

# 新鉄源製造技術の展開

稲葉 晋一\*

Overview of New Direct Reduced Iron Technology

Shinichi INABA

**Synopsis :** The technology of direct reduced iron production is reviewed for a look at the future trend of alternative iron source out of the blast furnace route. High productivity direct reduced iron based on the demand on mini-mills has been established by the enlargement of furnace size and high temperature reduction. New technical development in the alternative iron world is a conjunction with rotary hearth furnace and iron ore agglomerate with incorporated carbon. The carbon composite agglomerate is reduced in the time less than 10 min at 1300–1400°C in the rotary hearth furnace. The carbon composite agglomerate and rotary hearth furnace technology allows the recycling of residues due to the next century.

**Key words:** ironmaking; direct reduction; direct reduced iron; rotary hearth furnace; DRI production; DRI usage; alternative iron; iron ore agglomerate with incorporated carbon; carbon composite agglomerate; recycling.

## 1. 緒言

高炉によらない製鉄法の一つである直接還元製鉄法は酸化鉄を溶解することなく金属鉄に還元するプロセスと位置付けられてきた。

現在では還元剤として天然ガスを用いる MIDREX 法と HYL 法が世界の還元鉄生産の 90% 程度を占めてはいるが、その他にも種々のプロセスが考案され稼働している。この直接還元製鉄法は 1957 年に稼働した HYL-I プロセスに刺激される形で 60 年代後半から 70 年代にかけて競って研究・開発され、建設された。現在知られているプロセスのほとんどがこの時期に開発されている。これらの直接還元製鉄法は、高炉法が必要とするコークス炉をはじめとした付帯プロセスが不要なことから、発展途上国のみならず、先進工業国においてもミニ・ミルの中心となってきている。したがって、各国、各地域の実情に即したプロセスが要求され、還元剤として、天然ガスのみならず、石炭を活用したプロセスが発展しつつある。また、製鉄廃棄物からの鉄をはじめとした有価金属の回収や、リサイクルの有効な方法としても発展し始めている。

本報告では、還元鉄の発展過程を概観するとともに、最近、再び注目されつつある炭材内装塊成鉱を用いた還元鉄製造技術の方向を展望する。なお、個々の還元鉄製造プロセスの特徴は、既に多くの良書<sup>1,2)</sup>があり、言及しないこととする。

## 2. 鉄鋼生産における還元鉄の位置づけ

直接還元製鉄法によって生産される還元鉄は、最近、再び高炉での使用が試みられつつあるが、主体的には電気炉製鋼で使用されている。Fig. 1 に粗鋼の生産量を還元鉄-電炉ルートと高炉-転炉ルートで比較して示す。1998 年の世界の粗鋼生産量 7.2 億トンの内、還元鉄-電炉ルートによって生産される粗鋼は約 2.6 億トンで、約 3670 万トン<sup>3)</sup>の還元鉄が電気炉に供給されている。

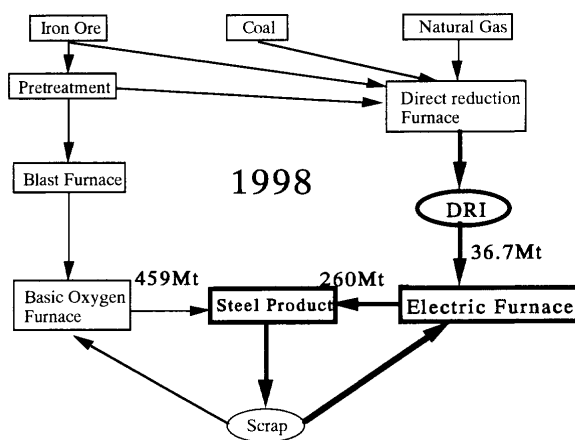


Fig. 1. Crude steel route on the ironmaking and steelmaking manufacture.

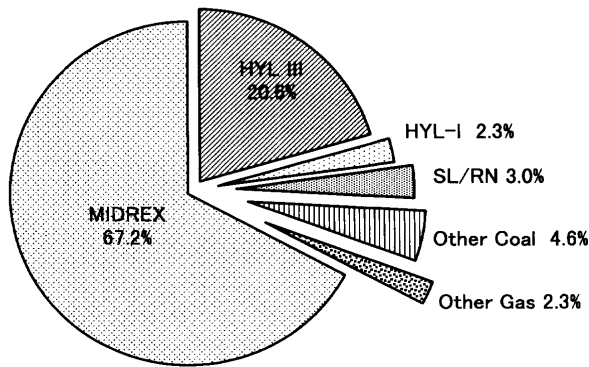


Fig. 2. World DRI production by process in 1999<sup>4)</sup>.

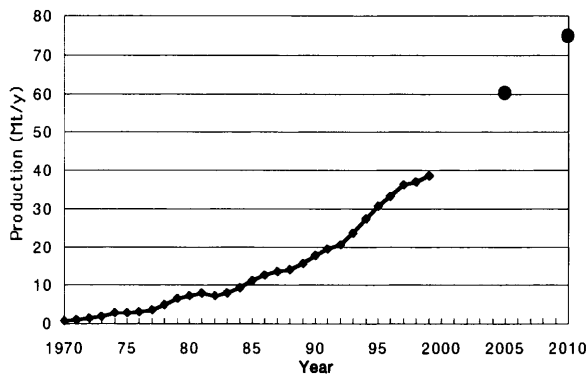


Fig. 3. World DRI production and trend by year<sup>4)</sup>.

