

# HBI利用による高炉増産効果の検討

宇治澤 優\*・砂原 公平\*・松倉 良徳\*・中野 薫\*・山本 高郁\*

Effect of HBI Utilization on Blast Furnace Productivity

Yutaka UJISAWA, Kouhei SUNAHARA, Yoshinori MATSUKURA, Kaoru NAKANO and Takaiku YAMAMOTO

**Synopsis :** As an iron source of blast furnace which can adapt to recent high production rate operation and CO<sub>2</sub> problem, reduced iron may attract attention in the near future. In this study, reduced iron melting test was performed using an experimental blast furnace with use of HBI (Hot Briquette Iron) which is one of the reduced irons in order to quantify effect of increase in production and reduction effect of reducing agent rate for blast furnace.

**Key words:** blast furnace; high productivity; CO<sub>2</sub> problem; low reducing agent rate; reduced iron; HBI.

## 1. 緒言

最近の高出鉄比操業指向ならびにCO<sub>2</sub>問題の両面の課題に対応できる高炉の鉄源として還元鉄は今後、注目を浴びる可能性が高い。高炉法による鉄鉱石100%使用の溶鉄製造では、炭素消費の半分以上を酸化鉄の還元に要するため、大幅な増産と還元材比低減の実行はハードルが高い。一方、スクラップや還元鉄は還元を必要としない分、原理的に大幅な増産と還元材比低減が期待できる。スクラップは、形状・サイズおよびトランプエレメント (Cu, Sn等)の問題はあるが、産業界全体として徹底的にリサイクル化のシステムを構築できれば、有効な高炉鉄源となる。還元鉄利用については、価格・搬送方法等の問題はあるが、スクラップのようなトランプエレメント問題はない。ここでは、還元鉄(HBI)の高炉増産および還元材比低減効果を定量的に把握するため、まず、還元鉄の溶解挙動に関する基礎実験を行った。次に、試験高炉を用いて、鉱石に対する還元鉄装入量を段階的に増加させる溶解試験 (最大100%使用)を実施した。更に、試験結果ならびに速度論的解析に基づき、実高炉におけるHBI使用効果の推定を行った。

## 2. 還元鉄の高炉使用時の効果試算

### 2.1 総括収支による還元鉄の使用効果の検討

出鉄比2t/d/m<sup>3</sup>、コークス比500kg/tで操業している高炉において、送風条件、排ガス温度および溶鉄成分同一条件で、100% MFeの鉄源 (還元鉄, スクラップ) を100%使用して操業した場合 (ガス利用率 $\eta_{CO}=0$ )、総括収支によれば、出鉄比4.6t/d/m<sup>3</sup>、コークス比195kg/tと試算される。

すなわち、現状高炉では、コークス比の約6割(300kg/t)を酸化鉄の還元に要している。従って、還元鉄使用により、鉄源の酸化度(O/Fe)を下げることで、増産・還元材比低減が期待できる。

### 2.2 リストモデル<sup>1)</sup>による還元鉄の使用効果の検討

鉄鉱石とともに還元鉄(100% MFe)を装入する場合を考える。基準条件は、現状高炉のコークス比312kg/t, PC 187kg/t, 送風温度1523K, 湿分30g/Nm<sup>3</sup>, 羽口前温度2290Kでシャフト効率1とし、装入全鉄分に対する金属鉄の装入比率を変更した場合の効果についてRistモデルによ

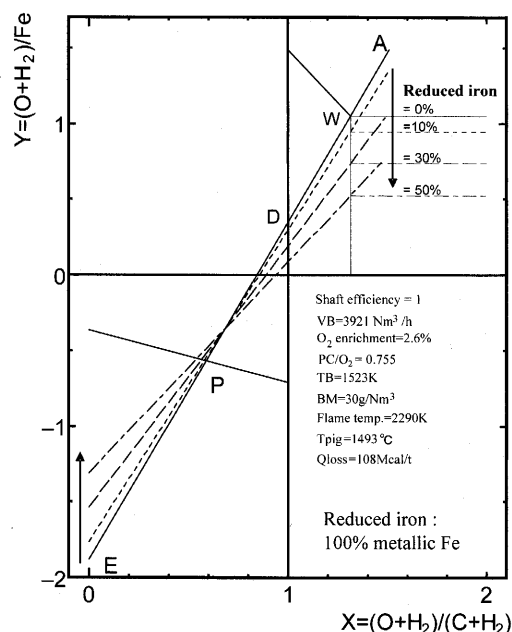


Fig. 1. The effect of the reduced iron charge on the operation diagram.

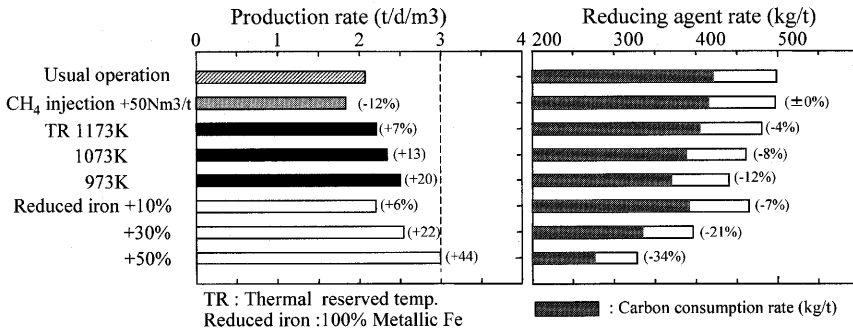


Fig. 2. Comparison of influence of the operations on productivity and reducing agent rate by the Rist model.

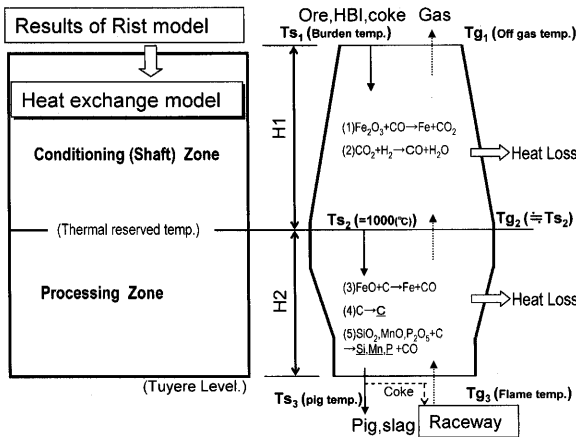


Fig. 3. Outline of the heat exchange model.

