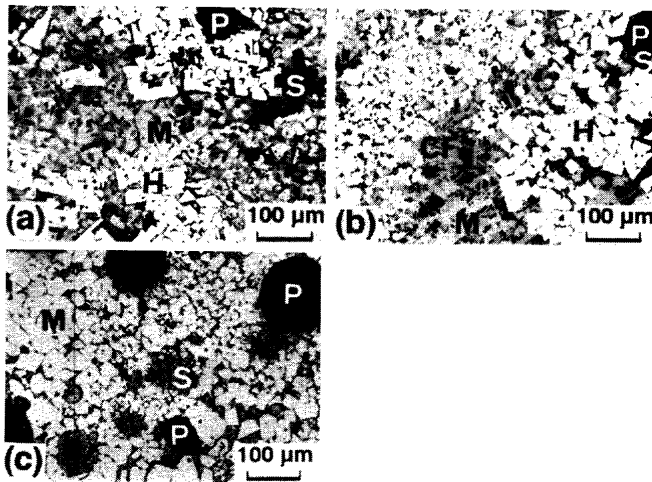
Fig. 7. Influence of O₂ content on JIS-RI, RDI and FeO of sinter products.

上となっても歩留、シャッター強度には変化は見られない。酸素濃度上昇時にコークスの燃焼速度が向上し、これに伴い焼結時間が短縮されることによって歩留や強度悪化と思われる現象は確認されなかった。酸素濃度が成品焼結鉱のJIS-RI, RDIおよびFeOに及ぼす影響をFig. 7に示す。これよりJIS-RI, RDIは、酸素濃度によって変化が認められない。ただし、焼結鉱中FeOについては酸素濃度の増加に従い低下傾向となった。

以上より、酸素富化によって生産率の向上が図られ、当初懸念された品質の悪化は酸素濃度が21 vol%未満の領域以外では認められない。これらの実験結果により、点火炉直後に酸素富化を行い、排ガス循環の前にベッド全体の粉コークスの燃焼を完了させるケース2がケース1, 3と比較して優れることが実験によっても考察された。逆にケース3のように前半に排ガス循環を行う場合、ベッド上、中層部の強度や歩留の悪化が懸念される。

3.3 焼結鉱組織観察結果

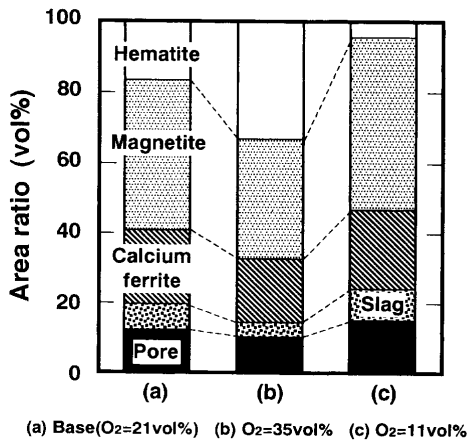
酸素濃度を変化させた場合の焼結鉱組織について顕微鏡による組織観察を行った。試料はいずれもポットテストよ



H:Hematite, M:Magnetite, CF:Calcium ferrite, S:Slag, P:Pore

(a) Base(O₂=21vol%) (b) O₂=35vol% (c) O₂=11vol%

Fig. 8. Effect of O₂ content in injection gas on the exhaust gas composition.



(a) Base(O₂=21vol%) (b) O₂=35vol% (c) O₂=11vol%

Fig. 9. Microstructure of sinter products.

