鉬石層へのコークス多量混合における 流量調整弁 (FCG) ダイナミック制御技術の開発

村尾 明紀^{1)*}・柏原 佑介¹⁾・渡壁 史朗¹⁾・佐藤 道貴¹⁾

Development of FCG (Flow Control Gate) Dynamic Control Technique at Mixed Charging of Massive Coke into Ore Layer

Akinori MURAO, Yusuke KASHIHARA, Shiro WATAKABE and Michitaka SATO

Synopsis : A method of improving control of the radial mixed coke ratio distribution under high coke mixed charging, which is called FCG (Flow Control Gate) dynamic control method, was studied with the aim of stable operation with high productivity and low RAR at Chiba No. 6 blast furnace. For this purpose, scale model experiments and mathematical burden distribution model calculations were performed. The effects of FCG dynamic control with ore and coke simultaneous discharging from the respective top bunkers on the mixed coke ratio distribution were examined and applied to Chiba No. 6 blast furnace. After application of FCG dynamic control, improvements of gas utilization efficiency: +0.2%, gas permeability at cohesive zone (the part of lower shaft): -14.7% and coke ratio: -4.2kg/t (with constant RAR) were confirmed. Since June 2007, high productivity operation with low RAR has been conducted at Chiba No. 6 blast furnace.

Key words: blast furnace; CO₂ emission; low RAR operation; bell-less charging; coke mixed charging; coke mixed ratio; coke mixing method; simultaneous discharging; burden distribution; permeability; cohesive zone.

1. 緒言

製鉄工程での二酸化炭素排出量削減のためには、高炉での低還元材比操業は必須である^{1,2)}。低還元材比操業を指向するためには、高炉内の通気性を高度に制御することが必要となり、特に炉内で最も圧力損失が大きい融着帯における通気性を緩和することが最大の課題となる。従来、融着帯の通気改善対策として、融着帯肥大化を防止する目的で原料の高温性状や装入粒度の改善³⁻⁵⁾、また融着帯形状の半径方向分布制御を目的とした装入物分布方法の改善⁶⁻⁸⁾と共に、鉬石層へのコークス混合装入が指向されている⁹⁻¹³⁾。鉬石層へのコークス混合装入により、鉬石の収縮率低下、また混合コークスが優先的にソルロス反応を受けるためにコークス層が保護される結果、融着帯での空隙率が増加し、炉内全体の通気性や混合層の還元性を改善する効果が期待される¹⁴⁾。JFEスチールの千葉第6高炉では多機能装入装置（ベルレス式、並列3バンカー型炉頂装入装置）を用いて混合装入が適用されている¹⁵⁾。混合装入の課題として、旋回シュートからの落下時や高炉堆積面上における鉬石と混合コークスの分離がある。コークスの分離には鉬石とコークスの粒径差や密度差、堆積面形状、堆積角が影響を及ぼすと考えられている。また通常、貯骸層に

て発生する小中塊コークスを鉬石層に混合するのが一般的であり、発生量以上の混合量を設定する場合、塊コークスの混合が必要となるが、鉬石と混合コークスの分離はより顕著になると考えられる。塊コークスを混合する際でも分離を防止する方法として、コークス、鉬石をそれぞれの炉頂バンカーから同時に切り出し、旋回シュート上で混合する方法、旋回シュートの傾動方向を炉の中心側から炉周辺方向とした逆傾動装入が千葉第6高炉には導入されており¹⁶⁾、2002年4月以降、鉬石層への120kg/tのコークス混合により、高出鉄比、低還元材比操業を安定して継続している。しかしながら、さらなる通気性改善、低還元材比操業に向けた混合層のコークス分離防止という観点では、鉬石、コークス同時切り出し方法にもまだ改善の余地があると考えられる。ここでは、新しいコークス混合率制御手段として、FCG (Flow Control Gate : 流量調整弁) ダイナミック制御を考案し、数式モデルを用いた計算と縮尺模型実験による検討を行った。結果として、FCGダイナミック制御法を確立し、JFEスチール東日本製鉄所千葉地区第6高炉にこの技術を適用した。

原著論文 : ISIJ Int., Vol.51 (2011), No.8, pp.1360-1367

平成24年1月17日受付 平成24年3月26日受理 (Received on Jan. 17, 2012; Accepted on Mar. 26, 2012; originally published in ISIJ Int., Vol.51, 2011, No.8, pp.1360-1367)

1) JFEスチール(株)スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama Hiroshima 721-8510)

