

(解説)

MIDREX[®]プロセス

MIDREX[®] Processes



厚 雅章*
Masaaki ATSUSHI



上村 宏*
Hiroshi UEMURA



坂口尚志*
Takashi SAKAGUCHI

Since Kobe Steel constructed a direct reduced iron plant in 1978 in Qatar with the MIDREX process, numerous technical improvements have been made together with MIDREX. Since 2007, the largest MIDREX module, which has an annual production capacity of 1.8 million tons, has started operation. The MIDREX module, together with melt shop, is now capable of having the same level production capacity of a blast furnace. This paper presents an overview of the history of the technical developments in these processes, as well as the latest development in this field.

ま え が き = 天然ガスを使用して鉄鉱石を還元する MIDREX 直接還元製鉄プロセス (以下、MIDREX プロセスという) は、当社の100%米国子会社である MIDREX Technologies, Inc. 社 (以下、MIDREX 社という) の前身である Midland-Ross 社によりその原型が開発された。1967年にオハイオ州トレドにパイロットプラントが建設された後、1969年にオレゴン州ポートランドに年産15万トンの商業機第1号が建設された。

当社がカタールに年産40万トンのプラントを建設した1978年当時はまだ十分に成熟したプロセスとはいええず、高炉で培った技術を活用して設計段階から多くの改良を行ったほか、稼動状態を安定させるために操業段階においてもさまざまな改良を加えた。さらに、MIDREX 社も各国で建設したプラントにおいてさまざまな改良を行い、これらを総合して1980年初頭にほぼ完成されたプロセスとなった¹⁾。

当社が1984年にMIDREX社を買収した当時の生産量は最大で年産60万トンであったが、その後のMIDREX社との共同改良によって飛躍的に増大し、2007年には年産180万トンと小形高炉なみの生産量を有するプラント規模となった。

1. 還元鉄の特徴

MIDREX プロセスで生産される製品は還元鉄 (Direct Reduced Iron, 以下 DRI という) と呼ばれ、天然ガスからの改質ガスで鉄鉱石を還元することによって得られる。この DRI は、スクラップとは異なる清浄な鉄源として主に電気炉の原料として利用される。

DRI には還元反応によって酸素が取去られた後の空隙が多数残っており、水などに触れると鉄と空気中の酸素が結び付くことによって再酸化が起り、発熱および発火という問題が生じる性質がある。このため、海上輸送

や長期間にわたる屋外保存は不可能であった。この問題を解決するため当社は、見掛け比重 3.4~3.6t/m³ 程度の DRI を 700°C 前後の熱間で見掛け比重 5.0~5.5t/m³ に圧縮成型するホットブリケット技術を開発した。

DRI の再酸化の問題から、還元鉄プラントは製鋼プラントに隣接させる必要があり、立地上の制約があった。しかし、ホットブリケット技術によりこの制約がなくなり、天然ガスや鉄鉱石、電力が安価な国に還元鉄プラントを建設し、その製品をホットブリケットアイアン (Hot Briquette Iron, 以下 HBI という) にして海上輸送し、他国の製鋼/圧延プラントに輸出することが可能となった。これにより還元鉄プラントの立地範囲は世界的に拡大した¹⁾。

表1にDRIとHBIの化学性状と物理性状の比較、また図1にDRIおよびHBIの外観を示す。

世界のDRI生産は1970年の79万トン/年から2008年の6,845万トン/年へと飛躍的に増加し、MIDREXプロセスによるDRI生産は全世界の約60%を占めている。世界のDRI生産地の状況を図2に示す。

表1 DRIとHBIの仕様
Table 1 Specifications of DRI and HBI

	DRI	HBI
Fe total (%)	90~94	←
Fe metallic (%)	83~89	←
Metallization (%)	92~95	←
Carbon (%)	1.0~3.5	←
P* (%)	0.005~0.09	←
S* (%)	0.001~0.03	←
Gang* (%)	2.8~6.0	←
Mn, Cu, Ni, Mo, Sn Pb and Zn (%)	trace	←
Bulk density (t/m ³)	1.6~1.9	←
Apparent density (t/m ³)	3.4~3.6	5.0~5.5
Discharge temperature (°C)	40	80

