

最近の日本の高炉操業からみたコークス品質への期待

緒方 勲*・一田 守政*²

Expectation for Coke Quality Seen from Recent Blast Furnace Operation in Japan

Isao OGATA and Morimasa ICHIDA

Synopsis : The coke quality requested for the stable operation of a large-scale blast furnace under high production and low coke rate in the future is arranged based on a past finding concerning relation between the coke quality and the blast furnace operation analysis. And an expectation for next generation coke-making process (SCOPE21) which has the function to enable the above-mentioned coke quality and a necessary requirement are described.

Key words: coke quality; coke strength; coke size; coke degradation; coal pretreatment technology; SCOPE21; large-scale blast furnace; high productivity; low coke rate; high pulverized coal injection; cohesive zone; hearth; permeability.

1. 緒言

日本鉄鋼業の製鉄分野では、最近10年間高炉の大型化と要員合理化を進めるとともに、安価低品位原燃料の多量使用技術、高炉・コークス炉の長寿化対策、高PCI操業等による省エネルギー・省コスト技術、廃棄物リサイクル技術、環境問題への対応技術を開発し、それらの実機化を推進してきた。

日本のエネルギー事情を考慮した場合、高炉法が他の鉄源製造プロセス等に比較して優位であり続けることに間違いはない。しかし、今後予想される中国の急速増産に伴う原燃料需給のアンバランスと原燃料の低品位化、コークス炉の高齢化に伴うコークス生産能力不足問題の顕在化等の環境下において、省エネルギーと省コストを目指した低還元材比(RAR)・低コークス比(CR)操業技術、更なる高生産安定操業技術が高炉法に強く要請されている。

これらの課題を解決するためには、原燃料品質が高炉の炉内反応に及ぼす影響の定量的評価に基づいた原料から溶銑品質までの一貫最適化と限界RAR(低CR)下での高生産安定操業技術の確立が必要である。

本解説では、高炉炉下部での反応とくに通気性と通液性に重要な影響を与えるコークス品質に着眼した高炉炉内解析に関する過去の知見に基づき、今後の高炉操業に対して求められるコークス品質について整理した。さらに低品位燃料多量使用によるコークス品質改善技術と高炉の低RAR(低CR)・高生産安定操業技術を可能とする次世代コークス炉(SCOPE21)への期待を述べた。

2. 解体調査結果に基づいた高炉下部でのコークス挙動

2.1 コークス品質が高炉操業に及ぼす影響

1960年から1970年前半にかけて、各社の高炉内容積を1000m³から3000m³弱に大型化する過程で吹き抜け等の操業トラブルが頻発した。上記操業不安定化は炉口径拡大による装入物分布制御の低下に起因した融着帯の脆弱化¹⁾と大型高炉でのコークス劣化²⁾の結果と推定され(Fig. 1)、コークス品質の重要性が認識された。

一方、ほぼ同時期あるいは直前から始まった高炉解体調査結果³⁻⁸⁾により、融着帯の存在や炉芯・レースウェイを含む炉下部でのコークス充填構造が明らかになった。1977年に吹き止められた新日鐵名古屋第1高炉(2次, 2518m³)では、従来の注水冷却に替わり、窒素ガスで冷却した後に解体調査が実施された⁹⁾。Fig. 2に炉内高さ方向(出銑口基準:羽口レベルは3.6m)におけるコークスの平均粒度および-10mm粉率の変化状況を、炉径方向の位置別に示す。

平均粒度はシャフト上段から中段(出銑口から20~14m)にかけて低下するが、シャフト中段から下段(出銑口から14~9m)にかけてはほぼ一定であり、炉径方向でもほとんど差がない。シャフト下段から羽口直上(出銑口から9~4m)にかけて、平均粒度は急激に小さくなるが、羽口以下ではほとんど変化は認められない。一方、-10mm粉率はシャフト上段から中段にかけては高さ方向ではあまり差は認められないが、炉径方向では中心部および中間部が5%以下であるのに対し、炉壁部のみは20%以上の高い値を示している。シャフト中段から下段にかけては炉径方向