* Corresponding author : E-mail : a-murao@jfe-steel.co.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.98.397>

2. 縮尺模型実験

2・1 実験方法

今回実験に使用した装入模型装置は千葉第6高炉の1/17.8の縮尺であり、Fig.1に示すように、ベルレス式、並列3バンカー型炉頂装入装置を備えている。また実機の装入系統を模擬するため、貯鉱槽、貯骸層、サージホッパー、ベルトコンベアから構成されている。炉体の下部では、12本のガス吹き込み口からの送風と底部の電磁フィーダーによる原料の抜き出しが可能であり、原料の荷下がり再現している。原料の装入中は下部から送風することで、装入物の堆積角を再現した。実験条件や原料粒径は模型の縮尺比に基づいている。本実験では、焼結鉱(黒色)、塊鉱石(赤色)、コークス(黒色)、小中塊コークスとして色付き砂(白色)を用いて、実験後の断面観察時に層構造を把握できるようにした。実験に用いた各原料の粒度分布をFig.2に示す。実験に用いた各原料の粒度分布は実機でのサンプリングデータを参考にした。篩目については、縮尺に応じてJIS規格で規定されている中で近い篩目を採用し、積算粒度分

Fig. 1. Experimental apparatus.

Fig. 2. Particle size distribution.

布が実機データと近似するように設定した。焼結鉱、塊鉱石と小塊コークス、塊コークスの粒度差が大きいことが分かる。また原料の落下運動については、重力と慣性力の比であるフルード数を実験条件と実機条件で一致させた。

2・2 現状のコークス混合状況の観察

2・2・1 実験条件

Fig.1に示す実験装置を用いて、鉱石層内のコークス混合状況を観察した。コークス比は400kg/tとし、各バッチの装入重量、装入時間は実機条件に応じてTable 1のように設定した。模型実験での装入重量に関しては、断面観察時の可視化のために色付き砂(白色)、塊鉱石(赤色)等を用いているため、相似則に加えて嵩比重の多少の違いも考慮し、鉱石層、コークス層の体積比が実機と同一となるように補正した。千葉第6高炉の装入手順は、コークス2バッチ(C1, C2)、鉱石2バッチ(O1, O2)である。千葉第6高炉におけるコークス多量混合装入方法のイメージ図を従来装入方法と比較してFig.3に示す。多量混合装入法では、混合する塊コークスはコークス2バッチ目(以下、C2)の一部が鉱石1バッチ目(以下、O1)に混合され、小塊コークスは鉱石2バッチ目(以下、O2)に混合される。塊コークスと鉱石はそれぞれが装入された炉頂バンカーから同時に排出、混

Table 1. Comparison of charging weight and charging time between commercial plant and experiment.

	Commercial Plant		Experiment	
	Charging weight (t)	Charging time (sec)	Charging weight (kg)	Charging time (sec)
C1	25.0	96	5.03	22.8
C2	10.0	96	2.01	22.8
O1	90.13	48	16.54	11.4
O2	73.74	48	14.59	11.4
+	+		+	
Small coke	5.5		1.44

Fig. 3. The image of high ratio coke mixed charging method of Chiba No.6 blast furnace.

合される。小塊コークスは貯鉬槽の鉬石ベルトコンベア上で混合される。本実験では、O1に塊鉬石（赤色）、O2に焼結鉬（黒色）を用いて、混合コークスと鉬石を識別した。実験終了後、低粘性の樹脂を堆積面表層から流し込み、樹脂硬化後に切断し、堆積断面の観察を行った。

2・2・2 堆積断面観察結果

Fig.4に従来の多量混合装入法によるコークスの混合状況を示す。鉬石層中の混合塊コークス、小塊コークスともほぼ均一に鉬石層中に混合しているが、一部の混合塊コークスが炉中心近傍に集中している。これらの塊コークスは装入中に分離し、流れ込んだと推定される。また、炉中心近傍の堆積面表層では、O2層の一部流れ込みが観察された。

2・2・3 装入物分布モデル計算結果と実験結果の比較

鉬石層内コークス混合状況を定量化するために、Fig.4の画像を用いて画像解析を行った。解析の手順として、最初に堆積面にFig.5に示すようなメッシュを施した。次に、各メッシュ内のコークス、鉬石を輝度の相違から2値化し各面積率を算出後、円周方向に積分し、任意の半径位置における体積に換算した。最終的に、求められたコークス、鉬石の各体積と密度から重量に換算し、任意の半径位置でのコークス重量と鉬石重量の比でコークス混合率を定義した。Fig.6に実験後の画像解析から得られた半径方向のコークス混合率分布を示す。比較として装入物分布モデル¹⁵⁻¹⁹⁾による計算結果も合わせて示す。

実験結果と計算結果は同じ傾向を示していることが分か

Fig. 4. Cross-section of burden in scale model experiment (conventional method).