* depends on components of iron ore

*資源・エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 プロジェクト部

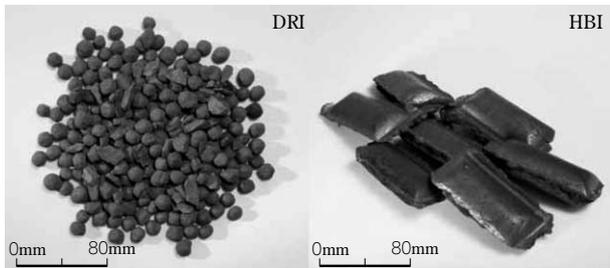


図1 DRI および HBI の概観
Fig. 1 Appearance of DRI and HBI



58 modules operating & 4 modules under construction in 19 countries.
Total capacity of MIDREX Process=43.4 million ton/y

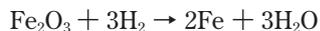
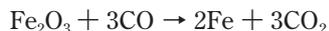
図2 世界の MIDREX プラント
Fig. 2 World's MIDREX plants

2. MIDREX プロセス

2.1 プロセスフロー

図3に MIDREX プロセスのフローシートを示す。原料として、塊鉱石、あるいは直接還元製鉄用に調整されたペレットがシャフト炉の炉頂から挿入され、炉内で還元された後に最下部から排出される。還元ガスはシャフト炉のほぼ中段から吹込まれ、吹込口より上方で原料を還元した後に炉頂から排気される。下部では冷却ガスが循環しており、これにより DRI が冷却される。原料挿入部も DRI 排出部もシールガスによりダイナミックシールが施されており、原料の挿入および DRI の排出を連続的に行うことが可能な構造となっている。

シャフト炉内での反応は、以下のように一般に知られている鉄の還元反応である。



シャフト炉からの炉頂排ガス（トップガス）は、湿式集塵機（トップガスクラバ）により除塵、冷却された後、循環再利用される。CO₂ や H₂O を含むトップガスは、コンプレッサにより昇圧された後、天然ガスと混合、予熱されて改質炉（リフォーマ）に送られる。リフォーマにはニッケル触媒が充填されたリフォーマチューブが数百本設置されており、これらのチューブ内を通過する過程でトップガスと天然ガスの混合ガスが改質され、還元ガスである一酸化炭素と水素が得られる。リフォーマ内での化学反応は以下のとおりである。

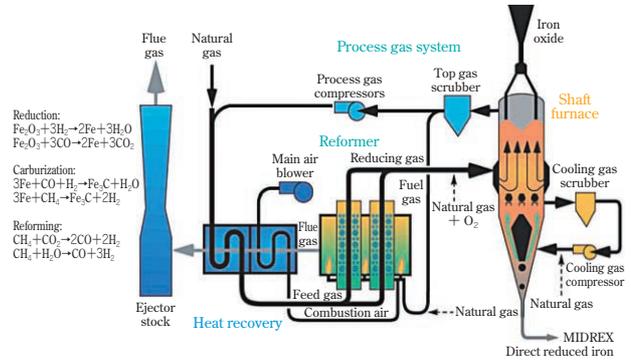
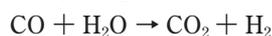
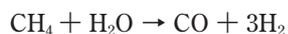


図3 MIDREX プロセスフローシート
Fig. 3 MIDREX process flow sheet

3. MIDREX プロセス開発の歴史

3.1 MEGAMOD®シャフト炉の稼働、原料コーティング（1990年～）

プラントの生産量を増大させるという市場ニーズの高まりにこたえるべく、シャフト炉の大形化が急務となっていた。これを受けて当社と MIDREX 社は、

- ・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

などの開発に着手し、まず5.5m径、ついで6.5m径（MEGAMOD シャフト炉）と段階的にシャフト炉径を拡大させた。これにより、それまで年産40万トン以下にとどまっていた生産能力は、年産80万トン、さらには150万トンにまで増加した¹⁾。

また、還元ガス温度の高温化を目的として、DRIと比較して融点の高い消石灰を原料にコーティングする技術を考案した。これにより還元ガスを900℃程度にまで高温化することが可能となり、シャフト炉の生産性は10%以上向上した。

