

# 高温熱保存帯温度制御による高炉内反応効率向上技術

## Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by the Temperature Control of Thermal Reserve Zone

内藤 誠章<sup>\*(1)</sup> 岡本 晃<sup>\*(2)</sup> 山口 一良<sup>\*(3)</sup> 山口 剛史<sup>\*(4)</sup>  
 Masaaki NAITO Akira OKAMOTO Kazuyoshi YAMAGUCHI Takeshi YAMAGUCHI  
 井上 義弘<sup>\*(5)</sup>  
 Yoshihiro INOUE

### 抄 録

高温熱保存帯の温度制御技術は、高炉の反応効率を抜本的に改善する技術として検討され、高反応性コークスならびに炭材内装塊成鉱の使用技術が提案された。本技術を検討するために、鉱石、コークス共存下でのコークス、炭材内装塊成鉱の反応に伴う温度・ガス量変化をシミュレート可能な実験装置として断熱型高炉内反応シミュレーターを開発した。実験により下記結論が得られた。コークスおよび内装炭材の反応開始温度が、高温熱保存帯温度(Ttrz)に対応する。コークスおよび内装炭材の反応性向上により、熱保存帯温度は低下する。高炉の反応効率は、高反応性コークスの使用ならびにその使用比率の増大、また小粒径化さらには鉱石層との混合使用によって改善する。高反応性コークスの使用によって、約25-33 kg/tの還元材比(RAR)低減が可能である。高反応性コークス使用により高炉内反応効率の向上するメカニズムとして、FeO-Fe還元平衡点(W点)の制御すなわち高温熱保存帯温度の低下、コークス反応に伴うガス還元能力の改善、低温領域からのFeOからFeへの還元促進、さらには還元に伴う微細気孔の増大と融液生成の起点となるCW(カルシオ-ウスタイト)の減少によるガス還元の加速が挙げられる。同様の技術として、炭材内装塊成鉱の使用技術についても、高温熱保存帯温度を制御する有力な技術であることを確認した。

### Abstract

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 and C-composit agglomerate is proposed. The adiabatic blast furnace simulator which is able to simulate the temperature transition and the gas volume change according to the coke and C-composite agglomerate reaction under ore and coke coexistence is developed. Following findings are obtained. The starting temperature of coke and carbon reaction corresponds to the temperature of the thermal reserve zone (Ttrz). Ttrz has decreased along with the rise of the coke and carbon 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 RAR (Reducing Agent Rate) of about 25-33 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. Transition of FeO-Fe reduction equilibrium point (W point), that is, decrease of thermal reserve zone temperature, Improvement of the gas reduction ability by the coke reaction, Gas reduction promotion by increase of micro-pore volume according to reduction from wustite to iron and to restrict of CW (calcio-wustite) melt generation. And also, technology of using of C-composite agglomerate is one of expected technology which control the Ttrz.

### 1. 緒 言

高炉内には950~1000 程度の高温熱保存帯が生成し、この温度をRIST線図<sup>1)</sup>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、図1に示すように、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、高温熱保存帯温度の低温化によりW点を高  $\alpha = \text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$  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やC)が挙げられる。これまで実施されてきた技術は、前者に属するものが主体で、焼結鉱被還元性の改善、鉱石層の高温性状改善(小塊コークスの鉱石層への混合使用など)、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。後者に関しては、著者が

<sup>\*(1)</sup> 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 部長 工博  
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2130

<sup>\*(2)</sup> 元 新日本製鐵 製鉄研究開発部

<sup>\*(3)</sup> 元 新日本製鐵 製鉄研究開発部 工博

<sup>\*(4)</sup> 名古屋製鐵所

<sup>\*(5)</sup> 大分製鐵所(現 ㈱濱田重工)

