

(解説)

# 石炭ベース還元プロセスの展望

## Prospects for Coal-based Direct Reduced Process



道下晴康\*

Haruyasu MICHISHITA



田中英年\*\*

Hidetoshi TANAKA

Kobe Steel has developed coal-based direct reduction (DR) technologies, such as FASTMET, FASTMELT and ITmk3, where carbon composite agglomerates (pellets or briquettes) are placed on the hearth to be processed with Rotary Hearth Furnace. This paper outlines the features of each process, status of technical development and commercialization. Furthermore, the paper surveys the contributions of these technologies for environmental compatibility and security of raw materials, which are becoming critical issues in the world steel industry.

まえがき＝天然ガスを用いた直接還元法（MIDREX<sup>®</sup>法、HYL 法など）による製鉄は、高炉法に比べて設備投資が小規模でコークスも必要としないため、天然ガスを産出する発展途上国を中心に鉄源プラントとして建設されてきた。また最近では、先進国における電炉ミルの台頭により、清浄スクラップ代替鉄源として還元鉄（Direct Reduced Iron, 以下 DRI という）の需要が高まっており、その生産量は図 1 に示すように年々増加している<sup>1)</sup>。しかし、天然ガスベースの DRI プラントは立地が天然ガス産出地域に限られるため、最近では、広範囲に分布して埋蔵量が多く、輸送も可能な石炭を活用した DRI 製造プロセスによる生産量が増えている。2008 年の世界 DRI 製造量 68.5 百万トンのうち、25.7%の 17.6 百万トンが石炭ベース還元プロセスによるものである<sup>1)</sup>。石炭ベース還元プロセスのほとんどは SL/RN<sup>2)</sup>をはじめとするロータリーキルンを使用し<sup>2)</sup>、ペレットまたは塊鉱石を石炭とともにロータリーキルンに装入して石炭バーナで加熱することによって DRI を製造する。キルニングが顕著に発生しない炉温（1,000～1,100℃<sup>3)</sup>）に抑える必要があることから、還元に約 12 時間を要し、一基当たりの生産規模は年産 15～25 万トンと鉄鋼プラントとしては生産性が低く代替プロセスが望まれていた。

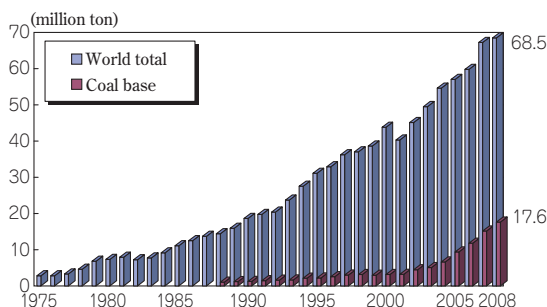


図 1 世界における DRI 生産量の推移<sup>1)</sup>  
Fig. 1 World DRI production by year<sup>1)</sup>

そうした中で当社は、米国子会社 MIDREX 社と共同で回転炉床炉（Rotary Hearth Furnace, 以下 RHF という）を用いた石炭ベースの還元プロセスの開発を進めてきた。このプロセスは、炭材内装塊（ペレットまたはブリケット）を RHF の炉床上に敷詰め、静的な状態で加熱・還元処理を行うため、ロータリーキルンに比べて高い炉温（1,300～1,400℃）が適用でき、還元速度が速く生産性が高い。さらに、粉鉱、ダスト、一般炭など適用原料のフレキシビリティが高いなどの特長をもつ。

本稿では、RHF にて炭材内装塊を還元する当社の石炭ベース還元プロセスの特徴と開発状況を概説し、鉄鋼業が直面する原料確保と環境対策という課題に対して期待される役割を展望する。

### 1. 炭材内装塊還元プロセスの特徴

外部からの還元ガスの拡散に支配される通常のペレットや焼結鉱の還元とは異なり、粉鉱石と微粉碎した石炭を混合してペレットおよびブリケットに成型した炭材内装塊の還元は、高温加熱によって塊中に生成された CO ガスにより酸化鉄を内部から還元する。このため、外部から還元するプロセスに比べて還元速度が速い。このときの反応機構は図 2 に示したとおりであり、以下の反応

