

(解説)

FASTMET[®]プロセス

Features of FASTMET[®] Process



堤 博文*

Hirofumi TSUTSUMI



吉田昌平*

Shohei YOSHIDA



鉄本理彦**

Masahiko TETSUMOTO

Over the past 10 years, Kobe Steel and its Midrex, subsidiary company in USA, have been developing the FASTMET Process. This process enables the conversion of metallic oxides from either steel mill waste or iron ore fines, into metallized iron in a rotary hearth furnace (RHF) using solid carbon sources, such as coal, as the reductant. Since 2000, the current commercial operations have enabled steelmakers to deal with metallic waste problems. In 2009, Kobe Steel successfully supplied two new FASTMET plants each with 190,000 t/h capacity. One is the third plant for Nippon Steel Hirohata Works with the first FASTMET-HBI process, and the other is the first plant for JFE Fukuyama Works which produces DRI as supplemental source for blast furnaces.

まえがき＝回転炉床炉 (Rotary Hearth Furnace, 以下 RHF という) により鉄の還元を行う試みは、当社米国子会社 MIDREX 社の前身である Midland Ross 社により、炭材を内装化したペレットをグレートで予熱し、RHF で事前還元後シャフトクーラで冷却を行う Heat Fast プロセスとして 1960 年代に世界に先駆けて着手された。1965 年にはパイロットプラントを建設し 1966 年までテストが行われた。しかし、同時期に Midland Ross 社において行われていた天然ガスを用いた直接還元プロセス、すなわち MIDREX[®]法の開発が当時の天然ガス価格を考慮した経済性から優先されたため、Heat Fast の商業化は実現しなかった。

その後天然ガス価格の上昇を受け、1990 年代に当社と MIDREX 社との共同で RHF を用いた還元鉄製造の開発を再開した。1995 年には加古川製鉄所に実証プラントを建設して実証運転を重ね、商業化に向けた FASTMET プロセスを確立した。

2000 年には、製鉄所の製造工程で発生する製鉄所ダスト 190,000t/年を FASTMET プロセスで還元し、再利用するプラントを新日本製鐵(株)広畑製鐵所向けに商業機の第 1 号として納入した。

さらに 2005 年に同じ規模の 2 号機を同製鐵所に納入したが、この実績により FASTMET プロセスは、製鐵所で発生するダストを効率よくリサイクルできるシステムとして、財団法人クリーン・ジャパン・センター 資源循環技術・システム表彰大臣賞を受賞した。

2008 年および 2009 年には処理規模 190,000t/年のプラント 2 基を新日本製鐵(株)広畑製鐵向け 3 号機、および JFE スチール(株)西日本製鐵所 (福山地区) 向け 1 号機としてそれぞれ納入した (表 1)。以下に、これらのプラントの紹介と FASTMET プロセスの概要について述べる。

表 1 FASTMET プラント実績
Table 1 Supply list of FASTMET plant

Plant	Startup	Capacity (t/y)
1) Kobe Steel Kakogawa Works FASTMET	2001 Apr.	14,000
2) Nippon Steel Hirohata Works FASTMET No.1	2000 Mar.	190,000
3) Nippon Steel Hirohata Works FASTMET No.2	2005 Feb.	190,000
4) Nippon Steel Hirohata Works FASTMET No.3	2008 Dec.	190,000
5) JFE Steel West Japan Works (Fukuyama) FASTMET No.1	2009 Apr.	190,000

1. FASTMET プロセスの特徴

FASTMET プロセスは、天然ガスからの改質ガスで行われるガス還元と異なり、加熱還元処理するにあたって鉄鉱石または製鉄所ダストから成る塊成化物に炭材を内装し、急速加熱することで還元反応の高速化を実現するというシンプルかつ独創的なプロセスである。また、塊成化物を炉床に 1～2 層に敷き詰め、放射熱で加熱を行うことにより、燃焼炉内であるにもかかわらず、酸化ポテンシャルをもった燃焼排ガスによる塊成化物の酸化を防ぐという点においても極めて特徴的である¹⁾。とくに炉全体としては、ほぼ完全燃焼する空気比で燃焼させることが可能で、塊成化物への効果的な加熱・還元と効率的な燃焼を同一炉内で具現化するという効率的なプロセスである。加えて、塊成化物に内装された炭材から発生する可燃性ガスをその上部において 2 次燃焼させることから、高温燃焼炉にもかかわらず NO_x の排出が極めて少ないことも FASTMET プロセスの特長である。

