

高反応性コークス使用による高炉内反応効率向上技術

内藤 誠章*・岡本 晃*²・山口 一良*³・山口 剛史*⁴・井上 義弘*⁵

Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by Use of High Reactivity Coke

Masaaki NAITO, Akira OKAMOTO, Kazuyoshi YAMAGUCHI, Takeshi YAMAGUCHI and Yoshihiro INOUE

Synopsis : The temperature control technology of the thermal reserve zone is examined as a technology which drastically improves reaction efficiency in the blast furnace, and the usage technology of high reactivity coke is proposed.

The adiabatic blast furnace simulator which is able to simulate the temperature transition and the gas volume change according to the coke reaction under ore and coke coexistence is developed.

Following findings are obtained.

The starting temperature of coke reaction corresponds to the temperature of the thermal reserve zone (Trtz).

Trtz has decreased along with the rise of the coke reactivity. The blast furnace reaction efficiency improves by using high reactivity coke voluminously and by mixing using the small-size high reactivity coke and sinter.

The decrease of the fuel ratio of about 25–35 kg/t can be expected by using the high reactivity coke.

The factors of reaction efficiency improvement by using the high reactivity coke are shown as follows.

① Transition of FeO–Fe reduction equilibrium point (W point), that is, decrease of thermal reserve zone temperature, ② Improvement of the gas reduction ability by the coke reaction, ③ Increase of micro-pore volume according to reduction from wustite to iron, ④ Decrease of melt generation and control of pore decrease by reduction of CW (calcio-wustite), ⑤ Gas reduction promotion by increase of porosity.

Key words: ironmaking; coke reactivity; reaction efficiency; adiabatic blast furnace simulator.

1. 緒言

高炉内に生成する高温熱保存帯温度は950~1000°C程度であり、この温度をRist線図¹⁾のW点(ウスタイト-鉄還元平衡点)とした時のシャフト効率は、現状操業において90数%の高水準にある。

高炉の反応効率をさらに向上させるためには、Fig. 1に示すように、①現状の高温熱保存帯温度条件において、操業線図をW点へ接近させる方法(A→B)と、②高温熱保存帯温度の低温化によりW点を高 η_{CO} ($=CO_2/(CO+CO_2)$)側へ移動させ、実ガス濃度と還元平衡ガス濃度との差で示される駆動力を大きくして還元を促進させる方法(B→C)が挙げられる。

これまで実施されてきた炉内反応効率向上技術は、前者に関するもので、焼結鉱被還元性の向上や装入物分布制御によるガス流分布の適正化等が主体であった。また、鉱石層の高温性状改善策として、鉱石層内への小塊コークスの混合使用技術が指向され成果を挙げている。

後者に関しては、理論面での検討はなされてきたが、具体的な技術検討については、著者らが提示した含C塊成鉱

多量使用技術²⁾や、本論文で提示する高反応性コークス使用技術に限られる。

これまでコークス品質については、高炉安定操業に及ぼす通気・通液性の重要性から、強度を重視しており、結果として、負の相関にある反応性は低めに誘導された。高炉

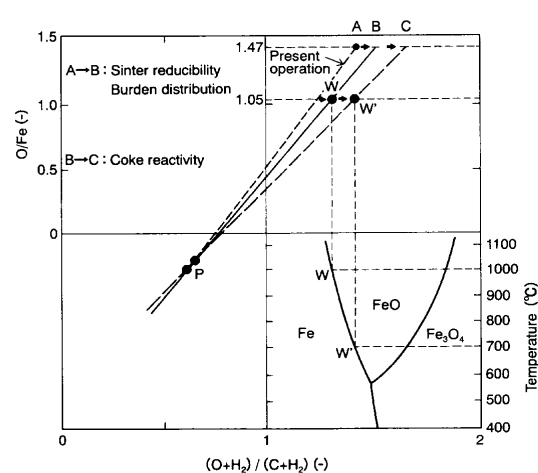


Fig. 1. Improvement technology of reaction efficiency on a blast furnace (Rist diagram).

平成12年9月6日受付 平成12年11月9日受理 (Received on Sep. 6, 2000; Accepted on Nov. 9, 2000)

* 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

* 2 新日本製鐵(株) (Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 (現: (財) 石炭利用総合センター) (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., now Center for Coal Utilization, Japan)

* 4 新日本製鐵(株) 名古屋製鐵所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

* 5 新日本製鐵(株) 大分製鐵所 (現: 技術協力事業部) (Oita Works, now Technical Cooperation Div., Nippon Steel Corp.)

内反応効率向上に求められるコークス品質については検討の余地があり、高炉内反応効率の極限を指向するには、強度と反応性の影響を分離した形でのコークス品質評価が必要である。

高炉内におけるコークスの反応性の影響を定量的に評価するためには、コークスのソリューションロス反応に伴う温度変化やガス量変化の影響を、鉍石の還元速度に反映させることが必要となる。

ところが、従来の装置、例えば高温性状試験装置等の固定層実験装置の場合、温度とガスの両条件とも設定項目であり、また擬似移動層である BORRIS 炉³⁾および高炉内反応シミュレーター(BIS)⁴⁾の場合、炉内ガス組成・量の変化についてはシミュレート可能であるが、炉内温度については設定項目であった。したがって、従来装置ではコークスの反応性の影響を定量的に評価できない。

本論文では、原燃料品質や操業条件に応じて、炉内温度が自動的に変化する断熱系の向流反応試験装置を開発し、この試験装置を用いて、コークス反応性と熱保存帯温度との関係、高反応性コークスの効果的使用法、反応効率向上メカニズム等を検討した。

2. 断熱型高炉内反応シミュレーターの開発

前報⁴⁾で報告した加熱型高炉内反応シミュレーターを断熱型に改造し、その概要を Fig. 2 に示す。本装置はシャフト部還元をシミュレートするための上部炉とその還元履歴を受けた装入物の高温性状を調査するための下部炉で構成される。反応管内に鉍石、コークスを充填し、電気炉を上部から下部に移動させ、ガスを反応管上部から導入するこ