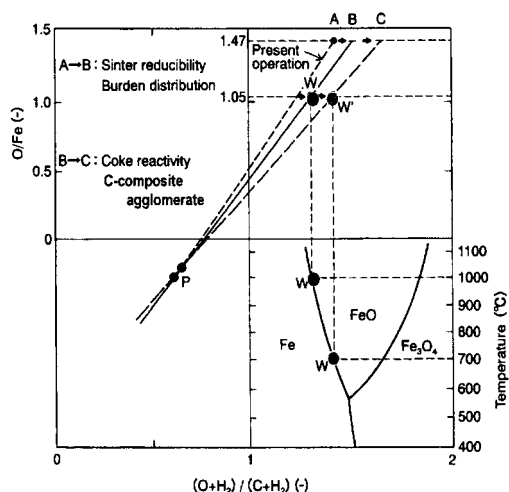


図1 高炉における反応効率向上技術(リスト線図)  
Improvement technology of reaction efficiency on a blast furnace (RIST diagram)

提示した高反応性コークス使用技術<sup>2)</sup>や含C塊成鉱多量使用技術<sup>3)</sup>に限られる。

本報告では、CO<sub>2</sub>低減技術として有望な熱保存帯温度制御技術について、その考え方と効果について紹介する。

## 2. 高反応性コークス使用による高炉内反応効率向上技術<sup>2)</sup>

### 2.1 高反応性コークス使用時の炉内挙動と焼結鉱還元性改善効果

高反応性コークス使用技術は、コークスの反応開始点を低温化することで、高炉の熱保存帯温度、還元平衡点を制御し、また高温での還元ポテンシャル向上により塊成鉱の間接還元を促進することを

狙った技術である。著者らは本技術による効果を確認する目的で、向流移動層型の断熱型高炉内反応シミュレーターを開発した(図2)<sup>2)</sup>。反応管は内径103 mm、長さ5.4 mのステンレス鋼パイプで、電気炉群はガスを高炉融着帯上部温度(1200)まで予熱し、鉱石還元を終了させるための4個の加熱炉と、この温度以下の反応、伝熱を断熱系で進行させるための10個の断熱炉で構成される。

実験に供した焼結鉱、コークスの性状ならびに試験条件を表1に

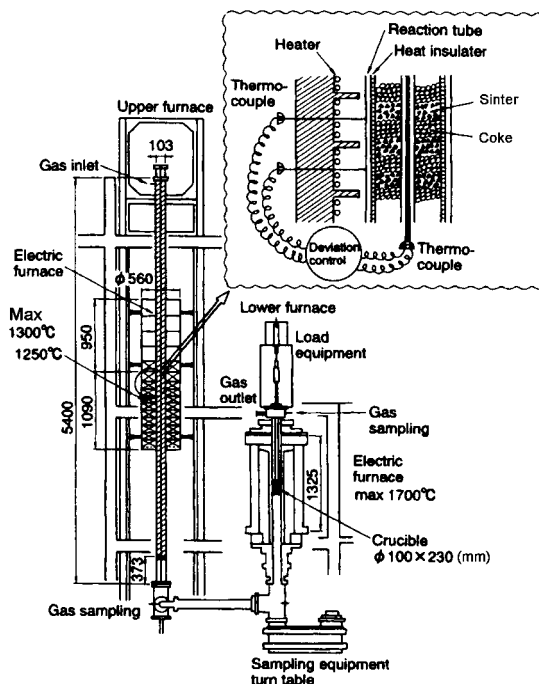


図2 断熱型高炉内反応シミュレーターの概要  
Schematic representation of the adiabatic blast furnace simulator (adiabatic BIS)

表1 実験に供した焼結鉱、コークスの化学成分、反応性指数および実験条件  
Chemical composition and physical properties of sinter and coke

a) Sinter						(wt%)	(%)
T.Fe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	JIS - RI	Total porosity
57.56	5.03	8.9	5.22	1.89	1.69	66	32
b) Coke							
Sample	K	Na	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - HRC	2	0	4	0	98		
CaCO <sub>3</sub> - HRC	2	0	0	4	95		
Formed coke	2	0	0	0	92		

