

高炉低還元材比操業に向けた周辺流制御と 原材料品質設計

佐藤 健*・佐藤 道貴*・武田 幹治*・有山 達郎*²

Control of Peripheral Gas Flow and Design of Burden Quality for Low Reducing Agent Rate Operation of Blast Furnace

Takeshi SATO, Michitaka SATO, Kanji TAKEDA and Tatsuro ARIYAMA

Synopsis : Concepts and targets of operational conditions and burden qualities for reduction of exhaust carbon dioxide (CO_2) are discussed with consideration of an energy balance at Steel works. Lowering a reducing agent rate (RAR) with reduction of a heat loss and increase in a shaft efficiency is desirable measures to decrease in the exhaust CO_2 . Suppressed gas flow at a peripheral part of furnace contributes to improvement of both heat loss and shaft efficiency, however, promoted gas flow at that part is necessary for a stable state of gas permeability with low quality burden against degradation behavior. To apply for the operational design, effects of sinter RDI and coke TI on the RAR and exhaust CO_2 through the changes in peripheral gas flow are clarified on the basis of analyses of the operational results and simulations by using of the mathematical model. For example, improvement with -10.4% of RDI and 0.69% of TI contributes the reduction of RAR by 10 kg/t through changes of heat loss by 78.3 MJ/t and shaft efficiency by 0.014 .

Key words: blast furnace; reducing agent rate; carbon dioxide; heat loss; shaft efficiency; peripheral gas flow; RDI; TI.

1. 緒言

今後の製鉄業においては地球温暖化に代表される環境問題への対応が必須であり、排出 CO_2 の削減、換言すれば炭材および炭素含有燃料の使用量削減は重大な課題である。製鉄所へインプットされる炭材は主に石炭であり、コークス製造工程および高炉への直接吹き込みを経て高炉の還元材として機能するとともに、副生ガス（コークス炉ガスおよび高炉ガス）として発電設備や圧延工程の加熱炉等、製鉄所のエネルギー源として利用される。すなわち、製鉄工程は銑鉄製造に加え、製鉄所におけるエネルギー供給基地としての役割を果たしていると言える。当社では製鉄所毎のエネルギー事情を勘案し、所全体としてのコストミニマムを追求して高炉還元材比を設定してきた。その結果、状況によっては高還元材比操業が指向され、それに符合して装入物スペック緩和が実施されてきた。今後は CO_2 排出量削減への要請を背景として高炉の還元材比低減が要求されると考えられる。この際、製鉄工程の持つエネルギー供給機能を勘案した操業諸元を設定する必要がある、装入物品質を含めた適正な操業設計が要求される。

本稿では CO_2 排出量削減に向けた望ましい還元材比低下方策を製鉄所のエネルギー収支に基づいて検討し、ヒートロス低減とシャフト効率向上が有効な手段であることを示した。次に、これらを律束する要因として径方向のガス分

布に焦点を当て、操業解析並びに数学モデルを用いて装入物品質（焼結RDI、コークスTI）がガス分布並びに還元材比に及ぼす影響を定量化した。

2. 還元材比低下手段と CO_2 排出の関係

還元材比低減の主要な手段としては、1) 入熱量の増加（送風温度上昇）、2) 出熱量の低下（ヒートロス低減）、3) 還元効率の向上（シャフト効率向上）、4) 還元平衡点の操作（熱保存帯温度低下）が挙げられる。いずれも還元材比低減という目的に対しては有効な手段であるが、製鉄所からの CO_2 排出量削減を議論する際には製鉄部門が有する下工程へのエネルギー供給機能を考慮する必要がある。Fig. 1は製鉄所のカーボン収支を表している。製鉄工程に主に石炭としてインプットされたカーボン(X)はコークスおよびコークス炉ガス、高炉ガスに変換され、焼結工程の凝結材の燃焼やコークス炉、熱風炉等の加熱(Y_1)に使用される他、製鉄工程に必要な酸素・電力をまかなうためのガス燃焼(Y_2)で消費される。よって残りが圧延工場等の下工程で利用され得るカーボン量(P)となる。高炉還元材比の低下に応じてPで示される供給エネルギーが減少した場合、その分別途エネルギーを補填する必要性が生じ(E)、製鉄所からの排出 CO_2 としてはそれを加算したもの($Y+Q$)を評価する必要がある。Pは還元材比低下方策に影響を受

平成18年4月28日受付 平成18年6月26日受理 (Received on Apr. 28, 2006; Accepted on June 26, 2006)

* JFEスチール (株) スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama 721-8510)

* 2 JFEスチール (株) スチール研究所 (現: 東北大学) (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, now Tohoku University)

けるため、製鉄所からのCO₂排出量は高炉還元材比では一義的に決定されない。

上記の関係を定量的に評価するため、リストモデルを核とした製鉄所からのCO₂排出予測モデルを構築した¹⁾。概要は、高炉操業諸元と併せてコークス炉ガス、高炉ガス(副生ガス)の発生量およびそのカロリー、並びにコークス炉や熱風炉等での副生ガスの消費量から製鉄工程のエネルギー収支を算出し、下工程へ供給可能な副生ガスのエネルギーを予測するものである。排出CO₂に関しては、Fig. 1に基づき製鉄へのインプットカーボンと、供給エネルギーの変化に応じた補填エネルギー(本検討では重油を想定)に由来するカーボン量との合算値から算出する。各種手段でコークス比を10kg/t低下させた際の製鉄からの供給エネルギーおよび製鉄所からのCO₂排出量の変化をFig. 2に示す。いずれの手段においてもコークス比10kg/tの削減は製鉄へのインプットカーボン約10kg/t減に相当するが、製鉄工程が下工程へ供給するエネルギーに関しては差が生じ、送風温度上昇のケースはヒートロス低減やシャフト効率向上に比べて低下量大きい。これは、熱風炉の消費エ

