

これらの炉内現象の変化に伴う高炉操業への問題点を図2に示す。高PC比作業時の問題点は図2から2つに絞られる。1つは、炉体熱負荷の上昇による放散熱の増加に伴う燃料比上昇である。2つ目は、炉上部ガス温度が上昇することで炉内ガス速度が増加するための炉上部通気抵抗悪化とO/Cの上昇による塊状帯空隙率の低下や

鉱石昇温還元が遅れによる融着帯の肥大化のために炉中、下部通気抵抗悪化など高炉全体での通気性悪化である。燃料比の上昇や炉内通気性の悪化は高出鉄比作業を要求されている呉の高炉操業ではいずれも高位安定操業を大きく阻害する要因となるため、改善のターゲットとした。

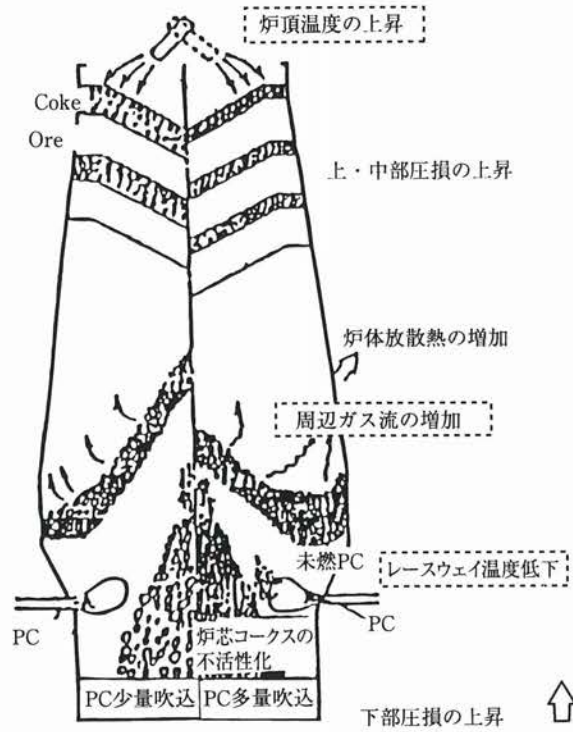


図1 PC比増量時の高炉内現象変化
Fig.1 Transition of phenomena in blast furnace under higher PC ratio

