

今後の高炉操業に望まれるコークス性状

有山 達郎*・佐藤 道貴*²・佐藤 健*²・渡壁 史朗*²・村井 亮太*²

Desirable Coke Properties for Blast Furnace in Future

Tatsuro ARIYAMA, Michitaka SATO, Takeshi SATO, Shirou WATAKABE and Ryota MURAI

Synopsis : The operation condition of blast furnace in Japan has been currently changed by the following issues ; green house problems, shortage of coke supply and high production derived from rapid growth of Asian countries. From these backgrounds, high productivity and low reducing agent rate operation in blast furnace will be demanded for Japanese steel industries.

In this paper, the roles of coke, which strongly affects on the blast furnace operation, are discussed, and in-furnace phenomena at low reducing agent rate and high productivity conditions are clarified. On the basis of these discussions, the desirable coke properties to attain the above purpose are described. As a result, the increase in coke diameter and strength to keep permeability and the control of coke reactivity are evaluated to be important so as to achieve low reducing agent rate and high productivity operation of blast furnace.

Key words : blast furnace; reducing agent rate; productivity; coke property; CO₂ emission.

1. 緒言

近年の地球温暖化問題への対応、および国際的な鉄鋼需要の急拡大を背景に我が国の製鉄の技術指向は大きく変わりつつある。前者のCO₂発生抑制に対しては日本鉄鋼連盟が既に自主行動計画を示し、2010年において1990年比、10.5%削減の目標を掲げている¹⁾。その対応として省エネルギー設備の更なる導入、廃プラスチックリサイクルの拡大なども提唱されているが、基幹技術は製鉄工程での炭素消費のミニマム化となるであろう。また、至近の鉄鋼需要の拡大により2004年の世界の粗鋼生産量は10億トンを超え、我が国の粗鋼生産量も1.1億トンに達し、高生産が急務となっている。しかし、一方では石炭など原燃料の高騰およびその確保など世界的な需給に関する新たな問題も生じている²⁾。鉄鋼需要の拡大はアジアの急速な経済発展によるものであり、長期的に継続しうるかについては議論もあるが、国際競争力堅持のために高生産への技術開発は引き続き進めるべきであろう。

上記の環境変化の中で高炉操業においては、炭素消費のミニマム化とタイトなコークス需給から低還元材比操業が急務になっている。さらに、生産の上方弾力性指向に伴い、高出鉄比操業へのシフトも共通の方向と認識されている。従来、コークス炉操業では安価炭の使用拡大などによる溶鉄コスト削減が優先課題であったが、現在では、それを維持しつつ、高炉の低還元材比、高操業度を保証しうるコークス性状の追求が重要な課題となっている。

一方、生産設備の状況に目を転じると、国内鉄鋼各社におけるコークス炉の平均炉命は既に30年に達し、主要鉄鋼生産国に比較しても老朽化が著しい。今後のコークス炉更新の時期、形式選定は製鉄の大きな次期課題であるが、現況の環境変化への対応に関しては、既存の室炉コークス炉をベースにしたコークス製造技術を考えねばならない。

以上のような製鉄を取り巻く環境変化の中で高炉操業の性能を大きく左右するコークスの役割、性状を新たに捉えなおす時期に来ていると言える。今ほどコークス研究が注目されている時期はないと思われる。高炉内のコークス劣化機構については既に山口が詳細な調査、報告をしている^{3,4)}。本稿では最初に低還元材比、高出鉄比操業時に推測される高炉内現象について述べる。そして、その中で高炉内コークスの役割、課題に触れ、今後指向すべき高炉操業において望まれるコークス性状について総括する。

2. 今後の高炉操業の方向

従来の国内外の主要高炉におけるコークス比、吹き込み還元材比、および高炉還元材比の関係をFig. 1に示す⁵⁾。エネルギー価格が高い我が国では、一般に高炉のガス供給機能を重視し、海外の高炉に比べて還元材比の高い操業を指向し、同時に安価原料の多量使用を図ってきた。しかしながら、今後は緒言で述べたCO₂削減対策、同時に至近のコークスの需給バランスを配慮し、Fig. 1に矢印で示した方向のごとく還元材比低減を進めていくことになろう。た

平成17年8月17日受付 平成17年9月20日受理 (Received on Aug. 17, 2005; Accepted on Sep. 20, 2005)

* JFEスチール (株) スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835)

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

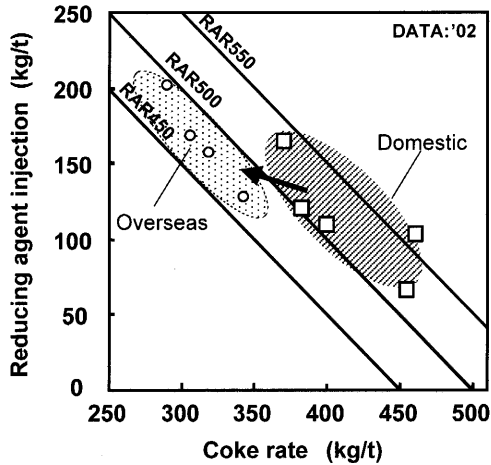


Fig. 1. Relationship among reducing agent rate, coke rate and reducing agent injection rate. (RAR: reducing agent rate).⁵⁾

