

技術報告

直接還元鉄の電気炉溶解実績と熱間成型
還元鉄の性状金子伝太郎*・Marcus O. DAVIES*²・土屋 脩*³
迫 博信*⁴Melting Results of Direct Reduced Iron in Electric Arc Furnace and
Properties of Hot Briquetted IronDentaro KANEKO, Marcus O. DAVIES, Osamu TSUCHIYA
and Hironobu SAKO

Synopsis :

The direct reduction process is now playing an important role, not only as a supplemental ironmaking procedure in the natural gas or coal producing regions of the world, but also as a technology to provide new iron source free of residual elements to iron and steelmakers, particularly those using electric arc furnace technology.

Continuous charging and slag forming operation of directly reduced iron in electric arc furnace can decrease tap to tap time and refractory wear and lowers electrode consumption.

Recently, new technical improvements of the hot briquetted iron has been completed which is hardly reoxidized and pulverized during transportation and storage.

Commercial application of this research will permit further increase of market demand for the hot briquetted iron.

Key words : direct reduction ; melting ; electric arc furnace ; Hot Briquetted Iron ; Midrex process.

1. 緒 言

直接還元製鉄法（以下、DR 法と記述する）のなかでシャフト炉方式による還元鉄製造技術は、ガス利用率が高く、エネルギー消費量が少ないプロセスとして注目されている。シャフト炉方式による主なプロセスとして Midrex 法、Armco 法¹⁾、Purofer 法¹⁾ および最近開発、工業化された Hylsa-III 法²⁾ と新日鉄法¹⁾ などがある。

DR 法は、従来特殊な立地条件において成立する高炉製鉄法を補完する製鉄法とみなされてきた。最近、世界的な電気炉製鋼比率の増加にともない還元鉄（以下、DRI と記述する）はスクラップとの併用を目的とした新しい流通鉄源となりつつある。特に工業化に成功した熱間成型還元鉄（Hot Briquette Iron 以下、HBI と記述する）製造プラント³⁾ はその要求を満たすものである。

本報告は、Midrex 法の技術を概述するとともに、DRI および HBI と各種スクラップの性状比較および DRI の電気炉での溶解実績について述べたものである。

2. Midrex 法における製鉄技術の概要

2.1 Midrex 法の沿革

Midrex 法の概念は、1950 年代において米国の Surface Combustion 社で生まれた。その後、この技術は Midland Ross 社に移り、1960 年代になつて Midland Ross 社の子会社として独立した Midrex 社により開発され、実用化された。1967 年には内径 1.2 m のパイロットプラントにおける操業経験を基に、Portland（米国、Oregon 州）において一気に内径 3.5 m、15 万 t/年規模への拡大に成功し、最初の商業プラントが誕生した。その後、1970 年代にいたり Georgetown（米国、South

昭和 62 年 3 月 6 日受付 (Received Mar. 6, 1987)

* Midrex Corporation 工博

*² Midrex Corporation

*³ (株)神戸製鋼所エンジニアリング事業部 工博 (Engineering Division, Kobe Steel, Ltd. 4-2-8 Iwayanakamachi Nada-ku Kobe 657)

*⁴ (株)神戸製鋼所エンジニアリング事業部 (Engineering Division, Kobe Steel, Ltd.)

Carolina 州), Hamburg (西独) および Sidbec Dosco (カナダ) と次々と 40~50 万 t/年規模プラント (内径 4.8~5.5 m) が建設され, 現在 45 基を越えている。

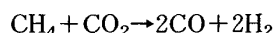
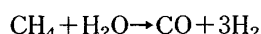
最近建設を完了し, 操業中の Sabah Gas Industries (マレーシア) のプラントにおいては, DRI を熱間でシャフト炉から排出してこれを製鋼原料に適した寸法に成型, 高密度化する HBI 製造技術の適用に成功している。

2.2 Midrex 法のフローと設備構成

Midrex 法の代表的なプラントのプロセスフローを Fig. 1 に示す。以下, 本プロセスの主要工程の概要を述べる。

1) 原料処理工程: ヤードから運搬された鉄鉱石はスクリーンで微粉を除去した後, 貯鉱槽を経てシャフト炉ホッパーに搬送される。シャフト炉で還元されて製造された DRI はスクリーンで微粉を除去後, 製品貯鉱槽を経て製鋼工場へ送られる。