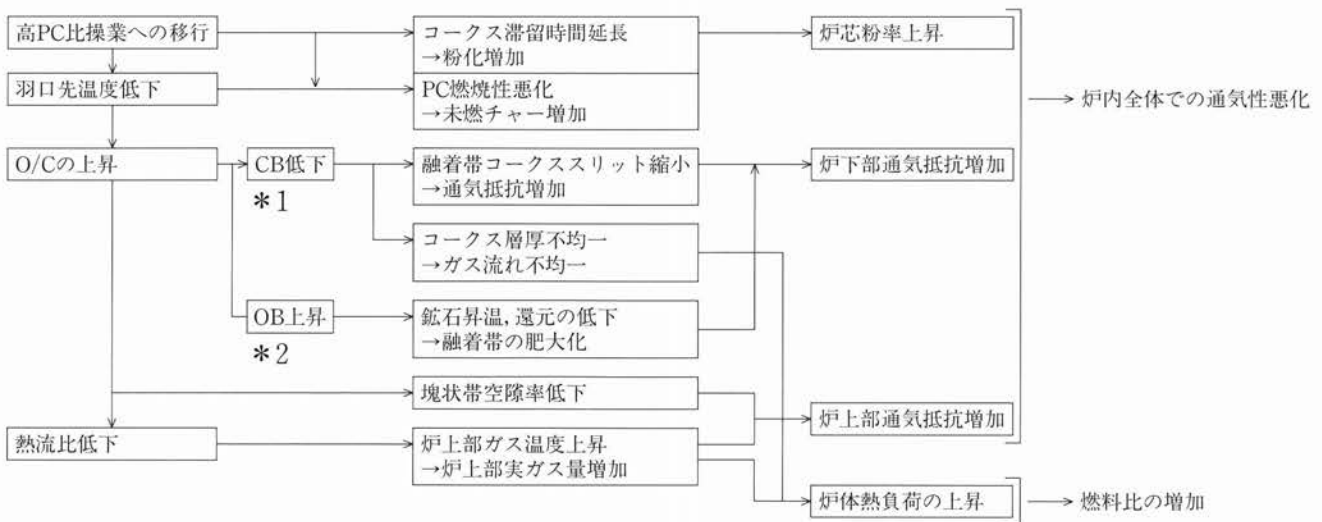


図2 高PC比作業時の問題点
Fig.2 The point of issue under higher PC ratio
*1.Coke Base, *2.Ore Base

3. 呉1高炉の操業実績

図3に呉1高炉の操業実績推移を示す。1995年4月20日の火入れ以来、操業方針の第1目標を出銑量確保として安定操業を目指した。次に第2目標をPCの最大限の積極的な増量とした。PC増量の操業対応として第1ステップは放散熱増加防止対策のための高酸素富化操業の実施、第2ステップは炉底不活性の改善対策として、ペルレス装入パターンの適正化及び鉍石ベース（1チャージに炉内に装入する鉍石重量）上限値管理による装入物分布制御の実施、第3ステップは更なる高出銑比、高PC比操業を目指すために燃料比低減を狙った低風湿操業の実施、第4ステップは原燃料の篩強化による通気性改善である。

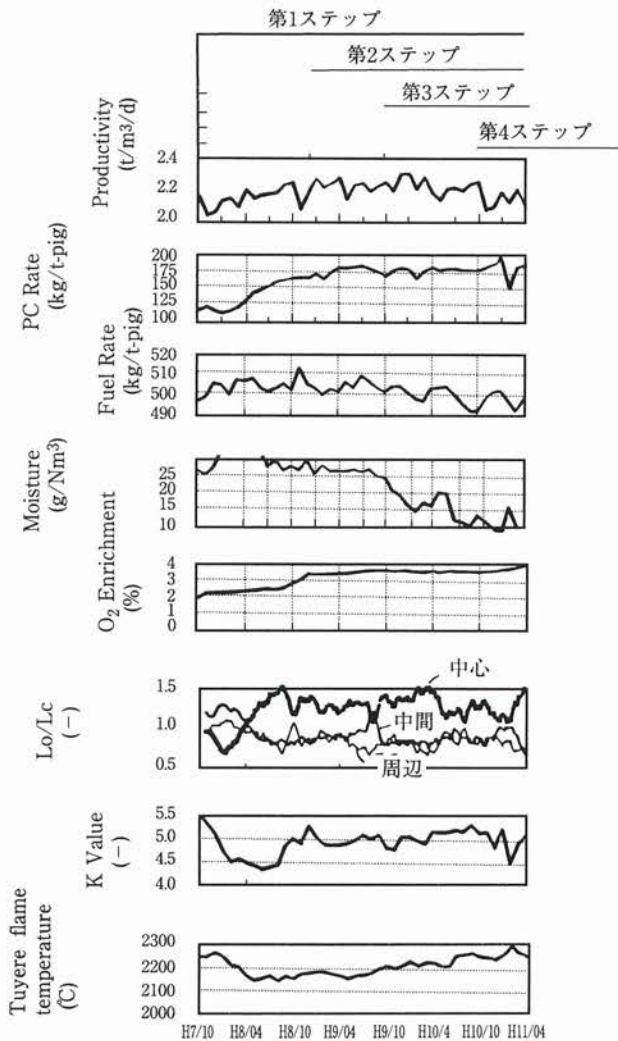


図3 呉1高炉の操業実績
Fig. 3 Transition of operation at Kure No.1 blast furnace

4. 高PC比操業推進時の改善内容の考え方と実施項目

4.1 高酸素富化操業

図4に呉1高炉のPC比と酸素富化率の関係を示す。酸素富化はPC比増量にともなう熱流比の低下を防止しガス流量を低減することで炉体放散熱を低減する目的で実施している。実操業ではPC比160kg/t-pigレベルまでは火入れ立ち上げ期のため熱流比を一定に操業設計した。PC比190kg/t-pigレベルまでは羽口先温度の低下防止のために熱流比上限を0.84まで上昇させた。

