

(解説)

MIDREX[®] DR プロセスの技術確立 / 改良

稲田 裕

都市環境・エンジニアリングカンパニー・プラント技術部

Improvements in the MIDREX[®] Direct Reduction Process

Yutaka Inada

The MIDREX Direct Reduction Process was developed during the 1960s. The process, consisting of shaft furnace and stoichiometric gas reforming system, reduces iron ore into direct reduced iron with utilizing natural gas. The first module was built in 1969. Since then 49 additional modules have been built and achieved 67% share in this field. Over the years numerous technical improvements have been made, including larger shaft furnaces, hot briquetting, better catalysts, and greater heat recovery. KSL and MIDREX are constantly developing this technology to improve economy-of-scale, to apply alternate fuels, and to realize direct reduced iron hot charging, etc.

まえがき = 世界の還元鉄生産は、1970 年の 790 000t/y から 1999 年の 38 590 000t/y へとこの 30 年間で約 50 倍に拡大した。この還元鉄製造プロセスの中で約 67% のシェアを占めるに至った MIDREX DR (Direct Reduction : 直接還元製鉄) プロセスの概要および当社と Midrex 社による本プロセスの技術の確立 / 改良に関し、以下概説する。

1. 直接還元製鉄

直接還元製鉄とは高炉によらない製鉄法である。製品は高炉と異なり溶銹ではなく、還元鉄と呼ばれる固体で生産される。直接還元製鉄法が、工業的に確立し始めたのは 1960 年代からで、各種のプロセスが商業規模・準商業規模で建設され始めた。大規模製鉄法として現時点で高炉法に勝るものは無いが、直接還元製鉄法は、コークスを使用せずに主に天然ガスを使用して電気炉との組合せで鉄を製造するという点に特徴を有している。

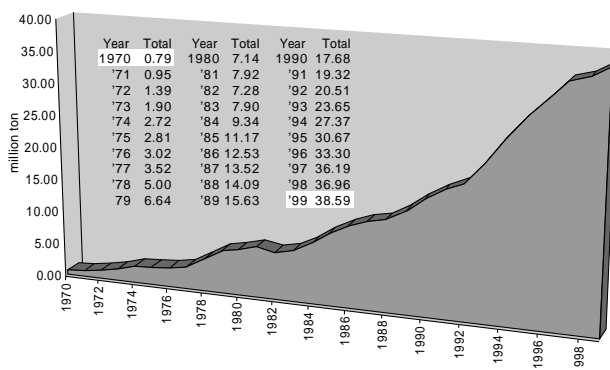
直接還元製鉄法による還元鉄の生産量は、順調に拡大してきており、第 1 図に示すように 1970 年の 790 000t/y から 1999 年には 38 590 000t/y と、30 年間で約 50 倍になってきている。世界各地域での直接還元製鉄法による還元鉄生産量を第 2 図に示す。天然ガスの豊富な中南米・中近東地区の生産量が、それぞれ第一位・第二位を占めている。

2. MIDREX 法

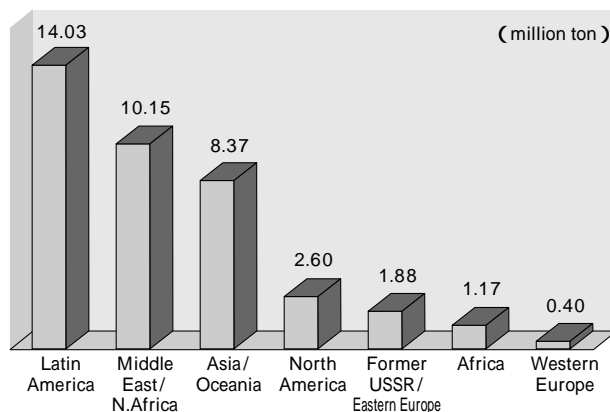
2.1 直接還元製鉄法各プロセス

現在世界には 19 種類の直接還元製鉄プロセスが稼働しており、これらの中には 1 カ所ですら稼働していないプロセス、非常に小さい生産規模のプロセスも含まれている。

