

# 展望

## 今後の高炉操業においてコークスに求められる性状

Coke Properties Required for Blast Furnace Operation in Future

山口一良

Kazuyoshi Yamaguchi

(財)石炭利用総合センター 技術開発部 調査役  
(前 新日本製鐵(株)鉄鋼研究所)

### 1 はじめに

高炉においてコークスが果たす4つの役割(熱源、還元剤、浸炭源、通気・通液媒体)のうち、高炉内の通気、通液性を確保するスパーサーとしての役割が、高炉安定操業を維持するためにもっとも重要であることは、今さら言を待たない。すなわち、粉を発生せずかつ大塊であることにより、高炉の上部～中部において通気性を確保し、下部において通気、通液性を確保する役割であり、この役割を解明し劣化抑制技術を開発するために、高炉内におけるコークスの劣化機構「体積破壊(分裂)による細粒化、表面磨耗による粉生成」が研究されてきた。この研究は、コークス製造におけるコストダウン、石炭選択自由度拡大(一般炭使用量増加)に寄与するとともに、高炉操業の安定化、効率向上、極限追求、および環境問題への対処(CO<sub>2</sub>排出抑制)に対しても大きく貢献する。本展望では、微粉炭多量吹込み(>200kg/t-pig)を前提とした今後の高炉操業において、コークスに求められる性状に関する従来知見、特にコークス強度の変遷をレビュー、整理し、コークスとして具備すべき品質の提示を試みた。

### 2 コークス常温強度が高炉操業にとっていかに重要であったか?

過去における高炉操業に関する文献、図書等を紐解いてみると、安定操業の歴史はコークス常温強度確保のための努力であったといっても過言ではない<sup>1)</sup>。直近の「ふえらむ」に掲載されている日鉄輪西高炉の稼働経緯をみても、コークス強度(多分DI<sup>30</sup>と思われる)と銑鉄生産量の関係を把握しながら高炉操業をしていたと記述されている<sup>2)</sup>。

1709年に、Darby(イギリス)がCoalbrookdaleに建設した10m<sup>3</sup>の高炉でコークスを使用する試験に成功したが、その成功には種々の周辺環境の貢献<sup>3)</sup>および幸運があったと推

定される。当時イギリスでは、鉛、銅の製錬、真鍮、明礬、ガラス、レンガ製造の燃料として、すでに木材、木炭から石炭、コークスへの転換がはかられており、コークス使用に関する周辺環境ができていた。当時石炭の高炉での直接使用には成功していなかったが、Darbyはいきなり全量コークスを高炉に使用する試験を実施している。今では知る由もないが、高炉から約2マイル離れた場所で産出されたコークス製造のための石炭(土塊炭; Clod coal)は、硫黄含有量が低く、高炉に適した強度の高いコークスを製造できる粘結炭であっただろうと想像される(反応性の低いことが1つの検証データである)。高炉において必須の条件であるコークス常温強度確保が、コークス高炉法発明の段階ですでに備わっていたという事実はまさに幸運の極みであり、このときDarbyの使用したコークスが低い強度しかなかったとしたら、コークス高炉法の発明はさらに遅れていた可能性がある。

### 3 コークス常温強度としてのDI<sup>150</sup>制定は適正であった

コークス常温強度を表す指標を制定し、その指標を確保したコークスを製造することは、高炉の安定操業上極めて重要であることは前述したとおりである。常温強度を制定するための潰裂強度試験の歴史をみると<sup>1)</sup>、すでに大正初期に、コークスを鉄板上に落下させ15mm以上の歩留りを指標とする試みがなされている。これはコークスが輸送中および高炉の炉頂部から炉内に装入、落下するときの耐性を模擬、確保する目的をもっていった。その後1925～26年にドラムが製作され、回転数15rpmによる潰裂強度(Drum Index; DIと略す)が制定されたが、その指標は30回転(DI<sup>30</sup>)であった。この方法が1951年にJIS法として制定されている。

DIの指標としての最適化の研究は、1962～64年に八幡製鐵(株)技術研究所の城らによって詳細になされ、150回転

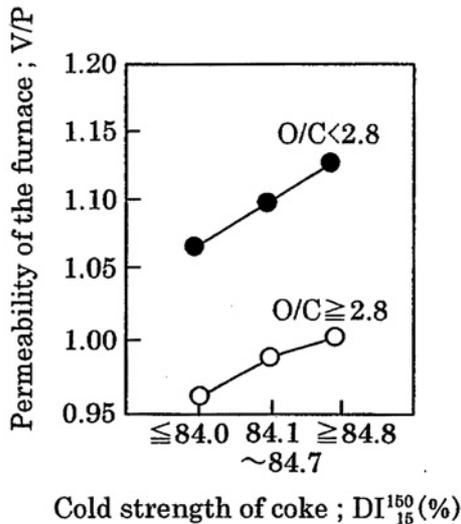


図1 コークス常温強度と高炉通気性の関係(東田1高炉)

(DI<sub>150</sub>) が推奨されて<sup>4)</sup>、1972年に30回転とともにJIS法として改正されている。その研究の骨子は、コークスの具備すべき性状は、体積破壊による分裂がし難くかつ磨耗による粉生成が少ないことであるとの概念を基にしており、最終的に当時の東田1高炉(内容積892m<sup>3</sup>)において、通気性(送風流量と送風圧力との比; V/P)との明確な相関関係が得られたことが決め手となった(図1参照)が、150回転指標の検出感度が高く、バラツキが小さいことも推奨の理由として挙げられた。回転数を増加させた指標が推奨されたということは、輸送中および装入、落下するときの耐性に加えて、高炉炉内における荷重、剪断等の衝撃に対する耐性をも考慮したことになる。コークスが高炉内(炉下部滴下帯およびレースウェイ内)で受ける衝撃力をDI測定用ドラムの回転数に換算すると<sup>5,6)</sup>、トータル105回転(60+25+20回転)となる。この値は150回転に比較的近く、城らの設定したDI<sub>150</sub>は、高炉用コークスの品質指標として適正であったといえることができる。

