



コークスの劣化に及ぼすガス化反応と 溶融還元反応の影響

夏井 琢哉*・砂原 公平*・宇治澤 優*

Effects of Gasification and Smelting Reduction on Coke Degradation

Takuya NATSUI, Kohei SUNAHARA and Yutaka UJISAWA

Synopsis : Decreasing of the reducing agent rate can be expected by using the high reactivity coke to the blast furnace. However, it is predicted that the reaction form of the coke and permeability in the blast furnace change.

In this study, three kinds of coke were used for the solution-loss reaction and the smelting reduction experiments. The coke strength which was evaluated by using I-type tumbler after each reaction was different, even if these reaction quantities were equivalent. In addition, the effect of the solution-loss reaction on the coke degradation was larger than that of the smelting reduction.

On the basis of these experiments, the coke strength after direct reduction and results of the blast furnace operation with high reactivity coke were quantitatively estimated. According to the calculation of the operation with high reactivity coke, decreasing the coke rate and increasing the productivity by decreasing pressure drop in the blast furnace are expected.

Key words: high reactivity coke; solution-loss reaction; smelting reduction; reaction form; coke strength; permeability.

1. 緒言

1997年に開催された「地球温暖化防止京都会議(COP3)」において我が国の炭酸ガス排出量を2010年までに1990年を基準として6%削減することを決定したことを受け、国内最大級の資源多消費型産業である鉄鋼業界では自主行動計画を策定し、鉄鋼業のエネルギー消費量の同11.5%削減を目標に掲げている。高炉は鉄鋼業全体のエネルギー消費量の約7割を占めることから、高炉の低還元材比操業技術の確立が目標達成に対して大きな役割を担っている。

高炉内反応効率を向上させ低還元材比操業を実現できる技術のひとつとして高反応性コークスの高炉使用が提案されており¹⁾、過去には高反応性小塊コークスを使用した実炉操業試験によってその効果が実証された例がある^{2,3)}。これらの操業試験では鉬石層への小塊混合コークスとしての使用であったため、炉内通気性への影響は明確ではなかった。また近年では、触媒添加による高強度・高反応性コークスの製造方法が開発され、塊コークスの一部を高反応性コークスに置換した実炉操業試験⁴⁾も行われている。この試験においては塊コークスの最大8wt%を高反応性コークスに置換し、通気性を維持しつつ還元材比の低減が可能であったとしている。

更なる低還元材比を指向するためには高反応性コークスの多量使用が有効と考えられるが、このときの炉内通気性

への影響は明らかにされているとは言い難い。高反応性コークスを高炉において多量使用した場合、平衡論に基づく操業解析によればソリューションロスと鉬石溶融還元の間反応からなるコークスの直接還元量が低下するため、コークス冷間強度が一定であればコークスの劣化が抑制されて炉内通気性は改善すると考えられている。しかしながら、速度論的解析によれば直接還元量が低下するだけでなく直接還元反応比率が変化し、ソリューションロス反応比率が増加することが予測されている⁵⁾。このようにコークス反応形態が変化するのであれば、コークス劣化が抑制され炉内通気性が改善するとは言い切れない。特にソリューションロス反応が増加した場合、コークス劣化量の増加による炉内通気性の悪化が懸念されるため、これを事前に評価する事は重要である。

コークス反応形態の変化に伴う炉内通気性を評価するためには、高炉内のソリューションロス反応帯から滴下帯にかけてのコークス強度低下を定量的に評価してコークス粒径の変化を推算する必要があるが、これらの領域、特に滴下帯におけるコークス劣化を対象とした研究報告は少ない。既往の研究では、羽田野らがコークスのソリューションロス反応試験を行い、ソリューションロス反応帯におけるコークス粒径低下をモデル化して高炉操業への影響を検討している⁶⁾。砂原らは滴下帯におけるコークス劣化を模擬した試験を行っており、溶融還元反応速度はコークスの

反応性に依存しないことを明らかにしている⁷⁾。さらに、笠井らはソリューションロス反応とFeO融液による溶融還元反応によるコークス劣化形態をそれぞれ単独の反応試験により調査し、前者が表面磨耗、後者が体積破壊に分類されるとの知見を得ており、これらの反応試験における反応量とコークス強度低下をそれぞれ定量化している⁸⁾。実高炉においては、コークスはソリューションロス反応を受けた後に鉱石の溶融還元反応を受ける。したがって、実炉内のコークス劣化をより精緻に再現するためには、両者が連続して進行する状況下で反応を行った上でコークス強度を評価する必要がある。

そこで、本研究では高反応性コークス操業におけるコークス反応形態の変化を想定した反応試験を行うことにより、コークス劣化へ及ぼす反応形態の影響を評価することを目的とした。反応性が異なる数種のコークスを用い、反応形態を人為的に変更した直接還元反応試験により、反応後のコークス強度を定式化した。次に、試験結果を高炉総合モデル⁹⁾に反映して高反応性コークス操業時の諸元変化を試算した。

2. 試験内容

2.1 試験条件

高炉内の反応によるコークス劣化を模擬するため、直接還元反応試験はソリューションロス反応試験、溶融還元反応試験の順で行なった。トータルのコークス反応量が実炉におけるコークス反応量の推定値(25%)で一定となるようにTable 1にしたがって各反応の比率を変更した。