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

### c) Operational conditions

RAR (Reducing agent rate) 480 kg/t

BG (Bosh gas volume) 1 363 Nm<sup>3</sup>/t

Gas composition CO: 35.6%, H<sub>2</sub>: 4.4%, N<sub>2</sub>: 60.0%

示す。焼結鉱は還元指数(JIS-RI)66%, 全気孔率32%, 粒度10~15 mmの実機焼結鉱で、コークスは高炉内でのアルカリ循環付着を考慮し、アルカリ2%添加コークスを基準コークス(JIS反応性59)として反応性の異なるコークスを製造し試験に供した。反応管径制約から10~15 mmを大粒コークス, 3~5 mmを細粒コークスとした。

反応性の異なるコークス使用時の炉内温度と焼結鉱の還元挙動を図3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 近傍に高温熱保存帯が生成するが、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 まで低下した。

焼結鉱の還元挙動に着目すると、炉頂~熱保存帯領域内までは、ほぼ類似した還元率で推移するが、熱保存帯より高温領域では、反応性の高いコークス使用時のほうが、焼結鉱の高温還元性は改善される。

炉内反応指標をRISTモデル<sup>4)</sup>で解析すると(図4), コークスJIS反応性の上昇に伴い、焼結鉱の間接還元率の向上(炉頂ガス利用率  $\eta_{CO}$  の向上), コークスソリューションロス量の低下が見られ、各熱保存帯温度を基準とした反応効率も向上した。このことは、反応性の高いコークスを使用すると、ウスタイトー鉄還元平衡点(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、操業線図を新W点に近づける効果も期待できることを示唆する。

高反応性コークスの効果的使用方法を検討するため、JIS反応性98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鉱層、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。

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し、熱保存帯末期位置から高温領域における焼結鉱の還元速度も改善した。RISTモデルによる炉内還元解析によると(図5), 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、細粒化した高反応性コークスを使用するほうが、炉内反応効率の改善効果が大きいことを示唆する。

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。

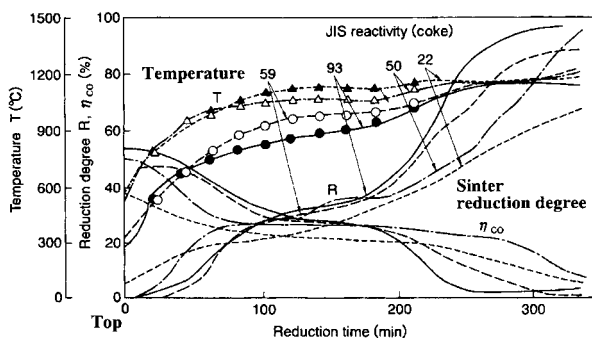


図3 炉内温度および焼結鉱の還元挙動に及ぼすコークス反応性の影響  
Influence of coke reactivity on the temperature and sinter reduction behavior

