

焼結鉱の高品質化による高炉操業改善と今後の課題

Quality Improvement of Sintered Ores in Relation to Blast Furnace Operation

樋口 謙一^{*(1)} 高本 泰^{*(2)} 折本 隆^{*(3)} 佐藤 武彦^{*(4)}
Kenichi HIGUCHI Yasushi TAKAMOTO Takashi ORIMOTO Takehiko SATO
 小泉 文夫^{*(4)} 品川 和之^{*(5)} 古田 博之^{*(6)}
Fumio KOIZUMI Kazuyuki SHINAGAWA Hiroyuki FURUTA

抄 録

高炉の高出銑比操業には、焼結鉱の被還元性と高温還元性状の改善が不可欠である。広い成分範囲の焼結鉱の高温還元性状を解析した結果、高温還元性状は、'FeO'含有スラグの液相量と粘性、熔融還元速度の変化を介して、焼結鉱の化学成分と気孔構造に依存しており、高Fe化、C/Sの適正化(1.5-2.0)、低Al₂O₃化、15 μm以下の微細気孔の増加が改善に有効であることが分かった。この結果から、低SiO₂、低MgO、低Al₂O₃焼結鉱を開発し、新日本製鐵の全製鉄所に適用した結果、高炉操業が改善された。

Abstract

High productivity operation of blast furnace requires enhancing reducibility and improving reduction behavior at high temperatures of sintered ore. Analysis results of sintered ores with extensive ranges of chemical composition showed that reduction behavior of sinter depended on their chemistry and pore structure as a result of changes in the amount of liquid phase, viscosity and smelting-reduction rate of formed slag containing 'FeO'. Sinter with High Fe content, proper basicity range (1.5-2.0), low Al₂O₃ content and fine pores below 15 μm in size had superior reduction behavior. Finally, sinter with low SiO₂, low MgO and low Al₂O₃ has been developed and manufactured in all works in Nippon Steel, resulting in improvement of blast furnace operation.

1. 結 言

新日本製鐵ではこの20年間に高炉設備が集約された結果、現在は大型高炉を中心とした高出銑比操業となっている。さらに、微粉炭吹き込み量も増加し、高炉内のOre/Coke比が上昇して、炉内の通気に重要な役割を担うコークスが相対的に減少している。このような厳しい条件での高炉操業を支えるべく、焼結鉱はその量の確保とともに、高品質化、特に被還元性と高温還元性状、軟化、融着、滴下性状の改善に取り組んできた。

本報告では、焼結鉱の被還元性と高温還元性状の支配因子の明確化の取り組みと、焼結鉱成分の適正化による高炉操業改善例を報告し、更なる改善のための今後の課題について述べる。

2. 焼結鉱の高温還元挙動の支配因子¹⁾

2.1 焼結鉱成分と高温還元挙動の関係

図1に断熱条件での荷重軟化試験装置²⁾による、鍋焼結鉱とペレット(オフライン製造品)の滴下開始温度T_d(滴下検知器がグライフアイトるつばからの最初の滴下を検知した時の温度)と化学成分

の関係を示す。T_dの上昇に伴い、T_dが低下する傾向が見られた。さらに、塩基度CaO/SiO₂・C/Sが1.0-1.1でT_dが最低となった。Al₂O₃の影響は塩基度によって変化し、低塩基度(1.6以下)ではAl₂O₃はT_dを上昇させる一方、高塩基度では逆に低下させた。MgOはT_dを低下させ、その影響は高塩基度で大きかった。

CaO-SiO₂-Al₂O₃-FeOスラグの液相線温度は、塩基度1.0以上では上昇し、この範囲で液相率も急激に低下している。これは、還元過程で固相の2CaO・SiO₂が析出するためであり、高塩基度で見られたT_dの急激な上昇は固相析出による浸炭の抑制³⁾が原因と考えられる。塩基度によって、Al₂O₃のT_dへの相反する影響が見られた点や、MgOによるT_dの低下も、FeOを低濃度含むスラグ系の粘度と液相量の変化⁴⁾と対応していた。一方、塩基度0.5付近では、液相率が十分高いにも関わらず、比較的高いT_dを示した。この結果は、スラグの低流動性⁴⁾の他、低い熔融還元速度^{5,6)}の影響と考えられた。

図2に焼結鉱とペレットの軟化融着温度T_c(圧力が2.0kPaまで上昇した時の温度)と化学成分の関係を示す。軟化融着挙動は物理的構造に由来する還元率の影響も大きいので、T_cの成分の影響はT_dの場合に比べると小さかった。それでも、T_cの上昇によるT_s上昇の傾