ネルギー増加により製鉄工程内における副生ガス消費が増加するためである。一方、ヒートロス低減は製鉄プロセスにおける省エネルギーであり、還元材比低下に伴う下工程への供給エネルギー減少が抑制される。従って、同一の高炉還元材比削減量を指向してもその手段により製鉄所からの排出CO₂量には差が生じ、下工程で消費されるエネルギーが不変の場合には供給エネルギー減が大きいケースほど別途補填すべきエネルギーが増加するためCO₂削減効果が小さい。今後のCO₂削減に向けた高炉還元材比低下手段としてはヒートロス低減が望ましく、次いでシャフト効率の向上や熱保存帯の低下を図るべきであろう。以下では、ヒートロスとシャフト効率を律束する要因としてガス分布に焦点を当て、操業解析並びに数学モデルを用いて、その改善方策について検討した。なお、高炉還元材比低減時の下工程への供給エネルギー不足を容認できるならば(Fig. 2の補填無しの場合)、製鉄所排出CO₂は製鉄へのインプットカーボンと同義となり、いずれの還元材比低減手段においてもCO₂削減効果は同等であり、かつその削減量もエネルギー補填が不要な分、大きくなる。CO₂削減を効果的に推進するためには、還元材比低減と並行して下工程の省エネ化が重要である。

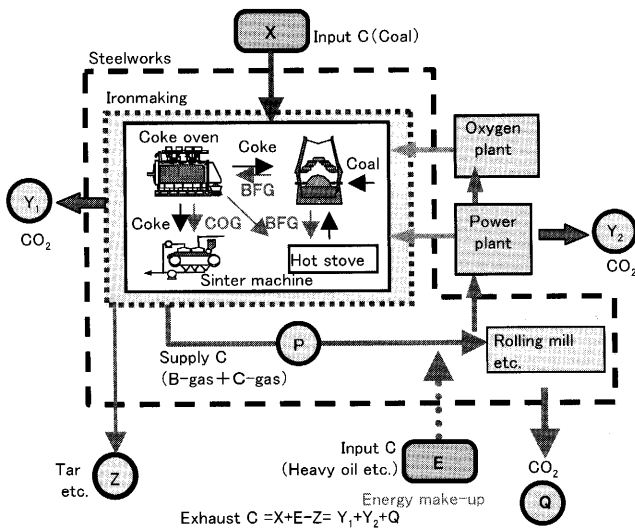


Fig. 1. Carbon balance in Steelworks.

3. ヒートロスに及ぼす影響因子

前章で述べたヒートロスとはプロセス帯の計算熱損失を指すが、操業において監視、管理しているのは炉体冷却水からの抜熱量である。Fig. 3に倉敷第3高炉(3次)におけるボッシュ部~シャフト部のステーブ抜熱量測定値と、熱収支から算出したプロセス帯のヒートロス(熱保存帯温度を950°Cと仮定)の関係を示す。出鉄比1.6~2.38(t/d/m³)、還元材比480~517(kg/t)の範囲にある月平均データを解析対象とした。熱収支上のヒートロスは炉体抜熱と相関が強いことがわかる。以降、本稿におけるヒートロスとはプロセス帯の熱収支から算出したものを指すが、その概念は羽口より上方の炉体抜熱と同義として扱う。

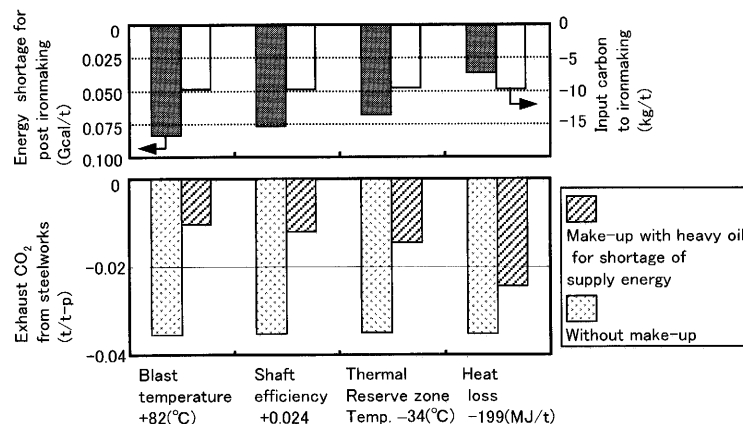


Fig. 2. Changes in exhaust CO₂ from Steelworks with decrease in RAR by 10 kg/t.

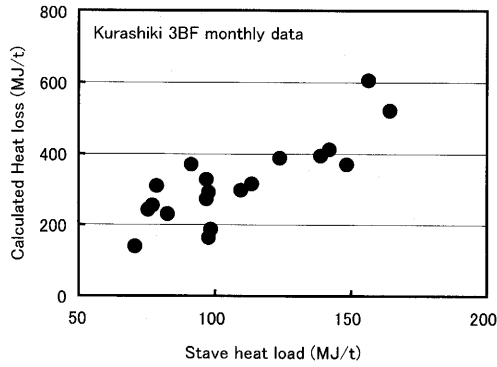


Fig. 3. Relation between measured stove heat load and calculated heat loss.

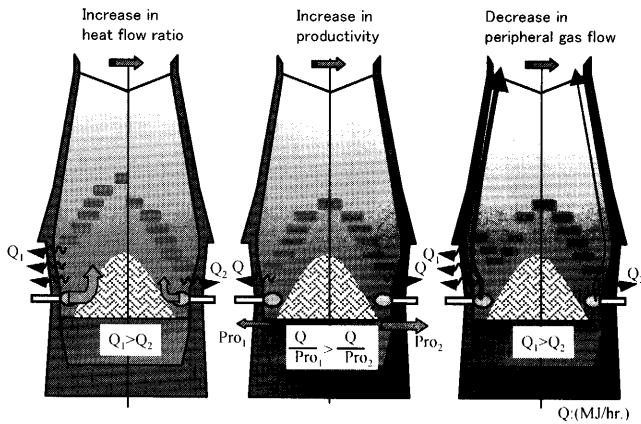


Fig. 4. Concepts of operational variation for lowering heat loss.

