

(技術資料)

HBI超多配合装入による高炉の低コークス比・低CO₂操業技術の開発

焼谷将大*¹・笠井昭人*¹ (工学博士)・坂本 充*¹・宮田健士朗*²・田川智史*³

Innovative Ultra Low Carbon Ironmaking Technology with Massive HBI Charging in Blast Furnaces

Masahiro YAKEYA・Dr. Akito KASAI・Mitsuru SAKAMOTO・Kenjiro MIYATA・Toshifumi TAGAWA

要旨

KOBELCOグループは中期経営計画の最重要課題の一つに、“カーボンニュートラルへの挑戦”を掲げている。生産プロセスにおけるCO₂削減に関し、2030年目標は“2013年度比で30~40%削減”であり、2050年ビジョンは“カーボンニュートラルへ挑戦し、達成を目指す”である。そこで、鉄鋼アルミ事業部門において最大のCO₂排出源である高炉のCO₂排出量を大幅削減すべく、加古川製鉄所第3高炉においてHBI (Hot Briquetted Iron) 超多配合装入によるCO₂削減技術の実証実験を実施した。技術課題は高炉下部の通気性悪化と炉熱変動の増大であり、実証実験時には当社独自の高炉操業技術を適用した。その結果、大型高炉でHBI=440 kg/THMの超多配合装入により還元材比=386 kg/THM、コークス比=230 kg/THMの世界最小水準を達成し、CO₂排出量の25%削減(2013年度比)に成功した。

Abstract

The KOBELCO Group has defined “challenges toward carbon neutrality” as a core priority in its medium-term business plan. As for CO₂ emission reduction in production, the Group's 2030 target is a 30 to 40% reduction compared with FY 2013, with a long-term vision to achieve carbon neutrality by 2050. To substantially cut CO₂ from blast furnaces—the largest emissions source in the Steel & Aluminum Business—Kobe Steel conducted a demonstration at Kakogawa Works' No. 3 blast furnace to evaluate CO₂ reduction technology by means of massive charging of hot briquetted iron (HBI). This trial addressed technical challenges such as deteriorated gas permeability in the lower part of blast furnace and increased heat fluctuations, which led to the application of Kobe Steel's proprietary blast-furnace operation technologies. The experiment achieved world-leading results for a large size blast furnace: reducing agent rate (RAR) of 386 kg/THM and coke rate of 230 kg/THM with HBI charging of 440 kg/THM, yielding a 25% reduction in CO₂ emissions compared with FY 2013.

検索用キーワード

製鉄, 高炉, CO₂排出量削減, HBI

まえがき = 近年、地球温暖化の一因であるCO₂ガスなどの温室効果ガスの削減は世界規模での重要課題となっている。2016年に発足したパリ協定において、CO₂排出量の削減目標が各国で制定された。日本は2021年4月に、2030年までに2013年度比でCO₂排出量の46%削減、2050年までにカーボンニュートラルの達成、を目標設定した。国内CO₂排出量の約15%を鉄鋼業が占めており、そのうち約7割は製鉄高炉工程である。そのため、製鉄高炉法でのCO₂排出量削減の早期実現が社会課題の解決に向けて極めて重要である。

これまで高炉でのCO₂排出量削減は、従来型装入原料である焼成鉄(焼結鉄、鉄鉄石ペレット)の品質改善や装入物分布制御(径方向のガス分配制御)による還元材比低減、および通気改善技術を活用した微粉炭(PC: Pulverized Coal)多量吹込みによるコークス比低減により進められてきた。しかし、これらの従来技術では高炉の還元材比・コークス比を大幅低減することは困難であり、CO₂削減効果は限定的であった。

日本国内では“グリーンイノベーション基金事業/製

鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト”が2021年度より発足し、新たな技術開発・プロセス開発が進行している。代表的な取り組み例として、Super COURSE50(外部水素を用いた高炉への水素吹込み)や、カーボンリサイクル高炉(高炉から発生するCO₂を水素と反応させてメタンに変換し、還元材として繰り返し利用)が挙げられる。これらの技術は従来技術よりも大幅な還元材比・コークス比低減を目指しており、将来的には高炉プロセスでのCO₂排出量の大幅削減に寄与することが期待されている¹⁾。

当社では多様な事業を営む企業としての特徴を活かし、エンジニアリング事業部門が保有する直接還元鉄HBI製造技術(MIDREX[®]プロセス)と鉄鋼アルミ事業部門が開発した独自の高炉操業技術[高炉へのHBI装入技術の深化、衝風制御技術、AIを活用した炉熱予測(AI操炉[®])、ペレット改質(KHP: Kobelco High-Performance Pellet)、ほか]を組み合わせて、加古川製鉄所第3高炉で出鉄比(=出鉄量(t/day)÷炉内容積(m³))の異なる条件下で二回のHBI超多配合テストを実施した。そ

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 製鉄開発部 *² 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 製鉄部 *³ 鉄鋼アルミ事業部門 事業戦略部

の結果、従来他社と同等のHBI装入量でより多くの還元材比・コークス比を低減可能な技術実証に成功し、2023年4~5月の第二回テストではHBI原単位 = 440 kg/THM (THM: Ton Hot Metal) の超多配合により大型高炉で世界最小水準である還元材比 = 386 kg/THM およびコークス比 = 230 kg/THM を達成したので報告する。