^{*(1)} 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL: (0439)80-3057

^{*(2)} 環境・プロセス研究開発センター
 エネルギー・プロセス研究開発部 主幹研究員

^{*(3)} 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員

^{*(4)} 北海製鉄株式会社 製造部 マネジャー

^{*(5)} 八幡製鐵所 製鉄部 原料課長

^{*(6)} 八幡製鐵所 製鉄部 高炉課長

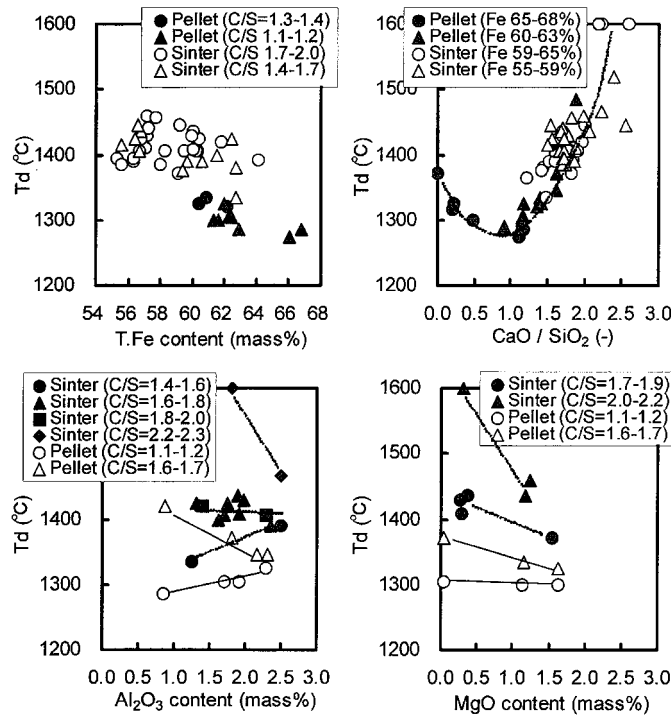


図1 滴下開始温度Tdに及ぼす化学成分の影響
Influence of chemical composition on dripping temperature

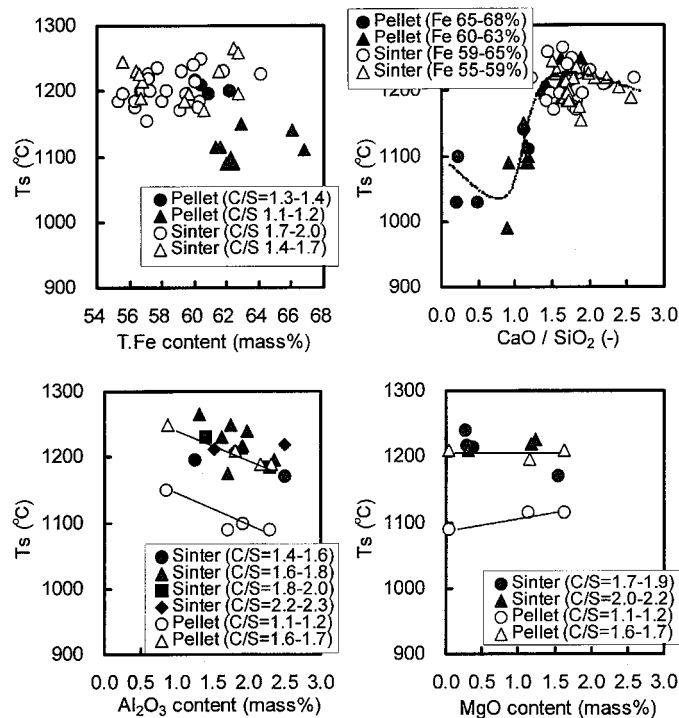


図2 軟化融着温度Tsに及ぼす化学成分の影響
Influence of chemical composition on softening-melting temperature

向と塩基度0.5~1.0の範囲でTsが低くなる傾向が見られた。Al₂O₃はTsを低下させる一方、MgOは若干ながら上昇させた。いずれの場合もこの傾向の塩基度による違いはなかった。これらの結果は、高FeO濃度域のCaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-FeOスラグの固相線温度の変化³⁾やそれを模擬した滴下試験結果⁷⁾とよく一致した。