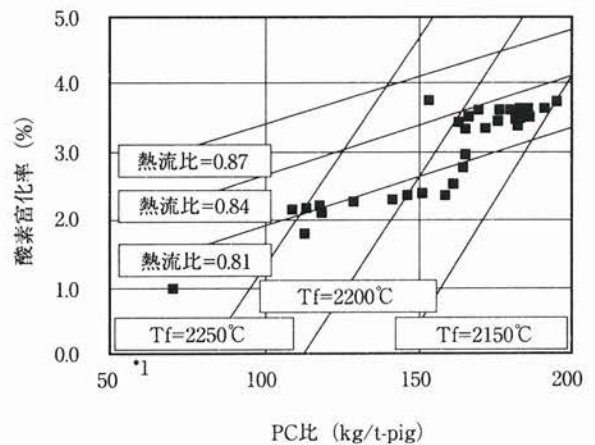


図4 PC比と酸素富化率の関係
Fig. 4 Relation between PC ratio and O₂ enrichment ratio
*1.Tf:羽口先温度

4.2 炉底不活性防止対策

炉底不活性は炉下部の通気性を著しく悪化させるために、高炉の安定操業とPC増量に対して大きな阻害要因となる。炉底不活性に至る高炉内の現象は融着帯の肥大化による炉内還元、昇温遅れにともなう未還元鉍石、未溶解鉍石の炉底への降下と想定している。このために鉍石溶解能力の確保を目的として鉍石層厚と羽口先温度、炉内径方向の鉍石とコークス層厚を検討した。

4.2.1 鉍石層厚の検討

図5に各社の炉腹径と鉍石層厚（鉍石量）の関係を示す²⁾。各高炉ともPC比レベルや燃料比レベルが異なるにも関わらずほぼ同一ライン上に分布していることから、鉍石層厚には上限値が存在すると仮定した。鉍石層厚の上限値は経験的にスリップ指数との関係から決定した。そこで、鉍石量とスリップ指数との関係を調査した。その結果を図6に示す。この結果から鉍石量は65t/CH以

上になるとスリップ発生頻度が増加することが分かった。また、この銹石量とスリップ発生頻度の関係はPC比レベルにより変化することが経験的にわかった。その関係をPC比レベルで整理した結果を図7に示す。実炉操作においては更にコークス層の融着帯でのスリット融着帯

