フェロコークスによる高炉内低温度域でのガス化、還元反応の促進

樋口 謙一^{1)*}・野村 誠治¹⁾・国友 和也²⁾・横山 浩一¹⁾・内藤 誠章³⁾

Enhancement of Low-temperature Gasification and Reduction by Using Iron Coke in Laboratory Scale Tests

Kenichi HIGUCHI, Seiji NOMURA, Kazuya KUNITOMO, Hirokazu YOKOYAMA and Masaaki NAITO

Synopsis : Iron-coke having various amount of M.Fe were produced in laboratory scale and the influence of M.Fe content in Iron-coke on reaction behavior under the condition simulating blast furnace has been investigated. Cold strength of Iron-coke products was decreased with an increase of mixing ratio of iron ore mostly due to a prevention of dilatation of coal particles by iron ore, resulting in weak bonding of coal particles. Nevertheless formed Iron-coke with iron ore in the fraction up to 30 % would have enough strength for use in blast furnace as nut coke. Both CRI and JIS-reactivity were enhanced by increasing ratio of mixed iron ore, confirming the catalysis effect of M.Fe. The temperature at which carbon consumption started was lowered with an increase of T.Fe in coke. Formed Iron-coke containing 43 % of T.Fe started reaction consuming its carbon at lower temperature than conventional coke by 150 °C. Furthermore, consumed carbon ratio was improved by M.Fe installation to coke due to increasing gasification. Process evaluation with using Iron-coke in blast furnace was performed by BIS test. It was revealed that using formed Iron-coke having 43 % of T.Fe for blast furnace resulted in an increase of shaft efficiency by 6.8%. It was found that to lower the reducing agent rate in blast furnace by decreasing the temperature of thermal reserve zone, lowering the beginning temperature of coke reaction was effective. Usage of Iron-coke having M.Fe catalyst within coke matrix is one of the methods.

Key words: ironmaking; blast furnace; reduction; coke reactivity; strength; formed coke.

1. 緒言

近年、製造業ではエネルギー効率改善による地球温暖化ガスの排出削減が求められている。特に日本では、製造業全体の8%のエネルギー消費が製鉄プロセス起因であるため、高炉エネルギー原単位の新規技術による削減への期待が大きい。

そこで、高い反応性を有する高炉向け塊成物に関する研究プロジェクトが複数推進されてきた。これらの研究活動から、カーボンの反応性向上が高炉の省エネルギーに有効であることが明らかとなった¹⁾。高炉装入物の反応性を高めるためには、カーボンと酸化鉄の附存距離を小さくすることが有効であり、そのような塊成物の候補としては、炭材内装鉄やフェロコークスが挙げられる。

Naitoら²⁾は、コークスの反応性向上によって、高炉の熱保存帯温度が低下し、その結果として還元反応の高効率化が得られることを見出した。その手段として、CaやFeの触媒効果の利用が検討されており³⁻⁷⁾、高炉の実機試験での

還元材比低減効果も既に報告されている⁸⁾。

一方、将来の鉄鉱石資源の劣質化を考慮すると、このような塊成物の原料として低品位鉄鉱石を活用する技術は資源対応技術としても有望である。その観点から、鉄鉱石粉と石炭の混合物を乾留し、触媒効果のあるFeを組織内に内包するフェロコークスの研究が盛んに行われている^{9,10)}。

還元材比削減への熱保存帯温度低下の効果については、温度低下幅に下限が存在することが報告されている一方¹¹⁾、Nomuraら¹²⁾により、コークスの反応性が高いアルカリ存在条件でもフェロコークスの還元材比低減効果が認められている。

しかし、フェロコークスの製造、使用の面で最適な鉄鉱石の配合割合や高炉内のフェロコークスの反応過程には依然不明な点が多い。そこで本報では、コークスのガス化反応へのM.Feの触媒効果と、高炉を模擬した条件でのフェロコークスの反応挙動へのM.Fe量の影響について検討を行った。

原著論文: ISIJ Int., Vol.51 (2011), No.8, pp.1308-1315.