Fig. 4にヒートロス低減に向けた操業変化の考えを示した。出鉄量一定条件における炉内通過ガス量の減少（熱流比増）や、炉内温度プロファイルを維持した上での出鉄量の増加により単位溶鉄当たりのヒートロスは減少すると考えられるが、これらは低ヒートロス達成の手段というより、所定の操業が達成された場合の結果としてヒートロスが低位になるという解釈が妥当であろう。加えて、出鉄量等は生産計画に基づいて設定されるものであり、操業改善のための操作因子とはなり難い。一方、半径方向のガス分布に関しては、周辺流を抑制して炉体抜熱を低減すれば低ヒートロスが達成できると考えられ、主たる操業改善方策となると考えられる。

次に、実操業データを用いて、周辺流とヒートロスの関係を解析した。周辺ガス流の相対的な強度を現す指標として、Fig. 5に示すように、シャフトゾンデで測定される半径方向各位置の η_{CO} について無次元半径0.3~0.7の領域における最大値と、周辺部（無次元半径1.0）との差を周辺ガス流指数として定義した（以下、 $\Delta\eta_{CO}$ ）。この値が大きいほど相対的に周辺部を流れるガス量が多いことを示す。倉敷第4高炉（2次）の月平均データ（出鉄比1.6~2.1 (t/d/m³), 還元材比497~543 (kg/t))の解析より得られた熱流比とヒートロスの関係をFig. 6に、同等の熱流比条件にお

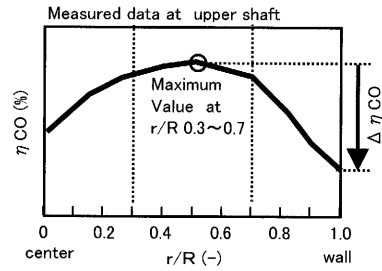


Fig. 5. Definition of peripheral gas flow index.

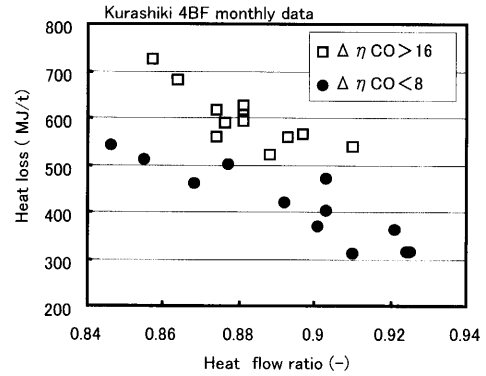


Fig. 6. Relation between heat flow ratio and Heat loss.

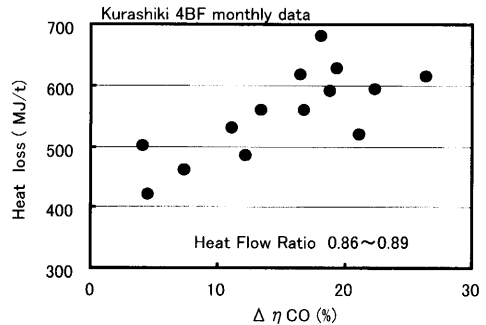


Fig. 7. Relation between $\Delta\eta_{CO}$ and Heat loss.

ける $\Delta\eta_{CO}$ とヒートロスの関係をFig. 7に示す。ヒートロスは大局的には熱流比に依存するが、同等の熱流比であれば、 $\Delta\eta_{CO}$ が大きいほどヒートロスが高くなる傾向が認められる。従って周辺流を抑制すればヒートロス低減が図れるのは明らかであるが、実際は操業安定性を重視して意図的に周辺流を増加させ、結果として高ヒートロス条件で操業する場合がある。この理由は後述する。

4. シャフト効率に及ぼす影響因子

シャフト効率を向上させる手段としては、原料の被還元性の改善と、還元ガスと原料の接触時間の増加が有効である。後者に影響を及ぼす因子としてはガス、原料の炉内滞留時間に加えて還元ガスの半径方向の流量偏差が挙げられる。ガスおよび装入物の滞留時間に影響を与える主な高炉操業条件は出鉄量、送風量、炉頂圧であるが、これらは生

産計画に基づく設定値または設備能力であるため、シャフト効率改善を主目的とした操作因子とはなり難い。これに対し、径方向のガス量偏差抑制は、前章で述べたヒートロスの場合と同様、シャフト効率向上に向けた主たる操業改善方策となろう。以上を踏まえ、操業実績からガス分布とシャフト効率の関係を導出した。まず、高炉操業シミュレーター²⁾を用いてシャフトガス速度、原料の炉内滞留時間がシャフト効率に及ぼす影響として以下の係数を得た。

$$\eta/\theta = 3.4 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta/V_s = -8.2 \times 10^{-2} \dots\dots\dots (2)$$

η : シャフト効率(-), θ : 平均装入物降下時間(h),
 V_s : シャフトガス速度(m/s)

これらは還元材比一定条件で出銑比 1.6, 2.0, 2.4 (t/d/m³) および炉頂圧力 220, 240, 260, 280 (kPa) の条件で計算を行い、得られたシャフト効率に対しシャフトガス速度および平均装入物降下時間³⁾で重回帰分析を行うことにより決定した。