### 3. 還元鉄の生産状況

主要プロセス別の1999年の還元鉄生産量をFig. 2に示す<sup>4)</sup>。MIDREXプロセスが全生産量の67.2%を占め、HYLプロセスがIとIIIを合わせて約23%を生産している。

Fig. 3に世界の還元鉄生産量の過去30年間の推移と今後の予測を示す<sup>4,5)</sup>。1980年頃より急激な増加を示してきたが1998年よりその増加率が低下している。しかし、還元鉄の生産は経年的には増加傾向にあり、世界の還元鉄生産量は2005年には6000万トン、2010年には7500万トンに達するものと予測されている<sup>4)</sup>。このような増加の主な理由として電気炉製錬の増加、ミニ・ミルの高級鋼生産量の増加、連続鋳造の採用に伴う自家発生スクラップの減少が考えられている。

### 4. 還元鉄利用の利点

還元鉄は主に不純物の少ない鉄鋼原料として高炉、転炉あるいは電気炉で使用されている。特に、ミニ・ミルの発達した米国ではFig. 4に示すように<sup>6)</sup>、1991年以降電気炉での使用量が飛躍的に増加している。高炉では、一般には、一時的に銑鉄の増産が必要になった時に使用されているが、小・中型高炉で還元鉄を常時使用し、出銑比3.5以上を維持して銑鉄の増産を図っている例もある<sup>7)</sup>。一方、日

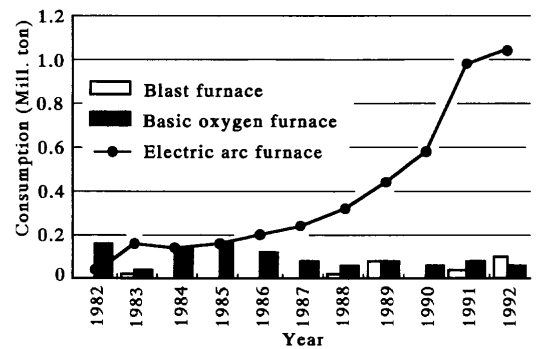


Fig. 4. Consumption of DRI/HBI by furnace type in U.S.<sup>6)</sup>.

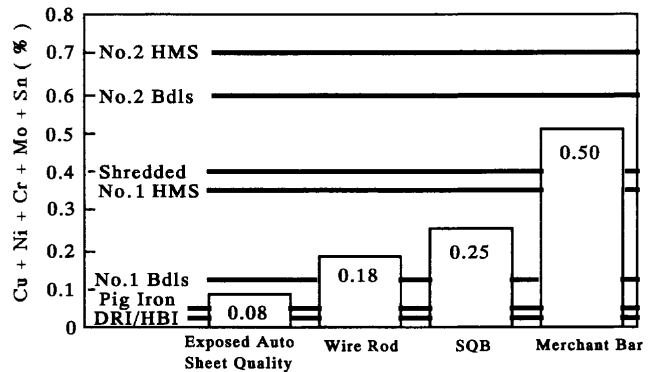


Fig. 5. Residuals levels in steel grade and charge materials<sup>22)</sup>.

本の鉄鋼、特に高炉各社はそれぞれ得意とする高炉の高生産性技術を保有しており、また、還元鉄が自家製造銑鉄に比して高価であるため、高炉や転炉で還元鉄を使用することには消極的である。

還元鉄を高炉で使用した場合の効果は1960年代初期にU. S. Bureau of Minesの試験高炉や商業高炉で精力的に調査された<sup>8-10)</sup>。また、1960年代末から1970年代始めにかけて、日本の八幡製鉄<sup>11)</sup>、富士製鉄<sup>12)</sup>や川崎製鉄、あるいはメキシコの高炉でも実施された<sup>13)</sup>。その結果、還元鉄の金属化率が10%増加することにより約8%の溶銑が増産でき、約7%のコークス比が低下すること、および還元鉄の微粉を羽口から吹き込むより塊で炉頂から装入の方が熱の有効利用の点で有利であること<sup>14)</sup>が確認された。また、金属化率の高い還元鉄を多量に使用する場合にはコークス比の減少する割合や出銑比の増加割合が小さくなるために、単基の高炉で集中的に使用するより複数高炉に分散して使用する方が得策である<sup>15)</sup>。

還元鉄は転炉製鋼では冷却剤として少量が使用されているに過ぎず、電気炉製鋼において最も多量に使用されている。しかし、日本の電気炉は還元鉄に強い興味を持ってはいるものの、ほとんど試験的な使用にとどまっている<sup>16)</sup>。電気炉で還元鉄を使用することの得失は次のように集約できる。