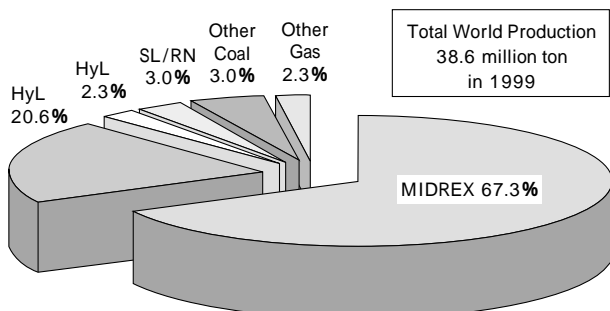
商業規模で稼働している代表的なプロセスとしては、天然ガス使用プロセスで MIDREX 法と HyL 法、石炭使用プロセスで SL/RN 法がある。第 3 図に各プロセスのシェアを示す。本図に示すように MIDREX 法が、約 67% のシェアを占めている。図中に HyL III , HyL I と記載



第 1 図 世界の直接還元鉄生産量の推移
Fig. 1 World DRI production by year



第 2 図 地域別の 1999 年度直接還元鉄生産量
Fig. 2 1999 World DRI production by region



第 3 図 直接還元製鉄法各プロセスのシェア
Fig. 3 World DRI production process in 1999

されているのはいずれも HyL プロセスである。HyL I が旧式タイプで還元炉が固定層式となっており、HyL III が MIDREX と同じ移動層式還元炉になっている。

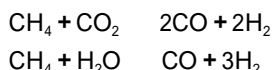
2.2 MIDREX プロセス

第 4 図に MIDREX プロセスのフローシートを示す。MIDREX プロセスは、還元炉からの炉頂排ガスを循環再使用する点に特徴がある。そのためにプロセス全体のエネルギー効率が大きく、天然ガス原単位が低くなるのが他のプロセスに対する大きな優位点となっている。

還元炉は、高炉の上半部と同じ移動層式であり、他の固定層式・流動層式に比較し、還元炉としての容積効率が高くかつ安定操作をもたらすものとなっている。炉のほぼ中段に還元ガスを吹込み、それより上方で還元反応を生じさせ、下部で還元鉄の冷却をおこなう構造である。

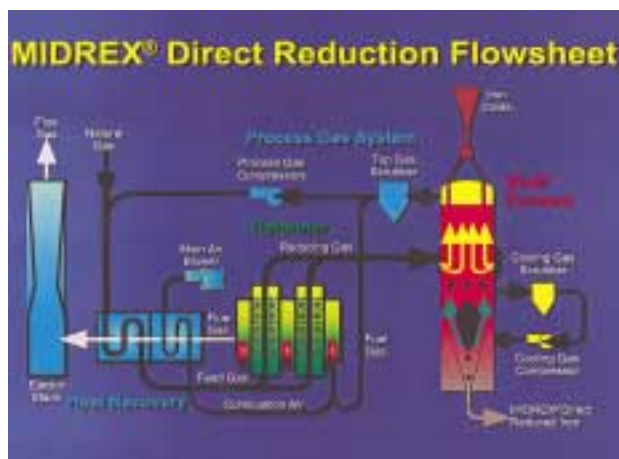
改質炉は還元ガスを発生させる装置であり、天然ガスと還元炉頂排ガスを反応させ一酸化炭素・水素を主成分とする還元ガスを製造する。一般的な天然ガス改質炉は天然ガスと水蒸気を使用するものであり、炭素析出問題を避けるために水蒸気は過剰な量を使用する。これに対し、MIDREX プロセスは還元炉頂排ガスを天然ガスの改質反応に使用する方式であり、しかも化学量論的で過剰な酸化性ガスは不要としており、他のプロセスにないユニークな技術である。

改質炉内での化学反応は

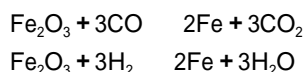


で示され、改質反応と呼ばれている（天然ガスの主成分はメタン CH_4 であるので、 CH_4 の反応式で改質反応を代表させている）。これらの反応は、改質炉内で上記混合ガスが触媒と接触することにより効率的に進行する。この改質触媒そのものと改質技術が、MIDREX プロセスの重要な要素である。

還元炉内での反応は、以下のように一般に知られている鉄の還元反応である。



第 4 図 MIDREX プロセスフローシート
Fig. 4 MIDREX process flowsheet



この還元反応とともに還元炉内では、鉄とカーボンが結びつく浸炭反応が生じている。

2.3 MIDREX プラントの納入実績

第 1 表に MIDREX プラントの納入実績を示す。現在までに 49 基を納入しており、その合計生産量は、年産ベースで約 29 000 000t/y である。49 基の内、当社が直接納入したのは*マークで示した 11 基である。写真 1 に当社が、ベネズエラに建設した最新の MIDREX DR Plant の全景を示す。中央部のタワー状の機器が還元炉で、その右側の箱形の機器が改質炉である。