Fig. 5. Method of image analysis (mesh).

る。炉中心近傍のコークス混合率の上昇は、Fig.4の断面観察結果に見られたように、炉中心への混合塊コークスの流れ込みによる影響であり、炉周辺近傍で上昇するのは、小塊コークス混合の影響であると考えられる。

炉中心近傍への混合コークスの分離、流れ込みにより、炉中間部におけるコークス混合率の低下が懸念される。コークス混合率分布の目標としては、混合コークスの偏析等が無い径方向で均一な分布が考えられる。混合装入コークスの分離、炉中心近傍への流れ込み防止により、混合層への混合コークス歩留まり上昇に加えて、反応後コークスやコークス粉の炉芯への侵入が避けられる結果、炉床での通気、通液性の悪化防止に繋がる。さらに周辺の小塊コークスの制御も可能となれば、炉中間部における混合率のさらなる上昇も期待され、混合層内の通気性改善、ガス利用率 ($\eta_{CO} = CO_2 / (CO + CO_2)$) 向上に繋がると考えられる。

3. FCGダイナミック制御がコークス混合率分布に及ぼす影響

3・1 装入物分布モデル計算による検討

千葉第6高炉はFCG可変機能を備えており、原料を炉頂バンカーから炉内に装入する際に、FCGの開度調整を行うことで1バッチ内の間に装入速度を変化（流量調整弁可変制御、以下、FCGダイナミック制御）させることが可能である。Fig.7にFCGダイナミック制御の概念図を示す。X、

Fig. 6. Comparison of model calculation and experimental results.

Fig. 7. Concept of FCG dynamic control.

Yは旋回シュートの旋回数を示し、 α 、 β そして γ は原料装入速度を示す。装入開始から旋回数Xまでは装入速度 α であり、旋回数XからYは装入速度 β 、最終的に、旋回数Yから装入終了までは、装入速度 γ に設定される。FCGダイナミック制御がコークス混合率に及ぼす影響を装入物分布モデル¹⁵⁻¹⁹⁾により検討した。Fig.8に計算条件を示す。装入速度のパターンとしては通常は鉱石、コークスとも一定であるのに対し、pattern1では鉱石、コークスそれぞれの装入速度が段階的に増加、pattern2では鉱石、コークスそれぞれの装入速度が段階的に減少する。Fig.9にコークス排出速度がコークス混合率分布に及ぼす影響を示す。FCGダイナミック制御をコークスバンカー側のみに適用した場合を想定し、鉱石排出速度は一定とした。逆傾動による鉱石、コークスの同時切り出し装入において、コークスの排出速度を段階的に増加させることにより、炉中心部へのコークス分離、偏析量が減り、コークス混合率が低下した。Fig.10に鉱石排出速度がコークス混合率分布に及ぼす影響を示す。FCGダイナミック制御を鉱石バンカー側のみに適用した

Fig. 8. Calculation conditions.

Fig. 9. Effect of coke charging speed on mixed coke ratio.

場合を想定し、コークス排出速度は一定とした。コークスの場合と同様に、逆傾動による鉱石、コークスの同時切り出し装入において、鉱石の排出速度を段階的に減少させることにより炉中心部のコークス混合率が低下した。

3・2 実験条件

計算結果に基づいて、前述の縮尺装入模型実験装置を用いて、FCGダイナミック制御がコークス混合率分布に及ぼす影響について基礎実験を行った。Fig.11に実験条件を示す。装入速度の実機換算値は縮尺模型実験に使用した原料の嵩密度から算出した。実験水準は、FCGダイナミック制御を行わないBaseと3つのCaseがあり、Baseでは、コークスと鉱石の排出速度は一定とした。本実験で用いた3つのCaseはそれぞれ、コークスバンカー側のみに段階的に排出速度が増加、鉱石排出速度一定であるCase1、鉱石バンカー側のみに段階的に排出速度が低下、コークス排出速度一定であるCase2、コークスバンカー側は段階的に排出速度が増加すると同時に鉱石バンカー側は段階的に排出速度が低下するCase3とした。平均コークス混合率（コークスの重量

Fig. 10. Effect of ore charging speed on mixed coke ratio.