り試算した。Fig. 1に操業線に及ぼす金属鉄装入比率の影響を示す。鉍石の代替鉄源として還元鉄を部分装入し、鉄源の酸化度(O/Fe)を下げることで還元材比は大幅に削減できることを示す。Fig. 2には基準操業の送風条件下での出銑比と還元材比に及ぼす操業操作の影響比較を示す。天然ガス(CH<sub>4</sub>): 50Nm<sup>3</sup>/tの場合、CH<sub>4</sub>の熱分解と分解生成物(CO, H<sub>2</sub>)の熱保存帯温度までの加熱に相当する熱量が必要なため、投入水素量増加によりカーボン消費比は低下するものの、出銑比は寧ろ低下方向となる。一方、図に示す通り、高反応性コークス使用により、熱保存帯温度(TR)を低下させることが出来れば、炉内の還元能力が向上して出銑比向上と還元材比低減が期待できる。還元鉄(100% MFe)の場合、装入量の増加に伴い、高反応性コークス使用と比べて、同等以上のパフォーマンス向上が期待できる。(還元鉄50%装入で基準操業の出銑比2 t/d/m<sup>3</sup>から3 t/d/m<sup>3</sup>に増加。)実高炉の高反応性コークス使用試験も行われている<sup>2)</sup>が、冷間強度を維持した高反応性コークスの定常製造は現状困難なことから、還元鉄の鉄品位(金属化率)にも依るが、還元鉄使用は高出銑比・低還元材比操業を指向する上で有力な選択肢の一つである。ここで、還元鉄の高炉使用時のシャフト部の熱交換状況を試算するため、Fig. 3に示すようにリストモデルの計算結果を用いたシャフト部・炉下部の段階別熱精算を行った。その結果をFig. 4に示す。熱交換簡略モデルによる還元鉄装入時の高さ方向温

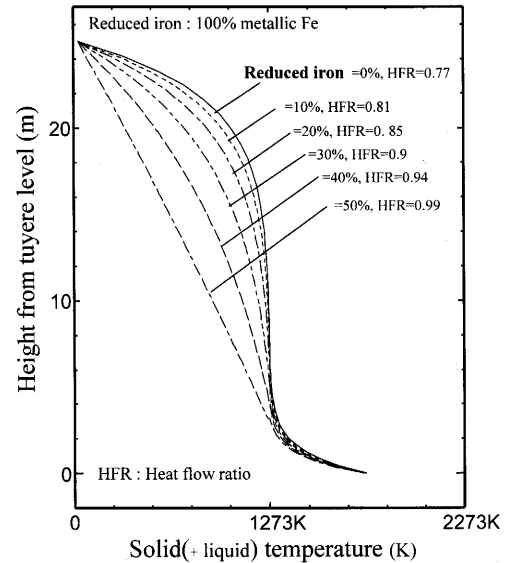


Fig. 4. The temperature profile in the reduced iron charge by the heat exchange model.

度分布を見てみると、還元鉄の装入重量比率が20%を越えると、送風原単位低下による熱流比上昇で、熱保存帯温度(1000°C)が消滅し、高炉の理想的な温度分布から乖離すると試算された。この試算結果から、高反応性コークス使用時には、熱保存帯温度低下に鉍石の間接還元が追従するか否かがポイントであると同様に、還元鉄使用によりシャフト部が低温化した場合、共存する鉍石の間接還元速度が追従するか否かは、還元鉄の高炉使用時の増産効果と還元材比の低減効果に影響を及ぼすと考えられる。総括収支の試算通りの還元鉄使用効果が得られるかどうかについては、次章以降にて還元鉄の使用評価試験と還元鉄使用時の速度論的解析により検証する。

### 3. 還元鉄の使用評価試験

#### 3.1 基礎実験によるHBIの溶解挙動の調査

還元鉄の溶解挙動を調査するため、荷重軟化試験<sup>3)</sup>を実施した。Table 1に試験に供した還元鉄の基本物性を示す。表には、塊成化還元鉄HBIと羽口吹き込みを想定した粒状還元鉄(Powder Reduced Iron)も参考データとして示す。Fig. 5には焼結鉍とともに還元鉄の外観を示す。Fig. 6に荷

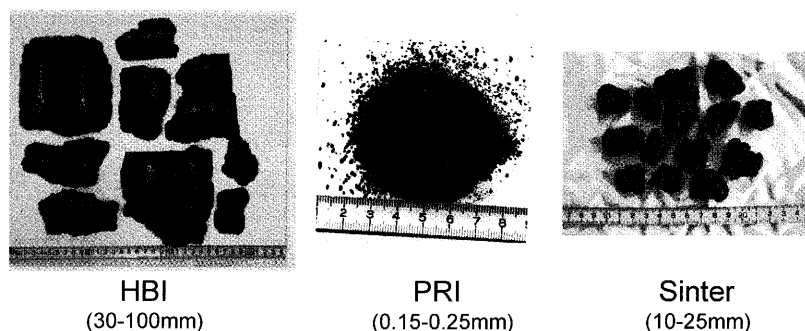


Fig. 5. The reduced irons and sinter.

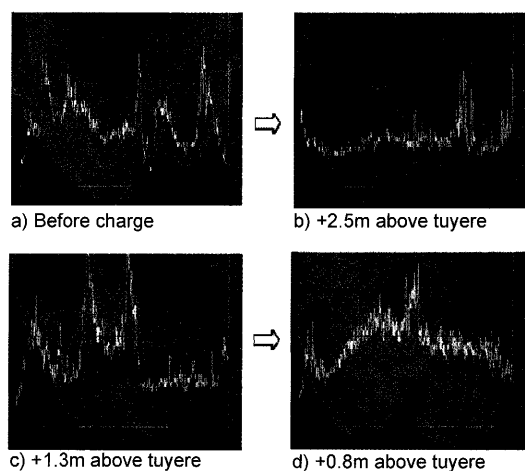


Fig. 21. C existence distribution of the HBI cross section by EPMA.

重軟化試験の概要を示す。黒鉛坩堝の最下層にコークスを一層敷き、その上部に焼結鉱とHBIを混合した充填層を形成させた後、高炉内で受ける昇温・ガス組成・荷重状態を模擬した条件下で、坩堝内の鉄原料が軟化収縮、溶解、滴下する過程での通気抵抗を測定し、Fig. 7の(1)、(2)式で定義される通気抵抗指数(KS値)を算出した。ここで、供試料の総重量は一定とし、焼結鉱とHBIの混合率(重量比率)およびHBIの粒径を変更した実験を行った。Fig. 8に実験条件と実験結果を示す。Case 1のHBI単独の場合、溶け落ち開始温度は、Case 5の焼結鉱単独に比べて100°C以上低下した。これは、脈石量が少なく塩基度が低いこと、またC含有の影響と考えられる。焼結鉱とHBIを混合した実験ケースCase 2とCase 3では1250~1300°Cで一回目の滴下が観られた。その後、約1400°Cまで上昇後に二回目のメタル滴下が観察された。この溶け落ち挙動から、HBIが焼結鉱よりも先に溶解したと推定される。Case 4のHBIの粒径を25~30mmに変更したケースでは、1300°C付近の滴下はなく、溶け落ち開始温度は1478°Cで、HBIと焼結鉱が同時にメタルとして滴下したと考えられる。Fig. 9には、実験中の供試料の層厚収縮率と圧力損失の関係を示す。HBI配合率が同じ50%であるHBI粒径15~20mmのCase 3と比較すると、Case 4の約40%の収縮までの圧力損失は著しく小さい。これは、昇温から滴下開始温度に至るまでの

Table 1. Chemical analysis and properties of the reduced irons.