その後の高炉操業解析結果でも、150回転指標(DI<sub>150</sub>)と高炉通気性の相関関係は明瞭に得られており<sup>7)</sup>、以来新日本製鉄(株)を始めとする鉄鋼各社は150回転の指標を一貫して使用している。

#### 4 高炉の大型化のためにコークス常温強度の上昇は必須であった

高炉内容積が拡大されるに伴って、炉内で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当然予想されたが、定量的把握にはなかなか至らなかった。内容積の異なる高炉の羽口部より採取したコークスの圧裂強度が、大型高炉ほど低下している現象(1975年)<sup>8)</sup>は

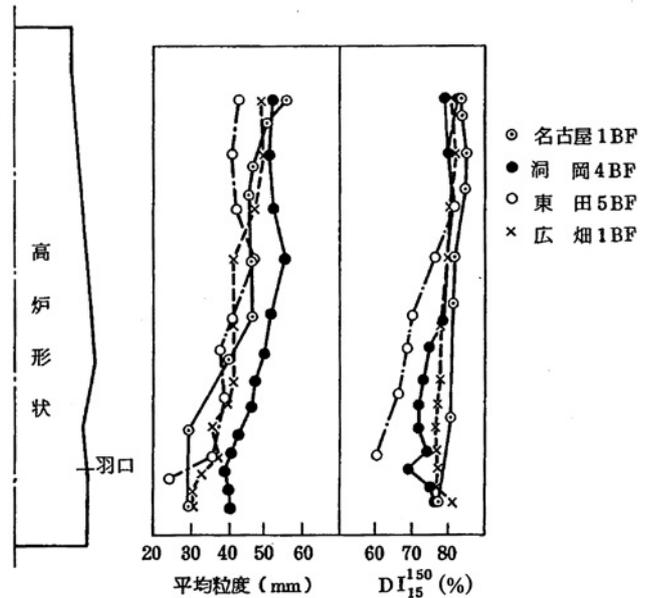


図2 高炉内におけるコークスの性状変化(高炉解体調査結果)

大型高炉でのコークス劣化の激しさを示唆している。また、内容積の異なる4基の高炉の解体調査による、高さ方向の粒径と常温強度(DI<sub>150</sub>)の推移(図2参照)によると、小型高炉(東田5高炉、内容積646m<sup>3</sup>、○印)と比較して、大型高炉(名古屋1高炉、内容積2,520m<sup>3</sup>、◎印)のほうが、炉内における粒径変化が大きく、かつDI<sub>150</sub>の高いコークスが存在しており(1984年)<sup>9)</sup>、大型高炉ほど炉内における荷重、衝撃力が大きいため、弱いコークスは細粒化、粉化してしまい、粒径が小さくDI<sub>150</sub>の高いコークスが残ったことを示している。

しかし、内容積2,000m<sup>3</sup>級大型高炉の建設は1960年頃より始まっており、上述した定量的データの出る前に、高炉大型化とともにDI<sub>150</sub>を上昇させて対処している<sup>7)</sup>。理論より実践が先行した製鉄技術の流れの典型といえる。

#### 5 第1次石油危機は高炉の寿命を縮めてしまった?

1973年暮に勃発した第1次石油危機により、重油価格は約4.5倍に高騰した<sup>10)</sup>。1960年代より使用を開始し徐々にその使用量を増大させていた重油比は、石油危機直前に60kg/t-pigに達していたが、重油価格上昇に伴う使用量低下は30kg/t-pig程度までに止まり、かつ高炉の出銜量もそれほど減少させる必要はまだなかった。このため重油比低下に伴うコークス所要量の増加により石炭需給が逼迫し、通常石炭購入ルートだけでは間に合わなくなった。これに対処するため、いわゆるスポット炭と称してアメリカ西部炭を中心とした買い付けが行われたが、量の確保が最優先であった

から、それまで購入の条件としていた灰分、硫黄含有量等の基準を緩めることはもとより、いわんや常温強度を確保するための粘結性等の条件は論外であった可能性がある。

このとき、SI-CBI 線図を利用した石炭配合設計による常温強度 (DI%) の推定<sup>1)</sup>により、コークス常温強度低下を極力抑制したが、経験則によるこの手法は、特殊な石炭を使用する場合や、コークス炉の乾留条件、石炭事前処理条件によっても線図が変わるため精度はあまり良くなく、結果としてコークス強度は低下した。とくにコークス熱間強度 (Coke Strength after Reaction ; CSRと略す) に関しては、図3に示すように、各単味炭データを用いた加算計算から推定した値に対して、スポット炭を多量に配合した場合は実績値が大幅に低下し (○印)<sup>11)</sup>、常温強度以上に低下幅が大きかった。