1. HBI超多配合時の課題

HBIは、鉄鉱石ペレットを天然ガスなどで還元して製造された直接還元鉄 (DRI: Direct Reduction Iron) をブリケット状に圧縮成型したものである。DRIは多孔質で酸化しやすく、輸送時に発火リスクがあるため近隣の電炉などでの使用に限られるが、HBIは緻密に固形化することで再酸化しにくく安全に海上輸送でき、遠方の高炉などでの使用が可能である²⁾。従来型高炉装入原料である焼結鉱・鉄鉱石ペレット・塊鉄石とHBIの物理化学性状を比較して表1に示す。HBIの特徴は、①還元されているため金属鉄含有率 (M.Fe) が高く、高炉内での還元が不要である (還元材使用量を低減できる) こと、②従来型高炉装入原料よりサイズが大きく、粒子一個当たりの重量が大きいこと、である。これらの特徴から考えられるHBI高炉使用時の炉内状況変化と作業課題を図1に示す。

①還元が不要なHBI超多配合時には還元材比の低下に伴いボッシュガス量 (羽口から送風する熱風と還元材が反応して生成するガス量) が低下し、熱流比 (= 装入物の熱容量 / 上昇ガスの熱容量) の上昇により鉄石の軟化溶解領域である融着帯 (CZ: Cohesive Zone) の高さ位置が低下する。その結果、炉下部コークスがレースウェイに向かって移動する領域であるコークスムービングゾーン (MCZ: Moving Coke Zone) が狭小化して炉下部ガス流れの周辺流化や、局所的なフラッディング (液体が滴下せず、滞留・逆流する現象) が生じ、炉下部の通気・通液性が悪化する。また、ボッシュガス量の減少は高炉内の円周方向への均一なガス分配を阻害し、スリップ (装入物の異常降下現象) のような装入物の荷下がり悪化にもつながる。さらに、ボッシュガス量の減少に伴いガス顕熱が低下し、溶銑 (ようせん) およびスラグへの着熱が不足し変動することで、炉熱変動の増大が懸念される。

②炉内還元ガスは、充てん層の空隙が大きい (通気抵抗の小さい) 領域を優先的に流れながら上昇する。局所

的には、サイズが大きいHBI表面近傍の空隙を上昇ガスが偏流する。したがって、HBI装入量が増加すると、還元ガスと従来型高炉装入原料との接触機会が低下することで、局所的な還元悪化が懸念される。

ここで、実高炉における還元鉄の装入実績として、日本製鉄 (株) の名古屋製鉄所第1高炉ではHBI 100 kg/THM 使用試験を実施し、生産性向上と還元材比低減効果を確認している³⁾。また、voestalpine AGのLinz製鉄所において、HBI 250 kg/THM 装入実績が報告されている⁴⁾。上記2社におけるM.Fe装入量と炭素削減量 (ΔC) の関係を図2に示す。図中の破線はRISTモデル⁵⁾でシャフト効率を一定として計算した ΔC である。M.Fe装入量が100 kg/THM程度の少量であれば、 ΔC はシャフト効率一定ライン (破線) に沿って低下している。100 kg/THMを超える装入量になると他社実績はその破線

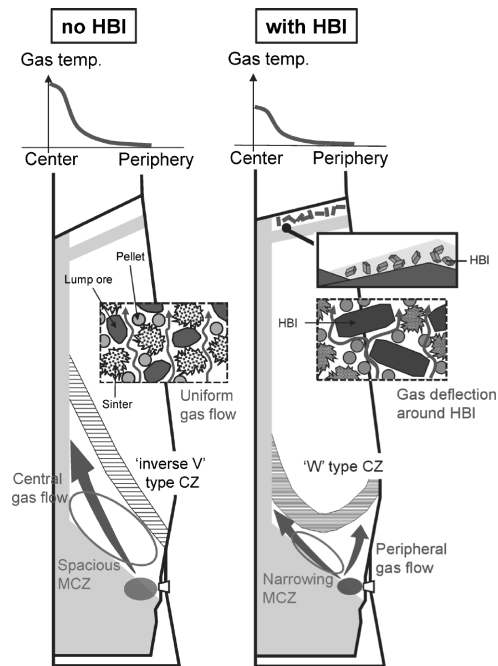


図1 HBI超多配合装入時の炉内状況変化と技術課題
Fig.1 In-furnace condition changes and technical issues with massive HBI charging

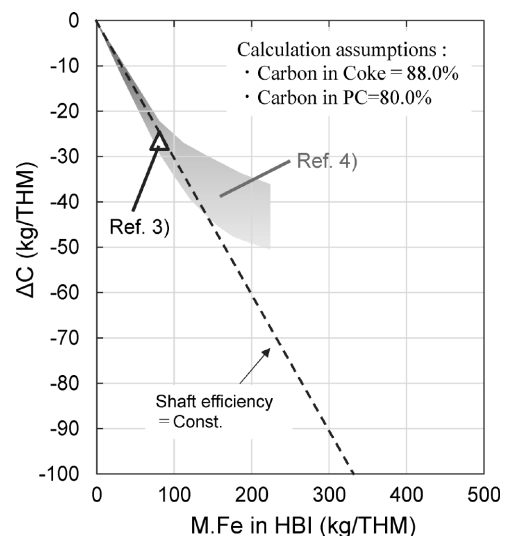


図2 M.Fe装入量と ΔC の関係 (他社実績)
Fig.2 Relationship between M.Fe charged and ΔC

表1 従来型高炉装入原料とHBIの物理化学性状
Table 1 Physical and chemical properties of conventional burden materials and HBI

