

石炭ベース還元鉄HBI製造技術とその高炉使用

田中 英年*・原田 孝夫*²

HBI Production through Coal-based Direct Reduction and Its Application in Blast Furnace

Hidetoshi TANAKA and Takao HARADA

Synopsis : In order to reduce CO₂ emission and cope with the shortage of agglomerated ore due to the use of low-grade iron ore for a sintering process, which are key issues in the ironmaking field, it was proved that direct reduced iron can be manufactured using comparatively cheap fine iron ore and coal, or steel mill waste as the raw material. By using coal-based direct reduced iron, hot briquetted iron (HBI) which has sufficient strength for blast furnace use was manufactured in the demonstration plant. The use of this HBI in the blast furnace could contribute to reduce CO₂ emission and dealing with the shortage of agglomerated ore.

Key words: FASTMET; RHF; agglomeration; direct reduction; ironmaking; coal; composite material; iron ore; physical property; environmental control.

1. 緒言

今後の製鉄分野においては、CO₂排出削減および高炉用の良質な資源の枯渇への対応策が強く求められている。特に地球温暖化の観点からCO₂排出量の抑制は喫緊の課題であり、日本における年間CO₂総排出量の15~20wt%を占める鉄鋼業での抑制が強く求められている。また鉄鋼各社では銑鉄コストの低減と、将来の良質なヘマタイト鉱石の枯渇への対応を目的として、豪州高結晶水鉱石の使用量をこの数年間で大幅に増加させてきたが、これに伴い焼結における歩留や生産性の低下などの問題が顕在化している¹⁻²⁾。

この様な背景の中、比較的安価な粉鉱石と一般炭を原料に還元鉄を製造し、これを高炉原料として利用することで、高炉でのCO₂削減および塊成鉱不足を解決できることに着目した。石炭ベース還元鉄製造法としては回転炉床炉(RHF)を用いた方法が考えられるが、高炉使用に際しては、

- 1) 製造した還元鉄が高炉使用に耐えられる強度を有するか。
- 2) 石炭ベースでありながら、高炉使用でCO₂がどれだけ低減できるのか。

といった問題点が上げられる。

そこで本研究では、50t/dのFASTMET[®]実証プラントを用いた還元鉄の製造、ホットブリケットマシンによるホットブリケットアイアン(HBI)の製造およびHBIの高炉使用におけるCO₂削減効果について検討した。

2. 実験方法

実験は神戸製鋼加古川製鉄所内に設置した直径8.5mの回転炉床炉と直径1mのホットブリケットマシンを用いた。Fig. 1にその外観写真を、Table 1に基本的な仕様を示す。

Table 1. Specification of pilot plant.

RHF	Hearth diameter	8.5m
	Hearth width	1.25m
	Burner	4 burners
	Burner Fuel	COG+LPG
	Off-gas treatment	Mist cooling Heat exchanger Venturi scrubber
Hot Briquette Machine	Roller diameter	1.0m
	Allowable feed temp.	800°C
	Motor power	200kw

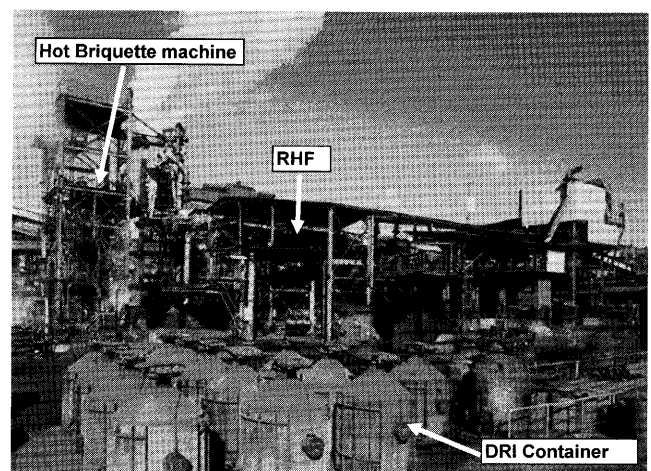


Fig. 1. View of Kakogawa pilot plant.