高炉の生産性が高い状態のままコークス強度が低下したた

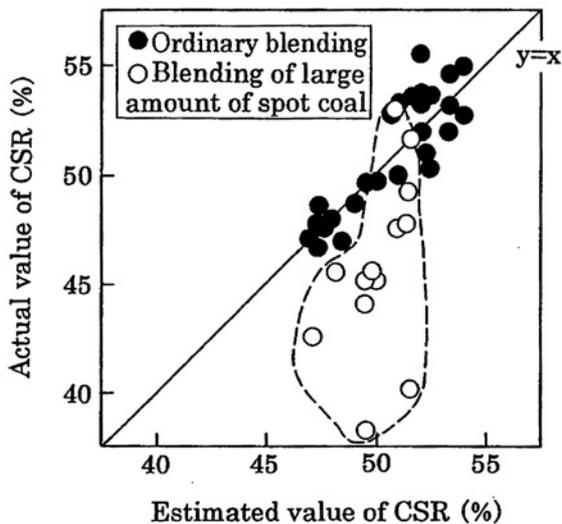


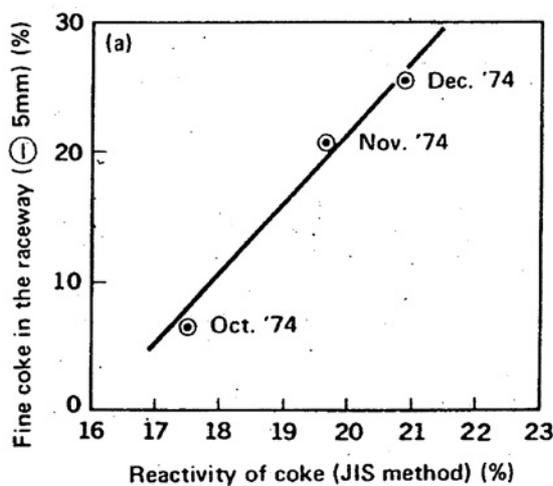
図3 コークス熱間強度 (CSR) の推定値と実績値の関係

め、高炉においてコークス粉が多量に発生し、羽口部レースウェイの奥に蓄積した。その結果、高炉の周辺ガス流が発達し炉壁部レンガを侵触したため、石油危機により高炉寿命は短くなったと推定されているが、残念ながら定量的な評価に至っていない。ただし SI-CBI 線図による石炭配合設計の適用がなかったら、コークス強度はさらに低下していたものと思われ、高炉寿命に及ぼす影響ははかりしれない。本推定法の適用は極めてタイムリーであったと思われる。

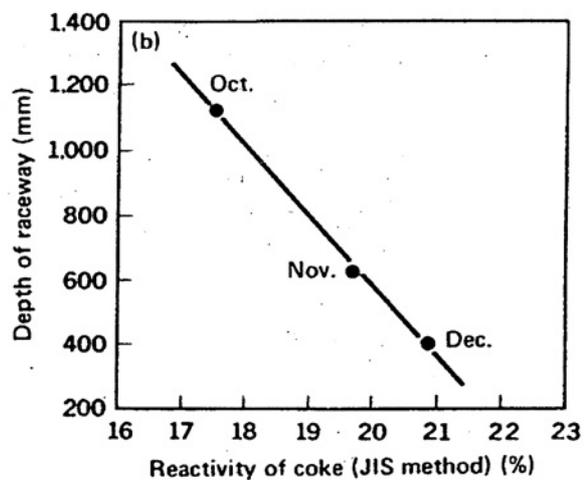
## 6 第1次石油危機は新しいコークス品質指標を生み出した

スポット炭購入によるコークス強度低下の影響が極端に現れたのが、羽口部レースウェイの形状変化であった。R. H. Sweetserによる Rod test<sup>12)</sup>を発展させた羽口コークスサンプリング<sup>7)</sup>により、鉄パイプを高炉の休風時に羽口部から炉内に挿入し、レースウェイ内のコークスを採取しその性状を調査した。1974年に採取し2つ割りにしたパイプ中コークスの外観をみると、驚くべきことに、レースウェイ深度を示す羽口先端から粉の存在位置までの距離が3ヶ月の間に急激に短くなっていった。とくに1974年12月の深度は0.4mであり、それまで1.0m以上は確保されていた値に対して極端に短く、遅かれ早かれこの後の高炉安定操業の支障となることは目にみえていた。図4に示すように、JIS反応性が高いほどレースウェイ深度が浅く、レースウェイ内コークス中の粉の量 (-5mm) は多くなっている<sup>7)</sup>。すなわち、コークス反応性の増大とともに高炉内におけるコークス粉化が助長され、粉蓄積によりレースウェイを変形させたことを意味する。

JIS反応性は0.9~1.7mmの小粒コークスを試料とした



(a) Relation between degradation of coke in the raceway ( $\ominus$  5mm) and reactivity of coke (Kimitsu No. 3BF).



(b) Relation between depth of raceway and reactivity of coke (Kimitsu No. 3BF).

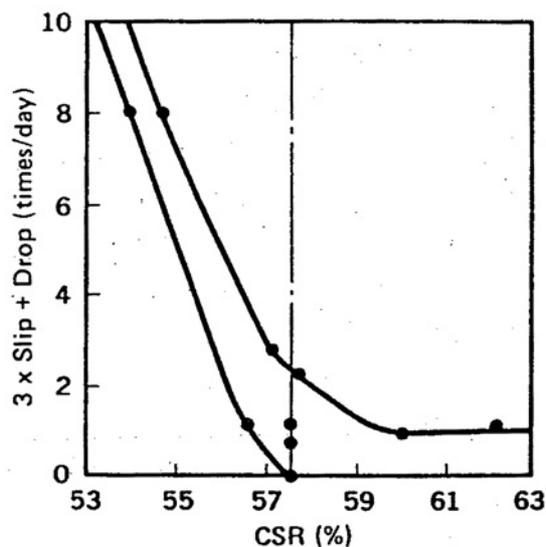
図4 JIS反応性のコークス劣化およびレースウェイ深度に及ぼす影響 (君津3高炉)