	Sintered ore	Iron ore pellet	Lump ore	HBI
Size	mm 3-40	φ12	10-30	100×40×30
Apparent Density	t/m ³ 3.3	4.2	4.0	5.0-5.5
T.Fe	% 56.2	62.2	62.3	90-94
M.Fe	% -	-	-	83-89

からかい離し、所定のM.Fe装入量でのC削減効果が縮小している。

以上より、従来他社実績を上回るHBI増配とC削減効果向上に向けた主要な技術課題を、1) 炉下部通気性の悪化、2) 炉熱変動の増大、およびそれらに伴う3) 還元材比（コークス比）低減効果の縮小、の三つと設定した。

2. コークス比（還元材比）低減効果の最大化に向けた高炉操業技術

1章で述べた三つの技術課題に対し、図3に示す四つの技術（①装入物分布制御、②鉄鉱石ペレット改質（KHP）、③AI操炉[®]、④衝風制御技術）を開発し、実機高炉に適用した。本稿では、四つの技術のうち①と②は2.1節および2.2節で詳述し、③および④は概要のみ以下に示す。

③AI操炉[®]の構成モニタの一つである炉熱予測モタ^{6),7)}は、AIを活用してHBI超多配合装入時の5時間先の溶銑温度（HMT：Hot Metal Temperature）を予測するシステムで、炉熱安定に寄与する技術である。

また、④衝風制御技術は、HBI超多配合に伴う低ガス量操業時に送風量・酸素富化量・窒素富化量および送風温度・送風湿度を調整し、ボッシュガス量・レースウェイ温度・PC燃焼率などを適正範囲に制御する技術で、HBI超多配合時の炉熱・通気性・荷下がり安定に寄与する技術である。

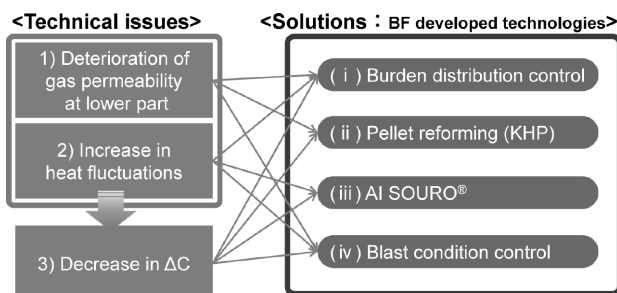


図3 HBI増配時の技術課題に対する開発技術

Fig.3 Technical issues and developed technologies with massive HBI charging in BF

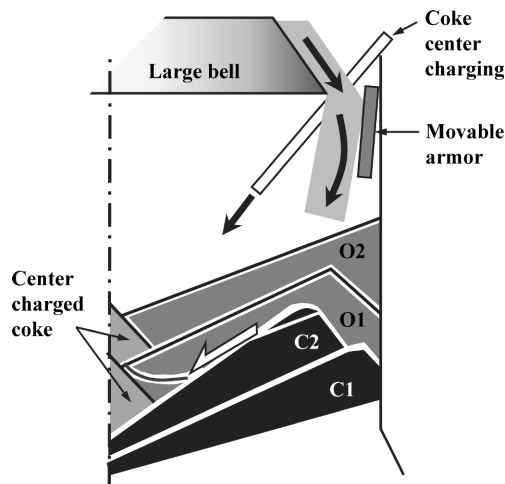


図4 ベル・アーマー高炉での装入物分布制御

Fig.4 Burden distribution control at bell-armor type blast furnace

2.1 装入物分布制御とHBI装入技術

(1) ベル・アーマー方式での装入物分布制御

高炉の安定操業には、強固な中心ガス流を維持し、融着帯形状を逆V型に制御することが重要である。当社高炉の原料装入方式はベル・アーマー方式（4バッチ装入；C1↓C2↓O1↓O2↓）である。上記安定操業に向けた装入物分布制御方法を図4に示す。周辺部から中間部の鉱石とコークスの層厚比 l_o/l_c （ l_o ：鉱石層厚、 l_c ：コークス層厚）調整にはC2アーマーとO1アーマーを組み合わせる。C2アーマーの押し出しによってC2堆積層のりょう線（ピーク）を炉内側に形成し、つぎのO1アーマーの押し出しによって装入したO1層でC2ピーク部を削り取ることで中心近傍から中間部へコークスを堆積させ、C2ピーク部の局所的なガス流を均等化する。また、周辺部の分布調整にはC1アーマー制御を実施する⁸⁾。

さらに、塊コークスの一部を装入シュートから高炉中心部へ装入し、中心部の l_o/l_c を直接制御する“コークス中心装入（CCC：Coke Center Charge）”を実施している⁹⁾。