Fig. 11. Experimental conditions.

／鉬石の重量) は0.072とした。実験終了後は前述したのと同じ手法で、装入物断面の観察、画像解析を行った。

3・3 実験結果と考察

Fig.12に各水準の堆積層断面の比較をBase, Case1, Case2, Case3の順に示す。Baseでは、炉中心部に偏析した混合コークスが多量に集中しており、一方炉周辺部では、不足気味になっているのが観察された。炉中心部への偏析コークス量はCase1, Case2, Case3ではBaseに比較して減少した。Case1, Case2では周辺部に少量の混合コークスの偏析が見られ、 $r/R=0.5$ の位置では混合が若干不十分である。一方、Case3では炉中心部への混合コークス偏析量は少なく、混合がほぼ均一であることが確認された。次に、半径方向のコークス混合状況を定量的に評価するために、2章と同様の方法を用いて画像解析を行った。Fig.13にFCGダイナミック制御が半径方向コークス混合率分布に及ぼす影響を示す。コークス混合率はBaseでは炉中心部で大きく、周辺部で小さくなる一方、Case1では炉中心部で

Fig. 12. Comparison of cross-sections.

Fig. 13. Effects of FCG dynamic control on radial distribution of the mixed coke ratio (image analysis).

小さく、周辺部で大きい結果となった。またBaseとCase1では、径方向コークス混合率分布の変動が大きい。コークス混合率分布の変動は、BaseやCase1と比較してCase2, Case3は小さくなったが、Case2では $r/R=0.72$ 近傍で部分的にコークス混合率が大きくなった。Case3ではコークス混合率は炉中心部、炉周辺部で僅かに大きくなったが、 $r/R=0.4-0.85$ の範囲では、コークス混合率の平均値に近い値となった。Fig.14にFCGダイナミック制御が径方向コークス混合率の標準偏差に及ぼす影響を示す。Case3において、もっとも標準偏差が小さい結果となった。Fig.15にFCGダイナミック制御が鉬石層内混合コークス歩留りに及ぼす影響を示す。混合コークス歩留りは、炉中心部への偏析や堆積面表層に分離していない混合コークスの割合で定義した。解析領域の最外周メッシュにおいて、コークスと鉬石の比が0.8を超えた場合は、そのメッシュ内のコークスは未混合で、偏析もしくは分離したコークスとして扱い、鉬石層内コークス混合歩留りから除外した。鉬石層内混合コークス歩留りは、Baseと比較して、Case1で約8%改善、Case2, 3では約10%改善した。以上のように、FCGダイナミック制御により、径方向のコークス混合率標準偏差やコークス混合歩留りともBase (従来方法) と比較して改善することが確認された。

Fig. 14. Effects of FCG dynamic control on standard deviation of radial coke mixed ratio.

Fig. 15. Effect of FCG dynamic control on mixed coke yield.

4. 千葉第6高炉へのFCGダイナミック制御の適用

本検討において、FCGダイナミック制御がコークス混合層の分離や径方向で均一な混合率分布を達成する可能性が示唆された。ここでは、FCGダイナミック制御を千葉第6高炉へ適用する際の装入パターンについて、装入物分布モデルと縮尺模型実験による検討を行った。FCGダイナミック制御を用いての装入物分布制御の目標としては、均一なコークス混合層の作りこみとコークス混合量の増加である。Fig.16, 17は装入物分布モデルによる計算結果であり、Fig.16にFCGダイナミック制御適用時のコークス混合率分布、Fig.17に $Lo/(Lo+Lc)$ 分布について従来方法と比較して示す。ここで、 $Lo/(Lo+Lc)$ 分布とは鉱石層中の混合コークスも考慮した実 $Lo/(Lo+Lc)$ 分布を意味する。 Lo と Lc はそれぞれ鉱石層とコークス層の厚さである。Fig.16, 17からFCGダイナミック制御により、一定の $Lo/(Lo+Lc)$ 分布において半径方向のコークス混合率分布を改善することが可能である。このFCGダイナミック制御適用時の新しい装入パターンの効果を確認するために縮尺模型実験を行った。Fig.18に実験後の堆積層断面の観察結果を示す。

Fig. 16. Calculation result of $Lo/(Lo+Lc)$ in comparison with base and FCG dynamic control.

Fig. 17. Calculation result of mixed coke ratio in comparison with base and FCG dynamic control.