以上から、焼結鉱の高温還元性状を改善するためには、高T.Fe化、C/Sの適正化(1.5-2.0)、低Al₂O₃化が有効であることが分かった。

2.2 焼結鉱気孔構造と高温還元挙動の関係

化学成分が一定の条件下でも、焼結鉱の被還元性の向上は、バル

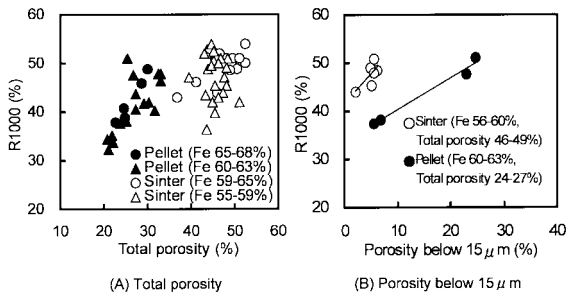


図3 1000 還元率R1000と(A)全気孔率 (B)15 μm以下気孔率の関係
Dependencies of total porosity (A) and porosity below 15 μm (B) on R1000

酸化鉄FeOを減少させるため、還元中の生成融液量が減少して軟化融着挙動を改善するものと考えられる。図3にR1000(1000 還元率)と気孔構造の関係を示す。焼結鉱とペレットの全気孔率は被還元性に概ね寄与していた(図3(A))。しかし、ばらつきも大きく、特に低Fe焼結鉱の場合に顕著であった。このばらつきは、気孔径分布と構成鉱物の被還元性によるものと考えられた。全気孔率と脈石量がほぼ同一の条件における気孔径分布の影響を見ると、15 μm以下の気孔が被還元性に特に寄与していた(図3(B))。このことから、成分一定でも、気孔の増加、特に15 μm以下の微細気孔の増加により、軟化融着性がさらに改善されることを示している。この結果は、実機焼結鉱の高温還元性状と微細気孔の関係においても指摘された⁹⁾。さらに、強度や低温での還元粉化挙動の改善にも微細気孔の増加が有効であることが明らかとなった⁹⁾。

3. 焼結鉱の品質改善による実機高炉操業改善

3.1 低SiO₂・低MgO化による改善

図1, 2に示すように、高Fe焼結鉱の優れた高温還元挙動が確認された。その手段として、従来用いられていた蛇紋岩(MgO-SiO₂)の削減を実施し、低SiO₂・低MgO焼結鉱による焼結鉱の高温還元性状の改善とそれによる高炉操業改善を図った。

まず、銅試験にて蛇紋岩配合量の異なる焼結鉱を製造し、その高温還元挙動を解析した。図4にその結果を示す。蛇紋岩削減によって高温還元挙動が改善されることが分かった。低MgO化によって、滴下温度が約15 °C上昇したもののその悪影響は小さく、むしろ低

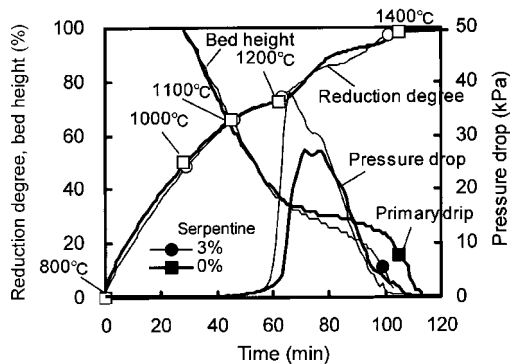


図4 蛇紋岩による焼結鉱高温性状の改善
Improvement of high-temperature reduction behavior of sinter by decreasing serpentine

SiO₂化による軟化融着性状の改善が顕著であった。本知見に基づき、まず新日本製鐵室蘭製鐵所第二高炉(室蘭2高炉)にて実機試験を行った(表1 Case 1)。室蘭2高炉では蛇紋岩の代わりに橄欖岩(SiO₂, MgOを含有)を使用している。焼結原料中に0.7mass%配合していた橄欖岩をカットし、CaO含有量一定で低SiO₂・低MgO焼結鉱を製造し、室蘭2高炉で全量使用した。