平成24年4月3日受付 平成24年5月9日受理 (Received on Apr. 3, 2012; Accepted on May 9, 2012; originally published in ISIJ Int., Vol.51, 2011, No.8, pp.1308-1315.)

1) 新日本製鐵(株) プロセス研究開発センター (Process Technology Center, Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi Futtsu Chiba 293- 8511)

2) 新日本製鐵(株) (現:九州大学大学院工学研究院材料工学部門) (Nippon Steel Corporation, now Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University)

3) (株)日鐵テクノリサーチ 資源・プロセスソリューションセンター (Resource and Process Solution Center, Nippon Steel Technoresearch Corporation)

* Corresponding author: E-mail: higuchi.kenichi@nsc.co.jp

DOI: http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.98.517

2. 実験方法

2・1 フェロコークスの製造

本研究では、coal G (強粘結炭) と coal N (非微粘炭) の2種類の石炭と、鉄鉱石を原料として用いた。Table 1に石炭と鉄鉱石の物性と化学成分値を、Table 2にフェロコークス製造時の原料の配合条件をそれぞれ示す。乾留前に成形しない、通常のコークス製造プロセスを模した製造方法と、乾留前にブリケット化する成形コークスプロセスを模した製造法の2つの製造方法を適用した。試料の製造方法の詳細は、前報に記した¹²⁾。

2・2 反応試験

Fig.1に示す、コークス反応シミュレータ (CRS)¹³⁾を用いて、フェロコークス中の鉄鉱石の還元反応とカーボンのガス化反応の挙動を解析した。19~21mmの粒径のフェロコークス、200gを反応管内に設置した後、Al₂O₃球で予熱された反応ガスを試料層に導入し、反応に伴う重量変化と排ガス成分を同時に測定した。

反応ガスと温度条件の異なる3種類の反応条件での評価を実施した (Table 3)。

CRS1, CRS2試験で、フェロコークスのN₂雰囲気中、CO + CO₂雰囲気それぞれの反応挙動を評価した。CRS3試験では、高炉を模擬したガス、温度条件での反応評価を試みた。

高炉でのフェロコークス使用評価は、断熱型高炉反応シミュレーター (BIS炉) を用いた。BIS炉²⁾は、高炉シャフト部の反応効率を、向流反応での還元と熱移動を模擬することで評価することができる装置である。BORIS炉¹⁴⁾を参照し、断熱制御を付与することで、熱移動とカーボンソルーションロス反応による吸熱反応量で決定される還元条件を試料に精緻に与えることができる。

焼結鉱とコークスは反応管内に層状に装入され、電気炉が反応管上端から下端に向かい下降する。同時にボッシュガスを反応管上端から導入し、擬似向流移動層を再現する。ボッシュガス量と組成は、微粉炭吹き込みを考慮し、1360Nm³/tHM, CO 36.0%, H₂ 7.0%, N₂ 57.0% N₂一定とし、還元材比は481kg/tHM一定とした。

Table 1. Properties of coals and chemical composition of iron ore used in the present study.

Coal	Proximate analysis (mass %) dry basis		Ultimate analysis (mass %) dry basis			Caking properties		Petrographic analysis	
	Ash	VM	C	H	N	Dilatometry	Gieseler plastometry		
						Total dilatation (%)	Maximum fluidity (log MF/ddpm)	Ro (%)	TI (%)
coal G	9.0	23.8	81.71	4.75	1.82	119	2.92	1.19	28.2
coal N	9.7	36.4	76.57	5.23	1.81	43	2.22	0.73	18.1

Chemical composition of iron ore (mass %)

T.Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂
67.93	0.13	1.08	0.06	0.50	0.04	0.07
S	P	Mn	CW	Na ₂ O	K ₂ O	
0.003	0.033	0.44	0.38	0.56	1.09	

Table 2. Mixing conditions of raw materials for Iron-coke production.