製鉄所ダストなどをその原料とした場合、燃焼時にダイオキシンを生成するケースがあるが、FASTMET では炉内温度を 1,300℃以上の高温にするためダイオキシンの生成が抑制される。また、排ガスを冷却する際、燃焼時に分解されたダイオキシンが再合成される温度域を急

*資源・エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 技術部 ** Midrex Technologies, Inc.

速に冷すことによって再合成を防止している。

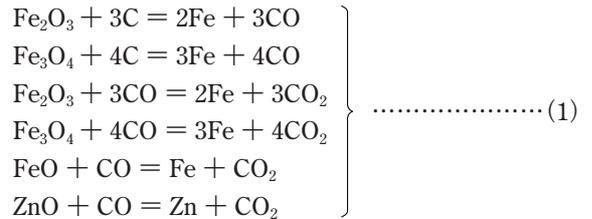
FASTMET プロセスは RHF を用いて石炭内装塊成物を還元する方式である。得られる還元鉄は、独創的なプロセスによる高生産性・高還元率により、高炉への供給はもちろんのこと、溶解炉への直接供給をも可能としている。

FASTMET プロセスの標準的なプロセスフローを 図 1 に示す。FASTMET プロセスでは粉鉱石または酸化鉄を主成分とした製鉄所ダストと粉状の石炭をミキサで混合後、ペレタイザまたはブリケッタでペレットまたはブリケットに塊成化し、乾燥機で乾燥した後 RHF の炉床上に 1～2 層になるよう供給する。

ペレットやブリケットを炉内に供給する際、炉内と外気との遮断を確実にし、かつ供給する量を精度よく制御する必要がある。FASTMET では、炉の大きさに合わせて配列数を調整できるフィードパイプ方式を採用することによってその両立を可能としている²⁾。また、1～2 層に均一に敷詰めらるにあたっては、スクリー式レベリング方式を採用している³⁾。

炉床上に並べられたペレットやブリケットは、当社固有技術である急速加熱法¹⁾にて 1,350℃ の高温で急速に加熱する。このとき、石炭に含まれる炭素の働きによる式 (1) のような還元反応が進む。8～16 分の滞留時間で還元鉄 (Direct Reduced Iron, 以下 DRI という) となっ

て 1,200～1,000℃ の温度で炉外に排出、あるいは下流工程に供給される (図 2)。



高温の DRI を炉外に排出するための機構および操作は、移動床型還元炉の操業方法⁴⁾を採用することにより安定した連続操業を実現している。また、高炉法とは異なり、生産量の調整に加えて、操業の開始停止を比較的自由に行うことができ、実需に合せた操業をも可能にしている。

炉外に排出した DRI は、輸送用のコンテナを用いて溶解炉へ供給するか、あるいは、冷却した後 DRI 形状のまま高炉に供給することが選択できる。

通常、還元された DRI はその還元プロセスで生じる気孔を多数有する。このため、長期間大気中に暴露された状態が続くと再酸化によってその金属鉄が酸化鉄に変わり品質を損なうことになる。DRI を溶解炉あるいは高炉原料としてすぐに使用しない場合は、圧密塊成化して HBI (Hot Briquette Iron) にすることによって再酸化を防止することができ、品質を損なうことなく長期保管が