	Metallization (%)	T.Fe	M.Fe	FeO	C	SiO <sub>2</sub>	CaO	Size (mm)	Bulk density	Apparent density
HBI	86.4	91.4	79.0	15.9	0.88	2.0	0.9	30-60-100	2650	5100
PRI	64.3	81.4	52.3	37.4	4.81	2.7	0.3	0.15-0.25	2300	—
Sinter	0.0	58.4	0.0	6.9	0.0	4.52	9.19	10-25	1720	2950

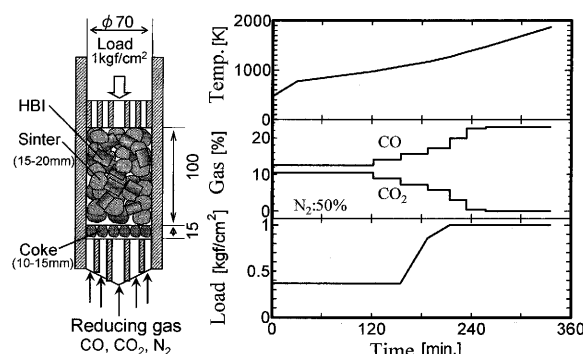


Fig. 6. Experimental condition for softening-melting test.

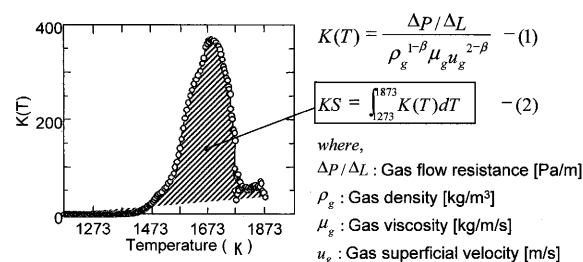


Fig. 7. Definition of KS value: High temperature permeability index.

間、坩堝内のHBIは粒径サイズの影響で、HBIの溶解が焼結鉱の軟化開始より遅れ、その骨材効果により層内の空隙率が維持されて、収縮率に対する圧損上昇開始点が高温側にシフトして1480°C付近で急激に溶解したものと推定される。Fig.10には高温通気抵抗指数KS値とHBI混合率の関係を示す。HBIの高温通気性は極めて良好であり、HBI単独だと軟化から滴下までの通気阻害は殆どなく、HBI 50%混合で観てもKS値は焼結鉱単独の10%以下に低下する。本実験結果から、HBIの高炉使用を想定した場合、出鉄比向上・還元材比低減のみならず、通気性改善に大きく

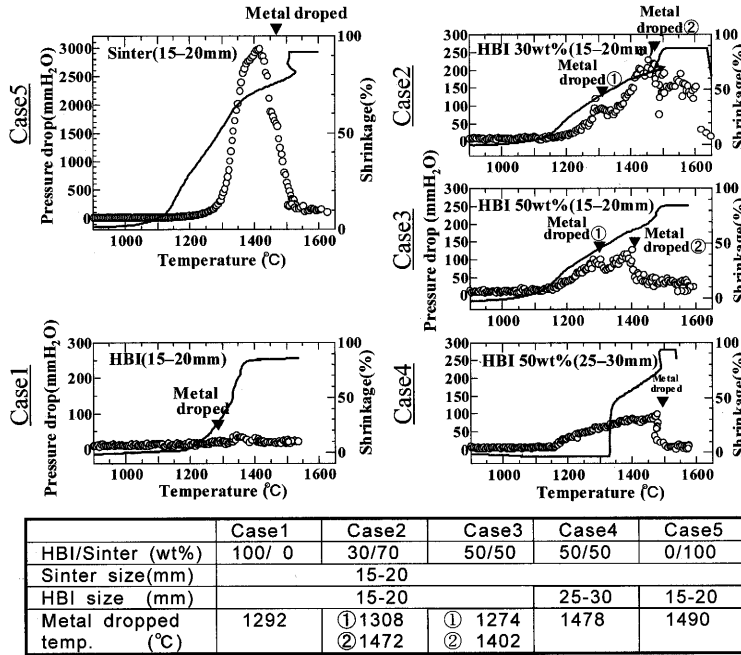


Fig. 8. Softening and melting behavior of HBI and sinter.

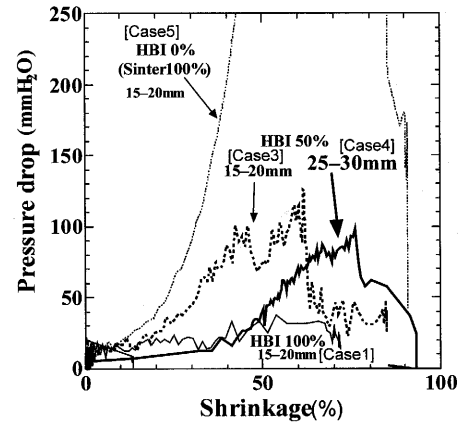


Fig. 9. The relationship between pressure drop and shrinkage.

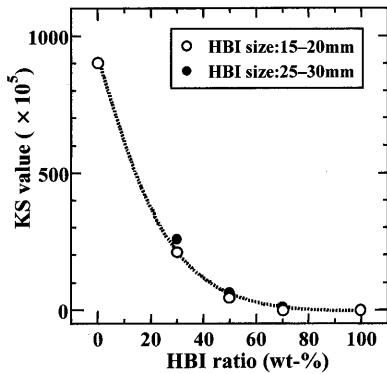


Fig. 10. The relationship between HBI mixing ratio and KS value.

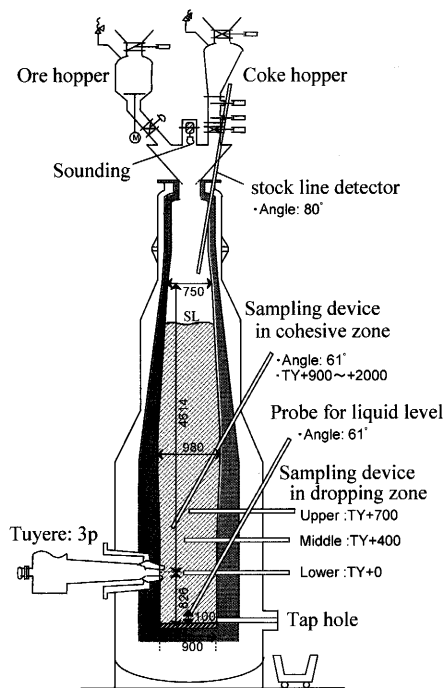


Fig. 11. Experimental blast furnace.

Specifications		
Inner size of furnace	(mm)	900Φ × 6000H (3.8m³)
Number of tap hole	(-)	1
Number of tuyere	(-)	3
Blast volume	(Nm³/H)	max 900
Blast temperature	(°C)	800
Oxygen enrichment	(Nm³/H)	400
Nitrogen enrichment	(Nm³/H)	400
Pulverized coal injection	(kg/H)	300
Fine ore injection	(kg/H)	150
Fine flux injection	(kg/H)	30
Top gas pressure	(MPa)	0.15
Output of hot metal	(t/tap)	800
Number of pressure gauge	(-)	30p
Number of temperature probe	(-)	30p

寄与するものと考えられる。

### 3.2 試験高炉試験によるHBI使用評価

#### 3.2.1 試験方法

還元鉄使用による増産および還元材比低減効果を総合的に評価するため、試験高炉操業を実施した。還元鉄の使用方法としては、塊状還元鉄HBIの炉頂装入と粉状還元鉄 (Powder Reduced Iron)の羽口吹き込みの2ケースを設定した。

#### (1) 試験設備

Fig.11に試験高炉の構成を示す。炉床径は、0.9mで内容積は3.8m³で、炉頂にはコークスホッパーと鉬石原料切り出し装置を装備している。今回のHBI装入は、コークスホッパーを用い、炉内にはコークス、HBI、鉬石の順で交互に、半径方向均一な層構造を形成するように装入装置を改造した。羽口は3本で、800°Cの送風を熱風炉より送り込む。羽口からは、微粉炭吹き込みの他に鉬石・フラックス吹き込みが可能な構成となっている。炉床の蓄鉄能力は、

Table 2. Operation condition for HBI melting test (planned at melting period).