(2) ベル・アーマー方式でのHBI偏析挙動

HBIは表1に示したように従来型高炉装入原料である焼結鉱や鉄鉱石ペレットに比べてサイズ・重量が大きく、装入時の堆積・偏析挙動が異なると想定される。HBIが周辺部に偏析した場合、炉内ガスが周辺流化し、融着帯がW型化して通気変動を誘発するとともに、炉下部熱損失の増大が懸念される。この対策として、HBIを高炉の周辺部でなく中間部から中心近傍へ堆積させ、高い位置で熔融させることができれば、コークススムービングゾーンが広がり、炉下部の通気通液性を適正に維持できると考えた。

そこで、装入コンベアから炉内までのHBIの堆積・偏析挙動の把握を目的に、二次元冷間模型を用いて装入物分布実験を実施した。実験装置は加古川製鉄所第3高炉の約1/10スケールの透明アクリル製スライス模型であり、原料の装入・堆積挙動を観察可能である。試料は実機の約1/5スケールの焼結鉱（2.8～4.0 mm）とHBIを模擬した鉄板（20 mm×7 mm×4 mm）である。装入コンベア上で焼結鉱の上に模擬HBIを同等長さで積み付け、搬送・装入途中の（a）上ベルカップ、（b）下ベルカップ、（c）炉内で試料を採取し、焼結鉱と模擬HBIの存在重量比率を測定した。

実験結果を図5に示す。（a）上ベルカップ内ではHBIは最上部にほとんど存在していない。これは、焼結鉱より大きなHBIは固定ホッパーの側壁部に堆積し難く、側壁部に多く存在する焼結鉱がファンネルフローで最後に上ベルカップへ排出されるためと推察される。（b）下ベルカップ内ではHBIは最下部と最上部にほとんど存在していない。最下部に存在しない理由は上ベル降下に伴い小さな焼結鉱が先行排出されるためであり、最上部については（a）と同様の理由である。（c）炉内では、HBIは高炉の中間部から中心近傍に多く堆積し、炉壁部への堆積は少ない。これは、一粒当たりの重量が大きく

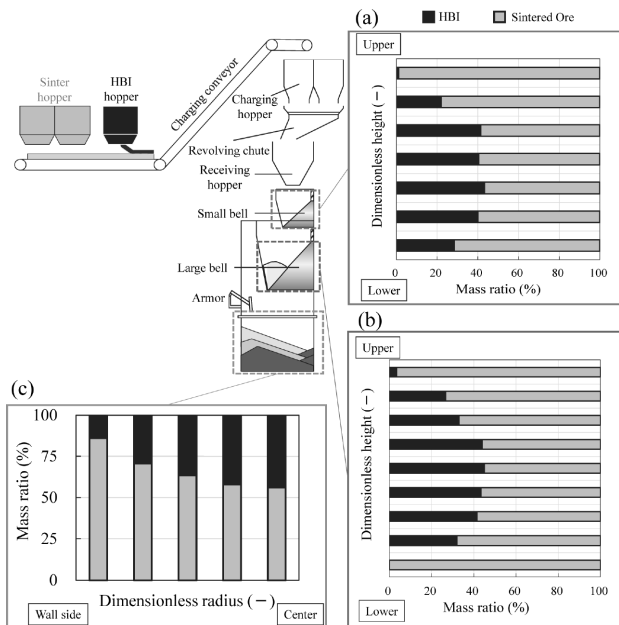


図5 装入物分布実験におけるHBIの偏析挙動

Fig.5 HBI segregation results in burden distribution experiments

扁平形状であるHBIが装入・堆積過程で焼結鉱と分離し、焼結層上部を転がることなく中間部から中心近傍へ流入するためである。

以上のラボ実験より、バル・アーモア高炉でのHBIの偏析特性を把握できたので、実機適用時は炉内のガス分配到に注視しながら装入物分布調整を実施した。

(3) HBI中心装入技術

高炉中心部ではコークス中心装入を実施して強固な中心ガス流を指向しているが、炉頂部での中心ガス温度が高く、持ち出しガス顕熱が大きいという欠点があった。そこで、中心ガス流を維持したまま高温ガス顕熱を回収する、“HBI中心装入 (MCC: Metal Center Charge)”技術を開発し、実機適用した。高炉中心部に塊コークスとともにHBIを装入することで、図6に示すように強固な中心ガス流を維持したまま、中心ガス顕熱をHBI溶融に利用可能と考えた。HBIはサイズが大きく炉上部では中心装入コークスとともに空げき率の大きな中心カラムを形成しうるが、過剰に装入すると炉下部でHBI含有スラグの滴下不順 (フラッディング) により中心ガス流が低下し、通気・通液性の悪化を引き起こす懸念がある。そこで、HBI中心装入時に通気悪化せずにガス顕熱を回収可能なHBI装入量の見極めを目的に、スラグ滴下実験を実施した。