3. MIDREX プロセスの確立と技術改良

3.1 MIDREX プロセスの確立

Midrex 社の前身であるアメリカの Midland-Ross 社は、それまで培ってきたペレット製造用移動層炉の技術と天然ガスの改質技術を合体し、1967 年にパイロットプラントを建設し還元鉄製造の目処をたてた。その後、



写真 1 コムシグアプラント
Photo 1 Comsigua Plant

第1表 MIDREX 直接還元製鉄プラントの納入実績

Table 1 World MIDREX direct reduction plants

Plant	Location	Capacity (Mt/y)	Modules	Start-up
Georgetown Steel	USA	0.40	1	'71
Ispat HSW	Germany	0.40	1	'71
Sidbec-Dosco (Ispat)	Canada	0.40	1	'73
SIDERCA	Argentina	0.40	1	'76
Sidbec-Dosco (Ispat)	Canada	0.60	1	'77
SIDOR I	Venezuela	0.35	1	'77
ACINDAR	Argentina	0.60	1	'78
* Qatar Steel Co.	Qatar	0.40	1	'78
SIDOR II	Venezuela	1.29	3	'79
Caribbean Ispat Ltd.	Trinidad & Tabago	0.84	2	'80/'82
Hadeed I	Saudi Arabia	0.80	2	'82/'83
OEMK	Russia	1.67	4	'83/'85/'86/'87
Amsteel Mills	Malaysia	0.65	1	'84
Khouzestan Steel Co.	Iran	1.20	3	'85/'90/'92
* ANSDK I	Egypt	0.72	1	'86
LISCO I	Libya	1.10	2	'89/'90
Essar Steel I & II	India	0.88	2	'90
* OPCO	Venezuela	1.00	1	'90
VEMPERCAR	Venezuela	0.66	1	'90
Essar Steel III	India	0.44	1	'92
Hadeed II	Saudi Arabia	0.65	1	'92
* NISCO	Iran	3.20	5	'92/'93/'94
Ispat Industries	India	1.00	1	'94
* ANSDK II	Egypt	0.80	1	'97
IMEXSA	Mexico	1.20	1	'97
LISCO II	Libya	0.65	1	'97
Corus Mobile	USA	0.80	2	'97/'98
American Iron Reduction	USA	1.20	1	'98
* COMSIGUA	Venezuela	1.00	1	'98
Ispat DR 3	Trinidad & Tabago	1.36	1	'99
Saldanha Steel	South Africa	0.804	1	'99
* ANSDK III	Egypt	0.80	1	'00
* Hambo Steel	Korea	0.80	1	Not yet
Total		29.064	49	

*KSL Constructed

1969年にアメリカ Oregon 州に建設した商業機第一号でプロセスの基本的な課題である還元炉内での安定した還元、改質炉での適正な改質を実績し商業レベルでのプラント技術を確立した。商業機第一号での還元炉での主要な問題点は、還元段階での還元鉄の粉化と還元鉄の相互融着であった。また、改質炉での最大の問題は天然ガスからのカーボン析出による触媒の破損であった。

3.2 当社のかかわり

当社が、カタール国に建設することになった一貫製鉄所の最上流設備として、当時最大の実績を有していた固定層式の HyL I プロセスを採用するか、十分な実績を重ねてはいないが移動層式で還元炉頂排ガスを循環使用するという MIDREX プロセスを採用するかで検討を重ねた結果、高いプロセス効率と将来性を考慮して MIDREX プロセスを採用した¹⁾²⁾。

当時 Midrex 社は、Oregon およびその後建設したプラントにおいてプロセスの改良・効率化を実現しつつあったが、1975年カタールでの DR プラントの建設時点では十分に成熟したプロセスとまではいえず、当社は高炉で培った技術を活用して設計段階で多くの改良をおこなうとともに、カタールでの実稼働段階においても操業安定のためのさまざまな改良を加えた。同時に Midrex 社も他地域に建設したプラントにおいてさまざまな改良を加えており、1980年初頭にはほぼ完成されたプロセスとなった。