平成18年4月28日受付 平成18年7月7日受理 (Received on Apr. 28, 2006; Accepted on July 7, 2006)

* (株) 神戸製鋼所新鉄源プロジェクト本部 (Iron Unit Division, Kobe Steel, Ltd., 9-12 Kita-Shinagawa 5-chome Shinagawa-ku Tokyo 141-8688)

*² (株) 神戸製鋼所新鉄源プロジェクト本部技術センター還元技術部 (Reduction Technology Department, Technology Center, Iron Unit Division, Kobe Steel, Ltd.)

Table 2. Chemical and physical analysis of iron ore and coal.

Iron Ore	Chemical Analysis (wt%)							Size (wt%)
	TFe	Fe3O4	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	LOI	-74 μm
	68.8	95.11	2.06	0.57	0.55	0.44	0.71	88%
Coal	Proximate Analysis(wt%)			Ultimate Analysis (wt%)				Size (wt%)
	Ash	VM	FC	S	C	H	O	-74 μm
	9.5	18.6	71.9	0.21	81.2	4.3	4	80%

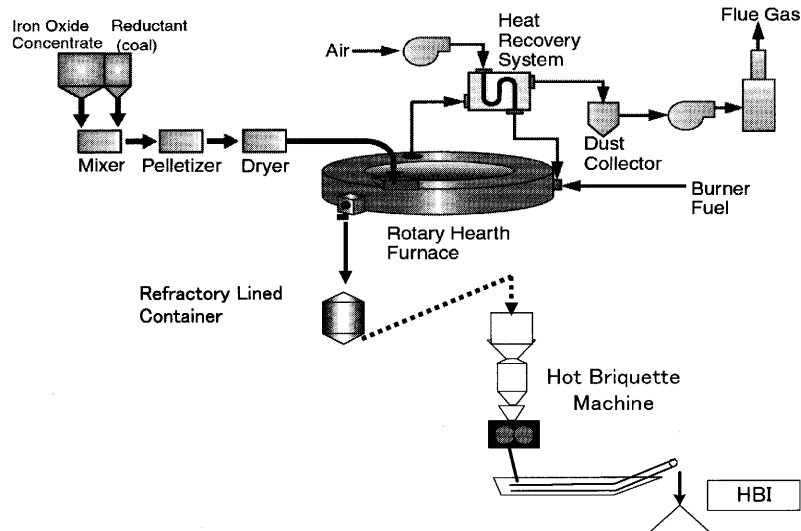


Fig. 2. Schematic chart of process flow.

Table 3. Physical property of green pellet and dry pellet.

Green Pellet	Dry Pellet		
Moisture content(wt%)	Moisture content(wt%)	Drop * Strength(times)	Pellet Size (mm)
11.4	0.2	14.4	19.1

*Drop Strength: To drop one agglomerate on the steel plate from 450mm height and to count the dropping number without collapse. (Do not count the drop at collapse.)

実験試料として、ここでは Table 2 に示したマグネタイト鉱石と瀝青炭を使用した。Fig. 2 に製造プロセスフロー図を示す。配合は鉄鉱石 80 wt% に石炭 20 wt%、有機バインダーを外数で 1.5 wt% 添加した。ミキサーでの原料混合後、直径 3.0 m のパン型造粒機を用いて炭材内装ペレットを製造し、約 170°C のバンド型乾燥機で連続的に乾燥した。Table 3 に生ペレットおよび乾燥ペレットの物性値を示す。この乾燥ペレットを連続的に RHF に装入し、還元を行った。製品の還元鉄を熱間でコンテナに受けて 2 回に分けてクレーンで持ち上げ、約 2.5 t の熱間還元鉄からバッチにて HBI を製造した。Table 4 に RHF での還元条件およびホットブリケットマシンの製造条件を示す。

製造された HBI の物性としては見掛比重、吸水率、気孔率、真比重の他に落下強度の測定を行なった。落下強度試験条件は天然ガスベース HBI と同様に、HBI を船等で海外に輸送することを想定して 10 個の HBI を 10 m の高さから 5 回、厚さ 12 mm の鉄板上に落下させた後、+38.1 mm と -6.35 mm の重量比率を測定した。ダストから製造した HBI の場合には、所内使用で長距離輸送の必要がなく粉化

Table 4. RHF & Hot Briquette Machine operation condition.