実験装置は高炉中心部から中間部を模擬した加古川製鉄所第3高炉の縮尺1/30の透明アクリル製冷間模型である。試料は中心装入コークスを模擬したアルミナボール ($\phi 8$ mm) とコークス層+鉱石層を模擬した焼結鉱 (2.8~4.0 mm) である。炉口ガス流速の径方向分布 (ガス分配) が実機高炉と同等となるよう試料を充てんした後、装置下部より窒素ガスを通風した。充てん層表層下100 mmの位置において、溶銲を模擬した水およびHBIスラグを模擬した高粘度溶液 (カルボキシメチルセルローズ) を所定量滴下し、装置前面より溶液の流動挙動を観察した。実験条件として、液体種 (液粘度)・液量・

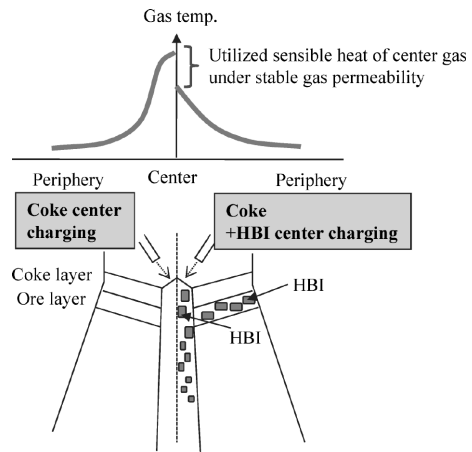


図6 HBI中心装入法の模式図

Fig.6 Schematic diagram of center charged HBI

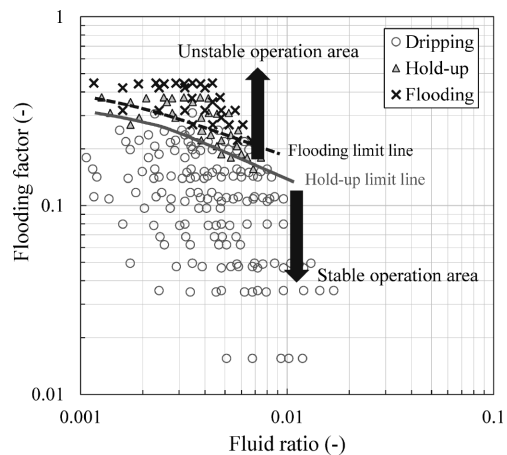


図7 冷間模型実験での滴下適正範囲

Fig.7 Proper dripping area in cold model experiment

ガス量を変更した。

実験結果は気液接触装置におけるガス流速と液流量の関係を整理した操作線図であるEckert線図¹⁰⁾を用いて、図7に整理した。Fluid ratioおよびFlooding factorはそれぞれ(1)式および(2)式で定義される。図7で液滴のホールドアップ (滞留現象) 限界線およびフラッディング (上方への逆流現象) 限界線が明らかになったので、通気・通液性に悪影響を与えないHBI装入量範囲でHBI中心装入法MCCを実機適用した。

$$\text{Fluid ratio} = (L/G)\sqrt{\rho_G/\rho_L} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Flooding factor} = (u_0^2 S/g\varepsilon^3)(\rho_G/\rho_L)\mu^{0.2} \dots\dots\dots (2)$$

L (kg/s・m²): 下降液体の表面質量速度

G (kg/s・m²): 上昇ガスの表面質量速度

ρ_G (kg/m³): 上昇ガスの密度

ρ_L (kg/m³): 下降液体の密度

u_0 (m/s): 上昇ガス速度

$S = 6(1 - \varepsilon)/d\phi$: 充てん物の単位体積当たりの表面積

g (m/s²): 重力加速度

ε (-): 充てん物の空隙率

μ (poise): 下降液体の粘性係数

d (m): 充てん物の粒度

ϕ (-): 球状係数

2.2 KHPの開発適用

加古川製鉄所は焼成鉱工場としてペレット工場と焼結工場を有しており、装入原料として性状の異なる焼結鉱・鉄鉱石ペレット・塊鉱石を混合使用している。鉄鉱石ペレットの配合比率は20~40%程度であり、その還元性状・高温性状は高炉の還元効率および通気性に大きく影響する。

当社では、鉄鉱石ペレットとして被還元性が高く、高温性状に優れた“KHP”を開発し、使用している¹¹⁾。CaO添加による塩基度C/S (=CaO/SiO₂) 上昇によりJIS還元率が向上するため、KHPは被還元性に優れた鉄鉱石ペレットである。さらに、MgO添加により軟化温度が上昇し、融着帯上面温度の上昇および収縮抑制の効果が得られる。また、熔融温度上昇により焼結鉱に近い性状となり、ペレットと焼結鉱の混合使用時に融着帯幅の縮小、すなわち炉下部で通気改善効果が得られる。

さらに、HBI超多配合時の低ガス量操業時には、少ない還元ガスがHBI表面近傍の空隙に優先して流れるため通常の鉄鉱石ペレットでは還元不良が懸念されるが、KHPであれば少ないガス量でも還元が可能である。

3. 高炉テスト操業結果

実高炉でのHBI超多配合テストは、大型高炉である加古川製鉄所第3高炉（炉内容積=4,844 m³）で、出銑比の異なる条件下で二回実施した。表2に実機テストの結果概要を2013年度の操業実績と比較して示す。