Case No.	1	2	3	4	5	6
Burden ratio or injection rate	HBI	HBI	HBI	HBI	PRI	OI
	100%	50%	25%	0%	200kg/t	200kg/t
Blast volume (Nm <sup>3</sup> /h)	430.5					
Oxygen (Nm <sup>3</sup> /h)	122.0					
N <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	120.0					
Moisture (g/Nm <sup>3</sup> )	20.0					
Top pressure (kPa)	49.0					
Blast temp. (°C)	800					
PCI (kg/h)	177					
PRI (kg/h)	0.0			111.0		0.0
OI (kg/h)	0.0					98.6
Flame temp. (°C)	1979			1865		1851
Bosh gas volume (Nm <sup>3</sup> /h)	990			990+20		990+33
Pig	Output (kg/tap)	800				
	Temp. (°C)	1450				
	[C] (-)	0.045				
	[Si] (-)	0.005				
	Slag	CaO/SiO <sub>2</sub> (-)	1.25			
	MgO (-)	0.060				
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (-)	0.136				
	Viscosity (poise)	4.04				

800 kg (1 tapの出鉄量)で、出鉄は減風・減圧下で行う。炉壁には静圧計(高さ方向8レベル)と炉内表面温度を計測する熱電対(高さ方向11レベル)が設置されている。また、操業中に炉内原料採取が可能な融着帯サンプラー、滴下帯サンプラーを装備している。

## (2) 試験条件

Table 2には操業条件、Table 3には使用原料性状の一覧を示す。通気性評価と増産効果を比較検証するため、送風諸元はすべて一定とした。微粉炭(PC)比は、PC燃焼雰囲気を実高炉に合わせせるため、酸素過剰係数を200kg/t相当に設定した。微粉炭の吹き込み速度については変更せず、増産による還元材比調整はコークス比で操作する。また、PRI吹き込み試験との比較のため粉鉱石吹き込み(Qre Injection)試験も併せて実施した。鉱石配合は、実高炉を想定し、焼結比を78%(塊鉱比22%)とし、還元鉄使用量増加に対しては、焼結/塊鉱比一定で減少させる。スラグ設計に関しては、C/S=1.25、MgO=6%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=13.6、スラグ粘度=4.0 poiseとした。また、コークスについては炉熱補償、および炉内発生粉抑制のため、オイルコークスを50%配合した。以上の操業条件で1ケースあたり8TAP以上の5日間の連続操業を行った。

## 3.2.2 試験結果

### (1) 出鉄速度・還元材比の比較

試験操業中の炉況は、いずれのケースもほぼ安定に推移し、還元鉄の炉頂装入と羽口吹き込みの比較を行えるデータを採取できた。Table 4とTable 5に代表的な操業成績と熱精算の一覧を示す。これらの表中のデータは出鉄に伴う増減風の影響を考慮している。HBI装入による酸化鉄の還元所要熱の低下に応じた還元材比の低下と増産効果が認められる。但し、HBI装入量が増加するほど、炉頂温度が上昇して増産勾配は低下する傾向であった。これは鉄源の平均粒径の上昇が原因と考えられる。炉内通気抵抗はHBI

Table 3. Iron sources and fuels used for HBI melting test.

Iron source	T.Fe	FeO	M.Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	C
	Sinter	58.42	6.90	0.0	4.52	1.67	1.10	9.19	0.050	0.025
Ore	64.83	0.07	0.0	2.44	1.20	0.07	0.11	0.02	0.01	—
HBI	91.4	15.9	79.0	2.0	0.8	0.3	0.9	0.1	0.0	0.88
PRI	81.4	37.4	52.3	2.7	1.5	0.1	0.3	0.1	0.047	4.81
OI	56.75	4.90	0.0	5.35	1.93	1.09	9.81	0.050	0.010	—

	Size	Bulk density
Sinter	10-25	1720
Ore	10-25	2410
HBI	30-100	2830
PRI	0.15-0.25	2300
OI	-100mesh	—

Fuel	C	H	N	O	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
	BF Coke	87.6	1.10	0.60	0.60	0.60	6.0	2.8	0.5
Oil coke	98.00	1.50	0.60	0.0	0.40	0.2	0.0	0.0	0.0
Coal	76.50	4.35	1.72	7.80	0.36	6.8	1.4	0.1	0.0

	Size	Bulk density
BF Coke	15-25	530
Oil coke	20-30	810
Coal	-200mesh	—

50%以上で大幅に低下した。PRI吹き込みケースでは、ベース操業から、送風圧変動、風量偏差などを監視しながら、PRI吹き込み量を徐々に増加させた。吹き込み量が200kg/t相当となったところで風圧変動が生じたが、出鉄量の若干の低下を伴いながらも、操業を維持することができた。OIケースも同様に吹き込み量を徐々に増加させる負荷テストを実施したが、風圧変動を伴いながらも200kg/tまで到達できた。増産及び還元材比低減効果をFig.12に示す。図中には、Table 4の実測の生データとともに、ガス利用率以外の操業結果をベース条件で標準化した値を併記している。その結果によれば、HBI 100kg/t当たりの増産効果は5.5%で、還元材比低減効果は4.3%であった。

### (2) 羽口吹き込みと炉頂装入の増産効果の比較

還元鉄増産効果に関し、羽口吹き込みの装入との比較、および操業阻害因子となり得る羽口内溶解、還元挙動、及び風圧変動について考察した。Fig.13は、レースウェイ内の1次元反応計算<sup>4)</sup>による粉体還元鉄(Powder Reduced Iron Injection, Ore Injection)の昇温挙動、反応挙動を示すものである。Table 2に示した増風時の送風条件で、レースウェイ深さは前回の試験操業解体調査による実測で得られた230mmに設定した。PRIを200kg/t吹き込んだときのレースウェイ深さ方向のガス組成分布を図の中段に示す。図の下段には、レースウェイ内の鉄源温度と還元率分布を、OIは破線、PRIは実線で示す。粉体鉄源は両者とも、急速昇温の結果、溶解温度(1270°C)に達した後、還元反応に移行すると推定される。Fig.14はFig.13と同様の計算により、吹き込み量と酸素富化量に対するレースウェイ先端部の粉体鉄源の還元率と溶解条件を示したものである。吹き込み量増加に応じてレースウェイ出口における到達還元率が低下し、酸素富化率を増加させるほど、還元率が上昇する。尚、溶解条件はPRI・OIとも融点を1270°Cに仮定している

Table 4. Operational results of HBI melting test (account of decrease blowing).

