

粗大粒子を配置した焼結原料層の焼結化挙動

川口 尊三*・上城 親司*・松村 勝*

The Sintering Behavior of Raw Material Bed Placing Large Particles

Takazo KAWAGUCHI, Chikashi KAMIJO and Masaru MATSUMURA

Synopsis : The pot tests, under the condition that large particles were placed in the sintering bed, were carried out for improvement of permeability. The large particles include green balls made from Marra Mamba ore, fired pellet, sinter, dense alumina ball and pisolite lump ore. In the course of pot tests, permeability before ignition and during sintering, bulk density and yield were measured. Also the cross sections of sinter cakes were observed. As a result, the permeability before ignition and during sintering was both increased regardless of the increase in the bulk density of sintering bed. When the large particles were placed, the calculated bulk density of sinter mixture (the rest part of bed excluding the large particles) decreased in inverse proportion to the surface area of large particles. Therefore, the effect of placing large particles was concluded to cause the permeability increase. Placing large particles occasionally decreased yield owing to void formation under the alumina balls in the sinter cake, which was confirmed the visual observation. It is proposed that the increase of coke and/or CaO contents in fine layer and adding carbon in the green balls are effective for yield recovery.

Key words: sintering process; sintering bed; large particle; sinter mixture; permeability; bulk density; apparent density; yield; productivity; Marra Mamba ore; pisolite ore.

1. 緒言

近年、焼結鉱の製造にあつては褐鉄鉱の使用量増加にと
もなう原料層の通気性悪化¹⁾や歩留の低下²⁾が問題とされ
ている。これは、焼結層が多孔質にもかかわらず通気空隙
の閉塞が原因とされており、原料の成分調整による融体の
流動性制御³⁻⁵⁾や、原料層への通気棒挿入⁶⁾などによる層空
隙制御⁷⁾が実施されている。さらには、原料層における擬
似粒子径による溶融同化制御⁸⁾や疎密充填による層内ヒー
トウエーブ制御⁹⁾が検討されている。また、著者は焼結原
料を2分割して造粒・装入することで、焼結組織制御を行
い品質改善をはかる技術について論述^{10,11)}している。さら
に、焼結層における空隙構造制御に着目して、原料充填層
内に粗大粒子を配置することの焼結層通気性および成品歩
留に及ぼす影響について、モデル原料による鍋試験により
調査解析した¹²⁾。そこで本報にあつては、この粗大粒子と
してマラマンバ鉱を主原料としたグリーンボールを選定

し、その条件を変更した鍋試験を実施し、前回のモデル実
験に加えて、焼結生産性に及ぼす影響について解析し考察
した。

2. 鍋試験方法および条件

2.1 実験方法

鍋焼成に使用する原料としては、所定の比率で配合され
た鉱石を混合造粒した擬似粒子（以下、粉体原料と呼ぶ）
と、別途準備された粗大粒子とを混合して用いた。粗大粒
子にはマラマンバ鉱の造粒球を始めとして焼成ペレット、
焼結鉱、ピソライト塊鉱、アルミナ球の Table 1 に示すモ
デル粒子を用いた。粒径は10~15 mmを基準に変更し、粒
子密度は2.9 g/cm³の多孔質低強度のものとして3.8 g/cm³の緻密
で高強度なものをを用いた。そして、Fig. 1に示す直径300
mm、高さ500 mmの鍋試験装置内に、10~15 mmの焼結鉱
床敷を2.0 kg敷設したのち、粗大粒子が粉体原料中に均一

Table 1. Characteristics of large particles.

Large particle characteristics	Particle size (mm)	Average size (mm)	Apparent density (dry-g/cm ³)	Moisture (mass%)	Series
Green Ball Y	10-15	12.8	3.09	9.9	Test A
Green Ball Z	10-15	13.2	2.88	10.3	
(bearing BF dust)	5-10	9.4	2.91	10.2	
Fired pellet	10-15	12.8	3.80	2.0	
Sinter	10-15	12.5	3.80	0.0	Test B
Pisolite lump	10-20	16.6	3.11	0.0	
Alumina ball	15-16	15.4	3.77	0.0	

平成18年2月15日受付 平成18年4月19日受理 (Received on Feb. 15, 2006; Accepted on Apr. 19, 2006)

* 住友金属工業(株) 総合技術研究所 (Corporate Research and Development, Sumitomo Metal Industries, 16 Sunayama Hasaki-machi Kamisu 314-0255)

に分散するよう配慮して原料を装入し、点火バーナーで1min着火したのち下方吸引にて焼成を行った。

2.2 実験条件

焼成については2種類の条件で実験を実施した。1つは排ガス風量(1.5 Nm³/min)および装入原料量(53 dry-kg)が一定となる条件での焼成で、焼成実験Aと呼ぶ。もう1つは鍋下圧力(9.8 kPa)および原料層厚(480 mm)が一定となる条件での焼成で、焼成実験Bと呼ぶ。前者の実験条件では対流伝熱にかかわる熱容量を概ね一定とした実験で、焼結層の通気性と独立して層内熱伝達および成品歩留が議論でき、要因解析には都合がよい。一方、後者の実験条件は直接的に実機操業条件に対応しており、焼結生産性や成品歩留への影響を評価しやすい。

なお、実験Aにあつては風箱内で測定した排ガス温度が最大となる時刻から1min後に送風機を停止させ、直ちに赤熱ケーキの状態では2mの落差で4回落下させて破碎したのち、5mm篩で分級し篩上を成品とした。一方、実験Bにあつては、同排ガス温度が最大となる時刻から3min後に送風機を停止させ放置冷却したのち、2mの落差で4回落下させて破碎後、5mm篩で分級し篩上を成品とした。実験Aの冷却条件は、実機プロセスを意識した冷却条件における成品歩留への影響を見極めるために採用した。

2.3 配合条件

実験に使用する鉱石の一覧をTable 2に示す。粉鉱の造粒球については配合表をTable 3に示す。マラマンバ粉鉱

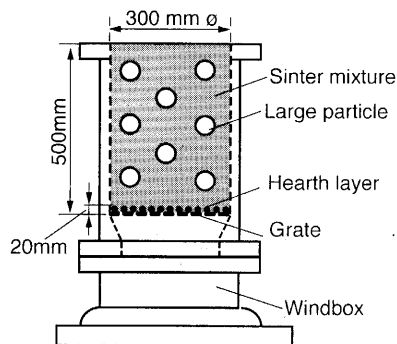


Fig. 1. Schematic view of the experimental apparatus.