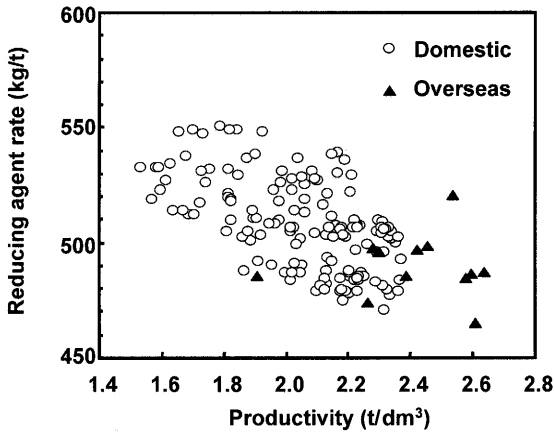


Fig. 2. Relationship between reducing agent rate and productivity.⁵⁾

だし、CO₂対策としては一貫製鉄所のエネルギーバランスを考慮した手段を取ることが基本であり、還元材比は下工程の省エネルギーの進捗に応じた適正レベルを考えねばならない。

Fig. 2に我が国における出銑比と還元材比の関係を海外と対比して示す⁵⁾。海外の高炉操業は低還元材比、高操業度の代表例に限って示したが、我が国の実績より低還元材比、高操業度の事例は多い。ただし、Fig. 3に示した還元材比とコークス強度との関係のように⁵⁾、一般に海外では高品質な原燃料の保証のもとにこれらの実績を出している。我が国では今後も競争力維持のために、現状の原燃料条件の維持が必要であり、海外とは低還元材比、高出銑比達成の前提が異なる。現状の原燃料使用条件の範囲内において高炉側で低還元材比、高出銑比操業を実現しうるコークス性状の具体的な目標値を明らかにし、それに合致したコークスの製造の開発を目指すことになろう。すなわち、高炉内の状況を十分に認識し、新たな技術体系のもとに方策を講ずる必要がある。

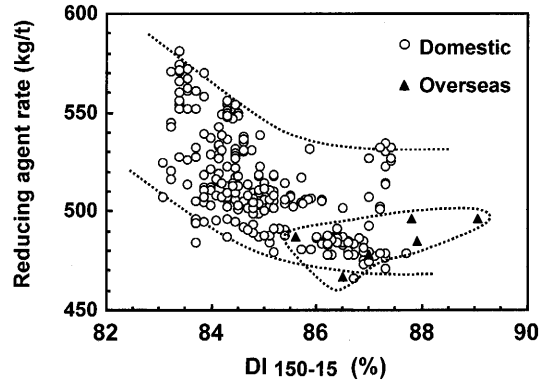


Fig. 3. Relationship between reducing agent rate and coke strength.⁵⁾

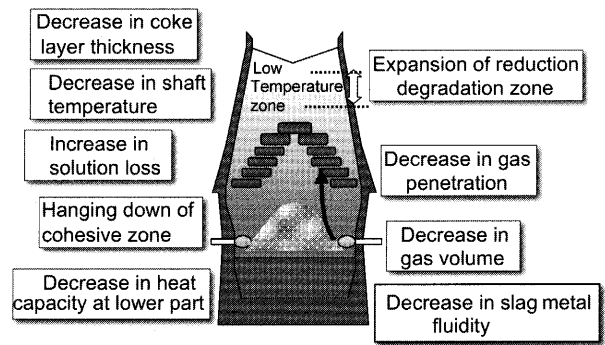


Fig. 4. In-furnace phenomena under low reducing agent rate operation.

3. 低還元材比・高出銑比時に推測される高炉内現象

低還元材比時の高炉内コークス挙動を考える上で基礎となる炉内状況の推定図をFig. 4に示す。コークス単位量当たりのソリューションロス反応量の増、コークス比に伴うコークス滞留時間の増加によってコークス劣化が加速される。炉熱は基本的に低下する方向にあるため融着層帯は低下する傾向にある。またガス量原単位減によって炉中心へのガス浸透力が低下して周辺流傾向となり、ヒートロスは増え、同時にシャフト効率が悪化しやすい。炉上部では熱流比上昇によって装入物の昇温が遅れ、還元停滞、還元粉化が助長されやすい。Fig. 5は396 kg/tまで還元材比を大きく低下させた試験的な操業の際に垂直プローブによって実測された炉内温度分布測定例を示す⁶⁾。実際に熱流比の変化によって昇温が著しく遅れていることがわかる。同時に還元停滞も報告されている。

次に高出銑比時に想定される炉内現象変化をFig. 6に示す。降下速度の増大、炉内ガス量の増加、および溶銑滓の滴下の増大で特徴づけられる。降下速度の増大は棚つりの可能性を増す。Fig. 7は出銑比と計算に基づく装入物滞留時間との関係を示す。本図に示すような降下速度の増大に伴う炉内滞留時間の減少は鉄鉱石の還元遅れを招く。高出

銑比による圧力損失増大の実例を Fig. 8 に示す⁷⁾。またガス量増によってコークス粉発生が顕著になり、特に炉下部におけるコークス粉蓄積が助長され、不均一な充填構造となる結果、ガス、液の偏流をもたらし、ガス・液滴の同時増加もあってスラグのフラッディングが誘起されやすい。