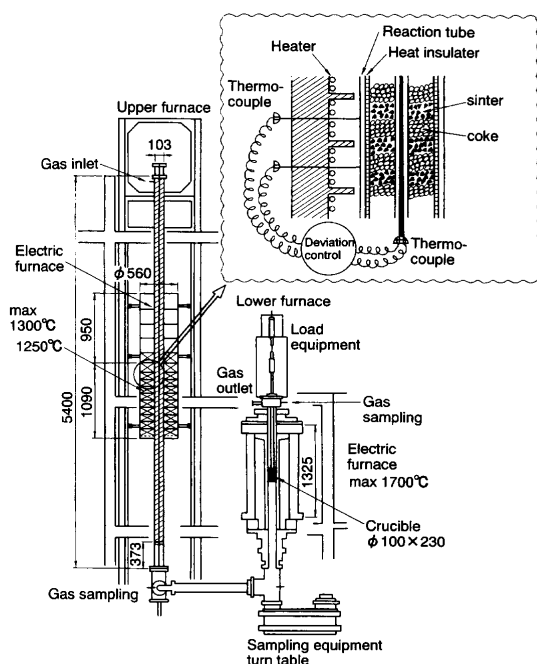


Fig. 2. Schematic representation of the adiabatic Blast furnace simulator (adiabatic BIS).

とで、向流移動層とした。

上部炉は、反応管と反応管に沿って移動可能な電気炉群で構成される。

反応管は内径 103 mm、長さ 5.4 m のステンレスパイプで、新設した電気炉群はガスを高炉融着帯上部温度(1200°C)まで予熱し、鉍石還元を終了させるための加熱炉と、この温度以下の反応・伝熱を断熱系で進行させるための断熱炉で構成した。加熱炉、断熱炉はそれぞれ長さ約 1 m とし、断熱炉は 10 個の電気炉で構成し、この断熱炉部分において高炉シャフト部をシミュレートする。

断熱方法は、反応管からの熱の放散を防止する制御方法で、Fig. 2 に示すように、反応管外壁に接触させた熱電対と、反応管内部の同位置にセットした熱電対から、両温度を検出し、両温度が合致するように電気炉を偏差制御する。また、各電気炉ごとに反応管内外にセットした熱電対は、電気炉と同期して移動する構造とした。

Fig. 3 に断熱型高炉内反応シミュレーター (以後、断熱型 BIS と呼ぶ) の実験過程における偏差制御 10 点の炉内温度推移ならびにガス組成・量変化の一例を示す。実験は 3・1 節の還元条件下で粒径 3~5 mm の焼結鉍を使用した例である。炉内原燃料が一替わりする約 4 時間経過後から、炉内温度、出口ガス組成、ソリューションロス反応に伴うガス増加量 (インプットガス中の dry 基準の N₂ 濃度 / 出口ガス中の dry 基準の N₂ 濃度: N₂^N / N₂^{OUT}) は安定化し、定常状態に近くなる。

炉内反応挙動のシミュレート法は炉内温度や出口ガス組成・量がほぼ定常状態となる位置に、熱電対とガス採取孔を設け、断熱炉移動過程、すなわち高炉炉内の温度・ガス濃度変化を検出して、鉍石・コークスの反応挙動を定量化する。また、還元ガスを N₂ ガスに切り換え、冷却後、サンプルを採取し、鉍石還元率導出のための化学分析や顕微鏡観察用に供した。

本装置の開発により、①炉頂から融着帯上面近傍までの領域におけるコークスおよび鉍石の反応履歴のシミュレー

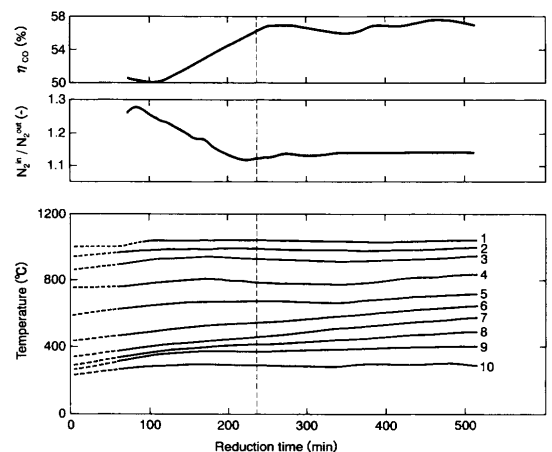


Fig. 3. One example of transition of temperature and gas composition in the adiabatic BIS.

ト、ならびに反応・伝熱の結果としての炉内温度変化の定量化が可能となった。また、②加熱炉内で鉱石の還元を終了させることにより、入口ガスを燃料比相当のボッシュガス量・組成に設定できることになり、高炉操業諸元に対応した炉内現象のシミュレーションも可能となった。

3. 実験

3.1 実験条件

実験は、燃料比480 kg/t相当とし、ボッシュガス量1363 Nm³/tに設定した。還元ガスはボッシュガス組成CO 35.6%, H₂ 4.4%, N₂ 60.0%の混合ガスとした。断熱型BISの実験ガス流量V_g (Nm³/min)は、出銑速度Pとボッシュガス量から式(1), (2)で決定する。

$$V_g = P \cdot BG / 60 \dots\dots\dots (1)$$

$$P = (W_s \cdot (T.Fe) \cdot V_d) / 0.94 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、BG: ボッシュガス量(Nm³/t), V_d: 電気炉降下速度(m/h), W_s: 単位高さあたりの焼結鉱重量(kg/m), (T.Fe): 焼結鉱T.Fe(—)。

電気炉降下速度は、銑鉄生産速度に対応するもので、炉頂部から1200°Cレベルまでの降下時間が約4時間程度の生産条件として、ここでは0.3 m/hに設定した。

装入方法は焼結鉱とコークスの層状装入とし、焼結鉱層厚を40 mmに設定した。

3.2 供試試料の性状

実験に供した焼結鉱、コークスの性状をTable 1に示す。焼結鉱はJIS-RI 66%, 全気孔率32%の実機焼結鉱で、シャフト下部での粒径低下の影響を考慮し、粒度を10~15 mmとした。