を主配合としてCaO/SiO₂=1.0となるよう微粉石灰石を添加し、カーボン源であるBFダストの添加有無(Y,Z)も検討した。Table 4に原料配合条件をまとめる。

要因因子解析を目的とした実験Aにあつては、34 mass%のマラマンバ造粒球(Z34, Z'34)のケースとベース(A)のトータル使用鉱石量は同一であり、すなわちベース(A)配合からマラマンバ鉱、石灰石の一部およびBFダストを抜き出し、造粒球を製造する条件となっている。トータルの配合原料水分も同一とした。一方、焼成ペレットや焼結鉱の配置ケースでは、このマラマンバ造粒球(Z34, Z'34)と焼成ペレットや焼結鉱が置換する条件となっており、粗大粒子を除く粉体原料の配合は同一、粉体原料の造粒水分も同一とした。この場合、ベース(A)ケースと粗大粒子ケースの粉体原料におけるコークス配合率や組成は異なる。粉体原料のCaO濃度は焼結融体の流動性に多大な影響を及ぼすので、マラマンバ造粒球のケースにおいて、粉体原料のCaO濃度がベース(A) 9.0 mass%と等しくなる条件ZL, Z'L(成品焼結CaO濃度は低い)も設定した。また、マラマンバ造粒球の配置比率の影響を調査するために、22 mass%配置の中間段階のケースも設定した。

生産性改善効果確認を目的とした実験Bにあつては、粗大粒子として緻密高強度なアルミナ球と多孔質低強度なピソライト塊鉱を選定し17 mass%の配置とした。アルミナ球ケースの粉体原料は、アルミナ球を未反応物質とみなし、ベース(B)配合と同一とした。その結果、原料全体としてはCaO濃度やコークス配合率は低下している。一方、ピソライト塊鉱ケースはピソライト塊鉱とピソライト粉鉱との置換条件になっており、粉体原料はベース(B)と異なるが、原料全体としては、ほぼ類似構成となる。なお、このケースに限ってコークス配合率を変更させるとともに、その結果からコークス配合比率を5.0 mass%とした結果を基

Table 3. Blending ratio of green ball.

Brands	Green Ball Y	Green Ball Z
Mara Manba fine	93.8mass%	88.2mass%
Limestone(-1mm)	6.2mass%	5.9mass%
BF dust	-	5.9mass%

Table 2. Chemical component of ores (mass%).

Brands	T.Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	L.O.I.	F.C.
Mara Manba fine	62	3.8	1.9	0.0	5.5	-
Hematite fine C	64	3.7	2.0	0.0	2.0	-
Pisolite fine K	57	5.5	2.5	0.0	9.0	-
Pisolite fine J	59	5.2	1.2	0.0	9.0	-
Hematite fine D	64	4.9	2.1	0.0	2.6	-
Hematite fine E	68	0.6	0.7	0.0	1.2	-
BF dust	4	4.7	2.4	3.3	-	30
Limestone	0	0.0	0.0	55.0	-	-
Serpentine	6	39.2	1.3	1.8	-	-
Dolomite	1	0.4	0.1	35.6	-	-
Return fine	59	4.4	1.8	8.5	-	-
Fired pellet	65	2.6	0.5	2.5	-	-
Sinter	59	4.3	1.8	8.6	-	-
Pisolite lump	59	5.1	1.1	0.0	8.3	-
Alumina ball	0	5.0	93.0	-	-	-

Table 4. Blending ratio of sinter mixture for each test case. (*: variable)

Test	Case	Brands (mm)	Largr particle mass%	Sinter mixture without large particle (mass%)						
				CaO%	Mara manba	Hematite C	Pisolite K	Pisolite J	Hematite D	Hematite E
A	Base(A)	-	0	9.0	30	15	13	13	-	-
	YL34	GB Y (10-15)	34	9.0	-	16	13	13	-	-
	Y34		33	12.8	-	16	13	13	-	-
	ZL34	GB Z (10-15)	35	9.0	-	16	13	13	-	-
	Z34		34	12.8	-	15	13	13	-	-
	ZL17		22	9.0	-	19	16	16	-	-
	Z'L34	GB Z (5-10)	35	9.0	-	16	13	13	-	-
	Z'34		34	12.8	-	15	13	13	-	-
	Z'L17		22	9.0	-	19	16	16	-	-
	P	Fired pellet	33	12.8	-	16	13	13	-	-
S	Sinter	33	12.8	-	16	13	13	-	-	
B	Base(B)	-	0	8.7	-	-	-	39	19	17
	L	Pisolite lump	17	8.6	-	-	-	20	30	8
	A	Alumina ball	17	7.0	-	-	-	32	15	15

Test	Case	Brands (mm)	Largr particle mass%	Sinter mixture without large particle (mass%)							Total Charge (kg)
				CaO%	BF dust	Limestone	Serpentine	Dolomite	Return	Coke	
A	Base(A)	-	0	9.0	2	12	-	-	15	4.1	53.0
	YL34	GB Y (10-15)	34	9.0	-	7	-	-	16	4.1	53.0
	Y34		33	12.8	-	10	-	-	16	4.1	53.0
	ZL34	GB Z (10-15)	35	9.0	-	7	-	-	16	4.1	53.0
	Z34		34	12.8	-	10	-	-	15	4.1	53.0
	ZL17		22	9.0	-	9	-	-	19	4.1	53.0
	Z'L34	GB Z (5-10)	35	9.0	-	7	-	-	16	4.1	53.0
	Z'34		34	12.8	-	10	-	-	15	4.1	53.0
	Z'L17		22	9.0	-	9	-	-	19	4.1	53.0
	P	Fired pellet	33	12.8	-	10	-	-	16	4.1	53.0
S	Sinter	33	12.8	-	10	-	-	16	4.1	53.0	
B	Base(B)	-	0	8.7	-	12	2	1	10	*4.2	57.3
	L	Pisolite lump	17	8.6	-	12	1	1	10	*5.0	59.0
	A	Alumina ball	17	7.0	-	10	2	9	8	3.9	59.3