Test No.		1	2	3	4	5	6	7
Charge materials shape		Powder			Briquette			
Coal G	%	70.0	66.5	63.0	-	-	-	-
Coal N	%	30.0	28.5	27.0	100.0	90.0	70.0	50.0
Iron ore	%	0.0	5.0	10.0	0.0	10.0	30.0	50.0
Total	%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
SOP	%	-	-	-	8.0	8.0	8.0	8.0
Bulk density (kg/m ³)	Coal	850	850	850	542	534	488	387
	Coal + Iron ore	850	895	944	542	593	698	774
	Coal+ Iron ore +SOP	-	-	-	585	640	754	835

電気炉の下降中に、反応管内部の固定位置の還元率と温度を測定した。ガス利用率とシャフト効率などの全体プロセス評価は、定常状態到達後の炉頂排ガス成分分析値から算出した。反応が定常状態に到達後、所定時間経た後に、反応管内試料をN₂通流下で冷却した。異なる位置および到達温度で急冷された試料の組織と化学成分を分析した。

Table 4にBIS炉試験条件を示す。通常コークスの50%カーボン等量分をフェロコークスに置換した。同時に、装入されるT.Fe量は、焼結鉱の装入量を調整して一定にした。フェロコークスは通常コークス層に均一混合して使用した。

3. 結果と考察

3・1 フェロコークスの基礎特性

Fig.2にブリケットに成形後に乾留した成形フェロコークスの外観を示す。鉄鉱石の配合なしのTest 4の試料は、

Fig. 1. Schematic diagram of apparatus of CRS test.

大きく膨張していた。一方、鉄鉱石を配合した試料には、いずれも顕著な膨張は観察されなかった。Fig.3に鉄鉱石配合量に伴う、フェロコークスの冷間強度 (I_{10}^{600}) の変化を示す。成形の有無に寄らず、フェロコークスの冷間強度は、鉄鉱石配合量の増加に伴い低下した。それでも、成形フェロコークスの方が比較的強度は高く、鉄鉱石配合30%でも I_{10}^{600} は80%以上を維持していた。

高炉の小塊コークスにはそれ程高い冷間強度が要求されないことを考慮すると、フェロコークスを小塊コークス代替として使用するならば、鉄鉱石配合30%まで配合した成形フェロコークスは、高炉使用に耐えうる強度を持つものと期待される。

ここで、鉄鉱石配合により強度が低下するのは、鉄鉱石

Table 3. Test conditions of CRS.

	CRS 1	CRS 2	CRS 3
Gas	N ₂	CO + CO ₂ (CO/CO ₂ = 50/50)	N ₂ (RT ~ 800°C)
			CO + CO ₂ (800 ~ 1200°C) CO/(CO+CO ₂) = 0.6~0.95*
Flow rate	20 Nl/min (8 cm/s)		
Temperature	RT~1100°C at 10°C/min 1100°C for 60 min	RT~1200°C at 10°C/min	RT~1200°C at 5°C/min
weight	200 g		
Sample size	19 ~ 21mm		
	fomed iron-coke was crushed into four pieces with 15 ~ 25 mm in size		

$$* CO/(CO+CO_2) = 0.000875 \times T(^{\circ}C) - 0.1$$

Table 4. Test conditions of BIS test.

		Conventional coke			Formed coke		
Iron-coke	-	No.1	No.2	No.3	No.4	No.6	No.7
F.C of iron-coke	%	87.8	83.0	79.2	85.7	59.9	40.8
F.C of conventional coke	%	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
T.Fe of iron-coke	%	0.3	4.4	8.5	1.5	27.0	43.2
T.Fe of sinter	%	58.1	58.1	58.1	58.1	58.1	58.1
Sinter	g/ch	463.0	459.0	455.0	462.0	429.0	383.0
Conventional coke*	g/ch	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Iron-coke*	g/ch	50.0	54.0	55.0	51.0	73.0	107.0
charged T.Fe **	g/ch	269.1	269.1	269.0	269.2	269.0	268.8
charged Oxygen	g/ch	111.9	111.4	111.1	111.7	107.1	101.1
charged F.C **	g/ch	87.8	88.7	87.4	87.6	87.6	87.6

* homogeneously mixed, ** kept constant

Fig. 2. Appearances of formed Iron-coke products.