コークスは、JIS反応性の異なるコークスを準備するため、アルカリ(K₂O, Na₂O)あるいはFe₂O₃, CaCO₃を所定量添加して製造したコークスならびに成形コークスを準備した。コークス粒度については、反応管径の制約から、10~15 mmを大粒コークス(基準コークスとして使用)、3~5 mmを細粒コークスとした。

なお、高炉内ではアルカリ循環の影響で、コークスにアルカリが付着し、炉内では装入時に比べコークスの反応性

が上昇する。名古屋解体調査結果⁵⁾によると、シャフト下部のコークス中にはK₂O 1~2%, Na₂O 0.5~1.0%付着していた。本実験においても、アルカリ2%添加コークス使用時に、高温熱保存帯温度が1000°C近傍となり実炉相当条件となることから、このコークスを基準コークスとし、高炉内でのアルカリ付着の影響を考慮した。

3.3 反応性の異なるコークス使用時の炉内反応指標

高温熱保存帯温度ならびに焼結鉱の還元性に及ぼすコークス反応性の影響をFig. 4に示す。高温熱保存帯温度はコークス反応性が高くなる程低下し、JIS反応性59の基準コークス使用条件では、1000°C近傍に高温熱保存帯が生成した。アルカリ添加量の多いJIS反応性93~98の高反応性コークス使用時には熱保存帯温度は約900°Cまで低下した。

焼結鉱の還元挙動に着目すると、炉頂近傍では昇温状態が異なる影響で反応開始位置は異なるが、高温熱保存帯領域内では同程度の還元率で推移する。しかし、高温熱保存帯より高温の還元速度については、同一焼結鉱使用条件にも拘わらず、コークス反応性の上昇に伴い急激に増大した。

炉内反応指標をRISTモデルで解析し、Fig. 5に示す。熱保存帯温度T_wについては、熱保存帯領域内で温度が停滞する位置の温度とソリューションロス反応の開始位置の温度を基に決定した。また図中にはJIS反応性75のコークス使用時の解析データを付記した。コークスJIS反応性の上昇に伴って、炉頂ガス利用率η_{CO}、焼結鉱の間接還元率は向上し、コークスのソリューションロス量は低下した。熱保存帯温度もコークス反応性の上昇に伴って低温化し、さらに各熱保存帯温度を基準としたシャフト効率も向上傾向にある。つまり、反応性の高いコークスを使用すると、ウスタイト-鉄還元平衡点(W点)を低温側に移動でき、かつ焼結鉱の還元性改善により、操業線図をW点に近づける効果も期待できる。

この結果がアルカリ添加特有の現象でないことを確認するため、アルカリ添加以外の高反応性コークスを使用した条件下において、同様の実験を実施した。Fig. 6に示す解

Table 1. Chemical composition and physical properties of sinter and coke.

Sinter						(wt%)		(%)	
T.Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	JIS-RI	T.porosity		
57.56	5.03	8.9	5.22	1.89	1.69	66	32		

Coke					
Sample	K	Na	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	JIS-reactivity
LC-1	0.26	0.05	0	0	22
LC-2	1.28	0.06	0	0	50
NC	2.08	0.15	0	0	59
HRC	4.12	0.97	0	0	93~98
Fe ₂ O ₃ -HRC	2	0	4	0	98
CaCO ₃ -HRC	2	0	0	4	95
Formed coke	2	0	0	0	92

LC: Low reactivity coke, NC: Normal coke, HRC: High reactivity coke

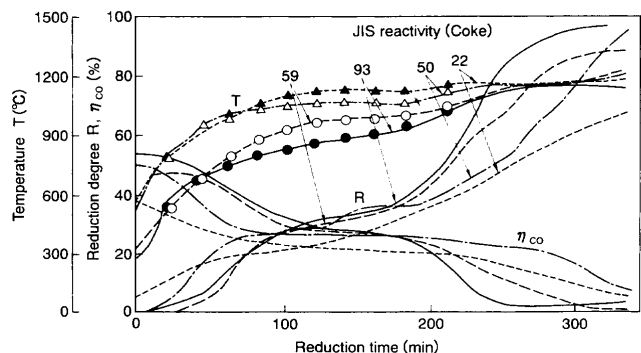


Fig. 4. Influence of coke reactivity on the temperature and sinter reduction behavior.

析結果によると、同様の改善効果が確認された。

以上の実験結果によると、反応性の高いコークスを使用することで、熱保存帯温度の低下ならびに炉内反応効率向上効果が期待できる。

3.4 高反応性コークス使用時の炉内反応効率向上効果

JIS反応性98のアルカリ4%添加の高反応性コークスを使用して、粗粒高反応性コークスならびに細粒高反応性コークスの焼結鉍層、コークス層内への部分混合使用時の炉内還元指標を調査した。

Fig. 7, 8に高反応性コークス部分使用時の炉内温度ならびに焼結鉍還元挙動を示す。図中のプロットは実験終了後に反応管を切断してサンプルを回収し、化学分析値から求めた還元率である。

高反応性コークスの使用比率が高いものほど、また、使用比率が同じ場合、細粒ほど、熱保存帯温度は低下傾向にある。また、熱保存帯末期位置から高温領域における焼結鉍の還元速度も上昇し、より低温側で焼結鉍の還元が終了した。

RISTモデルによる炉内還元指標をFig. 9に示す。熱保存帯温度低下による反応効率向上効果は、高反応性コークスの使用比率が高くなる程、また細粒ほど大きくなる。細粒高反応性コークスを25%使用した時の炉内還元指標は、粗粒高反応性コークスを50%使用した時の炉内還元指標と同等であることから、高反応性コークスを使用する場合には、極力細粒化して使用することが望ましい。