次に、試験に用いた試料性状をTable 2に示す。コークスAはCRI=29.5%の実炉コークスである。また、石炭配合調整により2種の高反応性コークスB、Cを小型反応炉(50kg)にて製作した。冷間強度($I_{9.5}^{600}$)は87.0から88.1で同レベルとした。焼結鉱は実炉用のもので、溶融還元反応試験におけるコークス反応量を制御することを目的として事前に還元処理を行なった。焼結鉱を試料温度：950°C、CO: 15 NL/min、CO₂: 15 NL/minの条件下で2時間保持することでFeOまで還元した。溶融還元反応試験では、還元焼結鉱

Table 1. Experimental condition of indirect reduction.

Case No.	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Solution-loss reaction (%)	25.0	18.8	12.5	6.2	0
Smelting reduction (%)	0	6.2	12.5	18.8	25.0

Table 2. Sample properties.

Sample	CRI	CSR	$I_{9.5}^{600}$	F. C	Ash					
						(Unit: wt%)				
Coke (15-20 mm)	A	29.5	60.1	87.2	87.0	11.9				
	B	38.6	50.7	88.1	88.7	10.9				
	C	43.8	41.1	87.0	88.6	11.1				
Sinter (10-15 mm)	T. Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	C/S	RDI	RI		
	58.97	6.36	4.40	1.65	1.08	2.01	40.4	69.2		

の重量(FeO量)を調整することでコークス反応量を制御した。

2.2 試験方法

2.2.1 ソリューションロス反応試験

まず、ソリューションロス帯におけるコークスの反応を想定した反応試験を実施した。一般に、実高炉内でソリューションロス反応が活発となる温度域は1000から1300°C程度であり、また、1300°C以下の反応温度では反応後のコークス強度に対する温度依存性は小さいと考えられる¹⁰⁾ため、ソリューションロス反応試験は温度1100°C一定の条件とした。

ソリューションロス反応試験装置にはコークス反応性(CRI)測定用の小型反応炉を用いた。コークス試料200g(層高: 約110mm)を反応管に装入し、1100°C、CO₂: 5NL/min(ガス線速度: 0.02 m/s)の条件下で反応させた。コークス反応量は反応時間を調整することで制御した。

2.2.2 溶融還元反応試験

次に、Fig. 1に示す荷重軟化試験装置を用いて融着帯、滴下帯におけるコークスの反応を想定した溶融還元反応試験を実施した。溶融還元反応によるコークス強度低下率は反応量に依存するため⁷⁾温度条件を変更する必要はないと考えられる。そこで、コークスと還元焼結鉱の混合試料を1600°Cまで加熱し、一定時間保持することによりFeO融液をコークス層に滴下して溶融還元反応させた。

ソリューションロス反応後のコークスと、還元焼結鉱をカーボン坩堝(内径: 70 mm, 高さ: 400 mm)に均一な混合状態で装入する。このとき、還元焼結鉱の装入量を調整して所定のコークス反応量となるようにした。試料温度測定のため、熱電対を試料上部に取り付けて坩堝を炉に設置し、窒素雰囲気中(N₂: 5NL/min)で4.5°C/minの速度で昇温を開始する。試験中は試料に0.3kg/cm²の垂直荷重を加えておくことで熱電対を試料に追従させ、試料変位とともに試料温度を測定した。還元焼結鉱の軟化収縮開始後に溶融還元反応が生じ始め、溶融したメタルとスラグがターンテーブル上に落下する。試料温度が1600°Cに到達したらそのまま30分間保持して炉を停止し、窒素を流したまま

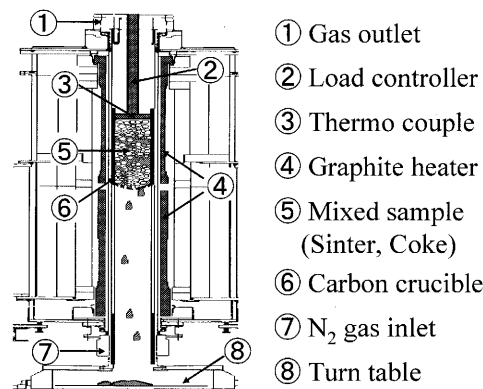


Fig. 1. Experimental apparatus for smelting reduction.