Fig. 3. Relationship between iron ore blending ratio and coke strength index.

Fig. 4. Microstructures of formed Iron-coke products.

によって石炭粒子の膨れが阻害されて、石炭粒子間の接着が弱まったためと推定される。

Fig.4に、成形フェロコークスの光学顕微鏡組織写真を示す。鉄鉱石10%配合のTest 5で既にコークス基質部の結

Fig. 5. Changes in corrected CRI values of Iron-coke products with blending ratio of iron ore powder.

Fig. 6. Changes in JIS-Reactivity of Iron-coke products with blending ratio of iron ore powder.

合の脆弱化が観察された。さらに、鉄鉱石配合50%配合のTest 7では、粗大な石炭粒子が膨張しているのに対して、微細な石炭粒子は膨張していない様子が観察された。

Fig.5, 6に鉄鉱石配合量に伴うCRIとJIS反応性の変化をそれぞれ示す。CRIの値はコークスの固定カーボン値で補正した。これらの反応性指標は鉄鉱石配合によって向上した。CRIとJIS反応性は、鉄鉱石配合割合の増加に伴って向上し、M.Feの触媒効果を確認した。

Table 5に各種フェロコークスの化学成分を示す。配合した鉄鉱石の殆どは乾留過程で金属鉄まで還元されており、T.Feを高く含有するフェロコークスの金属化率は約70%であった。フェロコークス成品内部で検出された酸化鉄は、冷却時やハンドリング時に再酸化で生成したか、乾留時に残留した鉄鉱石であると推察された。

フェロコークスの固定カーボンの値は、灰分測定時の金属鉄やFeOの再酸化を考慮して補正した。補正値は、石炭の配合割合から算出した値と良く一致していた。

3・2 フェロコークスのガス化反応

Fig.7にコークス中のT.Fe含有量と反応開始温度の関係

Table 5. Results of chemical analysis of Iron-coke products.

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
Charge material shape		Powder			Briquette			
Iron ore (PF)	%	0	5	10	0	10	30	50
T.Fe	mass%	0.3	4.4	8.5	1.5	9.1	27.0	43.2
M.Fe	mass%	0.1	1.9	6.2	0.6	6.6	19.7	28.8
FeO	mass%	0.1	1.2	1.2	0.4	0.9	4.3	7.8
O	mass%	0.1	0.9	0.8	0.3	0.9	2.7	5.3
Reduction degree	%(H)	n.a	51.0	76.6	n.a	75.6	77.2	71.4
Metallization degree	%	n.a	43.8	72.9	n.a	73.2	73.0	66.7
Ash	Wt%dry	12.2	17.9	23.6	14.6	24.8	49.1	72.5
Ash after correction*	Wt%dry	12.2	17.0	20.8	14.3	21.8	40.1	59.2
VM	Wt%dry	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FC after correction*	mass%	87.8	83.0	79.2	85.7	78.2	59.9	40.8
(Ref)calculated FC**	mass%	87.8	83.4	79.0	85.7	77.2	60.0	42.9

* after consideration of oxidation during ash measurement

** based on mixing condition of coals

Fig. 7. Relationship between T.Fe content of coke and reaction beginning temperature.

