

石灰石・粉コークス外装造粒技術の開発

Development of New Coating Granulation Technology of Limestone and Coke Breeze

大山 伸幸 OYAMA Nobuyuki JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員(課長)・工博
武田 幹治 TAKEDA Kanji JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部長・Ph. D.
藤井 紀文 FUJII Norifumi JFE スチール 西日本製鉄所(福山地区) 製鉄部 製鉄技術室長

要旨

JFE スチールでは、焼結用原料の新造粒技術の開発に成功した。これは、造粒粒子の表面に粉状のコークスと石灰石とを偏析させることで、鉄鉱石と石灰石の熔融反応を適正範囲に制御するものである。基礎研究と実機操業試験の結果、造粒性と融液流動性の改善による焼結生産性向上と鉱石由来の微細気孔の増加による焼結鉄の被還元性向上が確認された。本プロセスは、年産約 19 百万トンの当社西日本製鉄所 4 つの焼結工場に設置を完了している。

Abstract:

JFE Steel has developed new granulation process for sinter mixture, which has controlled the melting reaction between iron ore and limestone within a proper region by segregation of coke breeze and limestone to external surface in the granulated particle. The fundamental studies and commercial plant trial showed that the sinter productivity was increased by improving granulation particle size and melt fluidity and the sinter reducibility was enhanced because of increasing micro pore originated from relict ore. This process has already been installed at four sinter plants at West Japan Works of JFE Steel with annual capacity of 19 million tons.

1. はじめに

近年の製鉄分野を取り巻く大きな環境変化としては、アジアにおける旺盛な鉄鋼需要と COP3 (気候変動枠組条約第 3 回締結国会議, 1997 年 12 月, 京都) に代表される CO₂ の排出削減があげられる。これに対応して、高炉操業における高出鉄比低還元材比操業のニーズが高まっているが、それを実現するには、高炉の主要原料である焼結鉄の高生産性と高品質化が必須となる。

一方、原料資源の観点からの大きな変化としては、購入鉄鉱石の 6 割程度を依存しているオーストラリアにおいて、良質な高品位ヘマタイト鉄鉱石の生産が減少し、多孔質なりモナイト鉄鉱石やマラマンバ鉄鉱石が増加していることがあげられる。このような鉄鉱石の多孔質化の流れは、焼結操業における熔融レベルの適正範囲を狭め、これまで緻密質ヘマタイトを使用して多量な熱源により熔融させることを主眼にした従来の焼結プロセスでは十分に対応できず、通気性や強度の悪化が顕在化していた。

これまでに、焼結鉄の高生産性・高品質化を達成し、多様化する資源動向に対応する手段として、造粒粒子構造の制御が有効であることは知られており、これまでにいくつかの報告^{1~4)}があるが、造粒粒子構造そのものに関する研究は数多くあるものの、造粒粒子の崩壊まで考慮した造粒条件やその工業プロセス案の構築、その実機商業規模の報告例は数少なく、さらに、解析対象も焼結操業に限定されたものが多く、高炉操業まで含めた検討は不足している。

そこで、本研究では、石灰石・粉コークス外装造粒プロセスの開発をとおして、実験室実験と実機操業試験により、今後の鉄鋼生産構造と原料動向の変化に対応して、理想的な造粒粒子構造を明確にし、その造粒粒子の工業的な製造条件とこの造粒プロセスが焼結操業と焼結鉄品質に及ぼす影響、さらに、このようにして製造した焼結鉄を使用した際の高炉操業への影響について報告する。