950℃における測定値であり、高炉内におけるCO<sub>2</sub>ガス化反応のしやすさを示す指標である。これに対して、高炉内の実態により近い指標として10～15mmの塊コークスを試料として1,000℃において反応させながら回転衝撃力を与え(30rpm、3,450回転)、+6mmの歩留で表示する方法が、すでに1969年に検討されている<sup>13)</sup>。これを基にさらに検出感度を増大させたのが、1,100℃でCO<sub>2</sub>により2h反応させ、冷却後I型ドラムで回転衝撃力を与え(20rpm、600回転)、+10mmの歩留で表示する方法であり、現在使用されているCSRとして提唱された<sup>14)</sup>。CSRの低下とともに高炉の通気性悪化はどの高炉でもみられたため、DI<sup>50</sup>とともにCSRを確保するコークス製造が行われた。

## 7 コークスの常温強度と熱間強度の高炉操業に及ぼす影響の分離戦略が実行された

常温強度(DI<sup>50</sup>)、熱間強度(CSR)ともに高炉の通気性に大きな影響を及ぼすことが実炉で確認されたため、両方の指標を導入してコークス品質管理を実施するようになった。DI<sup>50</sup>を高める強粘結炭は従来どおりの購入基準、ルートで済んだが(アメリカ中心)、CSRを高める炭は、従来の購入ルートと異なる豪州、カナダにシフトし、その価格は決して安くはなかった。そしてこれらの炭を配合してコークスを製造するとDI<sup>50</sup>とCSRは比例的に変化し、高炉操業に及ぼす影響の分離ができなかった。両者の影響が分離できれば石炭の購入基準、ルートに反映させられるとの購買部門の思いと、高炉操業者の技術的興味が一致して、いわゆるCSR変更高炉操業試験が1981年にはじめて新日本製鐵(株)君津3高炉で実施された<sup>15)</sup>。

原料炭の配合変更により、DI<sup>50</sup>一定(85.5%)でCSRを変更した(57→54→62%)コークス製造、高炉使用試験の企画、実行であり、当時としては画期的な試みであった。この試験で判明した成果は次の3つである。その1つは、CSRがある限界値(この試験では57%)を下まわると装入物降下性が急激に悪化する現象であり(図5参照)、従来の高炉操業解析ではみられなかったクリティカルに変化する現象であった。CSR=54%に低下したとき、休風時に炉腹部で採取したコークス中の粉(-3mm)の量が多く、これを装入物降下性悪化の原因と特定したが、羽口部で採取したコークス中の粉の量はむしろ減少しており、ある期間経過後に増加している。この現象を説明するために提唱されたのがコークス粉移動説であり、これが2つめの成果である。すなわち、CSRが低下すると直ちに炉腹部で発生する粉が増加しその領域に蓄積するが、この蓄積粉が7～22日のタイムラグをもって羽口部に降下してくるという仮説である。3つめは、高炉内容



Relation between CSR and burden descent (Kimitsu No. 3 BF).

図5 コークス熱間強度(CSR)と装入物降下性の関係(君津3高炉)

積によってCSRのレベルを変更すべきであるという成果であった。

これらの成果は、その後の新日本製鐵(株)の石炭購入の基準に取り入れられ、結果としてCSRを高める炭を購入しコークス製造コストを上昇させることになってしまった。ただしCSRを導入してコークス品質管理を行っているのは、新日本製鐵(株)を始めとする5社だけであり、NKK、川崎製鐵(株)は通常は測定を行っておらず、この指標の普遍性に対する疑問と、現状のコークス品質評価の不十分さが現れている。

このような高炉操業試験は、その後住友金属工業(株)鹿島1高炉<sup>16)</sup>、NKK福山3高炉<sup>17)</sup>でもCSRの変化幅をさらに大きくして行われ、鹿島1高炉の結果は君津3高炉とほぼ同じであったが、福山3高炉では大きな操業上の変化は検出されなかったと報告されている。ただしこれらの高炉操業試験は、オールコークス(君津3高炉)、タール比15～25kg/t-pig(鹿島1高炉、福山3高炉)の操業条件下で行われており、コークス単位重量当りのソリューションロス反応量は25mass%程度と、現状の微粉炭多量吹込み操業(<20mass%)に比較して高い。これはCSRの影響が非常に検出しやすい操業条件を偶然採用したということであり、もし現在同じ試験を実施したとしたら、もう少し検出感度が落ちていた(影響の出方が少ない)可能性がある。

## 8 微粉炭多量吹込みはコークス常温強度の上昇を伴った

微粉炭吹込み量の増加とともに高炉の通気性が悪化し、そ

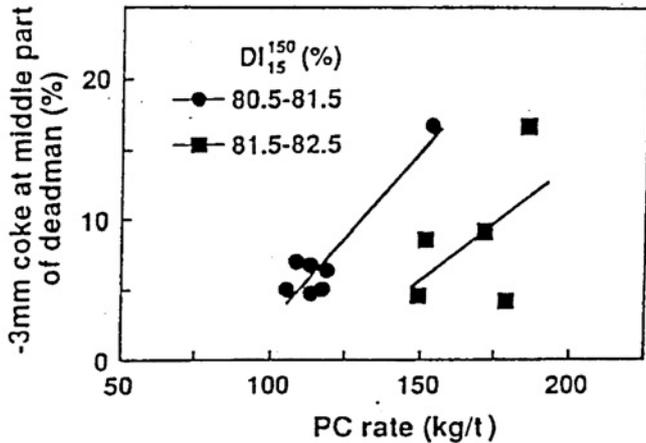


図6 微粉炭比、炉芯中間部の粉率（-3mm）、コークス常温強度の関係（神戸3高炉）  
（PC：Pulverized Coal）

これは高炉羽口部（炉芯中間部）のコークス粉（-3mm）の量の増加のためであり<sup>18)</sup>、コークス常温強度（DI<sup>150</sup>）を上昇させることにより粉の量の増加を抑制できる（図6参照）ことを、1993年にはじめて提唱したのが（株）神戸製鋼所である<sup>19)</sup>。この事実は、その後の微粉炭多量吹込みを実施した各社の高炉において、コークス常温強度向上というアクションに反映されている貴重な成果である。