①還元鉄はFig. 5に示すようにスクラップあるいは銑鉄に比して不純元素 (Cu+Ni+Cr+Mo+Sn) の含有量が極め

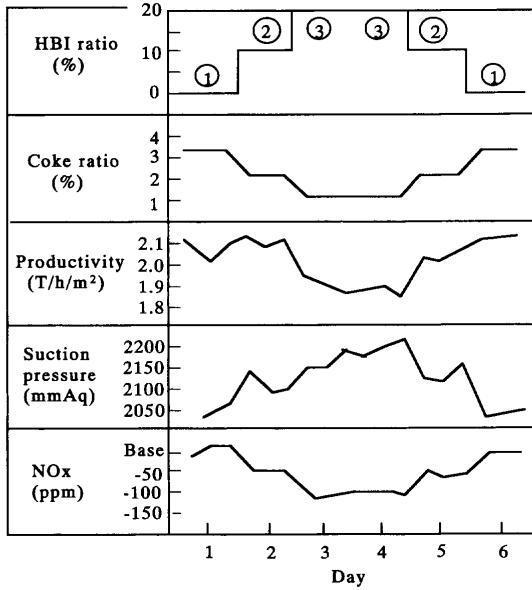


Fig. 6. Operation results using HBI fine at Nakayama Works<sup>23)</sup>.

- て少なく<sup>17)</sup>、鋼中の不純元素を希釈・低減できる<sup>18,19)</sup>。
- ②還元鉄の使用により、溶鋼のバブリングが活発となり介在物が減少する<sup>20)</sup>。また、溶鋼中のN含有量が低下する<sup>21)</sup>。
- ③出鋼間隔時間が短縮し、製鋼歩留まりが向上する<sup>20)</sup>。
- ④未還元FeOと脈石量に応じて電極消耗量と電力消費量が増加する<sup>22)</sup>。

還元鉄のふるい下粉を焼結鉱製造プロセスのコークスブリーズの代替として使用して、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>発生量を抑制する試みがなされている<sup>23,24)</sup>。Fig. 6 に一例を示すが、還元鉄のふるい下粉を20%使用した場合にはNO<sub>x</sub>は基準値に対して100ppm低下した。

## 5. 還元鉄製造技術の発展の動向

### 5.1 従来の還元鉄製造プロセスにおける技術改善

世界的な鉄鋼需要の増大、アメリカを中心とした一貫製鉄設備の老朽化と発展途上国の鉄鋼需要によるミニ・ミルの増加、および老朽スクラップの増加に伴うスクラップ品質の低下が還元鉄需要の増大をもたらしてきた。その結果、還元鉄製造技術は生産性の増大、還元鉄製造時のエネルギーの節減、製鋼コスト低減への対応を主要な技術課題として研究・開発されている。

#### 5.1.1 還元鉄の生産性の向上

生産性の向上は設備の大型化によって達成されるのが一般的である。Table 1 に一例を示す。ロータリーキルンやロータリーハースは高温部に駆動設備を持つことから、大型化には限界がある。また、還元鉄の生産はMIDREXとHYLの2大プロセスが主流であったため、これまではシャフト炉の連続化、大型化が推進されてきた<sup>25-27)</sup>。

Table 1. Shaft size and production capacity of MIDREX process<sup>26,27)</sup>.

Shaft internal dia. (m)	Production (t/y)
4.25	250,000 to 350,000
5.0	350,000 to 550,000
5.5	550,000 to 800,000
6.5	800,000 to 1,200,000
6.65	1,200,000 to 1,360,000
7.5	1,360,000 to 1,800,000

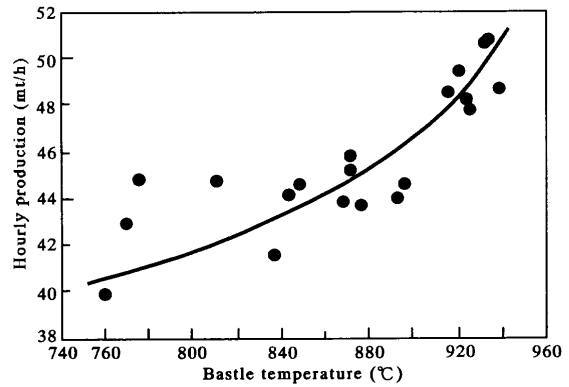


Fig. 7. Influence of bustle gas temperature on production rate<sup>28)</sup>.

生産性を高める今ひとつの方法はFig. 7 に示すように、吹込み還元ガスの温度を高くして還元速度を速くすることである<sup>28)</sup>。シャフト炉を高温で操業する場合の問題点の一つは還元鉄のスティッキングであるが、ペレットと塊鉱石の混合使用やペレット表面への石灰系酸化物の被覆<sup>26)</sup>等により、900°C以上の還元が行われている。

#### 5.1.2 高温還元鉄の直接装入技術

ミニ・ミルや発展途上国での鉄鋼生産のコスト低減を狙いとして、還元鉄を高温のまま製鋼炉に供給する技術が開発されている。その代表的プロセスはHYLのHYTEMP<sup>29)</sup>とMIDREXのHOTLINK<sup>30)</sup>である。これらの技術は650~700°Cで排出された還元鉄を直接電気炉に装入するものである。HYTEMPのデモンストレーション・プラントの操業結果によれば<sup>29)</sup>、650°Cの還元鉄を電気炉で70%使用することにより、電力消費量、電極消耗量ともに約19%低下し、生産性は16%向上している。