り得られた各焼結ケーキの中層部より採取した。Fig. 8にベース（大気中通常焼結：ケース1に該当し、酸素富化排ガス循環なし）および酸素濃度約35vol%、11vol%条件下（ケース2、3に該当）での焼成試験で得られた焼結鉱のミクロ組織写真を示す。また、同一試料での画像処理装置による組織定量も実施し、この結果をFig. 9に示す。

Fig. 8より、酸素濃度が35 vol%の条件下で焼成した(b)ではベース(a)に比べヘマタイト相が増加しているが、肥大化した2次ヘマタイト粒子はあまり見られず過溶融組織も少ない。(c)では酸素濃度が低下し組織中の酸化鉄がヘマタイトよりマグネタイトに変化しても、そのマグネタイト粒子は高シリカ焼結鉱中に見られる粗大2次ヘマタイトから変化した2次マグネタイト²³⁾に比較し粒径は小さいのが特徴である。

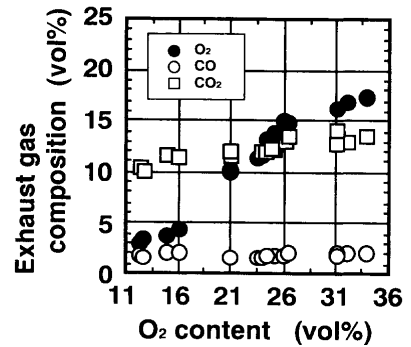


Fig. 10. Mineral composition and porosity of the sinter structures measured by an image analyzer.

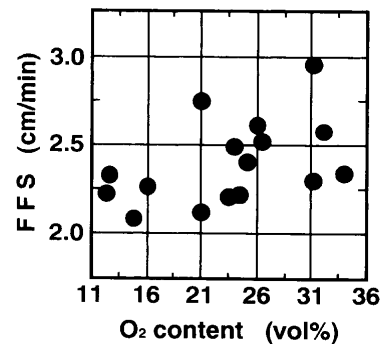


Fig. 11. Effect of O₂ content on Flame Front Speed obtained from the pot tests.

4. 考察

4.1 酸素濃度の粉コークス燃焼性に及ぼす影響

酸素富化時の焼結排ガスの組成分析結果（焼結開始から終了までの平均組成）をFig.10に示す。排ガス中CO濃度は酸素濃度によらずほぼ一定であるが、排ガス中CO₂および酸素(O₂)濃度は共に増加している。ただしその増加割合は、O₂に比較しCO₂は微増に留まっている。最近の事前処理を強化した焼結プロセスでは、焼結ベッド内での粉コークスは単独に存在することは少なく、その大部分はFig. 1に示すように擬似粒子内部に存在する。このため、擬似粒子内粉コークスは着火直後には化学反応律速と擬似粒子外表面境界膜内拡散律速によって燃焼が進行するが、中期以降は擬似粒子内部を酸素が拡散する拡散律速に移行する。このため、酸素富化により酸素濃度を上げてても十分に燃焼せず、Fig.10に示す排ガス中の酸素濃度の上昇に至ったものと推定される。しかし酸素濃度の上昇により、排ガス中のCO₂も上昇しており、粉コークスの燃焼速度向上への寄与は十分認められる。Fig.11に酸素濃度とFFS（Flame Front Speed: 焼結ベッド高さを焼結完了時間すなわち、点火からポットグレート炉直下の排ガス最高温度到達までの時間で除した値で、火炎前面の平均移動速度と定義）の関係を示す。これより、酸素濃度が増加するにしたがってFFSは増加していることが分かる。これは酸素富化により、

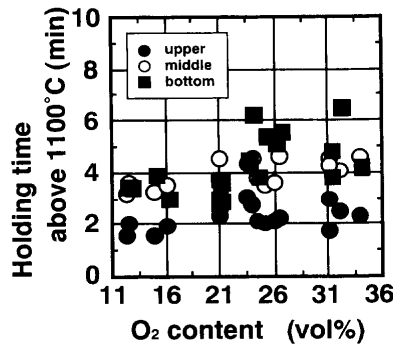


Fig. 12. Effect of O_2 content on the holding time above $1100^\circ C$.