を示す。反応開始温度は、カーボン消費が始まった温度、即ち N_2 雰囲気 (CRS1) では、直接還元の結果COガスが生成し始めた温度、CO- CO_2 雰囲気 (CRS2) では、カーボンのガス化反応の結果、重量減少速度 dw/dt が 0.002min^{-1} を超えた温度と定義した。

CRS1, CRS2いずれの試験に於いても、コークス中のT.Fe含有量の増加に伴って、反応開始温度が低下し、T.Feを43%含有するフェロコークスの反応開始温度は鉄鉱石を配合しない成形コークスに比べて150℃反応開始温度が低下した。また、フェロコークスの種類に関わらず、直接還元が起こる温度は、ガス化が起こる温度に比べて200℃低かった。

Fig.8に、高炉を模擬した条件でのCRS3試験での試料温度による重量変化と排ガス成分の変化を示す。

ΔCO と ΔCO_2 は、下記の式から算出した。

$$\Delta CO (\%) = CO_{out} (\%) - CO_{in} (\%) \quad (1)$$

$$\Delta CO_2 (\%) = CO_{2out} (\%) - CO_{2in} (\%) \quad (2)$$

通常形状のコークス (No.1~3) と成形コークス (No.4~7) のいずれも、1200℃到達時の重量減少がコークス中のT.Feの増加に伴って増加した。

800~1000℃の温度域では、COが減少し、 CO_2 が増加しており、フェロコークス中の酸化鉄の還元反応量がカーボンのガス化反応量を上回っていることを示している。一方、1000~1200℃の温度域では CO_2 が減少し、COが増加しており、カーボンのガス化が活発化していることを示している。

同等のT.Feを含有するNo.3試料とNo.5試料の反応性を比較すると、成形フェロコークス (No.5) の方が反応性が高かった。この比較結果は、Fig.5, 6, 7でも同様であり、配合原料と成形方法の差に起因するものと推定される。

CRS3試験後のフェロコークスの化学成分をFig.9とTable 6に示す。化学成分値から酸化鉄の還元による重量減少量は評価できるので、残りの重量減少量はカーボン消費と見なすことができる。フェロコークスの種類によって固定カーボン含有量が異なる点を考慮して、カーボン消費率CCRを式(3)のように定義した。

$$CCR (\%) = \left(\frac{C_{LOSS} \%}{C_{BEFORE} \%} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$C_{LOSS} (\%)$: カーボン消費量 (Table 6 参照)

$C_{BEFORE} (\%)$: 反応前カーボン含有量 (Table 5)

Fig. 8. Experimental results of high temperature reaction of iron-coke products (CRS 3, left: conventional coke, right: formed coke).

Table 6. Analysis result of iron-coke after CRS3 test.

			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	Note
			Conventional coke			Formed coke				
After reaction	T.Fe	mass%	0.3	4.7	9.5	0.9	9.8	30.0	54.2	measured
	M.Fe	mass%	0.1	4.5	9.2	0.7	9.4	29.3	53.5	measured
	FeO	mass%	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	measured
	Ash	Wt%dry	12.3	18.4	24.7	13.7	26.1	54.0	87.5	measured
	F.C after correction*	mass%	87.0	83.5	79.3	86.2	77.7	58.6	35.5	=100-VM-Ash'
Reduction degree		%H**	n.a	96.2	97.0	n.a	96.0	97.9	98.7	
Metallization degree		%	n.a	95.1	96.6	n.a	95.6	97.8	98.7	
Weight loss (total)		mass%	2.7	3.0	4.1	2.6	6.0	9.4	13.6	measured A
Weight loss (reduced oxygen)		mass%	0.0	0.9	0.7	0.2	0.8	2.4	5.1	measured O
Weight loss (consumed carbon)		mass%	2.7	2.2	3.4	2.4	5.2	7.0	8.5	C _{LOSS} = A-O
by gasification		mass%	2.7	1.8	3.1	2.3	4.9	6.1	6.6	=C-O/16*12
Consumed carbon ratio		%	3.0	2.6	4.3	2.8	6.6	11.6	20.9	equation (3)
Total consumed C/O		molar ratio	-	-	6.1	-	-	3.8	2.2	=C/O (in mole)

* after consideration of oxidation during ash measurement, ** hematite base
n.a : not analyzed

Fig.10にカーボン消費率CCRと反応前のコークス中T.Fe含有量の関係を示す。コークス中のT.Feの増加に従い、カーボン消費率が向上していることが分かった。
本研究で用いたフェロコークスは酸化鉄を含有するため、カーボン消費はCOガスのみの発生を伴う'純粋なガス

化と、CO、CO₂ガス発生を伴う還元反応も随伴している。後者の反応量は還元機構に依存し、ガス発生によって下記の3種に分類される。
1) 固体カーボンによる直接還元
(FeO + C = Fe + CO, 消費 C/O = 1) ,

Fig. 9. Weight loss of Iron-coke products (CRS 3).