準に議論することにした。

2.4 各因子の定義、測定方法および解析方法

球状粗大球の見掛密度は、乾燥質量とノギスで測定した外径から算出した。非球状粗大球の見掛密度は、乾燥質量とオレイン酸ケロシン法¹³⁾で測定した体積から算出した。そして、充填密度は装入原料の乾燥質量を点火前の原料層厚(床敷20mmを控除)と鍋径から求まる原料層全体体積から算出した。さらに、原料層全体の質量または体積から粗大粒子の質量または体積を控除したものを、粉体層部分の質量または体積とし、粉体層部分の充填密度として算出した。

焼成前後の層厚を比較すると層厚が減るので、減じた比率を層収縮率と定義した。焼成後の層厚と鍋径から焼結ケーキの体積を求め、質量を測定しケーキ密度を算出した。

さらに、焼成時間を点火開始から送風機停止までの時間とし、化学歩留を鍋に装入した配合原料の乾燥質量に対するシンターケーキから床敷鉋を控除した質量の比率とすれば、焼成速度および生産率は(1)式、(2)式で定義される。

$$\text{焼成速度 (mm/min)} = \frac{\text{原料層厚 (mm)}}{\text{焼成時間 (min)}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{生産率 (t/d/m}^2\text{)} = 1.44 \times 10^{-4} \times \text{焼成速度 (mm/min)}$$

$$\times \text{充填密度 (g/cm}^3\text{)} \times \text{成品歩留 (mass\%)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\times \text{化学歩留 (mass\%)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

3. 実験結果

3.1 マラマンバ造粒球の各種条件の影響

Table 5に焼成実験における各要因の測定、解析の結果をまとめる。マラマンバ造粒球における各条件の影響について、配置比率 34 mass%、造粒球径 10~15 mm、粉体原料 CaO=12.8 mass%、BFダスト配合のケース(Z34)を基準として、①造粒球が無い場合、②配置比率 22 mass%、③造粒球径 5~10 mm、④粉体原料 CaO=9.0 mass%、⑤BFダスト配合無しの各因子について、基準に対する影響感度解析を実施した。結果をTable 6に示す。数値は基準値に対するアクションによる影響度合を相対比率で示したものである。影響が顕著と思われる部分はTable 6で塗りつぶした。

まず、①の影響について、造粒球の存在は点火前の原料層厚を低減し充填密度を上昇させるが、焼成後は層収縮が低く逆に層厚が高くケーキ密度は低い。通気性は原料段階、焼成段階ともに良好である。成品歩留は低下傾向である。この結果から、マラマンバ造粒球の配置により、原料層の通気性が改善されるとともに焼結層の収縮が抑制され焼成

Table 5. Test results of sintering factors for the pot tests. (*: dry-mass)

Test	Case	Brands (mm)	Large particle		Sinter mixture		Bed height		Bulk density	
			Blending ratio (mass%)	Total surface (m ²)	(CaO%)	Bulk density (*g/cm ³)	Before (mm)	Sinter cake (mm)	Before (*g/cm ³)	Sinter cake (*g/cm ³)
A	Base(A)	-	0	0	9.0	1.65	462	368	1.65	1.80
	YL34	GB Y (10-15)	34	2.64	9.0	1.43	433	406	1.74	1.67
	Y34			2.55	12.8	1.46	431	403	1.75	1.65
	ZL34	GB Z (10-15)	34	2.85	9.0	1.44	437	382	1.74	1.72
	Z34			2.76	12.8	1.45	437	401	1.73	1.64
	ZL17	GB Z (5-10)	22	1.73	9.0	1.53	447	381	1.70	1.72
	Z'L34			3.97	9.0	1.38	451	373	1.68	1.77
	Z'34			3.84	12.8	1.41	445	382	1.70	1.72
	Z'L17			2.41	9.0	1.50	462	368	1.67	1.79
	P	Fired pellet	34	2.07	12.8	1.54	403	362	1.90	1.91
S	Sinter	33	2.12	12.8	1.42	426	394	1.77	1.72	
B	Base(B)	-	0	0	8.7	1.74	466	415	1.74	1.77
	L	Pisolite lump	17	0.85	8.6	1.61	470	402	1.78	1.84
	A	Alumina ball	17	1.24	7.0	1.62	467	424	1.80	1.80

Test	Case	Brands (mm)	Large particle		Shrinkage ratio (vol%)	Permeability		Exhaust gas temp.		Yield +5mm (mass%)
			Blending ratio (mass%)	Total surface (m ²)		Before (JPU)	Sintering (JPU)	Rising time (min)	End time (min)	
A	Base(A)	-	0	0	20.3%	25.3	14.2	19.2	28.3	83.0
	YL34	GB Y (10-15)	34	2.64	6.2%	31.1	17.4	17.5	25.2	57.9
	Y34			2.55	6.5%	31.1	20.7	18.3	27.7	66.0
	ZL34	GB Z (10-15)	34	2.85	12.6%	27.3	14.2	18.1	26.2	73.0
	Z34			2.76	8.2%	33.2	19.1	19.1	29.1	71.1
	ZL17	GB Z (5-10)	22	1.73	14.8%	31.4	15.8	19.1	27.9	75.6
	Z'L34			3.97	17.3%	33.0	14.4	19.4	28.4	79.9
	Z'34			3.84	14.2%	32.2	16.9	19.8	28.7	77.5
	Z'L17			2.41	20.3%	33.3	14.4	19.4	28.2	81.1
	P	Fired pellet	34	2.07	10.2%	26.0	19.6	16.2	25.5	82.3
S	Sinter	33	2.12	7.5%	33.8	24.6	17.4	26.1	85.2	
B	Base(B)	-	0	0	10.9%	16.0	8.9	25.4	33.5	79.2
	L	Pisolite lump	17	0.85	14.5%	22.9	10.5	21.9	28.7	77.4
	A	Alumina ball	17	1.24	9.2%	23.2	12.2	20.6	27.5	77.2

Table 6. Effect of mara-manba green ball on each sintering factor.