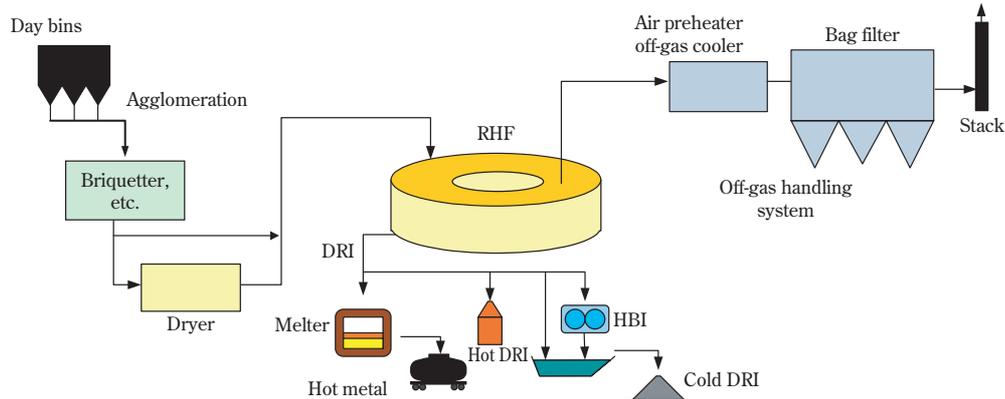


図 1 FASTMET プロセスの標準的なプロセスフロー
Fig. 1 FASTMET process flow

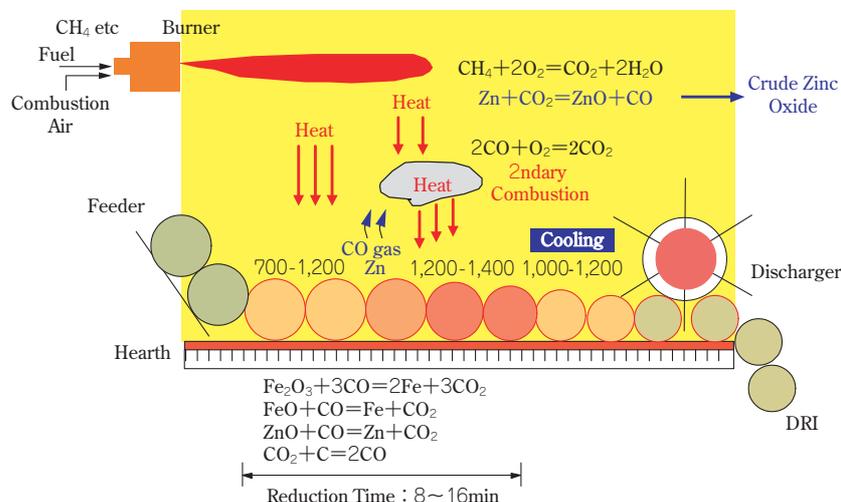


図 2 FASTMET プロセスの炉内反応概要
Fig. 2 Schematic drawing of reduction in FASTMET furnace

可能となる。HBIの状態では保管した後で溶解炉または高炉に供給することは可能であり、またHBIの状態での輸送や外販も可能である。

FASTMETプロセスで製造される還元鉄をペレット／ブリケット状のDRIの状態で使用するか、あるいはHBI設備を設けてHBI化して使用するかは、上述のとおり製品（鉄源）の用途と保存期間を考慮して決定する。

一方、還元反応によってペレット／ブリケットから発生した可燃ガス（COガス）はRHFでの燃料として利用できるため、バーナでの使用燃料の削減に大きく役立つ。また、製鉄所で発生するダストは従来から、所内ペレット製造設備もしくは焼結設備にて高炉原料としてリサイクルされてきた。しかしながら、高炉原料中に含まれる揮発成分、とくに亜鉛は、高炉内高温帯でいったんは揮発するものの全量が炉外へ排出されることはなく、一部は投入原料によって再度冷却・捕そくされて炉内に滞留する。この滞留は炉内の通気性を阻害するため、高炉の生産性を著しく低下させる原因となってきた。