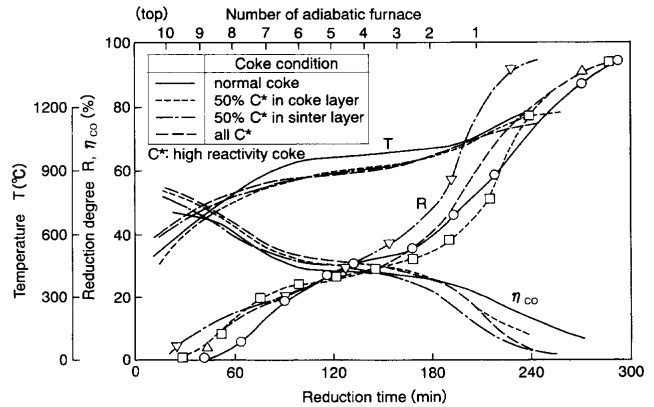


Fig. 7. Sinter reduction behavior under using high reactivity coke mixed in sinter and coke layer.

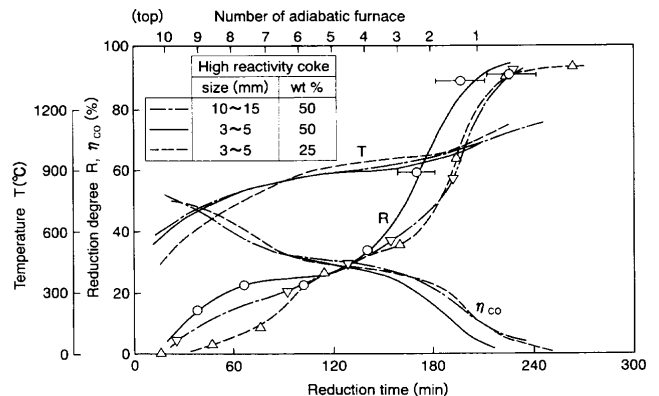


Fig. 8. Effect of high reactivity coke size and weight ratio on reduction behavior under using high reactivity coke mixed in sinter layer.

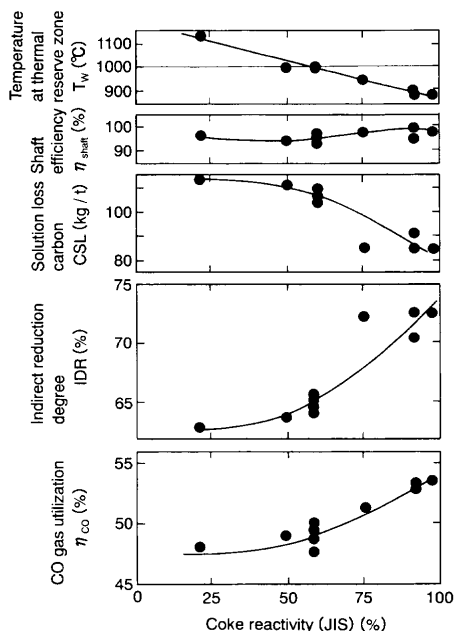


Fig. 5. Influence of coke reactivity on the reduction index.

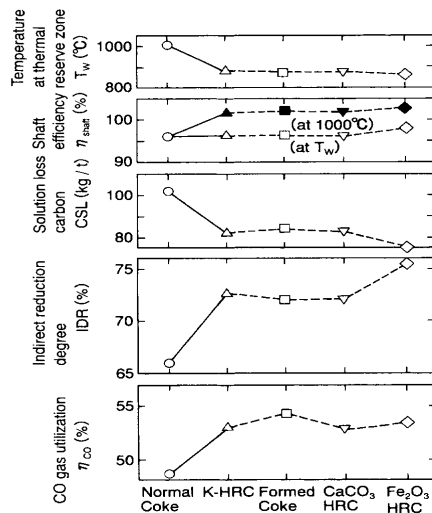


Fig. 6. Influence of coke reactivity on the temperature and sinter reduction behavior by using various high reactivity coke.

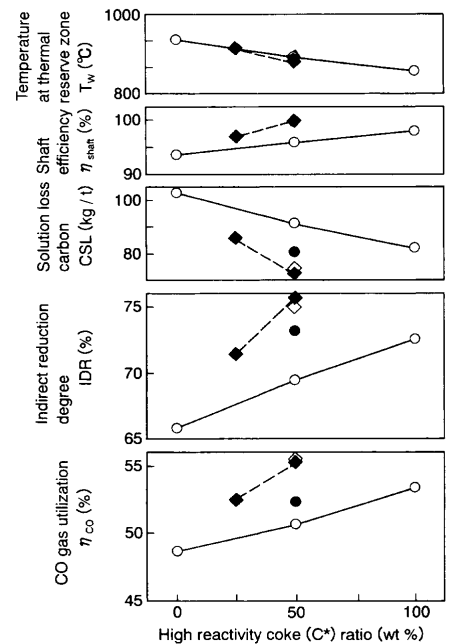


Fig. 9. Influence of mixing ratio, size and charging method of high reactivity coke on the reduction index.