Fig. 10. An increase in consumed carbon ratio with increasing T.Fe content of coke (CRS 3).

Fig. 11. Microstructures of iron-coke with 43% of T.Fe before and after CRS test (CRS 3).
M : Metal, W : Wustite, C : Coke matrix, R : Resin.

2) ガス化生成COによる還元反応

($\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$, 消費 C/O = 0.5),

3) バルクCOによる還元反応

(消費 C/O = 0)

上記の機構には2つの制約条件が存在する。即ち、直接還元はカーボンと酸化鉄の物理的な接触が必要であり、還元初期の期間に限定される。さらに、バルクCOによる還元には試料中へのガス拡散が必要であり、ガス発生反応であるガス化反応が始まるまでの反応初期の期間に限定される。

以上の考察から、主たる還元機構はガス化生成COによる還元であると推察される。この仮定に基づき、Table 6中

での全重量減少に対するガス化起因の割合を評価すると、約80%となり、消費カーボンの殆どが有効に系外へCOを排出すると評価される。

Fig.11にT.Feを43%含有するフェロコークスのCRS3試験前後の試料の組織観察結果を示す。EDS分析から、白色、明灰色、暗灰色粒子はそれぞれ、金属鉄、ウスタイト、石英（鉄鉱石の脈石）であると確認した。反応前では、金属鉄粒子はウスタイト相に取り囲まれており、ウスタイトは乾留後の冷却時や大気中でのハンドリング時に再酸化生成した可能性が高い。反応後試料ではウスタイト相は消失しており、酸化鉄の還元が高温で起こると推定したTable 6, Fig.8の結果と一致する。同時に金属鉄相は浸炭により半溶

Fig. 12. Results of BIS test with using iron-coke products (left: conventional coke, right: formed coke, upper: temperature and reduction degree, lower: reduction degree of 'sinter' calculated from chemical composition analysis).

Fig. 13. Results of BIS test.

融、もしくは凝集している状態であった。

3・3 BIS炉を用いたフェロコックス使用のプロセス評価

Fig.12にBIS炉試験結果を示す。通常形状、成形のいずれのフェロコックスの使用によっても、熱保存帯温度が低下した。熱保存帯までは温度低下に伴って、還元が遅延する傾向があったが、熱保存帯以降の還元は逆に促進されていた。

試料温度と還元率の関係をみると (Fig.12下段)、使用するフェロコックスのT.Fe含有量の増加に伴い、還元率が向上していた。

Fig.13に、BIS炉を用いた、フェロコックス使用時の高炉プロセス評価結果を示す。本試験条件では、フェロコックスがM.Feを含有するため被還元酸素量が試験毎に異なるため、炉頂ガスのガス利用率 ($\text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2) \times 100$, η_{CO}) やシャフト効率をヘマタイト基準で評価した。

使用するフェロコックスのT.Fe含有量の増加に伴って熱保存帯温度が低下した。T.Feが43%の成形フェロコックス (No.7) の使用時は、鉄鉱石配合なしの通常形状コックス (No.1) と比べると、熱保存帯温度が186℃低下し、シャフト効率も6.8%の改善と評価された。

Fig.14にBIS炉試験結果である熱保存帯温度と前述のCRS2試験の反応開始温度の関係を示す。測定装置も測定

Fig. 14. Relationship between temperature of thermal reserve zone in BIS test and the temperature at which gasification took place in CRS2 test.