冷却する。試料温度が室温まで低下した後、坩堝内の試料を回収してコークスの重量変化から反応量を求めた。

溶融還元反応試験におけるコークス重量変化は、溶融還元反応だけでなく浸炭反応によるものも含まれるが、試験後の滴下メタルの分析結果によれば、メタル中のカーボン含有率は全てのケースで2.6から3.6 (%)とほぼ一定であった。したがって、本研究ではコークス劣化に対する浸炭反応の影響を溶融還元反応と区別せず、ここでのコークス重量変化量を溶融還元反応によるコークス反応量として後の解析で扱った。

なお、ケース1,5は、それぞれソリューションロス反応、溶融還元反応のみを実施した。

2.3 反応後のコークス強度評価方法

直接還元反応後のコークス強度はI型ドラム試験機（内径：130mm，高さ：700mm）を用いて評価した。

反応試験終了後、粉を除く9.5mm以上の塊コークス140±3gをI型ドラム試験機に装入する。試料装入後、20rpmの速度でドラムを回転させ、最大600回転までの粒径分布を測定した。粒径分布測定に用いた篩い目のサイズは0.25から15.0mmである。

直接還元反応試験において、ソリューションロス反応試験（反応温度：1100°C）のみを実施したケース1のコークスは、溶融還元反応試験（試料最高到達温度：1600°C）を実施した場合とは熱履歴が異なる。そこで、ケース1のコークスはソリューションロス反応試験後に荷重軟化試験装置を用いて、窒素雰囲気下で1600°Cまで同一の昇温パターンでの加熱処理を行った後に強度試験を実施した。なお、比較のために未反応コークスの強度試験も実施したが、同様の加熱処理を施した。

3. 試験結果

3.1 コークスの直接還元反応試験

Fig. 2にソリューションロス反応試験結果として反応時間とコークスの重量減少率の関係を示す。試験では予め作成した検量線にしたがって、所定の反応量になるように反応時間を調整した。

Fig. 3はコークスAの溶融還元反応試験（ケース5）における排ガス中のCO比率、試料収縮率と還元率を示したものである。縦軸の収縮率は試験開始前・後の試料層厚をそれぞれ100, 0%として表した。また、還元率は試験終了時を100%として試験中に測定したCOガス発生量から求めた。試験中、試料変位は温度の上昇とともに1200°C付近まで増加した後、急激に減少する。試料変位の増加はコークスの熱膨張、収縮は焼結鉱の軟化融着と滴下に起因するものであると考えられる。COガスは1100°C付近から発生し始め、収縮率が約50%に到達する1300°C以降は急激に増加する。排ガス中のCO比率は1400°C付近と、溶融メタ

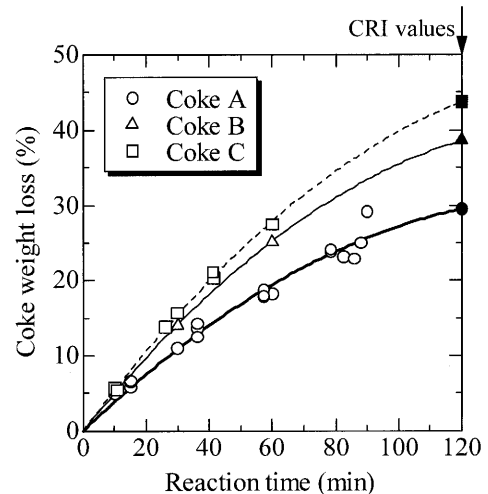


Fig. 2. Result of solution-loss test.

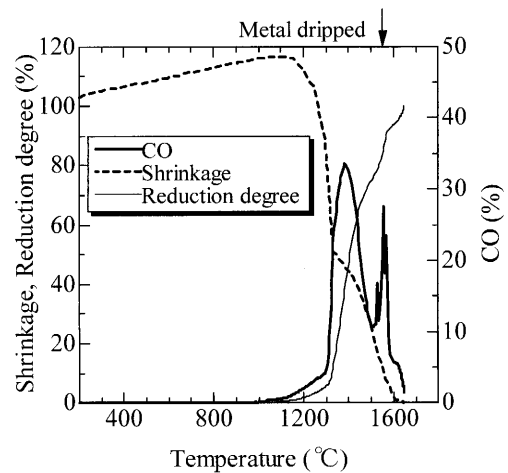


Fig. 3. Result of smelting reduction test (Coke A, Case 5).

ルの滴下開始温度である1550°C付近で大きなピークがみられる。これは、焼結鉱の軟化融着開始により生成した含FeO初期融液とコークスとの接触、およびコークス充填層内の融液滴下の2つの過程でコークスと溶融FeOの還元反応が急激に進行することを示唆する。ここでは試験例としてケース5の結果を示したが、他のケースも同様の傾向がみられた。

3.2 反応後のコークス強度

Fig. 4にコークスAのI型ドラム600回転後のコークス粒径分布を示す。ドラム回転後の粒径分布では9.5mm以上と1.0mm以下の重量比率が大部分を占めており、1.0から9.5mmの重量比率はいずれのケースでも全重量の5%未満であった。したがって本研究では、粒径1.0mm以下を粉、1.0から9.5mmまでを細粒、および9.5mm以上を塊と定義し、9.5mm以上の塊コークス比率を強度指標として扱った。

次に、コークス粉生成率、塊コークス重量比率とI型ドラム回転数との関係を表すとそれぞれFig. 5, 6のようにな

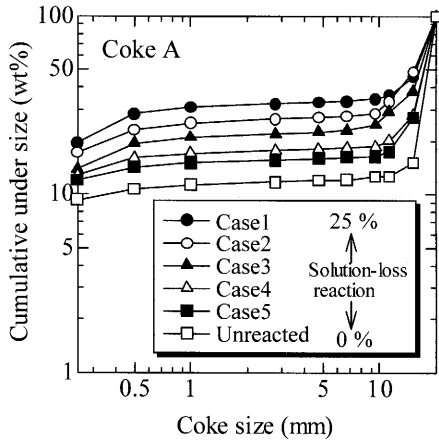


Fig. 4. Size distribution after I-type drum test (Coke A).