擬似粒子内への拡散ガス中の酸素分圧上昇によって粉コークスの燃焼速度が向上し、その結果、充填層内通気性が大幅に変化しなければ粉コークス着火に必要な熱量供給が図られ、Fig.11に示すようにFFSの上昇につながったと推察される。

以上より、酸素濃度の上昇に見合った酸素の有効利用を図るためには、粉コークス燃焼時に拡散律速段階となる時期を極力遅らせることが望ましく、そのためには例えば、粉コークスを擬似粒子表層部に被覆する方法²⁴⁾が効果があるものと考えられる。また、このような方法を導入することによって、ケース2のプロセスは短時間に粉コークスの燃焼が完了し、焼結速度の向上が期待できる。擬似粒子内の粉コークスの燃焼速度論的観点からは粒内酸素の拡散距離を短縮化することが効果的である。このため、擬似粒子径を小さくすることが対策の一つと考えられるが、この場合はベッドの通気性の悪化につながるため、好ましい方法とは言えない。Fig.12に吸引ガス中の酸素濃度とポット炉内部における高温保持時間の関係を示す。これより酸素濃度が増加するにしたがって $1100^\circ C$ 以上の保持時間が増加し、焼結ベッドの上層、中層、下層となるに従い、その傾向は顕著となることが認められる。これはFig.7に示すように酸素富化では焼結鉍中FeOが低いことから、酸素濃度の上昇により粉コークスの燃焼速度が向上し、擬似粒子内の未燃カーボンが酸化鉄(Fe_2O_3)の直接還元²⁵⁾に寄与するよりも燃焼反応、すなわち、 CO_2 への転換に寄与する割合が大きかったため層内温度が上昇し、結果的に高温保持時間が延長傾向となったと推察される。ただし、その燃焼メカニズムの詳細は今後の検討課題である。

当初、燃焼速度の向上により高温保持時間が短縮し、酸素富化焼結時の焼結鉍品質の低下が懸念されたが、このようにベッド層内の高温保持時間が延長傾向となったため、Fig.6に示したように吸引ガス中の酸素濃度が増加してもシャッター強度、歩留が低下しなかったものと考えられる。

4.2 酸素濃度の焼結鉍組織への影響

Fig.8の組織観察結果から、(b)では粗大2次ヘマタイトと過溶融組織の減少がRDIが悪化しなかった原因の一つと

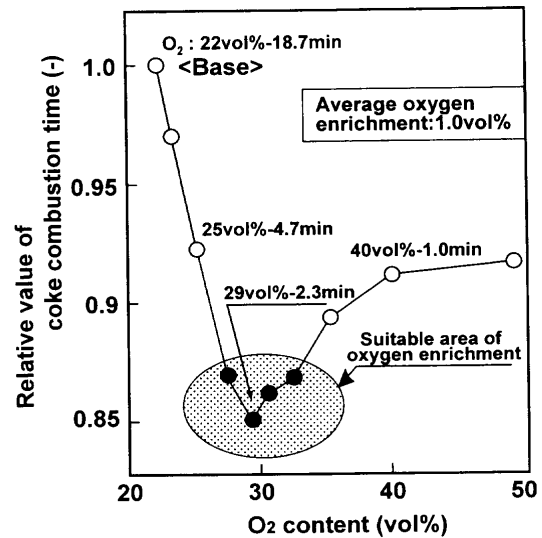


Fig. 13. Comparison of simulation results on coke combustion time under a constant oxygen enrichment condition.

考えられる。また、(c)では組織が全体的に多孔質で、各種鉍物相がスラグマトリックスから晶出した緻密組織とは異なっていることが分かる。これはTable1に示したように、成品焼結鉍中シリカ含有量が5mass%以下と比較的低シリカ傾向となるような原料配合を行ったことに起因していると推察された²⁵⁾。これによりFig.9に示すように、組織中にマグネタイトが相対的に増加しても還元性の悪化には至らず、Fig.8に見られるような多孔質組織が形成されるものと推察できる。この結果より、酸素富化排ガス循環プロセスでは、相対的に融液生成量の少ない低シリカ焼結鉍製造を指向することが品質面から見て優位と考えられる。