以上のように低還元材比・高出銑比操業時には炉上部、

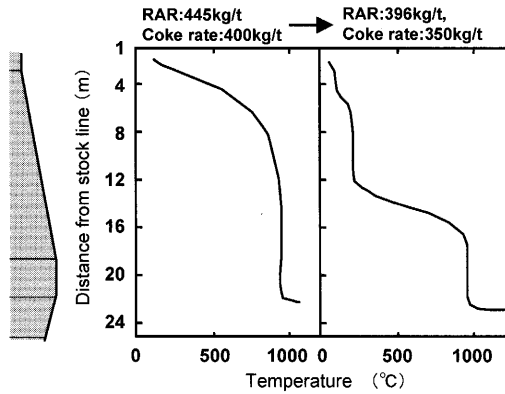


Fig. 5. Temperature profile measured by vertical probe in low reducing agent rate condition at Fukuyama 3 BF.⁶⁾

下部において還元および溶融に関して余裕が少なくなり、また炉下部のフラッディングに代表されるように物理的な不安定現象が誘起されやすいと推測される。総じて炉況はわずかな原料性状変化にも影響されやすくなり、このような条件下で良好な固気接触、熱供給を保障しうる適切なガス流を確保するためにも、強度、粒径などコークスの性状設計の役目は大きい。

4. コークス劣化の高炉操業への影響機構

前章では推測される高炉内の全体的変化について触れたが、本章では実際に観察された事象を参考に、コークスの劣化、粉化、コークス粉蓄積などの諸現象が高炉操業にどのように影響を及ぼすかについて述べる。

Fig. 9 は羽口レベルの炉芯粉率と微粉炭吹き込み量の関係を示した図である⁸⁾。微粉炭吹き込み量には数多くの解析がなされており、その結果を活用して低還元材比の現象を検討する。微粉炭吹き込み量増はコークスへの負荷増大にも繋がり、低還元材比操業を指向する際にも同様な

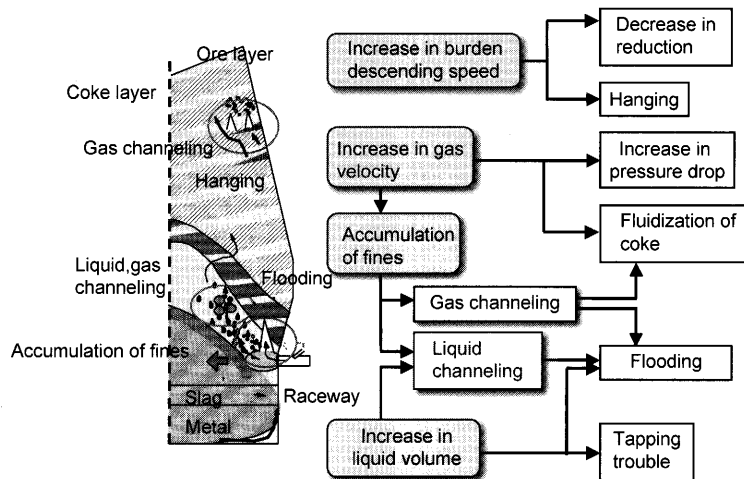


Fig. 6. In-furnace phenomena estimated at high productivity condition.

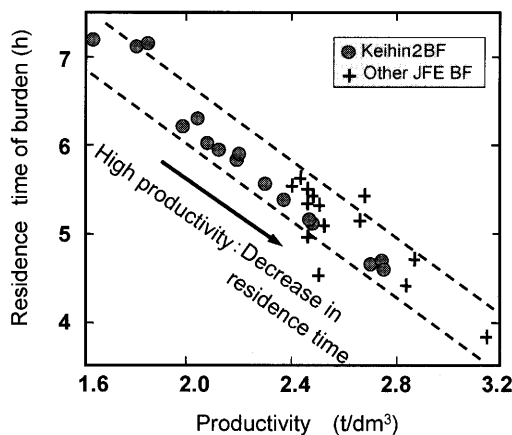


Fig. 7. Relationship between productivity and residence time of burden in blast furnace.

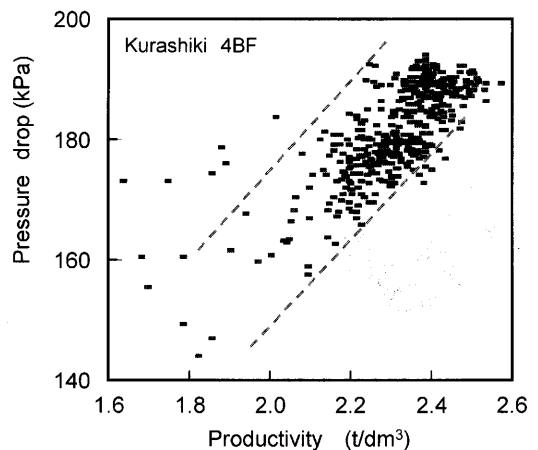


Fig. 8. Relationship between productivity and pressure drop.