このとき、滴下性状を悪化させないために、塩基度の上昇は最大限に留めた。さらに、高炉スラッグの化学組成を一定とするために、高炉炉頂から塊の橄欖岩を装入了。その結果、焼結鉱の高温還元性状が改善されて高炉の下部K値が低下し、微粉炭吹込み量(PCR)を140kg/t-pigから170kg/t-pigに上昇させることができた¹⁰⁾。その後、装入物分布適正化も行い、1998年12月には月間182kg/t-pigまでPCRを増加できた。SV(高炉スラッグ量)はむしろ増加しているため、主な改善要因は焼結鉱の被還元性と高温還元挙動の改善であると考えられる。その後、新日本製鐵八幡製鐵所第四高炉(戸畑4高炉)でも、低SiO₂・低MgO焼結鉱の製造を実施した。塊の副原料装入は行わずに、高炉スラッグ成分調整により融点、粘性を確保しスラッグ量低減を図る高炉操業とした(表1 Case 2)。本試験に於いて、高出鉄(Pmax = 2.37t/d/m³)、高Ore/Cok(4.87, PCR = 161kg/t-pig)操業が達成できた¹¹⁾。

3.2 低Al₂O₃化による改善

上記検討を更に進め、低SiO₂条件下で低Al₂O₃化を図る実機試験を2001年に新日本製鐵八幡製鐵所戸畑第三焼結機(戸畑3焼結) - 戸畑4高炉にて実施した(表2)²⁾。低Al₂O₃化による過剰な生成融液の分だけ、焼結のSiO₂の削減の他、粉コークス原単位も削減し低FeO化

表1 低SiO₂・低MgO化の実機試験結果(室蘭2BF, 戸畑4BF)
Plant test results of Muroran No. 2 blast furnace and Tobata No. 4 blast furnace

		Case 1		Case 2	
		Muroran 2BF		Tobata 4BF	
Period		'98.1-3	'98.10-12	'98.6-8	'99.2-4
Sinter quality	T.Fe mass%	58.1	58.4	58.0	58.2
	SiO ₂ mass%	5.52	5.10	5.12	4.96
	MgO mass%	1.20	1.00	1.38	0.86
	Al ₂ O ₃ mass%	1.87	1.89	1.79	1.81
	C/S	-	1.64	1.77	1.85
	TI/SI %	73.9	74.6	91.0	91.7
	RDI %	33.2	40.3	37.6	38.4
JIS-RI %	65.9	66.2	63.5	66.5	
S value kPa・min	814	686	791	585	
BF operation	Productivity t/d/m ³	2.09	2.06	2.30	2.26
	RAR kg/t-pig	512	508	490	496
	CR kg/t-pig	373	342	361	336
	PCR kg/t-pig	139	166	129	160
	Slag volume kg/t-pig	303	313	284	270
	Al ₂ O ₃ in slag mass%	15.4	15.8	14.9	15.5
	MgO in slag mass%	5.5	5.7	6.5	4.0
C/S in slag	-	1.26	1.27	1.29	

TI: Tumbler index, SI: Shatter index, RDI: Reduction degradation index, S value: accumulative pressure drop, RAR: Reducing agent rate, CR: Coke rate, PCR: Pulverized coal rate

表2 低Al₂O₃化の実機試験結果(戸畑3DL)
Plant test results in Tobata No. 3 sintering machine

Period		Base	Test
		2001.9	2001.10
Pisolite	Ore %	39.1	66.0
SI	%	91.3	91.5
T.Fe	mass%	58.5	59.2
FeO	mass%	6.2	4.6
SiO ₂	mass%	5.14	4.72
C/S	-	1.74	1.80
Al ₂ O ₃	mass%	1.76	1.46
MgO	mass%	1.13	1.08
JIS-R1	%	63.7	67.1
S value	kPa・min	1284	1068
shaft*	%	94.4	97.4