3.3 Midrex 社との共同技術改良

当初 Midrex 社はドイツ Korf 社の傘下であったが、当社はカタールでの成功とこのプロセスの将来性を見越し、1984年に Korf 社から Midrex 社を買収し当社の 100%子会社とした。それ以降、当社と Midrex 社が協力してさまざまな技術改良に努めた結果、還元鉄プラントとして 67% のシェアを確保するに至った。

遂行した技術改良には、天然ガス原単位の低減、多様

な原料に対する対応、還元反応の高温化、改質触媒の性能向上、各構成機器の改良、操業の自動化³⁾など数多くあるが、主要項目としてここでは、

- 還元鉄のブリケット化
- プラントの大型化

の2件に関し記述する。

3.3.1 還元鉄のブリケット化

還元鉄は別名で海綿鉄とも呼ばれるように還元反応によって取り去られた酸素の空隙が多数残っており、水などに触れると鉄と酸素が結び付く再酸化という問題を生じる性質がある。この問題のために海上輸送・長期屋外保存は原則不可能であった。これを解決する技術が、還元炉から生産されてきた見掛け比重 3.4 ~ 3.6t/m³ 程度の還元鉄を 700 程度の熱間で見掛け比重 5.0 ~ 5.5t/m³ 程度に団塊化するホットブリケット技術である。

従来は、製鋼プラントと隣接しそこに還元鉄を供給するという現地でのみの立地可能性しかなかったものが、この技術により天然ガス・原料鉱石の安価な国に還元鉄プラントを建設し、その製品すなわち還元鉄ブリケットを他の国に立地している製鋼/圧延プラントに供給することが可能となり、還元鉄プラントの立地の可能性が飛躍的に拡大した。当社がベネズエラに建設し、操業をおこなっている OPCO, Comsigua の両プラントはいずれもこの還元鉄ブリケットを製造し、それをアメリカや他の地域へ輸出するプラントである。第2表に還元鉄ブリケットと通常の還元鉄の化学性状と物理性状の比較を示す。

第2表 ホットブリケットと還元鉄の性状

Table 2 Typical characteristics of MIDREX iron

	DRI	HBI
Fe total *	90 - 94%	90 - 94%
Fe metallic	83 - 89%	83 - 89%
Metallization	92 - 95%	92 - 95%
Carbon	1.0 - 2.5%	0.8 - 1.2%
p *	0.005 - 0.09%	0.005 - 0.09%
S *	0.001 - 0.03%	0.001 - 0.03%
Gangue *	2.8 - 6.0%	2.8 - 6.0%
Cu, Ni, Cr, Mo, Sn, Pb, and Zn	trace	trace
Bulk Density* (metric tons per cubic meter)	1.6 - 1.9	2.4 - 2.8
Apparent Density* (metric tons per cubic meter)	3.4 - 3.6	5.0 - 5.5
Ocean Transportation	Care is required	Safe

*Depend on the iron ore source

3.3.2 プラントの大型化

これは、年産 400 000 t/y 程度にとどまっていたプラントの生産量を還元炉の大型化を実現することにより大量生産という市場ニーズに応えかつ経済性を高めたものである。

還元炉の大型化を図るためには、炉内での原料の挙動、

炉心での還元停滞、粉の発生増加、還元鉄同士の融着現象など多くの課題を解決しなければならなかった。当社と Midrex 社は、従来 5m 以下であった還元炉径をコンピュータ三次元有限要素法解析による検討、二次元モデル実験による検証、還元/粉化試験による原料性状の改善などをおこない、実プラントの設計に反映し、まず 5.5 m での実績を作り、さらに 6.5m での実績を積むことによりそれまで年産 400 000t/y レベルにとどまっていたものを年産 800 000t/y レベル、さらには年産 1 500 000t/y レベルにまで高めた。なお、他のプロセスでは現状年産 1 000 000t/y 以下にとどまっている。