傾向が現れると思われる。すなわち、Fig. 9と同様に低還元材比操業においても炉芯粉率は増え、特に中間、中心付近の粉率増大が顕著になると予測される。これは主として炉芯上部からの流入粉、シャフト部、レースウェイ縮流部における剪断応力によって発生する粉、およびレースウェイ発生粉によるものと考えられる^{9,10)}。

次に蓄積した炉芯の粉率と実際に観測された炉況指数の関係をFig.10に示す⁷⁾。これは送風圧と降下速度の変動を指数化したものである。本図のように粉蓄積時には、風圧変動、荷下がり不調が目立つようになる。粉蓄積がガス流の不安定化を助長した結果と思われる。高出鉄比になれば、このような傾向はさらに強まることは容易に想像される。

炉内全体の中でも大きく変化するのは炉下部と思われる。従来の知見から推測される低還元材比時の炉下部状況をFig.11に示す。微粉炭吹き込みが前提であり、レースウェイ奥に微粉炭灰分とコークス粉由来のシェルが形成されるため、炉芯奥へのガス流は阻害されやすい。その結果、

炉芯へのガス浸透力、熱供給力は低下し、炉芯温度は下がり、上述のように発生した粉は炉芯内に滞留しやすくなる。特に炉芯表層に粉が蓄積しやすいことが報告されている¹¹⁾。また村井らも移動層の冷間実験で炉芯表層に粉が蓄積しやすいことを冷間実験で確認し、その結果、粉が集まった炉芯表層を液が伝播し、液の偏流が生じやすいことを報告している¹²⁾。微粉炭吹き込み時、稼働中の羽口ゾンデによるビデオカメラによってもレースウェイ奥に液流れが集中する現象が観察されている¹³⁾。この粉蓄積に伴う液の偏流の結果、スラグのフラッディング現象が誘発されやすくなり、風圧変動の要因ともなる。

上記のようなコークスの劣化に伴う粉の発生、移動、蓄積が炉況変動をもたらし、また炉下部において液流れに大きく影響し、安定操業範囲を狭めていると考えられる。これらの現象の解消が低還元材比、高出鉄比達成の課題となる。

5. 高炉内コークス劣化抑制と通気性、通液性確保

5.1 コークス劣化の要因と対策

コークスの性状改善対策を考えるために、高炉内のコークスの劣化、粉化挙動をまとめるとFig.12のように示され

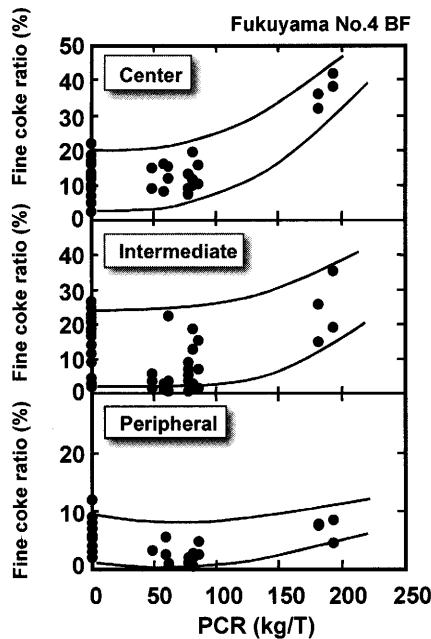


Fig. 9. Influence of pulverized coal injection rate on coke fines in deadman.⁸⁾

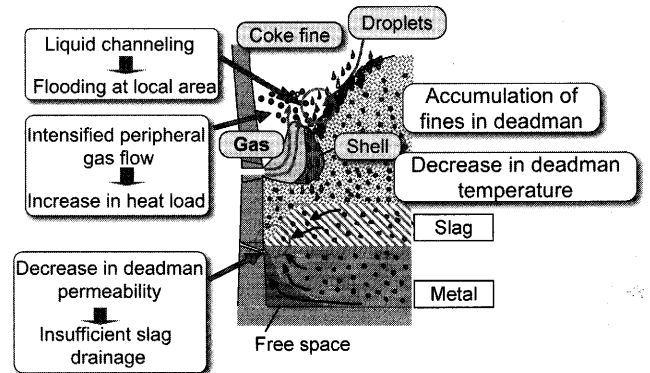


Fig. 11. Estimated lower part phenomena under low reducing agent rate operation.