4.3 酸素富化の適正化

焼結速度の上昇および高温保持時間の拡大の観点から、ケース2のプロセスの有効性を既に明らかとした。ここでは同一酸素使用量において酸素富化を有効に行わせるため、酸素濃度および酸素吹込み位置の最適化について検証を試みた。2.2の数学モデルにより、点火開始後、90sより最下層部の粉コークス燃焼が完了するまで酸素富化率を大気中濃度に対し、1vol%として焼成を行った場合の計算結果を基準として、この間に吹き込んだ酸素総量を一定とし、吹込み時間を変更して吹き込んだ場合の点火開始90s後から最下層部の粉コークス燃焼が完了するまでの相対的な焼結時間を求めた。この結果をFig.13に示す。なお、シミュレーションの計算条件および下層部の測定ポイント等は2.3と同一である。焼結プロセスは主として粉コークスの燃焼による発熱と常温空気による冷却とから成り立っており、その影響度合いによってヒートパターンが決定される。Fig.13より酸素供給量が一定であっても、その濃度と供給時間によって粉コークスの燃焼速度が異なるため、適正值のあることが予測される。シミュレーションによれば、酸素供給は点火直後(90s後)より酸素富化を行う場合、

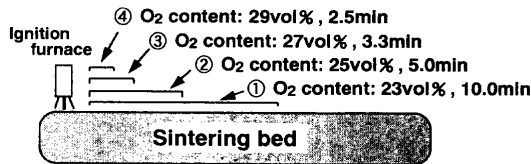


Fig. 14. Pot test conditions under a constant amount of injecting oxygen.

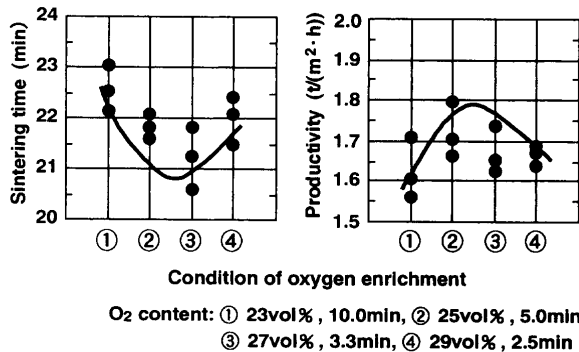


Fig. 15. Influence of oxygen enrichment conditions on the sintering time and productivity at pot test.

酸素供給量の総計が一定なら約30 vol%の酸素濃度を2~3 minで供給することが焼結時間の短縮に効果的であり、それ以上、酸素濃度を上げて吹込み時間を短縮しても効果がなくなることを示している。これを実験的に検討するため、ポット炉を用いた焼成試験を行った。ポットテストでは、焼結の進行が一次元非定常状態のため、実機プロセスにおける酸素富化位置の設定は吹込み時間で調整する、いわゆる位置-時間の単位変換により実施した。実験にあたってはFig.13の結果を参考に、その適正範囲と考えられる領域を設定した。Fig.14に示すような焼結機の機長長さ前半1/2(①)、1/4(②)、1/8(③)、1/16(④)の領域に酸素富化空気を吹き込むことを想定して酸素供給量の総計が一定となるように酸素濃度および酸素吹込み時間を換算して焼成試験を実施した。ポットテストにおける配合原料、造粒・焼成方法は3・1と同一である。Fig.15にFig.14の条件を基に行ったポットテストの結果を示す。これより、焼結機の機長長さ前半部の1/8~1/4の領域に酸素を集中的に供給した状況を仮定した条件が焼結時間、生産率の観点から優れていることが認められた。したがって、実機プロセスを想定すると同一酸素供給量前提では、できる限り点火炉に近い位置で酸素を集中的に供給した場合に焼結時間および生産率が各々、最適値を示す適正条件が存在することが予想された。この実験結果はシミュレーションの推定結果を裏付けるもので、酸素富化排ガス循環プロセスにおける最適酸素供給方法を示唆するものと言える。

5. 結言

高炉への処理鉄配合率維持の観点から、酸素富化排ガス

循環焼結プロセスをシミュレーションによる予測と実験による検討に基づき提言した。得られた成果は以下のとおりである。

(1) 酸素富化排ガス循環プロセスでは、粉コークスの燃焼過程にある前半部に酸素富化、粉コークスの燃焼の完了した後半部に排ガス循環を行う方式がその逆の組合わせあるいは循環排ガスに酸素を富化するプロセスと比較し、焼結鉄の生産面、品質面から有利と推察された。