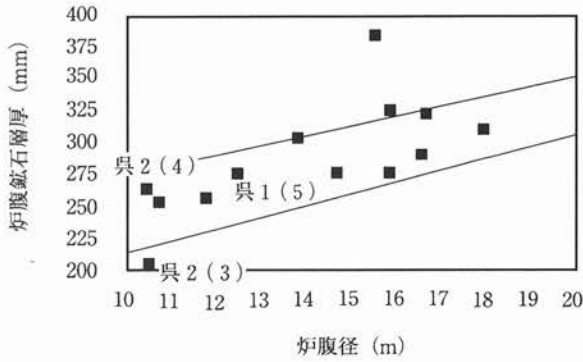


図5 炉腹径と銹石層厚の関係
Fig. 5 Relation between belly diameter and thickness of ore layer

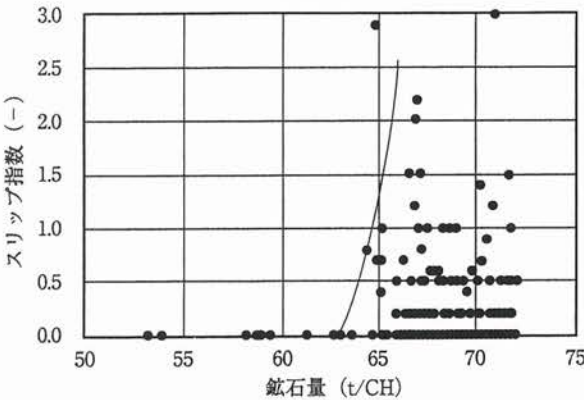


図6 銹石量とスリップ指数の関係
Fig. 6 Relation between ore base and slip index

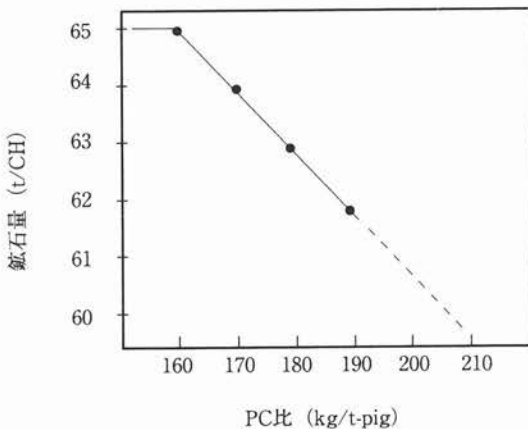


図7 PC比と銹石量の関係
Fig. 7 Relation between PC ratio and ore base

でガスの通路の役割を演じるコークス層としての役割を考慮しコークス層厚の下限値として炉腹コークス層厚190mm以上確保する条件を加えた管理にしている。

4.2.2 装入物分布制御の検討

①炉底活性化のためには炉芯の活性化をおこない、通液性、通気性の確保が重要と考えている。図8に炉芯更新に寄与する炉頂装入コークスの装入領域を示す³⁾。炉芯更新に寄与する炉頂装入コークスの装入領域は(rt)のみである。また、図9に示す模型実験の結果からはコークステラス長さの短尺化により粒度偏析とコークス層崩壊が強化され炉軸心部に粗粒コークスが優先的に供給され、実質的な銹石層厚が低減されることがわかる。さらに、図10に示すように炉底MZ(銹鉄凝固層)厚さに及ぼすPC比とテラス長さの影響からPC比146kg/t-pig以上でテラス長さの長尺化を実施すると、炉底MZ厚が著しく成長する傾向が認められた。これは無次元テラス長さで0.27であり、コークステラス長さでは1.12mとなる。以上のことからコークステラス長さ上限値は1mと設定し、日マプロフィールメーターでの測定結果を調査しコークステラス長さを管理し、炉底の活性化を図ってきた。

②炉内径方向の装入物分布制御

炉内装入物分布形状の管理指標として銹石層厚(Lo)とコークス層厚(Lc)の比を使用している。周辺部、中間部、中心部の3領域にわけ各領域のLo/Lcと全体のLo/Lcの比を相対Lo/Lcとして指標化した。この装入物分布形状の管理指標と高炉操作指標の関係を図11、図12に示す。