2) 天然ガス改質工程: シャフト炉還元ガスの原料である天然ガスは, プロセスを循環する炉頂ガスと一定の割合で混合された後改質炉へ入り還元ガスが製造される。改質炉は炉頂ガスの一部と天然ガスを混合燃料としたバーナーで加熱され, その排ガスはレキュペレーターをかねた煙道でバーナー用燃焼空気と熱交換される。改質炉内には, Ni 系触媒を充填した高合金のリフォーマチューブが吊り下げられており, 上述の混合ガスは約 1000°C の温度で CO と H₂ 濃度が 90~92% の還元ガスに次式に基づいて改質される。



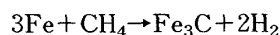
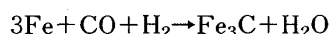
改質ガスの H₂/CO 比はプラントにより異なるが, 約 1.5 に保たれる。改質ガスの温度は通常 925°C であるが, シャフト炉で使用する原料の性状から判断して炉内

でクラスタリングが起こらない温度に調整された後にシャフト炉へ吹き込まれる。

3) 還元工程: シャフト炉は, もつとも代表的な 40 万 t/年規模の標準炉について述べると, 内径 5.0 m (断面積約 19.6 m²) で装入装置を含む高さは約 55 m, 内容積は約 300 m³ である。原料鉄石は炉頂ホッパーから分配管 (Distributor pipe) を経て炉内に装入され, 重力で炉内を降下する。還元域と冷却域の仕切りはとくにないが, 装入物排出機 (Burden feeder) と称する装入物の円滑な降下を補助するとともにクラスターを解砕する揺動装置が設けられており, 安定した装入物の降下を保証している。還元および冷却された DRI は, 炉最下端に備えられたかきだし板 (Wiper bar) の開閉により排出されるが, この開閉速度が DRI の排出速度, すなわち生産速度を制御する。

シャフト炉の還元域を降下する酸化鉄は, この充填層と対向流をなし上昇する還元ガスにより還元される。この反応の効率, 還元ガス温度, ガス量, 装入物の被還元性, 降下速度および降下の状況などによつて支配される。実用炉では, FeO-Fe-CO-CO₂ および FeO-Fe-H₂-H₂O 系の平衡から定まる理論的に必要な還元ガス量の 90~95% までが利用される。

4) 冷却工程: 還元鉄の渗炭反応は, 次式に基づいてシャフト炉の羽口付近から冷却域にかけて進行する。



HBI を製造せずに常温の DRI を製造する従来のシャフト炉では, 冷却ガスを単独で炉下部を循環させて DRI を 50°C 以下の温度まで冷却する。

5) 熱間成型工程: DRI を熱間で排出し, HBI の製造を目的とした設備の構造を Fig. 2 に示す。

この炉では冷却域が存在せず, 還元域で還元された

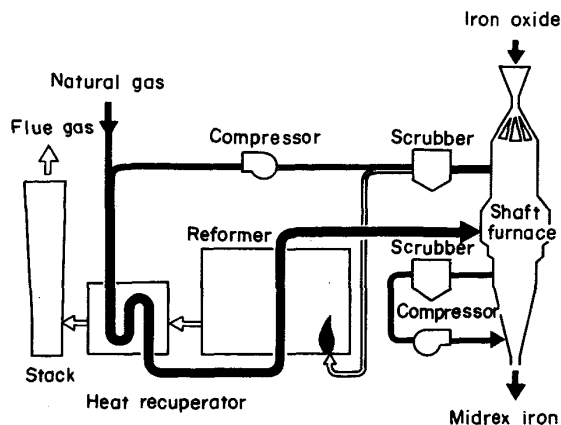


Fig. 1. Flowsheet of Midrex direct reduction process.