次に、前章で用いた倉敷第4高炉のデータからリストモデルを用いて算出したシャフト効率を上記の影響係数を用いて平均装入物降下時間 9 (h)、シャフトガス速度 1.25 (m/s) の条件に補正した値と、 $\Delta\eta_{CO}$ との関係を図 8 に示した。ここで、原料の被還元性の影響が現れないようにするために処理鉱比を 82~84% に限定したデータを採用した。高 $\Delta\eta_{CO}$ 、すなわち相対的に周辺ガス流が強い条件ではシャフト効率が低下しており、周辺ガス流の抑制、すなわちガス分布の径方向偏差の縮小がガスの利用効率改善に有効であることがわかる。しかしながら、前章で述べたように、周辺ガス流の強化は操業安定性追求の結果であり、シャフト効率の大小はその結果として生じたものと考えられる。

5. 装入物品質とガス分布の関係

5.1 ガス分布と圧力損失

3章および4章で強周辺流のガス分布がヒートロス、シャフト効率双方の悪化要因となることを示したが、実際の操業においては通気性の改善を目的として意図的に周辺流強化を指向する場合がある³⁻⁵⁾。以下に周辺流を操作する理由について考察した。Fig. 9に、炉断面を面積で中心、中間、周辺に3等分した際の各領域のガス分配比と等圧力損失線の関係を示す。これは、任意に設定した鉱石層厚比分布において、充填層中の半径方向の圧力勾配=0を満たす条件にガス量が分配された際のシャフト部の圧力損失をエルガン式より算出したものである。径方向のガス分布偏差が0になる点を頂点とした等圧力損失線が描け、本図上の通気性改善という意味では、中心流強化と周辺流強化で

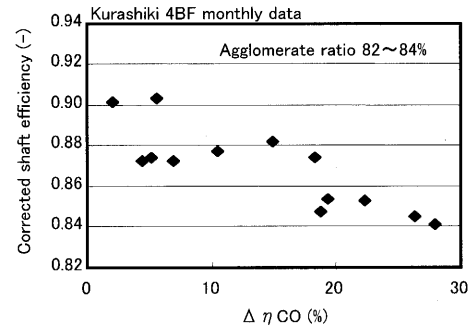


Fig. 8. Relation between $\Delta\eta_{CO}$ and Shaft efficiency.

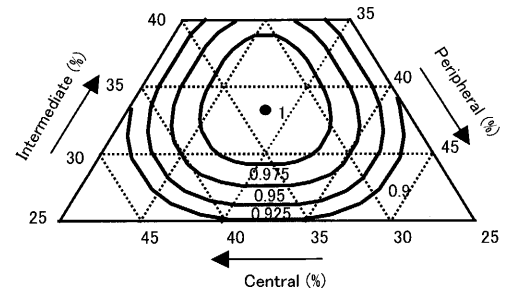


Fig. 9. Relation between radial gas flow distribution and contour lines of relative pressure drop.

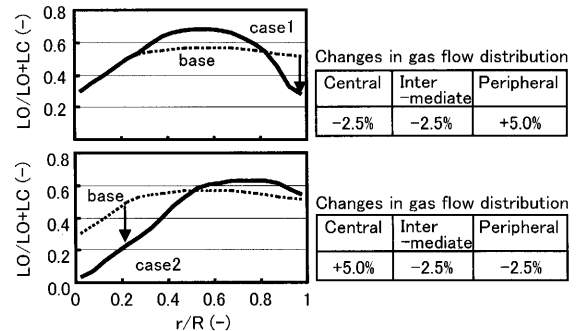


Fig. 10. Changes of layer thickness distribution and gas flow distribution.

効果に差は無い。一方、各領域は等断面積で分割しているため、無次元半径長さでは中心領域は0~0.577、周辺領域は0.816~1と3倍強の違いがあり、実際に分布制御を実施する場合には、その操作範囲を勘案すると周辺流の操作の方が容易である。Fig.10にベース条件に対して、周辺流5%増加(case 1)、中心流5%増加(case 2)に相当するように鉱石層厚比分布を変更した計算例を示す。中心流を増加させるケースでは、半径方向全域において鉱石層厚比の調整が必要であり、大幅な分布制御の変更（ベルレスパターンやムーバブルアーモアの設定変更）が必要であることがわかる。

なお、一般の装入物分布制御においては炉中心部が最も低くなるような斜面の形成をベースにしているために中間部をメインとした層厚制御は困難であり、中間流アップによる通気改善は採用し難い。以上の考察より通気性改善手

段としては周辺流の制御が優先的に選択されるという前提に基づき、以降、装入物性状と周辺流の関係を解析する。

5.2 焼結鉱還元粉化性

炉内に装入された焼結鉱は、500~700°C付近の還元により粉化することが知られており、その指標としてRDIが用いられている。RDI悪化時にはシャフト部で通気性が悪化し⁶⁾、高炉操業における対応としては周辺流の強化が報告されている⁷⁾。高微粉炭比操業においては熱流比の低下により前出の還元粉化領域が縮小するため、RDIの管理値は緩和傾向にあるが⁸⁾、一方で周辺流抑制条件では低熱流比条件でも高RDI時に通気性の変動が顕著になった事例も存在する⁹⁾。これらの事象を、操業データを用いて整理した。Fig.11に倉敷第3高炉(3次)および倉敷第4高炉(3次)におけるRDIと $\Delta\eta_{CO}$ および通気変動の関係を示す(出鉄比1.95~2.4 (t/d/m³), 還元材比474~506 (kg/t), コークス

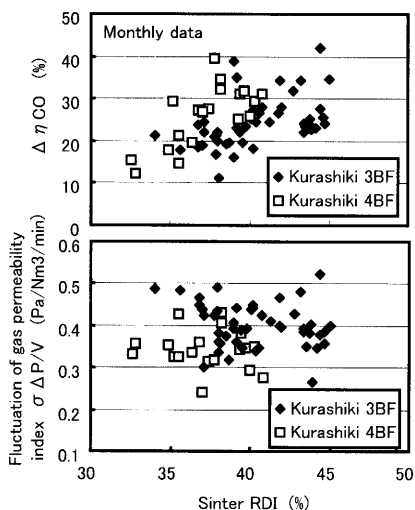


Fig. 11. Relation between RDI and $\Delta\eta_{CO}$.