3.2 還元ガスへの酸素吹込み（2000年～）

高温の還元ガス中に高純度の酸素を吹込むことにより、還元ガスを約1,000℃にまで高温化することが可能となった（図4）。酸素との燃焼で還元ガス中の水素や一酸化炭素が一部失われるものの、還元ガスの高温化によってシャフト炉の生産性は10~20%向上した^{2), 3)}。

3.3 酸素吹込み技術の改良（2005年～）

酸素吹込み技術をさらに改良し、部分燃焼技術を取り入

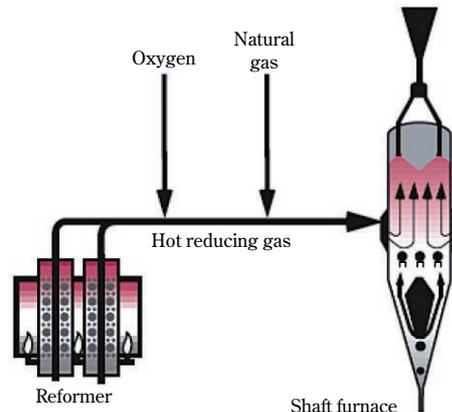


図4 酸素吹込みフロー
Fig. 4 Oxygen injection flow

れて OXY+® と命名した。図 5 に示すように OXY+ は、リフォーマで生成される還元ガスに加えて、燃焼器で酸素と天然ガスを部分燃焼させることによってさらに水素と一酸化炭素を発生させるものである^{2), 3)}。

図 6 にシャフト炉の生産性向上に関するこれまでの成果を示す。

3.4 SUPER MEGAMOD® シャフト炉の開発およびエンジニアリングの強化 (2007 年～)

6.5m 径シャフト炉での操業実績を踏まえ、2007 年にはサウジアラビアの HADEED Saudi Iron & Steel Company に 7.15m 径のシャフト炉が納入され、年産 180 万トンにまでスケールアップが図られた (図 7)。

現在、シャフト炉をさらに大形化させた年産 200 万トンクラスの SUPER MEGAMOD の開発が進められている。シャフト炉の大形化に伴って設備全体も大きくなり、設計管理、建設管理への対応も重要な課題となっている。このため、2004 年から 3 次元 CAD を全面的に採用した設計手法を取入れた。3 次元 CAD から、構造計算用データが取出せるほか、配管アイソメ図や材料集計表も直接出力することができる。また、建設サイトにおい

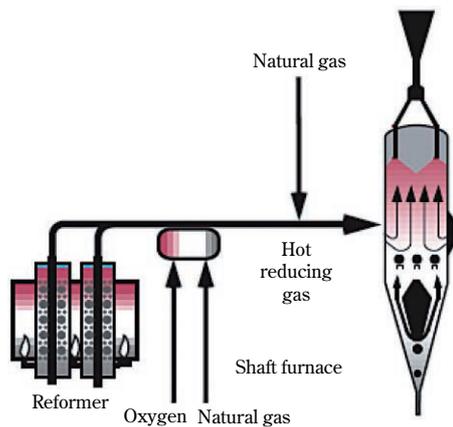
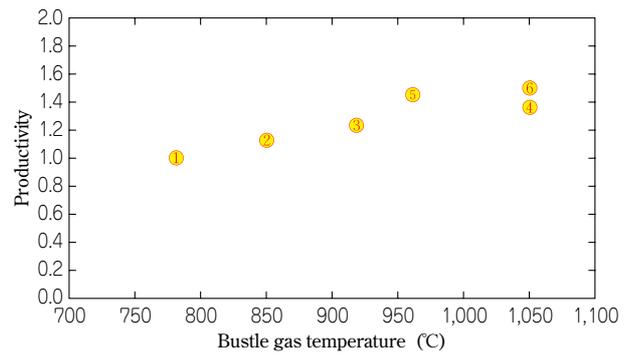


図 5 OXY+フロー
Fig. 5 OXY+ flow

ても 3 次元 CAD を利用した建設工事計画の立案が行われている。図 8 は、カタール製鉄所向け DR Plant の全容を 3 次元 CAD で描画したものである。



①オリジナル -1970年代 ④酸素吹込み -1990年代
②固体ガス接触の改良 -1980年代 ⑤OXY+ -2000年代
③原料コーティング -1990年代 ⑥酸素吹込み+OXY+ -2010年以降