#### 5.1.3 還元鉄中炭素含有量の増加

最近の電気炉操業ではO<sub>2</sub>吹込みが行われており、通常1~2% C<sup>17)</sup>の還元鉄中の炭素含有量を更に0.5ポイント程度増加させることが要望されている<sup>31,32)</sup>。鉄浴中でのCの酸化熱で溶解に消費する電力量を節約するために、ミニ・ミルによっては更に高い炭素量を要求するようになっており、4% C程度の還元鉄の生産が試みられている<sup>33-35)</sup>。この高炭素化を達成するために、還元ガスの温度を高めるとともに、通常の還元ガスに加えて、天然ガスを酸素で部分燃焼させて吹き込むプロセスが開発されている<sup>36,37)</sup>。

#### 5.1.4 炭化鉄ペレットの製造

1994年末、Nucor社は流動層を用いて粉鉱石から直接炭

化鉄を作るアイアン・カーバイド・プロセスの工業的生産を開始した<sup>38,39</sup>。炭化鉄は再酸化しにくく、ハンドリング性に優れ、製鋼段階での溶解性も良好で、ミニ・ミルを中心とした新鉄源の需給状況に一大変革をもたらす可能性があるとの考えから、世界的に注目され、いくつものプラントが検討された<sup>40</sup>。しかし、Nucorプロセスは数年間の努力<sup>41</sup>にもかかわらず、安定した生産を達成することができず、1999年1月に工業的生産は中止された<sup>42</sup>。

我が国においては、炭化鉄を安定に生成するための条件が研究されるとともに<sup>43-45</sup>、炭化鉄の生成過程で炭素の析出を抑制し、広い温度範囲で安定して生産するためには、還元ガス中に極少量の硫黄を添加することが有効であることが示された<sup>46,47</sup>。この成果を基に直径10数ミリのペレット状炭化鉄の生産が研究され、溶解試験において炭化鉄の

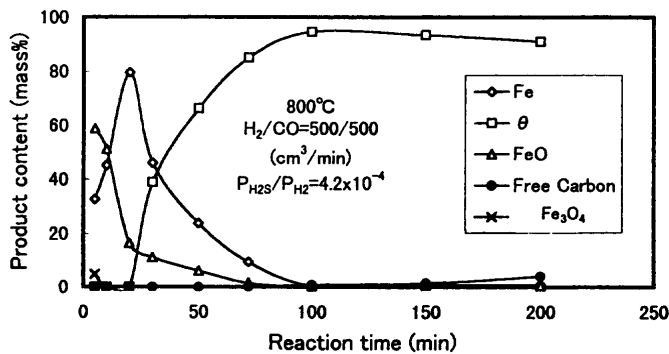


Fig. 8. Typical variation of product contents in a single pellet with reaction time at 800°C<sup>48</sup>).

溶解歩留まりの高さが証明された<sup>48</sup>。Fig. 8は酸化鉄ペレットを800°Cで反応させた時に生成する炭化鉄中各成分の生成状況である。θ相(Fe<sub>3</sub>C)の生成状況から約1.7hで完全に炭化鉄が生成する。この炭化鉄ペレットは流動層で生産される微粒炭化鉄に比して、はるかにハンドリング性に優れ、電炉で使用する場合の利点は大きいと考えられる。

しかし、還元ガス中に硫黄を含むことから、従来の天然ガスリフォーマーを有する還元鉄プロセスでは、触媒の被毒が懸念され、プロセスの変更を要することから実用化の動きは見られていない。

5・2 炭材内装塊成鉱を用いた高速還元鉄製造技術

5・2・1 還元鉄製造における炭材内装塊成鉱の位置づけ

Table 2は現在世界で開発中あるいは稼働している直接還元製鉄法の主なものを、装置形状と使用する還元材によって、分類したものである。表から明らかなように、還元温度の上昇とともに、固体炭素のガス化(ソリューション・ロス)反応が活用され、1100~1300°Cの高温度では、固体炭材が内装されている。微粒の固体炭素と酸化鉄を混合・成形した炭材内装塊成鉱は高炉や熔融還元よりも低い温度で高速還元することができる。炭材内装塊成鉱は一般にはハンドリング強度が低いために、これを用いた還元鉄の製造プロセスでは、静的状態で加熱・移動できるロータリーハース炉を用いることが考えられている。このプロセスは、炭材として石炭を使用できるため、天然ガスを産出しない地域でも採用できるプロセスである。しかも、設備的に簡単なため、建設費が安価で、発展途上国でも容易に採用で

Table 2. Classification of DR plants on reductant source, furnace type and reduction temperature.

Reductant	Natural gas			Coal		Heavy oil	Reduction temp.(°C)	Charged Solid Carbon	Reaction	Temperature distribution in bed	Condition in bed
	H <sub>2</sub> O reforming	CO <sub>2</sub> reform	Without reform.	Coal gasific.	Direct use	Direct use					
Fluidized bed	FIOR-I FINMET (FIOR-II) Iron Carbide CIRCORED HIB						~700			Uniform in the reactor	Prone to sticking
				CIRCOFER			850 900~950				
Shaft furnace	Retort	HYL-I					800~1000			Distribution in the height	
	Moving bed	ARMCO HYL-III PUROFER	MIDREX	AREX GHAEM							
Rotary furnace	Rotary kiln					Kinglor-Metor Tecnoerd	1000~1100 1100~1300			Uniform in the height	
	Rotary hearth					Heat Fast INMETCO FASTMET COMET	1100~1300	Mixed in agglomerate	Accompanied by solution loss reaction		