RHF	RHF feed rate. (t/h)	RHF ave. temp. (°C)	Retention time (min.)	RHF diff. pressure (Pa)
		3.0	1,350	7.0-9.0
Hot Briquette Machine	Feed material temp. (°C)	Feeder speed (rpm)	Roll pressure (MPa)	Roll torque (N-m)
	658	86	16.5	378

の機会も少ないので、10 個の HBI を 5 m 高さから 3 回、厚さ 12 mm の鉄板上に落下させて測定した。

石炭ベース DRI をブリケット化せずに直接使用する場合の輸送・貯蔵時の問題点を明確にするため耐候性試験を実施した。比較試料には石炭ベース HBI と天然ガスベース DRI を用いた。各試料約 5 kg をプラスチック製籠に入れ屋外（相対湿度 71.7%、平均温度 7.2°C、月平均雨量 44 mm の条件）に放置し、14 日間毎に少量の試料を採取して、その化学分析値から再酸化度合いを調査した。

3. 実験結果

3.1 RHF での還元挙動

製造した還元鉄の代表的な組成や物理性状をガスベース還元鉄の性状と比較して Table 5 に示す。化学成分においては石炭を還元剤に使用するため、ガスベース還元鉄に比

べてカーボン含有量，脈石分および硫黄の値が高くなる。また物理性状では還元途中に内装した石炭がガス化して抜けるため気孔率が高く強度も低いものになる。

Fig. 3には同時にサンプルした50個の還元鉄ペレットの個々の粒径と圧潰強度をプロットした。16mmから20mmの粒径の範囲で20kg/pから60kg/pの幅で変動している。一般に実験室の電気加熱炉等で製造した石炭ベース還元鉄は加熱が均質であるため，均質な還元鉄が製造できるが，工業的なRHFでは炉内でのバーナの配置やペレットの重なり等で熱の受け方が不均一になり，このような品質のバラツキを生じることがわかった。従い還元鉄を高炉で使用するためには強度アップのためにHBI化が必要である。

Fig. 4には金属化率と生産性の相関を示す。バラツキは大きいものの金属化率を上げるほど生産性が若干低下する傾向が見られる。金属化率90%程度を達成できる生産性

は最大で100kg/m²/hであることが確認できた。この実証プラントではこれらの鉄鉱石や石炭を用いて金属化率90%以上の還元鉄を1ヶ月以上に亘って安定的に生産できることが別途報告されている³⁾。

3.2 石炭ベース還元鉄のHBI特性

天然ガスベース還元鉄についてはすでにHBIプラントが商業化され，HBIが商品として世界中に流通している。しかし，石炭ベース還元鉄をHBI化しているのは米国SDI社のIDIプラントの例があるものの，その詳細は報告されていない。石炭ベース還元鉄の場合，その金属化率が比較的 low，カーボン含有量も多い特長を持っていることから，十分な強度を有したHBIが製造できるか疑問視されてきた。そこで今回石炭ベース還元鉄からHBIを製造し，その強度を測定した。製造したHBIの圧潰強度はいずれも1t/HBI以上の高強度を示すため，天然ガスベースHBIの強度測定に用いられる落下強度試験法を用いてその強度を測定した。

Fig. 5にHBI落下強度とHBI中のカーボン含有量の相関を表した。石炭ベースHBIの落下強度はカーボン含有量3wt%位までは天然ガスベースHBIの落下強度基準(+38.1mm: 65wt%)以上で推移する。また-6mm粉も10wt%程度に収まっている。

Fig. 6にはHBI落下強度とHBI金属化率との相関を示すが，はっきりした相関は無く，比較的低い金属化率でも天然ガスベースHBI並みの落下強度が得られることが判った。

Table 6に鉄鉱石と石炭から製造した石炭ベースHBIの代表特性をまとめた。製品金属化率で84%，落下強度(+36mm分率)で90wt%，気孔率12vol%，見掛密度5.3t/m³程度の緻密なHBIの製造が確認できた。この値は天然ガスベースHBIの値に比べてそんな色なく，長距離輸送を行なったとしても粉の発生も少なく，バラツキのない均一な強度のHBIを高炉に供給できることが判った。

3.3 石炭ベースHBIの内部構造

製造したHBIの外観形状とその断面組織をFig. 7に示す。サイズは：110mm×50mm×30mm(厚さ)で体積は105

Table 5. Product quality of Coal-based DRI and Gas-based DRI.