Factor	Green ball ↓	Blend ratio ↓	Particle size ↓	Mix CaO ↓	BF dust ↓
Base value	Z34	35%	10-15mm	12.8%	GB Z
Action value	Base (A)	22%	5-10mm	9.0%	GB Y
Height of material	5.7%	2.4%	2.8%	0.6%	-1.1%
Height of sintercake	-8.2%	-0.8%	-3.5%	-2.1%	3.4%
Density (without particle)	13.8%	7.5%	-3.0%	-1.6%	0.0%
Total surface area	-100.0%	-39.3%	39.2%	3.4%	-7.5%
Bulk density (Bed)	-4.6%	-1.4%	-2.3%	-0.4%	0.6%
Bulk density (Cake)	9.8%	0.6%	4.0%	3.0%	-1.1%
Shrinkage ratio	147.0%	17.5%	49.0%	23.6%	-35.8%
Permeability (before)	-23.8%	8.0%	8.0%	-5.1%	3.8%
Permeability (sintering)	-25.7%	5.6%	-6.3%	-18.8%	15.5%
Temp. rising time	0.5%	2.8%	4.1%	-3.9%	-3.8%
Sintering time	-2.7%	2.9%	2.7%	-6.7%	-4.3%
Yield	16.7%	2.5%	8.6%	-2.2%	-13.9%

時通気性も改善することが理解される。次に、基準ケース (Z34) を軸に各種条件の影響を比較すると、基本的には造粒球の配置比率の少ないケースや小径(5~10mm)のケースは、ベース (A) とマラマンバ造粒球基準ケース (Z34) との中間に位置する評価となった。この結果から、粉鉱石の造粒処理によって粗大粒子を製造する方法を考える場合、その造粒処理の程度に応じて粗大粒子の影響があらわれるものと思われる。しかし、粉体原料の CaO 濃度の影響は、CaO 濃度が上昇することによりケーキ密度が低下しながらも通気性が上昇する特徴が見られる。これは、CaO 濃度上昇により粉体層の融体流動性が向上したためと考える。また、造粒球内での BF ダストの存在は、層収縮率を高め通

気性を低下させるが、成品歩留を大幅に向上する特徴が見られる。造粒球内に存在するカーボンは球周囲を流れるガスによって燃焼し発熱して造粒球内温度を高め、造粒球内の融液を高め軟化収縮しやすい状況となるためと考える。このように粉体層の CaO 濃度および造粒球におけるカーボン濃度は温度や融体流動性を介して通気性や成品歩留に深く関与する。

3.2 焼結層内空隙

焼成実験 A における原料層全体の充填密度と粉体層の充填密度の関係を Fig. 2 に、粗大粒子の総外周面積と粉体層の充填密度との関係を Fig. 3 に示す。粗大粒子は 2.9g/cm³ 以上の密度があり、粗大粒子の存在により原料層全体の充

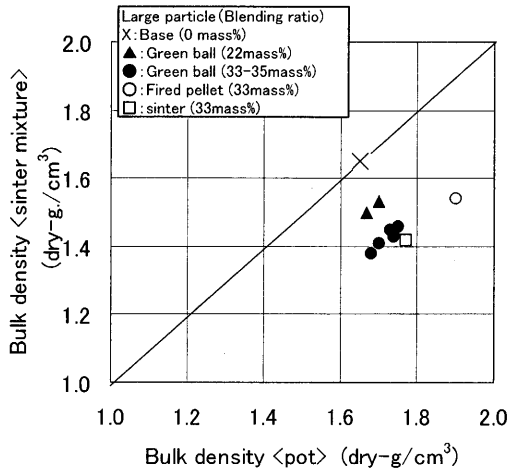


Fig. 2. Relation between observation value of bulk density in the sinter pot and calculation value of bulk density of sinter mixture without large particles at the test A.

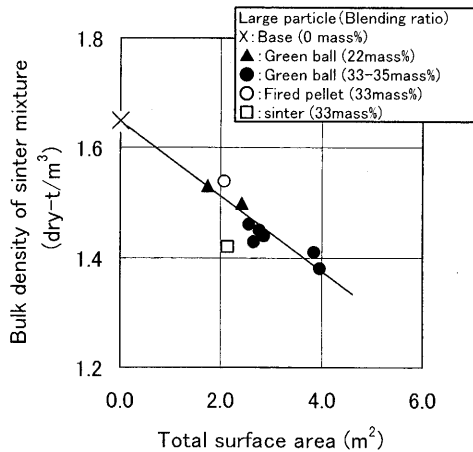


Fig. 3. Relation between calculated value of total surface area on large particles and calculated value of bulk density of sinter mixture without large particles at the test A.

填密度は大きくなる。しかし、粉体層の充填密度は粗大粒子の配置比率に応じて低下する傾向があり、また粗大粒子の総外周面積と密接な関係が認められる。本実験では粗大粒子の形状、見掛密度、粒径および配合量が変更されており、配合量が多いほど、また粒子径が小さいほど、粉体層充填密度の低下、すなわち粉体層空隙率が上昇する傾向がある。この理由として、原料充填層形成時において粒径差が装入の挙動差につながり、粗大粒子外周と粉体層の境界部に空隙が生成されやすいためと思われる。その結果、粗大粒子の外周近傍における粉体層は疎かな充填となり、粉体層密度が低下したものと考えられる。粉体層密度の低減は粗大粒子外周部に関連し、この部分が多いほどこの低減効果が大きくあらわれるものと思われる。

3.3 焼結層通気性

Table 5に示されるように、点火前の原料通気性は粗大粒子の存在により大きく向上する。この通気性向上はガスが

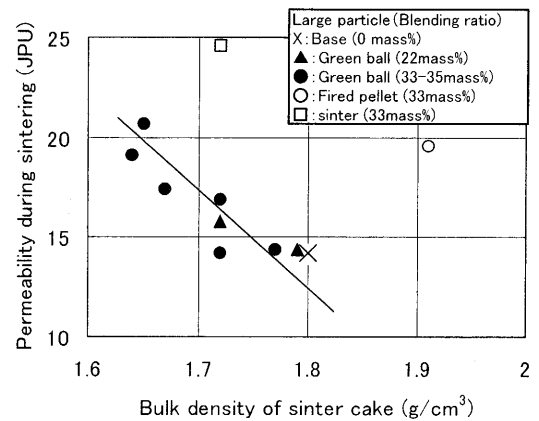


Fig. 4. Relation between bulk density of sinter cake and bed permeability during sintering at the test A.