図 6 MIDREX シャフト炉生産性の変遷
Fig. 6 Changes in productivity of MIDREX shaft furnace

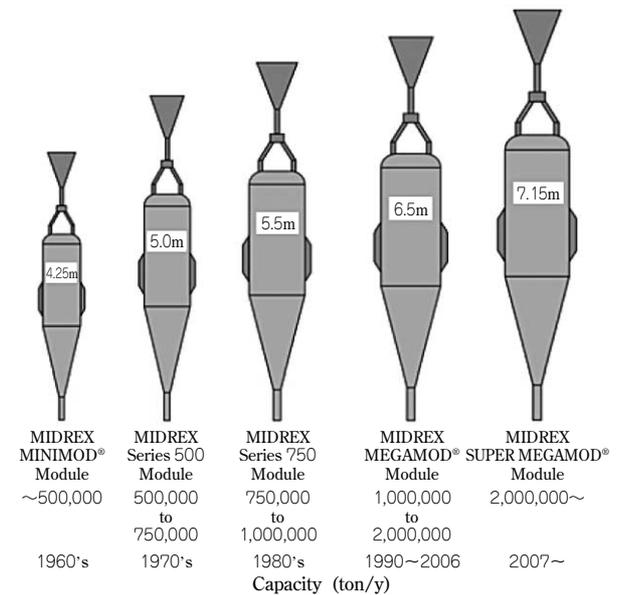


図 7 シャフト炉径および年間生産量の変遷
Fig. 7 Changes in shaft furnace diameter and annual production



図 8 QASCO Module-II プラントの 3 次元 CAD 図
Fig. 8 CAD drawing of QASCO Module-II plant

3.5 プラントの納入実績

MIDREXプラントの納入実績は表2に示すとおりである。以下にその主要プラントの概要を述べる。

3.5.1 LION プラント

マレーシアのLION GROUP向けに建設された定格年産150万トンのプラントで、2007年に操業を開始した(図9)⁴⁾。Hot DRI (以下、HDRIという) およびHBIの2種類の製品が製造でき、HDRIはHot transport vesselにより隣接する電気炉工場に高温のまま供給される。また、HBIは輸出されるほか、隣接する電気炉工場で使用されることもある。

3.5.2 HADEED Module-E プラント

サウジアラビアのHADEED Saudi Iron & Steel Company向けに建設された世界最大のMIDREXプラントで、2007

表2 MIDREX プラントの最近の納入実績
Table 2 Recent delivery record of MIDREX plants

	Plant	Location	Capacity (million tont/y)	Start up
*	EZDK III	Egypt	0.8	2000
	Essar Steel Module-IV	India	1.0	2004
	Nu-Iron	Trinidad	1.6	2006
	Essar Steel Module-V	India	1.5	2007
	HADEED Module-E	Saudi Arabia	1.76	2007
*	QASCO Module-II	Qatar	1.5	2007
	LGOK Module-II	Russia	1.4	2007
	Al-Tuwairqi Damman	Saudi Arabia	1.0	2007
	LION	Malaysia	1.54	2008
	Essar Steel Module-VI	India	1.8	2009
*	SHADEED	Oman	1.5	2010
	ESISCO	Egypt	1.76	2010
	Al-Tuwairqi Pakistan	Pakistan	1.28	2010

* : Kobe Steel constructed



図9 LION プラント
Fig. 9 LION plant



図10 HADEED Module-E プラント
Fig.10 HADEED Module-E plant

年に操業を開始した(図10)⁴⁾。7.15m 径のシャフト炉が初めて採用され、定格年産は180万トンと小形高炉なみの生産量を有する。製品はHDRIおよびDRIのいずれとしても排出可能で、HDRIはHot transport conveyorにより高温のまま直接、DRIはいったんサイロに貯蔵された後必要に応じて、隣接する電気炉工場に供給される。

3.5.3 QASCO Module-II

当社がカタールのQatar Steel Company向けに建設した定格年産150万トンのプラントで、2007年に操業を開始した(図11)。Qatar Steel Company向けには1975年に定格年産40万トンのModule-Iを建設している。当時まだ十分に成熟していなかったMIDREXプロセスに対し、当社が設計段階および実操業段階においてさまざまな改良を加え、安定操業に寄与したことが高く評価されたことがModule-IIの受注につながった。