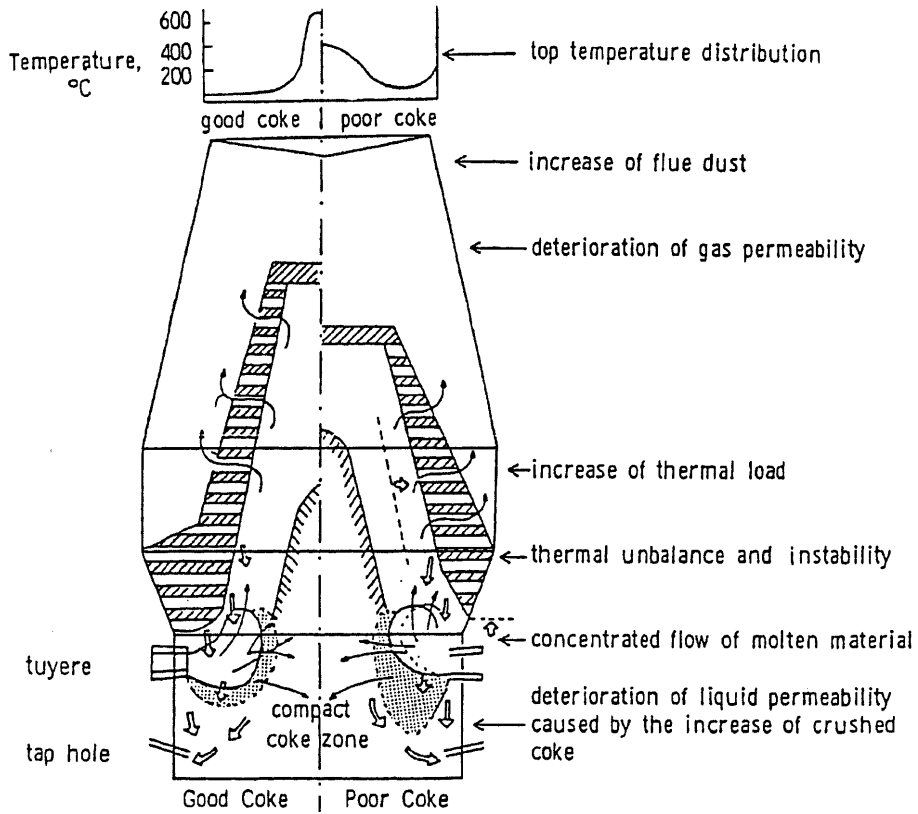


Fig. 1. Change of cohesive zone and raceway influenced by quality of coke.¹⁾

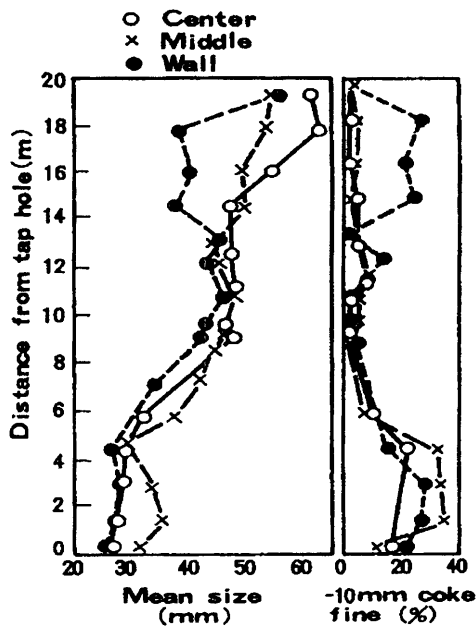


Fig. 2. Distribution of average coke size and fine sampled in Nagoya No. 1 BF blown out.^{2,9)}

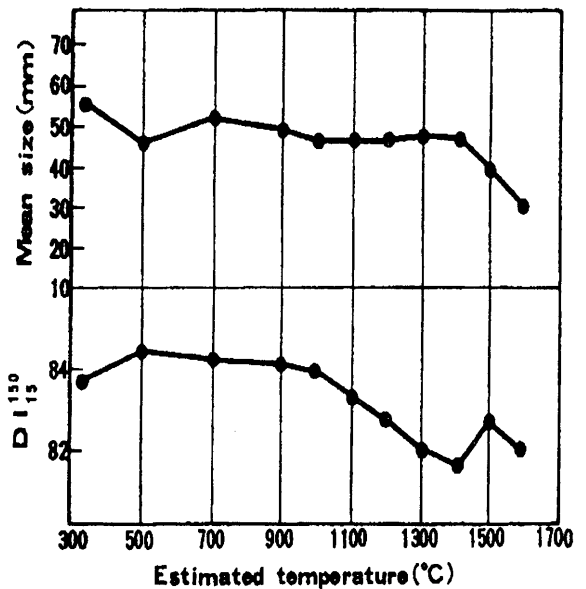


Fig. 3. Relation among temperature, average coke size and coke cold strength in Nagoya No. 1 BF blown out.^{2,9)}

の各位置でほぼ同じ値を示しながら漸増しており、シャフト下段から羽口直上にかけて急激に増加し、それ以下では羽口直上とほぼ同じ粉率レベルで推移している。

コークス冷間強度はソリューションロス反応が活発になる1000~1400°Cの範囲のシャフト下段から融着帯の領域で低下しているが平均粒度は変化していない(Fig. 3)。

1400~1600°Cの範囲の融着帯下面からレースウェイ直上の領域ではコークス冷間強度は若干上昇している。そして平均粒度は急激に低下し(Fig. 3)、粉率は急激に増加している(Fig. 2)。炉下部での通気性と通液性に大きい影響を及ぼす上記のコークスの粉化挙動から、コークス強度の重要性が認識されている。

2.2 粉発生箇所と粉発生メカニズム

武田ら¹⁰⁾は千葉第1高炉の解体調査結果¹¹⁾に基づき炉内でのコークス粉化機構を検討し、羽口上3.5m付近を境にそれより上のソリューションロス反応とアルカリによる劣化が主要因で体積破壊をおこす領域と、それより下の燃焼とソリューションロス反応を伴いつつコークスが活発に運動し表面摩耗をおこす領域とに分けられると報告している。

高炉内の主たるコークス粉生成領域は、炉下部滴下帯とレースウェイ内であり¹²⁾、コークスの破壊形態は、体積破壊と表面摩耗のふたつに分類される¹⁰⁾。さらにコークス劣化、粉生成は、①CO₂によるガス化、②溶融FeOとの接触還元、③溶融メタルとの接触浸炭の3つの反応によって起り、表面摩耗に影響を与える因子は①と③、体積破壊に影響を与える因子は②とされている^{13,14)}。これらの情報から、炉下部滴下帯では①~③による体積破壊と表面摩耗、レースウェイ内では①による表面摩耗の結果として、粉生成が起っていると推定される。③によるコークス劣化はレースウェイ内ではほとんど起らず、炉芯部で長時間かけて起ると考えられる¹³⁾。その他にも、CO₂よりもガス化速度が速いとされているH₂Oの影響も無視できないが、粉の消費の観点からの検討^{15,16)}がなされてはいるものの十分ではない。

②の反応に関しては、笠井ら¹⁴⁾、砂原ら¹⁷⁾の研究がある。笠井らは、溶融FeOとの反応量がコークスの劣化量（粒径低下、粉発生量）に及ぼす影響について基礎的に調査した。そしてCO₂ガスによる劣化との相違について比較検討し、溶融FeOとコークスとの反応は、反応界面積が小さい局所的な表面反応であり反応層は薄く、反応界面積が大きく厚い劣化層を形成するCO₂によるガス化との差違があることを示した¹⁴⁾ (Fig. 4)。溶融FeOとコークスとの反応では、粉の発生率は低いものの微粉を発生しやすいこと、その抑制には冷間強度の向上が有効と報告している。