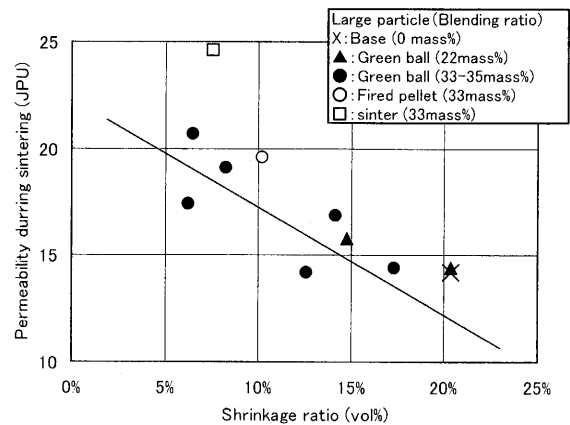


Fig. 5. Relation between shrinkage ratio of the bed height and bed permeability during sintering at the test A.

流れる粉体層部の空隙率上昇によるものと思われる。点火後の焼成時通気性も向上する傾向にあるが、その向上効果は粗大粒子の条件により異なる。粗大粒子が焼結鉱、焼成ペレット、アルミナ球のような見掛密度が大きい（緻密）ものは通気性向上効果が大きい、ピソライト塊鉱やマランバ造粒球では、やや通気性向上効果は小さい。Fig. 4には実験Aにおける焼結ケーキ密度と（焼成）通気性の関係を示すが、マランバ造粒球にとっては、焼結ケーキ密度の低下により通気性が向上する傾向が伺える。一方、焼成ペレットや焼結鉱のケースにおいては、ケーキ密度が高いにもかかわらず通気性が良好であり、マランバ造粒球とは明らかに異なる。Fig. 5には実験Aにおける層収縮率と通気性の関係を示す。層収縮率と通気性には相関が認められ、粗大球の種類によらず、層収縮の進行が通気性に関係しているものと理解される。

3.4 焼結層焼成速度

焼成実験Aにおける原料層厚と排ガス温度上昇時間（燃烧前線到達時間）との関係をFig. 6に示す。両者には対応関係が認められる。これは、風量（空塔風速）一定かつ原料量一定の実験A条件下であっても、原料の層厚、すなわち充填密度によらず、燃烧前線降下速度が一定であること

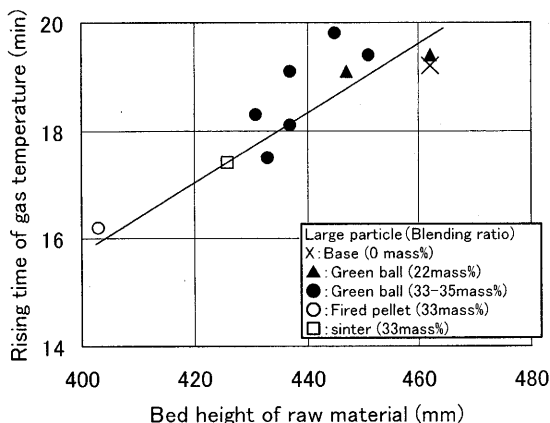


Fig. 6. Relation between bed height of raw material before sintering and rising time of exhaust gas temperature at the test A.

を意味している。この結果は、粗大粒子配置における焼結層の燃焼前線到達時間は、風量（空塔風速）と原料の熱容量比が支配因子とする従来の伝熱法則¹⁴⁾に従わないことを示唆している。粗大球原料を配置すれば、粗大粒子内にはガスは流れず粉体層に集中して流れるので、燃焼前線も1次元的に平均化して上から下に伝達することなく、3次元的に粉体層に集中してガスが流れ、ヒートウエーブにも影響を及ぼすものと考えられる。その結果、空塔風速が確保されている条件では、粗大粒子を配置している層の方が粉体層での実流速は大きく、充填密度が高いにもかかわらず燃焼前線到達時間が短くなったものと考えられる。葛西⁹⁾は焼結層のヒートウエーブに関し制御された焼成誘導層と焼成熟成層を形成させ、上記と同様の燃焼前線到達時間の短縮法を提案しており、定性的にはその効果は確認できたと言える。しかし、本実験のような条件下における対流伝熱と伝導・輻射伝熱の挙動評価は複雑であり、今後、詳細な解析が必要である。

一方、焼結層における焼成速度は粗大粒子が存在しても風量に大きな影響を受ける。焼成圧力、原料層厚が一定条件の実験BにおけるヒートパターンをFig. 7に示す。この図に見られるように粗大粒子を配置することによって焼成時間の短縮、すなわち焼成速度の向上が認められる。この向上効果を疎密通気存在による要因と単純な通気性向上による要因とに定量分離することは困難であるが、前者は風量を上昇させることなく焼成速度を向上できるので、風量原単位低減の観点からは有利である。

3.5 成品歩留

Fig. 8に実験Aにおける通気性と成品歩留の関係を示す。粗大粒子がマラマンバ造粒球にあっては通気性が向上するにともない、ベース(A)に比べ成品歩留が低下する傾向にある。焼成ペレットや焼結鉱にあっては成品歩留はベース(A)並に維持されている。また、実験Bにおける各因子の結果をFig. 9に示す。Fig. 9(d)の成品歩留の結果をみると、

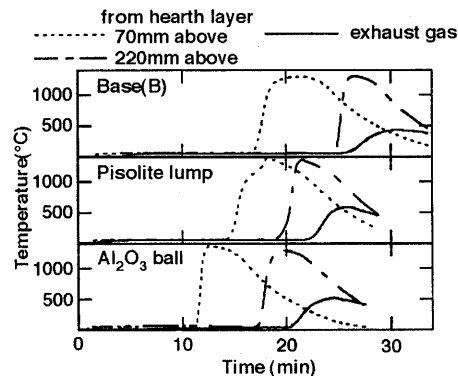


Fig. 7. Temperature profile during sintering (Test B).

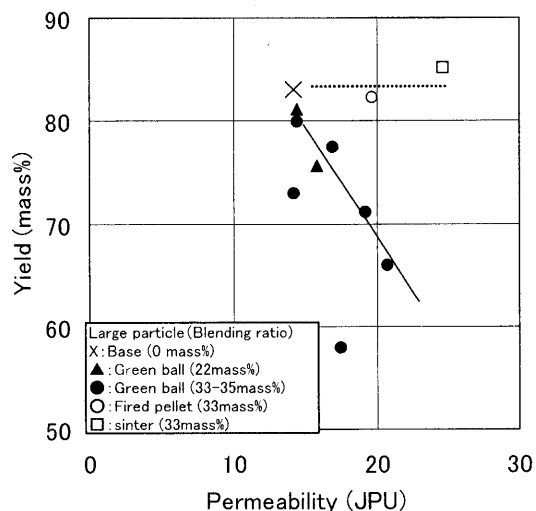


Fig. 8. Relation between bed permeability during sintering and Yield-(+5 mm) at the test A.