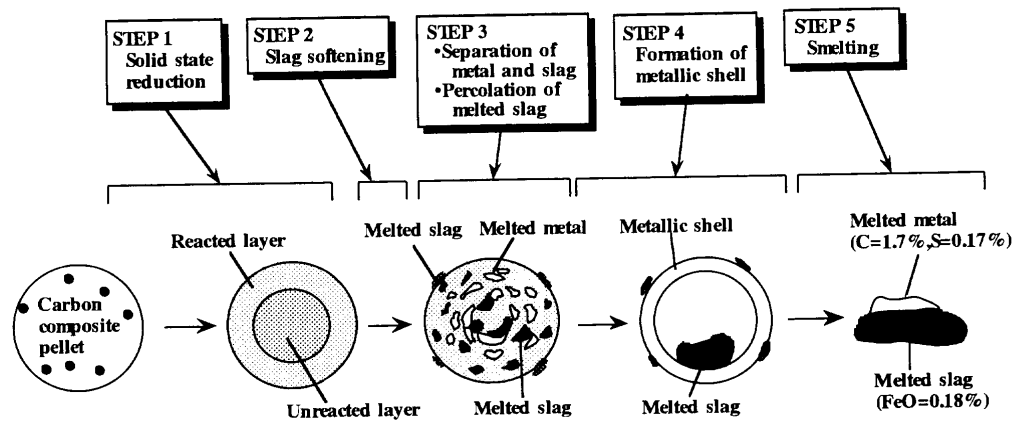


Fig. 9. Schematic image of molten iron production process<sup>54)</sup>.

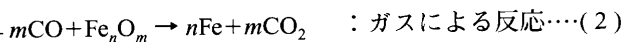
きる。

炭材内装塊成鉱の反応効率を高めるためには微粉の炭材と酸化鉄の接触密度を高めることが重要で、次の基本的特性が解決されねばならない。

- ① 固体炭素のガス化反応による大きな吸熱を伴うため、高い伝熱特性を持つ高密度の炭材内装塊成鉱が必要である。
- ② 炭材内装塊成鉱は炭材を含むために大気中で焼成して強度を高めることができない。したがって、何らかのバインダーを使用して冷間で結合させ、還元段階においても炭材内装塊成鉱に大きな荷重が懸からないプロセスが必要である。

5・2・2 酸化鉄の固体炭素による還元反応と反応挙動

この酸化鉄の固体炭素による還元は反応によって生成するCO, CO<sub>2</sub>ガスを介在して相互に影響しあって進行し、一般にその反応式は次のように表される<sup>49)</sup>。



(1) 式の酸化鉄と炭素の固体反応は鉱石と炭材が接触し続けることが前提となるが、反応生成物が離脱するために、接触を継続できず、還元速度は急速に低下してしまう<sup>50)</sup>。900°C以上の高温では、固体の酸化鉄と炭素の接触が維持できずに反応速度が低下したとしても、(2) 式と(3) 式の反応が連鎖することによって還元反応は進行し続けることができる。この連鎖反応の進行は熱の供給速度によって律速されると考えられている<sup>51)</sup>。

したがって、炭材内装塊成鉱の還元は、昇温速度と最高加熱温度に大きく影響される。炭材を20%内装するペレットを昇温速度10°C/min、最高加熱温度1100°CでN<sub>2</sub>気流中で反応させた場合、最高温度到達後30min保持して金属化率95%が得られる<sup>52)</sup>。また、最高温度1300°Cで加熱した場合には加熱開始後10min以内に還元率99%を得

る<sup>53)</sup>。

雰囲気温度1400°CのN<sub>2</sub>気流中で加熱した場合の炭材内装塊成鉱は最終的にはスラグとメタルが分離する。その反応過程は次のように総括されている<sup>54, 55)</sup>。

- ① 1100°Cを越えて加熱するとカーボン・ソリューション・ロス反応と酸化鉄の還元反応がともに活発化して還元はペレット中心部まで急速に進行する。ペレット表面から金属化が進行する。
- ② 1230°Cを越えると、還元反応が減少してCO<sub>2</sub>発生量が減少するため、吸熱反応量が減少する。このため、表面からの伝熱量が増加する結果、昇温速度が再び増加する。温度の上昇とともにスラグの軟化・溶融・分離が開始し、ペレット表面にスラグが染み出すとともに、表面に緻密な金属鉄殻を形成し、内部にスラグが凝集し、この時点で溶融する。

この還元・溶融過程はFig. 9のように図式化される。

しかし、このような還元溶融過程で外周部に金属鉄殻を生成したペレットが複数個接触した場合には、接触部分への還元ガスの供給が阻害されるため還元が進行しにくくなる。また、この部分の加熱速度も遅くなるため、FeOが多量に生成して溶融が始まり、内部が中空の“つらら”が形成されることとなる<sup>56)</sup>。

5・2・3 ロータリーハースによる高速還元鉄製造プロセス

炭材内装塊成鉱をロータリーハース上で1250~1400°Cの高温で急速に加熱することにより、10min前後の短時間で還元鉄を生成できることが明らかになっており、プロセスの実用化開発が行われている。ロータリーハースでは、シャフト炉やロータリーキルンのような塊成鉱粒子の相互摩擦や、転動がないため、比較的強度の低い塊成鉱が使用できる。このため、還元鉄の製造のみならず、製鉄ダストやスラッジの処理やリサイクルに有望視されている。