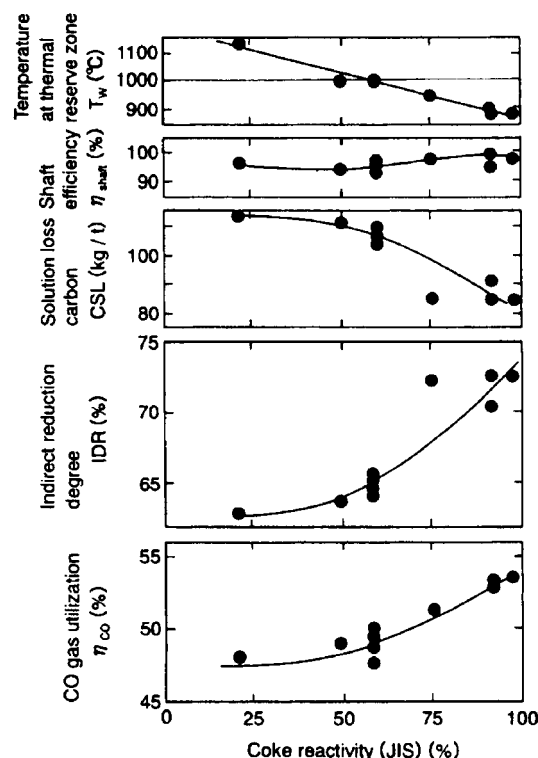


図4 還元指標に及ぼすコークス反応性の影響  
Influence of coke reactivity on the reduction index

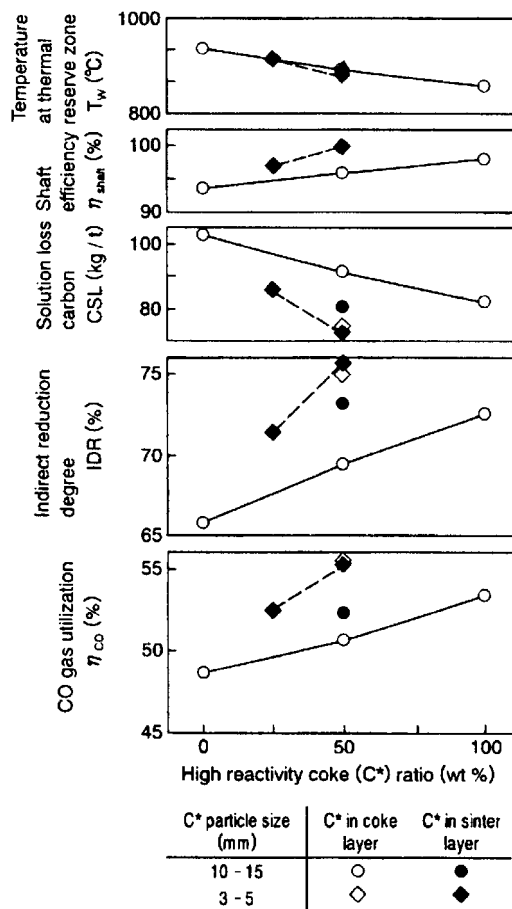


図5 高反応性コークス使用時の還元指標に及ぼす混合比、粒度および装入方法の影響  
Influence of mixing ratio, size and charging method of high reactivity coke on the reduction index

これら基礎試験結果を受けて、実炉での高反応性コークス使用試験が継続されている。

### 2.2 熱保存帯温度低下による焼結鉱還元効率向上メカニズム

通常コークスならびに高反応性コークス使用時の還元組織を比較すると、焼結鉱の構成組織の一つであるカルシウムフェライトの還元挙動に違いが見られる。

高反応性コークスを使用した操業では、焼結鉱の還元速度のピークは低温側となり、ウスタイトから鉄、カルシウムフェライトのウスタイト組織(CW)から鉄への還元開始温度が、より低温側となっている。また熱保存帯温度よりも高温側では、CWから鉄に還元された組織が多く観察される(図6)。

著者らは、通常コークス使用条件で、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 近傍から焼結鉱内に融液が生成し始め、部分的に気孔を閉塞する結果、1150 近傍から高温還元速度が低下し始めること、初期融液がCW組織付近で生じることを明らかにした<sup>5)</sup>。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ず、微細気孔の生成の顕著な1150 以下の温度領域で反応を促進させるか、融液生成の起因となるCWの量

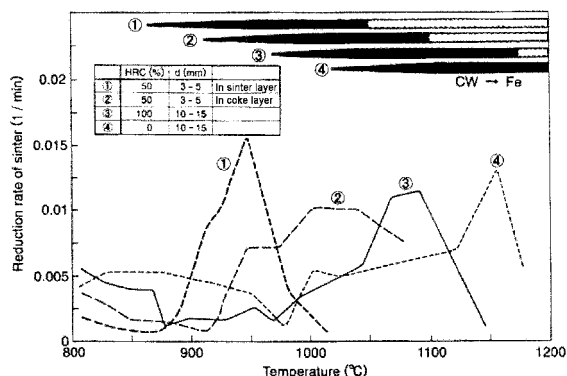


図6 焼結鉱の還元速度、カルシウムウスタイトの還元開始温度に及ぼす高反応性コークスの混合比、サイズ(d) 装入方法の影響  
Influence of mixing ratio, size (d) and charging method of high reactivity coke on reduction rate of sinter and starting temperature of reduction from calcio-wustite (CW) to iron