Items	Coal base DRI	Gas base DRI
Metallization (%)	91.0	92.0
Total Fe (wt%)	85.8	92.7
Metallic Fe (wt%)	78.1	85.3
C (wt%)	3.0	1.1
S (wt%)	0.08	0.01
Gangue (wt%)	7.54	3.60
Comp. Strength (kg/p)	42.1	52.0
Porosity (vol%)	65.6	62.1

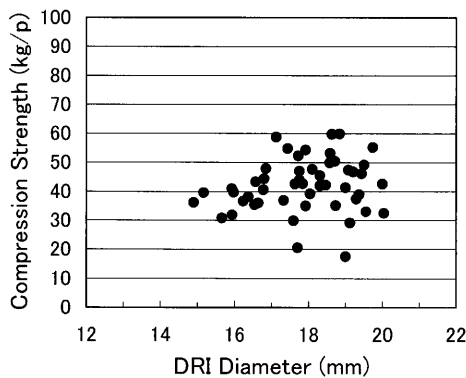


Fig. 3. Compression strength of individual DRI.

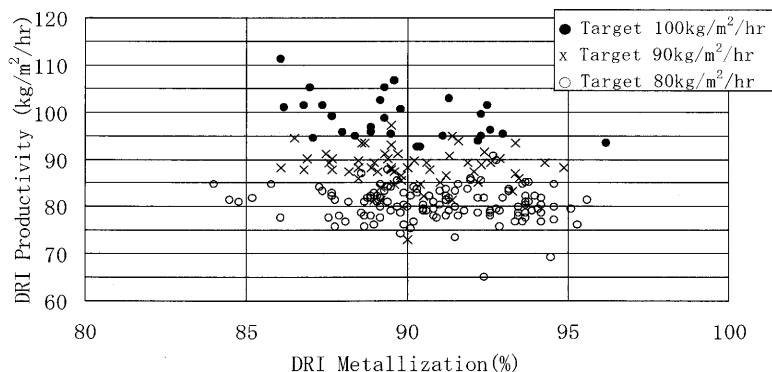


Fig. 4. Relation between DRI productivity and metallization.

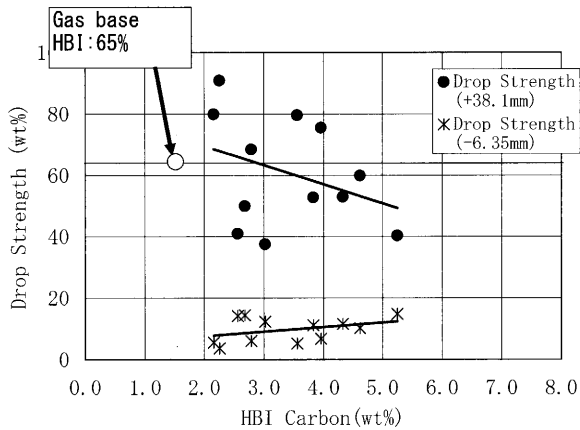


Fig. 5. Relation between HBI drop strength and carbon content.

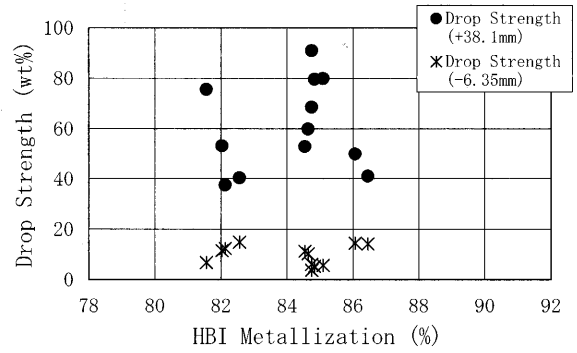


Fig. 6. Relation between HBI drop strength and metallization.