3.1 第一回テスト結果

第一回テストは出銑比 = 2.06での条件で、2020年10~11月に実施した。図8に操業推移を示す。HBI原単位を段階的に増加させながら、還元材比としてPC比は175 kg/THMで一定に維持し、コークス比を低減した。テスト期間中、全圧損ΔPはほぼ一定値で、管理値以下で操業できた。いっぽう、炉下部の通気抵抗指数（炉内充てん層のガスの流れ難さを表す指数）K_L¹²⁾はHBI原単位 = 230 kg/THMまでは徐々に増加しており、これはコークス比低減に伴う融着帯のW型化およびコークスムービングゾーンの狭小化によるものと推察される。このとき、鉱石堆積傾斜角の低下に伴う中心ガス流の低下が認められたので、鉱石堆積傾斜角を増加させる装入物分布アクションを実施し、中心ガス流を回復することで融着帯形状を逆V型に制御した。その結果、K_Lを低下

表2 実機テスト結果概要
Table 2 Results of actual tests

	Base	1 st test	2 nd test
Period	FY2013	Oct. 2020~ Nov. 2020	Apr. 2023~ May 2023
Productivity (t/m ³ /d)	2.10	2.06	1.80
HBI rate (kg/THM)	0	305	440
CR (kg/THM)	321	239	230
PCR (kg/THM)	197	176	156
RAR (kg/THM)	518	415	386
ΔC (kg/THM)	-	63.1	84.1
ΔCO ₂ (%)	-	18.0	25.4

CR : Coke rate PCR : PC rate RAR : Reducing agent rate

させることができ、風圧指数（送風圧力の変動の大きさを表す指数）PI¹³⁾も低下した。これら装入物分布アクションによる炉内状況変化を図9に示す。

装入物分布制御によるガス流れの改善とともにHBI中心装入MCCも実機適用し、還元材比の低減効果を最大化した。最終的にHBI = 305 kg/THM装入でCR=239 kg/THM, RAR = 415 kg/THMまで到達し、約3日間の安定操業を継続することができた。

3.2 第二回テスト結果

第二回テストは出銑比 = 1.80の低出銑比条件下であり、2023年4~5月に実施した。低出銑操業条件下でのHBI超多配合時の課題は、ボッシュガス量のさらなる低下に加え、レースウェイ温度の低下である。レースウェイ温度の低下はPC燃焼率の低下（未燃チャーの増加・炉内蓄積）による圧損変動やガス顕熱低下による溶銑滓（ようせんさい）への着熱不良を誘発する。

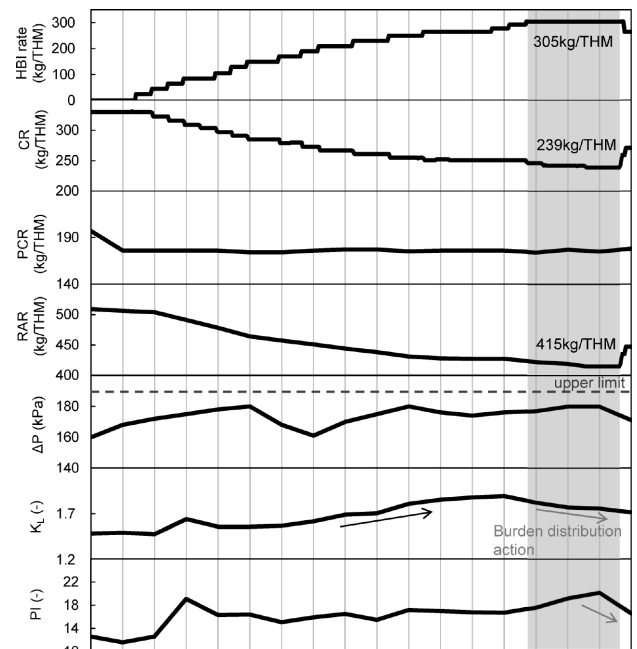


図8 第一回実証試験の操業結果

Fig. 8 Operational results of the first actual test

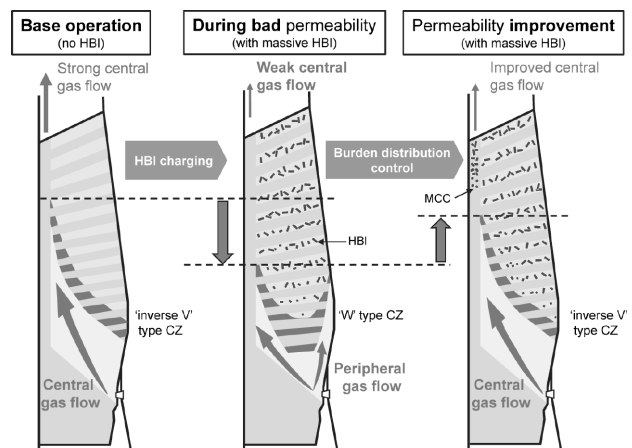


図9 HBI超多配合時の炉内状況変化

Fig. 9 In-furnace condition changes with massive HBI charging

図10に操業推移結果を示す。第二回テストでは、HBI原単位を段階的に増加させながら、コークス比とPC比を低減した。ボッシュガス量が極端に小さくなったタイミングで炉上部でのスリップが多発した（スリップ指数が増加した）。また、出鉄滓に関しては、4本の出鉄口（しゅっせんこう）のうち対角に位置する2本の出鉄口を用いて数時間おきに交互に出鉄を行っていたが、ボッシュガス量の低下に伴い出鉄口ごとの溶銑温度偏差が拡大した（溶銑温度偏差指数が増加した）。これらは、低出鉄操業下でのHBI増配（還元材比低減）に伴うガス量低下により、径方向および円周方向でガス分配が不均一化したためと推定される。