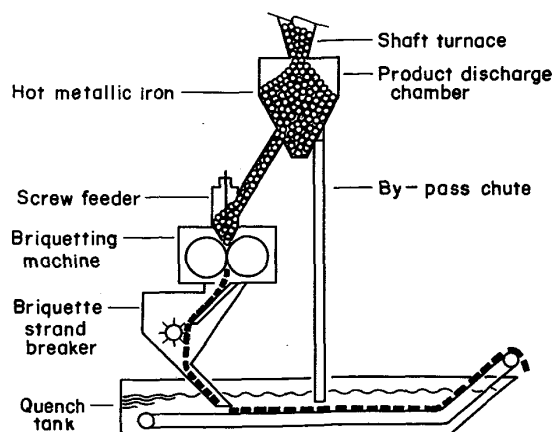


Fig. 2. Midrex hot briquetting system.

DRI は炉の下部の円錐部を通過した後 700~750°C の温度に保ち排出槽に移行する。排出槽の役割は、還元炉内の可燃性ガスをシールすることと次工程の熱間成型 (Hot briquetting) 設備に DRI を安定して供給することにある。この槽に供給される置換ガスは、DRI を熱間で成型するのに適した温度に加熱される。排出槽を経て切り出された DRI は供給管を経てスクリューフフィーダーに供給されるが、スクリューフフィーダーは成型される DRI をあらかじめ圧縮し、製品 HBI の密度を高めることに寄与している。成型ロールは鋳鋼製で、たとえば 100×50×15 mm のくぼみがついており、圧縮過程でこれら成型物の二つが一對となり帯状に連結したブリケットとして排出される。この連結したブリケットはシュートを経た後解砕機によつて個々のブリケットに衝撃分離され、水冷後取り出されて製品貯蔵槽へ搬送される。

2.3 Midrex 法に使用される原料および製品の性状

原料として重視される事項を列挙すると、次のようになる。

1) DRI は主として電気炉製鋼用に使用されることから、原料の鉄品位はできるだけ高いことが望ましく、かつ P, S, Cu およびアルカリなどの不純物が少ないこと。

2) DRI の生産量は、およそ炉断面積あたりに吹き込み得るガス量に比例することから炉内における通気性が良好であること。

3) 炉内必要滞留時間が短いこと。すなわち被還元性が良好であること。

4) 炉内でクラスターを形成しにくいこと。

原料の化学成分において S は 0.03% 以下、できれば 0.01% 以下が望まれる。Midrex 法では炉頂ガスを改質炉に循環使用するため、この含有量が高いと原料中の S が H₂S として循環して改質炉の触媒を劣化する。原料中の S 含有量が 0.015% 以上存在する場合はプロセスフローを変更してこれを回避している。すなわち、炉頂ガスをいつたんシャフト炉下部を通過させ、ガス中の S を DRI 中に吸収させることで S 含有量の減少したガスを改質炉に循環させるフローを取る。

従来は、塊鉱石は炉内で粉化しやすく、圧力損失の上昇をきたすため使用割合が制限され、ペレットの多配合使用が一般的であった。最近、パイロットプラントや実プラントでの経験から、シャフト炉への装入前鉱石の整粒強化による微粉混入率の減少、装入鉱石粒度の上限の拡大および使用塊鉱石種の混合率の適正化などの操業技術の改善がなされ、塊鉱石 100% 使用による操業も可能となった。

Table 1. Typical characteristics of Midrex iron.

Chemical	Pellets/Lumps (%)	Cold briquettes (%)	HBI (%)
Fe total	91 — 93	86 — 88	91 — 93
Fe metallic	83 — 88	77 — 79	83 — 88
Metallization*	92 — 95	89 — 91	92 — 95
C	1.0 — 2.5	1.8 — 2.8	1.0 — 1.5
SiO ₂	2.0 — 3.5	3.5 — 4.5	2.0 — 3.5
Al ₂ O ₃	0.5 — 1.5	0.6 — 1.6	0.5 — 1.5
CaO	0.2 — 1.6	1.5 — 2.5	0.2 — 1.6
MgO	0.3 — 1.1	0.3 — 0.8	0.3 — 1.1
MnO	0.1 — 0.2	0.1 — 0.15	0.1 — 0.2
Na ₂ O	—	0.3 — 0.4	—
P	0.02 — 0.04	0.02 — 0.035	0.02 — 0.04
S	0.005 — 0.015	0.005 — 0.015	0.005 — 0.015
Ti	0.01 — 0.2	0.01 — 0.2	0.01 — 0.2
V	0.01 — 0.2	0.01 — 0.2	0.01 — 0.2
Ni, Sn, Zn, Cr, Cu, Pb	Traces	Traces	Traces
Physical			
Bulk density (t/m ³)	1.6 — 1.9	approx. 2.2	2.6 — 2.7
Apparent density (t/m ³)	3.5	approx. 4.0	5.5
Weight	—	approx. 80 g	0.5 — 0.7 kg
Nominal size (mm)	4 — 20	15×30×40	30×60×90

* Metallization is defined as the percentage of total iron in metallic form.