しかし、コークス粉の量が増加する理由に対する回答は与えられておらず、やはり理論より実践が先行した製鉄技術の流れの典型であるが、それに答えたのが1996年に発表された論文<sup>20)</sup>である。それによると、微粉炭比 118kg/t-pig に比べて 203kg/t-pig の場合は、炉下部滴下帯で 20mass% のCO<sub>2</sub>ガス化によりコークス粒子表面に生成した劣化層は、レースウェイ内に侵入してからO<sub>2</sub>による消費がなく、かつレースウェイ内におけるCO<sub>2</sub>ガス化による反応量が多いため、粒子表面に劣化層が厚く生成するためと推定している。

## 9 実炉においてコークス粒径低下を支配している要因は何か？

実炉解体調査<sup>9)</sup>、休風時羽口部採取コークス調査<sup>21)</sup>の結果から、微粉炭多量吹込み（～200kg/t-pig）時における炉下部滴下帯でのコークス平均粒径低下量は、19mm程度と見積もられる<sup>5)</sup>。しかし、20mmに破碎、整粒したコークスを用いた、炉下部でのCO<sub>2</sub>ガス化（20mass%）による粉生成（Max.17mass%）の結果としての粒径低下量は高々7mmであり<sup>5)</sup>、実炉での値よりはるかに少ない。また粒径50mmのコークスは炉下部で体積破壊（分裂）により細粒化するが、この体積破壊はガス化に影響されず<sup>22)</sup>、このときの粒径低下量は7.5mmであり、ガス化による粒径低下量7mmと合わせて14.5mmとなるが、実炉での値よりまだ少ない。体積破壊

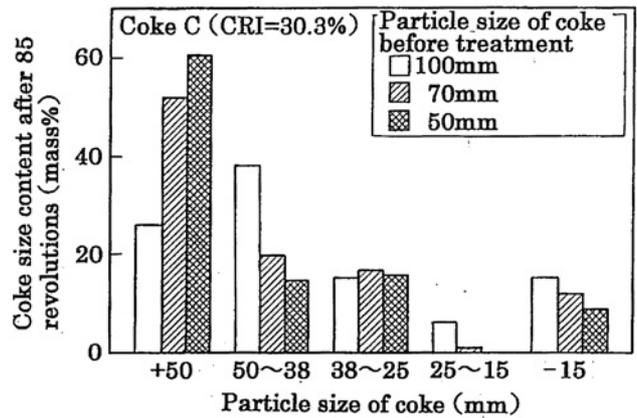


図7 種々の粒径のコークスを用いたドラム85回転後の粒径分布

を支配している要因の1つは、西村ら<sup>23)</sup>の提唱している平均気孔壁厚さである<sup>22)</sup>。

次に、粒径100、70、50mmのコークスを、ガス化せずDI測定用ドラムで85回転させた後の粒径分布をみると<sup>22)</sup>、いずれの粒径も体積破壊を起こし、粒径の大きいコークスほど粒径低下量が大きく、-15mmの生成量が多い（図7参照）。この結果を用いて、体積破壊による粒径低下量を計算すると14mmとなり、ガス化による粒径低下量7mmと合わせて21mmとなるから、実炉での値をほぼ説明できる<sup>22)</sup>。すなわち、実炉の炉下部滴下帯におけるコークス粒径低下は、装入物荷重等による体積破壊の結果としての細粒化と、CO<sub>2</sub>による20mass%ガス化、表面磨耗の結果としての粉生成によって起こり、体積破壊の影響のほうが大きい。

## 10 コークス品質として設定可能な新しい劣化支配要因はあるのか？

炉下部滴下帯における体積破壊による細粒化が、コークス粒径低下に及ぼす影響がもっとも大きいことは前述したが、粒径の大きいコークスほど粒径低下量が大きいこと、体積破壊を支配している要因の1つはコークスの平均気孔壁厚さであり、気孔壁厚さが厚いほど壁の強度が高いことを除いて、現在判明している知見はない。

レースウェイ内における体積破壊による細粒化は、この領域におけるコークス劣化を模擬した実験結果<sup>6)</sup>によると、図8に示すように、細粒（1～9mm）生成率で層別した全気孔量（-400μm）と微細気孔比率（-10/+10μm）の関係において、⊗印で示す細粒生成率の低いプロットには、全気孔量が少なく微細気孔比率の大きい群と、全気孔量が多いが微細気孔比率は低い群が存在し（図中の斜線で示す領域）、コークス反応性（Coke Reaction Index；CRIと略す）で層別されない（図中のローマ字はコークスの種類を示す記号で

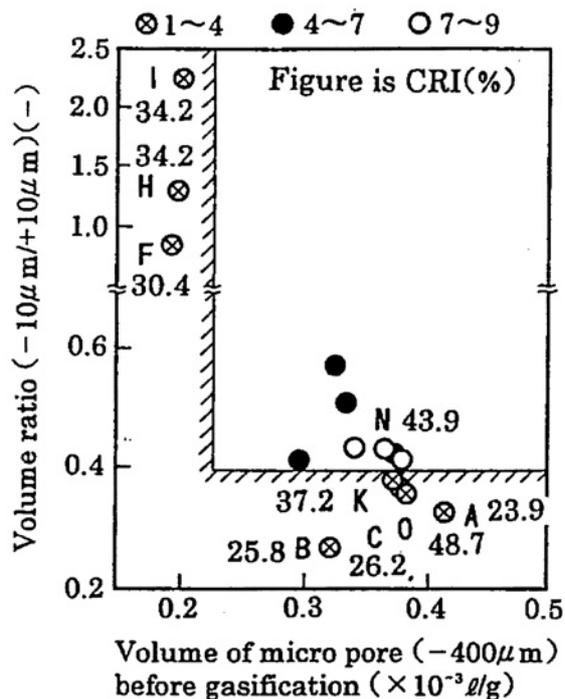


図8 コークスの全微細気孔量、微細気孔比率、細粒生成率(1~9mm)の関係(レースウェイ内)