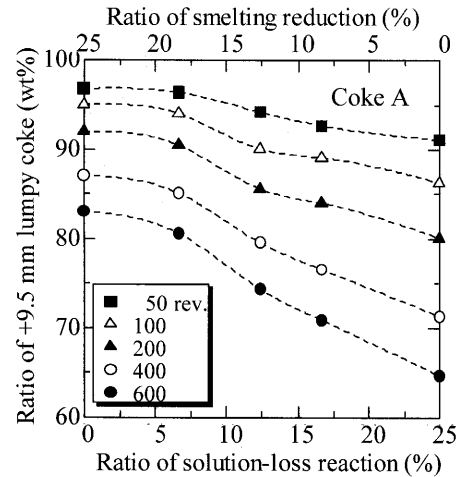


Fig. 7. Effect of reaction form on coke strength after reaction (Coke A).

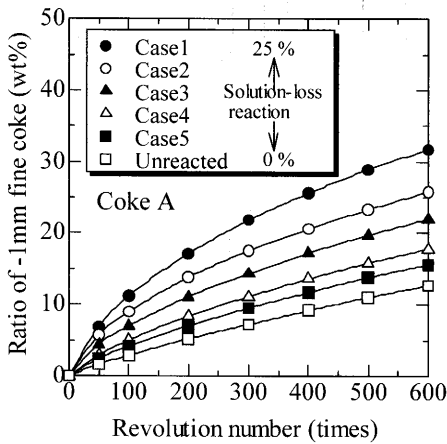


Fig. 5. Ratio of -1.0 mm fine coke (Coke A).

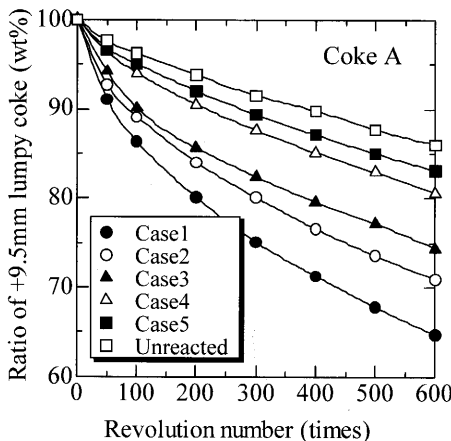


Fig. 6. Ratio of +9.5 mm lumpy coke (Coke A).

る。これらよりソリューションロス反応比率の増加とともにコークス粉率が増加，塊コークス比率が減少することがわかる。

Fig. 7には9.5 mm以上の塊コークス比率と，反応形態の変化の影響をドラム回転数とともに示した。横軸はソリューションロス，溶融還元反応比率，すなわちコークスの反応形態を表す。トータル反応量は一定であっても反

応形態が異なればコークスの強度低下量が異なることがわかる。また，ソリューションロス反応比率の増加によって塊コークス比率が減少していることから，コークスの強度低下への影響は溶融還元反応よりもソリューションロス反応の方が大きい。

コークスとCO₂ガスとの気固反応であるソリューションロス反応では，CO₂ガスがコークスの気孔を介して内部まで拡散することが知られている。これに対してFeO融液とコークスとが反応する溶融還元反応では，コークス内部へのFeO融液の拡散はほとんどなく，表面近傍で還元反応が進行する^{7,8)}。したがって，ソリューションロス反応ではコークスの反応劣化層が溶融還元反応のそれに比べて厚くなっており⁸⁾，劣化に及ぼす影響が大きかったと考えられる。したがって，実高炉においてコークス反応量は同一で反応形態のみが変化した場合でも，先にソリューションロス反応を受けることによりコークス粒子内部まで劣化が進行してしまうため，ソリューションロス反応比率の増加とともに反応後強度は低下するものと推測される。

4. 考察

4.1 高炉内におけるコークス粒径低下のモデル化

4.1.1 直接還元反応による強度低下

試験結果からソリューションロス反応と溶融還元反応のそれぞれによるコークス強度低下量を分離評価し，直接還元反応後のコークス強度を推算することを試みた。

Fig. 8にコークスAの反応後強度に及ぼす反応形態の影響を示す。縦軸はコークスの強度指数： $I_{9.5}^{600}$ ，横軸の上下はそれぞれ，ソリューションロス，溶融還元によるコークス反応比率である。図中のプロットは右から順にTable 1に示したケース1から5の試験結果を表す。また，試験に用いた未反応コークスの強度($I_{9.5}^{600}=87.2$)を横軸と平行な直線で示した。コークス強度は溶融還元反応量の増加とともに

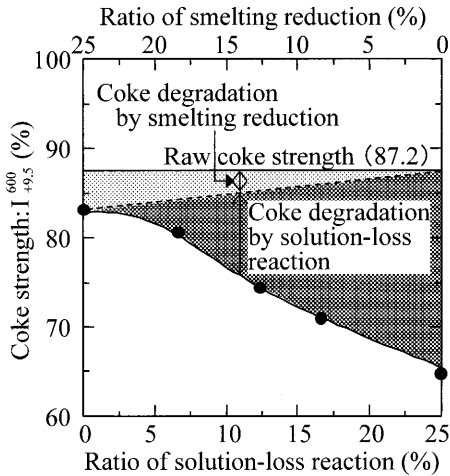


Fig. 8. Effects of direct reduction on coke strength (Coke A).