3. 高炉大型化および高PCI操業にともなうコークス品質と高炉操業との関係

3.1 シャフト上部での通気性とコークス品質の関係

シャフト部の通気性とコークス品質との関係に関する知見は少ない。これはシャフト部通気性には還元粉化を含む焼結鉱の粒度が支配的なためである。コークス粒度の上昇により逆に周辺流が助長されたとの知見¹⁸⁾もある。シャフト部通気性の確保のためには、中心部のコークスのみを大粒径化するか粒度偏析を促進する装入方式の検討が必要である。

3.2 融着帯近傍での反応とコークス品質の関係

コークスの冷間強度は常温でのコークスの強度であり、厳密には高炉内の温度やガス雰囲気下でのコークス強度ではない。上記認識から融着帯近傍（1000℃以上、CO₂リッ

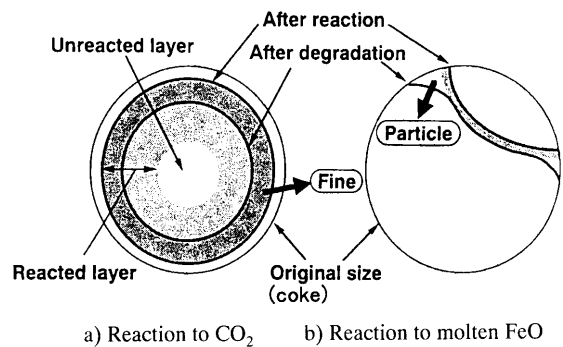


Fig. 4. Schematic diagram of reaction model.¹⁴⁾

チ)でのコークスのガス化反応を考慮した強度指標の開発が検討され、CSR (Coke Strength after Reaction)という指標が提唱された¹⁹⁾。CSRを変更したコークスを使用した実機試験では、低CSR時に装入物降下異常が発生する現象が確認され、本指標の重要性が認識された^{15,20)}。しかし、本指標を管理指標として測定していない鉄鋼会社もあり、本指標の再評価が今後の課題である。

また、最近では、低RARの手段として、高炉の熱保存帯温度の低下によりW点（ウスタイトー鉄還元平衡点）を高ガス利用率側へ移動させる高反応性コークス (Fig. 5)の使用が提案されている²¹⁾。高反応性コークスによる高炉内反応効率向上技術では炭酸ガス発生量低減効果が期待される。しかし、本技術は熱保存帯温度の低下をとともなうことから、焼結鉱の被還元性の観点からの研究も同時に行う必要がある。

3.3 炉下部での反応とコークス品質の関係

従来から、微粉炭吹き込みによる高炉下部でのコークスの粉化・粉蓄積の促進やそれによる通気性悪化が指摘されている²²⁾。原因となるコークス粉の由来や主な発生場所と推察されるレースウェイ内部でのコークス粉発生機構などについても不明な点は多い。山口ら¹²⁾は燃焼炉によりレースウェイ内でのコークス粉発生と微粉炭燃焼との関係に注目し、高PCI時のコークス粉発生量の増加はレースウェイ内のO₂によるコークスのガス化の結果として生ずるコークス劣化部分の消滅がなく、CO₂によるガス化反応量が増加するためであり、コークスの反応性を上げることが粉化防止に有効としている。また、笠井ら²³⁾も同様の実験を行ない、反応性の高いコークスが粉発生を抑制すると報告している。武田ら²⁴⁾は、小型燃焼炉実験で微粉炭吹き込み量の増加とともにコークス粉発生量が急増する結果を得ている。清水ら¹³⁾は、実炉で微粉炭比(PCR)を200kg/tに上げていった際の炉芯中間部の粉率の変化をトレースし、微粉炭比を110kg/tまで上昇させてゆく過程での粉率が急激に上昇したと報告している。ただし、高微粉炭比においても炉芯コークス粉の由来は大部分が炉上部発生粉であるとしている。佐藤ら²⁵⁾は、ホットモデルを用いた燃焼実験とモデル計算により、微粉炭燃焼下でのコークスの反応挙動の