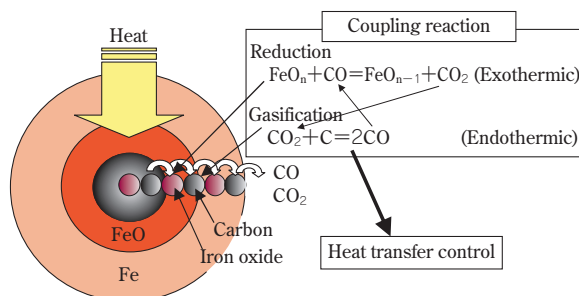
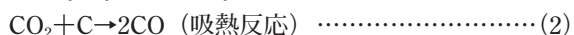
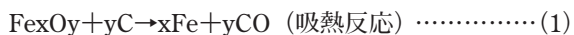


図 2 炭材内装ペレットの還元メカニズム  
Fig. 2 Reduction mechanism of carbon composite pellet

\*資源・エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 技術部 \*\*資源・エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 開発部

が進んでいると考えられる。



すなわち、鉄鉱石が溶融しない温度範囲では石炭やコークス粉などの固体炭素と鉄鉱石の直接的な反応(式1)は少ないが、1,000℃以上の高温下においては、カーボンソリューションロス反応によるCOガス生成(式2)とCOガスによる酸化鉄の還元反応(式3)が炭材内装塊の内部で連鎖的に進行する<sup>2)</sup>。

上記の還元反応に関しては、強い吸熱反応であるCOガス生成(式2)が律速であるので<sup>2)</sup>、必要な熱を1,000℃以上の高温下で炭材内装塊内部に供給すること、すなわちペレット表面への外部からの輻射伝熱およびペレット外周部からペレット内部への伝導伝熱を効率的に行うことが反応促進のポイントとなる。

ここで、炭材内装塊の約半分の体積が石炭で占められるため、還元反応の進行に伴って空隙率が高くなり、DRIの強度が低下する。装入された炭材内装塊が焼結化するまでの温度に達するまでの間の強度がとくに弱くなり、還元粉化が起りやすい。

粉化すると伝熱表面積は増加するが、発生したCOガスが還元に寄与せず炭材内装塊の外部に放出されやすくなり、還元反応が進行しにくい。さらに、COガスによる外部との遮へい効果が小さくなり、還元後に再酸化しやすくなる問題がある。したがって、炉内における還元粉化を抑えることが重要となる。

## 2. FASTMET<sup>®</sup>プロセス

RHFの炉床上に炭材内装塊を薄く敷いて静的に加熱還元処理することは、上述の効率的な輻射伝熱と還元粉化の抑制に有効であることから、ロータリーキルンやシャフト炉で炭材内装塊を処理する方式に比べて有利である。MIDREX社の前身であるMidland Ross社は、1960年代初頭から炭材内装ペレットをRHFで還元するHeat Fastプロセスの開発に着手し、1965年に2t/hのパイロットプラントを建設した。

しかし、それらの時期は天然ガス価格が安かったことから、同社はMIDREX法を優先したため、Heat Fastプロ

セスの開発は中断され、商業化にもつながらなかった。

その後、天然ガス価格が上昇したことを受け、1990年代に当社とMIDREX社は共同で、RHFに炭材内装ペレットを装入してDRIを製造するFASTMETプロセスの開発を再開した。

1992年に米国ノースカロライナ州にあるMIDREX社テクニカルセンターに建造した160kg/hのパイロットプラントで基礎実験を重ねた後、1995年に当社加古川製鉄所内に年産16,000t規模の実証プラントを建設した。1998年までの実証プラントの運転を通じて様々な鉱石、ダスト、石炭の原料適用性の確認を行い、また、商業プラントをにらんだ設計データを採取した結果、商業化にめどが立った。なお、この実証プラントは、2001年に加古川製鉄所内のダスト処理を行う商業プラントとして改造され、再稼動している。

FASTMETのプロセスフローを図3に示す。粉鉱石と微粉炭を混合後ペレットまたはブリケットに塊成化し、RHFの炉床上に1～2層になるように供給する。塊成化方法は、パンペレタイザまたはボーリングドラムでの造粒特性が優れている原料は球状ペレットとし、それ以外の場合は回転成型機によるブリケット化を選択する。塊成化された原料は、ドライヤにて予備乾燥された後、RHFに装入される。ペレットやブリケットはRHF内にて最高部分を1,350℃以上の温度にて急速に加熱され、6～12分の滞留時間で還元されてDRIとなって炉外に排出される。炭材内装塊は炉床上に静置されて処理されるため、粉の発生や排ガスへのダストの混入が少ない一方で、高温での還元反応により金属亜鉛や金属鉛が排ガス中に揮発分離される。