2. 石灰石・粉コークス外装造粒プロセスの原理とプロセスフロー

図 1 に本造粒プロセスのコンセプトを、図 2 に造粒粒子と成品焼結鉄の模式図を示す。これらより、本造粒プロセ

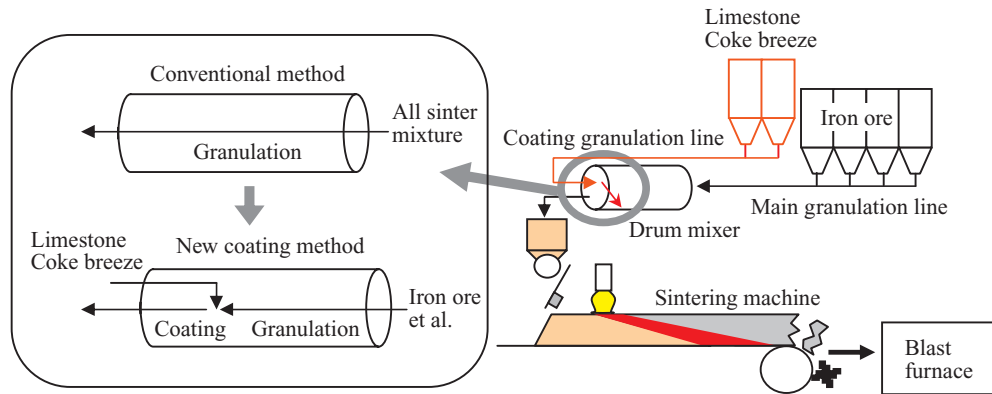


図3 石灰石・粉コークス外装造粒技術のプロセスフロー

Fig.3 Process flow of limestone and coke breeze coating granulation technology

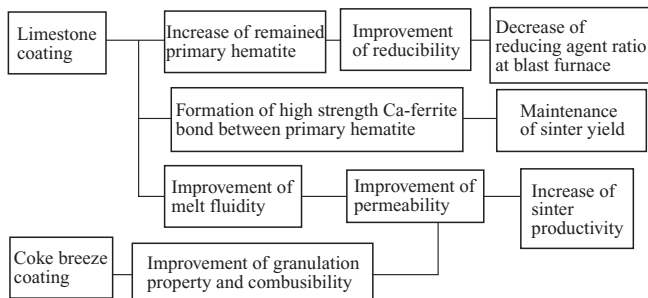


図1 外装造粒法の考え方

Fig.1 Concept of coke and limestone coating granulation process

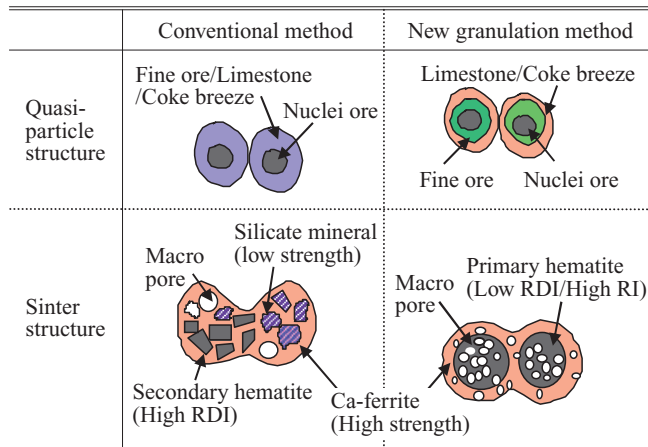


図2 各造粒法による造粒粒子と焼結鉱構造の模式図

Fig.2 Schematic diagram of granulated particle and sinter structure by each granulation method

スにおける第一のコンセプトは、石灰石を外装造粒することで、微細気孔をより多く含有する高被還元性の一次ヘマタイト⁵⁾を多く残留させて焼結鉱の被還元性の向上を図り高炉における還元材比の低減を図るとともに、一次ヘマタイト間を高強度のカルシウムフェライト⁶⁾のボンドでつなぐことで歩留を維持し、さらに、焼結過程における融液流動性を改善して熔融帯における通気性を向上させることで焼結生産性の増加を狙うものである。そして、本造粒プロセスにおけるもう一つのコンセプトは、粉コークスを外装

造粒することで、粉コークスの燃焼性を改善し、低熱量焼結することで鉄鉱石中の微細気孔をより多く残留させて焼結鉱の被還元性の向上を図るとともに、造粒性を改善して湿潤帯における通気性を改善し焼結生産性の増加を図るものである。

図3に、既報⁵⁾の実験室実験の結果を基に、構築した本造粒プロセスフローを示す。これより、本造粒プロセスは、鉄鉱石を主体とする原料を主要ラインで造粒した後、別系統の外装造粒ラインで搬送した粉コークスと石灰石をドラムミキサーの後端部から高速コンベヤで投射することで、これらを鉄鉱石主体の造粒粒子外側に偏析させることを特徴としている。また、本プロセスの重要な制御因子である粉コークスと石灰石の外装造粒時間は、その高速コンベヤのベルト速度を変化させることで調整することとした。さらに、比較試験を行う目的で、従来と同様に、粉コークスと石灰石を主要造粒ラインで輸送できる設備も設置した。