* Results of BIS test

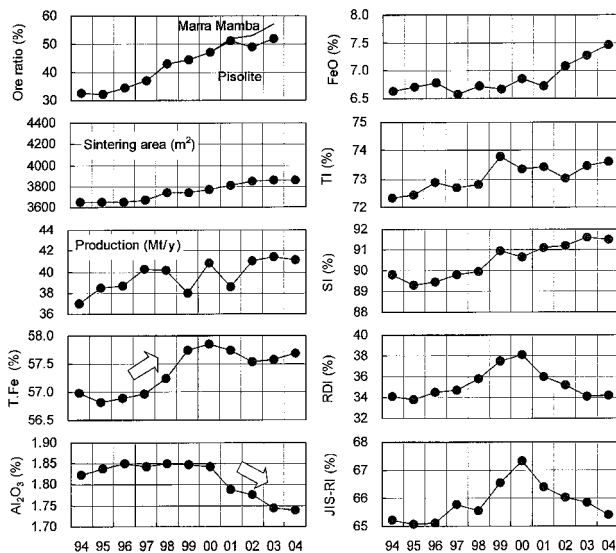


図5 最近10年間の焼結鉱品質の推移
Changes in quality of sinter product in the past decade

も狙った。その結果、強度一定で、焼結鉱の被還元性が飛躍的に向上し、S値の低下と高炉のシャフト効率(BIS炉:オフライン高炉シミュレータでの評価)の向上効果を確認できた。実炉においても0.3%のシャフト効率向上がはかれ、戸畑4高炉において出銹比2.3t/d/m³、コークス比324 kg/t-pigの操業が可能となった。その後、本焼結鉱は新日本製鐵全製鉄所に適用され、安価な難焼結性原料を多配合した条件においても、焼結鉱の高品質化を介して、高炉の高出銹・低還元材比操業に寄与している(図5)。

4. 今後の課題

4.1 焼結鉱の組織制御による高温還元挙動改善の可能性

図6に焼結鉱組織中の残留元鉱を模擬したCaOとの同化なしの鉱石(A)と、焼結鉱組織自体を模擬したCaOとの同化後焼結試料(B)の、2種の試料R1200と原料鉱石のFe濃度の関係を示す¹⁾。図7にCaOとの同化なしの鉱石の還元後組織を示す。図中の数字は還元前の全気孔率と-15μm気孔率である。いずれの種類の結果も、Fe濃度と気孔構造で説明できた。低Fe濃度の鉱石の還元では、1100付近で、SiO₂-Al₂O₃-FeOスラグの共晶点由来の融液生成による顕著な還元停滞が観察された。Ore Bが低脈石量にも関わらず低還元率であったのは、低気孔率の他に、粗大な粒子径も関係していると思われる。

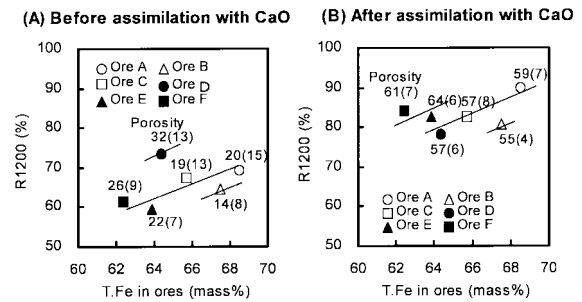


図6 (A)天然鉱石 (B)焼結後鉱石の1200 還元率R1200と加熱後鉱石中T.Fe濃度の関係
Results of R1200 of natural ore samples (A) and of sintered sample (B) as a function of Fe concentration after dehydration

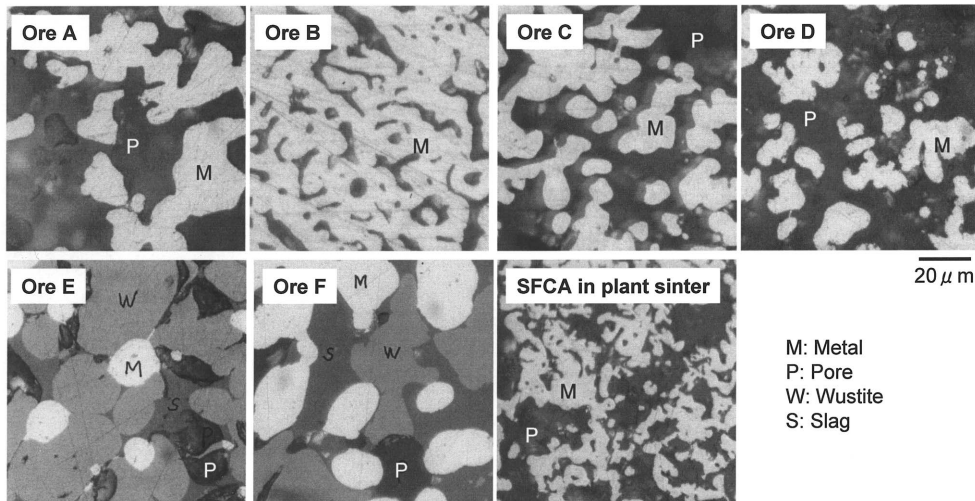


図7 天然鉱石の還元後組織 (×500)
Microstructures of natural ores after reduction (magnification ×500)