TI84.3~84.7 (%)の月平均データ)。高RDI時には $\Delta\eta_{CO}$ を増加(周辺流を強化)したガス分布の採用により通気性の悪化を回避していることが伺える。次に、炉頂ガス温度とRDIの関係を $\Delta\eta_{CO}$ で層別した結果をFig.12に示す(上記の倉敷高炉データに福山第5高炉(2次)のデータを追加)。炉頂ガス温度の上昇(熱流比の低下)に伴い、高RDIを許容しているが、RDIが40以上では低熱流比条件でも周辺流強化型のガス分布を採用しており、分布制御による通気安定性の補填が必要であることを傍証している。

RDI増加時に周辺流強化が必要な理由を、焼結鉱の還元粉化現象を考慮した高炉操業シミュレーター²⁾を用いて考察した。RDI, 熱流比, 炉頂鉱石層厚分布が炉内焼結鉱粒径に及ぼす影響をFig.13に示す。低RAR+周辺流抑制型分布条件をベースとすると、Case 1に示したRDI上昇時には周辺部で粒径低下が著しい。これに対し、Case 2のように層厚分布は維持しつつ低熱流比条件とした場合は、炉

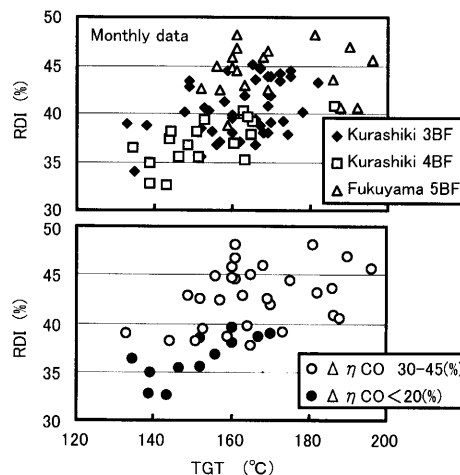


Fig. 12. Relation between top gas temperature and RDI.

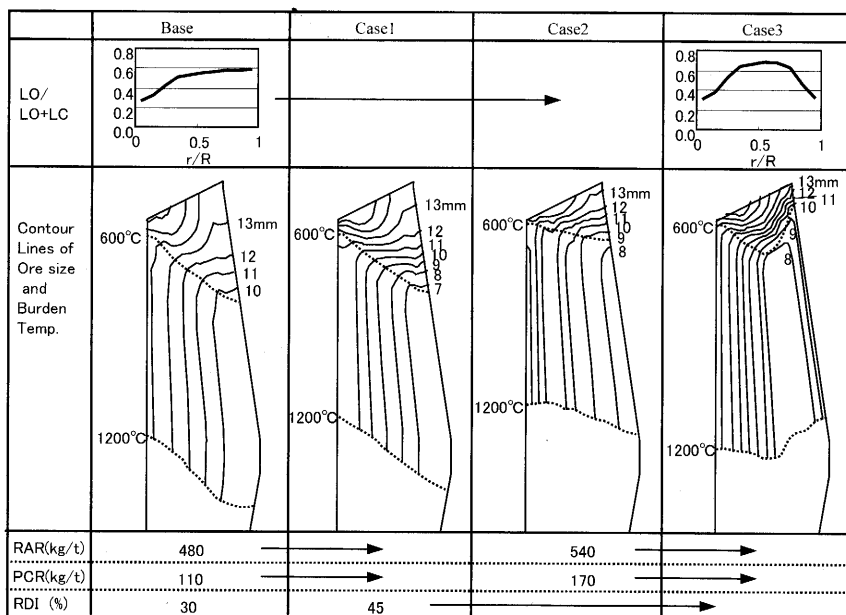


Fig. 13. Predictions of ore size distribution with various operational conditions.

上部の低温領域の縮小に対応して全体の粒径低下は抑制されるものの、周辺部はベースに対し低粒径となる。一方、Case 3に示したように周辺の鉱石層厚を低下させると周辺部の粒径低下が緩和されベースと同等の粒径となる。このように、高RDI焼結鉱使用時には周辺部での粒径低下抑止がポイントであり、周辺流強化はこれに対応した操業アクションであると考えられる。Fig.14に同シミュレーターを用いて算出したシャフト部の通気抵抗と、操業条件および $\Delta\eta\text{CO}$ との関係を示す。 $\Delta\eta\text{CO}$ 一定でRDI増加時には通気抵抗の上昇が著しいが、還元材比の上昇(熱流比の低下)により、それが緩和される。さらに周辺流を増加させると通気抵抗も減少することがわかり、実績の高炉操業で整理された事象と合致する。

5.3 コークス強度

炉内におけるコークスの主たる粒径低下の要因は、炉上部では体積破壊、レースウェイ近傍では表面磨耗であり、特に炉下部の磨耗による粉発生は通気性に大きな影響を及ぼす¹⁰⁾。JFEスチールではコークスの粉化の指標としてタンブラー400回転6mm指数(以下TI)を採用しており、TI低下時の現象として下部通気抵抗の増大、炉芯粉率の上昇が報告されている¹⁰⁾。コークス粉蓄積により通気抵抗が増大した場合、圧力損失を低減するためには前述のよう

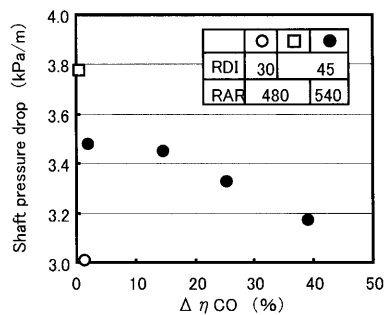


Fig. 14. Relationship among RDI, RAR, peripheral gas flow index and pressure drop at shaft.