Case No.	Top Charge				Tuyere Injection	
	1	2	3	4	5	6
Burden ratio or injection rate	HBI 100%	HBI 50%	HBI 25%	HBI 0%	PRI 200kg/t	OI 200kg/t
Blast volume (Nm <sup>3</sup> /h)	439	427	408	432	435	431
Blast temp. (°C)	866	866	866	866	866	866
Moisture (g/Nm <sup>3</sup> )	20	20	20	20	20	20
Oxygen (Nm <sup>3</sup> /h)	87	84	92	97	98	97
PCI (kg/h)	102	117	121	127	131	131
Iron source injection (kg/h)	0	0	0	0	99	68
N <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	99	102	103	104	104	103
Bosh gas volume (Nm <sup>3</sup> /h)	894	887	883	929	936	928
Flame temp. <sup>*1</sup> (°C)	2004	1942	1975	1986	1979	1977
Pressure drop (kPa)	3.28	4.87	5.74	5.47	5.41	5.95
Gas utilization (%)	3.2	19.5	27.6	30.5	25.2	26.8
Top gas temp. (°C)	540	447	401	412	400	394
Coke rate (kg/t)	320	324	359	444	418	479
Coal rate (kg/t)	188	227	256	301	297	350
Reducing agent rate (kg/t)	508	551	615	745	715	829
Production rate (kg/h)	544	513	470	421	441	374
Hot metal temp. (°C)	1550	1540	1510	1483	1450	1430
[C] (%)	4.80	4.78	4.50	4.60	4.78	4.69
[Si] (%)	1.38	1.25	1.13	0.82	0.81	0.7
[S] (%)	0.014	0.011	0.043	0.072	0.045	0.041
Slag rate (kg/t)	121	172	211	265	250	276
CaO/SiO <sub>2</sub> (-)	-	-	1.39	1.23	1.22	1.20

\*1: The value except effect of iron source injection.

Table 5. Heat balance of test results (MJ/tHM) (account of decrease blowing).

Items		Case	1	2	3	4	5	6
			HBI 100%	HBI 50%	HBI 25%	HBI 0%	PRI 200kg/t	OI 200kg/t
Input	Fuel	Coke	10246.3	10374.8	11484.9	14225.0	13387.0	15337.0
		Coal	5606.8	6790.7	7668.4	9005.6	8869.3	10450.0
		C in Iron source	296.4	179.4	100.6	0.0	353.8	0.0
		Hot blast	1174.9	1212.7	1293.7	1527.7	1468.8	1717.5
		Total	17324.4	18557.6	20547.6	24758.3	24078.9	27504.4
Output	Pig	Sensible heat	1308.7	1300.1	1274.3	1251.1	1222.8	1205.7
		C → $\bar{C}$	100.1	99.6	93.8	95.9	99.6	97.8
		$\bar{C}$ latent heat	1574.8	1568.3	1476.4	1509.2	1568.2	1538.7
		SiO <sub>2</sub> → $\bar{Si}$	432.3	388.5	354.0	256.9	253.8	219.3
		Fe <sub>x</sub> O <sub>y</sub> → Fe	602.5	3037.6	4699.6	6799.2	5784.5	6802.0
	Slag	Sensible heat	223.4	315.1	377.6	467.3	431.1	469.9
		CaCO <sub>3</sub> → CaO	106.2	52.5	21.0	0.0	40.7	0.0
	Gas	Sensible heat	1232.3	1105.6	1090.6	1353.3	1251.9	1429.1
		CO latent heat	9174.0	8206.8	8327.1	9783.4	10200.5	11493.3
		H <sub>2</sub> latent heat	1714.5	1614.3	1618.2	1849.1	1932.8	2212.5
	Loss	Heat loss	855.6	869.2	1215.0	1392.9	1293.0	2036.1
		Total	17324.4	18557.6	20547.6	24758.3	24078.9	27504.4

ため一致している。粉体還元鉄吹き込み操業では、溶解、及び還元率を左右する酸素富化量は、生産量に依存するため、還元鉄装入時と同一の送風条件で、かつレースウェイ内で完全溶解する酸素吹き込み量を設定した。上記条件による試験操業の結果、今回使用したPRIの場合、前記Fig.12に示すように、還元材比と生産量に変化が見られず、OIでは、還元材比の上昇を伴う減産となった。吹き込み限界に関しては、粉体吹き込み量を増加させた際（吹き込み量負荷テスト）の羽口間の送风量変動に着目した。Fig.14に示すように酸素富化一定の下で吹き込み量を増加

させ、溶解上限条件に近づいた時、Fig.15に示すようにPRI吹き込み時の风量偏差が顕著化した。一方、粉鉱石(OI)では、吹き込み量が少量の場合でも风量偏差は顕著であった。還元鉄吹き込みの場合、急速昇温により直接還元反応が生起するため、増産効果は鉄品位に大きく左右される。Table 6には総括収支により求めた鉄品位が増産効果に与える影響を示す。ここではHBI装入の場合を含め、還元鉄を試験高炉で100 kg/t使用する際の増産効果の比較を行った。金属化率が高い場合でも、装入による還元鉄利用は吹き込み使用よりも有利となる。羽口吹き込み利用は、

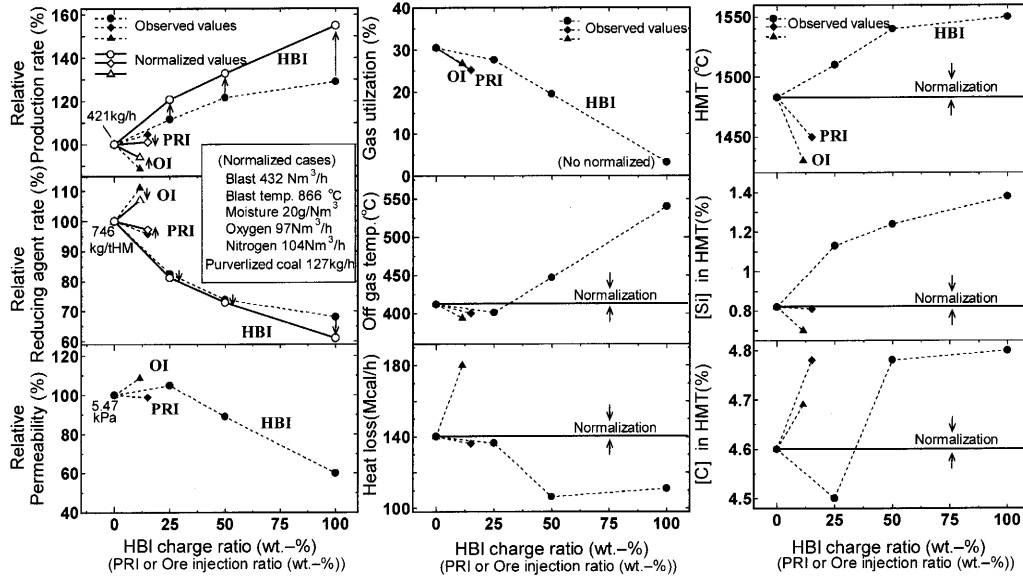


Fig. 12. Relative production rate, reducing agent rate and permeability through the reduced iron melting tests using experimental blast furnace.