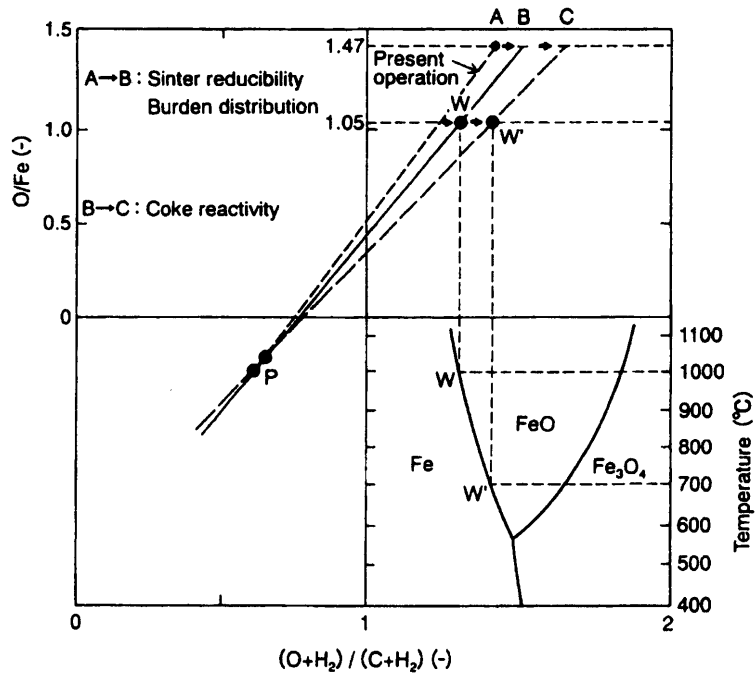


Fig. 5. Improvement technology of reaction efficiency on a BF (Rist diagram).²¹⁾

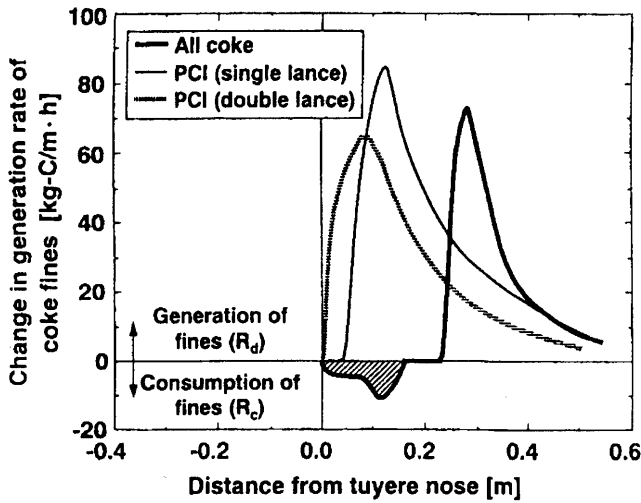


Fig. 6. Change in calculated carbon consumption rate along tuyere axis.²⁵⁾

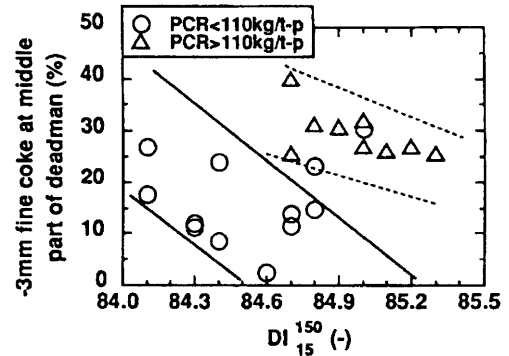


Fig. 7. Relation among cold strength of coke, fine coke and PCR.¹³⁾

評価を行ない、羽口先酸化帯やレースウェイ奥でのソルロス帯での反応量の差異を推定し、羽口先酸化帯の縮小によるコークス劣化層の除去能力の低下が粉増加の理由と推定している (Fig. 6)。

コークス冷間強度 (DI) および反応性 (CRI) とレースウェイ内発生粉との関係について検討されてきており^{12,23,26)}、レースウェイに着目すれば高反応性コークスを用いることで劣化層の厚さを低減できる。一方で、炉中部から炉上部での冷間強度も当然必要であり、理想的には高いコークス基質強度を有し、かつ高反応性を具備したコークスが粉化量低減のためには有効と考えられる。しかし、通常の冶金用コークスでは DI と CRI は逆相関であるので、両者の相

互作用で粉化量が決まることになる。現実的には微粉炭多量吹き込みを実施しているほとんどの高炉では冷間強度 (DI) の大きいコークスを使用することにより対処している^{13,27-29)} (Fig. 7)。

3.4 高炉大型化とコークス品質の関係

高炉内容積が拡大されるとともに、炉内でのコークスが受ける荷重、衝撃力が大きくなり、コークスの劣化が激しくなることは予想される。大竹らは高炉内容積と休風時に羽口部より採取したコークスの圧壊強度との関係より、大型高炉ほど圧壊強度が低下していることを報告している³⁰⁾ (Fig. 8)。また原口らは高炉内容積と高炉解体調査結果に基づいた炉内におけるコークス粒径低下率 ((装入粒径 - 羽口部採取粒径) / 装入粒径) との関係より、大型高炉ほど粒径低下率が大きいことを報告している²⁾ (Fig. 9)。上記の知見に対応して、高炉大型化にともない、冷間強度 (DI) の大きいコークスを使用している³¹⁾ (Fig. 10)。

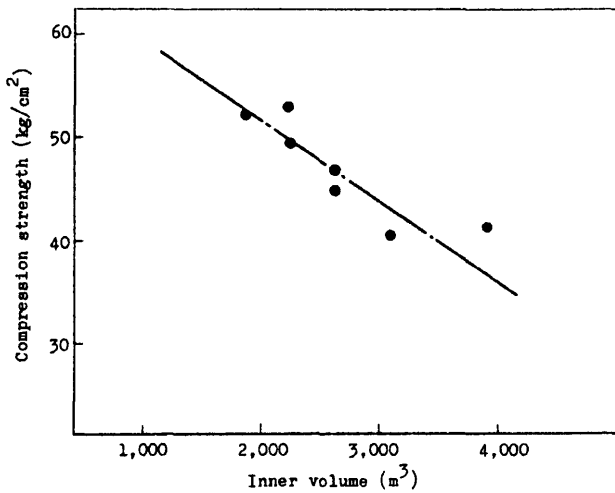


Fig. 8. Relation between inner volume of BF and compression strength of coke sampled at tuyere level during shut down.³⁰⁾

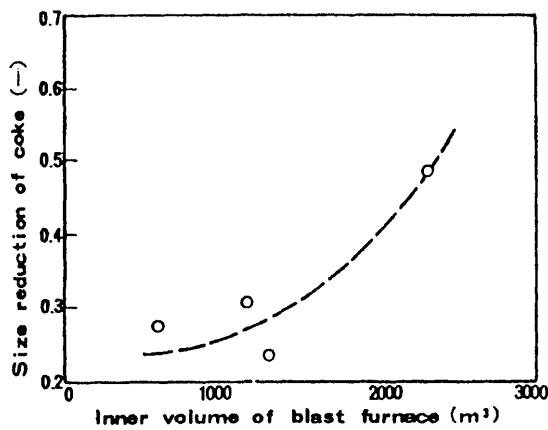


Fig. 9. Relation between inner volume of BF and size reduction ratio of coke in several BFs blown out.²⁾