リサイクル利用の障害になっていたそれら亜鉛や鉛などの重金属についても、FASTMETプロセスでは炉内の加熱過程で揮発して粗酸化亜鉛などとなり、プロセス内で循環することなく排ガスラインに流れる。排ガスラインには当社独自の冷却・除塵システム⁵⁾を装備しており、空冷および水冷を組合せることによって揮発分が機器内部壁に固着するのを軽減することができる。これによって長期安定運転が可能となったうえに、粗酸化亜鉛などをバグフィルタで回収することができる。回収された粗酸化亜鉛は、還元鉄と共に有価な資源としてリサイクルされる。

また高温排ガスに含まれるエネルギーは、オフガス処理設備に設置された熱交換器で燃焼用あるいは原料乾燥用空気の昇温用に転換され、省エネルギー化を図っている。

2. 新日本製鐵(株)広畑製鐵所向け3号機として納入した「FASTMET-HBIプロセス」

新日本製鐵(株)広畑製鐵所向けには2000年にFASTMETの1号機(図3)を、2005年には同規模の2号機を納めている。また、1990年代に当社加古川製鐵所に建設した実証プラントはその後、製鐵所内で発生する製鐵ダスト



図3 新日本製鐵(株)広畑製鐵所向けFASTMETプラント1号機
Fig. 3 First FASTMET plant in Nippon Steel Hirohata Works

を還元鉄にリサイクルする設備として現在も同製鐵所の低資源化対策工場として貢献している(図4)。

新日本製鐵(株)広畑製鐵所にはさらに、ダスト処理能力が1号機および2号機と同じ190,000t/年のFASTMET3号機(図5、以下本機という)を納入した。1号機および2号機の最終製品がDRIであるのに対して、本機は最終製品はDRIを熱間で圧縮塊成化したHBIである。すなわち本機は、FASTMET-HBIプロセスを採用した第1号商業機である。

上述のように、還元鉄を外販する場合など長期にわたって大気中に保管する場合は、DRIを圧縮成型(塊成化)して気孔を有しない状態であるHBI(図6)に成型する。このDRI塊成化は、当社とMIDREX社がガススペース直接還元製鐵プラント用として1990年代に世界に先駆けて開発した技術である。今日まで多くの知見を積重ね、現在多くのMIDREX法の直接還元プラントでDRI塊成化技術が採用されている。

FASTMET-HBIプロセスはこの実績ある基本プロセスをベースに、付帯装置としてDRIクーラを備えている。



図4 加古川製鐵所FASTMETプラント
Fig. 4 FASTMET plant in Kobe Steel Kakogawa Works



図5 新日鐵広畑製鐵所FASTMET3号機
Fig. 5 3rd FASTMET plant in Nippon Steel Hirohata Works



図6 HBI断面
Fig. 6 Sectional view of HBI



図7 HBI外観
Fig. 7 Appearance of HBI

表2 加古川デモプラント HBI ブリケッター仕様⁶⁾
Table 2 Specification of hot briquette machine of pilot plant⁶⁾

Hot briquette machine	Roll Diameter	1.0 m
	Allowable feed temp.	800°C
	Feed material temp. (typical)	658°C
	Feeder speed (typical)	86 rpm
	Roll pressure (typical)	16.5 MPa
	Roller speed (typical)	5 rpm
	Production rate (typical)	9.5 t/h
	Motor Power	200 kW

炉から排出される DRI の温度の違いから MIDREX 法では DRI クーラは装備されない。この DRI クーラは、RHF から約 1,000°C で排出される DRI を温度域 (約 600~800°C) に冷却・制御できるように設計されており、HBI ブリケッターで高品質の HBI (図 7) を効率よく塊成化することができる。

RHF で生産される DRI の HBI 化技術の確立に向けて、1996 年にはすでに当社加古川製鉄所に HBI パイロットプラントを建設し、成型実験を行っている⁶⁾。パイロットプラントの仕様は表 2 に示したとおりである。

この実験を通じ、HBI の代表的性状である気孔率および見掛け密度が HBI に要求される耐候性や強度に与える影響度、HBI 成型に必要な DRI 温度、および残留炭素量の条件などの知見を得た。また、その実験結果を受け、鉄鉱石や製鉄所ダスト (トータル鉄分約 50%以上) を原料とし、RHF の通常の操業条件 (雰囲気温度 1,200~1,400°C, DRI の残留炭素 2~6%) によって製造した DRI は、約 600~800°C の温度域で圧縮成型することによって長期保管および高炉への供給が可能な品質の HBI に塊成化できることを初めて示した⁶⁾。