Module-IIではDRIおよびHBIの2製品が製造でき、DRIは隣接する製鋼工場に供給され、HBIは輸出される。製鋼場で溶解されたDRIは圧延設備に供給され、ピレットや異形鉄筋、あるいは線材コイルとして輸出される。

3.5.4 SHADEED プラント

当社がオマーンのSHADEED Iron & Steel向けに建設した年産150万トンのプラントであり、2008年に完成した(図12)。DRIおよびHBIの2製品が製造でき、現在稼働準備を行っている。隣接する電気炉工場にHDRIを重力によって供給するHOTLINK[®]を初めて採用した。



図11 QASCO Module-II プラント
Fig.11 QASCO Module-II plant



図12 SHADEED プラント
Fig.12 SHADEED plant

4. 最近の技術動向

4.1 DRIの熱間排出

従来、冷却後にシャフト炉から排出していたDRIを熱間排出することにより（HDRI）、下流の製鋼プロセスも含めたトータルとしてのエネルギー原単位と生産性を改善することを目的とした技術改良が実施されつつある。また、生産計画に柔軟性をもたせることによるプラント

の生産性改善をねらい、2種類の排出方法を組合せる提案も実現されている^{3), 5)}。

図13にMIDREXプロセスを用いた一貫製鉄所の全体フロー図を示す。図14に示した3種類の方法により、シャフト炉で生産されるHDRIを下流の製鋼設備へ移送することが可能である。

a) Hot transport vessel による製鋼設備への移送・供給（図14①）

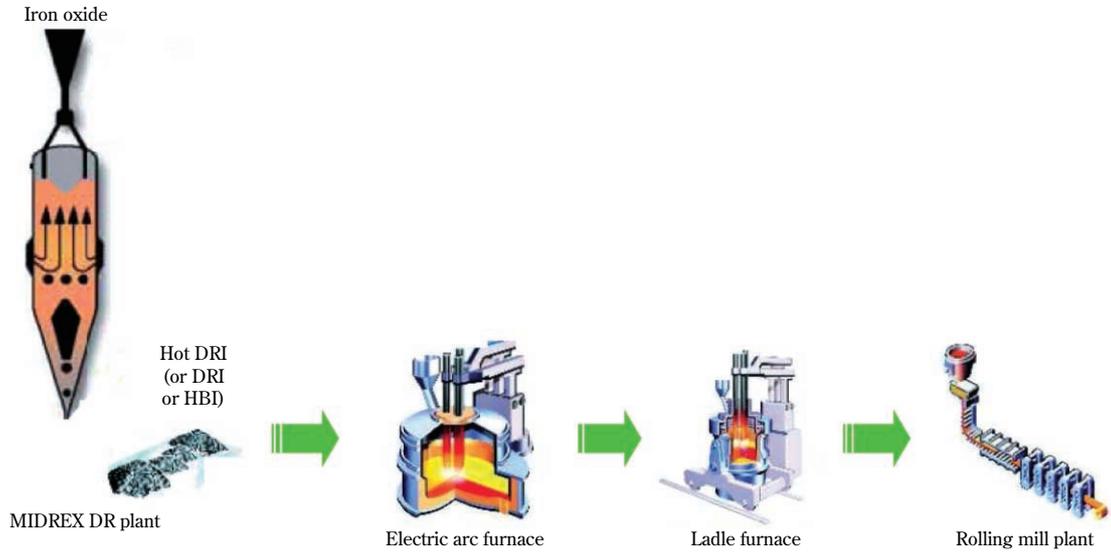


図13 MIDREX プラントを用いた一貫製鉄所の全体フロー
Fig.13 Overall flow sheet for integrated steel mill equipped with MIDREX plant