粗大粒子がピソライト塊鉱（コークス比アップ）およびアルミナ球ともに、成品歩留はベース(B)レベルが維持されている。以上の結果から、焼結鉱、焼成ペレット、アルミナ球など粗大粒子自体が十分な熱間強度を保有しているものは、焼成過程を経ても成品歩留に及ぼす影響が少ないことが理解される。

一方、粗大粒子がマラマンバ造粒球にあっては、マラマンバ造粒球の焼結化状況が成品歩留に大きな影響を及ぼしている。BFダスト配合のマラマンバ造粒球(Z)ケースの方が無配合(Y)ケースよりも成品歩留は向上しており(Table 5, Table 6), 10 mmを越える粗大粒子にあっては、カーボン成分を添加することによって焼結化状況を改善したものと思われる。

Fig.10には実験Aおよび実験B(◆◇)における焼結ケーキ密度と成品歩留との相関を示すが、高密度化による成品歩留上昇の対応関係が認められる。また、熱割れ性を有するピソライト塊鉱のケースとベース(B)との比較について、熱レベル最適化をはかるべくコークス比を3.7~4.5%に変更した同様の鍋実験も実施した。成品歩留の結果をFig.11に示す。同一コークス配合率条件では、ピソライト塊鉱のケースはベース(B)に比べ成品歩留は低下する傾向にある

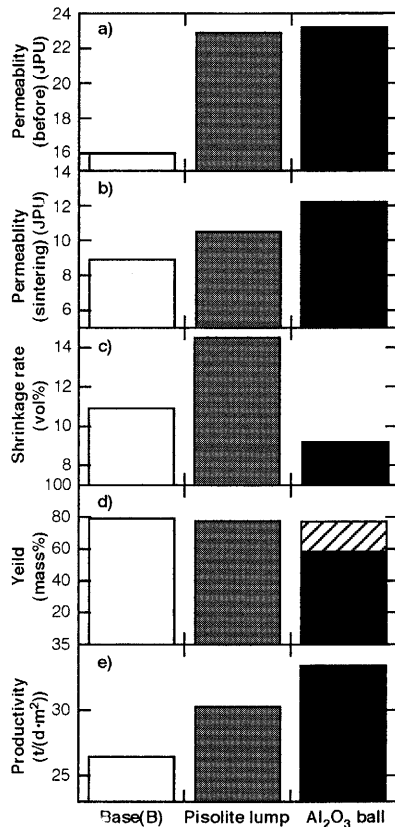


Fig. 9. Effect of large particles in bed on sintering operation at the test B. (Hatched area: Yield of charged Al_2O_3 balls)

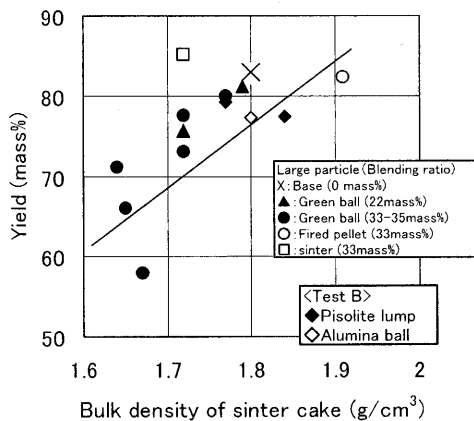


Fig. 10. Relation between bulk density of sintercake and Yield (+5 mm) at the test A and B.

が、コークス配合率の上昇にともなって成品歩留が上昇しており、コークス配合率を上昇させて粉体原料層の流動性や粗大粒子への熱補償を向上させることによって、成品歩留が維持できている。

以上の結果から成品歩留維持の観点からは、まず粗大粒子自体で熱間強度を確保すべく緻密（高密度）構造、融液確保、熱補償などを配慮する必要があり、次に粉体原料から生成される融体についても、粗大粒子を接合するのに有利な流動性に富む低融点組成（高CaO、高FeO）で高燃料カーボン含有する配合が良好と考えられる。

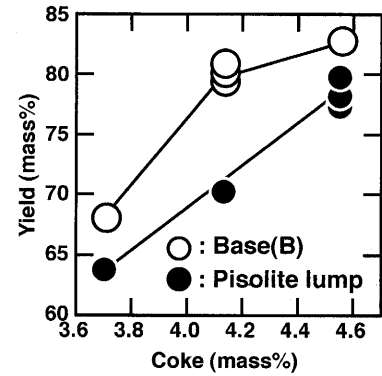


Fig. 11. Effect of coke content on yield (+5 mm) at the test B.

4. 考察

4.1 焼結生産性

焼結生産率は(2)式で定義される。原料条件が一定の場合、焼成速度と成品歩留が決定の主要因子と考えられるが、充填密度も同様に重要な因子である。特に実験Aのような装入量一定の実験条件にあっては、充填密度は原料層厚と同義である。焼成風量が一定に制御され、焼成速度や成品歩留に差が少ない場合には、原料の充填密度はそのまま生産率に影響する。焼成速度は、焼成空塔風速に対応する関係があり、通気性もしくは送風圧力が高ければ上昇する。通気性はケーキ密度との対応が見られるものの、Fig. 5に示されるように層収縮率と強い相関が認められ、一律的に空隙率に関係するのではなく収縮挙動に深く関与しているものと思われる。一方、成品歩留は粗大粒子における密度、発熱、融液生成や、粉体原料における粗大粒子側への融液浸透などが関与すると思われるが、Fig. 10に示すように焼結ケーキ密度と強く対応しており、ケーキ密度の上昇が成品歩留上昇の重要な指標となっている。従って、原料の充填密度を上昇させ焼結ケーキ密度を高く維持し成品歩留を確保しつつ、層収縮率を小さく抑え焼結ケーキの通気性を上昇させることが、焼結生産率を向上させる上で重要と思われる。