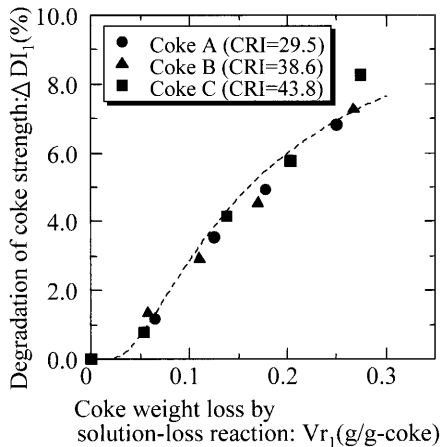


Fig. 9. Degradation of coke strength by solution-loss reaction.

に直線的に低下すると考えられる⁸⁾ことから、破線で示した直線でソリューションロス反応と溶融還元反応によるそれぞれのコークス強度低下量を分離した。

ソリューションロス反応量を Vr_1 (g/g-coke), コークスの強度低下率を ΔDI_1 (%)とし、両者の関係を示すと Fig. 9 のようになる。 ΔDI_1 は反応前の冷間強度に対するソリューションロス反応による強度低下率を表すものである。ここでは、試験結果を実炉サイズコークスに反映させるために当社で測定した(1), (2)の相関式を用いてコークスの強度指標を $I_{9.5}^{600}$ から DI_{15}^{30} に変換した後、強度低下率を求めた。

$$DI_{15}^{50} = 0.500 \cdot I_{9.5}^{600} + 39.363 \dots (1)$$

$$DI_{15}^{30} = (DI_{15}^{50} + 67.46) / 1.590 \dots (2)$$

コークスのソリューションロス反応においてはコークスの反応性が高いほど界面反応化するため、強度低下率は反応性に依って異なることが予想されたが、Fig. 9に示した試験結果はこの限りではなく、反応性に依らず反応量の増

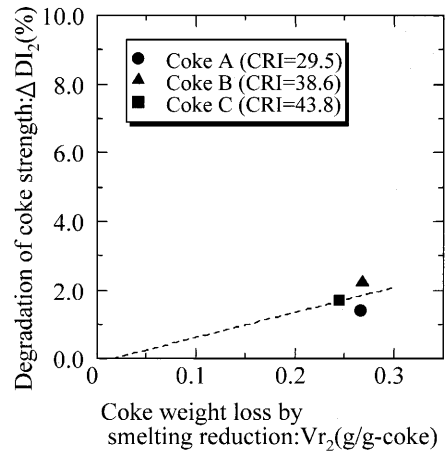


Fig. 10. Degradation of coke strength by smelting reduction.

加とともに強度が低下した。高谷らによれば低温では CO_2 ガスのコークス粒子内への拡散、高温では界面反応が支配的である¹¹⁾としており、川上らはその境界温度が $1100^\circ C$ である¹²⁾ことを示している。したがって、Fig. 9においてコークスの反応後強度が反応性にかかわらず反応量の増加とともに低下しているのは、本試験の反応温度 ($1100^\circ C$) では粒内拡散が作用するためであると考えられる。また、西らのガス化反応試験によれば、 $1300^\circ C$ 以下の反応温度ではコークス反応後強度に対する温度依存性は小さく、強度低下量は反応量に大きく依存する¹⁰⁾ことが確認されており、このことは山岡らのコークスのガス化反応後強度のモデル試算¹³⁾によっても示されている。そこで、ソリューションロス反応による強度低下率は反応量の関数として一義的に整理し、図中に破線で示した近似曲線より(3)式を導いた。

$$\Delta DI_1 = \exp(2.525 - 0.147 / Vr_1) \dots (3)$$

溶融還元反応による強度低下率についても同様に整理する。溶融還元反応量を Vr_2 (g/g-coke) とすると、コークスの強度低下率 ΔDI_2 (%) との関係は Fig. 10 のようになる。溶融還元の反応速度はコークス反応性に依存せず⁷⁾、強度低下率が反応量に応じて直線的に増加する⁸⁾と仮定すれば、溶融還元反応による強度低下率は近似直線から(4)式のように表せる。

$$\Delta DI_2 = 7.300 \cdot Vr_2 \dots (4)$$

以上の定量化に基づき、直接還元反応によるコークス強度低下を表現する。まず、ソリューションロス帯で反応を受けた後のコークス強度: DI_{r1} (%) は、装入時のコークス強度: DI_0 (%) と(3)式を用いることによって次のように表せる。