また、高反応性コークスを部分使用する場合、鉱石層に混ぜて使用するほうが、高炉内還元指標は改善方向にあり、焼結鉱の還元促進効果が、より期待できることを示唆する。

4. 考察

4.1 高反応性コークス使用時の焼結鉱還元効率向上メカニズム

4.1.1 還元組織から見た焼結鉱還元挙動の変化

通常コークスならびに高反応性コークス使用時の還元状況を観察するため、試料の還元組織を調査した。Fig.10, 11に各温度部位における代表的な還元組織を示す。

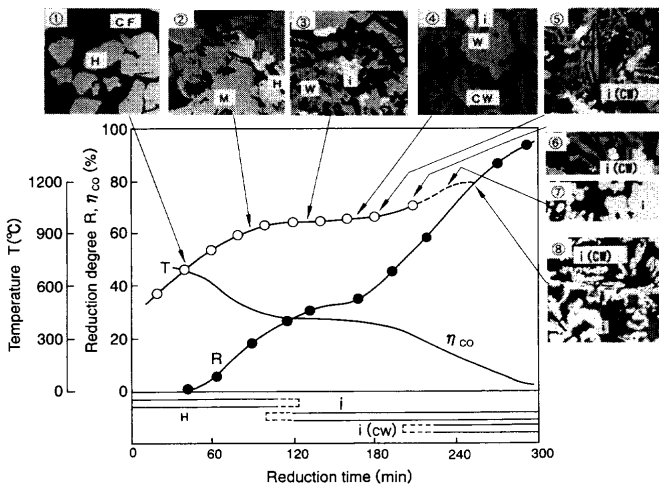


Fig. 10. Structure of sinter during reduction by using normal coke.
(H: hematite, M: magnetite, W: wustite, CW: calcio-wustite, i: iron, i (cw): iron from calcio-wustite)

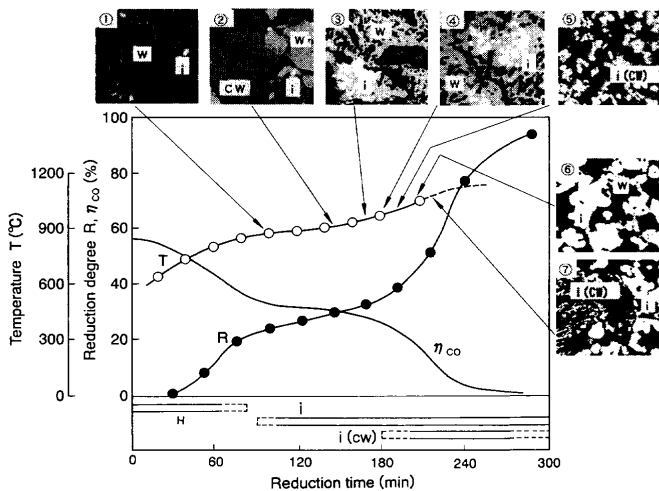


Fig. 11. Structure of sinter during reduction by using high reactivity coke.
(H: hematite, M: magnetite, W: wustite, CW: calcio-wustite, i: iron, i (cw): iron from calcio-wustite)

熱保存帯温度は異なるが、定常状態到達後の組織については、両コークス使用時とも、熱保存帯初期までにヘマタイトからマグネタイトまでの還元はほぼ終了し、熱保存帯内ではウスタイト主体の組織となっている。所々、焼結鉱粒子表面や気孔の周囲に鉄核が見え始めるが、カルシウムフェライトのウスタイト還元物（以後CWと呼ぶ）から鉄核が観察されるのは、熱保存帯末期位置もしくは、さらに高温領域である。

還元温度で比較すると、通常コークス使用時のウスタイトから鉄への還元開始温度は1000°C近傍であるのに対し、高反応性コークス使用時にはウスタイトから鉄への還元開始温度は880°Cまで低下する。またCWから鉄への還元開始温度も970°C近傍であり、通常コークス使用時の1000~1050°Cに比べ低温側となっている。

還元組織から見て、大きく異なるのは、熱保存帯温度よりも高温側の組織であり、高反応性コークス使用時には、CWの鉄に還元された組織が多く観察された。

Fig.12に代表例として、通常コークス使用時および細粒高反応性コークス部分使用時の還元速度とCWからの還元鉄生成温度との関係を示す。

炉内反応効率が高くなる程、焼結鉱の還元速度のピークは低温側となっており、ウスタイトから鉄、CWから鉄への還元開始温度は、より低温側となる。

著者らは、高温還元領域における融液生成状態ならびに気孔構造を調査し、1100°C近傍から焼結鉱内に融液が生成し始め、この生成融液により気孔が閉塞し、高温還元速度が低下し始める温度が1150°C近傍であること、初期融液がCW組織付近で生じることを明らかにした⁶⁾。

焼結鉱の還元効率を向上させるためには、融液生成の影響を受けない1150°C以下の温度領域で反応を促進させるか、あるいは融液生成の起因となるCWの量を減らすことが重要であるが、高反応性コークス使用条件は上記条件を両方満足する。

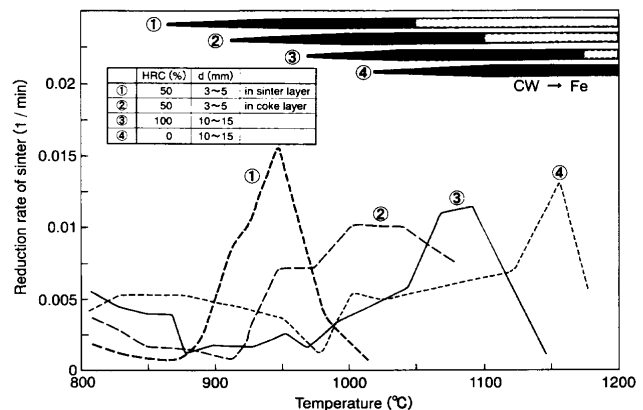


Fig. 12. Influence of mixing ratio, size and charging method of high reactivity coke on reduction rate of sinter and starting temperature of reduction from Calcio-wustite (CW) to iron.