この実験で得られた成型温度、残留炭素量と HBI 品質指標の一つである強度との関係を図 8 に示す⁷⁾。

また、HBI の塊成化に際しては、DRI の表層に近い部分の金属化率がより高いほど、また内部の残留炭素が表面に比べて高いほど DRI 塊間の付着性が強化され、良好な HBI が製造可能なことを見いだした⁷⁾。図 9 に加古川製鉄所の HBI パイロットプラントの全景、図 10 に同パイロットプラントでの HBI の製造状態を示す。また表 3 には HBI の性状を示す。このパイロットプラントでの実験結果などにより、還元炉と HBI ブリケッター間に設置される DRI クーラに必要とされる有効伝熱面積やその冷却時間、DRI クーラが与える HBI 品質への影響度などの知見を得た。

製鉄所で発生するダストは、高炉ダストや製鋼ダス

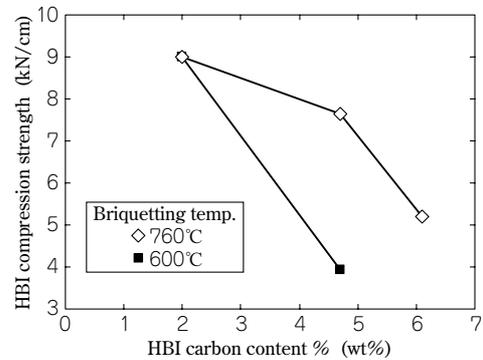


図8 加古川デモプラントで得られた残留炭素量等と HBI 強度との関係

Fig. 8 Relationship between compression strength and carbon content of HBI



図9 加古川 HBI デモプラント
Fig. 9 Kakogawa HBI pilot plant



図10 加古川 HBI デモプラントにおける塊成化テスト
Fig. 10 Agglomerate test in Kakogawa HBI pilot plant

表3 加古川デモプラントで生産された HBI 性状例
Table 3 HBI property of pilot plant

Metallization:	80-85%	
Carbon:	2-6%	
Density:	4.2 g/mL	
Compression Strength:	5-7 t/HBI	
Drop Strength	+ 38.1mm:	85%
	6-38.1mm:	11%
	- 6 mm:	4%

ト、スラッジなどがある。その生成過程は千差万別であり、商業化レベルで還元可能か、また HBI への成型が可能か、計画段階で評価判定することは非常に難しい。当社はそうした計画段階より適切な事業化評価ができるよう、還元テスト設備、塊成化テスト設備などを有しており、適切なアセスメントが可能な環境を整えている。新日本製鐵(株)広畑製鐵所 3 号機は、その環境を活用するこ

とによって2005年より計画に着手し、事業化可能なことを確認して2007年より詳細設計を開始した。

当社は、RHF、HBI 製造プラント、ブリケット乾燥機および排ガス処理設備の設計・製作を行い、2008年5月より据付工事を開始した。同年10月に試運転、12月には負荷運転開始という短期工程を達成し、12月末には同製鐵所での商業運転が開始された。

HBI 設備はRHFの下部に設置されたが、非常にコンパクトなレイアウトを実現し、先に同製鐵所に納入したHBI 設備を有しない1号機および2号機と同程度の設備高さとなっている。

また、環境に配慮した設計となっており、原料となるダストブリケットを搬送する際の発塵を防止する目的から集塵設備を各所に設置している。

1・2号機ではRHFより排出されたDRIは高温のまま下流の製鋼プロセスへ搬送されるが、本機のFASTMET-HBIプロセスでは、RHFより排出されたDRIは異物除去の目的で設けられているスクリーン⁸⁾を経た後、DRIクーラによって高温塊成化に適した温度まで冷却され、ホッパを通じて塊成機であるHBIブリケットタへ供給されてHBIに成型される(図11)。