炉周辺部では、 O_2 バッチ中の小塊コークスは両条件とも均一に混合している。また炉中心部については、FCGダイナミック制御により混合コークスの偏析が減少することが確認された。前述したのと同様の方法で画像解析を行い、実コークス混合率を定量化した。Fig.19に実コークス混合率の解析結果をbaseとFCG dynamic control条件と比較して示す。実コークス混合率はFCGダイナミック制御により10.3%改善した。Fig.20にコークス混合量と融着帯での相対圧力損失の関係を示す。融着帯での相対圧力損失は、融着層の通気抵抗とコークス層の通気抵抗についてそれぞれ杉山の式とエルガン式から計算し、計算には荷重軟化試験装置の結果から得られた物性値を用いた¹⁶⁾。Fig.19の画像解析結果より、120kg/t相当の混合量である千葉第6高炉の場合、実コークス混合率は12.4kg/tの改善となり、融着帯での通気性改善効果は13.6%と見積もられる。

FCGダイナミック制御によるコークス混合率の改善効

Fig. 18. Comparison of cross sections under base condition and with FCG dynamic control.

Fig. 19. Image analysis result of mixed coke ratio in comparison with base and FCG dynamic control.

果が実機適用時の装入パターンでも確認されたため、本技術を2007年6月初めに千葉第6高炉に段階的に導入した。Fig.21に実機でのFCGダイナミック制御パターンを示す。コークスの排出速度は、同時切り出し開始と共に段階的に増加していき、鉬石は一定の排出速度とした。Table 2に通常操業（期間A）とFCGダイナミック制御適用後（期間B）について操業データの比較を示す。

これらは、1ヶ月間の日データの平均値である。A、B両期間で装入原料の性状はほぼ一定であるにも関わらず、本技術適用後の期間Bでは、ガス利用率と通気性の改善が確認された。出鉄関係のデータでは、溶鉄温度は約10℃上昇し、鉄中Si、S濃度はほぼ一定であった。

Fig.22にシャフトガスサンプラーによるガス利用率分布測定結果についてFCGダイナミック制御適用前後の比較を示す。FCGダイナミック制御により半径位置で中間部近傍 ($r/R = 0.2-0.5$) のガス利用率が増加した。Fig.23にコークス比と通気抵抗指数の関係を、FCGダイナミック制御適用前後で比較した。通気抵抗指数は一般的にコークス比の増加と共に減少していくが、FCGダイナミック制御適用後は同じコークス比でも通気抵抗指数を低位に保っている。Fig.24にシャフト圧力計から得られた圧力損失分布についてFCGダイナミック制御適用前後の比較を示す。シャフト下部の圧力損失差 (B3とS3の圧力値の差) はFCGダイナ

ミック制御導入後、32.3kPaから27.5kPaに低下 (14.7%減少) した。この圧力損失低減効果はFig.20で見積もった値とほぼ一致した。これらの効果はFCGダイナミック制御により鉬石中への混合コークス歩留まりが改善した効果と推定される。

通気性の改善により、還元材比一定下でコークス比の低減を行うことができた。2007年6月から7月の平均データを通常操業時と比較すると、ガス利用率+0.2%、コークス比-4.2kg/t (還元材比488kg/t) であった。千葉第6高炉は、高出鉄、低還元材比での安定操業を継続している。

5. 結言

千葉第6高炉の高出鉄、低還元材比操業に向けて、鉬石層へのコークス多量混合時のコークス混合率分布制御手段として、FCGダイナミック制御法について検討した。縮尺模型実験、装入物分布モデル計算により、FCGダイナミッ

Table 2. Comparison of operational data with base and case of FCG dynamic control.

			Conventional (Period A)	FCG control (Period B)
Operation	Productivity	t/d/m ³	2.39	2.30
	RAR	kg/t	488.3	489.8
	CR	kg/t	381.9	377.7
	Permeability	-	0.869	0.870
	η_{co}	%	49.5	49.7
	Shaft efficiency	-	0.893	0.898
Tapping	Hot metal temp.	°C	1503	1513
	Si content in metal	%	0.268	0.255
	S content in metal	%	0.021	0.023
Burden	Coke DI 150-15	%	83.2	83.3
	Sinter RDI	%	34.1	32.6
	Sinter RI	%	62.9	63.1

Fig. 20. Relationship between mixed coke ratio and relative pressure drop at cohesive zone.

Fig. 21. Change in discharging speed during C2 and O1 batch at commercial plant.