従来、主代ら³⁾や、中野ら¹⁵⁾は、焼結過程における焼結ケーキ空隙構造制御において、空隙率（ブランチ密度）と空隙径（ブランチ幅）が重要で、ブランチ幅を拡大しつつブランチ密度が低下するように制御すべきであると指摘している。この制御のためには、融体の流動性を高める配合設計を行うことと、原料充填密度の低減が効果的であるとしている。しかし、易同化性、多孔質、低化学歩留の褐鉄鉱を多配合し、CaO成分を低減する高融点の低スラグ原料条件下にあっては、原料充填密度は従来よりも大幅に低下し、また融体の流動性は低くならざるを得ない。このような原料条件下にあっては、逆に積極的に原料充填密度を高くし、なおかつ通気性を飛躍的に向上させることが重要で

ある。すなわち、充填密度が高くても通気性が良好なケーキ層空隙構造を造り込むことが重要で、焼成ペレットや焼結鉱の粗大粒子の配置によるケーキ構造形成がその一例である。

実験Bにおけるモデル粗大粒子の通気性および焼結生産率に及ぼす影響はFig. 9(b)–(e)に示されている。実験Bでは実験Aと異なり送風圧力を一定としているため、通気性の向上は焼成風量の上昇となって直接的に焼成速度を上昇させ生産性を評価できる。ピソライト塊鉱およびアルミナ球の配置により、通気性が向上し焼結生産率が大幅に上昇している。また、ピソライト塊鉱およびアルミナ球の比較において通気性に差が存在し、Fig. 7に示されるヒートパターンとの差となり焼結生産率に影響があらわれている。この差の原因が、ピソライト塊鉱のケースにおける粉コークス比率の上昇による層収縮率の上昇に起因するのか、熱割れ性状や易同化性状による層収縮率の上昇に起因するのかは明確でない。

4.2 焼結ケーキ層構造

Fig.12に、実験Bにおけるピソライト塊鉱およびアルミナ球の粗大粒子を配置して焼成した破碎前の焼結ケーキの断面写真を示す。焼結ケーキの大部分において、原料層内部に配置されたピソライト塊鉱は、目視観察では全て同化して焼結ケーキになっていた。しかし、ケーキ上面や側壁部に配置したピソライト塊鉱は、未同化で塊鉱の原形をとどめていた。ケーキ上面や側壁部では、熱不足であったためと考えられる。

一方アルミナ球を配置して焼成した焼結ケーキは、破碎前の鍋排鉱時に一辺が200mm程度のブロック状に分断された。配置したアルミナ球1269個のうち1162個は、表面に付着物が付くこともなく回収された。またFig.12(b)に示すように、アルミナ球の直下には空洞が形成され、それらが繋がっているのが観察された。焼結ケーキが破碎時にブロック状に分断されたのは、焼結ケーキがこの繋がった空洞によって、破碎の衝撃に耐えられなかったためであると思われる。このような繋がった空洞の存在は、焼結層のマクロな通気流れ方向に沿った通気空隙網の形成制御の可能性を示唆し、高密度高通気性の焼結ケーキ構造のあり方を示唆するものである。このアルミナ球周囲の空洞形成については、葛西¹⁶⁾もアルミナ板を設置した直下に空洞が形成される状況をX線CTの直接観察で報告している。

Fig. 9(d)にはアルミナ球のケースにおける成品をアルミナ球と焼結鉱とに分離して成品歩留を表示しているが、合計の値は77mass%でベース(B)にほぼ一致する。ここで、焼結鉱の部分のみを取り出して粉体層部分の焼結ケーキにおける成品歩留を算出する。アルミナ球の強度は十分に高いのでアルミナ球部分の成品歩留を100mass%と仮定すれば、粉体層部分の成品歩留は72mass%となりベース(B)に比べ低下している。この原因としては、高焼成速度や低

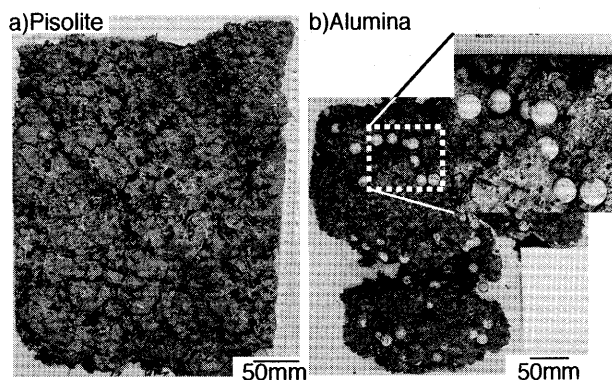


Fig. 12. Cross section of sintercake placed large particles.

コークス比率による高温保持時間短縮の影響、低CaO成分の影響や、アルミナ球周囲に生成した空洞の影響が考えられる。

焼結ケーキの強度低下の原因となった空洞は、もともと低密度領域だった部分が熔融して形成された。アルミナ球のケースでは、粗大球の剛性が高く層収縮率が低かったので(Fig. 9(c))、低密度領域は低密度のまま熔融同化し、そのため破碎時に容易に粉化して歩留が低下したと思われる。従って粗大粒子配置時の粉体層部分の歩留維持には、ピソライト塊鉱のケースと同様に、例えば粉コークス比率を増加して融液生成量を増加させ、粗大粒子周囲での低密度領域を強固に焼結化することで、さらなる成品歩留向上が期待できるものとする。

4.3 粗大粒子配置時の焼結化挙動

ピソライト塊鉱およびアルミナ球の粗大粒子を配置した実験Bにおける粗大粒子近傍での焼結化挙動を推察する。Fig.13に変化過程の模式図を示す。粗大粒子を配置すると、粉体層部分の充填密度が低下したが、充填密度が低下した領域は、粗大粒子周辺であったと考えられる。この場合、粗大粒子周辺の低密度領域は、それ以外の領域よりもガス流速が速くなるので、燃焼前線の移動速度は粗大粒子周辺の方が速くなったと思われる。その結果、粗大粒子周辺では周囲よりも先に融液生成が開始され、生成した融液はガス流によって粉体層側に浸透し空隙を形成せしめ、粗大粒子の周囲に空洞が形成されたと思われる。

粗大粒子がアルミナ球の場合、アルミナ球自体に溶融・同化反応が起こらず、また急速昇温による熱割れも起こらなかったため、アルミナ球は装入時の形状(剛性)を保持することができ、上部からの荷重をアルミナ球が変形することなく支えることができたので、焼結後も空洞が残留したと考えられる。

一方、粗大粒子がピソライト塊鉱の場合、昇温中にピソライト塊鉱自体の熱割れや溶融・同化反応によって剛性が低下するので、空洞形成後に上部からの荷重によりピソライト塊鉱が変形し空洞を潰し、焼結ケーキ全体が収縮しながら焼結ケーキ構造を形成したと思われる。それゆえFig.