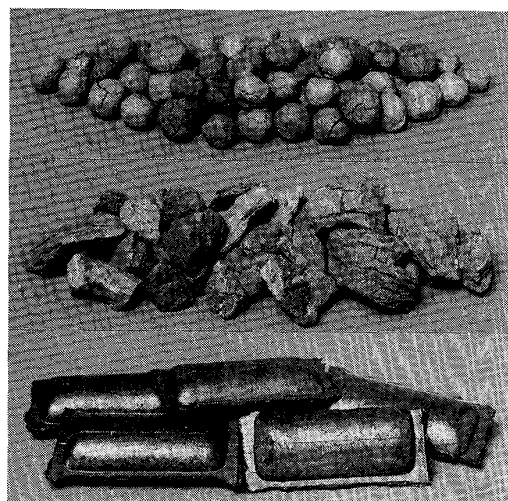


Photo. 1. Three forms of DRI pellets, lump and briquette.

Midrex 法プラントで製造した代表的な DRI および HBI の性状例を Table 1 に、外観写真を Photo. 1 に示す。

見掛け比重は、従来の DRI では 3.5 t/m³ に対し HBI では 5.5 t/m³ と著しく高密度化しているのがわかる。

3. Midrex 法で製造された DRI の利用とその拡大

3.1 Midrex 法で製造された DRI の利用

Midrex 法プラントに隣接して建設されている製鋼プラントの主設備仕様および最終製品を Table 2 に示す。

これら製鉄所における DR プラント建設の理由は、

Table 2. Melt shops adjacent to Midrex direct reduction plants.

Plant/Location	Raw steel capacity (tpy)	DRI in charge (%)	EAF No. × Size (t)	Transformer power (MVA)	CCM No. × Strands	Product mix
Oregon Steel Mills Portlad, OR, USA	400 000	60—100* (now 0)	1× 75 1× 90	33 40	Pressure Pouring Only	HR carbon heavy plates and medium plates
Georgetown Steel Corp. Georgetown, SC, USA	650 000	30— 50* (now 25)	2× 75	30/36	2×4	Wire rod, Special quality bar
Neue Hamburger Stahlwerke Hamburg, W, Germany	620 000	10— 40	1×100	75	1×6	Wire rod, Deformed bar
Sidbec-Dosco Inc. Contrecoeur, Quebec, Canada	1 030 000	30— 60	2×100 2×140	55 90	2×6 1×1	Mild steel, HR & CR coil and sheet, Wire rod, Bar
Dalmine Siderca Campana, Argentina	450 000	70	2× 50 1× 75 1× 75	13.4 25 33	2×4	Seamless tube and pipe
ACINDAR S.A. Villa Constitucion, Argentina	940 000	62	3×100	45/65	2×6	Bars, Rebar, Skelp, Wire rod
Qatar Steel Co. Ltd. (QASCO) Umm Said, Qatar	420 000	80— 90	2× 70	37/42	2×4	Plain and deformed rebar
SIDOR Matanzas, Venezuela	3 600 000	60—100	6×200 4×150	100 100	3×2 3×6	Plate, CR & HR coil/sheet, Seamless tube & pipe, Tin plate, Wire rod
Delta Steel Co., Ltd. Warri, Nigeria	1 000 000	80	4×110	60	3×6	Light sections, Bars, Wire rod, Angles, Rounds
Saudi Iron & Steel Co. (HADEED) Al-Jubail, Saudi Arabia	850 000	75	3×120	70/85	3×6	Plain and deformed rebar, Wire rod
ISCOTT Point Lisas, Trinidad & Tobago	600 000	85	2× 90	65	2×4	Wire rod, Rebar
National Iranian Steel Co. Ahwaz, Iran	1 750 000	90	6×150	70	1×6 2×2	Plate, HR coil, Pipe, Medium sections
O.E.M.K. Sary Oskol, U.S.S.R.	1 500 000	65	4×150	90	4×4	Special quality billets and sections
Iron & Steel Projects Misurata, Libya	1 000 000	75— 80	6× 90	54	2×6 1×4 2×1	Wire rod, Rebar, Medium sections, HR and CR coil and sheet
National Iranian Steel Co. Mobarakeh, Iran	3 000 000	80— 90	8×180	90	4×2	Carbon sheet Low alloy sheet
Alexandria Nat'l Iron & Steel Co. El Dikheila, Egypt	840 000	70— 80	4× 70	46	3×4	Wire rod and bar