3. 西日本製鉄所（倉敷）第2焼結工場における操業試験

3.1 試験方法

実機操業試験において、外装造粒法による操業試験は、粉コークスと石灰石を外装造粒ラインで輸送し、ドラムミキサー後端部から投射装入することで行った。また、比較試験である通常造粒法による操業は、従来通り、粉コークスと石灰石を主要造粒ラインで輸送し鉄鉱石と一緒に造粒することで実施した。

今回の実機操業試験では、生石灰配合比、原料層厚、造粒水分、原料配合を一定とした。また、通気性（焼成速度）の変化は、BTP（焼成完了点）が一定となるようにパレット速度で調整し、焼結層内の熱レベルは、焼結機後のクーラーの負荷も考慮し、BTP温度が $350 \pm 20^\circ\text{C}$ となるように凝結材配合比で調整した。そして、高炉操業への悪影響を避ける目的で、成品焼結鉱中の5mm以下の重量割合が6.0%以下となるようにパレット速度や凝結材配合比などの

操業条件を設定した。

3.2 試験結果および考察

図4と図5に、高速コンベヤの速度を調節することで、外装造粒時間を60秒に設定して行った操業試験結果の一例を示す。図4より、粉コークス・石灰石外装造粒法を適

用することで、擬似粒子径が増加し、BTP値が減少し、通気性が向上し、焼成完了点が給鉱部側に移動したことを確認した。また、このとき、焼結機排鉱部での焼結ベッドの収縮量は、本法適用により、86mmから72mmに減少していた。その後、BTP値が一定となるようにパレット速度を上昇させた結果、成品中の5mm以下の重量割合を大き

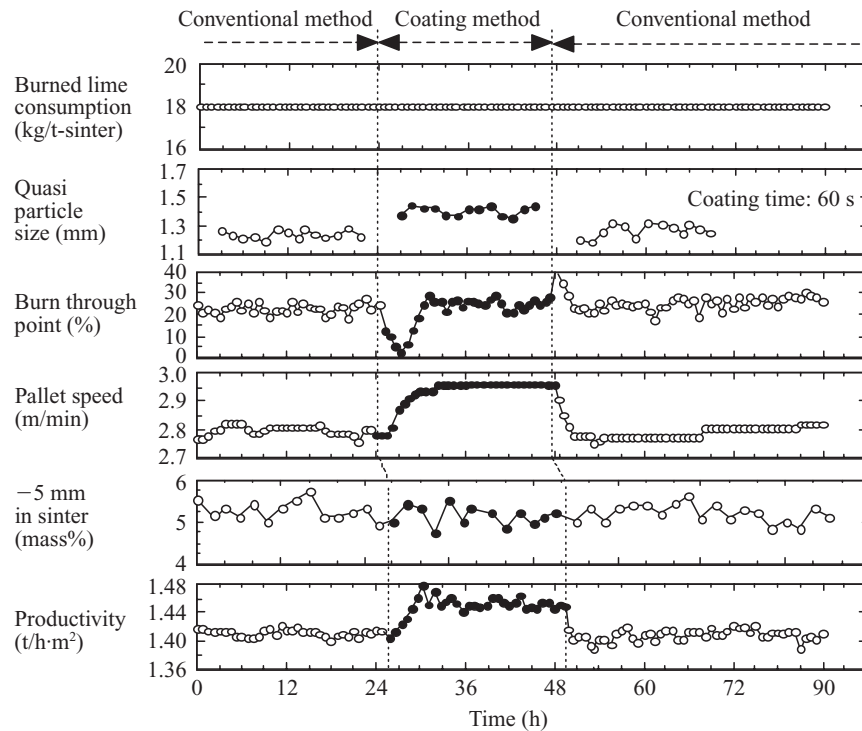


図4 焼結操業に及ぼす外装造粒法の影響

Fig. 4 Effect of coating granulation process on sinter productivity at West Japan Works (Kurashiki) No. 2 Sinter Plant