還元反応により発生したCOガスは回転炉床炉内での2次燃焼により有効活用されるため、排ガス中に未燃分(COおよびH<sub>2</sub>)がほとんど含まれない。排ガス顕熱は熱交換器にて回収された後、排ガスは冷却・清浄処理されて大気中に放出される。ここで、炉内で揮発分離された亜鉛や鉛は再酸化・固化され、排ガス中のばいじんとともにバグフィルターにて除去される。

以上のように、FASTMETプロセスは、ガスベースDRI製造プロセスの石炭ベース代替として、鉱石と石炭からDRIを製造するプロセスとして当初から開発が進め

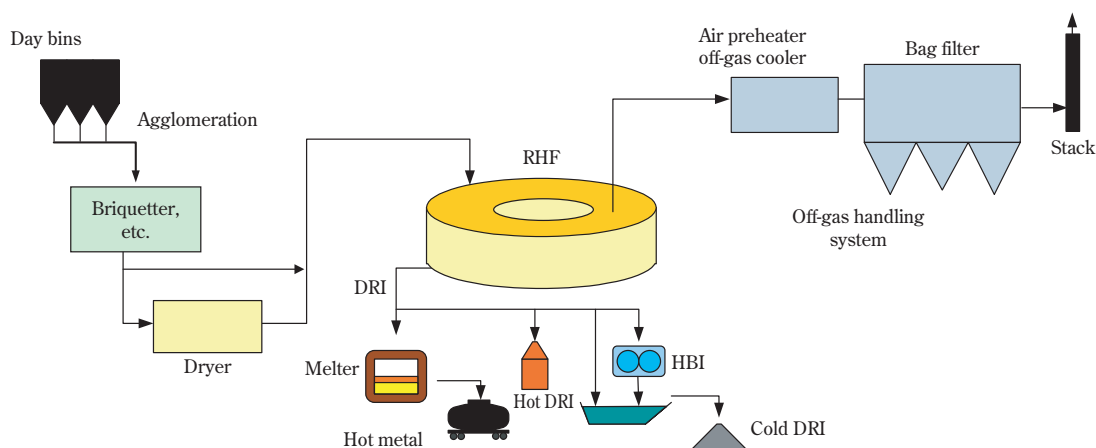


図3 FASTMET プロセスフローシート  
Fig. 3 Process flow sheet for FASTMET

られてきた。しかしながら、製造される DRI は石炭の灰分由来で鉄分比率が下がること、および石炭由来の硫黄分が高くなるといった問題があり、鉄鉱石から DRI を製造するプロセスとしては商業化が進んでいない。

一方、最近の資源・環境問題の観点から製鉄所内で発生するダストのリサイクルが進められているが、高濃度の亜鉛やアルカリ成分を含んだダストは既存の焼結・ペレット・高炉設備での再利用が困難で、そのリサイクルが課題となっていた。FASTMET プロセスでは、製鉄ダスト中に含まれる亜鉛を粗酸化亜鉛として分離し、亜鉛精錬原料としてリサイクルできるほか、鉄分は DRI としてリサイクルすることができる。こうした利点を生かし、FASTMET プロセスは製鉄ダスト処理プロセスとして商業化が進んだ。

現在は、製鉄ダスト処理プラントの商業機が 5 基稼動中で (表 1)、いずれも、製鉄および製鋼工程に向けた DRI のリサイクルが行われている。

DRI の形態としては、RHF に装入された塊のままの形で排出される DRI と、輸送や保管時の強度と耐候性に優れた熱間圧縮成型還元鉄 (Hot Briquetted Iron) の 2 種類がある。

FASTMET プロセスによって製鉄ダストを処理した時の DRI および 2 次ダスト (Zinc Dust) 組成の一例を表 2<sup>5)</sup> に示す。高還元率の DRI と飛散ダスト (鉄分) の含有が少ない高純度の粗酸化亜鉛が製造されており、製鉄ダストからの鉄源と亜鉛のリサイクルに寄与している。

表 1 FASTMET 商業プラント仕様  
Table 1 FASTMET commercial plant specification

	NSC Hirohata #1	NSC Hirohata #2	NSC Hirohata #3	JFE Fukuyama	KSL Kakogawa
RHF feed rate (t/y)	190,000	190,000	190,000	190,000	14,000
Raw materials	BOF dust	BOF dust	BOF dust	BF dust BOF dust	BF dust BOF dust EAF dust
Product application	BOF feed DRI	BOF feed DRI	BOF feed HBI	BF feed DRI	BF & BOF feed DRI
RHF outer dia. (m)	21.5	21.5	21.5	27.0	8.5
Operation start	Apr.2000	Jan.2005	Dec. 2008	Apr. 2009	Apr. 2001