4・1・2 高温熱保存帯より高温領域での焼結鉍／コークス反応速度の比較

Fig.13に代表例として高反応性コークス50%使用時のコークス反応量と反応速度ならびに鉍石還元速度を示す。

コークスのソリューションロス反応開始温度は高温熱保存帯温度にほぼ対応する。

トータルのコークス反応量を比較すると、高反応性コークス使用時のほうが通常コークス使用時に比べ減少するが、温度別に比較すると、高反応性コークス使用時のほうが、より低温側から反応し、その量も多い。この傾向はTable 2に示す種々の条件下でも同様である。

これは、通常コークス使用時には1150°C到達時の鉍石還元率が65%程度で、より高温域において直接還元量が増大するのに対し、高反応性コークス使用時には1150°C到達時に高還元率となっており、より高温域での鉍石還元によるCO₂発生量が少ないためである。

定常状態到達後のコークス反応量から鉍石還元に関する直接還元率と間接還元率を、また高温熱保存帯から1150°C領域内でのコークス反応量と1150°C到達時の鉍石還元率から、この領域内での直接還元率と間接還元率を導出しFig.14に示す。直接還元率はコークスのソリューション

ロス反応および熔融還元により生成したCOによる鉍石の還元率であり、間接還元率はボッシュガスCOによる鉍石の還元率に相当する。

高温熱保存帯~1150°C領域内では、コークス反応性によらず、間接還元量のほうが直接還元量よりも多く、その比率は約1.5倍である。つまり、高反応性コークス使用により、コークス反応量が増加しても、その約1.5倍の間接還元率上昇が見込めることを示す。

一方、1150°C~1200°Cの温度領域では、還元が進んでいない通常コークス使用時のデータを参照すると、間接還元量/直接還元量の比は0.75程度となり、低温域での効果に比べると、間接還元率の増加量は約半減する。

高炉融着帯内で生じる熔融還元は直接還元であることを考慮すると、実炉の場合には、本実験結果よりも、直接還元比率はさらに高くなる。

以上の知見によると、コークスのソリューションロス反応は極力1150°C以下の塊状帯部で進行させ、鉍石の間接還元への促進に役立てるほうが高炉の反応効率向上には有利である。

通常コークス使用下でも、高被還元性焼結鉍（JIS-RI70%以上）を使用して炉内反応効率を高めた場合にも、1000°Cの高温熱保存帯から1150°C温度領域までのコークスのソリューションロス量は、通常焼結鉍使用条件に比べて増加する（Table 2参照）。ソリューションロス量が増加する理由は、鉍石の還元速度向上によるCO₂生成量の増加にあるが、反応効率改善理由は間接還元率の向上によるもので、高反応性コークス使用時と同様の現象である。

炉内の反応効率が高くなる条件は、Fig.13によると、コークス反応速度のピークと鉍石還元速度のピークがより低温側にあり、また重なる条件である。コークス反応開始温度の低温化に伴うバルクCOガス濃度の増加は、鉍石の還元速度向上に寄与することは上述したが、鉍石とコークスの反応速度のピークが重なる一因としては、還元過程における鉍石の気孔量増加がより低温側から生じることで、

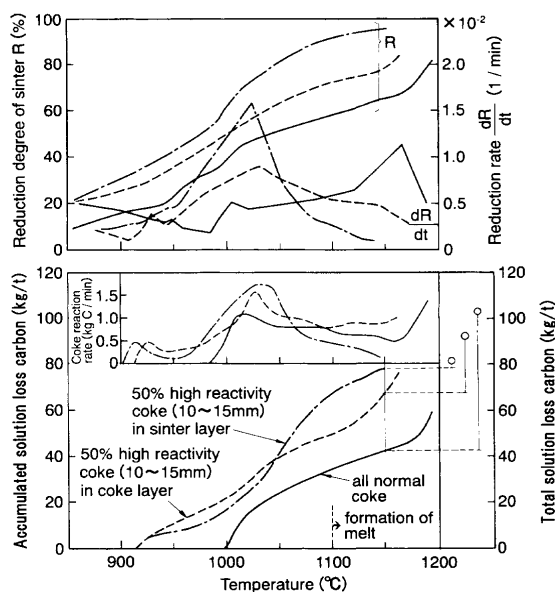


Fig. 13. Reaction behavior of sinter and coke under using high reactivity coke mixed in sinter or coke layer.

Table 2. Reduction index by using high reactivity coke.

Sinter	Coke	Dooke HRC ratio (mm)	HRC ratio (%)	Mixed layer	Solution loss carbon (kg/t)		
					TRZ~1150°C	1150°C~	Total
NS	NC	10-15			43	60	103
HRS	NC	10-15			67	16	83
NS	HRC	10-15	100		54~76	6~25	82
NS	HRC	10-15	50	Coke	67	25	92
NS	HRC	10-15	50	Sinter	79	2	81
NS	HRC	3-5	50	Coke	69	6	75
NS	HRC	3-5	50	Sinter	71	2	73
NS	HRC	3-5	25	Sinter	71	15	86
NS	Fe ₂ O ₃ -HRC	10-15	100		68	7	75
NS	CaCO ₃ -HRC	10-15	100		66~77	18~22	84
NS	Formed coke	10-15	100		64	20	84

HRS: High reducibility sinter (T. Porosity 56%)

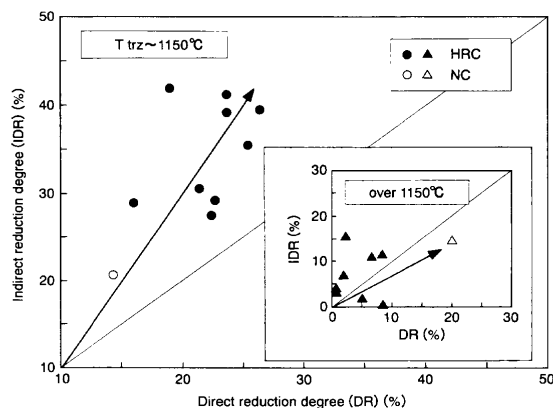


Fig. 14. The ratio of indirect reduction degree and direct reduction degree on the high temperature region over the temperature of thermal reserve zone (Ttrz).