に分布制御による通気抵抗の低減が有効である。Fig.15に倉敷第3高炉(3次)および第4高炉(3次)(出鉄比1.9~2.4(t/d/m³),還元材比482~521(kg/t),焼結RDI34~38(%))の月平均データにおけるTIと $\Delta\eta\text{CO}$ および通気抵抗指数の関係を示す。TIが低位の場合でも通気抵抗指数の上昇は認められず、前章のRDIと同様、周辺流強化による通気性悪化の回避効果が明らかである。なお、中心の鉱石層厚比を低下させる分布制御は、炉軸近傍のコークスの反応劣化抑制を介して炉芯コークス層の通気性改善に寄与すると考えられるが、炉芯の更新時期を勘案すると2週間程度の長い時定数を持つアクションと言え、通気改善に即応するものではないため、今回の解析からは除外した。

前出の高炉操業シミュレーターを用いてTI 1%低下を想定し、圧力損失と炉頂分布の関係を試算した。TI -1%で炉芯中間部粉率9.4%増加¹¹⁾の知見に基づき、炉芯領域の空隙率を変化させた。加えて、粒径低下の効果として休風時のレースウェイ上コークスサンプリング結果を解析し、TI -1%でボッシュ部の調和平均径-6mmの関係を得た。

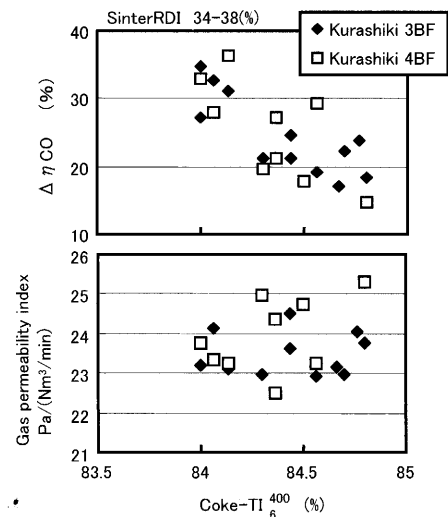


Fig. 15. Relation between coke TI and $\Delta\eta\text{CO}$.

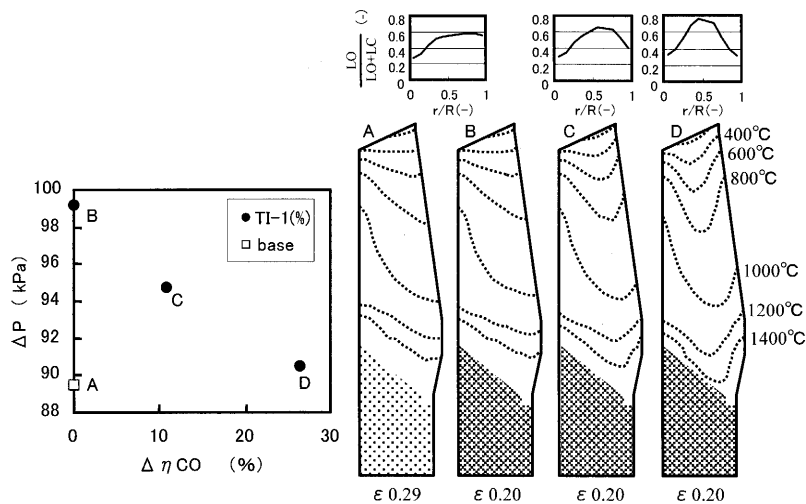


Fig. 16. Burden distribution control compensating for deterioration of gas permeability at Lower part.

Fig.16に結果を示す。ベースに対し、同一ガス分布でTI低下を想定すると圧力損失は約10%増大するが、 $\Delta\eta_{CO}$ を上昇させることにより圧力損失が減少し、 $\Delta\eta_{CO}+25\%$ では、ほぼベースと同等となる。これはFig.15に示したTI-1%あたりの実績 $\Delta\eta_{CO}$ 変化にほぼ等しい。

6. 装入物性状が還元材比に及ぼす影響

以上の解析結果より、ヒートロス増加とシャフト効率低下が強周辺流によってもたらされ、強周辺流の原因として装入物性状の影響が大きいたことが明らかになった。還元材比低減を主眼とした今後の操業設計においては、通気性に多大な影響を及ぼす粉発生に関連する装入物性状に着目する必要がある。中でも熱流比の低下に応じて緩和して来た経緯のある焼結鉱RDI、並びに操業安定性への影響が大きいたことが経験上認識されているコークスTIがヒートロスとシャフト効率に及ぼす影響を定量化する意義は大きく、以下に整理した。

まず、周辺流指数 $\Delta\eta_{CO}$ がヒートロス、シャフト効率に及ぼす影響として、Fig. 7およびFig. 8より、以下の関係を得た。

$$\partial(H.L.)/\partial(\Delta\eta_{CO})=7.5 \dots\dots\dots (3)$$

$$\partial(\eta)/\partial(\Delta\eta_{CO})=-1.4 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (4)$$

H.L.: ヒートロス (MJ/t)