表 2 還元鉄と 2 次ダストの組成  
Table 2 Analysis for DRI and zinc dust

(1) Dry ball and DRI analysis (wt%)						
	T.Fe	M.Fe	FeO	C	S	Zn
Dry ball	50.0	4.3	17.7	11.1	0.29	0.33
DRI	72.9	56.2	16.9	0.2	0.44	0.009

(2) Secondary dust (wt%)		
	Zn	T.Fe
Dust	63.4	1.11

### 3. FASTMELT<sup>®</sup>プロセス

前述の通り FASTMET プロセスによって製造される DRI には、使用する石炭由来の灰分と硫黄分が高くなる問題がある。これに対し、RHF と溶解炉を組み合わせることによって FASTMET プロセスで製造される DRI をそのまま高温で溶解し、脱硫、スラグ分離を行って溶融鉄を製造する FASTMELT プロセスが開発されている<sup>6)・7)</sup>。溶解炉としては、電気アーク炉<sup>6)</sup>に加えて、石炭と酸素を供給して熱エネルギーを得る石炭式溶解炉<sup>7)</sup>が適用できる。

1995 年に MIDREX 社テクニカルセンターの FASTMET パイロットプラントに電気式溶解炉が増設され (図 4)、それ以来、様々な原料を用いた FASTMET 還元鉄の溶解試験により高品質の溶銑製造とプロセスパラメータの採取が行われた。

石炭式溶解炉に対しては、2006 年に経済産業省からの補助金で加古川製鉄所内に新設された年産 16,000t 規模の実験プラント (図 5) により溶銑製造実験が行われた。鉄鉱石やダストを原料として製造した DRI を高温のまま溶解することにより表 3<sup>9)</sup> に示す高品質な溶銑を、表 4<sup>9)</sup> に示す炭材原単位にて効率的に製造できることが連続操業にて確認された。

RHF から排出される金属化率約 85% の DRI は、溶解炉より高い位置に RHF を配置して溶解炉に直接落とし込むか、あるいは Hot transfer conveyor などによって高温のまま溶解炉に装入される。DRI は電気アーク炉または石炭式溶解炉にて溶融され、石炭由来の灰分と硫黄分はスラグ側に移行し、スラグを分離し清浄な溶銑が製造される。溶解炉から発生する排ガスは CO を主成分とするため、回転炉床炉の燃料として使用する。

FASTMELT は、近年塊鉄石やコークス製造用原料炭の安定量の確保と価格高騰が問題になっているなかで、粉鉄と一般炭から溶銑を製造することができる。FASTMELT プラント商業機の溶銑生産量は年産 30~80 万 t で、電炉ミルへの鉄源供給のほか、高炉一貫製鉄所での増産用補助鉄源として期待される。



図 4 Midrex テクニカルセンター試験炉  
Fig. 4 Test furnace at Midrex technical center

また、類似規模の溶銑製造設備として最近主に東南アジア地区で運転されているミニ高炉に比べ、副生ガスの発生がなくエネルギー的に自己完結型で、原料の前処理設備やユーティリティーなどの付帯設備が少なくシンプルで設備となるというメリットがある。