このロータリーハースを用いるプロセスとしては三つのプロセスが良く知られている。第一はINMETCO Process<sup>57)</sup>で比較的小規模ではあるが、1978年以来ステンレス・ダストからNi, Cr, Feを回収する工業的プロセスとして稼働

している。第二は電気炉向けの還元鉄の多量生産とともに製鉄ダストの処理を狙いとした FASTMET process<sup>58,59)</sup> と IRON DYNAMICS process<sup>60)</sup> である。もう一つのプロセスは CRM が開発中の COMET process<sup>61)</sup> である。この最後のプロセスは炭材内装塊成鉱を使用することなく、微粉の酸化鉄と石炭のそれぞれ2層を交互に堆積させて加熱、還元するものである。したがって、このプロセスでは微粉の酸化鉄と石炭をペレットやブリケットに加工する事前処理設備が不要であるが、高密度化しにくいために加熱速度を大きくできないことが懸念される。

#### 5.2.4 高温高速還元による粒鉄の製造

従来の還元鉄は固体状態での還元であるために、脈石成分を多量に含有しており、これがスクラップに対して不利な点であった。そこで、炭材内装塊成鉱をロータリーハース上で1400°C前後の高温度で急速に加熱することにより、酸化鉄を高速還元するとともに鉄に浸炭させ、反応最終段階で鉄とスラグを溶融させて脈石分を分離するプロセスが開発されている<sup>62-64)</sup>。このプロセスで得られる粒鉄はスラグを含まず、炭素を含んでおり、ハンドリング性に優れるとともに、製鋼コストを大幅に低減することが期待されている。その一つが現在開発途上の ITmk3 (Ironmaking Technology Mark Three) で、5~10 min の急速加熱・還元でメタルとスラグを分離する<sup>65)</sup>。その製品粒鉄の代表的組成は Total Fe 96~97%、C 2.5~3.5%、S 0.05% と報告されている<sup>66)</sup>。

#### 5.2.5 高密度・高強度炭材内装塊成鉱の開発

炭材内装塊成鉱の加熱還元では、伝熱速度を大きくするために密度の高いブリケットが必要である<sup>67-69)</sup>。流動度を有する石炭が約350~550°Cの温度域で溶融固化する特性に着目し、微粉碎した石炭を微粉鉄鉱石と混合して、150~600°Cで加圧成形することにより、Fig.10に示すように石炭内装ブリケットの見掛け密度は向上する<sup>70)</sup>。

熱間成形したブリケットは軟化溶融した石炭が加圧成形により鉄鉱石粒子間に進入して空隙を埋める。この段階では、炭材はまだ多量の揮発分を保有しており、還元時に高温度に加熱された場合にはガスを発生し、ブリケット内部のガス圧力が高まり、膨張あるいは亀裂を生じて崩壊する可能性がある。このブリケットを石炭の軟化溶融温度域で保持した場合には、炭化が穏やかに進行するとともに脱ガスによる気孔が発生して内部のガスが放出され、高温度でも崩壊しない強度の高いブリケットが得られる。

#### 5.2.6 炭材内装塊成鉱使用プロセスのエネルギー低減の試み

炭材内装ブリケットを燃焼排ガスなどにより酸素濃度を調整した熱風で、800~1000°Cに加熱することにより、鉄鉱石を焼結させる。生成する還元鉄は内装炭材の消失により気孔が増加し、強度が低下する。この強度は内装炭材とともに炭材内装ブリケットの周囲に外装炭材を使用するこ

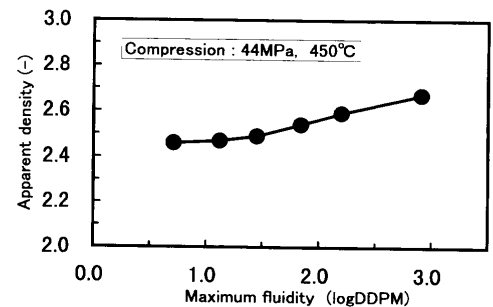


Fig. 10. Effect of maximum fluidity of coal [log(ddpm)] on apparent density of carbon contained briquette<sup>70)</sup>.

とによって高めることができる<sup>71)</sup>。

また、炭材内装ペレットを高温の酸素含有ガス流中に置き、ペレット外周部での炭素の燃焼熱によって内部の強吸熱反応である炭材ガス化反応を活発にして、部分還元鉄を製造するプロセスが検討されている<sup>72-74)</sup>。

電気炉や高炉で使用できる、耐候性に優れた予備還元ペレットの製造<sup>75)</sup> や製鉄廃棄物を安価な鉄源原料に加工する<sup>76,77)</sup> ことを目的に二層構造炭材内装ペレットが考えられている。ペレットの内核を炭材内装ペレットとし、その外側を鉄鉱石のみで被覆したペレットで、大気中で焼成され、内核で発生したCOガスが内核の酸化鉄を還元するのみならず、外殻をも部分的に還元する<sup>76)</sup>。

炭材内装塊成鉱を外装炭材と混合して充填し、空気を流通させながら層上部に着火させ、この外装炭材を燃焼させて熱源として還元を上層から下層へ進行させて金属鉄を製造するプロセスが考えられている<sup>78,79)</sup>。このプロセスでは、還元終了後に酸素濃度の高いガスによる再酸化が懸念されるため、炭材内装塊成鉱の表面に石灰成分を被覆して反応中の塊成鉱組織を緻密にするとともに、還元終了後の再酸化によって層内温度が制御不能なることを防止する対策が必要である。