$$DI_{r1} = DI_0 \{1 - 0.01 \cdot \exp(2.525 - 0.147 / Vr_1)\} \dots (5)$$

さらに融着帯へと降下し、溶融還元反応によって強度低下

することを考えると溶融還元反応後のコークス強度： DI_{r2} (%)は DI_{r1} と(4)式を用いて次式のようになる。

$$DI_{r2} = DI_{r1} \{1 - 0.01 \cdot (7.300 Vr_2)\} \dots\dots\dots (6)$$

4・1・2 ソリューションロス反応による粒径低下

次に、ソリューションロス反応に伴うコークス粒径の変化を考える。

コークスを球形粒子と仮定すると、ソリューションロス反応前後の質量バランスから(7)、(8)式が成立する。

$$W_0 = 1/6 \cdot \pi \cdot Dp_0^3 \rho_0 (1 - \varepsilon_0) \dots\dots\dots (7)$$

$$W_r = 1/6 \cdot \pi \cdot Dp_1^3 \rho_r (1 - \varepsilon_r) \dots\dots\dots (8)$$

W はコークス質量(g), Dp_0 , Dp_1 はソリューションロス反応前・後のコークス粒径(mm), ρ はコークス真密度(g/mm³), ε はコークス気孔率(-)を表す。また、添字の0は反応前、添字のrは反応後を示している。ソリューションロス反応によるコークス反応量： Vr_1 (g/g-coke)は(9)式で表せる。

$$Vr_1 = (W_0 - W_r) / W_0 \dots\dots\dots (9)$$

ここで、(7)、(8)式を(9)式に代入し反応前後のコークス真密度は不変とみなすと次式を得る。

$$Dp_1 = \{(1 - Vr_1)(1 - \varepsilon_0) / (1 - \varepsilon_r)\}^{1/3} \cdot Dp_0 \dots\dots\dots (10)$$

また、羽田野らの浸水法による反応前後のコークス気孔率測定⁶⁾によると ε_r は Vr_1 の関数として表せる。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_0 + 0.214 Vr_1 \dots\dots\dots (11)$$

したがって、反応前のコークス気孔率： ε_0 (-)と、ソリューションロス反応によるコークス反応量： Vr_1 (g/g-coke)を与えると(10)、(11)式からソリューションロス反応後のコークス粒径が推算できる。

4・1・3 溶融還元反応による粒径低下

ソリューションロス反応により Dp_1 (mm)になったコークスが、滴下帯での溶融還元反応(浸炭反応を含む)によって Dp_2 (mm)まで粒径低下する場合を考える。ここでもコークスは球形粒子、さらに溶融還元反応は均一な界面反応であると仮定する。また、コークスの気孔率は溶融還元反応によって変化せず一定に保たれるとする。すると結局、溶融還元反応による粒径低下は(7)~(10)式において気孔率の影響が無視でき、溶融還元反応によるコークス反応量： Vr_2 (g/g-coke)を用いて(12)式のように表せる。

$$Dp_2 = (1 - Vr_2)^{1/3} \cdot Dp_1 \dots\dots\dots (12)$$

4・1・4 コークスの強度低下に伴う粒径低下

高炉内では荷下がり磨耗による機械的エネルギーが加わるため、直接還元反応により強度低下したコークスの粒径低下が助長される。

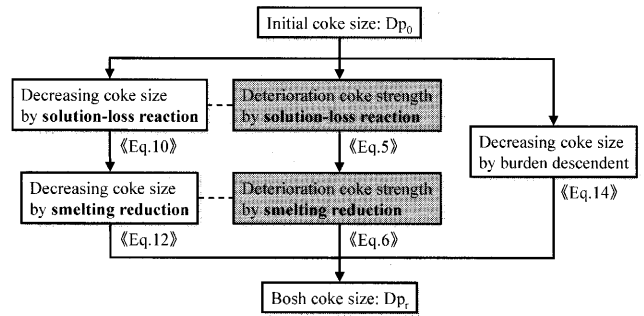


Fig. 11. Flow diagram of decreasing coke size in blast furnace.

羽田野らによれば、化学反応に拠らない荷下がり磨耗によるコークスの粒径低下率： δ (%/ドラム1回転)は、コークスの冷間強度： DI_{15}^{30} (%)の関数として(13)式のように表せる⁶⁾。

$$\delta = 0.007645(DI_{15}^{30})^2 - 1.477(DI_{15}^{30}) + 72.155 \dots\dots\dots (13)$$

したがって、(13)式の DI_{15}^{30} を直接還元反応後のコークス強度指数： DI_{r2} に置き換えることによって、荷下がり磨耗によるコークスの粒径低下率を算出できる。結局、高炉内でのコークス粒径： Dp_r (mm)は、直接還元反応後のコークス粒径： Dp_2 (mm)と定数： γ (-)を用いた(14)式により求められる。

$$Dp_r = (1 - \gamma \cdot \delta / 100) \cdot Dp_2 \dots\dots\dots (14)$$

4・1・5 コークス粒径低下モデルの概略

高炉内に装入されたコークスはFig.11に示すような過程で粒径低下していくものと推定される。すなわち、高炉内に装入されたコークスは先ず、塊状帯でのソリューションロス反応により(10)式に従って粒径低下が引き起こされると同時に、(5)式に従いコークス強度が低下する。次いでコークスが融着帯・滴下帯に差し掛かると、溶融還元反応によりコークス粒径と強度が低下するが、これらは(12)、(6)式を用いてそれぞれ推定できる。このように、直接還元反応により強度低下したコークスが高炉内を降下する間は荷下がり磨耗を受けるため、最終的に(14)式により高炉内のコークスの粒径変化が推算できる。