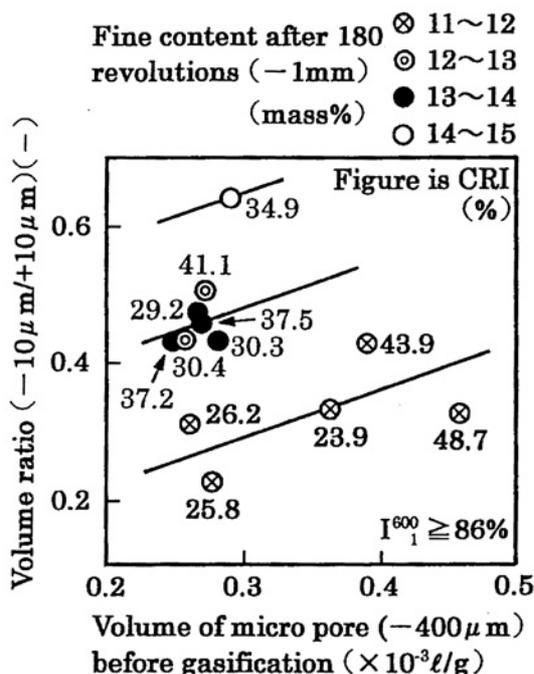


図9 コークスの全微細気孔量、微細気孔比率、粉率(-1mm)の関係(炉下部滴下帯)

ある)。前者は、全気孔量が少ないため $-10\mu\text{m}$ を含む気孔中にガスが侵入し難く、後者は、ガスは $+10\mu\text{m}$ の気孔中に侵入するが相対的に少ない $-10\mu\text{m}$ の気孔中にまでは侵入し難い。すなわち、 $-10\mu\text{m}$ の気孔中にガスが侵入し難い構造をもつコークスが、体積破壊による細粒化がし難いことになる。

次に、炉下部滴下帯、レースウェイ内のいずれにおいても、表面磨耗による粉生成に影響を及ぼす主たる反応は $\text{CO}_2$ ガス化であり、熔融 $\text{FeO}$ との接触還元、熔融金属との接触浸炭の影響は小さい<sup>5)</sup>。

炉下部滴下帯における表面磨耗による粉生成は、図9に示すように、粉率(-1mm)で層別した全気孔量と微細気孔比率の関係において、 $\otimes$ 印で示す粉率の低いプロットは同じ全気孔量でも微細気孔比率が小さく、CRIで一義的に決まらない<sup>5)</sup>。 $\otimes$ 印で示すプロットのうち、全気孔量が少なく微細気孔比率が低いコークスは、ガスが気孔中に侵入し難く反応性が低い(CRI=23.9~26.2%)。一方、全気孔量が多く微細気孔比率が低いコークスは、ガスが $+10\mu\text{m}$ の気孔中に侵入し反応性が高い(CRI=43.9~48.7%)。CRIが低いと反応が粒子表面に限定されるため、CRIが高いと反応が粒子内部に拡大して分散されるため、いずれも粉生成が少ない。また図10に示すように、粉生成を抑制するために常温強度( $I_1^{600}$ )に下限値(86%)が存在する。

レースウェイ内における表面磨耗による粉生成は、図11に示すように、細粒生成の多いコークスからの粉生成は多く、

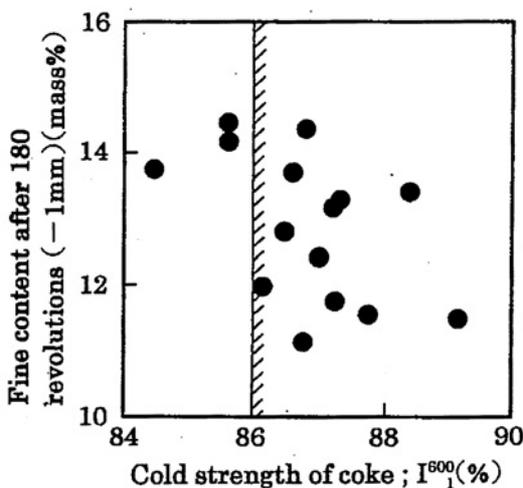


図10 コークス常温強度と粉率(-1mm)の関係(炉下部滴下帯)

粉生成を抑制するために常温強度( $I_1^{600}$ )に下限値(85%)が存在する<sup>6)</sup>。細粒生成の多いときは、ガスが $-10\mu\text{m}$ 気孔中に侵入して反応し、気孔壁薄少化をもたらすと同時に $-10\mu\text{m}$ の気孔量が増大し、分裂した細粒、および残存塊の表面(ガス化により劣化している)から、表面磨耗により粉が生成する。表面磨耗による粉生成を支配している $I_1^{600}$ は、 $\text{TI}^{400}$ と同一の概念で示される指標であり(TI: Tumbler Index)、 $\text{TI}^{400}$ が高いほど炉芯コークス中の粉(-5mm)は低下し<sup>24)</sup>、 $\text{TI}^{400}$ は気孔壁強度(Pai)と気孔率(Por)で設計できる<sup>25)</sup>。ここでPaiはコークスの引張強度( $\sigma$ )を表す指標である。