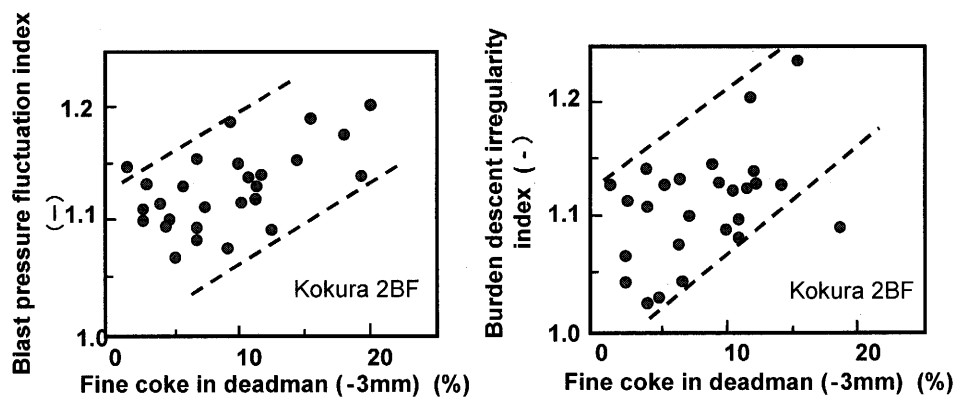


Fig. 10. Influence of fine coke ratio in deadman on operation index.⁷⁾

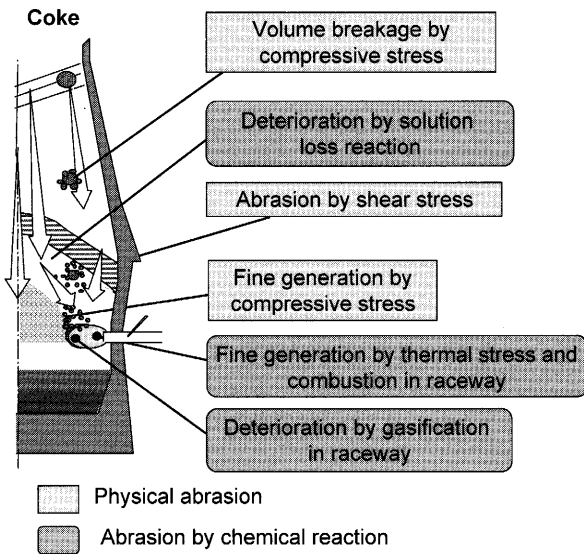


Fig. 12. Mechanism of coke breakage in blast furnace.

る。物理的な劣化に関しては圧縮荷重による破壊、下部における粒子縮流部における剪断応力による粉化があげられる⁹⁾。次に反応を主体とする劣化に関しては融着層帯下部のソリューションロスによる反応劣化、レースウェイ内部での熱衝撃、燃焼粉化、およびガス化による劣化があげられる。どの部位の粉化が支配的かについては山口らが実炉の調査、モデル実験結果をもとに総括し¹⁴⁾、滴下帯下部およびレースウェイ内部の影響が大きいことを報告している。

ここで融着層帯下部のソリューションロスによるコークス劣化に注目すると、微粉炭多量吹き込み時には未燃チャーで代替されてコークスへの負荷が減少し、同時にレースウェイ内燃焼粉化も微粉炭が優先的に酸素を消費することによって軽減すると考えられる。この条件下では、粉化要因の中でもレースウェイ内後半部での反応劣化が支配的になると予測される。よって、高温領域でコークス粒子表面が優先的に反応するような高反応性コークスが劣化抑制を考える上で重要な手段となろう¹⁵⁾。レースウェイ燃焼炉実験でも渡壁らがFig.13に示したように高反応性コークスの使用は粉の蓄積を軽減することを確認している¹⁶⁾。さらに笠井らも高CRIコークスの使用は反応劣化層を表面にとどめ、粉発生を抑制すると報告している¹⁷⁾。その結果、レースウェイ奥に形成されるシェル層の薄層化も考えられ、炉下部の通気性改善への効果は大きいと考えられる。

ただし、上記の実験結果はレースウェイ付近を再現した燃焼炉実験に基づくもので、融着層帯下部におけるコークスのソリューションロス負荷は微粉炭吹き込み量のレベルによって影響されることに留意する必要がある。Fig.14は微粉炭吹き込み量と炉内に流入する未燃チャーの関係を燃焼率との関係で図示したものである。発生した未燃チャーはコークスに比較して反応性が高いことが既に報告されている¹⁸⁾。レースウェイ内微粉炭燃焼率は約60~70%と推測

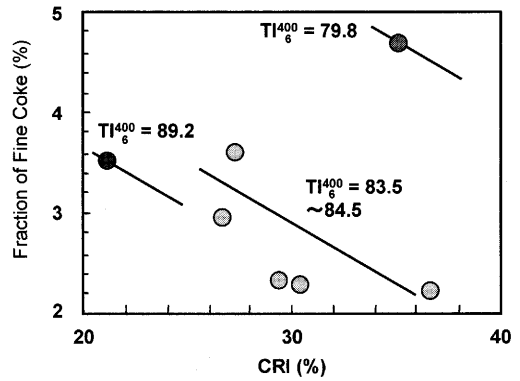


Fig. 13. Influence of coke CRI and coke strength on fine coke ratio.¹⁶⁾

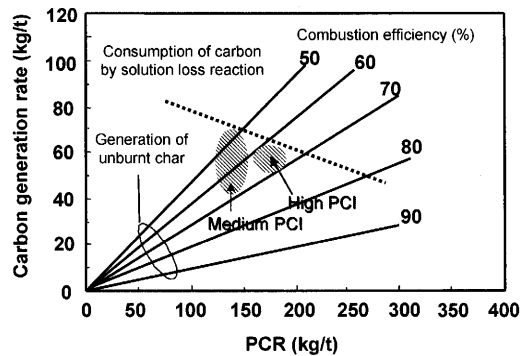


Fig. 14. Relationship between pulverized coal injection rate and carbon generation rate.

されており¹⁹⁾、Fig.14に示すように吹き込み量が180~200 kg/tに達する多量吹き込み条件では発生未燃チャーの量はソリューションロス反応消費にほぼ相当するため、高炉内のソリューションロス反応を反応性の高い未燃チャーがほぼ担える。しかし150 kg/t以下では、この未燃チャー発生量はソリューションロス反応量を下回って代替効果は減少し、融着層帯下部のコークスの反応劣化が浮かび上がってくる。よって、コークス粉化対策としてのコークス反応性制御は微粉炭吹き込み量によって、融着層帯下部、レースウェイ内などコークス劣化部位の重みが変わることを考えて実行に移す必要がある。