ここで、DRIクーラでの冷却にあたっては、DRIの塊成化に適した温度範囲になるようにコントロールすることが重要である。すなわち、DRIクーラ出口温度が高すぎる場合、HBIブリケットタのロールや供給装置の劣化が急速に進んでメンテナンス負荷が増大する。また、温度が低すぎる場合も、DRIの延性が低下することによってロールの劣化が進むうえに、HBIの延性低下によって強度などの品質が所定の域に達しないことになる。DRIクーラには間接水冷ドラム方式を採用しているが、本機では、ドラムの回転数を調整することに加え、HBI系内部を不活性雰囲気⁹⁾に保つためにDRIクーラなどに供給している窒素ガスの量を調整することによって温度コントロールする方式を初めて採用した。これによって良好にコ

ントロールできることが確認できている⁹⁾。

サージホッパは、RHFのDRI生産量とHBIブリケットタのHBI生産量の差分調整を行うためのバッファとしての役目をもっている。ホッパ内部は常に高温雰囲気であるため、ホッパ内部のDRIの貯蔵量を外部より計測するのは容易ではない。これと同様な測定用途にはこれまでガンマ線を使用したレベル計が用いられてきたが、厳密な線源の安全管理が求められることから、メンテナンス負荷と操業調整の裕度に制約を受ける。本機ではそのようなメンテナンス負荷の軽減を目的として、マイクロ波方式のレベル計を同用途としては初めて採用し、良好な調整結果を得ている。

HBIブリケットタで塊成化されたHBIは、再酸化防止およびベルトコンベヤやトラックでの搬送のため、クエンチコンベヤにおいて水散布によって常温に近い状態まで冷却されてヤードに貯蔵される。HBIは急速に冷却すると強度が落ちることが知られていることから、当社では、独自の技術である徐冷方式、いわゆるスロークエンチ方式を採用している¹⁰⁾。

冷却およびクエンチコンベヤハンドリング中に発生するHBI粉は、比較的大きなものはクエンチコンベヤ下部に設けた傾斜型ファインコンベヤで回収できる方式としている。冷却水の中に随伴される細かいダストは、搬送用ポンプの入口などで詰りが発生しないレベルにまで自然沈降装置(ダストキャッチャ)によって分級された後、水処理設備に送る方式を採用した。

本機で生産されたHBIの性状の一例は表4に示したとおりであり、良好な品質のHBIが製造できている。

表4 新日鐵広畑製鐵所 FASTMET 3号機で製造されたHBI性状の例

Table 4 Property of HBI of 3rd FASTMET plant in Nippon Steel Hirohata Works

Metalization	> 85%
Carbon	< 3%
Density	> 5g/mL

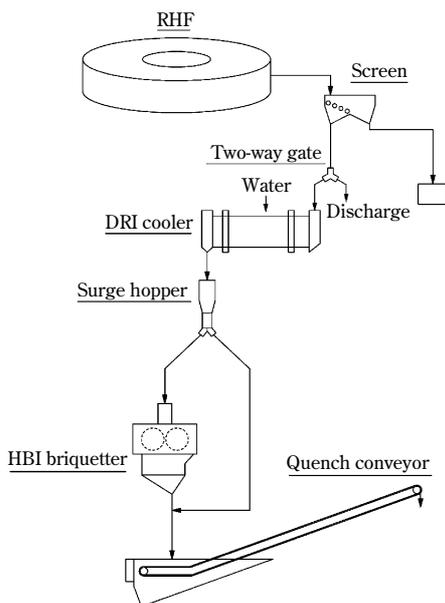


図11 新日鐵広畑製鐵所 FASTMET 3号機 HBI系フロー

Fig.11 HBI line process flow of 3rd FASTMET plant in Nippon Steel Hirohata Works



図12 新日鐵広畑製鐵所 FASTMET 3号機の排ガス冷却器

Fig.12 Exhaust gas cooler of 3rd FASTMET plant in Nippon Steel Hirohata Works

本機では、上記 HBI 系の設置に加えて、新たにオフテイク部への二次燃焼室を設置している。これは、RHF で発生する燃焼ガスが排ガス系に流れ、有効に活用されないまま排出されることを防ぎ、炉内で発生する二次燃焼効果を還元反応用熱源として最大限に活用することを可能とする設備である。二次燃焼室には温度監視システムを設置し、燃焼室内での燃焼状態が、原料性状変動に伴う RHF 内部の燃焼状態変化に対して常に即した状態に保たれるようにしている。