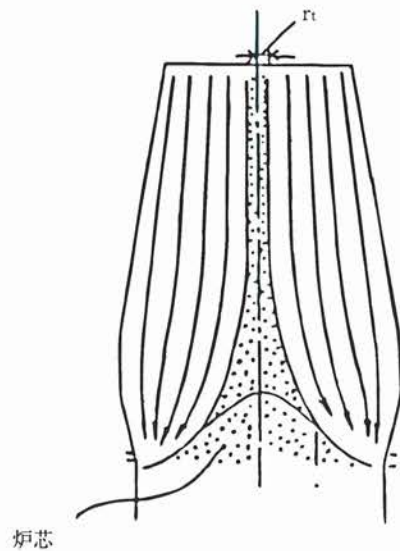


図8 炉芯更新に寄与する炉頂装入コークスの装入領域
Fig. 8 Flow of charged coke to the dead man

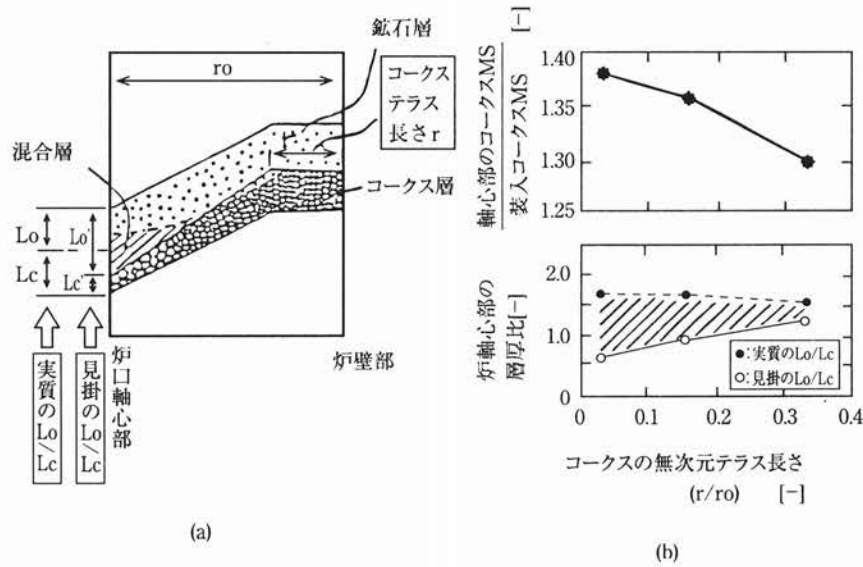


図9 模型実験の結果
Fig. 9 Results of model experiment

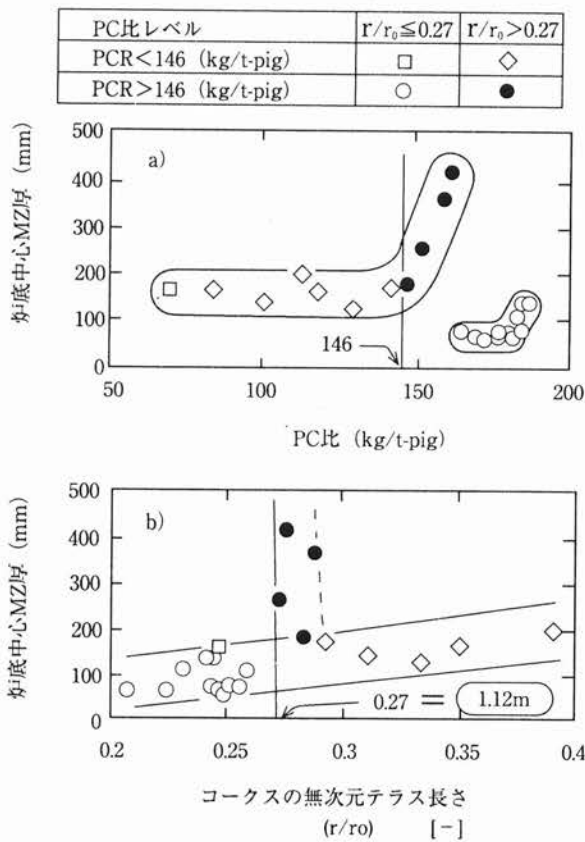


図10 炉底MZ厚さに及ぼすPC比とテラス長さの影響
Fig.10 Effect of PC ratio and terrace length on thickness of solidified layer

スリップ指数 = $-20.6 + 27.7 \times$ 炉周辺部の相対Lo/Lc
(相関係数 = 0.776)

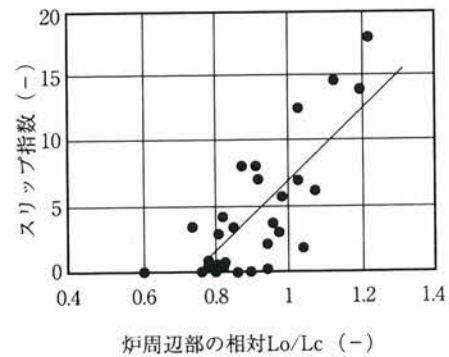


図11 スリップ指数に及ぼす周辺相対Lo/Lcの影響
Fig.11 Effect of relative Lo/Lc on slip index

炉体抜熱量 = $-3.07 + 13.4 \times$ 炉中間部の相対Lo/Lc
(相関係数 = 0.873)