鉱石の構造を高被還元性化したためと考えられる。

Fig.15に、鉱石の還元過程で生成する微細気孔量を、水銀圧入式ポロシメーターで調査した結果を示す。還元前後の微細気孔量の差を示すが、融液生成に伴う気孔閉塞の影響が出にくい1150°C以下の温度条件では、還元率増加に伴い、気孔量はほぼ正相関で増加する。

より低温域での鉱石の還元率上昇は、鉱石の高気孔率化を推進し、より高温域での還元性改善に大きく寄与する。このように、装入時には通常焼結鉱であっても、高反応性コークス使用による低温領域での鉱石の高気孔率化により、高温領域では高気孔率・高被還元性焼結鉱と同等の構造に変化している。

高温熱保存帯温度が低下すると、FeO-Fe還元平衡ガス濃度が高 η_{CO} 側となり、CO₂の多いガス雰囲気でもウスタイトやCWの鉄への還元が進行することから、その効果はより低温側まで拡がる。

以上の知見をまとめ、高反応性コークス使用による炉内反応効率向上メカニズムを以下に列挙する。

- ① 高反応性コークスが、より低温側から反応開始することから、熱保存帯温度低下が可能となり、FeO-Fe還元平衡ガス濃度の高 η_{CO} 化が可能となったことに加え、
- ② 低温領域でのFeへの還元によって、微細気孔量が増大し、より高温領域での還元速度向上に寄与すること、
- ③ CWの鉄への還元開始温度を低温化させ、鉄への還元量を増大させることにより、融液生成の起点となるCW量を減少させることなどが挙げられる。

4.2 高反応性コークス使用による燃料比低減量の試算

高反応性コークス使用時に、炉内反応効率改善効果が明らかとなったが、Fig. 5に示す高温熱保存帯温度と、その温度基準のシャフト効率の値をもとに、燃料比低減量を試算する。部分分割熱・物質収支モデル⁷⁾を用いて試算した

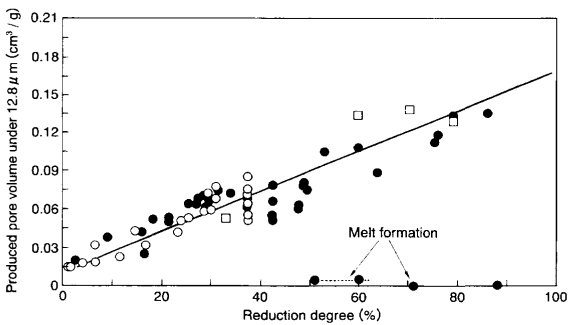


Fig. 15. Relation of produced micro-pore volume during the reduction and sinter reduction degree.

Table 3. Prediction of operational data by using high reactivity coke.

Sinter	Coke	η_{shaft} (%)	Temp. of TRZ (°C)	FR (kg/t)
NS	NC	94	1000	480
HRS	NC	100	1000	460~470
NS	HRC	99	900	450~460
HRS	HRC	100	900	445~450

NC : normal coke, HRC : high reactivity coke,
NS : normal sinter, HRS : high reducibility sinter ($\epsilon = 56\%$)
TRZ : thermal reserve zone

結果を Table 3 に示す。

通常コークス使用時のベース操業（燃料比480 kg/t）と比較すると、高反応性コークス使用により、燃料比は20~30 kg/t低減可能である。

高被還元性焼結鉱との組み合わせで、シャフト効率をさらに改善できた場合、さらに約10 kg/t程度の燃料比低減効果が期待される。

ここで試算した燃料比低減量の妥当性を検証するため、高反応性コークス+通常焼結鉱使用条件（25 kg/tの燃料比低減）と高反応性コークス+高被還元性焼結鉱使用条件（35 kg/tの燃料比低減）で実験を行いFig.16に示す。図中には、比較のため、同一焼結鉱使用下で、通常コークス使用条件での低燃料比操業実験結果（燃料比435 kg/t, 470 kg/t）も付記した。

燃料比低減により、全体的に炉内温度は低下し、焼結鉱の還元開始位置は炉下部側にずれる。通常コークスを使用した条件では、熱保存帯から高温領域にかけて、鉱石の還元速度が低下し、燃料比480 kg/tの還元状態に比べ、極端に還元不足状態に陥る。

一方、高反応性コークスを使用した条件では、熱保存帯末期からの鉱石還元促進効果が大きく、還元率90%到達位置はベース条件と同等もしくは若干炉上部側となった。つまり、還元性は担保されており、25~35 kg/tの燃料比低減操業は可能と判断される。

4.3 高反応性コークスの実炉使用試験結果

コークス反応性の上昇に伴い強度が低下する傾向にあるため、高反応性コークスの実炉使用試験においては、強度の制約が緩い中小塊コークスの使用試験とした。最初に、大型高炉での小塊コークスの多量使用可否を確認するため、1990年2~5月に大分1高炉において、小塊コークスの増使用試験を実施した⁸⁾。小塊コークスの粒度は10~25 mmで、JIS反応性26.2は大塊コークスの反応性に比べ6~11ポイント高い。最大約40 kg/t（通常使用時16 kg/t）の使用試験の結果、 η_{CO} の向上、ソリューションロ

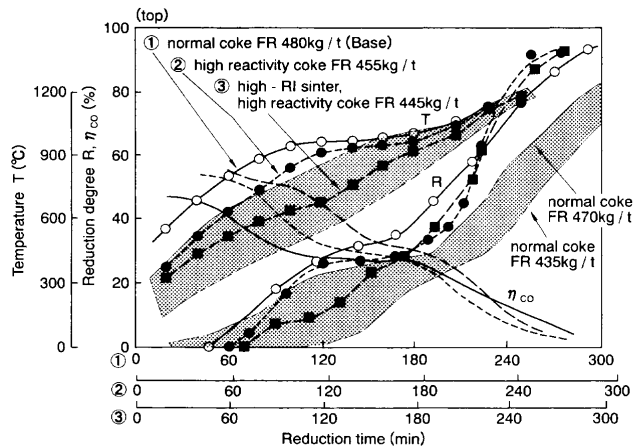


Fig. 16. Sinter reduction behavior by using high reactivity coke on the operational condition of the low fuel rate.