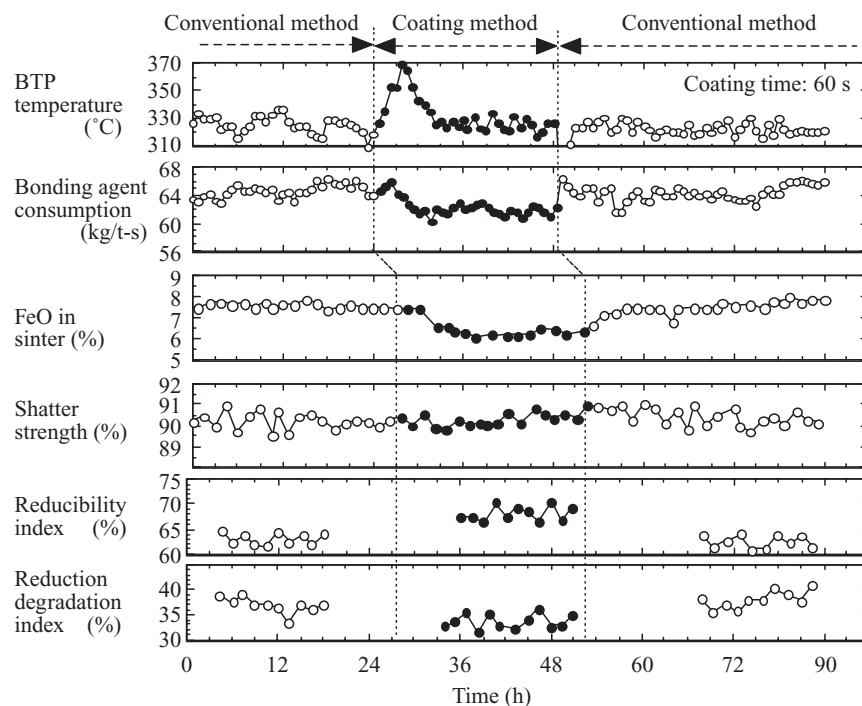


図5 焼結鉱品質に及ぼす外装造粒法の影響

Fig. 5 Effect of coating granulation process on sintering operation and quality

く変化させることなく、焼結生産性が向上した。図5より、外装造粒法適用にともない、BTP 温度が上昇し、焼結層内温度が熱余剰になっているものと推定され、クーラーへの負荷を考慮して BTP 温度が一定となるように、凝結材比を低減させた。成品焼結鉱の品質に関しては、冷間強度の指数であるシャッター強度には大きな変化は見られなかったものの、還元性や還元粉化性に関しては改善が見られた。

図6に生産性の改善効果の変化を示す。ここで、原料配合と原料層厚が一定である場合、焼結鉱の生産性は、焼結層内の通気性に依存するパレット速度と焼結鉱の冷間強度と高い相関がある歩留によって決定される。図6には、各種造粒法におけるパレット速度と歩留の値とともに、原料装入密度や原料層厚などから算出される焼結生産率の等高

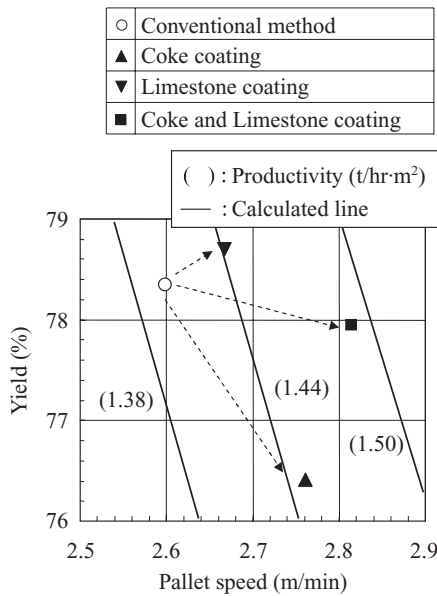


図6 造粒法の違いによる焼結生産性の変化
Fig.6 Change of productivity with granulation method

線を示す。これより、通常造粒法と比較して、粉コークスを外装造粒することで、通気性が改善されパレット速度は大きく増加するものの、歩留は低下した。これに対し、石灰石を外装造粒することで、パレット速度の増加効果は粉コークスのみの場合と比較して小さいものの、歩留は若干向上した。そして、粉コークスと石灰石の両者を外装造粒することで、歩留は通常造粒法とほぼ同一で、パレット速度の増加効果は最大となった。

次に、石灰石を外装造粒することで、通気性改善とともに、冷間強度と高い相関がある歩留の改善原因を考察する目的で、成品焼結鉱の調査を行った。図7に通常造粒法と石灰石外装造粒法で製造した焼結鉱を光学顕微鏡による観察と電子線マイクロアナライザー (EPMA) による Ca と Fe の分布を調査した結果を示す。これより、石灰石を外装造粒した焼結鉱では、通常造粒法による焼結鉱の組織と比較して、一次ヘマトイト間をカルシウムフェライトで結合された組織が多く観察された。これより、焼結鉱の構成鉱物の中で最も強度が高いカルシウムフェライト⁶⁾が焼結鉱の冷間強度を維持する上で有効に配置されているものと考えられた。さらに、表1に、図7におけるカルシウムフェライトの化学組成を EPMA により定量化した結果を示す。これより、石灰石を外装化することで、カルシウムフェライト中の Al₂O₃ 濃度と Fe₂O₃ 濃度が低下しており、融液流動性が改善された⁷⁾ものと推察された。この融液流動性の