* Original design

良質スクラップの入手困難、天然ガスが豊富であることなどさまざまな理由があるが、そこで製造される製品構成も単なる鉄筋棒鋼から、パイプ、各種形鋼、冷間・熱間圧延鋼板など多彩をさわめている。

DRI は電気炉へ連続装入される。連続装入は 3 電極の中央部になされ、最大供給速度は通常 33 kg/MW・min に維持される。投入された DRI を速やかにスラグおよび溶湯と接触させる目的で、積極的にスラグを泡立ちさせる操作方法がとられている。DRI 中の未還元酸化鉄と炭素との反応により、この泡立ちが活発化される。この操作法の利点は、電極アークから炉壁へ直接放射する熱を泡立ちスラグが低減させるとともに、炉壁からの熱損失が減少するため、泡立ちスラグ操作をしない場合に比べて熱効率がよく、耐火物の損傷も少ないことにある。このスラグの泡立ち度合いは、主に DRI または炭材の供給速度で制御でき、供給速度を増加すると著しくなる。耐火物の損傷および熱効率に対して適正な泡立ち度合い

があるものと考えられるが、現状では操業者の経験に基づいて操業されている。

溶解時における塩基度は 1.7～2.0 に保たれる。DRI 中に脈石分が多く存在するためスラグ量は増加し、当然電力消費量は増すが、このスラグ量の増加により脱硫機能が高まるため塩基度は比較的強く保たれる。

Table 2 に示した製鋼プラントの中で比較的 DRI の使用比率の高い Qatar 製鉄所における DRI の電気炉溶解結果の一例を以下に述べる。

3・2 Qatar 製鉄所における DRI の溶解⁴⁾

当製鋼プラントでの通常の操業は DRI 90% 配合を基準としているが、DR プラントの定期修理などで DRI の供給が減少する期間を利用して、電気炉操業におよぼす DRI 配合量の影響を調査した。この製鉄所には精錬用酸素プラントはなく、電気炉への酸素の吹込みは実施していない。

Table 3 に DRI の配合率と補修時間および全操業時

間 (Tap to tap time) との関係を示す。DRI 配合率の増加に伴って全作業時間および補修時間も短縮される。特に、DRI 配合率が少なくなると炉壁の耐火物の損傷が多くなる。

Fig. 3 は DRI 配合率と電力消費量との関係を示し

Table 3. Effects of DRI % on repair and tap to tap time.

DRI (%)	40	50	60	70	80	90
Repair time (min)	35	35	32	31	30	28.1
Tap to tap time (min)	148.7	146.8	145.3	144.9	143.2	142.3

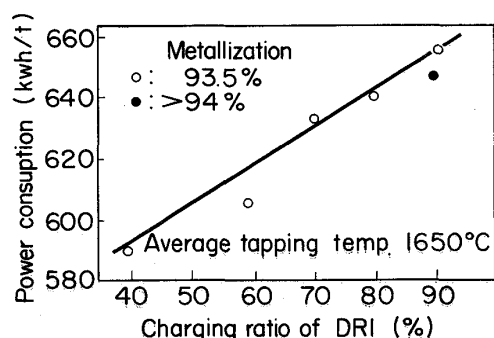


Fig. 3. Relation between power consumption and DRI %.