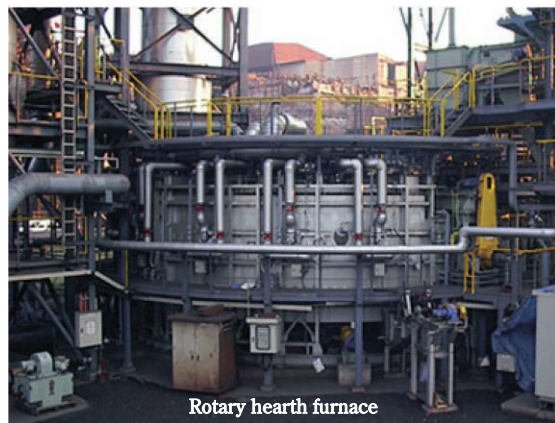


図5 FASTMELT 加古川パイロットプラント  
Fig. 5 FASTMELT Kakogawa pilot plant

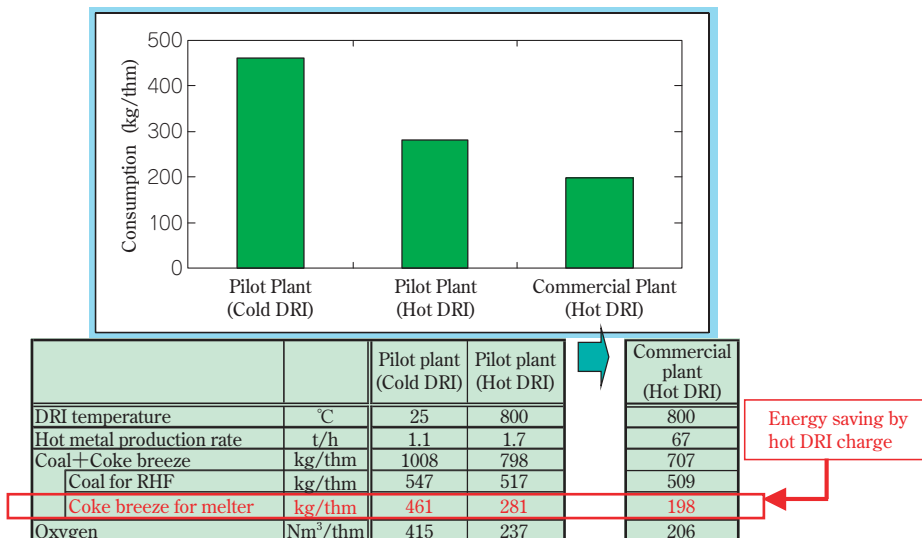
表3 代表的な種湯成分

Table 3 Typical chemical analysis of charging hot-metal

(%)			
C	Si	S	P
4.3~4.7	0.15~0.30	0.030~0.060	0.090~0.120

表4 ホット DRI, 50万 t/年級メルタ炉のトータル炭材原単位予測

Table 4 Prediction of total carbon unit consumption for pilot plant and commercial plant



#### 4. ITmk3®プロセス

1995年にFASTMETプロセスの技術開発の過程で実験炉（回転炉床炉）を高温で運転した際に、金属鉄とスラグが分離したDRIの生成が発見された。それを契機に、炭材内装塊から粒鉄（アイアンナゲット）を製造するITmk3プロセスの研究が進められた。

ITmk3プロセスは、FASTMETプロセスと同じくRHFに炭材内装ペレットを装入するが、RHF内でDRIの溶融域まで還元加熱してスラグを分離する<sup>8)</sup>、従来の炭材内装プロセスとは異なるコンセプトをもとに開発された第3世代の製鉄法と位置づけられている<sup>5)</sup>。

当社および国内外の協力研究機関による1996年以降の基礎研究を経て、1999年に当社加古川製鉄所内に建設したパイロットプラントによりプロセスのコンセプトを検証した。

引続き、2002年に米国ミネソタ州に建設を開始したパイロットデモプラントにより、連続運転の達成と商業プラント建設のためのエンジニアリングデータを採取して2004年に実証試験を完了した。2009年米国ミネソタ州に年産50万トン規模の商業1号機の建設が完了し、2010年1月より商業運転が開始された。パイロット、デモ、商業プラントそれぞれの仕様を表5に示した。

ITmk3プロセスは、FASTMETと同様に粉鉱石と微粉炭を混合しペレタイザで炭材内装ペレットに造粒した後、ドライヤで予備乾燥してRHFに装入する。炭材内装ペレットをRHF内で1,350~1,450°Cに加熱すると、前述したとおりCOガス生成とCOガスによる酸化鉄の還元反応により金属鉄が生成されるとともに、金属鉄の浸炭が進む。その結果、図6<sup>4)</sup>の状態図に示したように、高炉に比べて低温かつ高速で鉄からスラグが分離し、溶融鉄が粒状に凝集する。そして、凝集した溶融鉄とスラグは冷却されてRHF外に排出される。これら一連の反応は8~10分で完了するが、鉄分とスラグは明瞭に分離される<sup>4)</sup>。

ITmk3は適用原料のフレキシビリティが高いことに加

表5 ITmk3のプラント仕様  
Table 5 ITmk3 plant specification

	Kakogawa pilot plant	Mesabi pilot demonstration plant	1st commercial plant
Location	KSL Kakogawa works	Northshore, MN, USA	Hoyt Lake, MN, USA
Operating period	1999/8 ~ 2000/12	2003/5 ~ 2004/8	2010/1 ~
Capacity (t/y)	3,000	25,000	500,000
RHF diameter (m)	5	14	60