5.2 炉下部通液性の改善の考え方

炉下部においてはスラグのフラidding回避が重要である。この通液性に直接的に影響するコークス粒径、空隙率の観点からコークス性状を考える。フラidding線図に着目し、安定操業範囲を検討する。炉下部のガス、液流れの不均一性を考えると、Fig.15に示すようにフラidding限界値に対して70%程度が現実的な限界(以下、R値)を与えると予測される⁹⁾。この関係に基づき、各種の高炉操作条件とR値との関係から、R値を一定とした時に操作条件の改善による出鉄比向上の余地を求めることができる。その結果をFig.16に示す。すなわち、シャフト効率の向上、ヒートロスの低減、還元平衡の制御など還元材比低

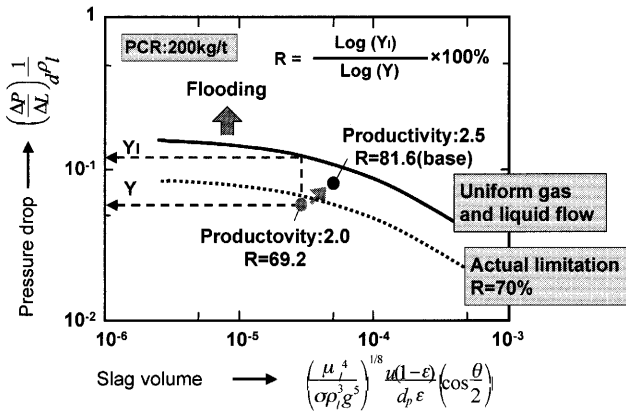


Fig. 15. Estimation of maximum productivity based on flooding phenomena (R: flooding index).

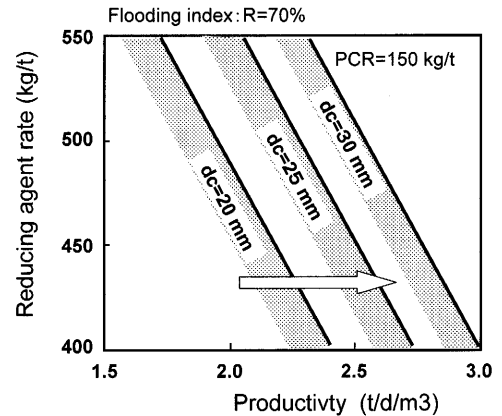


Fig. 17. Change of stable operating condition by enlargement of coke diameter.

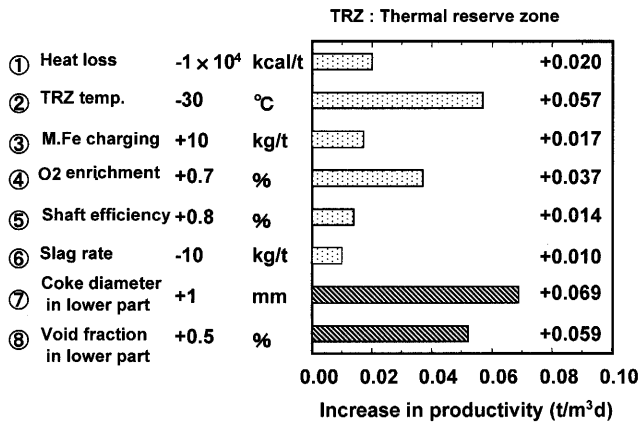


Fig. 16. Effect of blast furnace operation parameters on productivity estimated by R-value.

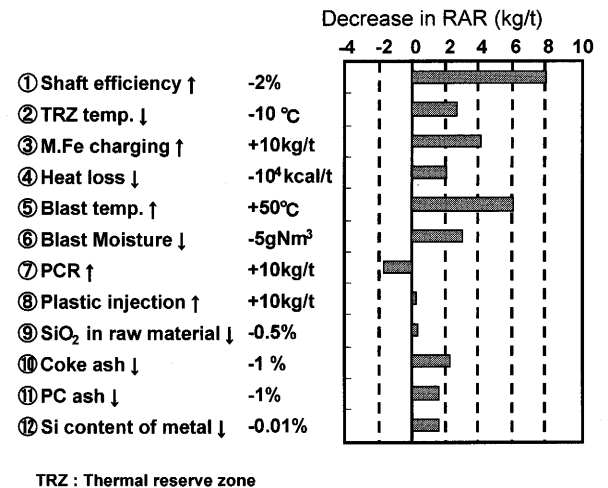


Fig. 18. Effect of blast furnace operating parameters on reducing agent rate estimated by RIST diagram.

下に伴うガス原単位低減による出銑比向上分、および物理的な通液抵抗減による効果を求めたものである。この中で通液抵抗に直接、影響するコークス粒径のアップ、強度向上による空隙率の上昇は極めて効果が大い。炉下部コークス粒径の1mm上昇、空隙率の0.5%の拡大は大幅な出銑比向上効果を与えており、炉下部コークス粒径制御、空隙率確保の重要性が理解できる。さらに、Fig.17はR値70%以下を満足する出銑比、還元材比の関係を、コークス粒径をパラメーターとして求めた図である。コークス粒径の拡大によって安定操業範囲を大きく拡大できることがわかる。

6. 望まれるコークス性状

6.1 低還元材比操業に向けたコークス性状

安定操業範囲確保の観点から必要とされるコークス性状について既に述べた。さらに、低還元材比をねらった高炉操業を行う上での条件とコークス性状の関係を述べる。

還元材比低減手段としては、下記の項目が挙げられる。

- 1) 入熱量の増加 (送風温度上昇, 湿分低下など)
- 2) 所要熱量の低減 (ヒートロス低減など)