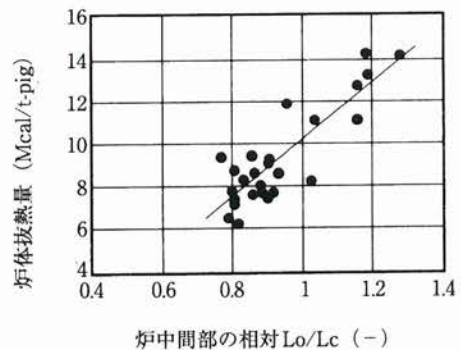


図12 炉体抜熱に及ぼす中間相対Lo/Lcの影響
Fig.12 Effect of relative Lo/Lc on stove heat load

図11はスリップ指数に及ぼす周辺Lo/Lcの影響を示す。両者の関係は相関が高く、スリップは炉壁のO/C増加時に多発している。図12は炉体抜熱量に及ぼす中間Lo/Lcの影響を示す。中間部のO/C増加に伴って炉体抜熱量が増大する傾向がわかった。メカニズムは不明であるが周辺部のO/Cと炉体抜熱量の関係よりも、中間部との相関は非常に高く、抜熱は中間部の装入物分布制御でほぼ決定される。以上のことから、装入物分布形状の管理値を決定し良好な結果を得た。

4.3 低風湿操作

2高炉の炉寿命延長を図るため操業度を下げたために、1高炉は高PC比操業下で更なる高出鉄比操業の実施が必要となったために、操業度アップの方策として、低燃料比操業を指向した。具体的方法は低風湿操作の実施である。この時の操業解析結果から送風湿度と燃料比の関係は送風湿度1g/Nm³減で燃料比0.86kg/t-pig減が得られた。図13に操業解析表を示す。

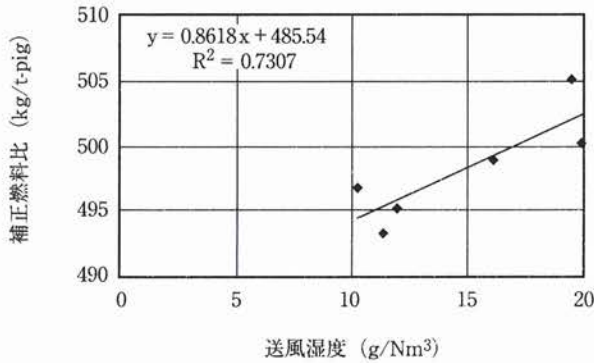


図13 低風湿操作時の燃料比解析
Fig.13 Analysis of operation with lower blowing moisture

4.4 炉内通気性改善

1高炉でのPC増量のネックは炉内通気性であると考えている。図14にPC比と炉内通気性指数⁴⁾(数値が大きい方が通気性は悪いことを示す)の関係を示す。図14からも呉1高炉は他の高PC比操業を実施している高炉に比べ炉内通気性が悪いことがわかる。その原因は鉱石庫の庫下篩能力不足のため炉内装入粉が多いことである。図15に炉内装入原料中の-5mm粉量割合の比較を示す。図15から国内高炉の中では呉1高炉が最も-5mm粉量割合が大きいことがわかる。そこで、庫下篩の篩能力改善を実施した。改善方法は図16に示すように原料切出しゲートの水平方向縮小である。この方法により篩への原料切出し速度を低減し篩効率を向上させた。従来の高さ方向のゲート開度縮小では原料詰まりが発生し、ゲート

を戻すために篩効率の向上はできなかったが今回の水平方向のゲート開度縮小は開口面積が確保され原料切出し詰まりが防止でき、かつ原料切出し速度を低減できたために篩効率の向上ができた。図17に篩効率改善効果を示す。