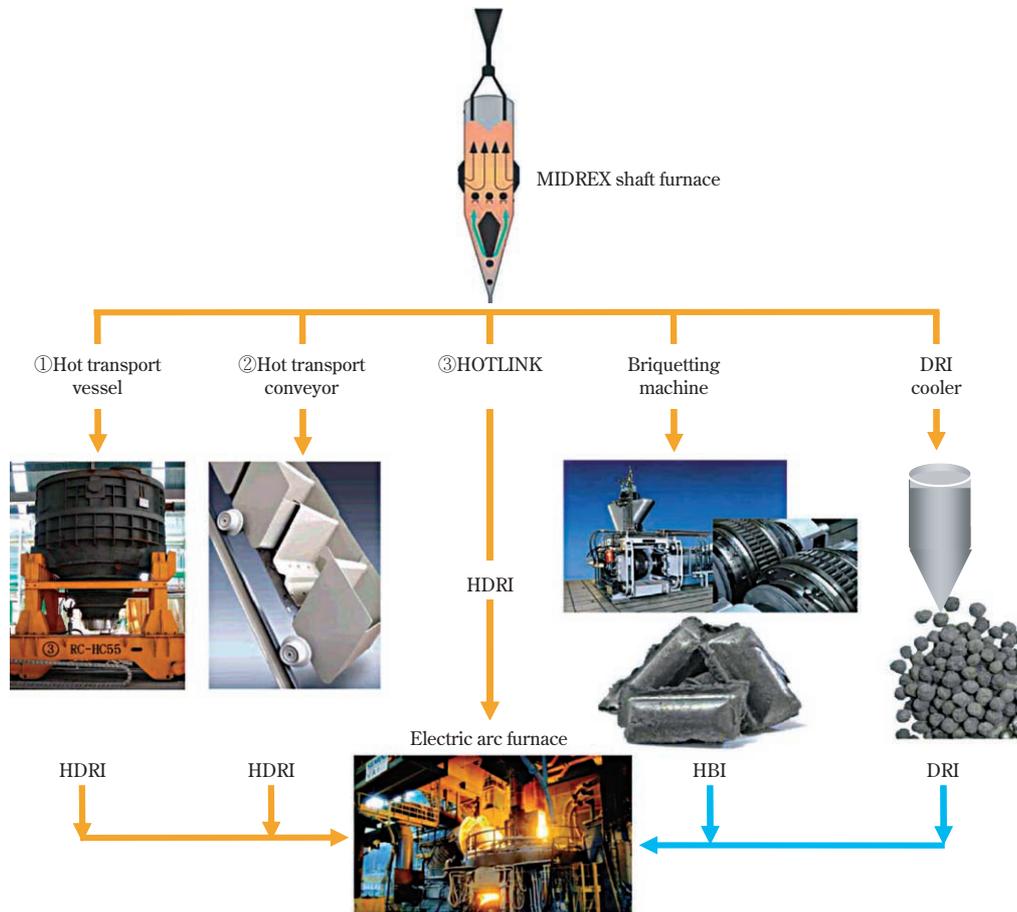


図14 製品の排出方法
Fig.14 Variation of discharging products

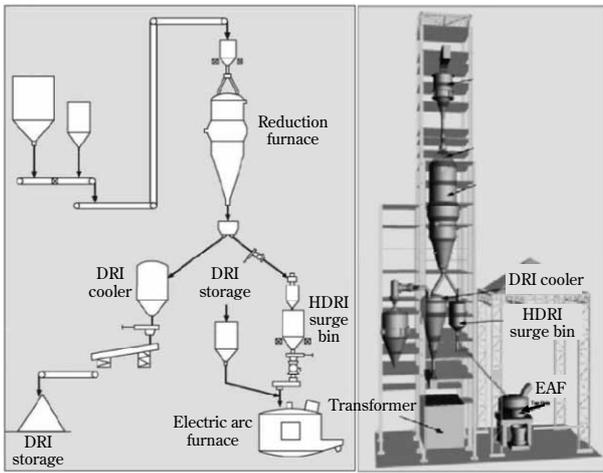


図15 HOTLINKのマテリアルフローおよび機器配置
Fig.15 Material flow of HOTLINK and equipment arrange