一方、低Fe鉱石のいくつかはCaOとの同化前は低い還元率であったのに対し、同化後は高被還元性を示した。このことは、焼結鉱成分が一定の条件でも、焼結鉱製造時の鉱石熔融制御によって鉱物構造、気孔構造の変化を介して高温還元性状が改善できることを示している。さらに、鉱石種によって結合相のタイプも異なっていた。しかし、この結合相のタイプの軟化融着挙動への影響は現時点では不明であり、今後劣質化する鉱石資源に対応するためには、さらに基礎的検討が必要である。また微細気孔の増加も、高温還元挙動の改善には有効な手段であるが、その生成過程や製造条件には不明点も多く¹³⁾、今後の課題である。

4.2 高炉操業にとっての高温還元指標のあり方

従来、実操業における還元指標としてJIS-RIが用いられている。JIS-RIは簡易的な手法による還元手法であるため、低スラグ焼結鉱による高炉操業改善を明確に表せない場合も認められてきている¹⁴⁾。従って今後は、実操業との対応が良好な焼結鉱の還元管理指標が必要である。

5. 結 言

高炉操業改善を目的に、焼結鉱の被還元性と高温還元性状の改善に取り組み、以下の知見を得た。

- (1) 焼結鉱の高温還元性状は焼結鉱の化学成分と気孔構造に依存した。溶銑の滴下性状は、FeOを低濃度含有する共存スラグの液相量(間接的には液相線温度)、粘性、熔融還元速度が浸炭挙動に影響を与える結果、決定される。一方、軟化融着挙動は化学成分、気孔構造、焼結鉱組織によって決定されと考えられた。軟化融着温度は、FeOを高濃度を含むスラグの低温液相率(間接的には固相線温度)と被還元性によって変化した。
- (2) 焼結鉱の高温還元性を改善するためには、高Fe化、C/Sの適正

化(1.5-2.0)、低Al₂O₃化が有効であることが分かった。さらに、15 μm以下の微細気孔の増加も有効であることが分かった。

- (3) 以上の結果に基づいて、高温還元挙動の良好な低SiO₂・低MgO・低Al₂O₃焼結鉱を開発し、新日本製鐵全製鉄所に適用した。その結果、高炉操業が改善され、高炉還元材比低減などにより収益向上に貢献している。
- (4) 更なる改善のためには、焼結鉱組織の高温還元性状への影響の明確化と組織、気孔構造の制御手段の確立が必要である。同時に、従来法の還元指標の見直しによる精緻な高炉操業制御も必要である。

参考文献

- 1) Higuchi, K., Naito, M., Nakano, M., Takamoto, Y.: ISIJ Int. 44(12), 2057(2004)
- 2) 細谷陽三, 山口一良, 折本隆, 樋口謙一, 川口卓也, 後藤秀明: 鉄と鋼 .83(2) .97 (1997)
- 3) Shigaki, I., Shirouchi, S., Tokutake, K., Hasegawa, N.: ISIJ Int. 30(3), 199(1990)
- 4) Slag Atlas. 2nd Edition. Ed. VDEh, Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, 1995
- 5) Ohno, K., Nagasaka, N., Hino, M.: Steel Res. 74(1), 5(2003)
- 6) Enaka, T., Uchida, Y., Hasegawa, H., Naito, M., McLean, A., Iwase, M.: Scand. J. Metall. 30, 168(2001)
- 7) Hino, M., Kumano, A., Shimizu, K., Shimizuno, K., Nagasaka, T.: Proc. of the Yazawa Int. Symp. Vol.1. Ed. F. Kongoli, K. Itagaki, C. Yamauchi, H.Y. Sohn: TMS, Warrendale, 861, 2003
- 8) 山口一良, 樋口謙一, 細谷陽三, 大塩昭義, 笠間俊次: 鉄と鋼 .84(10) .702(1998)
- 9) Higuchi, K., Heerema, R.H.: ISIJ Int. 45(4), 574(2005)
- 10) 山口一良, 樋口謙一, 細谷陽三, 田中毅, 佐藤武彦, 小泉文夫: 鉄と鋼 .85(7) .501 (1999)
- 11) 古田博之, 栗田泰司, 森實好文, 宮脇雅敏, 栗原喜一郎: CAMP-ISIJ .12 .711(1999)
- 12) 古田博之, 栗田泰司, 高本泰: CAMP-ISIJ .16 .138(2003)
- 13) 樋口謙一, 細谷陽三, 岡崎潤, 山口一良: CAMP-ISIJ .13 .62(2000)
- 14) 磯部誠, 伊藤洋平, 高橋顕, 折本隆, 樋口謙一: CAMP-ISIJ .16 .1043(2003)