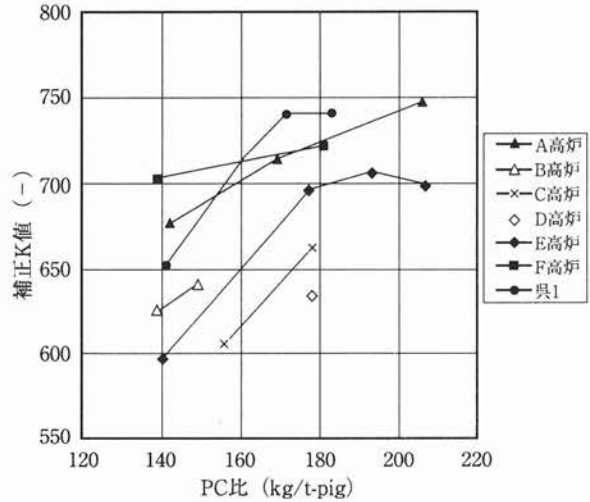


図14 PC比と炉内通気性指数の関係
Fig.14 Relation between PC ratio and permeability in blast furnace

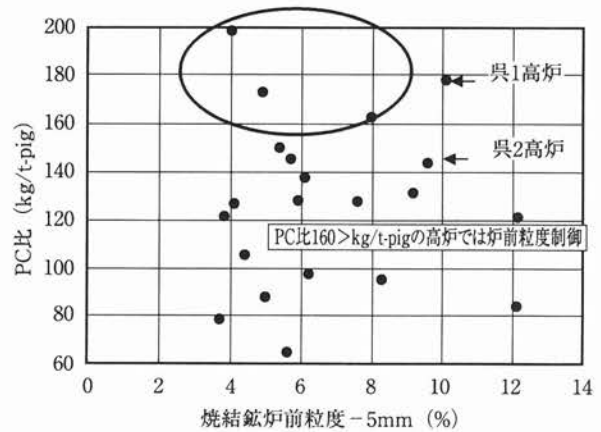


図15 炉内装入原料中の-5mm粉量割合
Fig.15 Quantity of -5mm fine in the raw materials

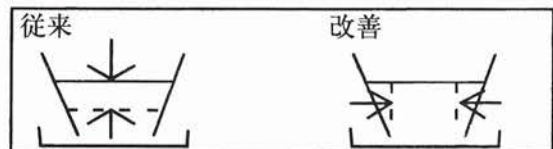


図16 庫下篩ゲート絞り方法
Fig.16 The method of narrowing gate

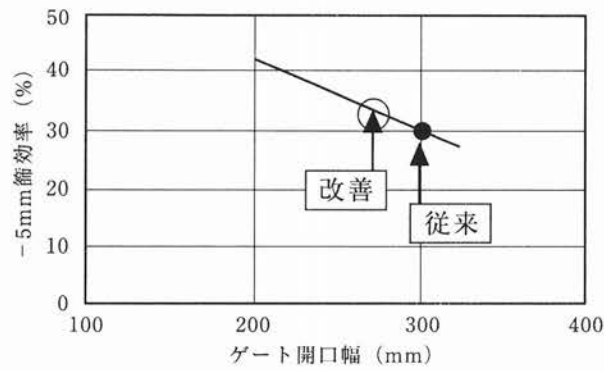


図17 ゲート開口幅と篩効率の関係

Fig.17 Relation between gate width and efficiency of sieve

5. 結 言

呉1高炉では鉄源安定供給とコスト低減のために高出銑比、高PC比操業を以下の方法で実施できた。

- (1) 高酸素富化操業の実施
- (2) 炉底不活性化防止のための鉍石ベース上限値管理、
コークステラス長さの管理、炉内径方向の鉍石、
コークス層厚比管理
- (3) 燃料比低減のための送風湿度低減
- (4) 炉内通気性改善のための庫下ゲート開度縮小による
炉内装入粉低減

参考文献

- 1) 重見彰利：製鉄ハンドブック(1979), p.190 [地人書館]
- 2) 石井ら：学振54委, 高炉内微粉炭燃焼研究会報告書(平成9年7月), p.166
- 3) 清水正賢：鉄と鋼,73(1987), S754
- 4) 第3版鉄鋼便覧III(日本鉄鋼協会編), (1980), p219 [丸善]