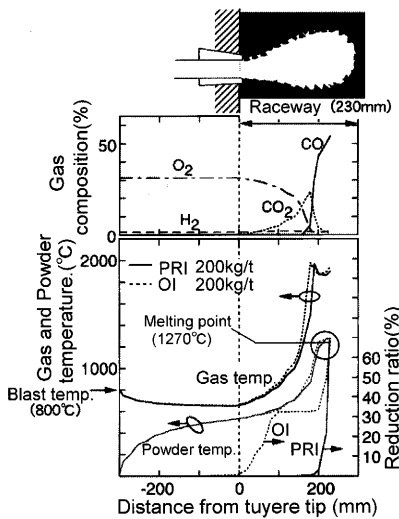


Fig. 13. Heating and reduction behavior in the raceway with reduced iron injection (Calculated by 1-dimensional raceway model).

Table 6. Comparison of increased production effect between top charge and tuyere injection (per reduced iron +100 kg/t).

	Top Charge		Tuyere injection	
	Test results	Assumed	Test results	Assumed
Metallization ratio	86.4%	(95.0%)	64.3%	(99.7%)
Effect of output increase	+5.5%	(+9.3%)	-0.7%	(+5.8%)
Effect of RAR decrease	-4.3%	(-8.3%)	0.0%	(-6.6%)

Test results using experimental blast furnace, ( ): Assumed.

金属化率が高ければ増産効果は得られるものの、多量使用時の羽口前条件悪化に伴う風圧変動の懸念を考えれば、高炉における還元鉄使用に関する増産効果に対しては、羽口吹き込みよりも炉頂装入が有利である。

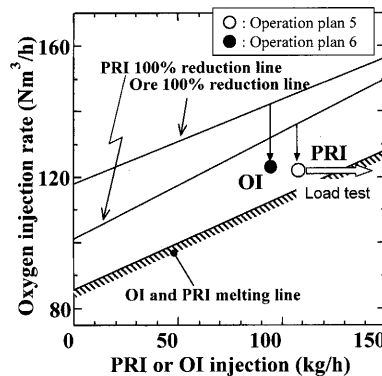


Fig. 14. Reduction degree and melting lines of powder iron sources in the raceway tip for oxygen and powder iron source injection rates (calculated by 1-dimensional raceway model).

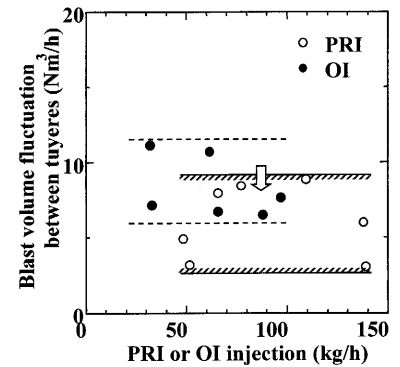


Fig. 15. Blast fluctuation in OI and PRI injection (observed).

(3) HBI使用効果の速度論的解析

試験高炉のHBI使用効果を定量的評価し、最終的に実高炉のHBI使用効果を推定するため、Fig.16に示す方法で総合シミュレータ<sup>9)</sup>を応用した速度論的解析を行った。解析前提を以下に示す。

- 解析系は、試験高炉の特徴から断面均一の高さ方向1次元系とする。
- 送風条件は、試験時の出銑(減風)、溶解(増風)の非定常性を考慮する。
- HBIと焼結鉱は、別々の鉄源として独立に扱う。
- 酸化鉄の還元速度には未反応核モデル<sup>9)</sup>を適用し、焼結鉱の場合はFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>→FeOの3段階の反応過程を考慮し、HBIの場合はFeO→Feの3段階目の反応のみを考慮した。
- 融着帯については、先に述べた高温荷重軟化試験より求めたHBI混合割合に応じたKS値の低下勾配を通気抵抗

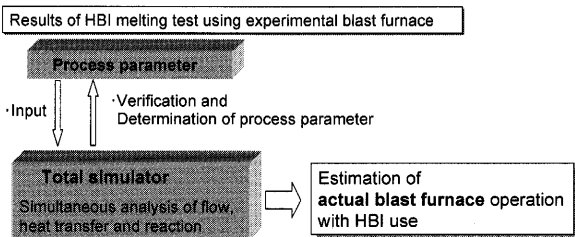


Fig. 16. Analysis method of the HBI use effect.

Table 7. Process parameters in the total simulator.

	Sinter (100%)	HBI (100%)
1) Particle diameter	1	2.7
2) Void ratio	1	0.86
3) Gas flow resistance coefficient in cohesive zone	3 (Commercial scale:20)	0
4) Rate constant of FeO-Fe on indirect reduction	1	1.5

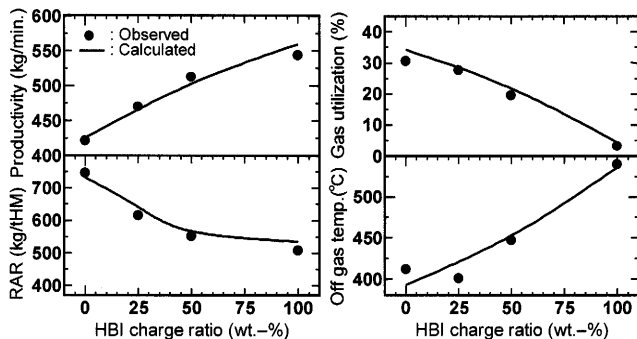


Fig. 17. Calculated results of experimental blast furnace operation.

に反映させた。

- 塊状帯については、冷間ガス流れ基礎実験により求めた HBI 混合割合に応じた空隙率を設定した。

解析方法は、まず、HBI 0% (焼結鉱 100% 使用) と HBI 100% 使用試験の 2 ケースの操業解析を行い、プロセス定数を同定した。Table 7 に焼結鉱と HBI のプロセス定数の比較を示す。この時、焼結鉱の FeO→Fe の速度定数は従来と同じく<sup>5)</sup>、実験値の 1/10 に下方修正した。HBI の場合、その速度定数は焼結鉱 100% 使用の場合の 1.5 倍とした。次に、その定数を用いて HBI 使用量変更時の操業成績を予測解析した。Fig.17 に試験高炉操業の実績諸元と計算値との比較を示す。図に示すように、計算結果は HBI 混合率増加による増産と還元材比低減、及びガス利用率低下をほぼ説明できる。HBI 使用率増加に伴う炉頂ガス温度の上昇は、HBI 使用増による鉄源の比表面積低下が原因と考えられる。尚、図中の実績還元材比は、非正常操業 (出鉄時の減風) による熱補償コークスを考慮している。以上の解析方法により、スケールアップ解析の準備が整った。次章では本解析方法を用いて実高炉シミュレーションを行う。

(4) HBI 使用時の炉内状態の推察

Fig.18 に HBI 使用時の炉壁部高さ方向の静圧分布を示す。図に示すように、HBI の多量使用により塊状帯ならび

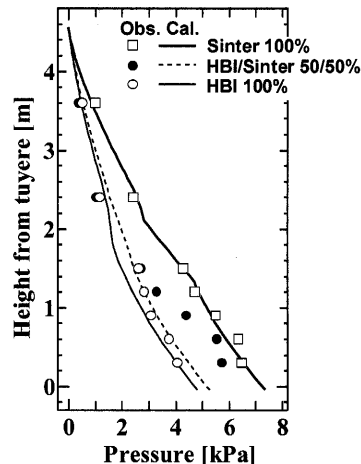


Fig. 18. Static pressure distribution of experimental blast furnace.