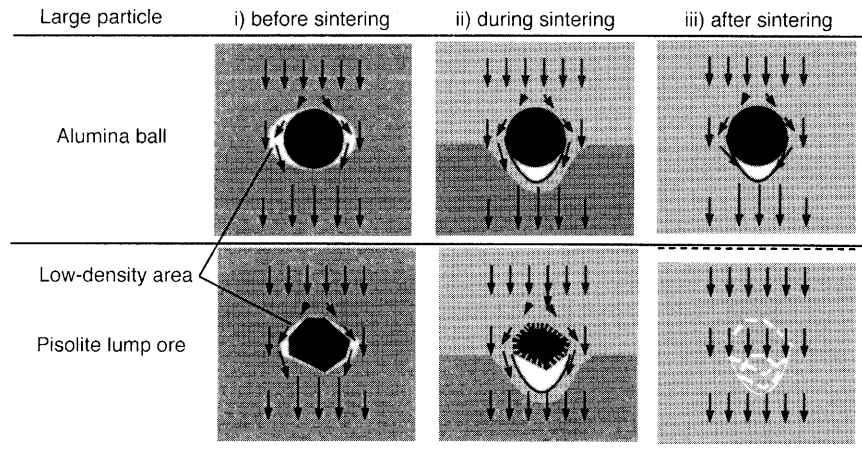


Fig. 13. Schematic view of sintering behavior of sinter bed placed large particles.

9(b), (c)に示されるように通気性は、アルミナ球のケースよりも低く、収縮率はベース(B)よりも大きくなったと考えられる。このように粗大粒子の溶融同化過程での剛性は重要と考えられるが、粗大粒子に必要な強度、粒径、存在率などは、明確にすべき課題である。今後、マラマンバ鉱などの細粒粉鉱の造粒および層配置技術への展開を考えるならば、焼結鉱の組織制御を意識した原料組成設計とケーキ空隙構造制御を意識した粗大粒子設計の両立研究が必要と思われる。

5. 結言

焼結原料層内に粗大粒子を配置した焼結鍋試験を実施し、通気性や焼結化挙動に及ぼす影響を調査し、以下の知見を得た。

(1) 粗大粒子を焼結原料層に配置すると、粗大粒子の見掛密度に対応して原料層全体の充填密度は上昇する。しかし、粗大粒子を除いた粉体層部分の充填密度は、粗大粒子外周部の面積に対応して低下した。

(2) 粗大粒子を焼結原料層に配置すると、通気性が大幅に向上した。これは、原料充填層内において粗大粒子と粉体層の境界部分に低充填密度領域が形成され、これが焼成ガスの通気路形成に深く関与しているためと思われる。

(3) 上記の通気性向上効果は、焼成ペレット、焼結鉱、アルミナ球などの緻密で高強度な粗大粒子ほど大きく、ピソライト塊鉱やマラマンバ造粒球ではやや通気性向上効果は低下した。

(4) 粗大粒子を焼結原料層に配置し原料量と焼成風量を一定とする実験では、燃焼前線到達時間は原料層厚に対応する関係が認められ、原料層厚の低い、充填密度の高い原料層の方が燃焼前線到達時間が短縮された。すなわち、焼成風量が一定ならば焼成体積速度は一定との結果が得られた。この結果、粗大粒子を焼結原料層に配置することによって充填密度を上昇すると、その比率分の焼成速度の向

上と焼成必要風量の低減が図れる。

(5) 粗大粒子を焼結原料層に配置すると、焼成ペレット、焼結鉱、アルミナ球などの緻密で高強度な粗大粒子の場合には成品歩留は低下しなかったが、ピソライト塊鉱やマラマンバ造粒球の粗大粒子の場合には成品歩留の低下傾向が見られた。しかし、コークス配合率の上昇や燃料カーボン、CaO成分など融体流動性上昇の配合調整により、成品歩留維持の可能性が見出された。

(6) 粗大粒子を焼結原料層に配置する方法にあっては、焼成速度は焼成風量すなわち通気性に対応し、通気性は層収縮率に対応する。成品歩留は焼結ケーキ密度に対応している。従って、焼結ケーキ密度が高いにもかかわらず通気性の良好なケーキ構造を目指すことが重要であり、同時に原料充填密度を上昇させることも重要と思われる。

文 献

- 1) T.Kawaguchi, M.Hoshi, Y.hatano, M.Yariyama, K.Hashikawa and K.Kitamura: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 864.
- 2) T.Matsumura, K.Morioka, M.Shimizu, T.Noda and T.Matsuo: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 23.
- 3) K.Nushiro, Y.Konishi, K.Takihira and N.Fujii: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 413.
- 4) T.Inazumi and S.Kasama: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1061.
- 5) M.Nakano, S.Kasama and Y.Hosotani: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 711.
- 6) K.Kitamura, T.Miyake, K.Yanagisawa, K.Ono and T.Shouho: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1037.
- 7) K.Higuchi, T.Kawaguchi, M.Kobayashi, Y.Hosotani, K.Nakamura, K.Iwamoto and M.Fujimoto: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 1188.
- 8) E.Kasai: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 714.
- 9) E.Kasai: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 718.
- 10) T.Kawaguchi, K.Kuriyama, S.Sato and K.Takata: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1924.
- 11) T.Kawaguchi, K.Kuriyama, S.Sato and K.Takata: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1642.
- 12) C.Kamijo, M.Matsumura and T.Kawaguchi: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 544.
- 13) 規格協会: JIS-M8716, JIS-M8719.
- 14) I.Muchi and J.Higuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **56** (1970), 371.
- 15) M.Nakono and Y.Hosotani: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 690.
- 16) E.Kasai, S.Komarov, K.Nushiro and M.Nakano: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 538.