表1 造粒法によるカルシウムフェライトの化学組成変化
Table 1 Changes of chemical compositions of Ca-ferrite in sinter by granulation method

	(mol %)			
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Limestone coating method	34.7	49.2	11.2	4.9
Conventional method	28.5	53.0	12.1	6.4

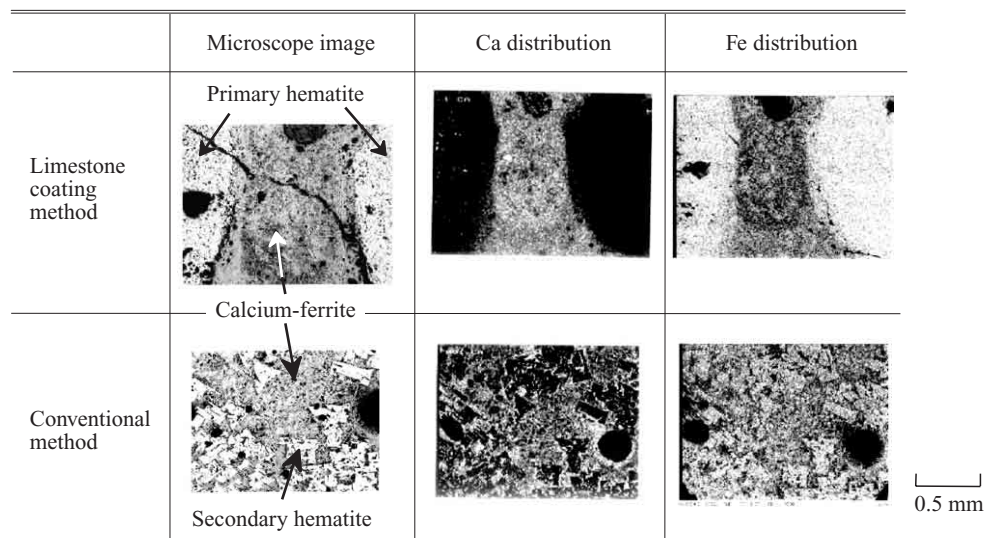


図7 造粒法の違いによる焼結鉱中の Ca と Fe 分布の比較
Fig.7 Comparison of Ca and Fe distributions in sinter by granulation method

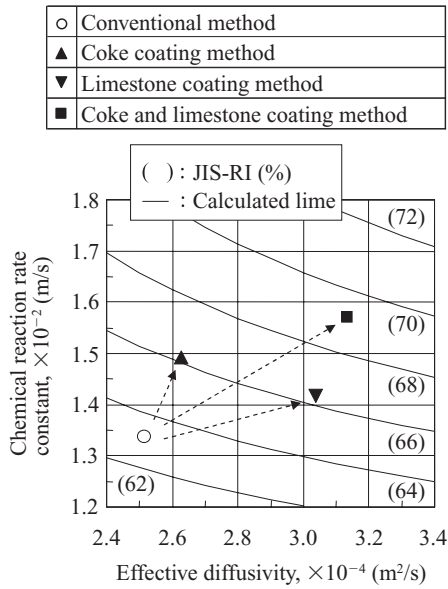


図8 造粒法による被還元性の変化
Fig.8 Change of reducibility with granulation method

改善にともない気孔の成長が促進⁷⁾され、溶融帯での通気性の改善や冷間強度に大きな悪影響を及ぼす1mm~5mm程度の気孔⁹⁾が減少したものと推察された。

焼結鉄の還元性を調査する目的で、未反応核内化学反応抵抗、粒内拡散および焼結鉄周辺のガス境界膜内拡散抵抗の3過程を考慮した1界面未反応核モデルを基にした還元速度式⁸⁾を用いて解析を行った。図8に各造粒法で製造された焼結鉄の化学反応速度定数と粒内有効拡散係数とJIS-RI(還元指数)の等高線図を示す。これより、通常造粒法と比較して粉コークスを外装化することで主に化学反応速度定数が増加してJIS-RIが増加し、さらに石灰石を外装化することで化学反応速度定数だけでなく有効拡散係数も大きく増加し、JIS-RIが向上した。還元解析によって導出される化学反応速度定数と有効拡散係数に及ぼす鉄物組成と気孔構造の影響について明確な分離は難しいが、これは、既報⁵⁾に示すように、粉コークス外装化による化学反応速度定数の増加は主にマグネタイト低下に依るものと、石灰石外装化による有効拡散係数の増加は主に還元ガスの流路となる一次ヘマタイト由来の焼結鉄中の微細気孔増加に起因するものと考えられた。