(2) 供給酸素量が一定であれば、点火直後に集中して供給すると粉コークス燃焼速度の面から焼結時間の短縮に有効な最適条件が存在する。シミュレーションおよび焼成試験結果より適正酸素濃度は約28~30 vol%，添加時間は約2~3 minと推定された。

(3) 焼結過程での酸素濃度変化は特にヘマタイト相とマグネタイト相の比率に大きな影響を及ぼす。焼結鉄中シリカが相対的に低下傾向となると、吸引ガス中の酸素濃度の低下によって組織内にマグネタイト相が増加してもマグネタイトの粒径あるいは多孔質組織によって還元性の悪化は見られない。

文 献

- 1) D.Schlebusch, F.Cappel, J.Otto and H.Weisel: Proc. 6th Int. Symp. on Agglomeration, Soc. Powder Technol., Jpn., ISIJ, and Soc. Chem. Eng., Jpn., Kyoto, (1993), 403.
- 2) J.Rengersen, E.Oosterhuis, W.F.de Boer, T.J.M Veel and J.Otto: *Rev. Metall., Cah. Inf. Tech.*, (1995), 329.
- 3) S.Ikehara, S.Kobo, Y.Terada and J.Sakuragi: Proc. 1st Int. Cong. on Science and Technology of Ironmaking (ICSTI '94), ISIJ, Tokyo, (1994), 659.
- 4) T.Yamada, M.Fukutome, M.Okuyama, T.Kodama, Y.Imai, T.Hirai, K.Kitazawa and M.Haitani: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), S26.
- 5) M.Sawayama, R.Ito, N.Mizoue, A.Nishiguchi, K.Ano and T.Matsumura: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 183.
- 6) K.Tokutake, S.Masunari, R.Ito, K.Hashimoto and K.Shibuta: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), S795.
- 7) M.Haitani, S.Kotake and S.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), S424.
- 8) S.Yasumoto, M.Fukutome, T.Yamada, T.Kodama, A.Tamei, Y.Imai, M.Haitani and K.Kitazawa: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), S483.
- 9) S.Yasumoto, M.Fukutome, T.Yamada, T.Kodama, A.Tamei, Y.Imai, M.Haitani and K.Kitazawa: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), S484.
- 10) S.Yasumoto, M.Fukutome, T.Yamada, T.Kodama, A.Tamei, Y.Imai, M.Haitani and K.Kitazawa: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), S485.
- 11) I.Muchi and J.Higuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **56** (1970), 371.
- 12) T.Tsukamoto, S.Shimada, T.Taguchi and J.Higuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **56** (1970), 661.
- 13) S.Ergun: *Chem. Eng. Prog.*, **48** (1952), 89.
- 14) W.E.Ranz: *Chem. Eng. Prog.*, **48** (1952), 148.
- 15) L.I.Stiel and G.Thodos: *AIChE J.*, **7** (1961), 611.
- 16) C.R.Wilke: *Ind. Eng. Chem.*, **43** (1951), 1641.
- 17) C.R.Wilke: *AIChE J.*, **8** (1962), 221.
- 18) S.Fujita: *Chem. Eng. Jpn.*, **28** (1964), 251.
- 19) A.Parker and H.C.Hottel: *Ind. Eng. Chem.*, **28** (1936), 1334.
- 20) T.Miyashita, N.Sakamoto and H.Fukuyo: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2238.
- 21) S.Nigo, K.Kimura, M.Ichimiya, S.Yasumoto, K.Nakashima and T.Kasahara: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2182.
- 22) Y.Hosotani, M.Fujimoto, N.Konno, T.Okada and J.Shibata: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 293.
- 23) N.Sakamoto, H.Fukuyo, Y.Iwata and T.Miyashita: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 504.
- 24) N.Sakamoto, T.Akashi, H.Noda and K.Takemoto: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 811.
- 25) H.Noda, K.Ichikawa, S.Machida and N.Sakamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 725.