これに、リストモデルから理論的に導出される式(5)、(6)を加味すると、 $\Delta\eta_{CO}$ が還元材比に及ぼす影響として、式(7)が導出される。

$$\partial(RAR)/\partial(H.L.)=5.0 \times 10^{-2} \text{ (kg/t/(MJ/t))} \dots\dots\dots (5)$$

$$\partial(RAR)/\partial(\eta)=417 \text{ (kg/t/-)} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial RAR}{\partial \Delta\eta_{CO}} = \left\{ \frac{\partial(RAR)}{\partial(H.L.)} \frac{\partial(H.L.)}{\partial(\Delta\eta_{CO})} + \frac{\partial(RAR)}{\partial(\eta)} \frac{\partial(\eta)}{\partial(\Delta\eta_{CO})} \right\} = 0.958 \text{ (kg/t/\%)} \dots\dots\dots (7)$$

一方、装入物性状とガス分布の関係として、Fig.11, Fig.15から式(8)、(9)が得られ、これらは最終的に(10)、(11)式に要約される。

$$\partial(\Delta\eta_{CO})/\partial(RDI)=1.0 \text{ (\%/ \%)} \dots\dots\dots (8)$$

$$\partial(\Delta\eta_{CO})/\partial(TI)=-15 \text{ (\%/ \%)} \dots\dots\dots (9)$$

$$\partial(RAR)/\partial(RDI)=0.96 \text{ (kg/t/\%)} \dots\dots\dots (10)$$

$$\partial(RAR)/\partial(TI)=-14.4 \text{ (kg/t/\%)} \dots\dots\dots (11)$$

本検討ではRDIおよびTIが通気性を介して $\Delta\eta_{CO}$ という共通の指標に制約を与えるという取り扱いをしている

が、前章で述べたようにRDIは炉上部の、TIは炉下部の通気性に影響を与え、かつ上部と下部とでは通気を律する要因が異なる¹²⁾。従って、 $\Delta\eta_{CO}$ を下げるためにはRDI, TI両者の改善により炉上下部双方の通気改善が必要であるが、RDIおよびTIの改善による還元材比低減効果は $\Delta\eta_{CO}$ に及ぼす効果が小さい方に律束され、他方で過剰の通気性余裕が生じても全体の $\Delta\eta_{CO}$ 低減には寄与しない。すなわち、RDI, TI改善による還元材比低減効果は式(12)で現される。

$$dRAR = \text{MIN}(0.96 dRDI, -14.4 dTI) \dots\dots\dots (12)$$

これに基づき、ベース条件として炉上下部双方で通気余裕が無い場合を想定したRDI, TI改善によるRARの変化をFig.17に示した。RDIまたはTIで還元材比が規定されるため、目標還元材比低減量に対して最小限必要とされる装入物性状改善値は各等還元材比線の頂点を包絡した直線となり(0A)、各々の等還元材比線において同一RDIでは上方ほど、同一TIでは右方ほど、他方の性状が $\Delta\eta_{CO}$ 低減に寄与しないために過剰スペックであると言える。一方、上部あるいは下部に通気余裕がある状態をベースとすると、装入物性状改善を必要最小限に留める条件下の還元材比の変化はFig.18のように表される。炉上部でRDI+5%相当の通気余裕を持つ状態をベースとすると線分ABB'で

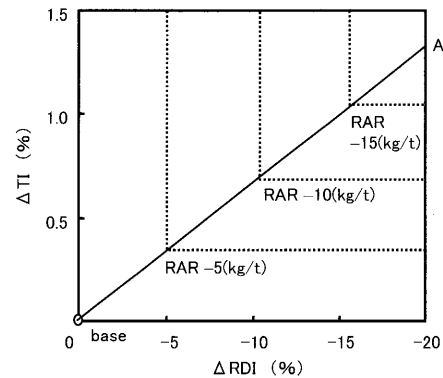


Fig. 17. Changes of RAR with improvement of sinter and coke qualities.

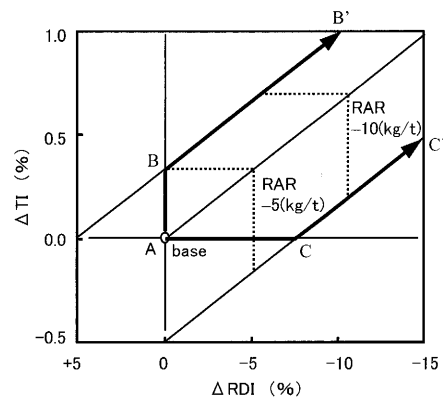


Fig. 18. Schematic drawing of Changes of RAR with margin of gas permeability at base condition.

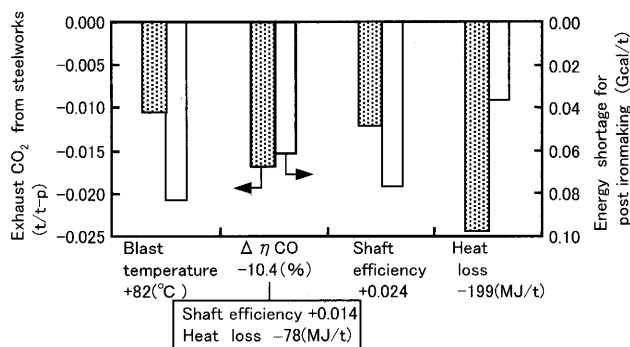


Fig. 19. Changes in exhaust CO₂ from Ironworks with decrease in RAR by 10 kg/t with improvement of gas flow distribution.