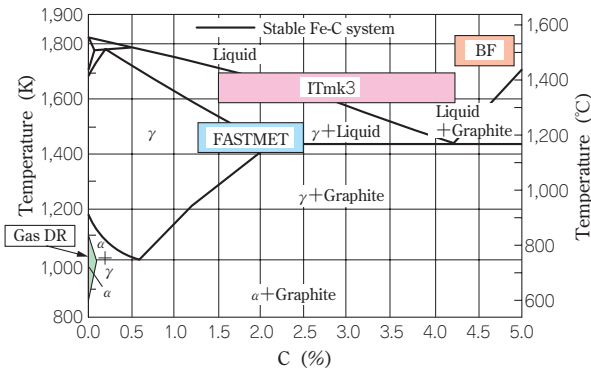


図6 Fe-C状態図  
Fig. 6 Fe-C phase diagram

表6 アイアンナゲット仕様  
Table 6 Iron nugget specification

Metallic Iron	96~97%
Carbon	2.5~3.0%
Sulfur	0.05~0.07%
Size	5~25mm



図7 アイアンナゲット外観  
Fig. 7 Iron nugget shape

え、付加価値の高い製品が製造できることが大きな特長である。製造される代表的なアイアンナゲットの品質を表6<sup>4)</sup>に、外観写真を図7<sup>4)</sup>に示す。スラグフリーで鉄分が高く適量なC分を含むアイアンナゲットは、良好な化学性状を有するうえに、輸送・貯蔵時のハンドリング特性や溶解特性に優れた物理性状を備えることから、転炉や電気炉の製鋼工程用原料（鉄源）として生産性、原単位、品質の向上に寄与することが期待される。

## 5. 石炭ベース還元プロセスの展望

鉄鋼業が直面している原料確保とCO<sub>2</sub>削減という課題に対して、石炭ベース還元プロセスに期待される役割を以下に展望する。

### 5.1 鉄鋼原料の確保

2008年の世界粗鋼生産量は13.3億t、そのなかで中国は5億tに達した。2002年の世界生産量は9.0億t、うち中国は1.8億tであったことから、この間に世界生産量は約1.5倍、中国生産量は2.8倍になったことになる。これに伴い、鉄鉱石価格（日本CIF価格）は、2002年に\$20~30/tのレベルであったものが2009年には\$100/tを超えるまで高騰し、原料炭価格（日本CIF価格）も2002年に\$50/tのレベルであったものが2009年には\$130/tのレベルまで高騰した。

2008年の金融危機以降、直近の粗鋼生産量および価格はともに着落きを取戻している。しかし、中長期的にはインドをはじめとした中進国が中国に続き、世界粗鋼生産量のさらなる増加が予想される。鉄鉱石や原料炭は、大手鉱山会社による寡占化が進んでいることから、世界粗鋼生産量の増加に伴う原料需要増により将来的に適正価格で必要量を確保できるか懸念される。

さらに、現在広く利用されている高品位鉄鉱石（鉄分60%以上）のほとんどが高品位のヘマタイト縞状鉄鉱層（Banded Iron Formation）から採掘されている。この鉄鉱層は、鉄鉱石を埋蔵する堆積鉄床が隆起後に天水や火成岩系熱水による富化作用を受けたもので、地球全体のごく一部分に過ぎず、いずれ枯渇していく傾向にある。

今後は、低品位の堆積鉄床での採掘へと転換が進むものと予測されるが、低品位鉄石の選鉱処理によって鉄分比率を上げることが必要となってくる。低品位鉄石の選鉱時には、鉄と脈石の分離性を上げるべく鉄石の微粉砕が必要となり、製品鉄石は極めて細かい粒度（ $-44\mu > 80\%$ ）となる。そのため、選鉱処理した微粉鉄石を高炉で使用するには焼成ペレット化が必要であるが、焼成ペレット化の加工マージンは少額のため、プラントの経済性が成り立つためには、スケールメリットを求めた大規模なペレットプラントおよび港湾などのインフラ設備が前提となる。その結果として、埋蔵量の少ない小規模鉄山の粉鉄石の利用が遅れ、ますます大手鉱山会社の寡占化が進むことが懸念される。

それに対し、石炭ベース還元プロセスは微粉鉄石をそのまま使用できるため、ペレットプラントが不要で、小規模鉄山を含む広範囲な微粉鉄石に適用可能である。とくに、ペレットプラントに比べて小規模であるITmk3のプラントを小規模鉄山の山元に建設し、付加価値の高いアイアンナゲットを生産するビジネスモデルにより、今までは手のつかなかった低品位鉄石の利用が可能となる。米国ミネソタ州に建設したITmk3商業1号機も、鉄源安定供給を求めた米国電炉メーカーが、これまで高品位鉄石が掘り尽された低品位鉄山を買取り、そこから産出される低品位鉄から自社向けにアイアンナゲットを製造するものである。