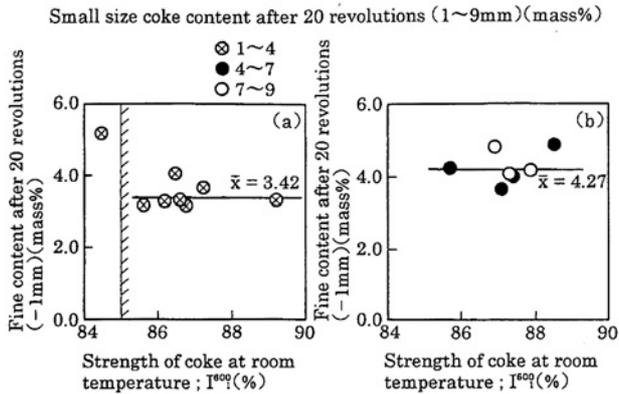


図11 細粒生成率(1~9mm)で層別したときのコークス常温強度と粉率(-1mm)の関係(レースウェイ内)

以上述べたように、コークスの平均気孔壁厚さ、常温強度( $I_1^{600}$ 、 $TI^{400}$ )、 $-400\mu\text{m}$ の微細気孔径分布がコークス劣化を支配する新しい要因として浮上した。これまで管理指標としてきた常温強度( $DI^{150}$ )、熱間強度(CSR)とは明らかに異なる品質であり、これら要因の制御可能性、および制御技術の開発は今後の大きな研究課題である。そして常温強度はともかく、平均気孔壁厚さ、微細気孔径分布を適正に表す新しい品質指標を設定する必要がある。

## 11 今後の高炉操業においてコークスとして具備すべき強度上昇以外の品質はあるのか？

高炉内で劣化により発生したコークス粉は、上昇ガス流および装入物降下に伴い炉内を移動するとともに、炉内に蓄積して通気、通液性を阻害する。したがってコークス粉の発生抑制、消費促進は、高炉安定操業にとって重要な課題である。シャフト下部~炉腹部において粉の発生量が増加し蓄積すると、装入物降下異常を誘発する<sup>15)</sup>。一方、羽口部炉径方向においては、炉芯中間部の粉が通気性を支配しており、中心部、レースウェイ内の影響は小さい<sup>18)</sup>。

微粉炭多量吹込み時に発生する未燃チャーはコークス粉に比較して反応性が高いため、 $\text{CO}_2$ ガス化あるいは熔融 $\text{FeO}$ との接触により優先的に消費されることがモデル実験で確認されている<sup>26,27)</sup>。一方コークス粉の消費に関する研究は少なく、水蒸気添加による消費効果がモデル実験<sup>15)</sup>、実炉解析<sup>28)</sup>の結果として報告されている程度である。コークス粉は、 $\text{CO}_2$ ガス化、熔融 $\text{FeO}$ との接触、熔融メタルとの接触浸炭により消費されると考えられ、今後これらの要因の影響の定量的把握が必要である。しかし、実炉における水蒸気添加のようなコークス粉の消費策は、操業上期待できない可能性が大きく、コークス粉の発生抑制は大きな課題である。

コークス粉の発生抑制策として、常温強度(DI)、熱間強

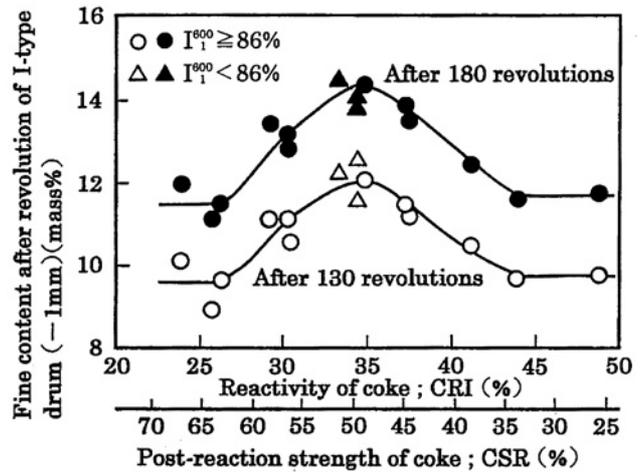


図12 コークスの反応性(CRI)、粉率(-1mm)、ドラム回転数の関係(炉下部滴下帯)

度(CSR)の向上、粒径の上昇<sup>29)</sup>は、コストアップとなるものの今後とも切り札的アクションとして採用され则认为られる。一方、微粉炭燃焼性向上<sup>30,31)</sup>、未燃チャーの優先的消費<sup>27)</sup>、小塊コークスの鉄鉱石中への混合および小塊コークスの高反応性化<sup>32)</sup>による塊コークス保護に関しては、高炉操業技術面からのアクションである。さらに、反応性(CRI)上昇は熱間強度(CSR)向上とは相反する現象であり、その機構解明とコークス製造技術の開発は今後の課題であるが、DI、CSR向上に比較して、炭種拡大によるコークス製造コスト低減の可能性を持ち、実現すれば有望な策である。

モデル実験では、常温強度を確保すればCRI上昇により炉下部滴下帯、レースウェイ内でコークス粉の発生抑制ができる結果が得られている<sup>5,20,33,34)</sup>。図12は炉下部滴下帯における結果であるが、CRIが40%を超えると粉率(-1mm)が低下している<sup>5)</sup>。レースウェイ内においては、常温強度( $DI^{150}$ )が高くかつCRIの高いコークスからのダスト生成量が少ない<sup>33)</sup>。高炉炉下部を模擬したモデル実験結果では、CRIを40%まで上昇させると朝顔部、炉芯内ダスト濃度はいずれも減少する<sup>20)</sup>。また(株)神戸製鋼所神戸3高炉の実炉解析の結果では、CRIが35~40%と高いほうが、同じソリューションロスカーボン量で比較して炉芯中間部の粉が少ない<sup>35)</sup>。これらの結果は、CRIはコークス粉の発生に対して極値を持ち(図12参照)、コークス劣化、粉生成がCRIで一義的に決定されないことを示唆する。反応性向上策に関しては、今後強度維持を前提としたコークス製造技術開発が重要である。