4・2 高炉総合モデルによる高反応性コークス操業の評価

高炉総合モデル⁹⁾に前節で述べた高炉内におけるコークス粒径低下式と、CRIの関数で整理したコークスの反応速度定数を取り込み、断面均一条件で高反応性コークス操業の評価を行なった。

計算は炉容積2700 m³の高炉を対象とし、Table 3に示したCRI=30の操業実績を基準としてコークス反応性をCRI=25から45まで5%間隔で変更したときの諸元変化を求めた。このとき、コークス反応性の変更に伴って出銑量、溶銑温度が変化するが、これらを一定に維持するように出銑量の変化に対しては送風量、溶銑温度の変化に対しては

コークス比を調整した。微粉炭比と酸素富化量は送風量に対する比率が基準条件と等しくなるように変更した。装入コークスの冷間強度、初期粒径は基準とした操業実績のコークスと同じく、それぞれ $DI_{15}^{150}=83.1$ (%), $Dp_0=48.5$ (mm)とした。高反応性コークス使用時に炉内反応効率向上を達成するためには、同時に鉍石側の還元速度の向上も必要と予測される⁹⁾ため、焼結鉍の被還元性は通常の操業レベルよりも高い JIS-RI=76 (%)に相当する速度定数を設定した。微粉炭は羽口先で完全燃焼すると仮定し、コークス由来の粉の発生・移動・蓄積は考慮していない。

Fig.12にコークス反応性変更時の炉内変化の試算例とし

Table 3. Calculation conditions.

CRI (%)		25	30	35	40	45
Productivity (t-pig/d)		5472	5475	5476	5479	5470
Pig Temperature (°C)		1501	1501	1501	1501	1501
Blast Volume (Nm ³ /min)		4208	4074	4020	4010	4000
Blast Temperature (°C)		1076	1076	1076	1076	1076
O ₂ Enrichment (kNm ³ /h)		5.74	5.56	5.48	5.47	5.46
Blast Moisture (g/Nm ³)		37.6	37.6	37.6	37.6	37.6
PC Injection (kg/t-pig)		102.2	98.9	97.6	97.3	97.2

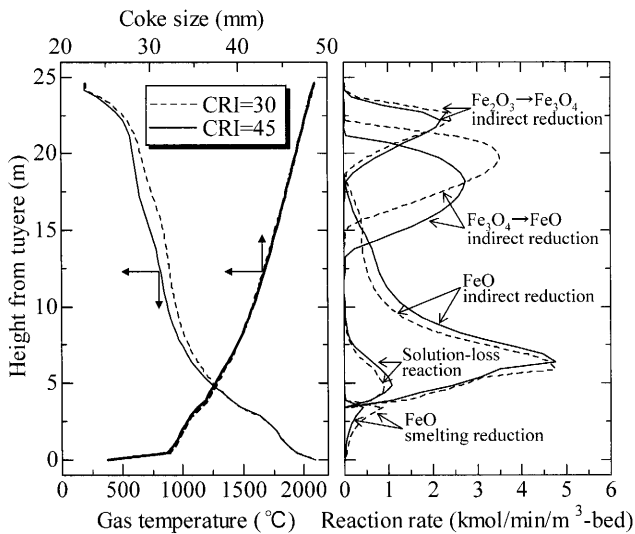


Fig. 12. Vertical distribution of process variables by the model.⁹⁾

て基準条件である通常コークス (CRI=30)と、高反応性コークス (CRI=45)使用時の計算結果を示す。高反応性コークスを使用することで熱保存帯温度は低下し、還元反応の速度分布が変化する。炉内のガス温度分布と還元反応の速度分布を合わせて考えると、高反応性コークスと高被還元性焼結鉍の共存により間接還元反応がより低温から進行することがわかる。これによりシャフト部での間接還元反応量が増加し、直接還元反応量が低下する。コークス粒径は直接還元反応が開始する羽口上10m付近からの低下が顕著となるが、コークス反応性の相違による影響はさほど大きくない。レースウェイ流入前のボッシュ部のコークス粒径は高反応性コークスの方がやや小さいが、いずれも32mm程度で同等であった。

次に、このときの直接還元反応によるコークス消費をソリューションロス反応と溶融還元反応によるものに分離してFig.13に示す。コークス反応性の増加とともに直接還元反応によるトータルのコークス消費量は低下するが、同時に反応形態が変化してソリューションロス反応によるコークス消費量が増加することがわかる。