(点Bで上部の通気余裕が消滅), 炉下部でTI -5%相当の通気余裕を持つ状態をベースとすると線分ACC' (点Cで下部の通気余裕が消滅) で還元材比の変化が記述できる。5章で述べたRDIまたはTI単独と $\Delta\eta_{CO}$ との相関関係は, Fig.17における横軸あるいは縦軸上の変化を示している。

次に, 2章で述べた内容と同様の手法により, $\Delta\eta_{CO}$ の変化を介して還元材比を10 kg/t減少させた場合の製鉄所からの排出CO₂変化を予測した。結果をFig.19に示す。 $\Delta\eta_{CO}$ とRARの関係については, 式(3)~(7)を用い10.4%の $\Delta\eta_{CO}$ 低減が還元材比10 kg/tの削減効果に相当するとした。同図にはシャフト効率, ヒートロスなどの改善による効果を併記したが, $\Delta\eta_{CO}$ の改善は双方の効果を含むため, これらの中間に位置する。比較としてFig. 2と同様に送風温度を上昇させたケースを示したが, $\Delta\eta_{CO}$ の改善は排出CO₂を削減する上で有効な手段であることがわかる。この際の装入物品質改善は, 炉上下部双方の通気改善を前提とすると, Fig.17よりRDI -10.4%かつTI+0.69%となる。

7. 今後の原燃料品質と高炉操業

焼結鉱性状に関し, 従来は被還元性向上による低還元材比操業が議論されてきた。被還元性の確保は重要であるが, Fig.19に示したようにシャフト効率向上のみを追求するよりも, ガス分布改善を介したヒートロス低減を併用した方がCO₂削減効果が大きく, また, 炉内の還元性は主原料中へのコークス混合等の高炉操業技術でも補填できる¹³⁾。従って, 焼結鉱製造においてRDIを犠牲にして被還元性を向上させるのは得策では無く, 被還元性を極力維持した条件でのRDI低下が優先課題となる。

コークス製造に関しては炉下部における粉発生抑制の観点からは強度向上が最重要課題であるが, 高炉操業側でもこれと並行した操業改善が必要である。炉下部通気性を確保してヒートロス低減に結び付けていくためには, 炉下部(炉芯)充填層の粒径および空隙率の向上が必須条件であ

り, コークス粉の発生抑制に加え, 蓄積の抑制も重要な技術課題である。これに関しては, レースウェイシエルの溶解除去¹⁴⁾による炉芯方向のガス流れの強化および炉芯粉の排出促進などが有効な手段となろう。ホットモデルテストによれば炉下部圧力損失30%低減が期待でき, 全圧損への寄与としてその50%(全圧損15%低下)を仮定すれば, Fig.16から $\Delta\eta_{CO}$ -30%(還元材比-29 kg/t)に相当する多大な効果が見込まれる。

ガス分布に関しては, これまで述べてきたように装入物品質が周辺流抑制の可否に多大な影響を与えるが, ある程度の周辺流が必要な条件においてはシャープな中心流と周辺流を確保した「おわん型」³⁾をベースに, 半径方向で局所的高熱流比箇所の生成抑止を指向した, 周辺部における η_{CO} が低い範囲を最小化できる高精度制御技術の開発が重要であろう。

また, 本稿では触れていないが, 周辺流が必要な理由として炉壁付着物生成抑止が挙げられる。付着物の生成を助長する亜鉛やアルカリに関しても, 還元材比低減と並行した高炉へのインプット量の管理が必要である。

8. 結言

CO₂削減に向け, 望ましい還元材比低減方策を検討した。製鉄所のエネルギーバランスを考慮すると送風温度上昇等の新たなエネルギー消費を伴う手段は得策ではなく, ヒートロス低減やシャフト効率向上といった高炉プロセス改善の基本に取り組む必要がある。

ヒートロス低減, シャフト効率向上達成には周辺流抑制がポイントとなるが, その成否は原燃料品質に強く依存する。焼結鉱RDI, コークスTIに関し, 操業解析および数値シミュレーションからそれぞれがガス分布を介してヒートロス, シャフト効率に与える影響を定量化した。焼結鉱RDI10.4%低減およびコークスTI0.69%上昇によってヒートロス78.3 MJ/t低減ならびにシャフト効率0.014改善を介して還元材比10 kg/t低減に寄与すると予測される。

今後は高炉操業形態に応じて要求される機能から見た, きめ細かい原燃料品質の設計を行っていくと同時に, 混合装入の強化, 炉下部通気性の直接制御, 周辺流の高精度制御など, 原燃料品位を補完できる新たな高炉操業技術の確立が必要である。

文 献

- 1) T.Ariyama, R.Murai, J.Ishii and M.Sato: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1371.
- 2) T.Sato, T.Nouchi and M.Kiguchi: *Kawasaki Steel Gihō*, **29** (1997), 30
- 3) R.Nakajima, A.Kishimoto, B.Iino, H.Hotta, H.Ito and S.Furuya: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1458.
- 4) K.Yamaguchi, M.Nakayama, K.Furukawa, K.Morii, S.Nagata and T.Sugiyama: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), S56.
- 5) I.Higashino, T.Isoyama, E.Tikamatsu, N.Konno, A.Suzawa and

- S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), S57.
- 6) K.Takeda, T.Fukutake and S.Yamazaki: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), S99.
 - 7) H.Wakai, A.Maki, A.Sakai, S.Wakita, S.Matsubara, M.Siobara and K.Mori: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 182.
 - 8) M.Naito and S.Matsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 2.
 - 9) Y.Yoshida, S.Kitayama, S.Ishiwaki, M.Isobe and H.Miyagawa: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 30.
 - 10) K.Takeda, K.Igawa, S.Taguchi, M.Kiguchi, Y.Senoo and S.Tamura: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 10.
 - 11) S.Watakabe, K.Takeda and K.Igawa: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 8.
 - 12) T.Sato, K.Takeda and H.Itaya: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 750.
 - 13) S.Watakabe, A.Murao, K.Takeda, T.Ariyama, N.Nishimura, S.Goto, M.Takeshita, H.Okuyama, T.Uchida and M.Kiguchi: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 180.
 - 14) M.Sato, R.Murai, A.Murao, T.Ariyama, T.Sato and T.Nouchi: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 784.