Table 6. HBI property from iron ore and coal.

Apparent density(t/m ³)	Absorbed moisture(wt%)	Porosity (vol%)	True density(t/m ³)	Drop strength	
				+38.1mm(wt%)	-6mm(wt%)
5.35	1.37	12.48	6.12	90.9	3.7
Chemical Composition (wt%)					Met. (%)
TFe	FeO	Met.Fe	T.C	Gangue	
85.5	15	71.8	1.85	8.41	84

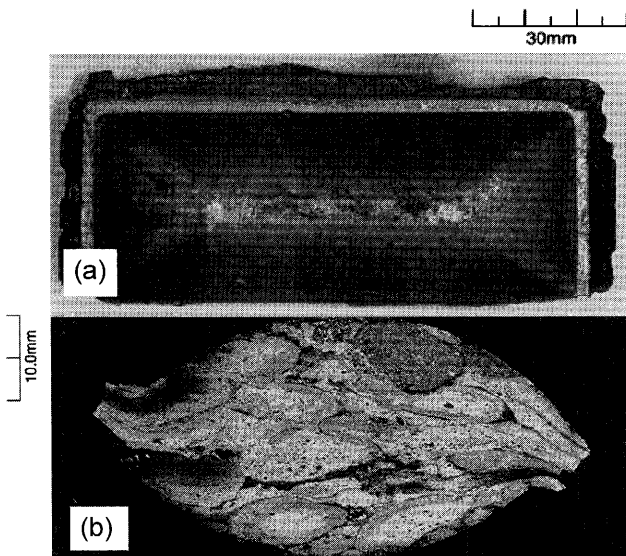


Fig. 7. External view (a) and macrostructure of cross section (b) of HBI.

mLである。見掛密度5.35t/m³を示したこのHBIは、先端部/後端部とも比較的良く成型されフィッシュマウス（先端部の開口）も形成されていない。またHBIの腹の部分も厚く、還元鉄が高圧力で押し込まれたものと思われる。断面をみると変形されたDRIの形を読み取ることができ、DRI個々の粒界面での接合状況がHBI強度を支配するものと考えられる。

天然ガスベースDRIの場合、カーボンがDRI表面に析出するため、カーボン量が多いとHBIを製造した場合に強度が低下するのに対して、石炭ベースDRIのカーボンはDRI内部に存在する残留カーボンであるため、HBI強度への悪

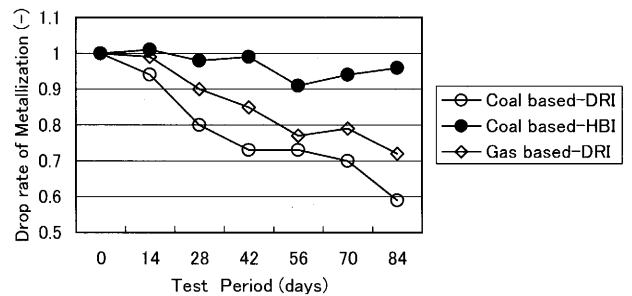


Fig. 8. Reoxidization under atmospheric condition.

影響が少なかったと考えられる。なお、断面マクロ組織の粒子界面が非常に黒っぽくなっているのはエッチングしてコントラストを付けているためである。

3.4 石炭ベースHBIの耐候性

Fig. 8に3ヶ月間の曝露テスト結果として、経過日数と金属化率の低下度合いの関係を示す。DRIの場合、石炭ベース・天然ガスベース共に金属化率の低下は著しく、84日間後では初期金属化率の6~7割までに低下している。一方HBIは金属化率の低下はほとんど見られず、84日間後でもわずか3%の減少に止まっている。還元鉄の耐候性は、特に海上輸送時の安全確保の点から重要であるが、このように石炭ベースDRIは、輸送や貯蔵時の再酸化やそれによる発熱発火の危険性があるが、HBI化することで気孔率が大幅に低下するため、この問題を回避できることがわかった。