表2に、今回、製造した各焼結鉄を西日本製鉄所(倉敷)第2高炉で使用した実績をRistモデル⁹⁾で解析した結果を示す。これより、新造粒方法で製造した焼結鉄を使用することで、通常造粒法で製造した焼結鉄を使用した場合と比較して、原料条件と送風条件一定で、シャフト効率が1%改善され、還元材比が7kg/tp低下することが確認された。

4. おわりに

焼結原料の石灰石・粉コークス外装造粒プロセスの開発

表2 西日本製鉄所(倉敷)第2高炉の操業に及ぼす焼結造粒法の影響

Table 2 Influence of granulation method in the sintering process on blast furnace operation at No. 2 Blast Furnace, West Japan Works (Kurashiki)

	Conventional method	Coating method
Charging ratio of raw materials		
Sinter (mass%)		70
Pellet (mass%)		10
Lumpy ore (mass%)		20
Productivity (t/d·m ³)	2.01	2.03
Reduction agent rate (kg/t·hm)	517	510
Blast temperature (°C)		980
Blast moisture (g/Nm ³)		50
O ₂ enrichment (vol %)		1.5
CO gas utilization (vol %)	50.9	51.7
Shaft gas efficiency (vol %)	95.5	96.3

に関して、焼結操業と高炉操業への影響を検討し、その原理を実機において検証し、以下の知見を得た。

- (1) 実機操業試験より、本プロセス適用により、焼結層内の通気性改善にともない生産率が増加し、さらに、被還元性と還元粉化性が改善した。
- (2) 外装造粒時には、通気性改善と均一焼成の観点から効果を最大限発現できる適正な範囲を有する。
- (3) 粉コークスを外装造粒することで造粒粒子の強度は向上し通気性が改善した。さらに、石灰石を外装造粒することで、鉄鉱石間を高強度のカルシウムフェライトで繋がれた組織が増加し、また、鉄鉱石の溶融反応が抑制されカルシウムフェライト中のAl₂O₃濃度やFe₂O₃濃度が低下し、融液の流動性が改善されることで、通気性が改善し、冷間強度を低下させることなく、焼結生産性が改善可能となった。
- (4) 本プロセスにより製造された焼結鉄は、微細な気孔をより多く残留することから、高温での被還元性や通気性に優れ、実高炉においてもガス利用率の向上が確認された。

参考文献

- 1) 沢村惇, 伊藤健三, 宇野成紀, 大水勝. 鉄と鋼. 1975, vol. 61, S416.
- 2) 丹羽康夫, 坂本登, 小松修, 野田英俊, 熊坂晃, 竹元克寛. 49th Ironmaking Conference Proceedings, Detroit, ISS. 1990, vol. 49, p. 683.
- 3) 川口尊三, 栗山和益, 佐藤駿, 高田耕三, 三宅貴久. Proc. of 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo. 1990, p. 31.
- 4) 芳我徹三, 大塩昭義, 柴田大介, 笠間俊次, 小園琢磨, 肥田行博. 4th European Coke & Iron making Conference, ATS, Paris. 2000, p. 118.
- 5) 大山伸幸, 井川勝利, 武田幹治, 有山達郎, 神野哲也. 鉄と鋼. 2004, vol. 90, p. 546.
- 6) 大山伸幸, 主代晃一, 小西行雄, 井川勝利, 反町健一. 鉄と鋼.

- 1996, vol. 82, p. 719.
7) 大山伸幸, 主代晃一, 井川勝利, 反町健一. 57th Iron making Conference Proceedings, Toronto, ISS. 1998, vol. 57, p. 109.
8) 村山武昭, 小野陽一, 川合保治. 鉄と鋼. 1977, vol. 63, p. 1099.
9) Rist, A.; Meysson, N. Rev. Metall. 1965, vol. 18, p. 995.



大山 伸幸



武田 幹治



藤井 紀文