を減らすことが重要であるが、高反応性コークス使用技術は上記条件を両方満足する。

コークスの反応量を1150 を境に比較すると(表2), 高反応性コークス使用時には、1150 までのコークス反応量は多くなるが、1150 以上の高温領域では逆に少なく、トータルのコークスソリューションロス量は、高反応性コークス使用時のほうが低い。1150 以下でのコークス消費量の増大は、低温からコークスが反応を開始し、カップリング反応が活発に進行するためである。一方で、1150 以上の高温領域でのコークス消費量減少は、カップリング反応により焼結鉱の還元が進行する結果、1150 以上の高温領域では、焼結鉱の還元量が減少し、反応性の高いコークスが存在しても反応するCO<sub>2</sub>が少ないためである。

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要約すると、

- 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、W点を低温化することが可能となったこと、
- 熱保存帯温度の低下は、微細気孔が多くなる低温側から、FeOおよびCWのFeへの還元を促進すること(1150 以下の温度領域では、焼結鉱の還元速度が、コークスのソリューションロス反応速度よりも約1.5倍速い)、
- またCWの鉄への還元促進は、1100 近傍で初期融液化し気孔を閉塞するCW量を減少させる効果があり、高温域の還元を促進すること等が挙げられる。

### 2.3 高反応性コークス使用による還元材比(RAR)低減効果

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、図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、還元材比低減量を試算した(表3)。

通常コークス使用時のベース操業(還元材比480 kg/t)と比較すると、高反応性コークス使用により、還元材比は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程度の還元材比低減効果が期待される。ここで試算した還元材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の還元材比低減)と高反応性コークス+高被還元性焼結鉱使用条件(35 kg/tの還元材比

表2 高反応性コークス使用時の炉内温度とコークスソリューションロス反応量  
Furnace temperature and solution loss carbon by using high reactivity coke

Sinter	Sample	d coke (mm)	HRC ratio (%)	Mixed layer	Solution loss carbon (kg/t)		
					Temp. of TRZ - 1150	1150 -	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - HRC	10-15	100		68	7	75
NS	CaCO <sub>3</sub> - HRC	10-15	100		66 - 77	18 - 22	84
NS	Formed coke	10-15	100		64	20	84

NS: Normal sinter, HRS: High reducibility sinter (Total porosity 56%), TRZ: Thermal reserve zone



表3 高反応性コークス使用時の還元材比の予測  
Prediction of operational data by using high reactivity coke

Sinter	Coke	shaft (%)	Temperature of TRZ ( )	RAR (kg/t)
NS	NC	94	1 000	480
HRS	NC	100	1 000	460 - 470
NS	HRC	99	900	450 - 460
HRS	HRC	100	900	445 - 450

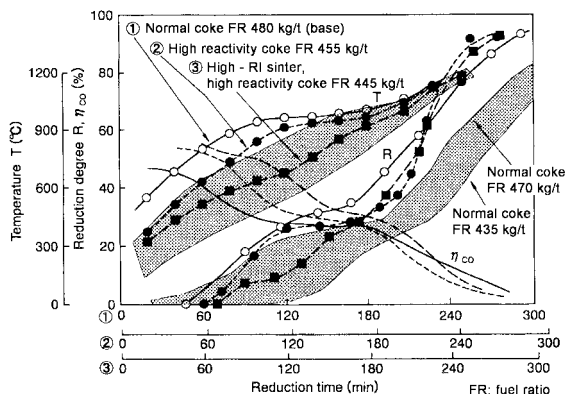


図7 高反応性コークス使用時の低還元材比操業における炉内挙動  
Sinter reduction behavior by using high reactivity coke on the operational condition of the low RAR