- 3) シャフト効率の向上
- 4) FeO/Fe還元平衡の制御 (金属鉄の投入, 熱保存帯温度低下など)

リストモデルによって各種の具体的な操作条件と還元材比との関係を求めた結果を Fig.18に示す。この中でもコークスの性状が関係する項目は多い。高反応性コークスによる熱保存帯低下、ガス流改善に基づくヒートロス低減、シャフト効率向上などが低還元材比達成に役立つ。通気性改善には粉発生と粉蓄積が関係し、これは装入コークスの大粒径化、操業条件に見合った反応性によって緩和できる。

高反応性コークスによる熱保存帯温度低下の効果は既に内藤らにより高炉内反応シミュレーターを用いた実験によって確認されている²⁰⁾。すなわち、試験的に高反応性コークスを製造し、JIS反応性を93~98まで上げることにより、熱保存帯温度が1000°Cから900°Cまで低下することを検証している(Fig.19)。さらに北海製鉄の高炉においては高Ca炭配合による高反応性コークス使用操業を実施し、還元材比低減効果を実証している^{21,22)}。ここで、高反応性コークスを工業的にいかに製造するかが同時に課題で

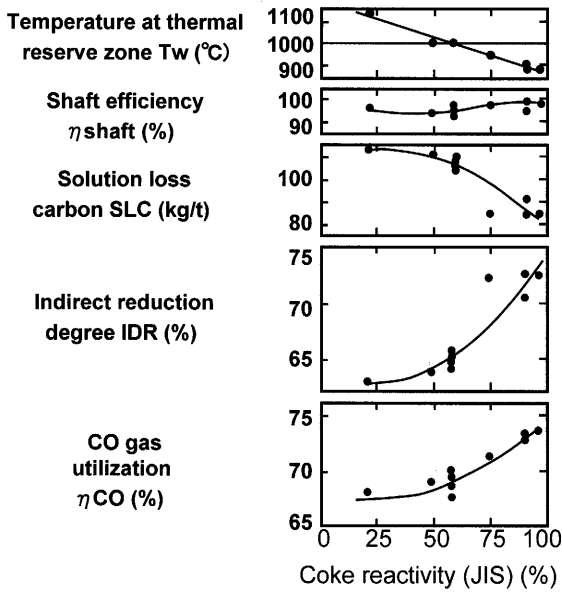


Fig. 19. Influence of coke reactivity on reduction phenomena in blast furnace.²⁰⁾

あるが、深田らは鉄内装による反応性向上と鉄源投入効果を併せ持ったコークス製造プロセスを提唱しており²³⁾、今後の一つの方向として注目される。

6.2 低還元材比・高出銑比の同時達成とコークス性状

総合的見地からの低還元材比，高出銑比達成条件をFig.20に示す。目標とする還元材比は450kg/t，操業度は2.5t/dm³とし，既に述べた効果的な手段を組み合わせ，リストモデルとフラッキング線図から求めた結果である。すなわち，粒径の拡大，強度向上による空隙率の確保，そのガス流改善効果によるシャフト効率の向上，ヒートロスの低減，フラッキング緩和による炉下部通液性の改善，さらに反応性上昇による熱保存帯温度低下などの手段からなる。本図に示すように粒径に関しては+2mm，空隙率では+1%によって操業度は大きく向上し，同時に低還元材比時の安定ガス流も確保できると思われる。よって，低還元材比操業と高操業度達成に対して大粒径・高強度コークス，反応劣化抑制および熱保存帯制御をねらった高反応性コークスの使用が決め手となる。望まれるコークス性状と高炉操業改善の関係を示す総括的な思考フローをFig.21に示す。

一方，これらの性状を具備したコークスの製造が可能であるかを検討しなければならないが，粒径拡大をねらい，強度を維持しながら反応性の向上を図ることには課題が多い。CRIで示される反応性を上げることによってCSRの低下も懸念され，高炉下部の強度，粒径維持は困難になる。上記の性状のすべてを満足するコークスの製造が目標であるが，使用する側での工夫も必要と考えられる。高反応性コークスを選択的に鉍石層に装入する方法^{20,24)}。さらにFig.22に示すようにコークスの機能別装入への展開も考えられる。すなわち，高反応性コークスと大粒径・高強度

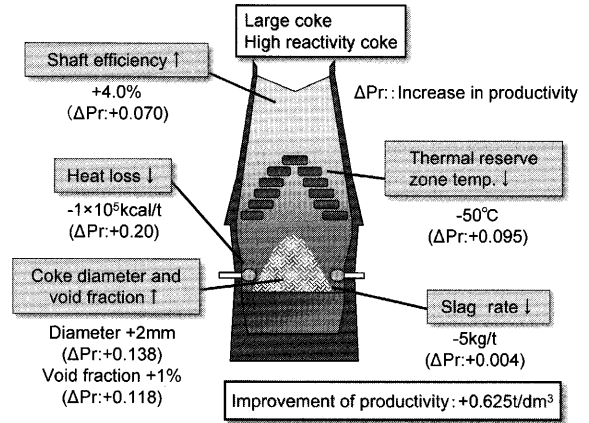


Fig. 20. Condition for low reducing agent rate (450 kg/t) and high productivity (2.5 t/dm³) and desirable coke properties.