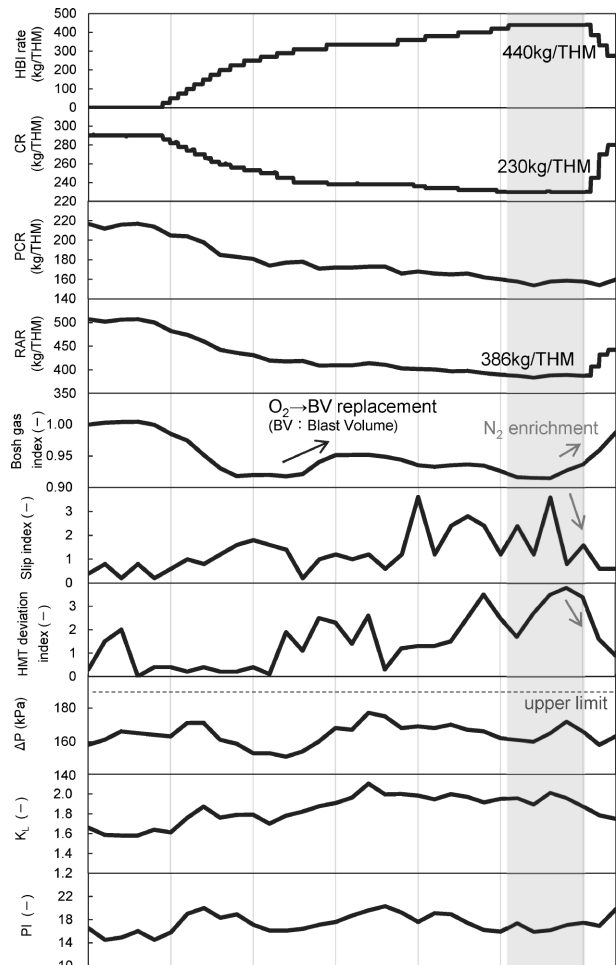


図10 第二回実証試験の操業結果
Fig.10 Operational results of the second actual test

図11にボッシュガス量とスリップ指数および溶銑温度偏差指数の関係を示す。ボッシュガス量低下時には窒素富化を行い、ガス量を増加して顕熱供給量を改善することでスリップと溶銑温度偏差が解消（スリップ指数および溶銑温度偏差指数が低下）し、安定操業を継続することができた。なお、窒素富化時は溶銑温度・レースウェイ温度・PC燃焼率などに問題が生じないように、炉熱調整を実施した。炉頂排出ダスト中に未燃チャーはほとんど存在せず、窒素富化時にPC燃焼性に問題がなかったことを確認した。

以上より、第二回テスト時の操業律速はボッシュガス量の低下に伴うスリップ増加と溶銑温度偏差の増加であり、窒素富化によりこれらの限界現象を緩和可能であることが分かった。最終的には大型高炉で、HBI = 440 kg/THMの超多配合装入により世界最小レベルのCR=230 kg/THM, RAR = 386 kg/THMを達成し、約4日間の安定操業を継続した。

3.3 炭素削減効果の最大化

高炉のシャフト効率 ηS は、ガス流れと装入物性状（鉱石還元性状、金属鉄装入量）の影響を受け、金属鉄装入量の増加により低下する。そこで、金属鉄装入による ηS の減衰度合いを(3)式および(4)式を用いて定式化した。 ηS は固有高炉の基準条件でのシャフト効率 ηS_{Base} と ηSP （金属鉄装入による ηS 減衰率）の積として、(3)式で表される。M.Fe = 0 kg/THMのとき $\eta SP = 1.0$ 、鉄中Fe原単位M.Fe Max (=940 kg/THM)のとき $\eta S = 0\%$ で $\eta SP = 0$ となるため、図12(a)のように ηSP は(0, 1), (940, 0)の2点を通る。よって、 ηSP と金属鉄装入量の関係はシャフト効率減衰パラメータ n を用いて(4)式で表すことができる。

$$\eta S = \eta S_{Base} \times \eta SP \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta SP = \left\{ 1 - \left(\frac{M.Fe \text{ charged}}{M.Fe \text{ Max}} \right)^n \right\} \dots\dots\dots (4)$$

- ηS (%) : シャフト効率
- ηS_{Base} (%) : 基準条件におけるシャフト効率
- ηSP (-) : 金属鉄装入による ηS 減衰率
- M.Fe charged (kg/THM) : 装入M.Fe
- M.Fe Max (kg/THM) : 鉄中Fe原単位 (= 940 kg/THM)
- n (-) : シャフト効率減衰パラメータ