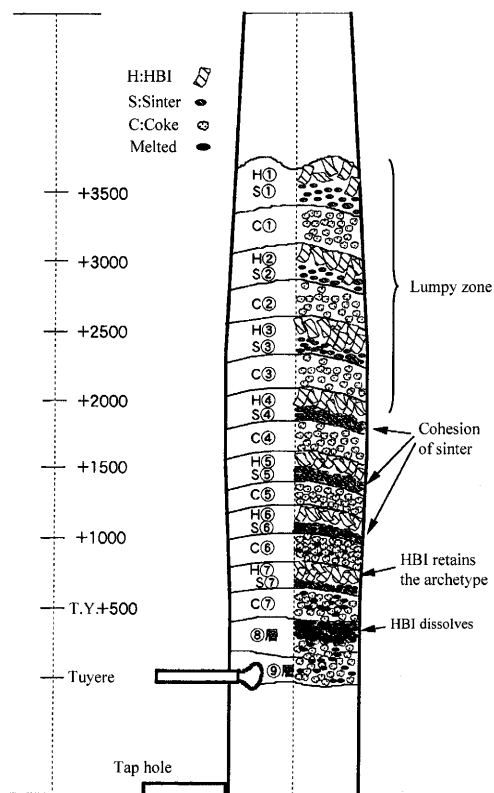


Fig. 19. Distribution of burdens after dissection in experimental blast furnace.

に先に示した高温荷重軟化試験の結果通り、融着帯での通気抵抗は大幅に改善する。次に、HBI 混合率 25% の条件で操業を停止した後の解体調査結果に基づいて HBI の溶解挙動について考察する。Fig.19 にその解体調査結果を示す。焼結鉱の融着開始レベルにおいて、HBI 粒子は若干の亀裂及び変形が認められるものの、溶解の形跡はなくほぼ原形を留めている。また、炉内サンプラーにより計測した羽口上 0.7m までの採取物中のメタル溶融物の割合は、HBI よりも焼結鉱のほうが多いことから、試験高炉内の HBI 粒子の溶解レベルは、焼結鉱よりも低かったと考えられる。羽



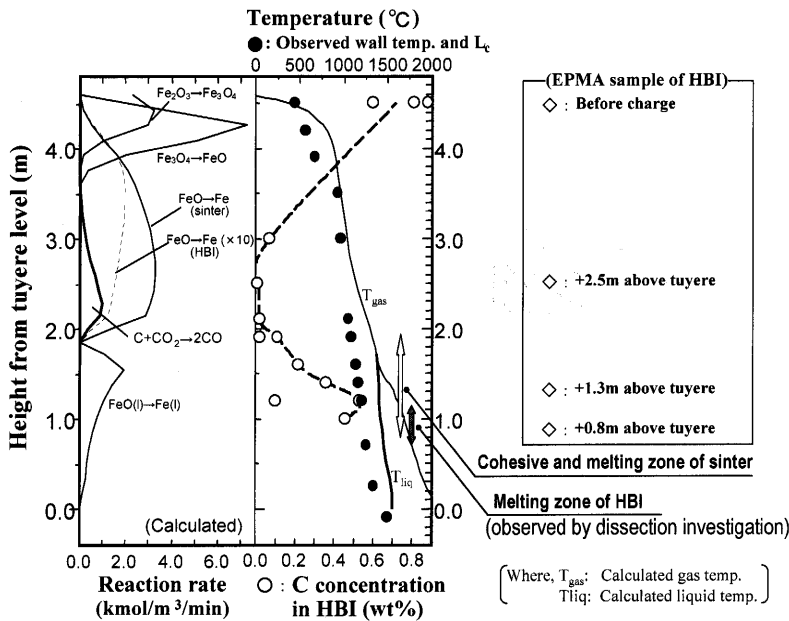


Fig. 20. Estimation of in-furnace behavior of HBI by in-furnace sampling, dissection investigation and calculation.

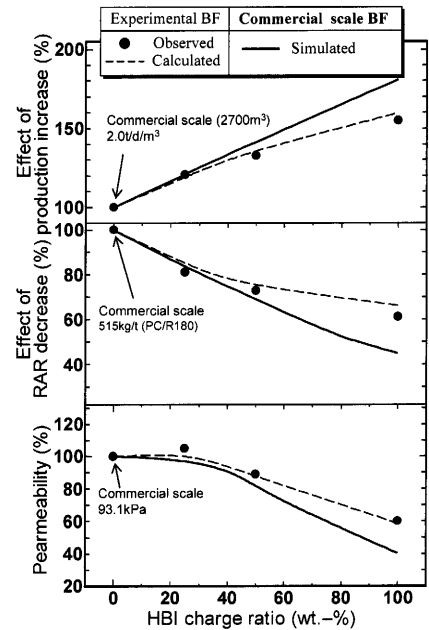


Fig. 22. Estimation of HBI use effect in actual blast furnace (simulated).

口上0.7m付近では、原型を留めたHBI粒子が存在しないことから、HBIは焼結鉱の融着帯レベル下端付近（炉内温度約1400°C）の羽口上0.6~1.1mのレベルにおいて、基礎実験と同様に融着層を形成することなく速やかに溶解したものと推定される。Fig.20は、操業中の炉内サンプラー及び解体調査から、HBI粒子中のC分布を炉内高さ方向分布で示したものである。装入時のHBI含有Cは0.88wt%であるが、炉内の昇温過程において1000~1200°Cの温度領域で脱炭している様子がうかがえる。これは、実測炉内温度と計算結果から推察するとHBI含有CがCO<sub>2</sub>ガスとの反応によりガス化していることを示唆するものである。更に、この事実はFeO→Feの間接還元速度定数を焼結鉱の1.5倍に上方修正した事にも対応する。すなわち、HBIに内装されたCのガス化反応により、FeO間接還元が促進されたものと解釈できる。一方、コークスのガス化反応が沈静化する1200°C以上の高温還元雰囲気では図に示すように、C濃度は逆に増加する傾向にあり、加炭が進行している。Fig.21は、解体調査及び操業中の炉内サンプリングにおいて得られた炉内で形状を保った未熔融のHBI粒子のC存在分布をEPMAにより測定したものである（赤：C濃度大、青：C濃度小）。装入前の粒子には、粒子表面にCが分布している。羽口上2.5mでは、分析結果と同様に一旦、C濃度は低下しているが、羽口上1.3mでは、表面および断面の亀裂部にCが存在しており、羽口上0.8mレベルでは、明らかに、粒子表面へのC吸着と亀裂から粒内部へのC拡散が進行している様子が窺える。上述のHBI溶解位置の推定も考慮すれば、HBI溶解速度は加炭によるHBIの融点低下よりも、寧ろ粒内伝熱抵抗で律速されている可能性がある。Table 8は、今回の解体調査により判定した溶け落ち開

Table 8. Melting start temperature of HBI and sinter.