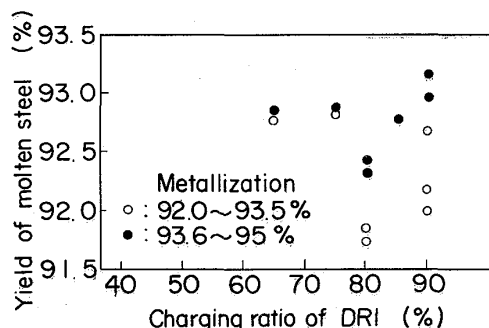


Fig. 4. Relation between yield and DRI % of different metallization.

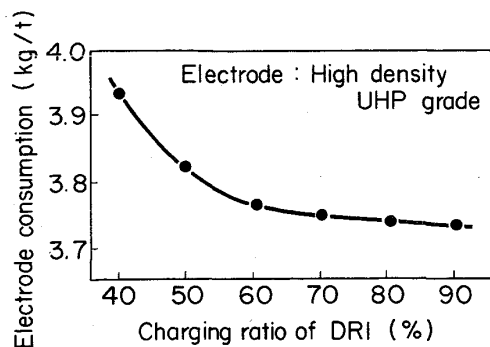


Fig. 5. Relation between electrode consumption and DRI %.

たもので、溶解エネルギーは配合量に対応して大きくなっている。DRI 10% 当たりの電力消費量の増加は約 13 kWh/t である。

Fig. 4 に DRI 配合率と溶鋼歩留りとの関係を示すが、両値の間には明確な関連は認められない。

Fig. 5 は DRI 配合率と電極消費量との関係を示したもので、とくに DRI 配合率が 40~70% において電極消費量の減少効果が著しい。これは、DRI が増えるとスクラップ多配合時に比べてアークが安定することおよび装入時の電極に与える物理的衝撃が少なくなることなどによる。

3.3 電気炉製鋼原料としての DRI および HBI の評価

3.3.1 DRI および HBI の利点

前節において、DR ベース一貫製鉄所における DRI の使用例を述べた。DRI とくに HBI は DR プラントと隣接した製鋼プラントで使用されるだけでなく、長距離輸送が可能であることからスクラップを補完する流通鉄源としてその用途は拡大されつつある。

HBI は不純物の少ない製鋼原料であるとともに非常に緻密で均一な形状を有し、再酸化に対する抵抗がきわめて高い。従来の DRI は、その再酸化性状から輸送および貯蔵に制約があつたが、HBI の開発によりその欠点が改善された。また、Fig. 6 に示すように他の製鋼原料に比べてもつとも不純物が少ない。Table 4 に各種

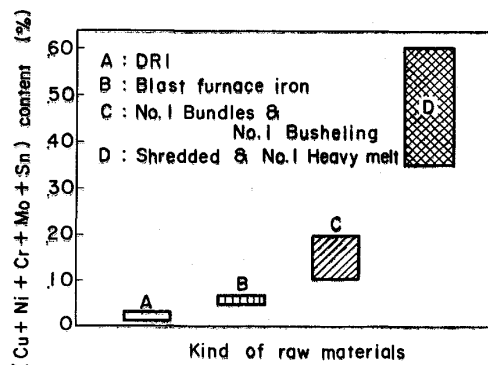


Fig. 6. Typical tramp elements content of various raw materials.

Table 4. Typical residual levels in common scrap grades and DRI. (wt%)

Element	No. 1 Bundles	Shredded	No. 1 H. M.	No. 2 H. M.	No. 2 Bundles	DRI & HBI
Cu	0.10	0.20	0.20	0.40	0.60	0.01
Sn	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.00
Ni	0.05	0.10	0.10	0.13	0.14	0.01
Cr	0.09	0.12	0.15	0.14	0.18	0.01
Mo	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00
S	0.02	0.04	0.04	0.07	0.09	0.01
P	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	*

* Subject to phosphorus content in the ore

Table 5. Price of DRI relative to common scrap grades in U.S.A..