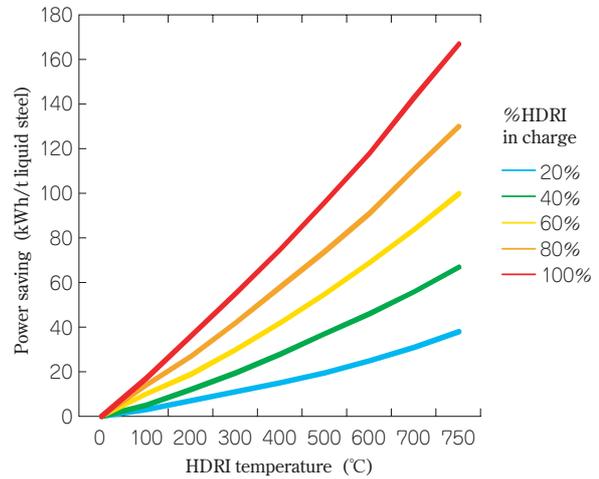


図16 HDRI 供給温度と電気炉における消費電力の節減
Fig.16 Correlation between HDRI temperature and power savings at EAF

表3 HDRI 排出を採用する MIDREX プラント
Table 3 MIDREX plants discharging HDRI

PLANT	LOCATION	START-UP	TYPE SYSTEM
Essar steel Module-I, II, III, IV	India	1999~2004	Hot transport vessel
HADEED Module-E	Saudi Arabia	2007	Hot transport conveyor
LION	Malaysia	2008	Hot transport vessel
ESISCO	Egypt	2010	HOTLINK
SHADEED	Oman	2010	HOTLINK

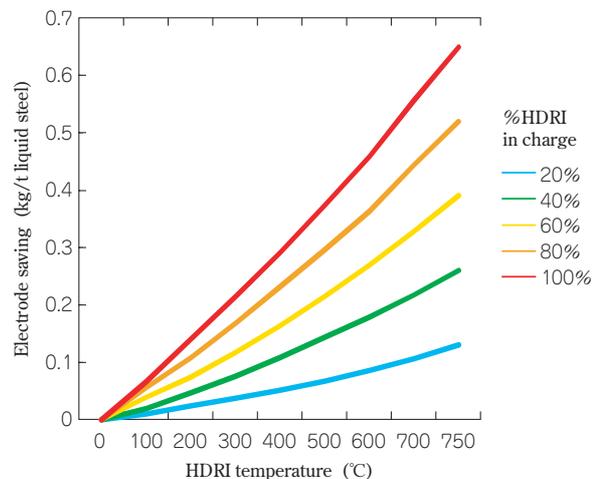


図17 HDRI 供給温度と電気炉における電極消費の節減
Fig.17 Correlation between HDRI temperature and electrode savings at EAF

- b) Hot transport conveyor による製鋼設備への移送・供給 (図14②)
- c) 重力による製鋼設備への供給 (HOTLINK) (図14③および図15)

表3に示したように、HDRI 排出は多くのプラントで採用されている。

4.2 HDRI によるエネルギー原単位および生産性の改善

高温の HDRI を製鋼設備に供給することにより、エネルギー原単位および生産性が大きく改善される。図16に示したように、HDRI の供給温度を上げることにより EAF (Electric Arc Furnace) における電力消費量が削減される。さらに、電力消費量の削減によって EAF の電極消費量も減少することから、運転費用を低減させることができる (図17)。

また、HDRI を挿入することによって EAF の運転時間を短縮させることができ、生産量を 10~15% 増加させる効果もある。

4.3 CO₂ 排出量の削減

これまで MIDREX プロセスには、下流の製鋼プロセスまで含めてエネルギー原単位の低減およびシャフト炉生産性の向上といった改良が施されてきた。これら消費エネルギーの低減は、単に操業コストの削減のみならず、CO₂ をはじめとする排出物の絶対量を少なくすることに

よって環境負荷の低減にも貢献している。

さらに、天然ガスベースであることから、石炭ベースのプロセスと比較して CO₂ の排出量が少ない。このため、石炭ベースのプロセスの製鉄所、例えば高炉に MIDREX プラントで製造した HBI を投入することにより、トータルとして CO₂ を低減することも可能となる。

4.4 石炭燃料との組合せ

MIDREX プロセスでは、天然ガスの改質により生成される還元ガスのほか、コークス炉ガスやペットコーク、製油所から出るボトムオイルなどをガス化炉でガス化し、還元ガスとして使用することも可能である。また、これにより天然ガス産出国に限られていた MIDREX プラントの立地上の制約がなくなる。例えば、コークス炉ガスを使用して製造した HBI を高炉に投入することによって還元負荷を低減し、熱源としての還元材の比率 (還元材比) を低下させる (CO₂ 発生量を低減させる) ことが可能である。