		Softening-melting test [Assumption of permeability in commercial BF]			Experimental BF [Estimated]	
	Size	Softening	Melting	Load	Melting	Load
HBI	10-15 mm	1200°C	1280°C	98kPa	1400°C (30 - 100 mm)	9.8kPa
	25-30 mm	1320°C	1478°C			
Sinter	10-15 mm	1100°C	1490°C		1400°C (10 - 25 mm)	

始温度と前述の還元鉄の荷重軟化試験の結果とを比較したものである。HBIの溶け落ち温度がHBI粒径サイズに依存するとしても、その高温通気性が焼結鉱に比べて格段に良いことから、実炉使用においてもHBIが融着帯での通気を阻害する恐れはないものと推定される。

#### 4. 実高炉におけるHBI使用効果の推定

第3章で述べたHBIの使用評価試験の結果を踏まえ、実高炉におけるHBI使用効果をモデルシミュレーションにより推定した。HBIの基本物性は試験高炉と同一とし、出銑比2.0t/dm<sup>3</sup>、還元材比515kg/tで、PC比は180kg/tで操業している高炉にHBIを使用することを想定した。計算結果をFig.22に示す。試験高炉に比べて相対的に炉の表面積が減少するため、必然的に炉体熱損失が減少する効果と排ガス温度の低下により、生産性と還元材比は試験高炉よりも向上すると推定された。通気性については、試験高炉と同等の改善効果と推定されたが、分布操作により更なる通気性向上が期待できると考えられる。Fig.23には、解析で得られた断面平均の高さ方向の温度分布を示す。第1章の熱交換簡略モデルで試算したようにHBI使用比率を増加させると、シャフト上部の熱流比が上昇するものの、シャフト

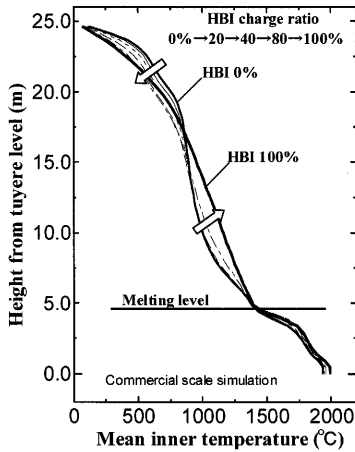


Fig. 23. Estimation of temperature profile in actual furnace. (Simulated)

Table 9. Examples of 100% steel scrap melting test using small blast furnace.<sup>8)</sup>

		Sacilor	Maxhutte
Inner volume	m <sup>3</sup>	816	—
Scrap	kg/t	1133	1074
Iron content	%	82.9	88.4
Fluxes	kg/t	122	128
<b>RAR</b>	<b>kg/t</b>	<b>222</b>	<b>242</b>
Blast temp.	°C	1062	940
Top gas temp.	°C	100	159
Slag	kg/t	158	124
HMT	°C	1376	1432
[C]	%	4.02	4.098
[Si]	%	0.485	0.63

中部は逆に熱流比が低下するため、還元鉄と共存する焼結鉱の間接還元速度が低下する懸念はないものと推定された。実高炉におけるHBI使用時の増産効果は、試験高炉のHBI 10%装入で+5.9%に対し、実高炉では+8.1%の増産、還元材比低減効果は同HBI装入比率で試験高炉が-4.8%、実高炉では-6.3%の低減が期待できると推定された。還元鉄の高炉での部分使用の実例としては、新日鐵の名古屋1高炉において還元鉄(DRI)の100kg/t使用試験を実施しており、生産性向上と還元材比低減効果が確認されている<sup>7)</sup>。還元鉄の鉄品位の差異、操業条件を考慮する必要はあるが、実高炉の増産効果は、還元鉄100kg/t当たり+7.4%の増産と報告されている。本解析結果では、還元鉄100kg/t換算で+7.7%で実績報告と整合する。一方、還元材比の報告値は還元鉄100kg/t当たり-31kg/tで、本解析結果-31kg/tと一致する。北米高炉ではコークス使用量の低減ならびに出銑量確保を目的に従来から、スクラップを主体としたメタリック鉄源が100kg/t程度使用されている。また、IRSIDでは内容積816m<sup>3</sup>の小型高炉を用いて、100%鋼屑を使用したスクラップ溶解試験<sup>8)</sup>が実施されている。その操業結果をTable 9に示す。表に示すように、100%メタリック操業では還元材比は222~242kg/tと報告されている。Fig.24には、本解析による還元鉄使用効果に及ぼす金属化率の影響を推定した結果である。この時、還元鉄のスラグ分の重量分率は7.1%で一定とした。また、基準操業の条件は先ほど示したFig.22と同じである。図に示すように還元鉄使用効果は金属化率に大きく左右される。図中には示していないが、T.Fe 91.4%で金属化率100%の鉄源を100%使用した場合、還元材比は228kg/t、炉頂温度は200°Cと推定された。この結果は小型高炉の報告と一致する。以上示した通り、実績報告との照合によれば、還元鉄の実炉使用効果に関する本解析値は妥当なものと判断できる。Fig.24の結果から、HBI装入による高炉増産効果は、

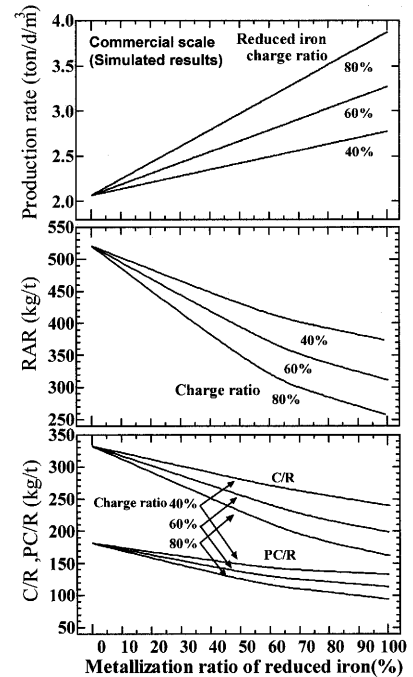


Fig. 24. Effect of metallization ratio on HBI use effect. (simulated)

HBI成分を金属化率74.5~94.4%, T.Fe 86.7~91.4%, HBI中のスラグ重量分率7.1%と仮定した場合、HBI 10%装入当たり、増産効果+7.6~+10.3%、還元材比低減効果-6.3~7.6%と推定される。

### 5. 結言

HBIの溶解挙動を把握するため、試験高炉操業ならびに実高炉シミュレーションを実施した。その結果、HBIは高温性状が極めて良好な鉄源であり、高炉に多量使用すれば、通気を維持しつつ、増産および還元材比低減に大きく寄与することが示された。HBIの実高炉使用時の増産及び還元材比低減効果はHBI成分(金属化率84.5%, T.Fe 89%, Slag 7.1%)の場合、HBI 10%装入当たり、増産効果+9%、還元材比低減効果-7%と推定される。

### 文 献

- 1) A.Rist and G.Bonnivard: *Rev. Met.*, **60** (1963), 23.
- 2) H.Ayukawa, T.Nakayama, T.Abe, S.Matsuzaki, S.Nomura, M.Naito and Y.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1040.
- 3) K.Mochizuki, T.Murai, Y.Kawaguchi and Y.Iwanaga: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 1855.
- 4) C.Yamagata *et al.*: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 84.
- 5) K.Takatani, T.Inada and Y.Ujisawa: *ISIJ International*, **39** (1999), 15.
- 6) R.H.Spitzer, F.Manning and W.O.Philbrok: *Trans. Metall. Soc. AIME*, **236** (1966), 1715.
- 7) T.Oonuma *et al.*: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 207.
- 8) J.-P.Briat *et al.*: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1024.