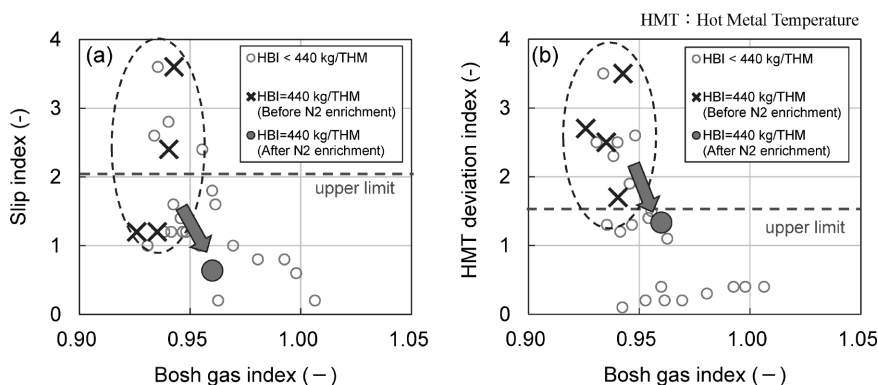


図11 ボッシュガス指数とスリップ指数および溶銑温度偏差指数の関係
Fig.11 Relationships between bosh gas index and slip index, HMT deviation index

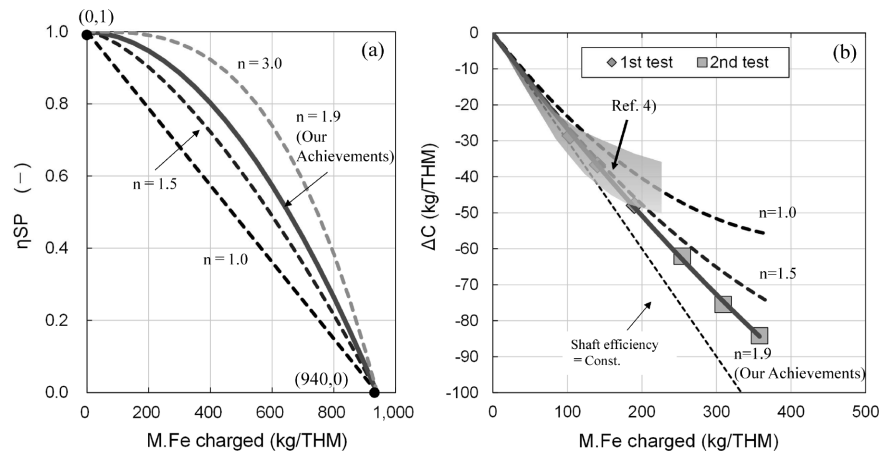


図12 M.Fe装入量と η_{SP} および ΔC の関係
 Fig.12 Relationships between M.Fe charged and η_{SP} , ΔC

また、図12 (a) よりM.Feの増加により η_{SP} は低下し、M.Fe装入によるC削減効果が低下する。シャフト効率減衰パラメータ n が低下すると、同一M.Feでの η_{SP} が低下し、M.Fe装入によるC削減効果が低下する。

図12 (b) にM.Fe装入量と ΔC の関係を示す。他社実績⁴⁾がHBI=250 kg/THMまでの装入量で $n=1.0\sim 1.5$ 程度であるのに対し、当社は高炉独自開発技術の適用によりHBI=440 kg/THMの超多配合装入でも $n=1.9$ となり、同量のHBI装入でより多くのCO₂削減効果が得られる結果となった。また、このシャフト効率減衰パラメータの考え方をRISTモデルへ組み込むことで、金属鉄装入時におけるCO₂削減量を精度よく推定可能とした。

むすび = CO₂排出量の大幅削減に向けて当社独自の高炉操業技術を適用した実機実証テストを実施し、大型高炉においてHBI=440 kg/THMの超多配合装入で世界最小レベルの還元材比 = 386 kg/THM、コークス比 = 230 kg/THMを達成した。また、高炉単独でのCO₂削減率は2013年度比で25.4%に到達した。なお、本成果は世界の高炉におけるCO₂排出削減に迅速かつ安定的に貢献する技術的解決策を提供するものである。

参考文献

- 1) GREINS HP. テクノロジー. 高炉のCO₂を減らす技術. <https://www.greins.jp/technology/technology03/>. (参照2025-12-16)
- 2) 厚 雅章ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.60, No.1, p.5-11.
- 3) T. Ohmura et al. *CAMP-ISIJ*. 2001,14, p.207.
- 4) G. Anna. voestalpine Stahl GmgH. ICSTI_299.
- 5) A. Rist et al. *Rev. Met.*1963, 60, p.23.
- 6) K. Kamo et al. *CAMP-ISIJ*. 2020, Vol.33, p.90.
- 7) 加茂和史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.73, No.1, p.28-32.
- 8) 伊藤良二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.6-11.
- 9) T. Uenaka et al. *I&SM*, NOV. 1988, p.34-39.
- 10) H. Sawistowski. *Chem. Eng. Prog.* 1970, 6, p.138.
- 11) 西田礼次郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 1984, Vol.34, No.4, p.28-35.
- 12) 重見彰利. 製鉄ハンドブック. 地人書館. 1979, p.182.
- 13) K. Nozawa et al. *ISIJ international*. 2001, Vol.51, No.8, p.1336-1342.