Fig. 22. Gas utilization distribution obtained by the shaft gas sampler before and after FCG dynamic control.

Fig. 23. Relationship between Coke ratio and permeability index before and after FCG dynamic control.

Fig. 24. Pressure drop distribution obtained by shaft pressure gauge before and after FCG dynamic control.

ク制御がコークス混合率分布に及ぼす影響を調査し、千葉第6高炉に適用した。2007年6月から千葉第6高炉は高出銑比、低還元材比操業を継続中である。得られた知見を以下に示す。

(1) 鉬石とコークスを同時に切り出し、逆傾動にて装入する場合、FCGダイナミック制御によってコークスの排出速度を段階的に増加させる、もしくは鉬石の排出速度を段階的に減少させる、もしくはそれらの組み合わせにより混合コークス率分布の均一性が改善する。

(2) FCGダイナミック制御によって、鉬石層への混合コークス歩留まりは8-10%改善し、径方向のコークス混合率偏差は改善した。

(3) 120kg/tのコークス混合を行っている千葉第6高炉では、FCGダイナミック制御により実コークス混合率は12.4kg/t改善すると推定され、それにより融着帯での通気性は約13.6%改善すると見積もられた。この結果は実機での通気改善状況(14.7%)とほぼ一致した。

(4) 2007年6月の千葉第6高炉へのFCGダイナミック制御適用後、ガス利用率は0.2%増加し、融着帯(シャフト下部)での通気性は14.7%減少し、コークス比は還元材比一定下で4.2kg/t減少することを確認した。

文 献

- 1) T.Okazaki: The Operations Research Society of Japan, (2005), 465.
- 2) T.Ariyama and M.Sato: *ISIJ Int.*, **46**(2006), 1736.
- 3) K.Mochizuki, T.Murai, Y.Kawaguchi and Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **72**(1986), 185.
- 4) Y.Ujisawa, K.Nakano, Y.Matsukura, K.Sunahara, S.Komatsu and T.Yamamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **92**(2006), 1015.
- 5) T.Ariyama, M.Sato, T.Sato, S.Watakabe and R.Murai: *Tetsu-to-Hagané*, **92**(2006), 114.
- 6) K.Kurita, T.Inada, K.Takada and A.Koike: *Tetsu-to-Hagané*, **73**(1987), S2.
- 7) Y.Terada, T.Ino, K.Inoguchi, K.Kurihara, H.Baba and K.Saito: *Tetsu-to-Hagané*, **73**(1987), S5.
- 8) T.Sato, M.Sato, K.Takeda and T.Ariyama: *Tetsu-to-Hagané*, **92**(2006), 1006.
- 9) K.Okuda, K.Yamaguchi, N.Ishioka, T.Furukawa and H.Endo: *Tetsu-to-Hagané*, **70**(1984), S102.
- 10) H.Kokubu, K.Sato, Y.Konishi, S.Taguchi, S.Sakurai, K.Okumura, K.Ichifuji and H.Emdo: *Tetsu-to-Hagané*, **70**(1984), S50.
- 11) T.Sato, T.Sumigama, A.Yamaguchi, K.Kimura, A.Shimomura and S.Furuya: *Tetsu-to-Hagané*, **70**(1984), S777.
- 12) K.Anan, T.Nagane, M.Nagata, M.Ogata, M.Honda and M.Isobe: *CAMP-ISIJ*, **12**(1999), 234.
- 13) M.Sawayama, K.Miyagawa, Y.Matsui, S.Tagawa and S.Kitano: *CAMP-ISIJ*, **20**(2007), 77.
- 14) H.Hotta, H.Yanaka, R.Yamamoto and S.Kishimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **70**(1984), S814.
- 15) T.Sato, T.Nouchi, K.Takeda and H.Kamano: *Tetsu-to-Hagané*, **86**(2000), 648.
- 16) S.Watakabe, K.Takeda, H.Nishimura, S.Goto, N.Nishimura, T.Uchida and M.Kiguchi: *ISIJ Int.*, **46**(2006), 513.
- 17) M.Kondoh, K.Okabe and J.Kurihara: *Tetsu-to-Hagané*, **67**(1981), S709.
- 18) T.Sato, T.Nouchi, K.Takeda, T.Kawai, M.Nomura and N.Nishimura: *CAMP-ISIJ*, **11**(1998), 897.
- 19) T.Nouchi, T.Takeda and H.Itaya: *Tetsu-to-Hagané*, **86**(2000), 293.