このように、当社石炭ベース還元プロセスの適用により、低品位鉱山や小規模鉱山からの鉄源供給を促進できることから大規模鉱山会社の寡占化を妨げることができ、鉄源の安定供給と適正価格維持に貢献するものと期待される。

一方、高炉コークスの原料となる粘結性のある原料炭の可採埋蔵量は全体の10%程度と言われており、枯渇が心配されている。さらにCO<sub>2</sub>排出問題をはじめとするコークス炉の環境負荷も問題となっている。とくに先進国を中心に老朽化したコークス炉の更新・新設が困難となっている状況にあり、高炉コークスの供給はますますタイトとなる可能性が高い。このため、石炭ベース還元プロセスは、一般炭の使用が可能でコークスレスの製鉄法の一つとして注目されている。

## 5.2 スクラップの利用拡大によるCO<sub>2</sub>削減

2009年9月に開催された国連気候変動首脳会合において「2020年までに、日本はCO<sub>2</sub>排出量を1990年比で25%削減することを目指す」と表明されたが、日本のCO<sub>2</sub>総排出量の約16%を占める鉄鋼業に対するCO<sub>2</sub>削減圧力は今後ますます強くなると予想される。とくに製鉄工程は、鉄鋼業におけるCO<sub>2</sub>排出量の60%以上を占めているとされ、製鉄工程のCO<sub>2</sub>排出量の削減は重要となる。

高炉での製鉄・製鋼工程では、鉄鉱石を還元する際に最も多くのエネルギーを消費しており、高炉一転炉法によって溶鋼1tを製造するのに約2tのCO<sub>2</sub>が排出される。一方、スクラップを電気炉で溶解して溶鋼1tを製造するのに排出されるCO<sub>2</sub>は約0.5tと1/4である。したがって、高炉一転炉法からスクラップベースの電気炉法へ転換することがCO<sub>2</sub>削減に非常に有効となる。

なお、近年、高炉一転炉法においてもスクラップが利用されているが、利用量に制約がある。すなわち、高炉では、炉頂での垂鉛の付着や原料装入装置でのスクラップのハンドリングができないといった理由からスクラップの利用には限度があると言われている。また転炉では、スクラップの溶解エネルギー補完の限界やスクラップ中の不純物の問題があるため、転炉一高炉法のスクラップ利用率は10~15%程度にとどまっている。

ここで、スクラップベースの電炉法はCO<sub>2</sub>削減に非常に有効であるが、スクラップの品質と景気動向に大きく左右される価格変動が問題となる。通常のスクラップ中にはトランプエレメント(Cu, Snなど)が含まれており、その含有量の増加が下流の連铸・圧延工程での加工品質に悪影響を与える。トランプエレメントは溶銑や溶鋼を処理しても除去することができないことから、その含有量をコントロールするには、清浄なスクラップを原料に選ぶか、DRIや冷銑鉄などの清浄鉄源で希釈する必要がある。また今後、スクラップリサイクルニーズの高まりによってスクラップ回収が促進される一方で、自動車加工くずなどの清浄スクラップの発生量はそれほど増えないと見込まれる。このため、スクラップの清浄度はさらに劣悪になると予想され、良質なスクラップの安定確保が困難となる。

以上述べたように、今後スクラップの利用が増えるに

従って、製品の品質確保とコスト維持のためにDRIなどの清浄鉄源の需要は確実に増えることが予想される。しかしながら、現状のDRI生産の75%を占める天然ガスベースDRIの供給量は、DRI製造プラントの立地が天然ガス産出地域に限られること、および原料がガスベースDRグレードの高品位ペレットに限られ、供給量に限界があることから、需要増に十分に対応できるが懸念される。

そうしたなか、石炭ベース還元プロセスによるDRIや清浄鉄源供給がその需給ギャップを埋めることによってスクラップベース電気炉法への転換を促進し、その結果として鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出量が大きく削減されるものと期待される。

## 5.3 ダスト処理

FASTMETによる製鉄ダスト処理は、廃棄されていたダストから貴重な鉄源を回収する一方で、CO<sub>2</sub>を削減する効果もある。

すなわち、ダスト中のFe分は一部還元されてFeやFeOの形態となっており、その再利用によって還元エネルギーが削減できる。さらに、ダスト中のC分も還元材として再利用することによって石炭やコークスの使用量が削減でき、その結果としてCO<sub>2</sub>排出量が削減される。