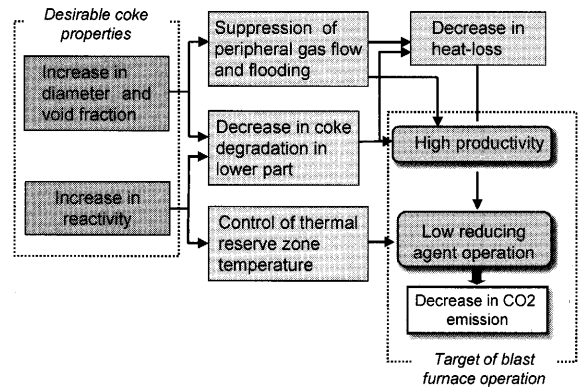


Fig. 21. Desirable coke properties for low reducing agent rate and high productivity.

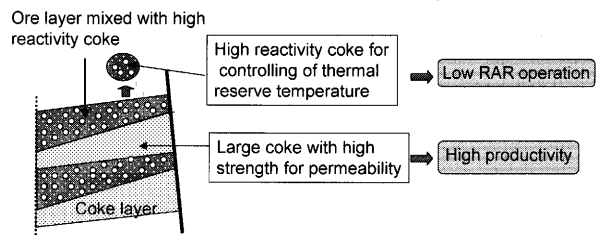


Fig. 22. Charging of coke with specified properties for attaining low reducing agent rate and high productivity operation.

コークスとを作り分け，鉍石層に装入した高反応性コークスには還元促進と熱保存帯制御の役割を持たせ，コークスベッドは大粒径・高強度コークスで構成し，炉下部の通気性，通液性確保を確実にする方法などが今後あり得るであろう。すでにコークスの多量混合装入の効果も確認されており²⁵⁾，コークス製造側と高炉側との連携として新たな展開も期待される。

7. 結言

地球環境問題、国際競争力強化を背景に高炉操業は一層、低還元材比・高出銑比操業へと向かうと考えられる。その中でコークスの役割は極めて大きく、特に高炉下部の現象変化を考慮したコークスの製造技術確立が重要となろう。すなわちコークスの大粒径化、強度向上による空隙率確保による炉下部の通気性、通液性改善、さらに耐粉化性、熱保存制御を意図した高反応性コークスの製造、使用が重要となる。

文 献

- 1) Japan Iron and Steel Federation: *Tekkohkai*, (2002), No. 9, 3.
- 2) P.Cleary, D.Isler, H.B.Lungen, M.Reinke and W.Ruedack: *Stahl Eisen*, **125** (2005), 17.
- 3) 山口一良：高炉を支えた操業技術と原燃料，東北大学出版会，仙台，(2001)。
- 4) K.Yamaguchi: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **6** (2001), 859.
- 5) T.Ariyama, M.Sato, T.Sato, S.Watakabe and R.Murai: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 610.
- 6) S.Kajikawa, R.Yamamoto, R.Nakajima, S.Kishimoto and T.Fukushima: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2361.
- 7) 高炉炉下部制御技術検討会成果報告書，日本鉄鋼協会，東京，(1997)，42.
- 8) A.Maki, A.Sakai, N.Takagaki, K.Mori, T.Ariyama, M.Sato and R.Murai: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 650.
- 9) K.Fukada, S.Itagaki, I.Shimoyama and M.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 26.
- 10) K.Fukada, S.Itagaki, I.Shimoyama, H.Kadoya and A.Shimomura: 57th Ironmaking Conference Proceedings, ISS, Toronto, (1998), 719.
- 11) M.Ichida, T.Nakayama, K.Tamura, H.Shiota, K.Araki and Y.Sugiyama: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1132.
- 12) R.Murai, A.Murao, K.Goto, M.Sato and T.Ariyama: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 249.
- 13) M.Matsuura, M.Sato, T.Ariyama, H.Mitsufuji, H.Wakai, K.Ishii and H.Tsukiji: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 852.
- 14) K.Yamaguchi, T.Uno, T.Yamamoto, H.Ueno, N.Konno and S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 641.
- 15) T.Kamijo, M.Shimizu, R.Ito and G.Hoshino: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 26.
- 16) S.Watakabe, K.Takeda and K.Igawa: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 8.
- 17) A.Kasai, K.Miyagawa, T.Kamijo, J.Kiguchi and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 239.
- 18) Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 927.
- 19) M.Sato, R.Murai, T.Ariyama, S.Itagaki and K.Fukada: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 14.
- 20) M.Naito, A.Okamoto, K.Yamaguchi, T.Yamaguchi and Y.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 357.
- 21) S.Nomura, M.Naito, H.Kitaguchi, T.Suzuki, T.Tahara, S.Koizumi and Y.Okata: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1039.
- 22) H.Ayukawa, T.Nakayama, T.Abe, S.Matsuzaki, S.Nomura, M.Naito and Y.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1040.
- 23) K.Fukada, I.Shimoyama, M.Asanuma, H.Fujimoto, T.Yamamoto, T.Ariyama and K.Hanaoka: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 842.
- 24) Y.Abe, K.Okuda, K.Yamaguchi, K.Yamaguchi, N.Ishioka, T.Furukawa, Y.Shimomura and K.Ono: The 54th Committee (Ironmaking), Rep. No. 1701, (1984).
- 25) 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.