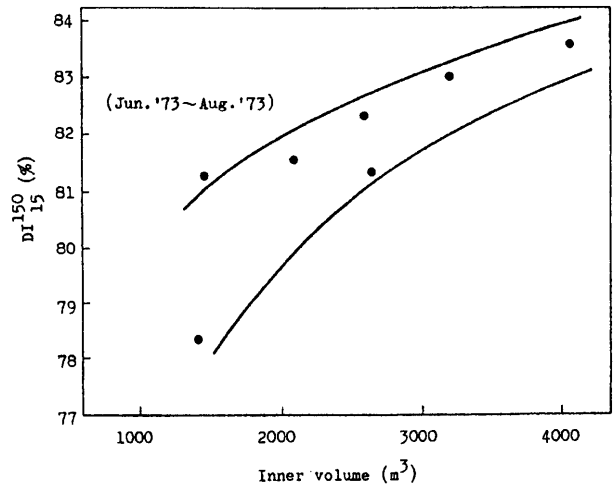


Fig. 10. Relation between inner volume of BF and cold strength of coke.³¹⁾

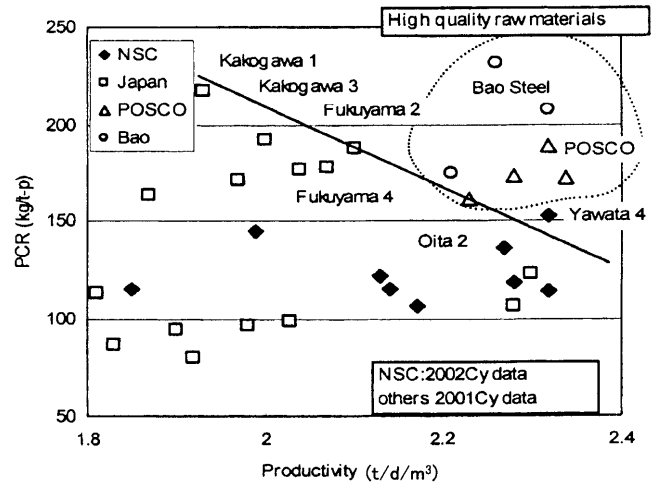


Fig. 11. Relation between PCR and productivity.³²⁾

4. 大型高炉における高生産低CR操業にて求められるコークス品質

4.1 高出鉄低CR操業を指向している高炉のコークス品質

国内外の高炉出鉄比とPCRの関係をFig.11に示す。国内の高炉でみると、出鉄比の上昇とともにPCRは低下しているが、Bao SteelやPOSCOの高炉では高出鉄比で200 kg/t以上の高PCRを達成している³²⁾。高PCR操業時の主要課題のひとつである高O/C操業下での安定操業は原燃料品質特に強度と粒度の影響を受ける。1999年の君津2高炉の高PCR操業は焼結鉱とコークスの冷間強度の上昇により達成されており、Bao SteelやPOSCOの高出鉄比高PCR操業はコークスの高冷間強度(DI=87~89)により達成されている³²⁾(Fig.12)。

4.2 炉内現象からみた高生産低CR操業におけるコークス品質

大型高炉における高生産、低コークス比操業での炉内現象から求められるコークス品質について以下に述べる。

大型化とともに、羽口中心レベルでのレースウェイ空間が占める面積を示す指標のひとつとして用いられている炉床有効断面積比率 $(\pi \times (\text{炉床径}/2)^2 - \pi \times (\text{炉床径}/2 - \text{レースウェイ深度})^2) / (\pi \times (\text{炉床径}/2)^2)$ が縮小している(Fig.13)。上記の現象が炉下部での装入物降下領域の相対的縮小による溶解能力の低下や伝熱の不足を招いて、炉芯不活性になる可能性がある。

上記現象を抑制するためには、原燃料品質の改善とともにレースウェイ深度の拡大と炉芯内へのガス流の強化が必要である。このためにはコークス品質の向上によるレースウェイ内での粉化抑制とあわせて羽口風速の上昇が必要である。

さらに高生産低CR操業下では、装入物の安定降下の観点から炉下部での通気性と通液性の確保が必要であり、出

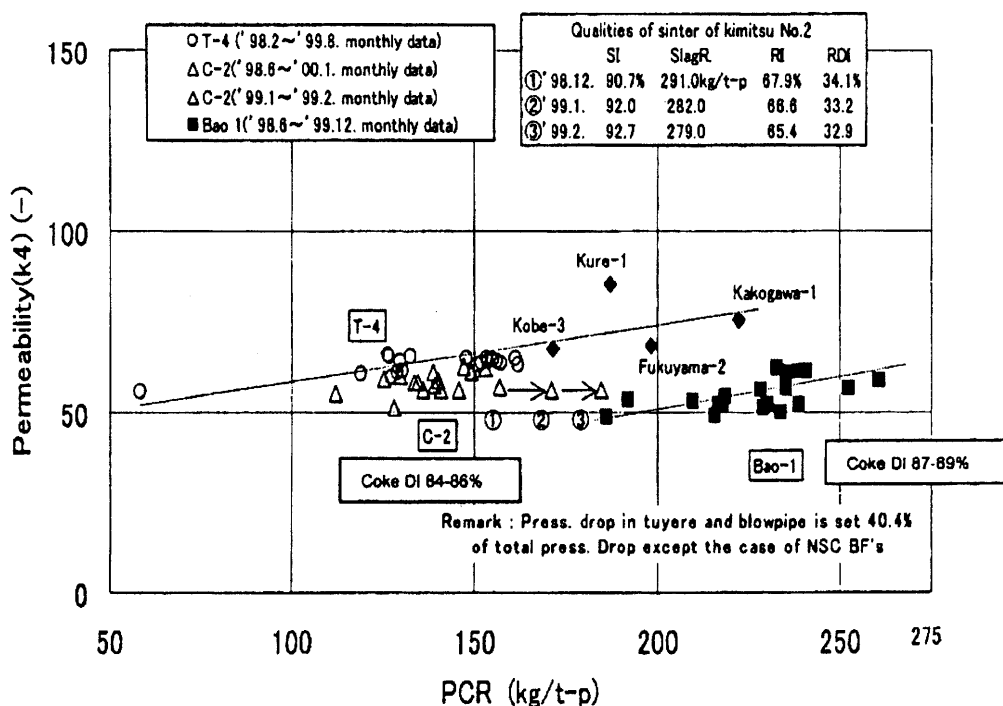
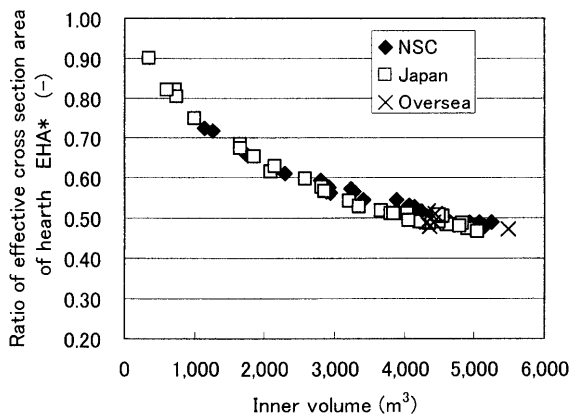