これらの技術はいずれも研究段階にあり、実用化までにはまだ道は遠いと考えられる。

## 6. 結言

世界的な鉄鋼需要の伸びに対応して、高炉を補完する新鉄源としての還元鉄の需要が増大している。この需要増大に対処するため、既存の還元鉄製造プロセスを大型化し、高温化してその生産性が高められてきた。また、製鋼コストの低減を狙って、高温還元鉄の製鋼炉への直接投入や還元鉄の高炭素化が図られてきている。また、流動層を用いた炭化鉄の生産は、期待を持って注目されたものの、現時点では成功を見るに至っていない。

一方、将来的な鉄鉱石資源の微粉化、還元鉄原料としての高鉄分酸化鉄ペレットの量的逼迫、賦存量の少ない天然ガスの民生用重視の動き等を背景として、微粉の鉄鉱石と

石炭を直接混合・成形した炭材内装塊成鉱をロータリーハースによって高速還元する技術が開発されつつある。このプロセスは強度の低い原料をロータリーハース上に静置した状態で加熱・還元できることから、成形性に劣るダストやスラッジ等の処理プロセスとして有望視されている。

還元鉄は従来、鉄鋼生産用の鉄源として生産されてきたし、将来的にもこの方向で伸長の一途をたどると予想される。これに加えて、新鉄源製造プロセスは製鉄廃棄物から鉄のみならず有価金属を回収、リサイクルするプロセスとしても発展することが期待されており、まさに、廃棄物ゼロのクリーン製鉄プロセスの構築に向けて新しい歩みを始めたといえることができる。