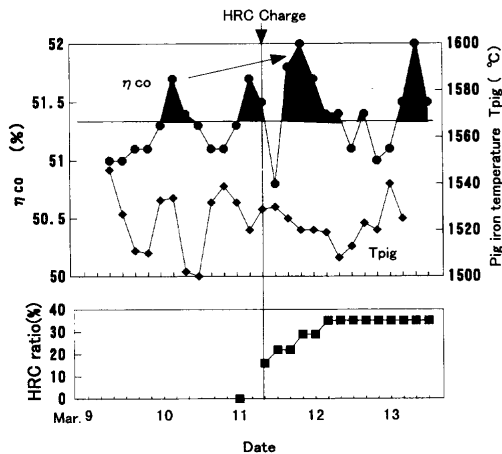


Fig. 17. Change of CO gas utilization (η_{CO}) by using high reactivity coke.

量の低下、小塊コークスの対大塊コークス置換率1.13の燃料比低減効果を確認した。次に、JIS反応性69.7、粒度17~19mmの高反応性小塊コークスの短期使用試験（1992年3月11日~15日）を実施した⁹⁾。試験は、通常小塊コークス35kg/tを高反応性小塊コークスに全量置換して鉍石層中に混合使用し、反応性の差が炉内反応に及ぼす影響を調査した。

試験期間中の大分1高炉操業推移図をFig.17に示す。炉内反応効率の尺度となる炉頂 η_{CO} は高め推移し、試験前に比べ平均0.2%（最大0.6%）向上した。

また、1994年3月に、大分2高炉で実施された月平均454.7kg/tの低燃料比操業期間中にも、通常小塊コークス26.2kg/tに加え、高反応性小塊コークスを最大10kg/t使用した¹¹⁾。垂直ゾンデ測定結果¹¹⁾によると、熱保存帯温度は約900°C（通常操業時950~1000°C）に低下していた。

高炉トータルとしての使用効果については、燃料比低減を視野に入れた長期の試験が必要となるが、還元反応面では断熱型BIS実験結果と同様の結果が得られている。

5. 結言

高炉内における焼結鉍・コークスの反応性による炉内反応挙動を精度良く推定するために、既存の高炉内反応シミュレーターを断熱型に改造し、高炉操業諸元に対応した試験が可能な断熱型高炉内反応シミュレーターを開発した。この試験装置を用いて、高炉内の反応効率向上技術として、高反応性コークス使用技術を検討し、以下の知見を得た。

(1) コークス反応性の向上に伴い、高温熱保存帯温度は低下し、炉内反応効率向上に寄与することを確認した。また、コークス反応性を制御することにより、高炉内高温熱保存帯温度を制御可能なことを明らかにした。

(2) 高炉内反応効率は、高反応性コークス使用比率の高いほど、また細粒化して焼結鉍層に混合使用するほど向

上する。

(3) Fe_2O_3 、 $CaCO_3$ 添加高反応性コークスおよび成形コークス使用下でも、アルカリ添加高反応性コークスと同等の効果が期待できる。

(4) 高反応性コークス使用時には、焼結鉍品質によって異なるが、燃料比約25~35kg/t程度の低減が可能と試算される。

(5) 高炉内条件では、鉍石の還元速度のほうが、コークスの反応速度よりも反応速度は大きい。そのため、より低温側からコークスソリューションロス反応を開始させるほうが、高炉の反応効率向上に有効である。

(6) 高反応性コークスの使用により高炉内反応効率が向上するメカニズムは、より低温から反応開始することによる $FeO-Fe$ 還元平衡濃度の高 η_{CO} 化が可能となったことに加え、低温領域で Fe への還元によって生成する気孔は微細気孔が多く、還元速度向上に寄与すること、カルシウムフェライトのウスタイト還元物(CW)の鉄への還元開始温度を低温化させ、鉄への還元量を増大させることにより、融液生成の起点となるCW量を減少させることが挙げられる。

なお、高反応性コークス使用による高炉内反応効率向上技術は、低燃料比操業を可能とするもので、炭酸ガス抑制に効果が期待できると共に、高炉の反応効率向上技術として、焼結鉍品質に加えコークス品質側からの改善も期待できることになり、操業の柔軟性に寄与することが期待される。また本技術は、高温熱保存帯が長い低熱流比型の操業、つまり微粉炭多量吹込み操業下において、より効果が期待できる可能性がある。

将来、本技術を主流となすために、高強度高反応性コークスの製造技術など、コークス製造面での技術開発の推進が要望される。

文 献

- 1) A.Rist and B.Bonnivard: *Rev. Métall.*, **60** (1963), 23.
- 2) H.Hasegawa, M.Naito, T.Orimoto and Y.Fujiwara: The 54th Committee (Ironmaking), the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), Rep. No. 2116, (1998).
- 3) B.Bonnivard and A.Rist: *Rev. Métall.*, **59** (1962), 401.
- 4) A.Okamoto, M.Naito, K.Ono, Y.Hayashi and Y.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 1529.
- 5) Y.Sato, T.Sugiyama and Y.Shimomura: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), S87.
- 6) T.Shioda, M.Naito, K.Yamaguchi, Y.Hida and Y.Hayashi: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 51.
- 7) K.Yamaguchi, H.Ueno, M.Naito and K.Tamura: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 1609.
- 8) T.Shioda, K.Sato, M.Sanui, E.Maeshibu and M.Naito: *CAMP-ISIJ*, **4** (1990), 1012.
- 9) T.Nakayama, K.Anan, M.Shirakawa, Y.Inoue and M.Naito: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 128.
- 10) M.Higuchi, Y.Matsuoka, Y.Inoue, T.Nakayama, S.Morimoto, M.Takao, S.Matsusaki, M.Naito and T.Deno: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1012.
- 11) N.Morishita, M.Higuchi, Y.Inoue, T.Haga, Y.Matsuoka, N.Konno, S.Matsusaki, M.Naito and T.Deno: The 54th Committee (Ironmaking), the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), Rep. No. 2048, (1995).
- 12) M.Naito, Y.Hosotani, K.Yamaguchi, M.Higuchi, Y.Inoue and T.Haga: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 627.