Fig. 12. Permeability of BF in Japan and Baosteel.³²⁾



$$* EHA = \frac{\pi \times (\text{Hearth diameter}/2)^2 - \pi \times (\text{Hearth diameter}/2 - \text{Raceway depth} (=1.5))^2}{\pi \times (\text{Hearth diameter}/2)^2}$$

Fig. 13. Relation between inner volume of BF and effective cross section area of hearth.

鉄滓の安定確保の観点から炉床での通液性の確保が必要である。そのためにはコークス粒度の上昇が不可欠である。しかし、コークス生産性上昇のためにコークス炉で実施している乾留温度上昇の手段は、コークス粒度を低下させる操作因子であり、両者を同時に満足することは難しい。したがって、炉芯に装入される限定されたコークスの粒度や強度を向上させる手段として、コークス中心装入法³³⁾への期待は大きい(Fig.14)。そのほかに、篩い目の調節による塊コークスの粒度上昇の結果、篩下に大量に発生する小塊コークスの装入方法も重要になる。

また、炉芯内の通気性と通液性の確保のためには、コークス品質だけでなく焼結鉱品質に起因する還元率、スラグ

の流動性を含む検討も必要である。

5. 低品位燃料多量使用技術の開発経緯と品質の改善について

5.1 最近10年間の石炭資源事情の変化と事前処理技術の開発

1990年度と2002年度の日本における石炭の輸入実績をFig.15に示す。米国、国内炭、カナダ炭の使用割合が減少し、豪州炭の使用割合が増加した。これは豪州での生産能力増に加え、日本が鉄源競争力向上の為にCIFベースでの安価炭（低品位炭も含む）の増大を図ってきたことに起因している。

日本では溶銹コスト削減のために安価石炭資源の活用を図り、石炭配合設計技術のほかに、石炭の事前処理技術の開発を推進してきた。具体的には、調湿炭技術、微粉炭成型技術、および石炭選択破碎技術等により、コークスの冷間強度を上昇させた。このコークス冷間強度上昇分を非微粘結炭増使用に振り向けて、非微粘結炭使用比率を大幅に上昇させ還元材コストを削減してきた(Table 1)。

5.2 水分低下によるコークス品質改善技術例

1983年にはCMC (Coal Moisture Control)技術が実機化された³⁴⁾。1992年にはDAPS (Dry-cleaned and Agglomerated Pre-compaction System)技術が実機化され、水分3~4%で非微粘結炭使用比率約40~50%を達成することが可能となった^{35,36)}。

石炭水分と嵩密度との関係はFig.16のような関係にあり、この嵩密度の向上によりコークス冷間強度(DI)を向上

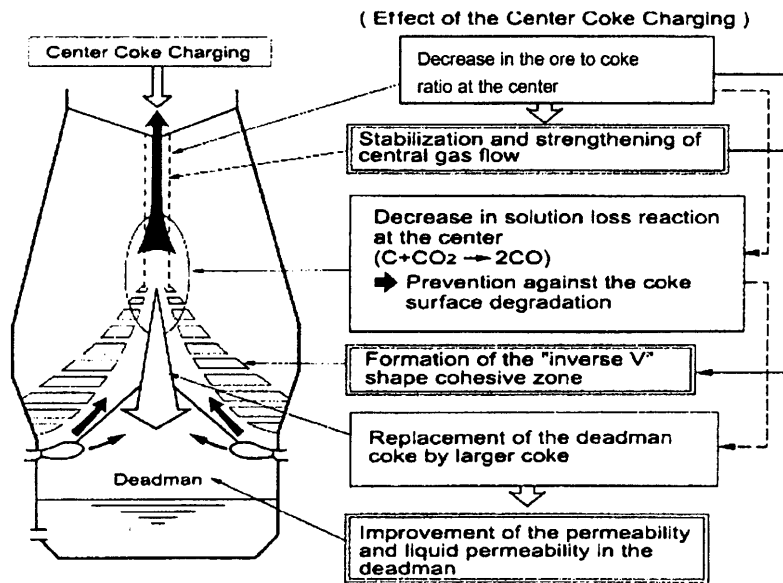


Fig. 14. Effect of center charging on temperature of hearth bottom and hearth wall.³³⁾