Table 3にしたがってコークス反応性を変更したときの諸元変化をFig.14に示す。コークスの冷間強度と装入粒径を

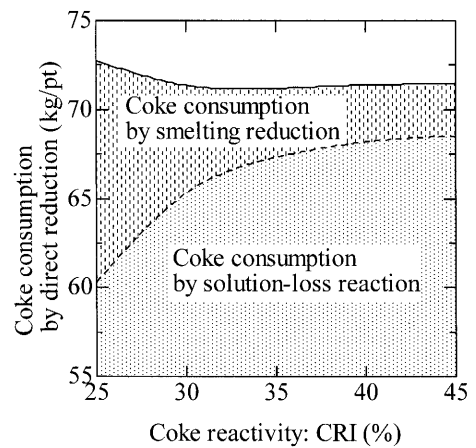


Fig. 13. Effect of coke reactivity on the reaction ratio between solution-loss reaction and smelting reduction by the model.⁹⁾

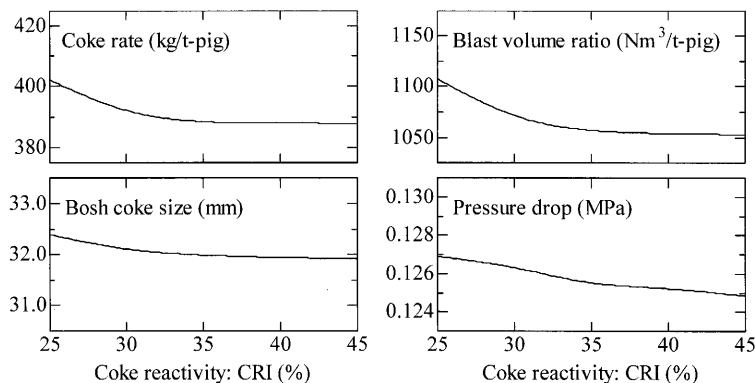


Fig. 14. Effect of coke reactivity on operational results.

一定とした場合は反応性を向上させると、(1)間接還元率が増加し直接還元量(コークス消費量)が低下するためにコークス比が低下する。(2)反応形態が変化してコークス劣化への影響が大きいソリューションロス反応の比率が増加するために、ボッシュコークス粒径は低下する。(3)炉内反応効率が向上するため、コークス比の低下とともに送風原単位が低下する。(4)コークス粒径の低下は炉内圧力損失を増加(悪化)させる要因であるが、粒径低下量が僅かであり送風原単位減少の効果の方が大きいためトータルの炉内圧力損失は低減できるとの試算結果を得た。

以上の結果から、高反応性コークス操業においてはコークス比低減によるコスト合理化が期待でき、炉内圧力損失を変化させずに増風を行うことができるため、出銑比の増加も可能であると考えられる。

5. 結言

本研究では高反応性コークス操業における炉内通気性変化を評価するために、コークスの劣化に及ぼす反応形態変化の影響を基礎試験により検討し、ソリューションロス反応と熔融還元反応によるコークス強度低下量を分離して定量化した。さらに、試験結果に基づく高炉内のコークス粒径減少式を導出し、高炉総合モデル⁹⁾により高反応性コークス操業の諸元変化を試算した。今後、焼結鉱の高温性状、炉下部で生成するコークス粉、および未燃焼微粉炭などの影響を考慮した総合的な通気性評価を行なう余地があるが、本検討では以下の知見を得た。

(1) 直接還元反応によるコークス反応量が一定であっても、反応形態が異なれば反応後のコークス強度が異なる。

(2) コークスの強度低下に及ぼす影響は熔融還元反応よりもソリューションロス反応の方が大きく、ソリューションロス反応比率の増加により強度が低下する。

(3) 高反応性コークス操業では反応効率が向上するとともに還元反応速度の炉内分布が変化してコークスの反応形態が変化する。コークス反応性の向上に伴って直接還元反応量は減少するが、ソリューションロス反応比率が増加する。

(4) 高反応性コークス操業においては、コークス比低減効果がコークス粒径低下による炉内通気性悪化を相殺するため、コークス比低減に伴うコスト合理化と、炉内圧力損失を維持しつつ増産できる可能性が示された。

文 献

- 1) M.Naito, A.Okamoto, K.Yamaguchi, T.Yamaguchi and Y.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 357.
- 2) T.Shioda, T.Sato, M.Nagata, Y.Fujiwara, M.Sanui, E.Maeshibu and M.Naito: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 1012.
- 3) T.Nakayama, K.Anan, M.Shirakawa, Y.Inoue and M.Naito: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 128.
- 4) H.Ayukawa, T.Nakayama, T.Abe, S.Matsuzaki, S.Nomura, M.Naito and Y.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1040.
- 5) Y.Ujisawa, K.Nakano, Y.Matsukura, K.Sunahara, S.Komatsu and T.Yamamoto: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1379.
- 6) M.Hatano, T.Miyazaki and Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), 1365.
- 7) K.Sunahara, T.Inada and Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1156.
- 8) A.Kasai, J.Kiguchi, T.Kamijo and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 697.
- 9) K.Takatani, T.Inada, and Y.Ujisawa: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 15.
- 10) T.Nishi, H.Haraguchi and T.Okuhara: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1869.
- 11) K.Takatani and Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **75** (1989), 594.
- 12) M.Kawakami, K.Murayama, M.Shibata, T.Takenaka and H.Toda: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 252.
- 13) H.Yamaoka and S.Suyama: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 338.