オフテイク部を通して RHF から排出される排ガスは、バグフィルタで捕集可能な温度域まで冷却を行う必要がある。そのためにオフガス設備に設けられる冷却器には水噴霧タイプのものが用いられるが、噴霧された水と排ガス中に含まれる酸化亜鉛などのダストが結合して冷却器内部壁面に付着物を形成し、ガスの流れを阻害するなどの問題が発生するケースがこれまで見られた。

本機では、冷却器へのガス導入部を対向流にする方式を新たに採用した(図12)。これまでの操業の結果、付着物が操業を阻害することもなく長期安定運転を達成している¹¹⁾。

3. JFE スチール(株)西日本製鉄所向け FASTMET プロセス 1 号機

JFE スチール(株)西日本製鉄所(福山地区)には、同社にとって1号機となる FASTMET 設備(図13)を2009年に納入した。当社加古川製鉄所向けおよび新日本製鉄



図13 JFE スチール(株)西日本製鉄所向け FASTMET 設備全景
Fig.13 FASTMET plant in JFE Steel West Japan Works (Fukuyama)

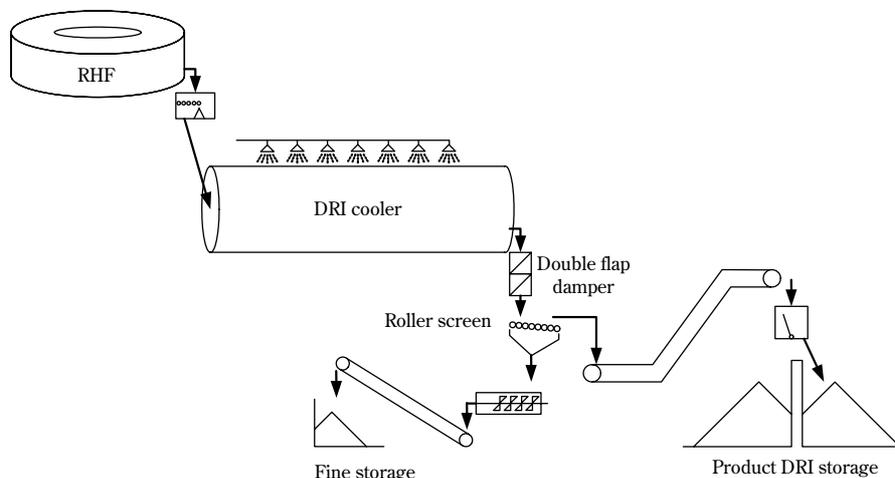


図14 DRI 搬送エリアフロー
Fig.14 DRI line flow of Fukuyama Works

(株)広畑製鉄所向けでの実績を高く評価いただいたことによって同社への納入につながったものである。

本設備は、同製鉄所で発生する高炉ダストおよび製鋼ダストのうち、亜鉛濃度の高いダストを処理して再資源化するものであり、ダスト処理量は190,000t/年を公称能力としている。製造された DRI は高炉に装入され、同製鉄所におけるゼロエミッション活動に貢献している。

本設備は、RHF、オフガス処理設備、および DRI 冷却・搬送設備を対象とする設計、製作、工事、および試運転指導員派遣の範囲で2007年9月に受注し、設計を開始した。2008年6月には機器据付工事を開始して2009年1月より試運転、同年4月より負荷試運転を開始するという短工期を実現している。その後、2009年6月には定格処理量での運転を行って保証性能を達成することができ、短期間での上上げが可能であることを示した。