3.5 製鉄所ダストから製造したHBIの特性

鉄鉱石と石炭の代わりに製鉄所ダストとそのダストに含まれているカーボンを用いて還元鉄を製造できることがすでに報告されている⁴⁾。製鉄ダストを原料として用いる

この利点は次の点が上げられる。

- 1) 鉄分を 50 wt% 以上含む鉄源が確保できる。
- 2) 高炉ダストのカーボンは一度高炉で CO₂ 発生カウントするので、これを還元剤として利用しても CO₂ 発生カウントされない。
- 3) 製鉄ダストは Cu, Sn と言った不純物を含まないピュアな鉄源である。
- 4) Zn, Pb, 等の重金属成分は RHF 炉内で揮発除去される。

この還元鉄を用いてこれまで同様 HBI の製造を行った。その物性値の測定結果を Table 7 に示す。製品金属化率で 80~85%, 落下強度 (+38.1 mm) で 85 wt%, 見掛密度 4.2 t/m³ 程度の HBI の製造が確認できた。その結果から強度的に自社内高炉使用に十分耐えられると考える。

4. 考察

4.1 石炭ベース HBI の高炉使用検討

製鉄プロセスの中では鉱石の還元時に最もエネルギーを消費するため、還元鉄の高炉使用が実現すればエネルギー削減に大きく寄与できる。また天然ガスのような H₂ 系ガスで製造した還元鉄の使用も CO₂ 削減の手段になる。天然ガスベース HBI の高炉での利用は世界中で広く実施されており、これまで下記のような経済効果が報告されている。

- 1) 塊成鉱の低減効果：焼成鉱不足の解消、高価な輸入ペレットの追い出しに有効である。

Table 7. HBI property from steel mill waste.

Metallization	%	80-85
Carbon	wt%	2-6
Density	t/m ³	4.2
Comp. Strength	t/HBI	5-7
Drop Strength	+38.1mm wt%	85
	6-38.1mm wt%	11
	-6.35mm wt%	4

- 2) コークス比低減効果：コークス不足の解消、高価な購入コークスの追い出しに有効である⁵⁾。
- 3) 増産効果：下工程に余力のある製鉄所あるいは高炉集約での恒久的増産。1基高炉巻替時の臨時増産に有効である。

最近では上記効果に加えて、焼結層に装入された HBI が骨材として働き通気性を改善するため大型高炉の炉況安定に役立つとの報告もある⁶⁾。この様に還元鉄 HBI の高炉使用ではコークス比の低減や焼成鉱代替の効果から CO₂ 削減効果も期待できる。

Fig. 9 に HBI 使用時の高炉操業変化をまとめた。このように HBI を高炉に投入することで、同等の鉄分相当の焼成鉱を減らすことができる（期待効果 1）。金属鉄装入効果として還元材比も減らすことが出来る（期待効果 2）と共に単位還元ガス量当たりの溶銑生産量が増えることから増産効果も期待できる（期待効果 3）。

しかしながら、天然ガスベース還元鉄については経済的な問題がその高炉での使用を妨げている。天然ガスベース還元鉄製造においてはシャフト炉を使用するため、近年値上がりの激しいペレットをその原料に使用する必要がある。そのため鉱石代だけで 100 \$/t-還元鉄を超える変動費になり、安価な天然ガスの産地に立地したとしても製造コストがかなり高くなってしまふことが問題である。

4.2 石炭ベース HBI 使用による CO₂ 低減効果

天然ガスベース HBI に比べて石炭ベース HBI は、TFe が低く金属鉄含有量も少ないと言った特長があるが、これらを考慮して高炉で使用した場合の CO₂ 削減効果について検討した。

高炉では還元熱と溶解熱を消費するがこの比率は 3:1 程度であり圧倒的に還元熱が大きい。すなわち、製銑工程で消費するエネルギーの 3/4 を占める還元熱を、海外で HBI の中に詰め込んで、エネルギーコンテナとして日本に輸送して利用することによる CO₂ 削減効果が期待できる。これ