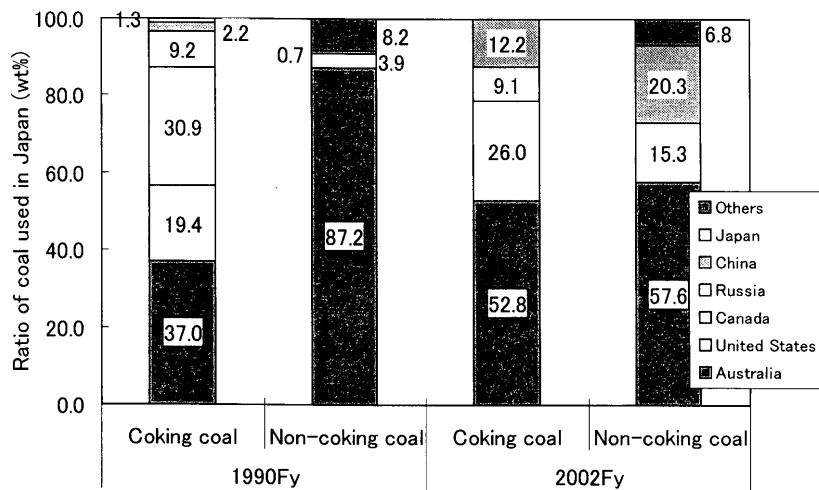


Fig. 15. Coal imported to Japan from overseas.

Table 1. BF operation and raw materials qualities data in Nippon Steel Corporation.

Operation and raw materials data	1990Fy	2002Fy
BF productivity (t/d/m ³)	2.07	2.09
Reducing agent rate (kg/t)	498	491
Coke rate (kg/t)	429	367
PCR (kg/t)	64	124
Ratio of non-coking coal (%)	13.9	51.2
Coal moisture (%)	8.5	5.1
Coke cold strength (%)	85.1	85.6
Ratio of pisolite ore (%)	16.2	32.5

させることができた。とくにDAPSでは微粉炭を成型することによりコークス炉での付着カーボン量が減少し、水分は2%レベルで130%の高稼働率を達成している。

変化する資源事情に柔軟に対応していくことは我々製鉄技術者の使命であるが、日本鉄鋼業はここ10年、とくに安価な劣質原燃料を使いこなすことにしのぎを削ってきた。これは量の伸びを期待できない中で、日本鉄鋼業の生

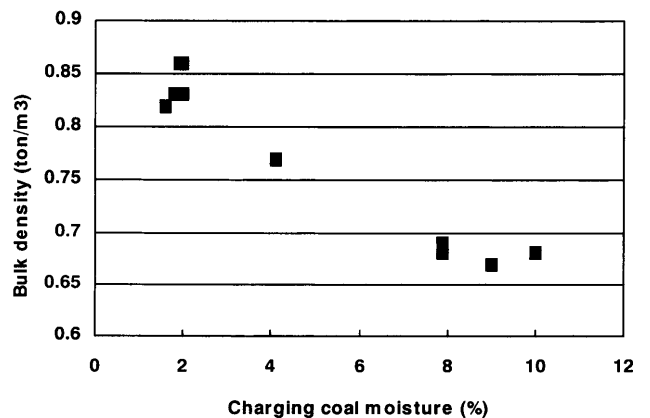


Fig. 16. Relation between coal moisture and bulk density of coal.

き残りのための努力であった。今後世界の高品位原燃料が枯渇していく中で低品位原燃料使用技術は優位な技術になるであろう。

6. SCOPE21 への期待

日本のコークス炉の炉寿命は稼動開始後の平均で32年である。最長炉令の炉が39年を迎える中で炉体の老朽劣化が進み、製鉄量および環境面で10数年内には順次炉寿命を迎えると予想されている。一方、中国を中心とした世界的な出鉄量の急激な伸びの状況下で、足元の強粘結炭の需給逼迫が進んでいる。資源量の豊富な非微粘結炭の利用拡大は一層強く望まれると同時に、中国からのコークス供給量も大幅に減少していくと予想される。このような資源状況と地球規模のCO₂削減要請が強まる状況下で製鉄プロセスに求められることは、製鉄工程内での低品位原料の使用割合の増大と限界的な低RAR（低CR）下での高生産安定操業の達成である。これらを可能とするコークス炉機能及び品質製造能力を有する次世代コークス炉がSCOPE21³⁷⁻³⁹であることが望まれる。そのための必要要件を下記に記載する。

①次世代コークス炉は、低品位原料を改質し、高品位コークスを製造可能な資源弾力性を有するプロセスである。とくに強粘結炭が枯渇していく状況下で、少なくとも50%以上は非微粘結炭を使用可能であることが求められる。

②省エネルギー（省コスト）プロセスである。CO₂問題等より省エネルギー問題は今後重要な課題となる。まずコークス炉プロセスとしての限界の省エネルギーを極めると同時に、品質適正化により原料から高炉までの一貫した省エネルギーの最適設計が重要になる。

③将来の高炉の低CR（高PCI）操業を支えるために高品位（とくに冷間強度、粒度等）コークスを供給できるプロセスである。世界の低CR操業の実績および今回整理したこれまでの炉内でのコークス品質劣化のメカニズムから判断して、高炉の大型化高生産性が益々要請される状況下では、コークス冷間強度は従来以上に重要になると予測される。炉下部での通気性と通液性は鉱石（焼結鉱）品質との組み合わせで適正化を図る必要がある。

④既存プロセスより長寿命化達成可能なプロセスである。コークス炉の寿命を律速する要因は炭化室の壁強度である。これを保持し続けるためには、レンガの構造や燃焼管理も含めた操業の安定性を保証する炉体設備と操業設計が重要となる。

⑤環境にやさしいプロセスである。NO_x、SO_x、煤塵濃度に加え、最近ではダイオキシン類濃度の規制管理も強化されている。これらの法規制値をクリアすることは当然として、将来を先取りしたプロセスであることが求められ

る。

7. 結言

日本鉄鋼業の製鉄分野の今後の課題は、今後原燃料の低品位化と枯渇が進行していく中で、省エネルギーを達成するために、合理化された大型高炉が限界的な低RAR（低CR）下で高生産安定操業を達成することである。