条件もそれぞれ異なるにも関わらず、両者の測定結果はよく一致し、熱保存帯温度がコークスの反応性に強く依存していることが分かった。

4. 結言

M.Feのコークス反応性への触媒効果に着目し、M.Fe含有量が種々異なるフェロコークスを試作した。本試料を用いて高炉条件下での反応挙動に及ぼすM.Fe含有量の影響を検討し、以下の知見を得た。

(1) 鉄鉱石の配合割合の増加に伴って、フェロコークスの冷間強度が低下した。これは、鉄鉱石により石炭粒子の膨張が阻害され、石炭粒子の接着が脆弱化するためと考えられた。しかし、鉄鉱石配合が30%までの成形コークスであれば、鉱石層内での使用に耐えうるフェロコークスの製造は可能と考えられた。CRIとJIS反応性は、鉄鉱石配合割合の増加に伴って向上し、M.Feの触媒効果を確認した。

(2) コークス中のT.Fe含有量の増加に伴い、 N_2 雰囲気、 CO - CO_2 雰囲気とも、カーボン消費の開始温度が低下した。T.Feを43%含有する成形フェロコークスは、通常コークス

に比べてカーボン消費開始温度が150℃低かった。フェロコークスのカーボン消費率も、T.Feの含有量の増加に伴って向上した。

(3) BIS炉を用いてフェロコークス使用時の高炉プロセス評価を実施した。T.Feを43%含有する成形フェロコークスは、熱保存帯温度を186℃低下させ、シャフト効率を6.8%改善することができると評価された。

(4) 熱保存温度を低下させて、高炉の還元材比を削減するためには、コークスの反応性を高めることが有効であり、触媒効果を有するM.Feをコークス基質に内包するフェロコークスは有効な手段のひとつであることが確認された。

なお、本研究はNEDO事業「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」の一環として行われたものであり、ここに謝意を表します。

文 献

- 1) M.Naito, S.Nomura and K.Kato: *Tetsu-to-Hagane*, **96**(2010), 201.
- 2) M.Naito, M.Nakano and S.Nomura: Proc. of 3rd ICSTI, Düsseldorf, VDEh, (2003), 539.
- 3) A.Tomita, T.Takarada and Y.Tamai: *Fuel*, **62**(1983), 62.
- 4) Y.Ohtsuka, Y.Kuroda, Y.Tamai and A.Tomita: *Fuel*, **65**(1986), 1476.
- 5) Y.Kashiwaya, S.Nakaya and K.Ishii: *Tetsu-to-Hagane*, **77**(1991), 759.
- 6) H.Ohme and T.Suzuki: *Energy & Fuels*, **10**(1996), 980.
- 7) M.Grigore, R.Sakurovs, D.French and V.Sahajwalla: *ISIJ Int.*, **46**(2006), 503.
- 8) S.Nomura, H.Ayukawa, H.Kitaguchi, T.Tahara, S.Matsuzaki, M.Naito, S.Koizumi, Y.Ogata, T.Nakayama and T.Abe: *ISIJ Int.*, **45**(2005), 316.
- 9) S.Nomura, H.Terashima, E.Sato and M.Naito: *ISIJ Int.*, **47**(2007), 823.
- 10) H.Sumii, T.Yamamoto, H.Fujimoto, T.Sato, T.Anyashiki, H.Sato, M.Sato and K.Takeda: Proc. of 5th ICSTI, Shanghai, CSM, (2009), 372.
- 11) A.Babich, D.Senk and H.W.Gudenau: *Ironmaking Steelmaking*, **36**(2009), 222.
- 12) S.Nomura, K.Higuchi, K.Kunitomo and M.Naito: *ISIJ Int.*, **50**(2010), 1388.
- 13) H.Yokoyama and K.Kunitomo: *CAMP-ISIJ*, **18**(2005), 978.
- 14) B. Bonnivard and A.Rist: *Rev. Metall.*, **59**(1962), 401.