ところで、今後、高炉一転炉法で利用されるスクラップの量は大きく変わらないもののスクラップの品質低下が予想され、製鉄ダスト中の垂鉛やアルカリ濃度も高くなる。このため、ダストからそれらを分離してDRIと垂鉛のリサイクルを可能にするFASTMETプロセスによるダスト処理の需要は増えると思われる。

さらに、高炉一転炉法から電気炉法への転換により、今後、電気炉発生ダスト量の増加が予想される。電気炉ダストの一般的な組成は表7<sup>6)</sup>のとおりであるが、垂鉛や塩濃度が高く鉄分が低いことから、有効利用されずに埋立て処分されているケースが多いのが現状である。

こうしたなか、電気炉ダスト処理にFASTMETプロセスを適用し鉄源と垂鉛を回収・リサイクルすることが望

表7 電気炉ダスト、DRI、粗酸化垂鉛ダストの組成  
Table 7 EAF dust, DRI and crude zinc oxide analysis

(1) EAF dust analysis (wt%)								
	T.Fe	Zn	Pb	C	CaO	SiO <sub>2</sub>	S	Cl
Dust # 1	31~33	17~19	1	3	3~4	4~8	0.4	1~2
Dust # 2	21~25	26~29	1~3	3~6	2~4	3~5	0.4~0.6	5~7
(2) DRI analysis (wt%)								
	T.Fe	M.Fe	Zn	Pb	C	CaO	SiO <sub>2</sub>	S
Dust # 1	46~53	40~46	0.7~2.4	0.1	5~11	5~8	9~13	0.6
Dust # 2	42~50	35~41	1~4	0.1~0.6	3~15	6~12	8~14	0.6~1.0
(3) Crude zinc oxide analysis (wt%)								
	T.Fe	Zn	Pb	C	CaO	SiO <sub>2</sub>	S	Cl
Dust # 1	~0.2	64~70	3~4	~0.1	0.1~0.2	0.1~0.2	0.4	5~8
Dust # 2	~0.7	57~62	4~6	~0.1	0.1~0.8	0.1~0.2	0.2~0.5	9~16

まれており、当社においても、加古川製鉄所内の実験プラントでの処理試験をはじめとして研究開発の段階は完了し、商業プラントの建設が待たれている段階である。

#### 5.4 グリーンエネルギーの活用

FASTMET/FASTMELT/ITmk3 プロセスは還元炭材とバーナ燃料が必要である。ウッドチップなどのバイオマス由来のC分を還元材に活用すること、またはバイオマスやごみをガス化してそれをRHFのバーナ燃料ガスとして活用することによってCO<sub>2</sub>排出量を削減することが技術的には可能である。

都市部から発生する都市ごみや下水汚泥、産業廃棄物を環境と調和した形でリサイクルするアイデアの一つとして、それらを原料にDRI源を製造することを社会全体の中の仕組みとして取組むことで実用化が期待できる。

また、ITmk3のプラントを鉱山の山元に建設し、その周囲の広大な土地を利用して栽培した再生可能なバイオマス(Renewable Energy)を原料として還元鉄源を製造することも考えられる。

#### むすび

1) 良質な鉄鉱石や原料炭が枯渇し、安定確保が困難となっていくなか、コークスレスで原料性状に対する制約の少ない石炭ベース還元プロセスは、製鉄原料の多

様化を推し進めることが期待される。その結果、大手鉱山の寡占化に歯止めをかけることができ、鉄鋼原料の安定確保につながる。

2) 石炭ベース還元プロセスによる清浄鉄源の安定供給が、今後品質が劣悪化すると予測されるスクラップの緩衝材としての役割を果たし、鉄鋼業のスクラップベース電気炉法への転換を促進する。その結果、鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出量の削減が期待できる。

3) 鉄鋼業から排出されるダストのみならず、一般社会から発生するごみや廃棄物およびバイオマスが活用できるDRI製造技術の開発により、地球環境と調和した製鉄業の持続的存続への貢献が期待できる。

#### 参 考 文 献

- 1) MIDREX: 2008 World Direct Reduction Statics (2009).
- 2) W.Schnabel et al.: Ironmaking Conf. Proceeding 42 (1983).
- 3) 田中英年: 日本鉄鋼協会, 西山記念講座 (2008).
- 4) 原田孝夫ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.2 (2005), pp.128-132.
- 5) T. HARADA et al.: KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, No.24 (2001), pp.26-31.
- 6) 特許: 第3509072号.
- 7) 特許: 第3940366号.
- 8) 特許: 第3845893号.
- 9) 藤本英明ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.59, No.2(2009), pp.73-79.