低減)で実験を行い、結果を図7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還元材比操業実験結果(還元材比435 kg/t, 470 kg/t)を付記した。一般的に、還元材比低減により、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、還元材比480 kg/tの還元状態に比べ、極端に還元不足状態に陥るが、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にある。つまり、還元性は担保されており、25~35 kg/tの還元材比低減操業は可能と判断される。

### 3. 含C塊成鉱使用による高炉内反応効率向上技術<sup>3)</sup>

1999~2004年まで実施された国家プロジェクト“高炉のエネルギー半減プロジェクト”において、炭材を内装した塊成鉱の還元速度に関する理論検討(カップリング反応)、高温場における還元・溶融挙動の調査あるいは形状(ぶどう状、テトラ型など)に関する検討、強度の高い炭材内装熱間成型ブリケットの製造および還元・浸炭挙動など、内装炭材の種類、量の検討や還元速度に関し数多くの検討が実施された。

著者ら<sup>3)</sup>は、含C塊成鉱の適正な形状の調査や炉内還元挙動の研究に携わり、断熱型高炉内反応シミュレーターを用いた実験を実施した(図8)。高反応性コークス使用時には900 程度までしか低下できなかった熱保存帯温度を、さらに820 前後まで低下できること、また反応効率改善効果もあることを確認した。この成果は、次

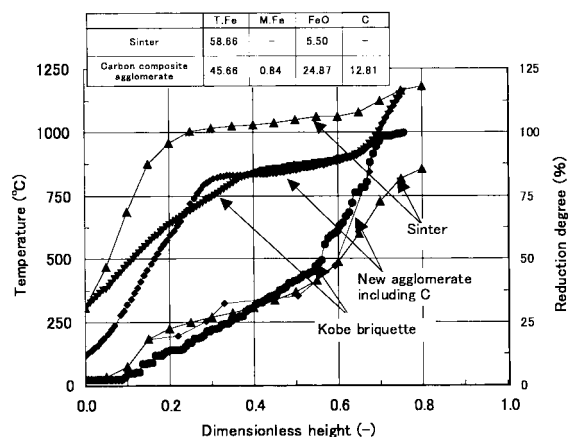


図8 高炉内条件下で含C塊成鉱を使用した時の高炉熱保存帯温度および還元挙動

Reduction behavior of carbon-contained agglomerates in a simulation of an actual furnace operation using BIS

世代高炉の熱保存帯温度制御技術(還元平衡点制御技術)の発展に寄与する技術と期待されている。

## 4. 結 言

高炉内における焼結鉱およびコークスの炉内反応挙動を精度良く推定するために、断熱型高炉内反応シミュレーターを開発し、種々の高反応性コークスあるいは含C塊成鉱を使用して、高炉の熱保存帯温度に及ぼす影響、反応効率改善効果を検証した。

- (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鉱層に混合使用するほど向上する。
- (3) 高反応性コークス使用時には、焼結鉱品質によって異なるが、還元材比約25~35 kg/t程度の低減が可能と試算される。
- (4) 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。
- (5) 含C塊成鉱の多量使用条件では、熱保存帯温度を820 まで低下でき、かつ反応効率の向上が期待できる有望な技術であることを明らかにした。

### 参考文献

- 1) RIST, A., Bonnard, B.: Rev. Metall. 60, 23(1963)
- 2) Naito, M., Okamoto, A., Yamaguchi, K., Yamaguchi, T., Inoue, Y.: Tetsu-to-Hagané. 87, 357(2001)
- 3) Naito, M., Nakano, M.: エネルギー半減プロジェクト 完了報告書 2004
- 4) Bonnard, B., Rist, A.: Rev. Metall. 59, 401(1962)
- 5) Shioda, T., Naito, M., Yamaguchi, K., Hida, Y., Hayashi, Y.: CAMP-ISIJ. 1, 51(1988)