	Typical Cu content (%)	Typical yield	Historical price relative to No. 1 H. M.	Historical relative price after corrected by yield*
No. 1 Bundles/Bushelings	0.1 $\pm$ 0.05	94.0	1.15 $\pm$ 0.10	1.22 $\pm$ 0.11
Shredded	0.2 $\pm$ 0.10	92.0	0.09 $\pm$ 0.09	1.18 $\pm$ 0.10
No. 1 Heavy melting	0.2 $\pm$ 0.05	91.0	1.00 $\pm$ 0.06	1.10 $\pm$ 0.07
No. 2 Heavy melting	0.4 $\pm$ 0.20	87.5	0.86 $\pm$ 0.08	0.98 $\pm$ 0.09
No. 2 Bundles	0.6 $\pm$ 0.15	83.5	0.67 $\pm$ 0.12	0.80 $\pm$ 0.14
DRI	0.01 $\pm$ 0.01	91.0	1.17 $\pm$ 0.10	1.29 $\pm$ 0.11

* In other words, relative value per unit of steel produced or relative value per unit of recoverable iron units, approximate standard price of scrap traded up to this time in U.S.A..

スクラップ中の不純物量を示し、比較のために DRI および HBI 中のその値をも併記する。

DRI および HBI の利点は、①電気炉で高品質の鋼を生産する場合のスクラップ中の不純物を希釈する効果があること、②DRI および HBI 中の残存 FeO が炭素と激しく反応して CO ガスを発生してスラグを泡立て、鋼浴が N₂ や H₂ に接触することをさまたげ、結果として N₂ および H₂ 含有量の極めて低い鋼が製造できることにある。その他、非金属介在物の減少にも有効である。

以上の鋼の品質の改善に加えて、電気炉操業上にも次のような利点がある。

- 1) スクラップに対して原料形状が均一であるため、貯蔵が容易で輸送や装入の面でも便利である。
- 2) スクラップに比べて溶鋼成分の予測が容易で、同一原料を使用している限り各装入ごとで同じ結果が得られる。
- 3) 連続装入が可能であり、バッチ装入に比べて全操業時間 (Tap to tap time) が著しく短縮される。

3.3.2 DRI および HBI の経済性評価

Table 5 に、米国における各種スクラップの Cu 量、溶鋼歩留り、さらには No. 1 Heavy melting スクラップを基準とした相対価格を示す。このスクラップを溶解した際の歩留りを考慮して、その相対価格を補正した値を表中の右端に示す。この歩留り補正相対価格は、No. 1 Heavy melting スクラップと対比した場合の回収可能な鉄単位重量当たりの価格に相当する。

DRI の溶解歩留りを考慮すると DRI の価値は No. 1 Heavy melting スクラップより 10% 高く、No. 1 Bundle または Busheling スクラップとほぼ同等である。

4. 結 言

Midrex 法 DR プラントで製造された DRI および HBI の性状、および DRI の電気炉での使用結果などについて述べた。

DRI は電気炉で連続装入使用され、全操業時間の短縮、炉底および炉壁の耐火物の浸食および電極消費量の低減をもたらし、品質面でもとくにスクラップ使用からくる不純物を希釈する効果がある。DRI は従来、再酸化性および粉化性の面から輸送および貯蔵に制約があつたが、この欠点は還元鉄を熱間成型した HBI を製造することで改善された。非常に緻密で均一な性状を有する HBI は、スクラップの品質の低下や需給の変動を緩衝するための新流通鉄源として今後期待される。

HBI の電気炉での使用実績はまだ少ないが、HBI の特徴を生かした使用法の開発により DRI にまさる使用効果が得られるものと考えられる。先進国における電気炉を中心とする製鋼業の製品構成の多様化および高級化にともなつて、従来の流通鉄源であるスクラップの他、HBI への需要はますます増加してくるものと確信している。

文 献

- 1) R. L. STEPHENSON: DIRECT REDUCED IRON, Technology and economics of production and use (1980), p. 82 [Iron & Steel Society of AIME]
- 2) J. M. PENA: Symposium on state of art of production & uses of DRI, Cairo Egypt (1981 年 4 月)
- 3) D. W. CLARK, G. G. CARINCI and J. A. LEPINSKI: ISS-AIME, 44th Ironmaking conference, Detroit USA (1985 年 4 月)
- 4) K. YOKOE, R. M. AL KUWART and K. A. AFZAL: Direct from Midrex, 10 (1981) 1, p. 4