本解説では、コークス品質と高炉炉内解析に関する過去の知見に基づき、今後の高炉操業に対して求められるコークス品質について整理すると同時に、これを可能とする機能および品質製造能力を有する次世代コークス炉（SCOPE21）への必要要件を述べた。将来のSCOPE21実機化の考え方の一助となれば幸いである。

文 献

- 1) Y.Ishikawa: Some Consideration on the Operation of Large Blast Furnace, International Iron and Steelmaking Days on Sintering and Pelletizing, La Revue de Métallurgie, Paris, (1975).
- 2) H.Haraguchi, T.Nishi, Y.Miura, M.Ushikubo and T.Noda: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 2216.
- 3) K.Kanbara, T.Nagiwara, A.Shigemi, S.Kondo, Y.Kanayama, K.Wakabayashi and N.Hiramoto: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 535.
- 4) Y.Shimomura, K.Nishikawa, S.Arino, C.Katayama, Y.Hida and T.Isoyama: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 547.
- 5) M.Sasaki, K.Ono, A.Suzuki, Y.Okuno, K.Yoshizawa and T.Nakamura: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 559.
- 6) K.Kojima, T.Nishi, T.Yamaguchi, H.Nakama and S.Ida: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 570.
- 7) K.Sasaki, M.Hatano, M.Watanabe, T.Shimoda, K.Yokotani, T.Ito and T.Yokoi: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 580.
- 8) S.Hashizume, Y.Takahashi, K.Okumura, S.Tomita, H.Koitabashi, Y.Konishi, M.Kondo and Y.Motioka: *Kawasaki Tech. Rep.*, **11** (1979), 388.
- 9) K.Ezaki, Y.Abe, K.Iwatsuki, K.Imada, M.Takasaki and N.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), S50.
- 10) K.Takeda, K.Ikawa, S.Taguchi, M.Kiguchi, K.Seo and S.Tamura: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 10.
- 11) T.Fukutake, M.Kondo, Y.Konishi, K.Okabe and S.Hashizume: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), A13.
- 12) K.Yamaguchi, T.Uno, T.Yamamoto, H.Ueno, N.Konno and S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 641.
- 13) M.Shimizu, A.Kasai, T.Kamijo, H.Iwakiri, R.Ito and M.Atsushi: Private letter, (1995).
- 14) A.Kasai, J.Kiguchi, T.Kamijo and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 697.
- 15) Y.Ishikawa, M.Kase, Y.Abe, K.Ono, M.Sugata and T.Nishi: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 42, AIME, Warrendale, PA, (1983), 357.
- 16) K.Yamaguchi, M.Ichida, T.Shinoda and E.Tashiro: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 30.
- 17) K.Sunahara, T.Inada and Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1156.
- 18) S.Kubo, H.Yamada, M.Baba, N.Yadomaru and K.Kurihara: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), S70.
- 19) Carbonization of Research Report 91: The Evaluation of the Nippon Steel Corp. Reactivity and Post-Reaction-Strength Test for Coke, The British Carbonization Research Association, Derbyshire, (1980).
- 20) I.Kurashige, F.Nakamura, M.Hatano, Y.Iwanaga, H.Nomiyama, M.Kojima and Y.Aminaga: Private letter, (1984).
- 21) M.Naito, A.Okamoto, K.Yamaguchi, T.Yamaguchi and Y.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 357.
- 22) M.Ichida, K.Kunitomo, Y.Fujiwara, H.Kamiyama and Y.Morizane: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 860.

- 23) A.Kasai, K.Miyagawa, T.Kamijo, J.Kiguchi and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 239.
- 24) K.Takeda and N.Ishiwatari: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 123.
- 25) M.Sato, R.Murai, T.Ariyama, A.Maki, A.Shimomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 717.
- 26) M.Ichida, K.Tamura, Y.Hayashi, T.Nishi, H.Haraguchi and T.Sugiyama: *Seitetsu Kenkyu*, **335** (1989), 7.
- 27) K.Yamaguchi, U.Ueno, S.Matsunaga, K.Kakiuchi and S.Amano: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 148.
- 28) A.Maki, A.Sakai, N.Takagaki, K.Mori, T.Ariyama, M.Sato and R.Murai: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 650.
- 29) T.Matsuo, Y.Kanazuka, K.Hoshino, Y.Yoshida, S.Kitayama and S.Ishiwaki: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 56, AIME, Warrendale, PA, (1997), 203.
- 30) 大竹康元：第33・34回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，東京，(1975)，43.
- 31) 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)，108.
- 32) I.Ogata and M.Sanui: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **8** (2003), 818.
- 33) K.Kadoguchi, T.Goto, R.Ito, T.Yataba and M.Shimizu: *Kobe Steel Eng. Rep.*, No. 166 (1996), 60.
- 34) S.Wakuri, M.Ohno, K.Hosokawa, K.Nakagawa, Y.Takanohashi, T.Ohnishi, K.Kushioka and Y.Konno: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 45, AIME, Warrendale, PA, (1996), 303.
- 35) Y.Nakashima, S.Mochizuki, S.Ito, K.Nakagawa, K.Nishimoto and K.Kobayashi: Proc. 2nd Int. Cokemaking Cong., Vol. 2, The Institute of Materials, London, (1992), 518.
- 36) S.Tanaka, K.Okanishi, A.Kikuchi and Y.Yamamura: Ironmaking Conf. Proc., Vol. 56, AIME, Warrendale, PA, (1997), 56.
- 37) S.Kubo: Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., Vol. 3, CRM, Liège, (1996), 279.
- 38) K.Nishioka: Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., Vol. 3, CRM, Liège, (1996), 285.
- 39) M.Matsuura, M.Sasaki, K.Saito, K.Kato and I.Komaki: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 565.