## 文 献

- 1) R.L.Stephenson and R.M.Smail: Direct Reduced Iron—Technology and Economics of Production and Use, ISS of AIME, Warrendale, (1980).
- 2) Direct Reduction of Iron Ore—A Bibliographical Survey, The Metal Society, London, (1976).
- 3) Steel Statistical Yearbook 1999, IISI, Brussel, (2000).
- 4) “1999 World Direct Reduction Statistics”, Supplement to *Direct Midrex*, (2000) 1, 2.
- 5) “1995 World Direct Reduction Statistics”, Supplement to *Direct Midrex*, (1996) 1, 3.
- 6) H.B.Jensen: 52nd Ironmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, (1993), 325.
- 7) D.A.Kercsmar, Y.Yamauchi, W.Dibert and J.Kleather: 53rd Ironmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, (1994), 443.
- 8) E.J.Ostrowski and R.L.Stephenson: Direct Reduced Iron—Technology and Economics of Production and Use, ISS-AIME, Warrendale, (1980), 128.
- 9) P.L.Woolf: 24th Ironmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, New York, (1965), 73.
- 10) J.A.Pearce and F.J.Pearce: 24th Ironmaking Conference Proceedings, AIME, New York, (1965), 67.
- 11) Y.Shiraishi, K.Ono, A.Takeuchi, N.Hiramoto, Y.Mizuno, K.Yamaguchi and H.Kanoshima: *Tetsu-to-Hagané*, **52** (1966), 313.
- 12) 富士製鉄(株)釜石製鉄所: 日本学術振興会製鉄第54委員会資料 No. 1009, (1966).
- 13) *Direct Midrex*, **18** (1993) 3, 9.
- 14) E.J.Ostrowski and R.L.Stephenson: Direct Reduced Iron—Technology and Economics of Production and Use, ISS-AIME, Warrendale, (1980), 128.
- 15) 重見 彰: 製鉄ハンドブック, 地人書館, 東京, (1979), 197.
- 16) 森 広司: 第165・166回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1997), 117.
- 17) F.L.Sammt: Text for Midrex Direct Reduction Seminar, Manila, (May, 1994).
- 18) M.Meraikib: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1174.
- 19) 林 高朗: 第114・115回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1997), 231.
- 20) D.W.Clark: 46th Ironmaking Conference Proceedings, AIME, Warrendale, (1987), 443.
- 21) J.Thomas, C.Scheid and G.Geiger: *Iron Steelmaker*, (1993) Apr., 37; (1993) May, 71; (1993) June, 50; (1993) July, 48; (1993) Aug., 39; (1993) Sep., 61; (1993) Oct., 50; (1993) Nov., 68; (1993) Dec., 15; (1994) Jan., 41.
- 22) M.Meraikib: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1174.
- 23) T.Yamakawa, H.Hayakawa, M.Nagafuchi and M.Nakano: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 101.
- 24) M.Nakano, T.Yamakawa, H.Hayakawa and M.Nagafuchi: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 102.
- 25) Article supplied by HYL SA de CV, *Steel Times Int.*, (1991), 23.
- 26) G.D.Hughes: *Direct Midrex*, (1998) 2, 3.
- 27) F.N.Griscom: *Direct Midrex*, **22** (1997) 3, 3.
- 28) A.Faucher, A.H.Marquis and T.E.Dancy: 38th Ironmaking Conference Proceedings, AIME, Warrendale, (1979), 259.
- 29) R.Quintero and C.Dominguez: 51st Ironmaking Conference Proceedings, AIME, Warrendale, (1992), 459.
- 30) S.C.Montague and W.D.Haensler: *Direct Midrex*, (1999) 4, 3.
- 31) P.E.Duaete: *Steel Technol. Int.*, (1994/1995), 59.
- 32) G.E.Metius: *Direct Midrex*, (2000) 1, 3.
- 33) *Steel Times*, **226** (1998) Oct., 361.
- 34) R.Walawalker: *Met. Bull. Mon.*, No. 335 (1998) Nov., 53.
- 35) R.L.Gonzalez, F.L.Acosta and R.T.Guzmar: *Direct Midrex*, (2000) 3, 8.
- 36) I.S.Alvarez and C.Dominguez: 53rd Ironmaking Conference Proceedings, AIME, Warrendale, (1994), 467.
- 37) T.P.McAloon: *Iron Steelmaker*, (1993) July, 44.
- 38) R.Garraway: *Iron Steelmaker*, (1996) June, 27.
- 39) F.M.Stephens, Jr.: Document from Iron Carbide, Holdings, Ltd., Lakewood, (1993).
- 40) A.Trickett: *Met. Technol. Met. Bull. Mon. Supplement*, (1999) June, 16.
- 41) K.M.Anderson and J.Scheel: *Iron Steelmaker*, (1997) June, 25.
- 42) S.Robertson: *Am. Met. Mark.*, (Jan. 29, 1999).
- 43) S.Sawai, Y.Iguchi and S.Hayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 6.
- 44) H.Nakagawa, T.Murayama, Y.Ono and T.Matsunaga: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 14.
- 45) S.Sawai, Y.Iguchi and S.Hayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 20.
- 46) S.Hayashi and Y.Iguchi: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 16.
- 47) S.Hayashi and Y.Iguchi: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 345.
- 48) Y.Iguchi, S.Hayashi, K.Ohnaka and H.Mori: 58th Ironmaking Conference Proceedings, AIME, Warrendale, (1999), 399.
- 49) L.von Bogdandy and H.-J.Engell: Die Reduktion der Eisenerze, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, (1967), 99.
- 50) L.von Bogdandy and H.-J.Engell: The Reduction of Iron Ore—Scientific Basis and Technology (Revised and Translated Edition of “Die Reduktion der Eisenerze”), Verlag Stahleisen m.b.H., Duesseldorf, (1971), 100.
- 51) B.-H.Huang and W.-K.Lu: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 1055.
- 52) K.Kitazawa, M.Haitani and S.Shimizu: *Hitachi Zosen Tech. Rev.*, **37** (1976) 1, 1.
- 53) M.Fanming, Y.Iguchi and S.Hayash: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 90.
- 54) T.Matsumura, Y.Takenaka, M.Shimizu, T.Negami, I.Kobayashi and A.Uragami: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 405.
- 55) T.Matsumura, Y.Takenaka, M.Shimizu, T.Negami, I.Kobayashi and A.Uragami: *Rev. Metall., Cah. Inf. Tech.*, **95** (1998) Mar., 341.
- 56) H.W.Gudenau and K.Stoesser: Proc. 10th Japan-Germany Seminar, ISIJ, Tokyo, (1999), 39.
- 57) S.Barozzi: *Steel Times*, **225** (1997), 191.
- 58) G.E.Hoffman and T.Harada: *Iron Steelmaker*, (1997) May, 51.
- 59) Y.Kuwata: *Direct Midrex*, (1998) 4, 3.
- 60) L.Lehtinen and N.Rokop: Proc. Gorham Conf. Iron and Steel Scrap and Scrap Substitute 99, (Feb., 1999).
- 61) R.Munnix, J.Borlee, D.Steyls and M.Economopoulos: *MPT Int.*, **20** (1997) 2, 50.
- 62) T.Matsumura, Y.Takenaka, M.Shimizu, T.Negami, A.Uragami and I.Kobayashi: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 979.
- 63) 特開平 9-256017, (1997).
- 64) 特開平 11-335712, (1999).
- 65) T.Negami: Proc. Gorham Conf. Mini-Market and Integrated Mills of the Future, (Oct., 1998).
- 66) T.Negami: Proc. Gorham Conf. Commercializing New Hot Metal Processes “Beyond the Blast Furnace”, (June, 2000).
- 67) S.Shirouchi, M.Shimizu, Y.Takenaka and H.Iwakiri: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 807.
- 68) 特開平 11-92833, (1999).
- 69) 特表平 11-511511, (1999).
- 70) 清水正賢: 日本学術振興会製鉄第54委員会資料 No. 2159, (2000).
- 71) Y.Kimura, T.Ashie, T.Nakamura and D.Kaneko: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), S17.
- 72) Y.Iguchi, S.Hayash and R.Kamei: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 665.
- 73) Y.Iguchi and R.Kamei: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 59.
- 74) 井口義章, 亀井 亮: 日本学術振興会製鉄第54委員会資料 No. 2112, (1998).
- 75) T.Sharma: *Ironmaking Steelmaking*, **19** (1992), 372.
- 76) S.N.Misra and R.C.Gupta: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 468.
- 77) 特公昭 51-5329, (1976).
- 78) T.Kitajima and A.Kasai: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 245.
- 79) T.Kitajima and A.Kasai: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 246.