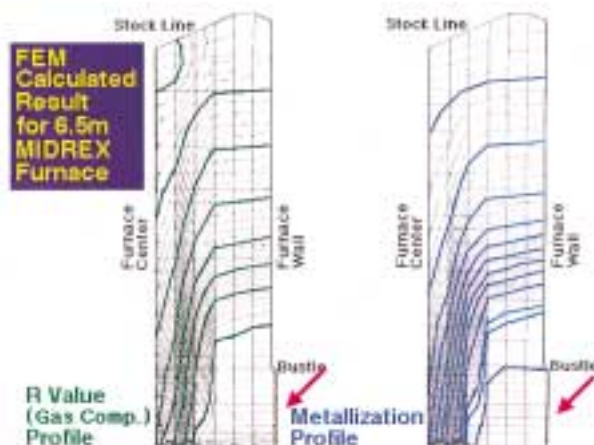
第 5 図にコンピュータによる炉内解析結果の一例を示す。炉壁から吹き込まれた還元ガスが炉内に入り炉心に達するが、その際の還元ガスの還元ポテンシャルの低下状況および炉内原料の還元率分布を 6.5m 径の還元炉に関し計算したものである。第 6 図に MIDREX プロセス還元炉径の比較を示す。

4. 今後の方向

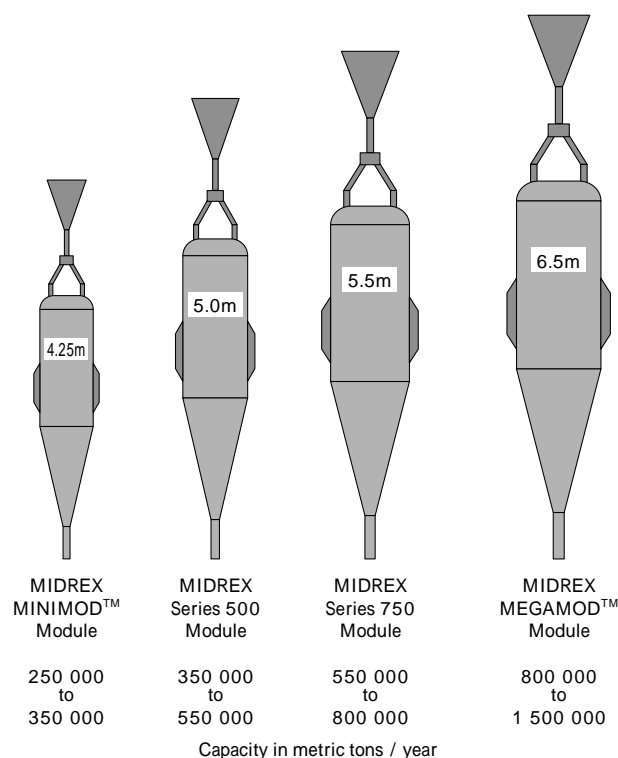
以上述べた如くホットブリケット技術の開発、還元炉の大型化、およびその他の技術開発/改良により、順調に発展してきた MIDREX 直接還元プロセスであるが、今後のさらなる発展のために以下の技術開発・技術改良を進めている。

- 現在 1 500 000t/y 程度の生産量を 2 百数十万 t/y に引き上げ、コストメリットをさらに追求する。
- 天然ガス以外の燃料たとえばコークス炉ガス、石炭ガスなどの多様化に対応するプロセスを確立する。
- 還元炉から熱間で還元鉄を排出しそのまま電気炉へ装入する Hot Charge (熱間装入) システムの開発。これにより大幅な電力削減が図れ CO₂ 発生量の削減にも寄与する。
- 電気炉側での高生産性と電力削減を図るために現状 2 % 程度である還元鉄中カーボンを 4% 超えにまで高めた高カーボン含有還元鉄を製造する。
- 部分燃焼法 (OXY + パーナ) により既設プラントにおいても比較的容易に増産を可能にする。

むすび=還元鉄プロセスの中で 67% のシェアを占める MIDREX プロセスの概要とホットブリケット技術および還元炉大型化などの主要な技術改良に関し概説した。将来に向け、さらなる大型化、燃料源の多様化、電気炉への還元鉄熱間装入、還元鉄中カーボン含有量向上などの技術改良に取組み、より効率的なプロセスとし顧客の要求をより高いレベルで満たすべく技術改善の努力を継続していく。



第 5 図 還元炉内コンピュータ解析の一例
Fig. 5 Example of furnace computer simulation



第 6 図 還元炉の比較
Fig. 6 Reduction furnace size options

参考文献

- 1) 河内昭太ほか：R & D 神戸製鋼技報, Vol.28, No.3 (1978) p.4.
- 2) 光島昭三：R & D 神戸製鋼技報, Vol.29, No.2 (1979) p.2.
- 3) 菊地晶一ほか：R & D 神戸製鋼技報, Vol.40, No.3 (1990) p.113.