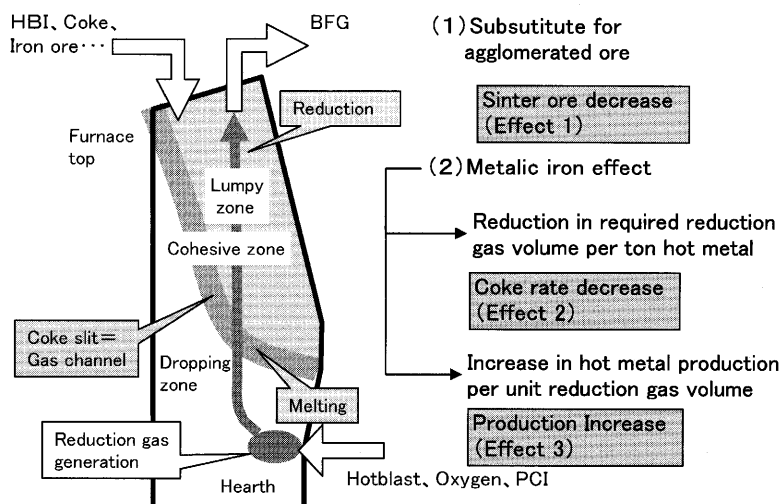


Fig. 9 BF operation change in using HBI.

はCO₂の国際排出権取引の概念で、わざわざエネルギー源である石炭を日本に運び、鉄鉱石を日本に輸送して日本の高炉で鉄鉄を作るより、重量の20wt%を占める酸素や鉱石によっては10wt%近くを含む結晶水を山元で除去した方が地球全体としてCO₂削減効果がある。

あるいは炭材として製鉄所ダストを利用することによるCO₂削減効果も考えられる。

そこで高炉における金属鉄1t当たりのCO₂削減効果を計算した。計算前提となるコークス比の低減量として-0.3t-coke/t-金属鉄との文献値⁷⁾を採用した。コークス比以外に高炉ガス(BFG)発生原単位も低下するが、この値は生産量増大で補填されると考えられるのでここでは考慮しなかった。石炭ベースHBIの金属鉄成分をここでは78wt% (TFe=85wt%)として、このコークス比の低減量をHBI効果に換算すると-0.234t-coke/t-HBIとなる。コークスのCO₂排出負荷は3.250kg-CO₂/kg-Cokeとするとの環境省令があるので⁸⁾、高炉でのCO₂発生量変化としては-0.76t-CO₂/t-HBIが期待できる。同様にダストHBIの場合の金属鉄成分を50wt% (TFe=58wt%)とすると-0.49t-

CO₂/t-HBIのCO₂発生量変化となる。ただし、すでにコークス比が十分に低い通気律速の高炉ではPC比を低下させることで同様のCO₂削減効果が得られる。一方、HBI製造や焼結製造と言った単体プロセスでのCO₂排出原単位はTable 8のように計算できる。ここで焼結の製造原単位についてはこれまでの報告資料を参考にした⁹⁾。

これらの値をもとに高炉でのHBI使用によるCO₂低減効果を計算するとTable 9のようになる。

すなわち、高炉に焼結とコークスを装入して溶鉄を製造するプロセスをベースとして考えると、

- 1) 鉄鉱石+石炭を用いて自社内でHBIを製造した場合は-0.02t/t-HBIとなり、ほとんどCO₂削減効果は期待できない。
- 2) ダスト中のカーボンを利用してHBIを製造した場合0.20t/t-HBIのCO₂削減が期待できる。ただし、亜鉛制約から製鉄所ダストを用いることによる装入亜鉛上昇を許容できない高炉では適用できない場合もある。
- 3) 海外でHBIを製造して日本に持ち込めば、1.02t/t-HBIのCO₂削減が期待できる。これは石炭ベースHBI製造

Table 8. CO₂ generation from unit process.