ガス化プラントを MIDREX プロセスに適用した場合のフローシートを図18に示す。

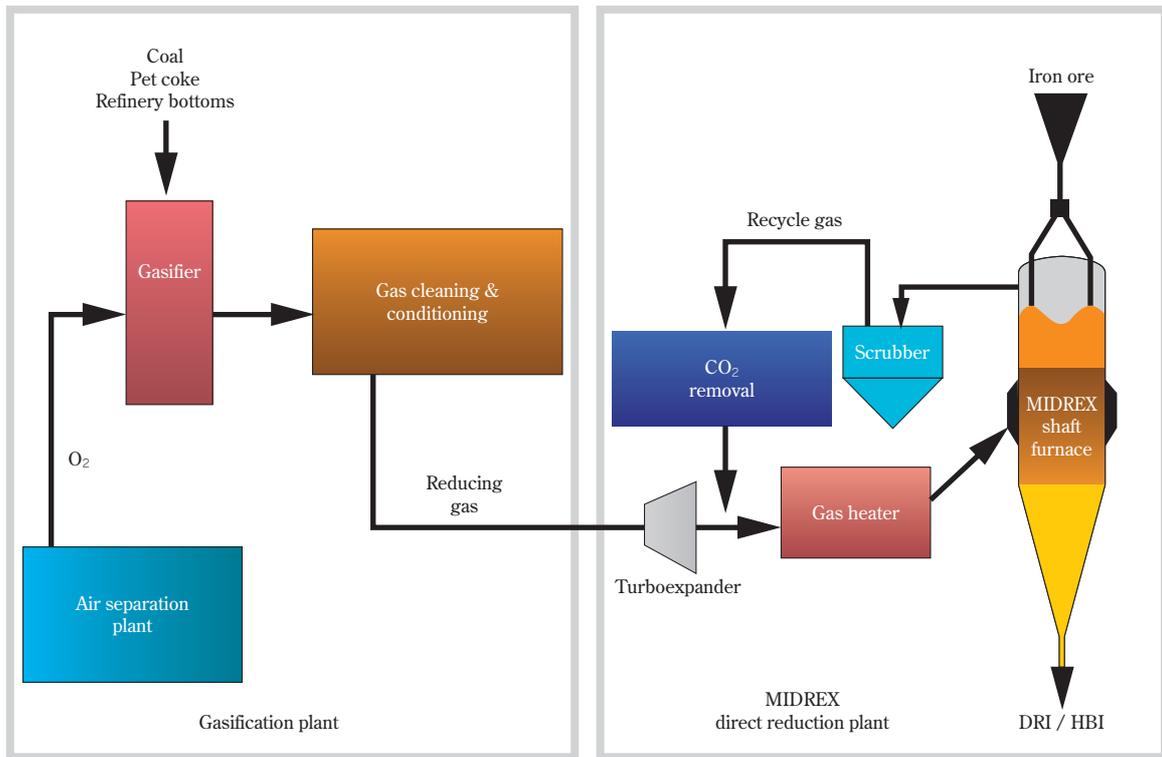


図18 石炭ガス化プラントと MIDREX プロセスとの組合せ
 Fig.18 Process flow of MIDREX process combined with coal gasification plant

むすび＝MIDREXプロセスの誕生から発展の経緯、および当社における新技術開発への取組みを概説した。

1969年に商業機第1号が誕生して以降、現在まで21か国に72基のMIDREXプラントが建設され、還元鉄プロセスの中で約60%のシェアを占めるに至っている。これは、MIDREXプロセスの信頼性が非常に高く、プロセスの高効率化に向けた努力が広く評価された結果であると考えられる。

今後も継続して環境負荷の低減、燃料源の多様化とさらなる効率化に取り組むことで世界の鉄鋼生産に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 稲田 裕：R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3(2000), pp.86-89.
- 2) F. N. Griscom et al. : Direct from MIDREX, 2ND Quarter (2000), pp.3-5.
- 3) 川村 明ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.56, No.2(2006), pp.32-36.
- 4) A. Mouer et al. : Direct from MIDREX, 2ND Quarter(2009), pp.3-9.
- 5) J. T. Kopfle et al. : Archives of Metallurgy and Materials, Vol.53, Issue 2(2008), p.332, 334.