本設備で得られた DRI は高炉へ装入されるため、高炉装入まで粉化することのない十分な強度を有すること、および高炉内循環亜鉛量を増加させないよう亜鉛濃度が十分に低いことが要求される。

DRI の強度を高く保つためには、十分に還元されていること、および DRI に含まれる残留炭素分を低く保つことが重要となる。また、ダスト中に含まれる亜鉛を還元し揮発させるためには十分に長い還元時間が必要となる。こうした要件を満たすため本設備では、これまでの FASTMET 設備としては最大の有効炉床外径27mの RHF を採用した。その結果、試運転による調整を経て表5に示すような性状の DRI が製造できており、現状問題なく高炉で使用されている。

本装置における DRI 搬送エリアのフローを図14に示す。RHF において還元・製造された DRI は約1,100℃の高温であり、これを200℃まで冷却する DRI クーラには間接冷却ドラム式の冷却器を採用している。ドラムの内

表5 DRI 性状
Table 5 Properties of DRI

Reduction degree	>80%
Zinc removal degree	>90%
Compression strength	>100kg/piece

部には送り羽根と冷却フィンを備えており、そのドラムの外壁に水を噴霧する。ドラムの回転に伴って送り羽根によって DRI は出口側へ送られていくと同時に、ドラム壁と冷却フィンとの接触熱伝達によって冷却される。

また、DRI クーラの排出口には二重ダンパを設置すると同時にドラム摺動部をシールし、これらにシールガスとして窒素を吹込んでいる。これによって DRI クーラ内部を不活性雰囲気を保つことができ、クーラ内において DRI が再酸化するのを防止している。

DRI クーラ出口での DRI 温度は、排出後の DRI の急速な再酸化反応を起こさず、また搬送に問題のない温度とすることが重要である。さらに、間接式クーラにおいては、被冷却物の温度が常温近くまで下がったときには冷却効率が低下するため多くの熱伝達面積が必要となり、設備規模が大きくなる。そこで、本装置での DRI クーラ出口温度は 200℃とした。

DRI クーラより排出された DRI は、ローラスクリーンで粉をふるい落としした後コンベヤによって製品ヤードへ搬送される。

RHF の排ガスを処理するオフガス系では、これまでに実績のある冷却器と熱交換器を採用している。とくに冷却器では、新日本製鐵(株)広畑製鐵所 3 号機と同様、ガス導入部を対向流にする新方式を採り、問題なく長期稼動を継続している。

RHF の燃焼用燃料として、加古川デモプラントでの使用実績がある COG を使用した。COG は他の LNG などの燃料に比べて発生熱量が少ない(約 18MJ/Nm³)ため、

オフガスとして排出される排ガス量が、同生産規模の広畑製鐵所向け FASTMET 設備に比べて多くなり、その処理設備規模も相応のスケールアップが必要となった。しかし上述のとおり、オフガス設備を含めプラント立上げ早期に所定の能力を達成している。

オフガス系のバグフィルタで捕集される粗酸化亜鉛を主成分とするダストは、コンベヤによってホッパ 4 基に一時貯留され、出荷される。

むすび＝これまで再利用が困難とされてきた製鐵所で発生する亜鉛を含んだダストなどを FASTMET プロセスを使用することによって商業規模で効率的に還元し、鉄および亜鉛資源として有効にリサイクルされていることを紹介した。地球資源の枯渇や CO₂削減をはじめとする地球環境保護の問題が重要視されるなか、FASTMET プロセス導入ニーズは今後ますます高まるものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 特許第 3304872 号.
- 2) 特許第 3075722 号.
- 3) 特許第 3208385 号.
- 4) 特許第 3075721 号.
- 5) 特許第 3844941 号.
- 6) 田中英年ほか：鉄と鋼, Vol.92, No.12 (2006), pp.330-336.
- 7) 公開特許 2008-127580.
- 8) 特許第 3404309 号.
- 9) 公開特許 2009-74725.
- 10) 特許第 3145834 号.
- 11) 公開特許 2008-256332.