## 12 おわりに

高炉の安定操業を支えるコークス性状、とくに強度に関す

る歴史的変遷をレビュー、整理し、今後の高炉用コークスとして具備すべき品質について考察した。従来の強度一辺倒であった経緯に対して、新しい支配要因出現の可能性、および反応性に着目した品質を提示したが、結果として強度維持という前提条件が付いたことを考えると、今後のコークス品質として「適正強度+反応性向上」という目標に対して、ミクロ的な気孔壁性状(強度、厚さ)、微細気孔径分布の評価、制御がキーワードといえる。

#### 参考文献

- 1) わが国における製鉄技術の進歩(特別報告書No.24), 日本鉄鋼協会共同研究会製鉄部会, コークス部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1977), 103.
- 2) 久田清明:ふえらむ, 6 (2001) 2, 91.
- 3) J. E. Rehder: I & SM, 25 (1998) 12, 29.
- 4) 城 博, 井田四郎, 小林正俊, 仲摩博至, 宇都宮又市, 栗田 豊, 吉見克英, 武居和人, 相浦光典:私信, 新日本製鐵(株), (1962~64)
- 5) 山口一良, 鶴野建夫:日本エネルギー学会誌, 78(1999), 760.
- 6) 山口一良, 鶴野建夫:鉄と鋼, 85 (1999), 578.
- 7) 新日本製鐵(株) 君津製鉄所:大型高炉におけるコークスの役割, 日本鉄鋼協会共同研究会製鉄部会(鉄50-21-自), 日本鉄鋼協会, 東京, (1977)
- 8) 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.
- 9) 原口 博, 西 徹, 美浦義明, 牛窪美義, 野田多美夫:鉄と鋼, 70 (1984), 2216.
- 10) 原燃料からみたわが国製鉄技術の歴史(特別報告書No.37), 日本鉄鋼協会鉄鋼科学・技術史委員会製鉄ワーキンググループ編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1984), 85.
- 11) 新日本製鐵(株), 大阪ガス(株):最近の原料炭状況におけるコークス性状について, 日本鉄鋼協会共同研究会製鉄部会コークス分科会(コ9-A (1.6.10.22) -共I), 日本鉄鋼協会, 東京, (1974)
- 12) R. H. Sweetser: Blast Furnace Practice, McGraw-hill Book Co., Inc., New York & London, (1938), 144.
- 13) 城本義光, 松岡 宏, 木場崇一, 米沢賢一:コークスサーキュラー, 18 (1969) 4, 126.
- 14) Carbonization 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)
- 15) Y. Ishikawa, M. Kase, Y. Abe, K. Ono, M. Sugata and T. Nishi: Proc. 42nd Ironmaking Conf., AIME, PA, (1983), 357.
- 16) 倉重一郎, 中村文夫, 波田野道春, 岩永祐治, 野見山寛, 小島正光, 網永洋一:日本学術振興会製鉄第54委員会, 54委-1689, (1984)
- 17) 奥山泰男, 宮津 隆, 岸本純幸:鉄と鋼, 69 (1983), A161.
- 18) 上條綱雄, 岩切治久, 木口淳平, 矢場田武, 田中英年, 北村雅司:鉄と鋼, 73 (1987), 2012.
- 19) 上條綱雄, 高橋 昇, 星野剛一, 吉田康夫, 伊藤良二, 柴田耕一朗, 宮川 裕:材料とプロセス, 6 (1993), 848.
- 20) 山口一良, 鶴野建夫, 山本哲也, 上野浩光, 今野乃光, 松崎真六:鉄と鋼, 82 (1996), 641.
- 21) 天野 繁:私信, 新日本製鐵(株), (1995)
- 22) 山口一良, 鶴野建夫:鉄と鋼, 86 (2000), 11.
- 23) 西村 勝, 松平寛司, 横山貴司, 朝田真吾:材料とプロセス, 11 (1998), 709.
- 24) 武田幹治, 井川勝利, 田口整司, 木口 満, 妹尾義和:材料とプロセス, 3 (1990), 10.
- 25) 井川勝利, 笠岡玄樹, 大島弘信:材料とプロセス, 1 (1989), 924.
- 26) 上條綱雄, 清水正賢, 伊藤良二, 星野剛一:材料とプロセス, 9 (1996), 26.
- 27) 稲田隆信, 上城親司, 片山賢治, 山本高郁:材料とプロセス, 9 (1996), 22.
- 28) 田中勝博:私信, 日新製鋼(株), (1996)
- 29) 門口維人, 後藤哲也, 伊藤良二, 矢場田武, 清水正賢:R・D神戸製鋼技報, 46 (1996) 1, 2.
- 30) 山口一良, 杉山 喬, 山本哲也, 上野浩光, 松永伸一:材料とプロセス, 8 (1995), 2.
- 31) 佐藤道貴, 村井亮太, 有山達郎, 牧 章, 下村昭夫, 森 侯寿:鉄と鋼, 85 (1999), 717.
- 32) 阿部幸弘, 奥田康介, 山口一成, 山口一良, 石岡信雄, 古川高司, 下村泰人, 斧 勝也:日本学術振興会製鉄第54委員会, 54委-1701, (1984)
- 33) 笠井昭人, 宮川一也, 上條綱雄, 木口淳平, 清水正賢:鉄と鋼, 83 (1997), 239.
- 34) 武田幹治:材料とプロセス, 10 (1997), 793.
- 35) 高橋 昇, 磯部光利, 上條綱雄, 吉田康夫:材料とプロセス, 6 (1993), 92.

(2001年5月8日受付)