		Sinter Plant		Iron Ore HBI Plant		Dust HBI Plant	
Production Capacity (kt/year)		5,500		710		120	
CO ₂ generation		Unit Consumption	CO ₂ generation (t-CO ₂ /t-Sinter)	Unit Consumption	CO ₂ generation (t-CO ₂ /t-HBI)	Unit Consumption	CO ₂ generation (t-CO ₂ /t-HBI)
Coal	2.717 t-CO ₂ /t			382 kg/t-HBI	1.04	40 kg/t-HBI	0.11
Breeze	3.251 t-CO ₂ /t	46.3 kg/t-Sinter	0.15		0.00		
LPG(COG)	3.005 t-CO ₂ /t			1.59 GJ/t-HBI	0.10	4.19 GJ/t-HBI	0.25
Electricity	0.951 t-CO ₂ /MWh	31.9 kWh/t-Sinter	0.03	85 kWh/t-HBI	0.08	116 kWh/t-HBI	0.11
Recover Steam	0.278 t-CO ₂ /t	-36 kg/t-Sinter	-0.01	-776 kg/t-HBI	-0.22		
Total CO ₂ Generation/t-Product			0.17	1.00		0.47	
Total CO ₂ Generation/t-Fe			0.31	1.17		0.81	
Product TFe(%)		56		85		58	

*1: LPG : 50.232GJ/t

Table 9. Expected CO₂ reduction by using HBI in the BF.

Mine Site	Consuming Site	a	b	c	d
		CO ₂ Reduction at Sinter Plant (t-CO ₂ /t-HBI)	CO ₂ Generation at HBI Plant (t-CO ₂ /t-HBI)	CO ₂ Reduction at BF (t-CO ₂ /t-HBI)	Total CO ₂ Reduction (t-CO ₂ /t-HBI)
(Base Case)		Base	Base	Base	Base
(1)HBI Production in Consuming Site		-0.26 (=0.17*85/56)	1.00 (From Table8)	-0.76	-0.02 (=a+b+c)
(2)HBI Production from Mill waste		-0.18 (=0.17*58/56)	0.47 (From Table8)	-0.49	-0.20 (=a+b+c)
(3)HBI Production in Mine Site		-0.26 (=0.17*85/56)	0	-0.76	-1.02 (=a+b+c)

プラントでの最大生産能力である70万トン/年のHBI使用で約70万トン/年のCO₂削減が期待できることになる。

5. 結言

本研究では、FASTMET[®]実証プラントを用いた還元鉄・HBIの製造およびこれらの高炉使用におけるCO₂削減効果について検討し、以下の結果を得た。

(1) 石炭ベース還元鉄製造技術を用いて鉄鉱石と石炭から高金属化率の還元鉄が高い生産性で製造できることを実証した。

(2) この還元鉄を用いて天然ガスベースHBI同等の高強度HBIが製造できることを実証した。

(3) 還元鉄の圧潰強度バラツキや輸送・貯蔵上時の再酸化の問題から石炭ベース還元鉄の高炉使用にはHBI化が好ましい。

(4) 鉄鉱石と石炭の代わりに製鉄ダストを用いても高炉使用に耐えられるHBIが製造できることを実証した。

(5) 石炭ベースHBIを海外で製造する、あるいは製鉄所ダスト中のカーボンを利用してHBIを製造し高炉で使用することで、焼成鉱不足を補うと共にCO₂削減が期待できる。

文 献

- 1) K.Kuwano, K.Hanao, Y.Igawa, K.Honda and K.Ano: *CAMP-ISIJ*, Vol. 5 (1992), 145.
- 2) T.Matsuo, T.Yabata, K.Osuzu, G.Hoshino, K.Kawamoto and S.Noda: *CAMP-ISIJ*, 6 (1993), 64.
- 3) J.Jimbo, H.Tanaka, T.Sakaguchi and Y.Kuwata: *Kobelco Technol. Rev.*, No. 22 APR. (1999), 60.
- 4) H.Tanaka, T.Sugiyama, T.Harada and H.Sugitatsu: *CAMP-ISIJ*, 13 (2000), 984.
- 5) D.A.Kercsmar, Y.Yamauchi, W.Dibert and J.Kleather: *Proc. of the 53th Ironmaking Conf. of AIME*, (1994), 443.
- 6) T.Onuma, Y.Fujiwara, K.Kunitomo, Y.Takamoto and T.Nishimura: *CAMP-ISIJ*, 14 (2001), 207.
- 7) E.J.Ostrowski and R.L.Stephenson: *ISS of AIME*, (1980), 128.
- 8) 平成18年3月経済産業省, 環境省令第3号: 特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令
- 9) 吉永眞弓: 第116・117回 西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1987), 87.